RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE
Liberté
Égalité
Fraternité

ANDRA

2025

DOSSIER D'AUTORISATION DE CRÉATION DE L'INSTALLATION NUCLÉAIRE DE BASE (INB) CIGÉO

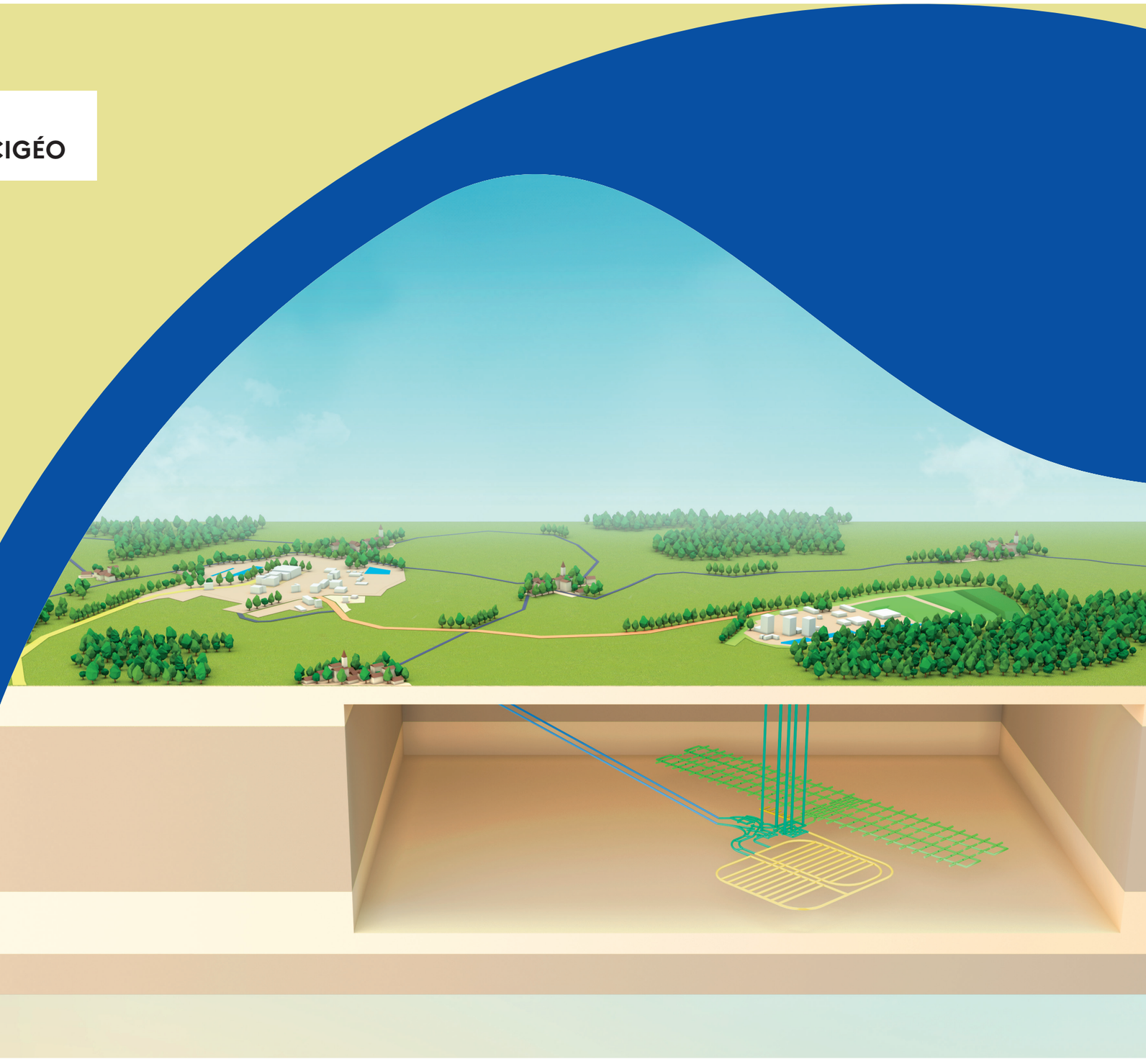
PIÈCE 6

Étude d'impact du projet global Cigéo

Volume 7

Méthodes de réalisation

Chapitres 1 à 6



MISE À JOUR DE L'ÉTUDE D'IMPACT DU DOSSIER D'AUTORISATION DE CRÉATION POUR MISE EN CONSULTATIONS RÉGLEMENTAIRES

À la suite de l'instruction technique par l'Autorité de sûreté nucléaire et de radioprotection, des mises à jour ont été apportées par l'Andra dans certaines pièces du dossier (déposé le 16 janvier 2023) avant sa mise en consultations réglementaires. La mise à jour de l'étude d'impact tient compte également des modifications apportées à l'analyse des incidences du projet global résultant des dossiers de la tranche de travaux DR0 concernant les premières opérations de caractérisation et de surveillance environnementale et leur instruction.

Pour la clarté de l'information, l'Andra assure la traçabilité de ces mises à jour via trois moyens :

- des barres vertes en marge du texte pour tracer les modifications ou ajouts apportés à l'étude d'impact du dossier d'enquête publique préalable à la déclaration d'utilité publique du centre de stockage Cigéo, à l'exception des corrections mineures de forme et de mise en cohérence qui ne sont pas matérialisées. Ces évolutions cumulent les modifications apportées à l'étude d'impact dans le cadre de l'EI-DAC (première actualisation déposée le 16 janvier 2023) et d'EI-DR0 portant sur les premières opérations de caractérisation et de surveillance environnementale (dites DR0, deuxième actualisation déposée le 6 mars 2024) ;
- des barres bleues en marge du texte pour tracer les modifications ou ajouts apportés à l'étude d'impact depuis la version EI-DR0 ;
- des tableaux de traçabilité des principales évolutions de l'étude d'impact.

Sommaire

1. Méthode générale de réalisation des études d'impact 7

1.1 Démarche itérative de l'étude d'impact 8

1.1.1 Des niveaux d'études adaptés à l'avancement de la conception et des concertations préalables de chaque opération du projet global Cigéo 8

1.1.2 Méthode générale de description de l'état initial 10

1.1.3 Méthode générale pour la définition des incidences et mesures 12

1.2 Définition des aires d'étude 15

1.2.1 Typologie des aires d'étude 15

1.2.2 Description des aires d'étude associées aux facteurs de l'environnement 18

1.3 Traçabilité 30

2. Atmosphère - Méthodes 31

2.1 Caractérisation du milieu atmosphérique 32

2.2 Conditions météorologiques locales 32

2.2.1 État initial 32

2.2.2 Incidences 34

2.3 Vulnérabilité au changement climatique 34

2.4 Énergie et gaz à effet de serre 35

2.4.1 État initial 35

2.4.2 Incidences 35

2.5 Qualité de l'air 41

2.5.1 Émissions conventionnelles 41

2.5.2 Émissions radioactives 47

3. Sols - Méthodes 57

3.1 Géomorphologie 58

3.2 Occupation et caractéristiques des sols 58

3.2.1 Occupation des sols 58

3.2.2 Carte pédologique 59

3.2.3 Caractéristiques physico-chimiques et biologiques des sols 59

3.2.4 Caractéristiques radiologiques des sols 59

3.3 Sites et sols pollués ou potentiellement pollués 60

3.4 Analyse des incidences sur le sol 60

4. Sous-sol - Méthodes 61

4.1 État initial 62

4.1.1 Milieu géologique du secteur de Meuse/Haute-Marne : tectonique et stratigraphie 62

4.1.2 Caractéristiques radiologiques du sous-sol 62

4.1.3 Caractéristiques chimiques des argilites 63

4.1.4 Caractéristiques radiologiques des eaux porales 63

4.1.5 Ressources naturelles potentielles du sous-sol 63

4.1.6 Risques naturels liés à la géologie 63

4.2 Incidences 63

4.2.1 Pollution accidentelle physico-chimique 63

4.2.2 Confinement des radionucléides et substances toxiques chimiques 64

4.2.3 Vulnérabilité au risque sismique d'origine naturelle et anthropique 64

4.2.4 Risque de retrait-gonflement des argiles, de cavités et tassements 64

4.2.5 Ressources du sous-sol 64

5. Eaux - Méthodes 65

5.1 Définition de l'état initial 66

5.1.1 Réglementation et exigences 66

5.1.2 Eaux souterraines 68

5.1.3 Eaux superficielles 75

5.2 Évaluation des incidences 87

5.2.1 Incidences quantitatives sur les écoulements d'eau souterraines et de surface 87

5.2.2 Incidences qualitatives 127

5.2.3 Incidences sur les usages 136

6. Biodiversité et milieu naturel - Méthodes 139

6.1 État initial du milieu naturel 140

6.1.1 Recensement des zonages environnementaux 140

6.1.2 Analyse bibliographique et réalisation d'inventaires faune-flore 140

6.1.3 Inventaires des habitats et de la flore 151

6.1.4 Inventaires de la faune 151

6.1.5 Délimitation des zones humides 178

6.1.6 Continuités écologiques 185

6.1.7 État radiologique initial 185

6.1.8 Appréciation des enjeux écologiques 186

6.1.9 Appréciation des niveaux d'intérêt des habitats d'espèces (NIH) 191

6.1.10 Appréciation des niveaux d'intérêt dégradés des habitats d'espèces (NID) 191

6.1.11 Synthèse de la démarche d'analyse de l'état initial du milieu naturel 191

6.2 Incidences sur le milieu naturel 195

6.2.1 Effets du projet sur l'environnement 195

6.2.2 Évaluation des niveaux d'incidences 197

6.2.3 Incidences sur les zonages environnementaux 197

6.2.4 Incidences sur les zones humides 197

6.2.5 Incidences sur les continuités écologiques 198

6.2.6 Incidences des émissions radiologiques et chimiques sur la faune et la flore sauvages 198

6.3 Compensation écologique 200

6.3.1 Les grands principes de la compensation écologique 200

6.3.2 Principes généraux retenus par l'Andra 200

6.3.3 Méthode de dimensionnement de la dette et du gain écologiques des fonctionnalités des habitats 203

6.4 Évaluation des incidences sur les sites Natura 2000 211

6.4.1 Méthode de traitement et d'analyse des données 211

6.4.2 Définition des zones d'études 212

6.4.3 Évaluation préliminaire : sites Natura 2000 susceptibles d'être affectés 213
6.4.4 Évaluation détaillée des sites Natura 2000 retenus 213
6.4.5 Cumul des incidences du projet global Cigéo avec d'autres projets existants ou approuvés 214

Tableau de traçabilité des principales évolutions de l'étude d'impact 215

Tables des illustrations 223

Références bibliographiques 227

Préambule

L'étude d'impact du projet global Cigéo est constituée de sept volumes pour l'étude elle-même et d'un résumé non technique de ces sept volumes.

	ÉTUDE D'IMPACT	
RNT	Résumé non technique de l'étude d'impact	
VOLUME I	Introduction et contexte réglementaire	
VOLUME II	Justification et description du projet global Cigéo	
VOLUME III	État actuel de l'environnement et facteurs susceptibles d'être affectés par le projet	
	Partie 1 : chapitres 1 à 4	1 - Méthodologie d'analyse de l'état initial/2 - Atmosphère/3 - Sol/4 - Sous-sol
	Partie 2 : chapitre 5	5 - Eaux
	Partie 3 : chapitre 6	6 - Biodiversité et milieu naturel (partie 1)
	Partie 4 : chapitre 6	6 - Biodiversité et milieu naturel (partie 2)
	Partie 5 : chapitres 7 à 13	7 - Population, emploi, activités économiques et habitat/8 - Activités agricoles et sylvicoles/ 9 - Réseaux/10 - Déchets radioactifs et conventionnels/11 - Risques/12 - Infrastructures de transport/13 - Cadre de vie
	Partie 6 : chapitres 14 à 17	14 - Paysage, patrimoine culturel, tourisme et activités de loisirs/15 - Planification territoriale et aménagement du territoire/16 - Interactions entre les différents milieux de l'environnement/ 17 - Synthèse des facteurs susceptibles d'être affectés par le projet global Cigéo et hiérarchisation des enjeux
	Partie 7	Annexes au volume III (en 3 parties)
VOLUME IV	**Évaluation des incidences et mesures d'évitement, de réduction et de compensation de ces incidences**	
	Partie 1 : chapitres 1 à 4	1 - Méthodologie d'analyse des incidences/2 - Atmosphère/3 - Sol/4 - Sous-sol
	Partie 2 : chapitre 5	5 - Eaux
	Partie 3 : chapitre 6	6 - Biodiversité et milieu naturel
	Partie 4 : chapitres 7 à 13	7 - Emploi, activités économiques, population et habitat/8 - Activités agricoles et sylvicoles/ 9 - Réseaux/10 - Déchets radioactifs et conventionnels/11 - Risques/12 - Infrastructures de transport/13 - Cadre de vie
	Partie 5 : chapitres 14 à 16	14 - Paysage, patrimoine culturel, tourisme et activités de loisirs/15 - Planification territoriale et aménagement du territoire (y compris urbanisme) - Compatibilité avec les documents de planification territoriale/16 - Interactions et effets cumulés
	Partie 6 : chapitres 17 à 22	17 - Meilleures techniques disponibles/18 - Incidences des opérations de démantèlement et de fermeture et incidences après fermeture définitive/19 - Nature et modalités de suivi des mesures environnementales et de surveillance/20 - Estimation des dépenses liées aux mesures prises pour l'environnement/21 - Évolution de l'environnement en cas de mise en œuvre du projet et en son absence/22 - Synthèse des incidences du projet global Cigéo sur l'environnement
	Partie 7	Annexes au volume IV

[1] https://www.andra.fr/cigeo/les-documents-de-reference (2).

	ÉTUDE D'IMPACT	
VOLUME V	Évaluation des incidences sur les sites Natura 2000	
VOLUME VI	Évaluation des incidences sur la santé humaine	
VOLUME VII	**Partie 1**	**Présentation des méthodes de réalisation de l'étude d'impact (chapitres 1 à 6)**
	Partie 2	Présentation des méthodes de réalisation de l'étude d'impact (chapitres 7 à 18)

Le présent volume est le **volume VII** (partie 1) ; il présente les méthodes qui ont été utilisées pour :

- établir l'état initial de l'environnement d'implantation du projet global Cigéo ;
- définir les incidences générées par le projet global Cigéo sur l'environnement et la santé et les mesures de compensation.

Les méthodes d'évaluation des incidences sur la santé humaine sont présentées dans le volume VI de la présente étude d'impact.

Dans ce volume, les méthodes sont présentées par facteur, en regroupant dans un même chapitre, les méthodes ayant été retenues pour établir l'état initial de l'environnement et les incidences du projet.

Les éléments techniques relatifs au projet sont présentés sous réserve de l'obtention des autorisations de réaliser le projet global Cigéo.

ÉTUDE D'IMPACT ET PROJET GLOBAL CIGÉO

La version initiale de l'étude d'impact du projet global Cigéo (EI-DUP) a été jointe au dossier d'enquête publique préalable à la déclaration d'utilité publique du centre de stockage Cigéo, déclaration délivrée par le décret n° 2022-993 du 7 juillet 2022 (1) :

- une première actualisation (EI-DAC1) a été réalisée pour le dossier de demande d'autorisation de création (DAC) de l'installation nucléaire de base (INB) Cigéo, déposé le 16 janvier 2023 et dont la recevabilité a été confirmée le 22 juin 2023 par l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN), engageant ainsi le démarrage de l'instruction du dossier. Cette instruction est toujours en cours et cette version de l'étude d'impact n'a pas encore été soumise à enquête publique ;
- une deuxième actualisation (EI-DR0) a été jointe au dossier de demande d'autorisation environnementale et aux dossiers de demande d'autorisation d'urbanisme (permis de construire, déclarations préalables), pour des demandes concernant les premières opérations de caractérisation et de surveillance environnementale - dénommées DR0. Ces demandes ont été déposées le 6 mars 2024 et les autorisations ont été délivrées les 11, 21 et 22 juillet 2025. Cette deuxième actualisation de l'étude d'impact est disponible sur le site de l'Andra[1].

L'étude d'impact (EI-DAC2) jointe au présent dossier de demande d'autorisation de création de l'installation nucléaire de base (INB) Cigéo, prend donc en compte, outre les éléments figurant déjà dans l'actualisation réalisée en vue du dépôt du dossier de DAC :

- l'actualisation réalisée dans le cadre des demandes d'autorisation concernant les premières opérations de caractérisation et de surveillance environnementale - dénommées DR0 et intégrant notamment le meilleur état disponible de description des travaux objet de ces demandes. Leurs incidences sont intégrées au projet global Cigéo ;
- les évolutions de connaissances sur certaines composantes du projet ou de l'environnement, les évolutions réglementaires, l'évolution de l'inventaire de réserve en cohérence avec les orientations de la PPE 2025-2035 ainsi que des éléments apportées en cours d'instruction technique (des précisions et des engagements avec échéance avant la fin d'instruction technique).

Les évolutions entre ces versions sont rendues visibles pour le lecteur et les services instructeurs afin qu'ils puissent avoir connaissance des modifications par rapport aux versions de l'étude d'impact instruites et portées à la connaissance du public. Dans le texte, une bordure verte met en exergue toutes les évolutions depuis l'étude d'impact initiale (EI-DUP) liées aux deux actualisations évoquées précédemment et une bordure bleue met en exergue les mises à jour postérieures au dépôt des dossiers de la tranche de travaux DR0. Le détail de ces évolutions est présenté au chapitre 3 du volume I de la présente étude d'impact.

L'étude d'impact identifie et apprécie les incidences sur l'environnement du projet global Cigéo, qui comprend le centre de stockage Cigéo et l'ensemble des opérations (activités, installations, ouvrages, travaux et aménagements) nécessaires à sa réalisation et à son exploitation, dont l'installation nucléaire de base (INB). Ces opérations sont menées par l'Andra et par d'autres maîtres d'ouvrage.

En raison de la nature et de la dimension du centre de stockage Cigéo, ses incidences sur l'environnement constituent la part majeure des incidences du projet global Cigéo, même si les opérations des autres maîtres d'ouvrage sont également susceptibles d'avoir des incidences sur l'environnement.

À ce stade, les opérations des autres maîtres d'ouvrage liées au fonctionnement du centre de stockage Cigéo ne sont pas aux mêmes stades d'avancement de leur conception et de leurs processus de concertation et de validation. L'analyse de leurs incidences est donc proportionnée à leur stade d'avancement respectif. .

La présente étude d'impact sera réactualisée dans l'hypothèse où tout ou partie des incidences du projet sur l'environnement n'auraient pu être complètement identifiées ou appréciées avant l'octroi d'une autre autorisation requise dans le cadre du projet global Cigéo, conformément à l'article L. 122-1-1 du code de l'environnement.

Ce processus de réactualisation prévu par la loi permet de garantir la qualité de l'évaluation des incidences environnementales des projets complexes tels que le projet global Cigéo, en lien avec les précisions apportées à sa conception et sa réalisation.

1

Méthode générale de réalisation des études d'impact

1.1 Démarche itérative de l'étude d'impact 8
1.2 Définition des aires d'étude 15
1.3 Traçabilité 30

1.1 Démarche itérative de l'étude d'impact

De très nombreuses études et données sources ont été utilisées pour l'élaboration de la présente étude d'impact. Les experts ayant contribué directement ou indirectement à la réalisation de l'étude d'impact sont présentés au chapitre 4 du volume I de la présente étude d'impact.

L'évaluation des incidences du volume IV de la présente étude d'impact est réalisée à partir de l'état initial et des caractéristiques du projet global Cigéo, présentés respectivement dans les volumes III et II de la présente étude d'impact. Les méthodes d'évaluation des incidences sont présentées dans le présent volume VII de l'étude d'impact du projet global Cigéo.

L'objectif de cette démarche (cf. Figure 1-1) est d'appréhender les incidences (appelées aussi impacts ou effets) positives ou négatives du projet global Cigéo sur l'environnement et la santé humaine, en tenant compte de ses caractéristiques et de celles des milieux d'implantation afin d'éviter et de réduire l'impact environnemental du projet global Cigéo, voire de le compenser si nécessaire.

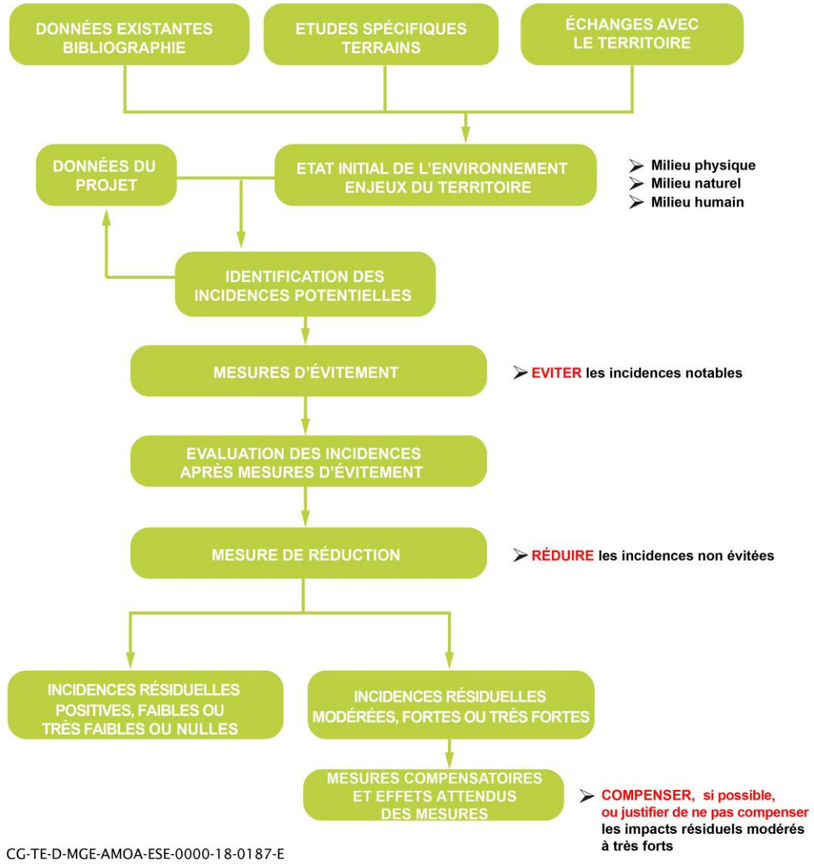


Figure 1-1 Présentation générale de la démarche d'évaluation des incidences (impacts)

1.1.1 Des niveaux d'études adaptés à l'avancement de la conception et des concertations préalables de chaque opération du projet global Cigéo

Les différentes opérations composant le projet global Cigéo n'ont pas toutes le même avancement en termes d'études de conception et de concertation, ce qui a des conséquences sur le niveau d'analyse dans la présente version de l'étude d'impact (cf. Tableau 1-1).

La conception des installations du centre de stockage Cigéo est celle qui est la plus avancée. La zone d'intervention potentielle intègre l'ensemble des potentielles zones de travaux et de fonctionnement. Les données bibliographiques décrivant le secteur ont été complétées par de nombreux inventaires de terrain et des modélisations, comme le détaille l'ensemble de ce volume.

La conception des autres opérations qui composent le projet global Cigéo n'est pas encore aussi avancée que celle du centre de stockage Cigéo.

Les travaux de sécurisation de la ligne 400 kV et la mise à niveau de la ligne ferroviaire 027000 sont définis uniquement par le linéaire des réseaux existants concernés. Les modalités d'intervention sur les pylônes de la ligne électrique, ainsi que les modalités de réfection des ouvrages d'art et des passages à niveau le long de la ligne ferroviaire 027000, restent à préciser par leurs maîtres d'ouvrage respectifs en lien avec les études de conception en cours. Ainsi, les éléments d'état initial proposés sont principalement bibliographiques. Ils sont accompagnés de premiers repérages de terrain et d'estimations techniques. Ils permettent l'arbitrage entre les principaux enjeux environnementaux, afin de choisir les solutions techniquement et financièrement envisageables, offrant le moindre impact environnemental pour préciser les modalités d'interventions. L'évaluation des incidences est réalisée sur le niveau de conception du projet et sera affinée au fur et à mesure des études. Cette évaluation permet de proposer les mesures couramment mises en œuvre pour ces types de travaux et les engagements nécessaires à la préservation des principaux enjeux environnementaux.

Des études de variantes ont été réalisées pour les travaux de construction du poste de transformation électrique et les lignes électriques enterrées ainsi que la déviation de la route départementale D60/960. Des études techniques sont en cours ou vont être lancées. Des analyses bibliographiques et des premiers inventaires de terrain nourrissent la description de l'état initial des secteurs concernés par les variantes restant en cours d'étude. L'analyse des incidences potentielles de chacune des variantes est accompagnée des mesures couramment mises en œuvre pour ces types de travaux et les engagements nécessaires à la préservation des principaux enjeux environnementaux.

Les opérations d'adduction d'eau et d'expédition et transport des colis de déchets radioactifs ne sont définies que par des objectifs fonctionnels. Des travaux de création de nouvelles adductions d'eau sont nécessaires. *A contrario*, des installations d'expédition et de transport des colis de déchets radioactifs existent déjà sur les sites des producteurs de déchets et sont notamment nécessaires pour gérer les flux liés, par exemple, aux activités d'entreposage ou à l'expédition vers les clients étrangers (cas d'Orano la Hague). Les activités d'expédition et de transport des colis de déchets radioactifs depuis les sites des producteurs de déchets seront réalisées depuis ces installations d'expédition déjà en place et par utilisation des infrastructures de transports existantes. En fonction des chroniques d'expédition des colis de déchets vers le centre de stockage Cigéo et des travaux des producteurs relatifs aux emballages de transport utilisés, des adaptations de ces installations, voire la création de nouvelles installations sur les sites existants, pourraient être nécessaires. Dans ce cas, l'étude d'impact du projet global Cigéo sera actualisée afin de prendre en compte les incidences des travaux et du fonctionnement de ces installations. Les principaux enjeux et incidences potentielles à prendre en compte sous forme de mesures d'évitement dans la conception de ces opérations sont identifiés dans la présente étude d'impact grâce aux données bibliographiques disponibles.

Tableau 1-1 Avancement des différentes opérations du projet global Cigéo

Opérations du projet global Cigéo	Définition fonctionnelle	Études de variantes (≈études préliminaires)	Étude de la variante retenue après concertation (≈avant-projet)	Avancement de la définition des ouvrages et installations
Installations du centre de stockage Cigéo (zone puits et zone descenderie, installation souterraine, liaison intersites et installation terminale embranchée ITE) sous maîtrise d'ouvrage Andra	Oui	Oui	Oui	Les caractéristiques techniques de l'INB Cigéo et leur emplacement ont été définis à l'issue de plusieurs phases de décisions ayant chacune fait l'objet d'une participation du public ou du vote d'une loi (cf. Volume II de la présente étude d'impact).
Alimentation électrique réalisée sous la maîtrise d'ouvrage de RTE	Oui	Oui	(début)	Des études de variantes pour l'implantation du poste de transformation électrique et de ses liaisons souterraines aux installations du centre de stockage ont été réalisées. La variante 3S a été retenue. Des études techniques sont en cours.
	Oui	(début)	/	Les travaux de sécurisation des pylônes de la ligne 400 kV existantes sont localisés, leurs modalités d'exécution sont en cours d'étude (variantes selon les sensibilités, notamment écologiques, des milieux).
Adduction d'eau sous maîtrise d'ouvrage des syndicats des eaux	Oui	(début)	/	L'opération d'adduction d'eau est définie par ses objectifs fonctionnels d'alimentation en eau potable du centre de stockage et de sécurisation de l'alimentation en eau potable des communes susceptible d'être affectée, à partir des sources d'Échenay, Gondrecourt-le-Château et Thonnance. Des études de variantes, partielles et anciennes, vont être reprises et complétées.
Mise à niveau de la ligne ferroviaire 027000 sous la maîtrise d'ouvrage de SNCF Réseau	Oui	Oui	(début)	Les études de conception débutent ; les éventuelles variantes sont très localisées autour de la ligne existante à aménager (variantes d'aménagement d'ouvrages d'art). Ces variantes viennent d'être discutées en concertation préalable. Des études techniques sont en cours.
Déviation de la route départementale D60/960 réalisée sous la maîtrise d'ouvrage du CD 52	Oui	Oui	(début)	L'opération de déviation de la route départementale D60/960 est définie par ses objectifs fonctionnels de rétablissement de la portion de route située sous la zone descenderie avec un niveau de service équivalent à la route départementale actuelle. À la suite de la concertation de début 2022, l'option de contournement par le sud est abandonnée et le Conseil départemental s'engage à poursuivre les études sur les deux options qui longent la zone descenderie par le nord
Expédition et transport des colis de déchets radioactifs	Oui	/	/	L'expédition des colis de déchets est prévue depuis les installations existantes d'expédition, soit dans leur état actuel, soit adaptées à leur emplacement actuel. Le transport des colis de déchets est prévu par utilisation des infrastructures de transports existantes.
Opérations de caractérisation et de surveillance environnementale	Oui, pour partie	Sans objet	Sans objet	Les premières opérations comportent des opérations d'archéologie préventive (diagnostics volontaires et fouilles archéologiques), l'implantation de forages, sondages et de piézomètres de caractérisation, supportées par des zones de stockage des matériaux et bases-vie.

1.1.2 Méthode générale de description de l'état initial

1.1.2.1 Définition de l'état initial

L'analyse de l'état initial de l'environnement consiste à faire le diagnostic de l'existant et du fonctionnement global et dynamique du territoire d'implantation du projet global Cigéo. L'état initial aborde tous les thèmes et facteurs[3] de l'environnement, de façon à disposer des données nécessaires et suffisantes à l'évaluation des incidences du projet.

L'état initial de l'environnement n'implique pas pour autant de mener le même degré d'approfondissement géographique ou thématique pour tous les facteurs. L'état initial s'affine également selon la progressivité des études et des incidences potentielles. Conformément à l'article R. 122-5 du code de l'environnement, la proportionnalité s'exprime en fonction de la « *sensibilité environnementale de la zone susceptible d'être affectée par le projet*, *à l'importance et la nature des travaux, ouvrages et autres interventions* » et de « *leurs incidences prévisibles sur l'environnement ou la santé humaine* ».

L'état initial est basé sur des connaissances bibliographiques et des investigations de terrain.

Les données collectées et les études réalisées permettent de qualifier, voire quantifier, l'état de l'environnement pour la thématique étudiée/facteur étudié et d'en apprécier si possible les dynamiques d'évolution, afin de mettre en évidence les enjeux territoriaux.

La détermination de l'état initial permet également de définir l'évolution probable de l'environnement en l'absence de mise en œuvre du projet. Cette situation est élaborée à partir des éléments recensés dans l'état initial, en particulier en décrivant les perspectives d'évolution envisagées.

L'Andra dispose depuis de nombreuses années de données environnementales dans la zone d'étude couverte par l'Observatoire pérenne de l'environnement (OPE). Les études réalisées par l'OPE ont été utilisées lors de l'analyse de l'état initial de l'environnement et complétées par des études qui visent à assurer l'exhaustivité de l'analyse selon les diverses aires d'étude du projet global Cigéo.

L'Observatoire pérenne de l'environnement (**OPE**) a été mis en place en 2007 par l'Andra afin de décrire l'environnement initial du futur centre industriel de stockage géologique (Cigéo) puis de suivre son évolution tout au long du fonctionnement du centre de stockage Cigéo.

La « zone d'étude OPE » couvre une surface de 900 km², située pour les deux tiers dans le département de la Meuse et pour un tiers dans celui de la Haute-Marne, regroupant ainsi quatre-vingts communes. Les contours de cette zone d'étude sont délimités par des repères naturels (cours d'eau, forêt, etc.) ou anthropiques (routes, etc.) (cf. Figure 1-2).

[3] Le thème est aussi appelé « facteur » conformément à l'article R. 122-5 du code de l'environnement), il s'agit de l'eau, de la biodiversité, du climat (…) c'est-à-dire des différentes composantes de l'environnement.

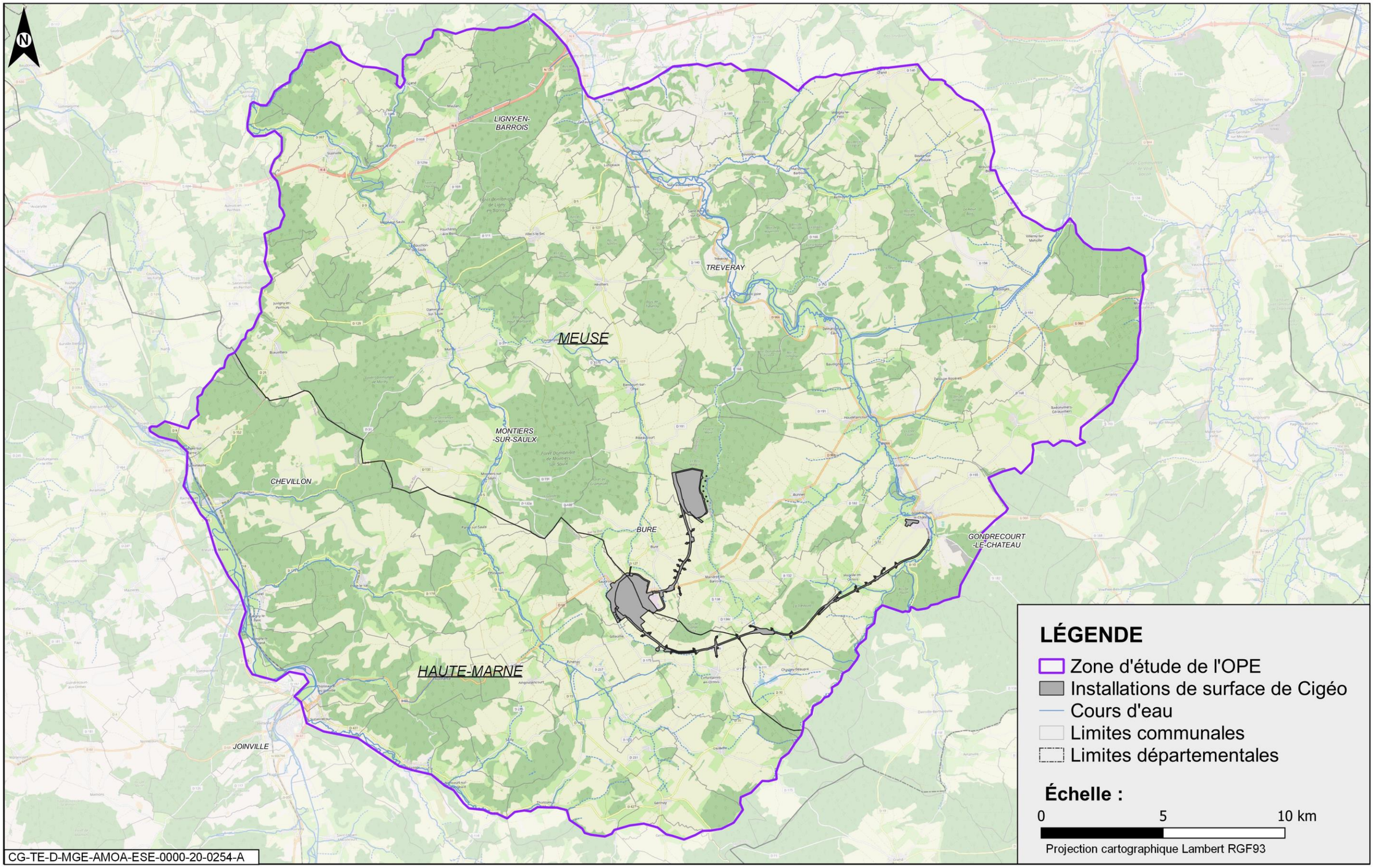


Figure 1-2 *Cartographie de la zone d'étude de l'observatoire pérenne de l'environnement*

1.1.2.2 Hiérarchisation des enjeux

» ENJEU

L'enjeu est la valeur environnementale intrinsèque aux milieux concernés au vu de leur état et de leur dynamique d'évolution, évolution naturelle des milieux et évolution en fonction des pressions extérieures. Cet enjeu est aussi dépendant de l'intérêt que porte la société aux différents facteurs de l'environnement du fait des avantages et ressources qu'elle en retire. Ainsi, le maintien d'une bonne qualité de l'air ou de l'eau est une des préoccupations sociétales principales du fait de son lien direct avec la santé humaine et le bon état des écosystèmes. L'enjeu environnemental du territoire ou du milieu est indépendant du projet. Sur un même territoire, des zones présentant des niveaux d'enjeu différents peuvent être identifiées.

Une hiérarchisation des enjeux a été réalisée. L'échelle de valeurs des enjeux utilisée dans la présente étude d'impact comprend cinq niveaux, tels que présentés ci-dessous. La présence d'un milieu de bonne qualité ou d'une ressource importante relève d'un enjeu modéré à fort. Les enjeux très forts découlent de la présence d'éléments très exceptionnels et rares sur la planète. Enfin, plus un facteur suscite un fort intérêt sociétal, plus son enjeu est fort.

Enjeux très forts
Enjeux forts
Enjeux modérés
Enjeux faibles
Enjeux très faibles

La démarche d'analyse de l'état initial est présentée pour chaque facteur dans les chapitres qui suivent du présent volume.

1.1.3 Méthode générale pour la définition des incidences et mesures

1.1.3.1 Identification et évaluation des incidences

1.1.3.1.1 Identification du type d'incidences

a) Effets directs/indirects

Les effets du projet sur l'environnement sont principalement des effets directs dans l'espace et dans le temps. Ils sont induits par l'implantation du projet, par exemple la modification de l'occupation des sols, la destruction d'habitats d'espèces, la modification des paysages. Ils peuvent aussi être induits par les différentes émissions liées à sa construction, puis son fonctionnement.

Des effets indirects secondaires, souvent conséquences d'effets directs, se produisant parfois à distance, peuvent également être observés. Ils peuvent correspondre par exemple à des conséquences d'une évolution du contexte socio-économique ou d'une évolution des écosystèmes.

b) Effets temporaires/permanents

Ces effets peuvent être permanents et engendrer une modification du milieu non réversible. Ils peuvent aussi être temporaires, l'effet est alors limité dans le temps soit parce qu'il disparaît immédiatement après l'arrêt de la cause, soit parce que son intensité s'atténue progressivement jusqu'à disparaître.

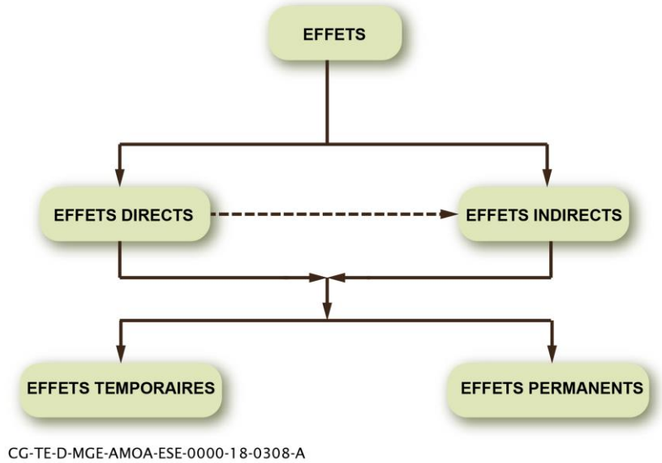


Figure 1-3 Des effets de différents types

c) Effets à court/moyen/long terme

Les incidences correspondant aux effets induits par le projet sur les milieux sont évaluées au regard des données de l'état initial de l'environnement et des enjeux associés. L'évaluation des incidences prend en compte l'évolution dans le temps du projet et ses différentes phases de vie. Les phases du projet sont présentées dans le chapitre 4 du volume II de la présente étude d'impact.

Les effets d'un projet peuvent survenir à différentes échelles de temps. Ils sont qualifiés d'effets à court, moyen et long terme. Dans la présente étude d'impact, il a été considéré que les effets à court terme correspondent à ceux de la phase d'aménagements préalables et de construction initiale, que les effets à moyen terme correspondent à ceux de la phase de fonctionnement (jusqu'à l'horizon 2150), et que les effets à long terme correspondent à ceux des phases de démantèlement et de fermeture, de surveillance et de post-surveillance.

Compte tenu de l'échelle très longue visée par la gestion durable des déchets radioactifs HA et MA-VL, les incidences du centre de stockage Cigéo sur la santé humaine, liés aux substances radioactives à vie longue, sont étudiés spécifiquement à très long terme, en phase de post-surveillance, jusqu'à plusieurs centaines de milliers d'années. Cela est plus spécifiquement abordé dans le chapitre 18 du volume 4 de la présente étude d'impact.

1.1.3.1.2 Appréciation du niveau d'incidence

La démarche d'évaluation des incidences intègre la séquence « éviter, réduire, compenser » (voir la méthodologie détaillée dans le chapitre 1.1.3.2 du présent volume) et est itérative.

L'évaluation de l'incidence dépend des phénomènes impliqués en lien direct avec la nature des opérations considérées (émissions, occupation de sols…) ainsi que de leur ampleur, de leur durée et des enjeux des différents facteurs de l'environnement.

La caractérisation des niveaux **d'incidences résiduelles** « très fort », « fort », « modéré », « faible », « très faible » ou « positif » sur les différents facteurs s'appuie sur les éléments d'appréciation présentés dans le tableau 1-2. Certains effets du projet, compte tenu des spécificités du milieu, peuvent avoir une incidence positive. Il s'agit en premier lieu de l'impact positif lié à la gestion en elle-même des déchets HA et MA-VL mais aussi par exemple de la création d'emplois liés au projet contribuant au développement socio-économique local.

Les différents éléments d'appréciation des niveaux d'impacts sont synthétisés dans le tableau 1-2 et sont utilisés comme « fil conducteur » pour apprécier le niveau des impacts.

Tableau 1-2 Éléments d'appréciation du niveau d'incidence (grille indicative d'évaluation)

Niveau d'incidence	Éléments d'appréciation
Positif	Amélioration directe ou indirecte du facteur par la réalisation du projet
Très faible	Absence d'effet Altération nulle ou marginale d'un facteur de l'environnement
Faible	Altération légère d'un facteur de l'environnement qui ne modifie pas ses fonctionnalités Effet peu perceptible sur une faible zone géographique et sur une durée limitée ou ponctuelle
Modéré	Modification perceptible d'un facteur de l'environnement localisée ou limitée dans le temps Perturbation ou dégradation importante de facteurs à enjeu faible
Fort	Modification importante d'un facteur de l'environnement sur une période longue ou permanente Perturbation ou dégradation importante de facteurs à enjeu modéré à fort
Très fort	Modification très importante d'un facteur de l'environnement sur une période longue ou permanente Destruction d'un facteur de l'environnement présentant un enjeu fort ou dégradation d'un facteur de l'environnement présentant un enjeu très fort

Il n'y a pas dans le code de l'environnement de définition de ce qu'est une incidence notable, telle qu'abordée dans l'article R. 122-5 fixant le contenu d'une étude d'impact. Aussi, sur une échelle à cinq niveaux d'incidences négatives, il a été choisi dans cette étude d'impact de considérer que les trois niveaux négatifs les plus élevés (modéré, fort et très fort) correspondent aux incidences négatives notables.

1.1.3.2 Séquence éviter/réduire/compenser

1.1.3.2.1 Définition des mesures selon la séquence éviter/réduire/compenser les incidences

Les incidences et mesures applicables des phases APR (aménagement préalable), CI (construction initiale) et/ou F (fonctionnement) du projet global Cigéo – telles que décrites en détail dans le volume II de l'étude d'impact - sont traitées, par facteur environnemental, dans les chapitres 2 à 15 du volume IV de l'étude d'impact.

Les incidences et mesures de la phase démantèlement/fermeture et de la phase de surveillance et post-surveillance après-fermeture sont, elles, spécifiquement traitées dans le chapitre 18 du volume IV de la présente étude d'impact.

La séquence « éviter, réduire, compenser » dite séquence ERC a été introduite dans la méthodologie des études environnementales dès les années 90. Transposée progressivement dans le code de l'environnement, la séquence ERC a été intégrée à la réglementation et appliquée de façon transversale aux procédures environnementales.

Elle conduit les porteurs de projet à rechercher et mettre en œuvre des mesures visant prioritairement à éviter les atteintes (effet négatif) à l'environnement et à la santé humaine, à réduire celles qui n'ont pu être suffisamment évitées et, si nécessaire et lorsque c'est possible, à compenser les effets notables qui n'ont pu être ni évités, ni suffisamment réduits (voir figure 1-4).

L'article L. 110-1 2 du code de l'environnement mentionne que le principe d'action préventive et de correction, par priorité à la source, des atteintes à l'environnement « *doit viser un objectif d'absence de perte nette de biodiversité, voire tendre vers un gain de biodiversité* ». Ce principe est repris à l'article L. 163-1 du code de l'environnement qui précise que *« Les mesures de compensation des atteintes à la biodiversité visent un objectif d'absence de perte nette, voire de gain de biodiversité ».*

Les **mesures d'évitement** visent à supprimer des effets négatifs sur l'environnement ou la santé humaine. Elles correspondent soit à un choix d'aménagement ou d'implantation qui permet d'éviter la survenue de l'impact grâce à la préservation de zones à enjeux, soit à des modifications dans les choix technologiques ou les temporalités de réalisation permettant de supprimer totalement des incidences.

Les **mesures de réduction** sont définies dès lors que des incidences ne peuvent être évitées totalement lors de la conception du projet. Elles visent à réduire les effets négatifs permanents ou temporaires du projet sur l'environnement et la santé humaine, pendant sa construction ou son fonctionnement. Elles peuvent agir en diminuant soit la durée de cet impact, soit son intensité, soit la combinaison de plusieurs de ces éléments.

Les **mesures de compensation** ont pour objet d'apporter une contrepartie, en fonction des objectifs réglementaires édictés pour chacun des facteurs, aux incidences résiduelles négatives notables du projet qui n'ont pu être ni évitées, ni suffisamment réduites. Elles sont mises en œuvre en priorité sur le site endommagé ou à proximité de celui-ci afin de garantir sa fonctionnalité de manière pérenne. Elles doivent permettre de conserver globalement et, si possible d'améliorer, la qualité environnementale des milieux.

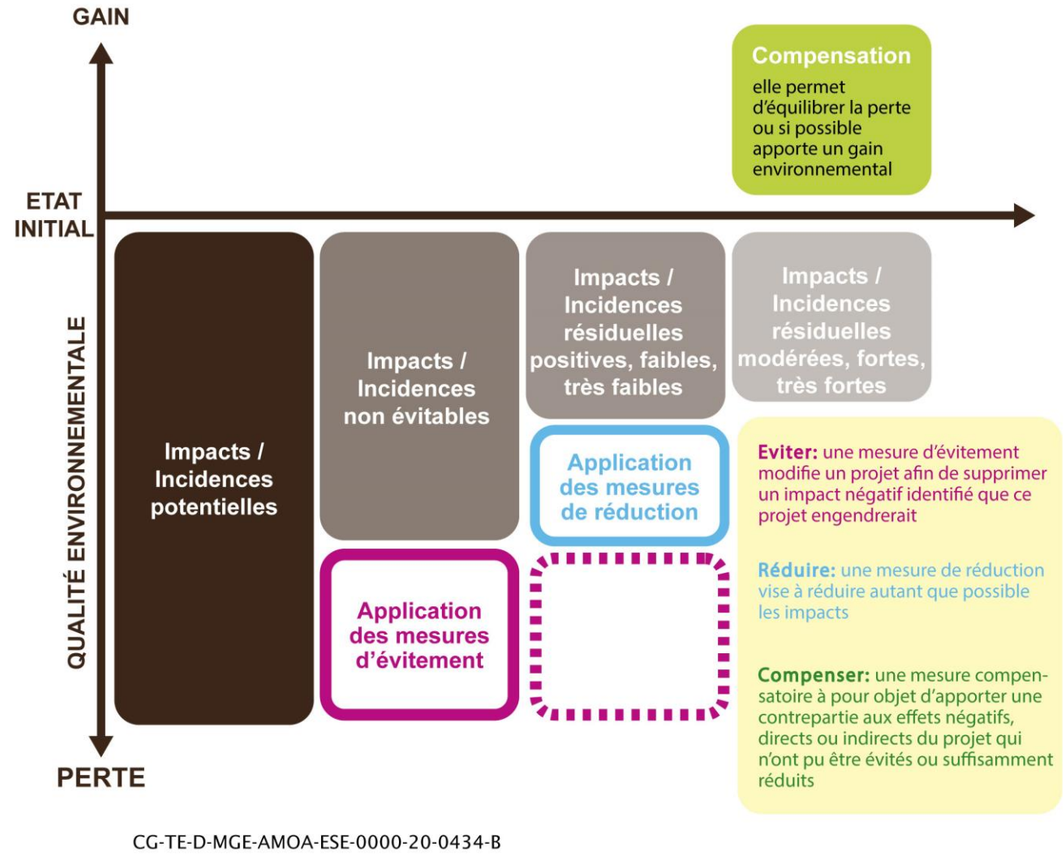


Figure 1-4 Démarche éviter réduire compenser

Ces différentes mesures peuvent être également complétées par des **mesures d'accompagnement**. Ces mesures ne s'inscrivent pas dans un cadre réglementaire ou législatif obligatoire, mais sont prises par les maîtres d'ouvrage en complément des mesures d'évitement, de réduction et de compensation pour renforcer leur pertinence et leur efficacité.

Les effets des mesures et les modalités de suivi associées sont précisés pour chaque mesure mise en place.

Afin de faciliter la lecture du volume IV, un tableau, présenté sous la forme du tableau 1-3 ci-après, synthétise, pour chaque mesure :

- **l'intitulé de la mesure avec son code selon le guide Thema du ministère de transition écologique et solidaire de janvier 2018 intitulé** « Évaluation environnementale - Guide d'aide à la définition des mesures (3) ;
- **le ou les facteur(s) environnemental(aux)** en faveur duquel ou desquels la mesure est mise en œuvre (ex : biodiversité, eaux superficielles, bruit, etc.) ;
- **le ou les maître(s) d'ouvrage (MOAs)** responsable(s) de la mise en œuvre de la mesure ;
- l'**opération** concernée par la mise en œuvre de la mesure ;
- la ou les **phase(s)** temporelle(s) sur laquelle ou lesquelles(s) porte la mesure (aménagements préalables (APR), construction initiale (CI), fonctionnement (F)).

Dans le cadre de l'étude d'impact, les mesures sont donc introduites sous la forme du tableau ci-dessous qu'on appelle bloc « mesure mère ».

Tableau 1-3 Exemple de tableau de présentation d'une mesure ERC

Nature mesure – Code Thema : Intitulé de la mesure			
Facteur(s) environnemental(aux)	**MOA(s)**	**Opération(s)**	**Phase(s)**

Dans le cadre du dossier d'autorisation environnementale d'une tranche de travaux, des études techniques approfondies sont réalisées et permettent d'affiner les mesures à mettre en œuvre pour la tranche de travaux considérée :

- soit la mesure mère s'applique en l'état ou ne nécessite que d'éventuels ajustements à la marge intégrés dans le bloc mesure mère ;
- soit la mesure mère est précisée en lien avec la tranche de travaux visée et déclinée en « mesure fille ».

1.1.3.2.2 Démarche d'analyse selon la séquence ERC

L'analyse des incidences s'est attachée à faire ressortir la démarche « éviter, réduire, compenser », en articulant l'analyse des facteurs autour des étapes suivantes :

- **incidences potentielles** : cette première étape présente succinctement les types d'incidence génériques que peut engendrer le projet global Cigéo ; elles sont appréciées au regard des enjeux identifiés dans l'état initial, sur la base de l'avancement des études techniques du projet lorsque les éléments sont disponibles ou sur la base de retours d'expériences sur d'autres opérations similaires ; cette étape se conclut sur l'appréciation du caractère notable (modéré à très fort) ou non notable (très faible à faible) de ces incidences génériques à l'échelle du projet global Cigéo.

  Un tableau synthétise ces incidences potentielles, leur caractère notable (indiqué en orange) ou non notable (indiqué en bleu) ainsi que la ou les phase(s) de vie du projet concernée(s) lorsque l'incidence potentielle est notable. Un exemple est présenté au tableau 1-4.

  Dans ces tableaux, l'opération de « Caractérisation et de surveillance environnementale », est incluse dans les autres opérations listées.

  Pour certaines thématiques, l'analyse des incidences potentielles du centre de stockage Cigéo peut être affinée par zone(s) ou installation(s). Dans ce cas, le niveau d'incidence est précisé pour chacune d'entre elles.

Tableau 1-4 Exemple de tableau de synthèse des incidences potentielles du projet global Cigéo

Incidences potentielles	Centre de stockage Cigéo	Alimentation électrique	Adduction d'eau	Mise à niveau de la ligne ferroviaire 027000	Déviation de la route départementale D60/960	Expédition et transport des colis de déchets radioactifs
Altération de la qualité des eaux superficielles	APR, CI, F					

En orange : incidence potentielle notable ; en bleu : incidence potentielle non notable ; en gris : opération non concernée par l'incidence évoquée
***APR** : aménagements préalables ; **CI** : construction initiale ; **F** : fonctionnement*

- **mesures d'évitement**, dont la définition est donnée au chapitre 1.1.3.2.1 du présent volume ;
- **incidences après mesures d'évitement** : cette étape n'est pas systématique à l'ensemble des chapitres du volume IV de la présente étude d'impact où il n'y a parfois pas de mesures d'évitement ou elles sont parfois regroupées avec les mesures de réduction suivant la quantification possible de l'effet de ces mesures d'évitement. Dans le cas où cette évaluation est présente, elle précise les incidences du projet sur l'environnement après mise en place des mesures d'évitement, en fonction des éléments de projet disponibles ; ces éléments variant d'une opération à l'autre (cf. Chapitre 1.1.1 du présent volume), certaines incidences éventuelles seront confirmées et précisées dans les actualisations ultérieures de l'étude d'impact ;
- **mesures de réduction**, dont la définition est donnée au chapitre précédent ;
- **incidences résiduelles** : l'objectif de cette étape est d'identifier les incidences du projet global Cigéo qui n'ont pu être ni évitées, ni réduites ; elle précise le niveau d'incidence selon la grille d'évaluation présentée au chapitre 1.1.3.1.2 du présent volume, puis elle conclut sur les besoins (ou non) de mesures de compensation. Ce chapitre se termine par un encart de conclusion dont la couleur de fond correspond au niveau des incidences résiduelles selon le tableau 1-2 ;
- **mesures de compensation** : cette étape décrit le dimensionnement des mesures de compensation en fonction des incidences résiduelles précédemment détaillées et en fonction des objectifs réglementaires édictés pour chacun des facteurs. Les modalités détaillées de réalisation de ces mesures, dont la finalité est l'absence d'incidence notable du projet global Cigéo sur l'ensemble des facteurs de l'environnement et notamment l'absence de perte nette de biodiversité, seront présentées dans les dossiers spécifiques d'autorisations de travaux.

L'analyse des incidences se conclut, pour chaque thématique, par un tableau de synthèse de la démarche ERC reprenant, pour chaque incidence potentielle notable, les mesures mises en place, avec précision du type de mesure (E, R, C) et de la phase (APR, CI, F), de l'effet attendu, des modalités de suivi et des opérations et MOAs concernées.

Les modalités de suivi des mesures mises en œuvre dans le cadre de la démarche « Éviter, Réduire et Compenser » (ERC) visent à s'assurer :

- de la mise en œuvre effective des mesures définies ;
- de l'efficacité de la mesure mise en œuvre. Il est à noter que, pour certaines mesures, la modalité de suivi peut s'arrêter au constat de mise en œuvre ; cela concerne par exemple certaines mesures d'évitement. Il n'y a ainsi pas de paramètre spécifique mesuré pour juger l'efficacité de la mesure.

Tableau 1-5 Exemple de tableau de synthèse de la démarche ERC

Incidences potentielles	Mesures	Type (ERC)	Phase (APR, CI, F)	Effets attendus de la mesure	Modalités de suivi	MOA	Opération
	Niveau d'incidences potentielles : Notable						
	Niveau d'incidences résiduelles : Faible						

Le chapitre 19 du volume IV de la présente étude d'impact présente un bilan global pour l'ensemble du projet et des thématiques de la nature et des dispositions proposées pour la surveillance de l'environnement des installations et opérations du projet global Cigéo, ainsi que des modalités de suivi des mesures environnementales pour chacune des grandes phases du projet global (aménagements préalables, construction initiale et fonctionnement).

1.1.3.3 Évaluation des incidences et mesures spécifiques à une tranche de travaux

Dans le cadre des actualisations successives de l'étude d'impact accompagnant les demandes d'autorisations des différentes opérations du projet global Cigéo, des chapitres spécifiques aux opérations dont l'autorisation est demandée sont ajoutés au sein de l'étude d'impact. Ces chapitres permettent d'identifier facilement les opérations objets de l'autorisation en question et contiennent des précisions sur les incidences desdites opérations.

La démarche d'évaluation des incidences et mesures présentée de la tranche de travaux est identique à celle présentée pour le projet global et renvoie vers cette dernière. Ce chapitre est un focus synthétique sur une tranche de travaux donnée. Ce chapitre se termine par un encart de conclusion dont la couleur de la bordure correspond au niveau des incidences résiduelles selon le tableau 1-2.

Ainsi, les volumes IV et VI de l'étude d'impact, relatifs à l'évaluation des incidences et mesures d'évitement, de réduction et de compensation de ces incidences et à l'évaluation des incidences sur la santé humaine, proposent une analyse à deux échelles :

- à l'échelle du projet global ;
- à l'échelle des opérations objets de la demande d'autorisation.

L'approche à l'échelle du projet global tient compte de l'ensemble des opérations qui composent le projet global Cigéo, en fonction de leur stade d'avancement, ce qui inclut effectivement les opérations objets de la présente demande d'autorisation.

1.2 Définition des aires d'étude

1.2.1 Typologie des aires d'étude

La caractérisation de l'état initial de l'environnement, l'appréciation de son évolution probable en l'absence de projet et l'évaluation des incidences du projet sont réalisées au travers de différentes aires d'étude au sein desquelles les facteurs de l'environnement sont susceptibles d'être affectés par le projet de façon positive ou négative, directe ou indirecte secondaire, temporaire ou permanente, cumulative le cas échéant, et à court, moyen et long terme.

Les aires d'étude ont été définies pour chaque facteur en prenant en compte le principe de proportionnalité indiqué à l'article R. 122-5 du code de l'environnement : « *Le contenu de l'étude d'impact est proportionné à la sensibilité environnementale de la zone susceptible d'être affectée par le projet, à l'importance et la nature des travaux, installations, ouvrages, ou autres interventions dans le milieu naturel ou le paysage projetés et à leurs incidences prévisibles sur l'environnement ou la santé humaine* ». Trois catégories d'aires d'étude sont définies en fonction des types d'effets potentiels envisagés :

- **l'aire d'étude immédiate** correspond à la zone géographique permettant d'appréhender les effets directs d'emprise des ouvrages et installations du projet global Cigéo ainsi les perturbations majeures liées aux travaux et activités (cf. Figure 1-5).

  Une aire d'étude immédiate (sous cette seule terminologie) est commune à de nombreux facteurs de l'environnement, elle est étendue jusqu'à 500 mètres de part et d'autre de la zone d'intervention potentielle du centre de stockage Cigéo et des opérations des autres maîtres d'ouvrage du projet global dont l'implantation ou les variantes d'implantation sont connues (voir chapitre 1.1.1 du présent volume). Elle inclut ainsi les potentielles zones de travaux et de fonctionnement du centre de stockage Cigéo et des opérations suivantes des autres maîtres d'ouvrage : les variantes d'alimentation électrique en dehors des travaux de sécurisation de la ligne 400 kV Houdreville-Méry (cf. Chapitre 1.1.1 du présent volume), la mise à niveau de la ligne ferroviaire 027000, les variantes de déviation de la route départementale D60/960 et les opérations de caractérisation et de surveillance environnementale.

  Des aires d'étude immédiate sont spécifiques à certaines thématiques et avec un périmètre spécifique différent des 500 mètres évoqués plus haut - le nom de la thématique est alors associé au nom de l'aire d'étude immédiate –cela concerne la biodiversité et les activités agricoles et sylvicoles. Leurs caractéristiques sont précisées dans la suite du document ;

- **l'aire d'étude rapprochée,** qui varie en fonction des facteurs de l'environnement, correspond à une extension de l'aire d'étude immédiate mieux adaptée à l'évaluation de certains effets du projet ou concernant des opérations encore peu définies.

  C'est par exemple dans cette aire d'étude que sont intégrés les éléments relatifs à l'adduction d'eau pour le facteur eaux ou les facteurs relatifs au milieu humain ;

- **l'aire d'étude éloignée,** qui varie en fonction des facteurs de l'environnement, correspond à la zone d'étude permettant d'appréhender les effets potentiels ou éloignés directs et indirects secondaires du projet global Cigéo. Cette aire d'étude a été définie en tenant compte de l'ensemble des incidences potentielles que pourraient avoir les installations, ouvrages, travaux et activités d'après les connaissances disponibles. L'aire d'étude éloignée contient les aires d'étude rapprochée et immédiate.

  C'est dans cette aire d'étude que sont caractérisées les incidences potentielles de l'opération d'adduction d'eau pour de nombreux facteurs où les enjeux relatifs à cette opération ne sont pas notables. Une aire d'étude éloignée dite étendue a été définie en complément pour quelques facteurs spécifiques comme les infrastructures de transport et la gestion des déchets radioactifs pour analyser les incidences éloignées de l'opération d'expédition et de transport des colis radioactifs.

L'adaptation de cette typologie à chaque facteur est décrite et justifiée dans les chapitres suivants. Les aires d'étude de chaque facteur sont définies de manière proportionnée aux enjeux de ces facteurs et aux incidences potentielles des différentes opérations du projet global Cigéo pour chaque facteur.

Une aire d'étude spécifique a été définie pour les travaux de sécurisation de la ligne électrique 400 kV qui s'étendent sur 124 km d'est en ouest. Pour de nombreux facteurs, cette étendue est largement en dehors de la zone susceptible d'être affectée par le reste du projet global Cigéo. Pour d'autres facteurs, l'aire d'étude éloignée suffisamment vaste intègre les travaux de sécurisation de la ligne électrique 400 kV.

Aucune incidence potentielle n'est envisagée en dehors de la France que ce soit en fonctionnement normal ou accidentel. Ainsi, le projet global Cigéo n'est pas susceptible de présenter des incidences transfrontalières.

ÉVOLUTION DES AIRES D'ÉTUDE EN LIEN AVEC LES PRÉCISIONS APPORTÉES AUX CARACTÉRISTIQUES DU PROJET

Les aires d'études ont été adaptées pour tenir compte des opérations de caractérisation et de surveillance environnementale.

Cela a conduit à avoir certaines aires discontinues compte tenu de la nature particulière de ces opérations de caractérisation et de surveillance environnementale : sites ponctuels répartis sur un vaste territoire, occupation au sol limitée, incidences principales en phase travaux de durée limitée.

La description des états initiaux et l'évaluation des incidences et mesures ont été renforcées pour prendre en compte ces opérations de caractérisation et de surveillance environnementale.

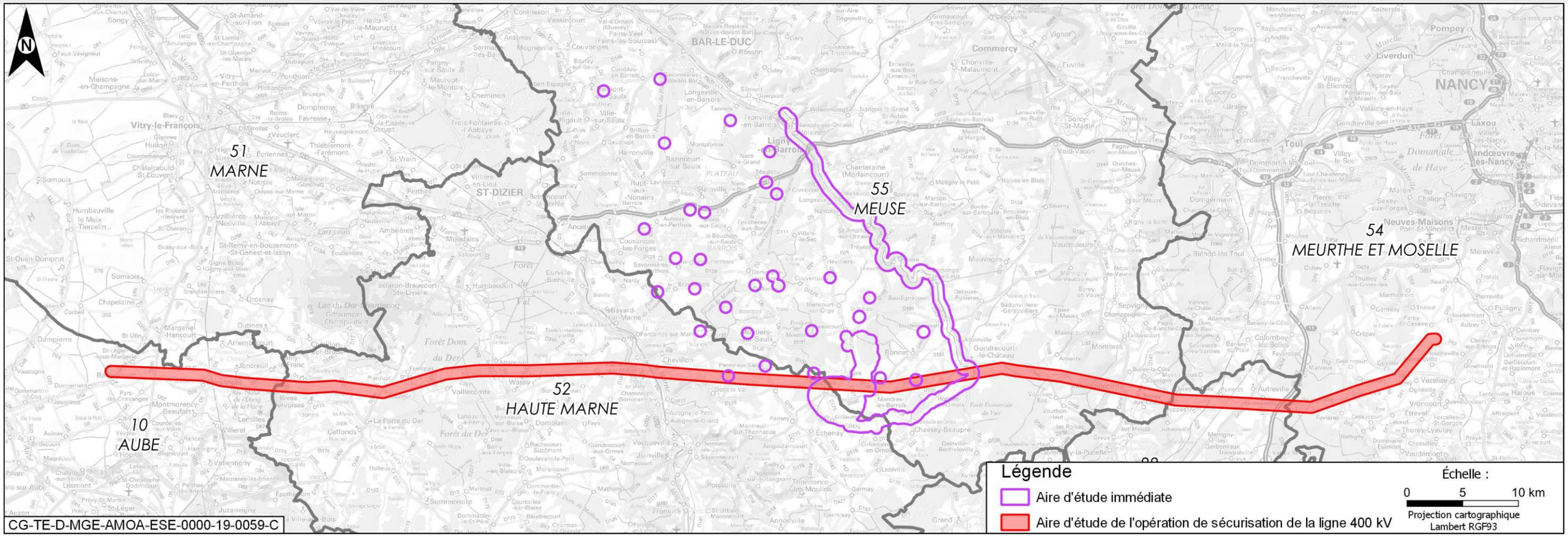


Figure 1-5 *Aire d'étude immédiate et aire d'étude spécifique à l'opération de sécurisation de la ligne aérienne 400 kV*

1.2.2 Description des aires d'étude associées aux facteurs de l'environnement

1.2.2.1 Définition des aires d'étude des facteurs relatifs au milieu physique : atmosphère, sols, sous-sols, eaux

La liste des aires d'étude utilisées et leur description sont indiquées dans le tableau 1-6. Leur représentation est visible sur la carte ci-après figure 1-6 pour les facteurs atmosphère, sols, sous-sols et eaux.

Certaines aires d'études se superposent, dans le cas présent l'aire d'étude rapprochée et l'aire d'étude immédiate. Cartographiquement, c'est l'aire d'étude la plus étendue qui apparaît au-dessus et dont on voit la couleur qui masque celle des autres aires d'étude. Un encart est proposé pour l'aire immédiate afin d'avoir une juste visualisation de la totalité de cette aire.

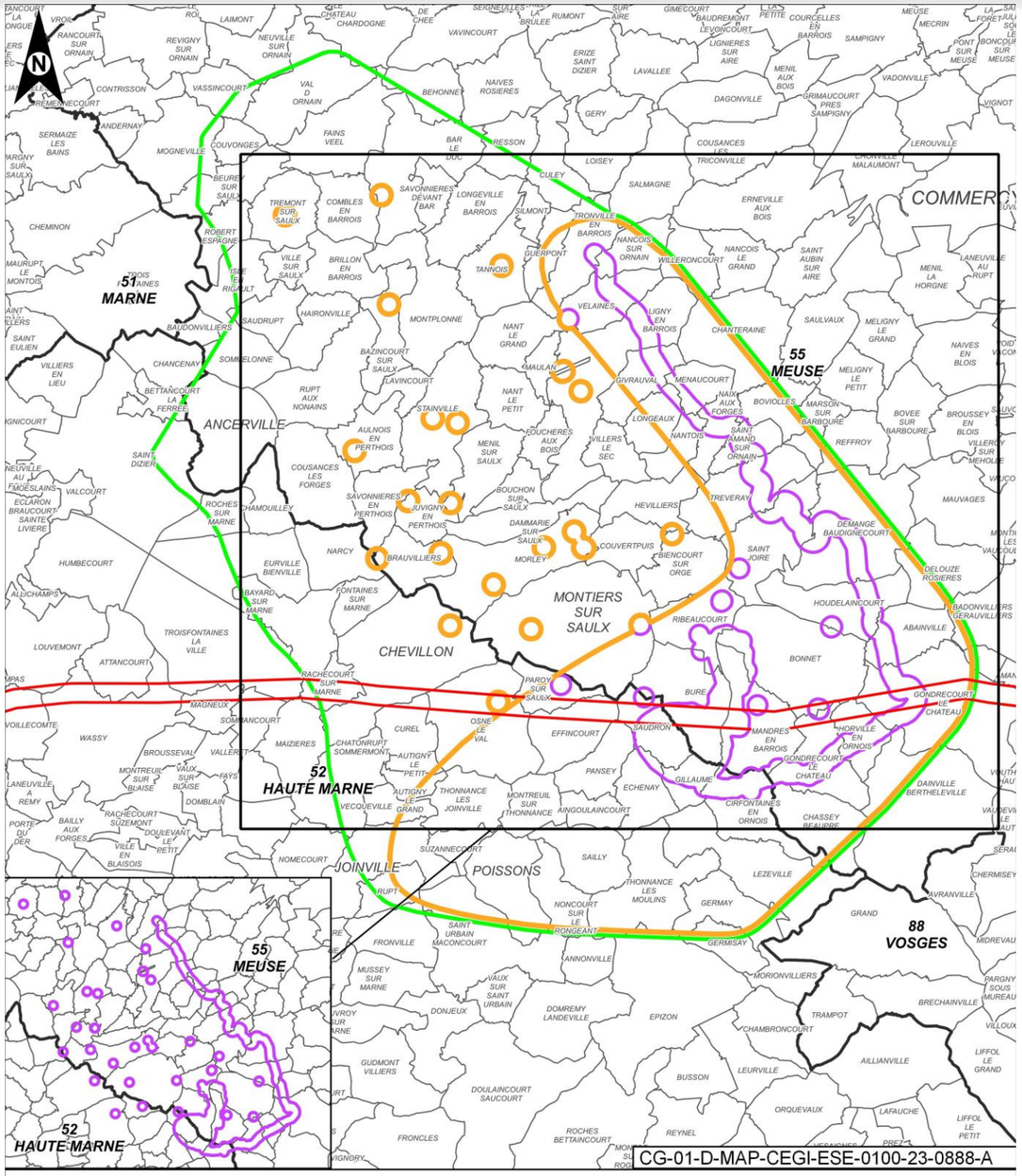


Figure 1-6 Aires d'étude du milieu physique

1.2.2.1.1 La définition de l'étendue de l'aire d'étude éloignée

L'Autorité environnementale a recommandé de « *produire la cartographie de l'aire d'étude potentielle d'influence des installations de surface et de la descenderie sur les eaux souterraines* ».

Ainsi une analyse de la zone d'influence du projet a été réalisée qui s'appuie sur l'intégration des résultats des différents traçages qui ont participé à la connaissance des écoulements au sein de l'hydrosystème des Calcaires du Barrois (cf. Figure 1-7).

Les principaux ouvrages du projet de centre de stockage Cigéo qui pourraient influencer les eaux souterraines sont les installations de surface en zones puits et descenderie implantées dans la formation des Calcaires du Barrois et les liaisons surface-fond (descenderies et puits verticaux) qui traversent l'ensemble des formations depuis la surface jusqu'à l'installation souterraine situées dans la couche argileuse et imperméable du Callovo-Oxfordien.

Les installations de surface du centre de stockage Cigéo sont implantées dans la formation géologique des Calcaires du Barrois. Cette formation ne forme pas un aquifère unique mais elle se divise en plusieurs sous-aquifères structurés par la présence de niveaux perméables (Calcaires sublithographiques, Calcaires de Dommartin et calcaires cariés et tachetés) et semi-perméables (Pierre Châline, Oolithe de Bure), avec à sa base les marnes kimméridgiennes constituant une barrière imperméable. Ainsi, seuls les Calcaires du Barrois sont concernés par de potentielles influences hydrauliques des installations de surface.

Les écoulements dans les Calcaires du Barrois sont globalement orientés vers le nord-nord-est, en lien avec le pendage des couches géologiques, la fracturation et les phénomènes karstiques. Il existe de plus des échanges entre les eaux souterraines et les eaux du système hydrographique (pertes et résurgences).

L'aire d'influence hydraulique potentielle des installations de surface sur les eaux souterraines du calcaire du Barrois se situe en aval hydraulique des installations de surface du centre de stockage Cigéo. En tête de bassin versant, les écoulements s'orientent pour partie en suivant la morphologie du substratum de la formation aquifère, constitué des marnes du Kimméridgien. À l'échelle de l'aire d'étude éloignée, des traçages artificiels recensés indiquent, de manière conservative, les directions d'écoulement et l'extension vers le nord de l'aire potentielle d'influence. Ces traçages peuvent être regroupés en deux types en fonction de la localisation de leur point d'injection :

- l'injection a été réalisée à proximité immédiate de la zone des futures installations de surface du centre de stockage Cigéo ; ces traçages témoignent d'une connexion directe entre la zone des futures installations de surface et les points de sortie du traceur situés dans l'Orge, la Saulx et au niveau de la source de Rupt-aux-Nonains ;
- l'injection a été réalisée à plusieurs kilomètres en aval de la zone des futures installations de surface du centre de stockage Cigéo mais à l'intérieur de l'aire d'étude éloignée ; ces traçages informent sur les directions globales d'écoulement et les potentielles connexions indirectes (par l'intermédiaire du réseau hydrographique). Ces traçages indiquent des directions générales vers le nord-nord-ouest avec des exutoires identifiés au nord de Bar-Le-Duc pour les plus éloignés.

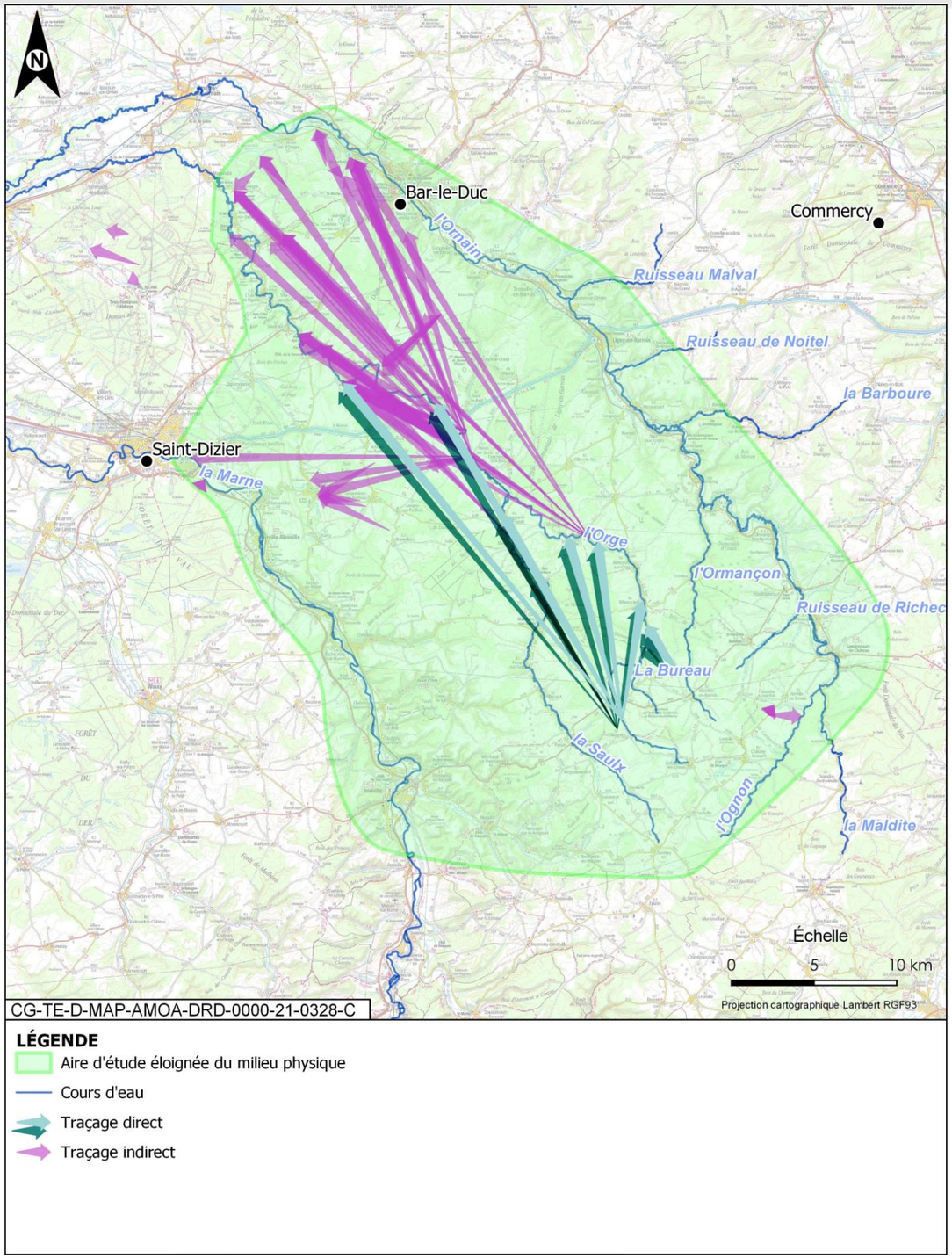


Figure 1-7 *Traçages hydrogéologiques et directions globales des écoulements dans les Calcaires du Barrois depuis la zone descenderie*

L'ensemble des connaissances disponibles (acquises par l'Andra ou disponibles dans les bases de données publiques) permettent ainsi de tracer, de manière très sécuritaire, une enveloppe de l'aire d'influence hydraulique potentielle des installations de surface du centre de stockage Cigéo en prenant comme référence les directions d'écoulements ainsi que les exutoires naturels identifiés par les traçages.

On retiendra notamment qu'au niveau du captage d'alimentation en eau potable (AEP) de Rupt-aux-Nonains, on a pu établir, par traçage en période de basses eaux, un facteur de dilution très important de l'ordre de 10^8.

Dans l'hypothèse d'une connexion entre les installations de surface du centre de stockage Cigéo et les captages plus au nord que celui de Rupt-aux-Nonains, le facteur de dilution serait plus élevé. Cette hypothèse est cohérente avec la délimitation du réseau d'alerte et de secours défini dans l'arrêté n° 2020-2664 du 18 décembre 2020 portant déclaration d'utilité publique les travaux de dérivation des eaux souterraines des sources Mourot et de la Côte Géminel (4). En effet, ce dernier couvre le secteur du cours d'eau de la Saulx de Ménil-sur-Saulx à Trémont-sur-Saulx jusqu'aux sources, avec une limite sud-est s'arrêtant à une quinzaine de kilomètres en aval des installations du centre de stockage Cigéo.

L'aire d'étude du milieu physique a donc été définie en tenant compte des résultats des différents traçages qui ont participé à la connaissance des écoulements au sein de l'hydrosystème des Calcaires du Barrois (cf. Figure 1-7).

Les liaisons surface-fond, telles qu'elles sont conçues à ce stade, sont étanches au niveau de la formation des Calcaires du Barrois et drainantes au niveau de l'Oxfordien. Leur influence hydraulique potentielle ne s'exprimera qu'au niveau des Calcaires de l'Oxfordien, en générant un rabattement hydraulique, comme observé autour des deux puits du Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne. Toutefois, du fait notamment des caractéristiques peu transmissives de l'Oxfordien au niveau de la zone de transposition, cette perturbation hydraulique ne sera significative qu'à proximité immédiate des descenderies et des puits, quelques dizaines à centaines de mètres de rabattement au plus, comme cela est observé autour des puits du Laboratoire souterrain. Elle ne modifierait pas le fonctionnement des captages d'alimentation en eau potable situés en dehors de la zone de transposition, à plusieurs kilomètres au sud-est des descenderies et des puits, notamment au niveau du fossé de Gondrecourt.

Les interrelations entre les masses d'eau souterraines, les masses d'eau superficielles, le sol et le sous-sol justifient la prise en compte d'une aire d'étude commune pour l'étude des milieux. Par souci de simplification, la même aire d'étude éloignée a été appliquée à la thématique de l'atmosphère.

Les masses d'eau sont étudiées sur une aire d'étude éloignée s'étendant sur les départements de la Meuse et de la Haute-Marne (en dehors de la ligne 400 kV). Au-delà de cette aire d'étude éloignée, les eaux superficielles et les eaux souterraines ne sont pas susceptibles d'être affectées par le projet global Cigéo.

L'opération d'alimentation électrique au niveau de la ligne 400 kV concerne les masses d'eau des départements de l'Aube, de la Haute-Marne, de la Meuse et de la Meurthe-et-Moselle. L'analyse des masses d'eau concernées par le projet et de sécurisation de ligne 400 kV est présenté dans une unique aire de 500 mètres de part et d'autre de la ligne et de manière plus générale que pour le projet global Cigéo.

1.2.2.1.2 Les différentes aires du milieu physique

Outre l'aire d'étude élargie qui vient d'être explicitée, d'autres aires d'étude sont définies pour l'étude du milieu physique et présentées dans le tableau qui suit.

Tableau 1-6 Définition des aires d'étude du milieu physique (Atmosphère, sol, sous-sol et eaux)

Aire d'étude	Description	Justification
Immédiate	Aire d'étude centrée sur la zone d'implantation potentielle envisagée pour les opérations du projet global Cigéo*[4] dont l'implantation ou ses variantes sont arrêtées, augmentée d'une zone de 500 mètres de part et d'autre. Elle inclut le périmètre opérationnel en phase travaux et en phase de fonctionnement.	Cette aire d'étude correspond à la zone géographique permettant d'appréhender les effets directs induits par les ouvrages et installations ainsi que par les perturbations liées aux travaux et activités dans la zone d'intervention potentielle et à sa proximité immédiate.
Rapprochée	Aire d'étude incluant les communes d'implantation des infrastructures de surface du projet global Cigéo*, et des trois captages participant à l'adduction en eau du centre de stockage Cigéo avec leurs périmètres de protection associés.	Cette aire d'étude permet de prendre en compte toutes les populations potentiellement soumises à des modifications de la qualité de l'air, de caractériser le contexte d'implantation, de décrire le contexte d'implantation des ouvrages souterrains. Elle permet ainsi de prendre en compte les communes concernées par la ZIOS (zone d'implantation des ouvrages souterrains) et la ZIRA (zone d'intérêt pour la reconnaissance approfondie). Ces zones servent à la description de la tectonique et de la stratigraphie. Pour le facteur eaux, elle intègre les périmètres de protection des trois points de captage nécessaires à l'opération adduction d'eau et les plans d'eau présents autour du projet global. Cette aire d'étude n'est pas utilisée pour la thématique eau où l'analyse se base sur les seules aires d'étude immédiate, éloignée et spécifique.
Éloignée	Aire d'étude qui s'étend sur une superficie d'environ 1 300 km². Cette aire est délimitée : • au nord et au nord-ouest par l'extension des traçages déjà réalisés dans le secteur ; • au sud par la tête du bassin versant de la Saulx ; • au nord-est par l'Ornain (longée par la ligne ferroviaire 027000) en considérant les bassins versants interceptés jusqu'à une distance moyenne en amont du point de franchissement du cours d'eau par la ligne ferroviaire de 1 km ; • à l'ouest par la limite du bassin versant de la Marne.	Cette aire permet la connaissance des systèmes hydrauliques et hydrogéologiques en interrelation. Cette aire inclut l'opération d'adduction d'eau potable pour laquelle il est nécessaire de vérifier, dans le cadre des recherches futures de variantes les terrains à éviter. Cette aire tient compte (cf. Chapitre 1.2.2.1.1 du présent volume) : • de la zone de transposition où la géologie garantit la sureté de l'installation de stockage souterrain ; • des relations entre les eaux de surface et les eaux souterraines dans les secteurs karstiques en incluant les secteurs de pertes dans les cours d'eau locaux et les zones de résurgences associées, y compris d'un cours d'eau vers un autre (de l'Ornain vers la Saulx, de la Saulx vers la Marne) ; • des usages déclarés de l'eau et des sens d'écoulement des masses d'eau de surface ou souterraine associées. L'ensemble des connaissances disponibles à ce jour permettent de tracer, de manière très sécuritaire, une enveloppe de l'aire d'influence hydraulique potentielle des installations de surface, en prenant comme référence les directions d'écoulements ainsi que les exutoires naturels identifiés par des traçages artificiels.
Spécifique	Aire d'étude spécifique de la ligne 400 kV qui s'étend sur 500 mètres de part et d'autre de la portion de ligne électrique de 124 km concernée par les travaux de sécurisation.	

[4] En dehors de l'aire d'étude spécifique 400 kV pour ces aires d'étude du milieu physique

1.2.2.2 Définition des aires d'étude du facteur biodiversité et milieu naturel

Quatre aires d'étude sont utilisées pour réaliser l'état initial du milieu naturel et l'évaluation des incidences sur les milieux naturels. Celles-ci sont présentées dans le tableau ci-dessous et illustrées sur la figure 1-8.

Tableau 1-7 Définition des aires de la biodiversité et du milieu naturel

Aire d'étude	Description	Justification
Immédiate de la biodiversité	Aire d'étude centrée sur la zone d'implantation potentielle envisagée pour les opérations du projet global Cigéo dont l'implantation ou ses variantes sont arrêtées, augmentée d'une zone de 500 mètres de part et d'autre. Elle inclut le périmètre opérationnel en phase travaux et en phase de fonctionnement. Elle concerne toutes les opérations du projet global et est adaptée concernant les opérations suivantes : Tampon de 500 mètres autour de la zone d'emprise travaux des opérations de caractérisation et de surveillance environnementale associée aux forages profonds de caractérisation en limite de ZIOS (programme ZBS_FOND_UP1) ; Tampon de 100 mètres autour de la zone d'emprise travaux des opérations de caractérisation et de surveillance environnementale associée aux forages de reconnaissance de la formation des Calcaires du Barrois ; Zone d'emprise travaux des opérations de caractérisation et de surveillance environnementale associée aux zones de stockage des matériaux et bases vies (Maulan et Morley).	Cette aire d'étude correspond à la zone géographique permettant d'appréhender les effets d'emprise des ouvrages et installations ainsi que par les perturbations liées aux travaux et activités dans la zone d'intervention potentielle et sa proximité immédiate. Elle est utilisée pour acquérir une connaissance détaillée du milieu grâce à des inventaires de terrain (habitats naturels, faune et flore). Cette aire d'étude d'inventaires a été définie afin de recenser de manière exhaustive les habitats naturels et les habitats d'espèces à distance des effets d'emprise directs. Le tampon de 500 mètres favorise la prise en compte de milieux naturels spécifiques non impactés directement par le projet mais pouvant abriter une biodiversité inféodée à ces milieux. Les tampons autour des sondages/forages (ZBS_FOND_UP1 et forages de reconnaissance de la formation des Calcaires du Barrois ont été définis en fonction de leurs spécificités techniques, des contraintes de stockage de matériels qu'ils peuvent induire et de la durée de réalisation et d'utilisation pour les activités de surveillance et de caractérisation. Les tampons autour des autres sondages/forages ont été définis en fonction de leurs spécificités techniques, des contraintes de stockage de matériels qu'ils peuvent induire et de la durée de réalisation et d'utilisation pour les activités de caractérisation.et de surveillance Ainsi, cette aire d'étude permet d'appréhender les atteintes aux fonctionnalités écologiques du territoire, en considérant les éléments nécessaires au bon accomplissement du cycle biologique des espèces.
Éloignée	Aire d'étude qui correspond à un cercle de 30 km de rayon centré sur la zone puits du centre de stockage Cigéo. Elle intègre l'ensemble des opérations du projet global Cigéo.	Cette aire d'étude est définie de manière à intégrer l'ensemble des effets potentiels du projet global Cigéo notamment sur les espèces à domaine vital important comme les oiseaux et les chauves-souris. La distance de 30 km est justifiée par les capacités maximales de déplacements quotidiens des individus entre leur gîte et leur zone de chasse. Elle est axée sur le centre de stockage Cigéo qui est l'opération qui présente les incidences les plus fortes sur ces espèces. Au nord-ouest, la délimitation de l'aire d'étude éloignée du milieu naturel s'étend à plus de 30 km, afin de suivre le tracé de l'aire d'étude éloignée du milieu physique.
Rapprochée		L'aire d'étude éloignée du milieu naturel est utilisée pour recenser les enjeux et incidences les plus étendus liés aux zonages réglementaires ou d'inventaires du milieu naturel et étudier l'écologie de certaines espèces à grands déplacements (oiseaux, mammifères terrestres, chiroptères). C'est la zone d'influence du projet vis-à-vis des sites Natura 2000. Cette aire d'étude permet aussi d'identifier les zones à enjeux à éviter lors du choix des variantes d'adduction d'eau.
Spécifique	Aire d'étude spécifique de la ligne 400 kV qui s'étend sur 500 mètres de part et d'autre de la portion de ligne électrique de 124 km concernée par les travaux de sécurisation.	

La zone d'intervention potentielle (ZIP) du centre de stockage recouvre les surfaces sur lesquelles les travaux ou installations sont susceptibles de s'étendre en surface de façon potentielle, provisoire ou définitive (périmètre prévisionnel des travaux, installations de chantier…).

La zone potentielle de travaux (ZPT) de la ligne ferroviaire 027000 recouvre les surfaces sur lesquelles les travaux ou installations sont susceptibles de s'étendre en surface de façon potentielle, provisoire ou définitive (périmètre prévisionnel des travaux, installations de chantier…).

Concernant les continuités écologiques, une zone tampon de 10 km de part et d'autre de la zone d'intervention potentielle du projet global Cigéo est utilisée pour recenser leurs enjeux, notamment *via* la réalisation d'une modélisation des continuités existantes.

VARIATIONS DE LA PRESSION D'INVENTAIRE

Au sein de l'aire d'étude immédiate de la biodiversité, il convient de préciser que la pression des inventaires naturalistes est plus forte sur les zones d'implantation connues que sur les « fuseaux d'études des variantes » pour les opérations de la déviation de la route départementale D60/960 et l'opération d'alimentation électrique. Ce n'est qu'à l'issue des phases de concertation préalable que les inventaires détaillés seront réalisés. La présente étude d'impact fera en effet l'objet, conformément à ce qui est explicité dans le chapitre 3.2.1 du volume I de la présente étude d'impact, d'actualisations au fur et à mesure de l'évolution des connaissances de l'ensemble des opérations du projet global, de l'intégration des conclusions des participations du public en cours ou à venir et de l'approfondissement de la conception du projet global.

Dans le cas des opérations de caractérisation et de surveillance environnementale, les zones qui ont fait l'objet d'inventaires de terrain en 2022, en complément de ceux déjà réalisés dans l'aire d'étude immédiate de la biodiversité correspondent à :

- une zone tampon de 500 mètres autour de chaque forage profond de caractérisation en limite de ZIOS (programme ZBS_FOND_UP1) ;
- une zone tampon de 100 mètres autour de chaque forage de reconnaissance de la formation des Calcaires du Barrois.

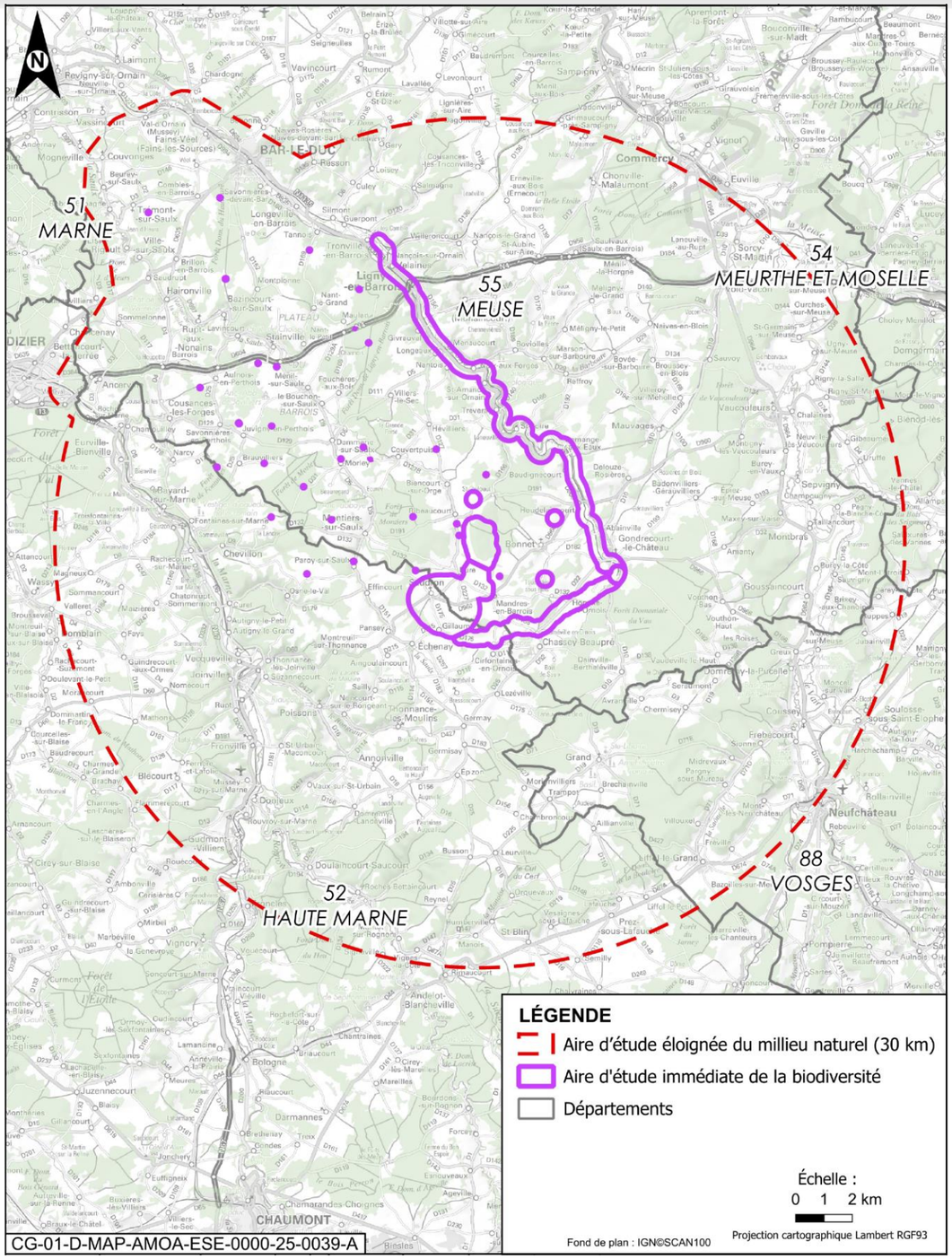


Figure 1-8 Aires d'étude de la biodiversité et du milieu naturel

1.2.2.3 Définition des aires d'étude des facteurs relatifs au milieu humain

Ce chapitre présente les aires d'étude des facteurs suivants qui participent à la description du milieu humain : population et socio-économie, réseaux, déchets radioactifs, déchets conventionnels, risques technologiques et sites et sols potentiellement pollués, infrastructures de transport, cadre de vie et planification territoriale. L'aire d'étude immédiate est commune pour ces facteurs. Quatre aires d'étude rapprochées et deux aires d'étude éloignées sont considérées en fonction du facteur concerné comme présenté dans le tableau ci-après et illustré sur la figure 1-9.

À noter que certaines aires d'études se superposent. Cartographiquement, c'est l'aire d'étude la plus étendue qui apparaît au-dessus et dont on voit la couleur qui masque celle des autres aires d'étude. Un encart est proposé pour l'aire immédiate afin d'avoir une juste visualisation de la totalité de cette aire.

Tableau 1-8 Définition des aires d'étude du milieu humain

Aire d'étude	Description	Justification
Immédiate	Aire d'étude centrée sur la zone d'implantation potentielle envisagée pour les opérations du projet global Cigéo dont l'implantation ou ses variantes sont arrêtées, augmentée d'une zone de 500 mètres de part et d'autre. Elle inclut le périmètre opérationnel en phase travaux et en phase de fonctionnement.	• cette aire d'étude correspond à la zone d'étude permettant d'appréhender les effets d'emprise des ouvrages et installations ainsi que par les perturbations liées aux travaux et activités dans la zone d'intervention potentielle et à sa proximité immédiate ; • elle permet d'analyser les effets sur les activités économiques et l'habitat au niveau local (effets sur les constructions existantes et augmentation de fréquentation/de développement de l'habitat induits par le projet au plus proche de celui-ci) ; • cette aire d'étude comprend les travaux de rétablissement des réseaux interceptés (réseau électrique, téléphonique, eau et assainissement et réseaux divers...) ou créés ; • elle intègre le centre de stockage Cigéo et la ligne ferroviaire 027000 comprenant les installations de transport et de chargement/déchargement des colis de déchets radioactifs, en vue de leur stockage ; • cette aire d'étude permet de vérifier l'absence de site de gestion des déchets ou de sites pollués ou potentiellement pollués dans la zone d'intervention potentielle, et de risques technologiques à prendre en compte dans la conception du projet. Elle est représentative de la zone susceptible d'être affectée pendant les travaux de construction (exemple : production de déchets et mise en dépôts de matériaux inertes liés aux travaux autour des opérations du projet). Par ailleurs, c'est dans cette aire que les principaux risques du projet global Cigéo sont recensés ; • cette aire permet une analyse ciblée des effets directs sur les infrastructures perturbées par les différentes opérations du projet et donc à rétablir ; • c'est la zone la plus susceptible d'être affectée par des nuisances acoustiques vibratoires, lumineuses qui peuvent être ressenties à cette distance et des champs électromagnétiques qui ne sont plus mesurés au-delà d'une centaine de mètres. Au-delà, la distance les atténue fortement ; • cette aire d'étude est utilisée pour analyser la compatibilité avec l'occupation locale des sols et l'incidence sur le développement de l'urbanisation au plus proche des opérations du projet global.

Aire d'étude	Description	Justification
Rapprochée	**Facteurs infrastructures de transport et cadre de vie** : aire d'étude du projet global Cigéo à l'échelle de l'aire de modélisation du trafic routier incluant la ligne ferroviaire 027000. Cette aire s'étend de Commercy au nord, Bologne au sud, Thuilley-aux-Groseilles à l'est et Joinville à l'ouest. Deux zones ponctuelles en extrémité nord sont liées à deux sondages du Barrois.	• cette aire d'étude intègre les déplacements domicile-travail et les approvisionnements locaux notamment ; • elle intègre les effets acoustiques et vibratoires liés à l'augmentation des trafics routiers, ainsi que pour les incidences vibratoires les plus éloignées pendant la période de travaux de creusement de l'installation souterraine (tirs à l'explosif, vibrations des tunneliers pour le creusement des galeries du site, etc.). Elle intègre également l'aire d'influence des nuisances lumineuses qui peuvent être perceptibles jusqu'à 2 km.
	Facteur population, emploi et activités économiques : aire d'étude du projet global Cigéo de 50 km autour du centre de stockage.	• cette aire d'étude permet d'appréhender les enjeux suivants : évolution démographique locale, création d'emplois directs et indirects (prestataires, services, etc.), création d'entreprises, etc. Elle est définie en considérant des statistiques nationales qui indiquent que 90 % des salariés effectuent un trajet de 50 km entre leur domicile et leur lieu de travail (centre de stockage Cigéo générateur d'emploi) ; • cette aire intègre les commerces et entreprises à proximité des autres opérations du projet global Cigéo dont la fréquentation pourrait augmenter durant les phases travaux. À noter que certaines données présentées dans l'aire d'étude rapprochée s'appuient sur les SCoT du Pays Barrois et Haut-Marnais, et permettent d'apporter des précisions complémentaires. Certaines analyses peuvent donc porter sur des secteurs qui diffèrent du cercle de 50 km autour du projet.
	Facteur planification territoriale et aménagement du territoire : aire d'étude du projet global Cigéo incluant les SCOT du pays Barrois, de nord Haute-Marne et de Commercy-Void-Vaucouleurs (5, 6).	Cette aire d'étude permet d'analyser la compatibilité et la cohérence du projet global Cigéo avec les grandes orientations retenues pour les différents territoires et permet d'évaluer les éventuelles incidences sur l'urbanisation future de ces territoires (habitats, zones d'activités…).
	Facteurs réseaux, risques technologiques : aire d'étude du projet global Cigéo incluant les communes d'implantation des infrastructures de surface du projet global Cigéo (le centre de stockage de Cigéo, la mise à niveau de la ligne ferroviaire 027000 et la déviation de la route départementale D60/960) et des trois captages participant à l'adduction en eau du centre de stockage Cigéo avec leurs périmètres de protection associés. Les zones ponctuelles discontinues correspondent à des opérations de caractérisation et de surveillance environnementale.	Cette aire d'étude est commune à celle du milieu physique et du paysage/patrimoine pour ne pas multiplier les aires d'étude. Elle comprend la zone d'analyse des variantes pour l'analyse des tracés des réseaux d'adduction en eau potable. Elle est utilisée pour analyser les principaux risques technologiques, réseaux et sites pollués et potentiellement pollués qui serviront dans le cadre de l'analyse de ces variantes de tracé.
20 km	**Facteur population, emploi et activités économiques** : aire d'étude du projet global Cigéo de 20 km autour du centre de stockage.	Une aire d'étude de 20 km est réalisée autour du centre de stockage. Elle correspond à 60 % des trajets entre le domicile et le lieu de travail au niveau national. Cette aire d'étude concerne plus spécifiquement le centre de stockage. Il ne s'agit pas donc à proprement parler d'une aire d'étude rapprochée.
Éloignée	Aire d'étude à l'échelle de la région Grand Est toute entière.	• étant donné l'ampleur du projet global Cigéo, des effets potentiels sur la population, l'emploi et les activités économiques sont envisageables à l'échelle de la Région Grand Est tout entière, notamment sur l'attractivité du territoire, la création et la structuration d'activités spécifiques (spécialisation des entreprises, création de pôles d'activité) ; • la gestion des réseaux peut relever de documents de planification régionaux et des effets potentiels sont envisageables à l'échelle de la Région Grand Est, Cette aire intègre l'ensemble de la portion de ligne 400 kV concernée par les travaux de sécurisation ; • concernant les déchets radioactifs, cette aire d'étude intègre le Centre de stockage de l'Aube (CSA) et le centre de regroupement d'entreposage et de stockage (Cires) qui accueilleront les déchets de fonctionnement et de maintenance du centre de stockage Cigéo ; • concernant les déchets conventionnels, le Plan régional de prévention et de gestion des déchets (PRPGD) programme les modalités de traitement des déchets conventionnels en fonction des objectifs de développement à l'échelle de la région Grand Est. Ce plan constitue l'annexe n° 7 Schéma régional d'aménagement durable et d'égalité des territoires (SRADDET) (7) ; • concernant la planification territoriale, cette aire est régie par le Schéma régional d'aménagement de développement durable et d'égalité des territoires (SRADDET) du Grand Est (8). La prise en compte de ce niveau administratif et géographique permet de considérer d'éventuelles incidences sur la structuration et le développement du territoire de la Région. C'est également l'aire d'étude éloignée à l'échelle de la région Grand Est qui est utilisée pour analyser les incidences socio-économiques.
	Aire d'étude éloignée étendue aux parties nord, est et sud-est de la France où sont effectuées les opérations d'expéditions et de transports des déchets radioactifs.	Cette aire d'étude intègre les sites actuels d'entreposage des déchets radioactifs HA et MA-VL chez les producteurs et les opérations d'expédition et de transport des déchets depuis ces sites. Elle permet d'étudier les incidences liées au trafic généré par le transport des colis de déchets radioactifs depuis les différents sites d'expédition sur les infrastructures de transport concernées par l'acheminement (réseau ferré et routier).

Aire d'étude	Description	Justification
		Elle intègre les zones susceptibles d'être affectées par une éventuelle très faible incidence acoustique ou vibratoire liée au trafic généré par le transport des colis de déchets radioactifs depuis les différents sites d'expédition sur les infrastructures de transport concernées par l'acheminement (réseau ferré et routier).
Spécifique	Aire d'étude spécifique de la ligne 400 kV qui s'étend sur 500 mètres de part et d'autre de la portion de ligne électrique de 124 km concernée par les travaux de sécurisation.	

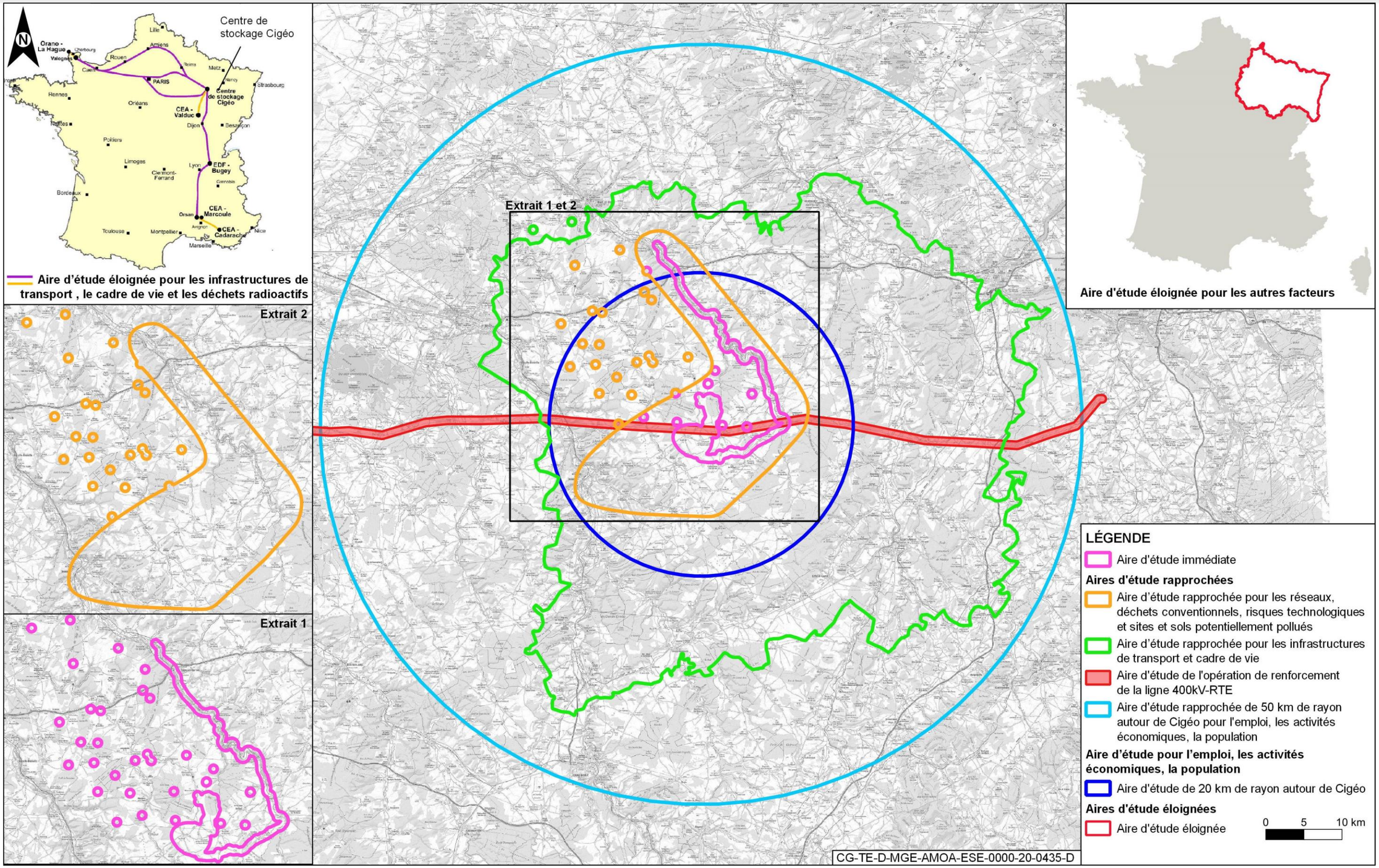


Figure 1-9 *Aires d'étude du milieu humain*

1.2.2.4 Définition des aires d'étude du facteur activités agricoles et sylvicoles

La liste des aires d'étude utilisées et leur description sont indiquées dans le tableau 1-9 et sur la figure 1-10.

Tableau 1-9 Définition des aires d'étude des activités agricoles et sylvicoles

Aire d'étude	Description	Justification
Immédiate agricole et sylvicole (zone d'intervention potentielle)	Aire d'étude correspondant à la zone d'intervention potentielle du centre de stockage Cigéo sur laquelle les travaux ou installations sont susceptibles de s'étendre en surface.	Cette aire d'étude correspond à la zone susceptible d'avoir d'importants effets directs compte tenu de l'ampleur des surfaces soustraites pour l'exploitation agricole ou forestière.
Rapprochée agricole	Aire d'étude agricole constituée des sept communes sur lesquelles les terres cultivées sont prélevées : Cirfontaines en Ornois, Gillaumé, Saudron, Bonnet, Bure, Gondrecourt-le-Château, Horville en Ornois, Mandres-en-Barrois.	Cette aire d'étude permet d'appréhender les effets liés à la consommation de surfaces agricoles sur les communes d'implantation du centre de stockage Cigéo. Elle couvre les variantes envisagées pour l'implantation du poste de transformation 400 kV et les liaisons souterraines associées ainsi que les variantes envisagées pour la déviation de la route départementale D60/960.
Rapprochée sylvicole	Aire d'étude sylvicole constituée des deux communes sur lesquelles les surfaces boisées sont prélevées : Bonnet et Mandres-en-Barrois.	Cette aire d'étude permet d'appréhender les effets liés à la consommation de surfaces sylvicoles sur les communes concernées par des surfaces boisées prélevées par le projet.
Cantonale	Aire d'étude associée aux quatre anciens cantons (trois en Meuse : Gondrecourt-le-Château, Montiers-sur-Saulx, Ligny-en-Barrois et un en Haute-Marne : Poissons)	• les quatre anciens cantons ont été retenus car ils couvrent les périmètres d'échange d'agrofournitures et de collecte céréalières des exploitations agricoles concernées par les emprises du centre de stockage Cigéo. Ces infrastructures des filières sont en particulier les silos agricoles, les concessionnaires de machinisme agricole, les ateliers de réparation, les magasins de pièces d'entretien et d'équipement d'élevage, les fromageries. Au-delà de ce périmètre, les échanges sont plus diffus. Ce choix du périmètre d'anciens cantons a été privilégié pour assurer la continuité de l'analyse de données agricoles historiques avant le redécoupage cantonal de 2014.
Éloignée	Aire d'étude à l'échelle des départements de la Haute-Marne et de la Meuse.	• cette aire d'étude permet l'étude des effets sur l'économie agricole et sylvicole. La profession agricole est structurée au niveau départemental, c'est pourquoi cet échelon a été retenu pour l'aire d'étude éloignée. Elle intègre l'ensemble de la ligne 027000 ; • un zoom est fait sur le territoire regroupant les quatre anciens cantons de Gondrecourt-le-Château, Montiers-sur-Saulx, Ligny-en-Barrois situés en Meuse et de Poissons en Haute-Marne où sont principalement effectués les échanges liés à l'économie agricole locale (en particulier les silos agricoles, les acteurs d'agrofourniture et machinisme).
Spécifique	Aire d'étude spécifique de la ligne 400 kV qui s'étend sur 500 mètres de part et d'autre de la portion de ligne électrique 124 km concernée par les travaux de sécurisation.	

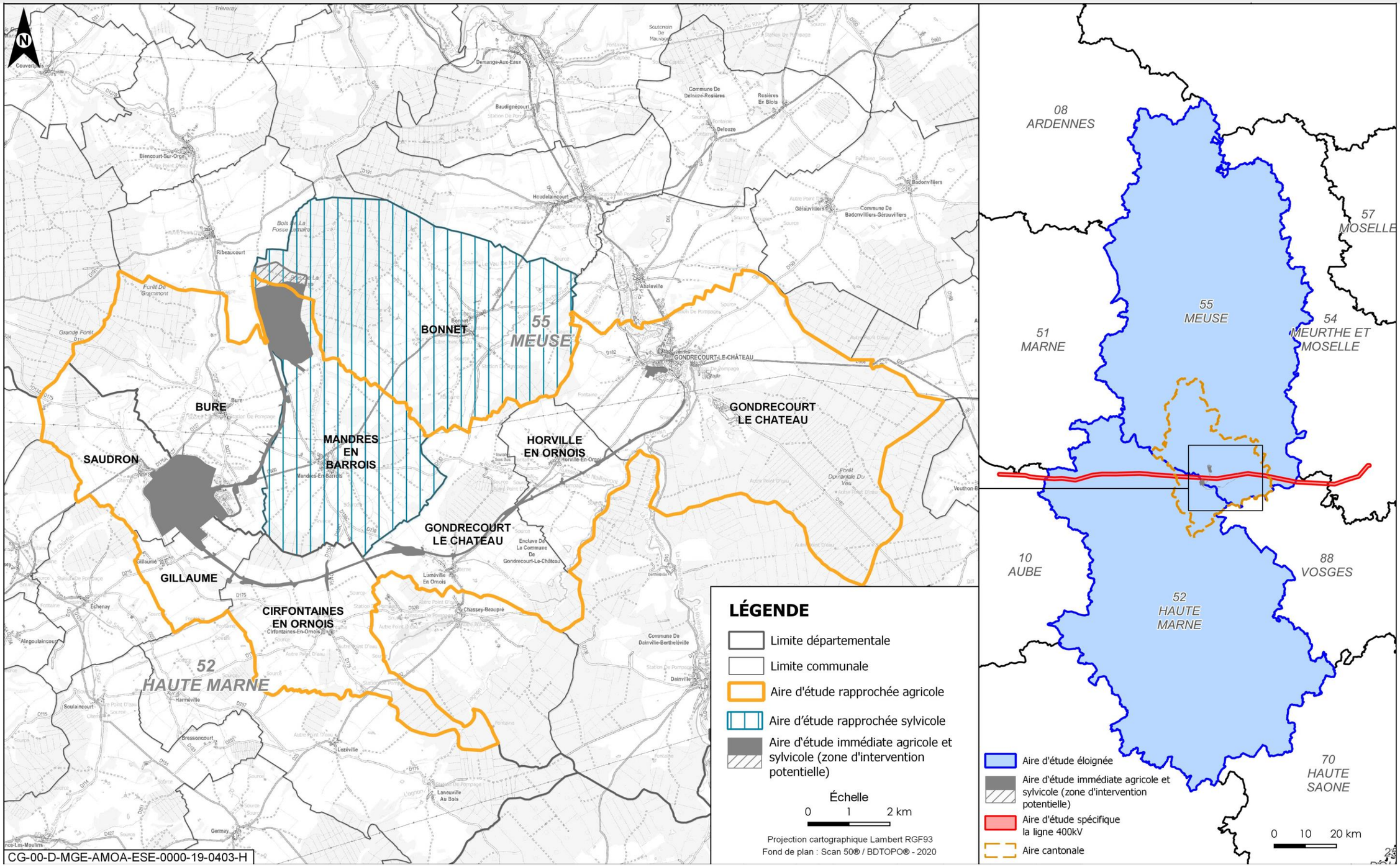


Figure 1-10 Aires d'étude des activités agricoles et sylvicoles

1.2.2.5 Définition des aires d'étude pour le paysage, le patrimoine culturel, le tourisme et les activités de loisirs

La liste des aires d'étude utilisées et leur description sont indiquées dans le tableau 1-6.

Tableau 1-10 Définition des aires d'étude pour le paysage, le patrimoine culturel, le tourisme et les activités de loisirs

Aire d'étude	Description	Justification
Immédiate	Aire d'étude centrée sur la zone d'implantation potentielle envisagée pour les opérations du projet global Cigéo dont l'implantation ou ses variantes sont arrêtées, augmentée d'une zone de 500 mètres de part et d'autre. Elle inclut le périmètre opérationnel en phase travaux et en phase de fonctionnement.	Cette aire d'étude correspond à la zone susceptible d'être affectée par les effets d'emprise des ouvrages et installations ainsi que par les perturbations liées aux travaux et activités dans la zone d'intervention potentielle et à sa proximité immédiate. Cette aire d'étude est adaptée au recensement : • des périmètres de protection des monuments historiques (généralement de 500 mètres autour du monument) traversés par les opérations du projet global Cigéo ; • des éventuels sites classés/sites inscrits ; • des points de vue représentatifs du territoire (paysages lointain et proche).
Rapprochée	Aire d'étude du projet global Cigéo incluant les territoires susceptibles d'être affectés indirectement ou directement par le projet global Cigéo (sous-unités paysagères, communes).	Cette aire d'étude permet d'évaluer les modifications substantielles apportées par le projet global Cigéo sur le paysage et d'identifier tous les sites patrimoniaux et activités de loisirs susceptibles d'être impactés par le projet global Cigéo. La description des unités paysagères est effectuée à l'échelle de cette aire d'étude rapprochée. La description des sous-unités paysagère et l'analyse paysagère sont quant à elles réalisées sur une « zone de visibilité » au sein de l'aire d'étude rapprochée, centrée sur les territoires susceptibles d'être affectés visuellement directement ou indirectement par le projet global Cigéo. À noter que les zones descenderie et zone puits sont implantées sur le plateau Barrois. Ce plateau étant vallonné et partiellement boisé, les effets de covisibilité avec les nouvelles installations du projet global Cigéo sont donc vite masquées par le relief et la végétation au sein du périmètre rapproché.
Éloignée	Aire d'étude du projet global Cigéo qui reprend les départements concernés par le projet global Cigéo : Meuse, Haute Marne, Aube, Vosges et Meurthe-et-Moselle.	Cette aire d'étude permet de recenser les unités de paysage dans lesquelles s'implante le projet global Cigéo.
Spécifique	Aire d'étude spécifique de la ligne 400 kV qui s'étend sur 500 mètres de part et d'autre de la portion de ligne électrique 124 km concernée par les travaux de sécurisation.	

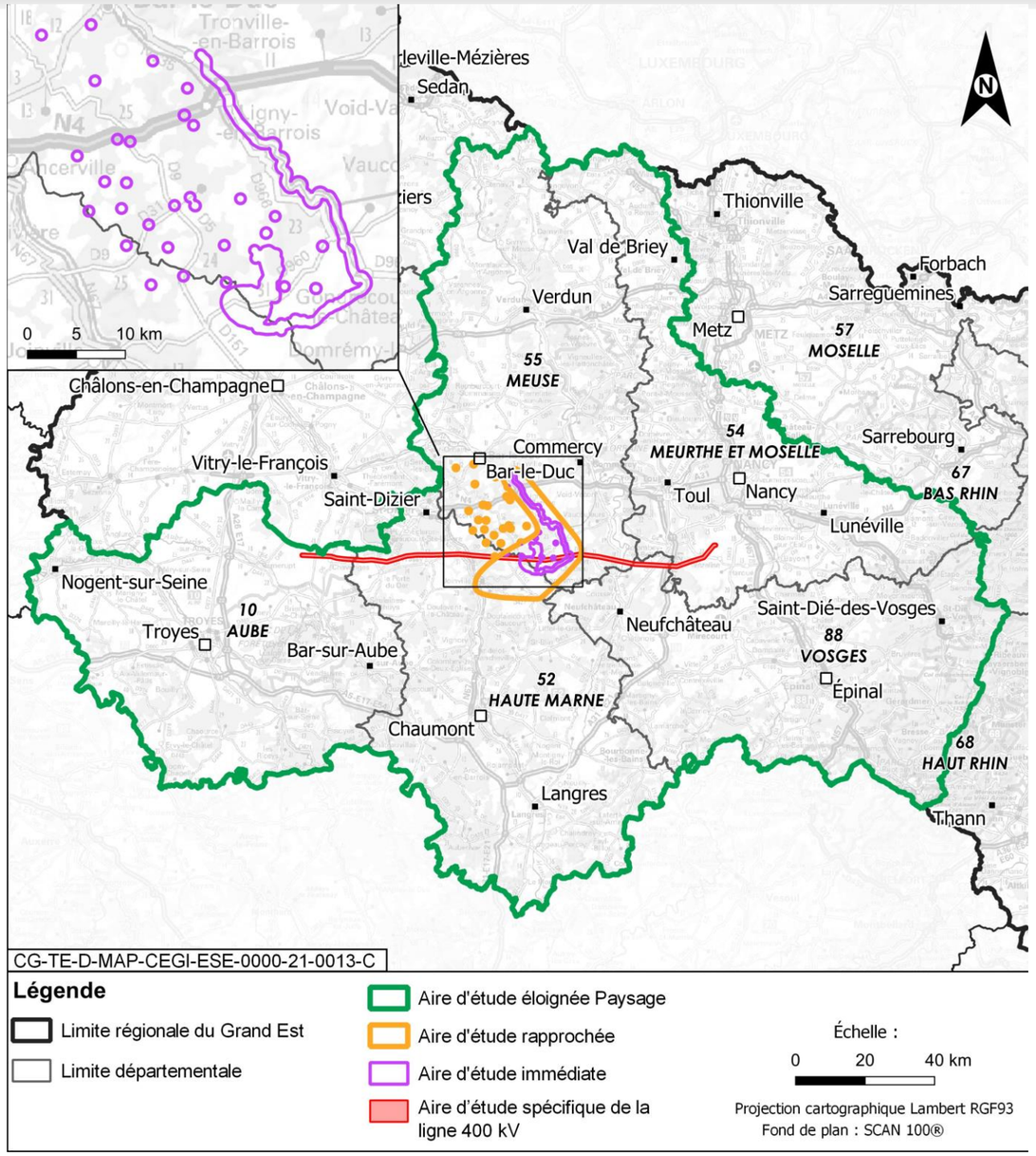


Figure 1-11 Aires d'étude du paysage

1.2.2.6 Définition des aires d'étude pour les interactions

Les interactions et services écosystémiques ont été évalués à travers deux aires d'étude : immédiate et éloignée (cf. Figure 1-12).

La liste des aires d'étude utilisées et leur description sont indiquées dans le tableau 1-6.

Tableau 1-11 Définition des aires d'étude pour les interactions

Aire d'étude	Description	Justification
Immédiate	Aire d'étude centrée sur la zone d'implantation potentielle envisagée pour les opérations du projet global Cigéo dont l'implantation ou ses variantes sont arrêtées, augmentée d'une zone de 500 mètres de part et d'autre. Elle inclut le périmètre opérationnel en phase travaux et en phase de fonctionnement.	Cette aire d'étude correspond à la zone susceptible d'être affectée par les effets d'emprise des ouvrages et installations ainsi que par les perturbations liées aux travaux et activités dans la zone d'intervention potentielle et à sa proximité immédiate. Elle permet l'analyse des interactions et des incidences sur les services écosystémiques à l'échelle locale.
Éloignée	Aire d'étude utilisée pour la biodiversité.	Cette aire d'étude permet d'identifier les interrelations entre les milieux du territoire sur lequel s'insère le projet global Cigéo.

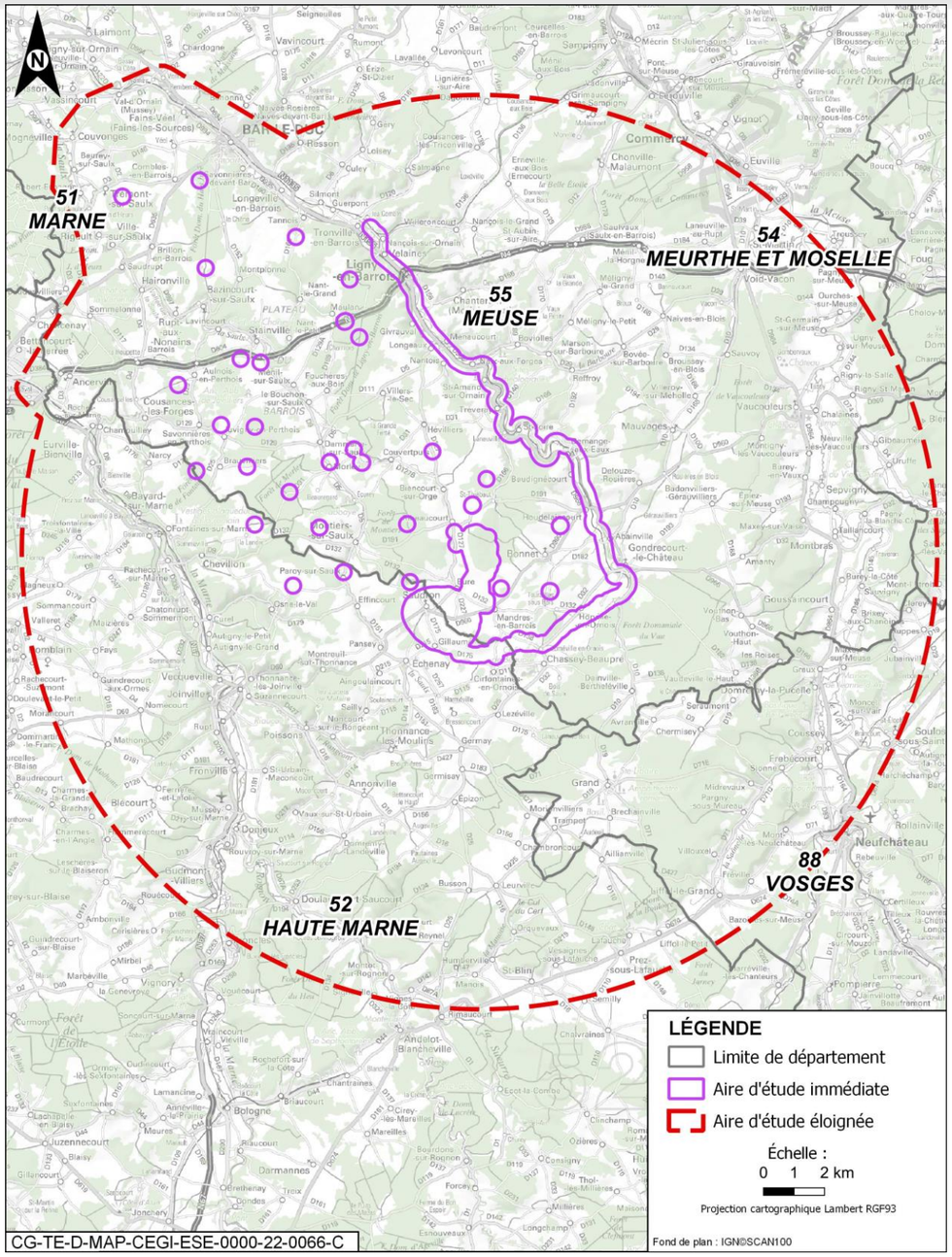


Figure 1-12 Aires d'étude pour les interactions

1.3 Traçabilité

Chaque nouvelle version de l'étude d'impact est attachée à une ou des demandes d'autorisation. L'objectif est de tracer les précisions apportées entre deux versions successives de l'étude d'impact, c'est-à-dire entre les versions N (version précédente) et N+1 (version actualisée) de l'étude d'impact.

Plusieurs indications permettent de suivre les précisions apportées à l'étude d'impact dans le cadre des actualisations :

- dans le texte, une bordure verte met en exergue les chapitres correspondant à des précisions apportées pour actualiser l'étude d'impact ; les corrections mineures de forme, de reformulation et de mise en cohérence ne sont pas matérialisées ;
- un tableau de la structure de l'étude d'impact disponible dans le sommaire général de l'étude d'impact ; il présente spécifiquement les évolutions de la structure du document : création, déplacement, regroupement de chapitre ou paragraphe. Il permet d'établir facilement une correspondance entre la précédente version de l'étude d'impact et l'étude d'impact actualisée. Ces restructurations et évolutions du sommaire ne font pas l'objet d'une mise en exergue dans le texte par la bordure verte afin de ne pas alourdir la lecture du dossier ;
- un tableau de suivi des principales évolutions du contenu de l'étude d'impact disponible en fin de chaque volume pour résumer les précisions apportées à l'étude d'impact actualisée. Il liste, selon la structure de l'étude d'impact actualisée, les évolutions apportées sur le fond et mises en exergue dans le texte par la bordure verte comme évoquées en premier point.

Concernant les figures et tableaux, en cas d'évolution une bordure apparaît seulement au niveau de la légende qui référence ces figures et tableaux.

Le tableau proposé pour le suivi des évolutions de l'étude d'impact est structuré en référence au sommaire actuel de l'étude d'impact actualisée objet du présent dossier et reprend les mises à jour tracées au sein du texte selon les catégories suivantes :

- les précisions que les maîtres d'ouvrage apportent aux caractéristiques détaillées des opérations composant le projet global ;
- l'évolution de l'état initial de l'environnement en lien avec la date de dépôt de l'étude d'impact ;
- les évolutions réglementaires ;
- les réponses apportées aux remarques émises par l'Autorité environnementale ainsi que celles des services de l'État lors de l'instruction de la précédente étude d'impact.

Les corrections mineures de forme, de reformulation et de mise en cohérence ne sont pas rappelées dans ce tableau.

Il permet également, en complément du tableau disponible dans le sommaire général de l'étude d'impact, d'identifier les éventuelles suppressions de parties de texte.

CAS PARTICULIER DE LA TRADUCTION GRAPHIQUE DANS LA PRÉSENTE EI DAC

Les éléments graphiques permettent de tracer :

- par des barres vertes en marge du texte, toutes les modifications ou ajouts apportés à l'étude d'impact du dossier d'enquête publique préalable à la déclaration d'utilité publique du centre de stockage Cigéo, à l'exception des corrections mineures de forme et de mise en cohérence qui ne sont pas matérialisées (étude d'impact initiale/EI-DUP (9)). Ces évolutions cumulent les modifications apportées à l'étude d'impact dans le cadre de la première (EI-DAC1) et de la deuxième actualisation (EI-DR0 (10)), telles que présentées dans l'étude d'impact associée au dossier d'enquête publique unique portant sur les premières opérations de caractérisation et de surveillance environnementale ;
- par des barres bleues en marge du texte, les modifications ou ajouts apportés à l'étude d'impact associée aux dossiers déposés le 06 mars 2024 portant sur les premières opérations de caractérisation et de surveillance environnementale (deuxième actualisation/EI-DR0).

2

Atmosphère - Méthodes

2.1 Caractérisation du milieu atmosphérique 32
2.2 Conditions météorologiques locales 32
2.3 Vulnérabilité au changement climatique 34
2.4 Énergie et gaz à effet de serre 35
2.5 Qualité de l'air 41

2.1 Caractérisation du milieu atmosphérique

Les propriétés atmosphériques, paramètres météorologiques (vent, température, couverture nuageuse…), mais aussi la composition gazeuse et particulaire de l'atmosphère, varient à de nombreuses échelles spatio-temporelles sous l'effet de processus naturels, mais également de perturbations anthropiques. Les fluctuations météorologiques locales dépendent de processus de grandes échelles liés aux grands équilibres climatiques et à la circulation générale de l'atmosphère, mais intègrent également des effets locaux liés notamment aux hétérogénéités de surface (topographie, type d'occupation de sol, de couvert, etc.).

L'implication d'échelles multiples, du local au global, de la minute à la décennie, dans les processus atmosphériques et dans les variations des propriétés atmosphériques et leurs incidences potentielles nécessite de mettre en place et de maintenir des réseaux d'observation incluant des mesures couvrant ces échelles. En effet, l'observation des propriétés atmosphériques ne livre d'informations que grâce à une couverture spatiale offerte par les réseaux d'observations (fondamentaux notamment pour la prévision météorologique) et par des séries temporelles longues permettant d'accéder à des descriptions statistiques. Cela implique de partager des protocoles communs d'observation et mettre en commun les données recueillies.

Au niveau international, les principaux programmes d'observations et de suivi météorologiques sont définis et encadrés par l'Organisation mondiale de la météorologie (OMM). Ils se déclinent régionalement et nationalement par le biais des agences météorologiques nationales telles que Météo-France. Certains programmes sont dédiés au suivi climatologique notamment le *World Weather Watch Program* et le Glob*al Atmosphere Watch* (GAW) *Program*.

La nécessaire transcription des directives européennes a conduit la France à adopter la loi sur l'air et l'utilisation rationnelle de l'énergie (11). Dans le cadre de cette loi la France a choisi de remplir certaines de ces obligations de surveillance par le biais d'associations agréées de surveillance de la qualité de l'air (AASQA) au niveau régional.

L'Andra a défini et mis en place, autour du projet global Cigéo, un programme de caractérisation atmosphérique sur le long terme qui s'intègre dans les grands réseaux nationaux et internationaux. Le tableau 2-1 présente les différents partenaires et les réseaux impliqués par grande famille de paramètres.

Tableau 2-1 Partenaires de l'Andra et réseaux impliqués par grande famille de paramètres atmosphériques

Paramètres	Partenaire	Réseau France	Réseau Europe
Pression, température, humidité, vent, précipitations, rayonnement	Météo-France	RADOME	WMO
Gaz effet de serre CO_2, CH_4, N_2O, traceurs	LSCE	RAMCES	ICOS
Polluants SO_2, CO, NOx, O_3 et PM_{10}/$PM_{2,5}$	Atmo Grand Est	MERA	EMEP
Particules : masse, spectre dimensionnel, propriétés optiques, composition…	IGE/LAMP	ATMOS	ACTRIS
Radioactivité gaz, aérosols et dépôts	IRSN	OPÉRA	Ring of 5

Météo-France est le service météorologique et climatologique national. Les missions de base de Météo-France comprennent :

- la sécurité météorologique des personnes et des biens grâce notamment aux dispositifs de Vigilance météorologique à l'élaboration d'une carte de vigilance météorologique ;
- le développement et la maintenance d'un réseau d'observation ;
- la collecte et le traitement de données climatologiques ;
- la prévision du temps ;
- l'élaboration de projections climatiques ;
- la recherche dans les domaines de la météorologie et du climat.

ATMO Grand Est est une association à but non lucratif agréée par le ministère chargé de l'Environnement. Elle est en charge de la surveillance de la qualité de l'air dans la région Grand Est. Afin de répondre au mieux aux enjeux majeurs que sont la protection de la santé des populations et la protection de l'environnement, ATMO Grand Est mène les missions suivantes :

- surveiller et informer sur l'état réglementaire de la qualité de l'air de la région Grand Est ;
- accompagner les décideurs dans l'élaboration et le suivi des plans d'actions visant à améliorer la qualité de l'air ;
- apporter un appui technique à ses membres et des éléments de diagnostic en situations d'urgence (épisodes de pollution, incidents ou accidents industriels) ;
- améliorer les connaissances sur les phénomènes liés à la pollution atmosphérique ;
- inciter à l'action en faveur d'une amélioration de la qualité de l'air.

2.2 Conditions météorologiques locales

2.2.1 État initial

La conception d'un projet de l'ampleur du centre de stockage Cigéo nécessite de disposer de données fiables. À ce titre, les données de plusieurs stations météorologiques sont étudiées, de manière à fiabiliser le dimensionnement.

Les paramètres météorologiques pris en compte dans cette étude sont la pluviométrie, la température, la vitesse et de la direction du vent, l'humidité relative, la durée d'insolation et de l'évapotranspiration.

Les données météorologiques extrêmes sont celles enregistrées par Météo-France.

L'étude de ces paramètres est primordiale puisqu'ils conditionnent les modèles de dispersion atmosphérique, l'évaluation de la pluie de référence, la modélisation hydrodynamique d'écoulement des eaux souterraine, etc.

La climatologie locale a été déterminée grâce aux relevés de stations météorologiques agréées Météo-France (cf. Chapitre 2 du volume III de la présente étude d'impact) qui sont :

- la station météorologique de Saint-Dizier gérée par le réseau RADOME qui dispose de relevés depuis 1953 pour certains paramètres et qui est située à environ 35 km au nord-ouest du centre de stockage Cigéo ;
- la station atmosphérique d'Houdelaincourt implantée par l'Andra dispose de relevés depuis 2011, et est située plus proche à environ 2,5 km de la ligne ferroviaire 027000, environ 10 km de la zone puits et environ 15 km de la zone descenderie ;
- la station météorologique de Cirfontaines-en-Ornois située à environ 7 km de la zone puits et environ 5 km au sud de la zone descenderie qui enregistre uniquement les données de précipitations et de température ; elle dispose de données depuis 1959.

2.2.1.1 La station météorologique de Saint-Dizier

La station météorologique de Saint-Dizier, agréée Météo-France, acquiert des données météorologiques depuis les années 1920. Cette station, appartenant au réseau RADOME (Réseau d'acquisition de données et d'observations étendu), est une station de type 0 c'est-à-dire qu'il s'agit d'une station qui effectue des observations quotidiennes et réalisées par du personnel sur place.

Située à environ 35 km au nord-ouest du centre de stockage Cigéo et à 139 mètres d'altitude, la station de Saint-Dizier est localisée dans un contexte topographique différent du plateau Barrois. Les statistiques climatiques ainsi que les observations météorologiques sont influencées par cette différence de contexte. La station de Saint-Dizier seule ne peut donc pas être considérée comme représentative pour l'établissement des statistiques climatiques.

» RÉSEAU RADOME

Les stations météorologiques professionnelles du réseau de Météo-France, appelé réseau RADOME (Réseau d'acquisition de données et d'observations étendu), sont au nombre de 554 en métropole (une tous les 30 km) et 67 en Outre-Mer.

Ces stations mesurent de façon automatique les paramètres de base que sont la température et l'humidité sous abri, les précipitations et le vent (vitesse et direction) à une hauteur de 10 mètres.

Certaines stations mesurent des paramètres complémentaires comme la pression, l'humidité dans le sol, le rayonnement, la visibilité, l'état du sol, etc.

Les mesures sont effectuées régulièrement et transmises toutes les six minutes, toutes les heures ou une fois par jour selon les paramètres et les besoins, au centre Météo-France de Toulouse.

Les stations météo sont classées selon six grands types, numérotés de 0 à 5 (12) :

- une station de type 0 ou 1 est une station qui effectue des observations quotidiennes et régulières par du personnel formé à cet effet (type 0) et sur place, ou par du personnel non spécialisé (type 1) ;
- une station automatique de type 2, ou 3, ou 5, effectue des mesures issues de capteurs et non des observations du temps comme le temps présent, les nuages... Une station de type 2 est interrogée quotidiennement. Une station de type 3 est une station automatique qui fait l'objet d'une exploitation en différé. Une station de type 5 est une station automatique dont l'interrogation est occasionnelle ;
- une station manuelle de type 4 fournit des mesures issues de relevés manuels.

Source : http://www.meteofrance.fr

Pour cette station, les normales saisonnières présentées dans le chapitre 2 du volume III de la présente étude d'impact portent sur la période 1980 à 2020. Les évènements extrêmes sont recensés depuis 1953.

Ces données météorologiques sont donc complétées par les données météorologiques acquises aux stations d'Houdelaincourt et de Cirfontaines-en-Ornois.

2.2.1.2 La station météorologique et atmosphérique d'Houdelaincourt

L'Andra a implanté la station atmosphérique sur les hauteurs de Houdelaincourt (Meuse) (cf. Figure 2-1), sous les vents dominants du centre de stockage Cigéo. Elle se trouve à environ 2,5 km de la ligne ferroviaire 027000, 10 km de la zone puits et environ 15 km de la zone descenderie. Cette station de type 1 appartient également au réseau Radome, et permet un suivi permanent et continu de la qualité de l'air et des conditions météorologiques.

Pour cette station, les données présentées dans le chapitre 2 du Volume III de la présente étude d'impact portent sur la période 2012 à 2020.

Elle fait d'ores et déjà partie intégrante :

- de l'observatoire pérenne de l'environnement de l'Andra ;
- du réseau des stations agréées Météo-France ;
- du réseau de surveillance de la qualité de l'air en Lorraine (ATMO Grand Est) ;
- de l'observatoire permanent de la radioactivité de l'air (réseau OPERA-Air) piloté par l'IRSN ;
- du réseau européen de surveillance des gaz à effet de serre (*Integrated Carbon Observation System*, ICOS) qui regroupe de nombreux autres acteurs scientifiques.

Les données de la station atmosphérique de Houdelaincourt alimentent ainsi chercheurs et institutions autour des thématiques de la surveillance de la qualité de l'air et du suivi climatique.

Les observations sont représentatives du fond régional et n'intègrent pas les nombreux effets locaux liés aux caractéristiques topographiques et aux hétérogénéités de surface. Elle est située à plus d'1 km de toutes sources de pollution locale, habitations, routes ou installations agricoles. Cette station a vocation à être la référence pour le fond atmosphérique régional autour du centre de stockage Cigéo.

Cette station n'a donc pas vocation à suivre les effets en champ proche autour des futures installations mais plutôt d'observer les changements de plus grandes échelles ainsi que les évolutions de fond. La représentativité recherchée et attendue va de la zone de l'observatoire pérenne de l'environnement (OPE) (240 km²) au grand quart nord-est de la France.

La station est située dans une parcelle clôturée de 2 ha. Elle comprend un mât météorologique de 120 mètres et des locaux raccordés aux réseaux électriques et informatiques. La réalisation des mesures, ainsi que l'analyse des données suivent des protocoles validés et permettent un partage des données dans le cadre de réseaux français et européens.

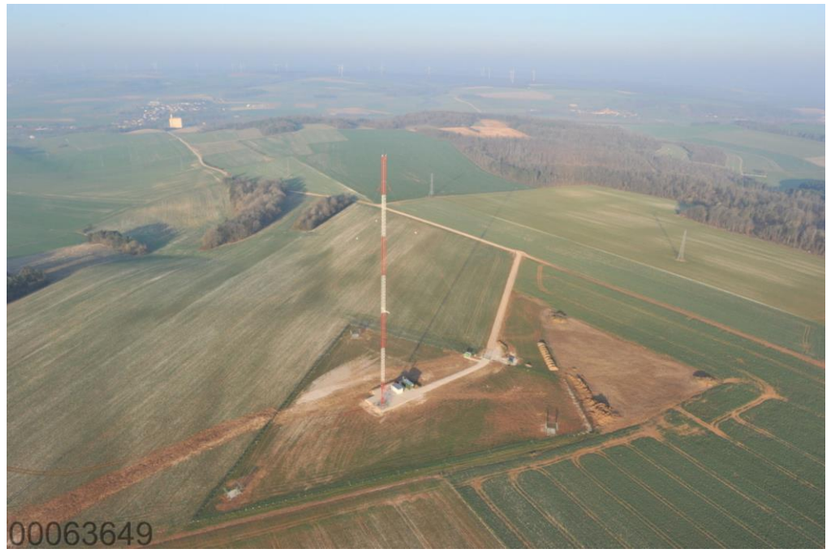


Figure 2-1 *Photographie aérienne illustrant la station atmosphérique d'Houdelaincourt et son environnement proche*

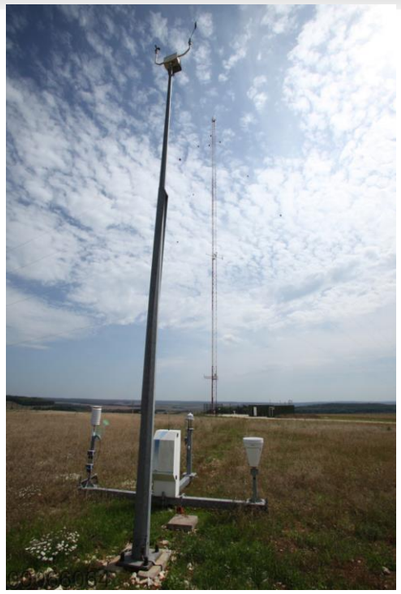


Figure 2-2 Station météorologique d'Houdelaincourt

Équipée de capteurs météorologiques (cf. Tableau 2-2), des mesures de température, d'humidité, de vent, de précipitations et de rayonnement y sont effectuées. Le suivi météorologique effectué est défini et encadré au niveau international par l'organisation mondiale de la météorologie (OMM), décliné nationalement et régionalement *via* les agences météorologiques nationales telles que Météo-France.

Tableau 2-2 Paramètres météorologiques mesurés à la station d'Houdelaincourt-Fréquences, prestataires et méthodes associées

Paramètres	Analyseur	Niveau	Fréquence de mesures	Réseau/partenaire
Précipitations	Pluviomètre Précis Mécanique	1 m	1 h/1 jour	RADOME/ Météo-France
Température	Sonde PT 100 Pyrocontrole	1 m	1 s/6 min/1 h	RADOME/ Météo-France
Vent à 10 mètres de hauteur par rapport au sol	Degréane Déolia 96	10 m	1 s/10 min/1 h	RADOME/ Météo-France
Humidité relative	Vaisala HMP45 D	1 m	1 s/6 min/1 h	RADOME/ Météo-France
Durée d'insolation	Non mesurée à Houdelaincourt			
Évapotranspiration	Non mesurée à Houdelaincourt			

Les paramètres non mesurés à Houdelaincourt sont pris en compte sur la station de Saint-Dizier.

» NOTE IMPORTANTE

La station d'Houdelaincourt est considérée comme la station de référence pour la rose des vents et la qualité de l'air pour le centre de stockage Cigéo.

La mesure des concentrations de gaz à effet de serre à l'état initial CO_2, CH_4, N_2O est réalisée dans le cadre d'une collaboration avec le LSCE (Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement) qui a permis d'installer et de faire fonctionner la première station atmosphérique du réseau international ICOS (*Integrated Carbon Observing System*) en France. Cette station intègre des mesures et prélèvements *in situ* à trois niveaux 10 mètres, 50 mètres et 120 mètres permettant d'estimer le gradient vertical proche de la surface. Des mesures météorologiques, vent, température, humidité relative et pression sont également réalisées à ces trois niveaux.

Les protocoles d'échantillonnage, de calibration et de distribution d'air, ainsi que les types d'analyseurs ont été établis dans le cadre de l'infrastructure ICOS d'observation des gaz à effet de serre et en respectant les objectifs de qualité de l'OMM (Organisation météorologique mondiale) (GAW, 2012). Les précisions/répétabilités des mesures requises de l'ordre du dixième de la partie par million (ppm) pour le CO_2 et du ppb (partie par milliard) pour le N_2O ne peuvent être atteintes qu'avec des analyseurs utilisant des méthodes spectroscopiques pointues telles que les méthodes *Cavity Ring Down Spectroscopy*. Le réseau européen ICOS a choisi ainsi un analyseur basé sur cette technologie pour le CO_2et le CH_4.

Les analyses en continu, à la fréquence horaire, des composés CO_2, CH_4, N_2O, et CO sont complétées par des prélèvements d'air en flacons (en doublon) qui sont analysés en laboratoire par GC/MS (chromatographie en phase gazeuse couplée à la spectrométrie de masse). La qualité des données produites par les analyseurs spectroscopiques et le système de calibration est donc évaluée grâce aux passages réguliers de gaz étalons indépendants mais également par comparaison aux analyses des échantillons d'air prélevés en flacons.

2.2.1.3 La station météorologique de Cirfontaines-en-Ornois

La station de Cirfontaines-en-Ornois est une station agréée Météo-France de type 2 qui acquiert des données depuis les années 1950. Elle est localisée à environ 7 km de la zone puits et 5 km au sud de la zone descenderie et se trouve à une altitude de 379 mètres.

Cette station météorologique mesure la température et les précipitations.

Pour cette station, les données présentées dans le chapitre 2 du volume III de la présente étude d'impact portent sur la période 1980 à 2020.

2.2.1.4 Risques météorologiques majeurs

Les risques météorologiques majeurs ont été recensés par des dossiers départementaux sur les risques majeurs (DDRM) de la Haute-Marne (13) et de Haute Meuse (14).

2.2.2 Incidences

Un recensement des incidences potentielles du projet global Cigéo sur le climat est réalisé. Ces incidences sont locales, communes et prises en compte dans la conception du projet.

Des mesures de réduction, telles que le respect des règles de l'art sont mises en place afin de limiter les incidences du projet global Cigéo sur le climat local.

La détermination des incidences résiduelles a été réalisée à dire d'expert.

2.3 Vulnérabilité au changement climatique

Une analyse de la vulnérabilité potentielle du projet global Cigéo aux risques météorologiques majeurs et à l'aggravation de ces risques du fait du changement climatique est réalisée.

Des mesures de réduction dans la conception du projet global Cigéo sont mises en place afin de limiter la vulnérabilité du projet au changement climatique. Ces dispositions de conception concernent les risques liés aux vents extrêmes, variations de températures, chutes de neige, foudre, fortes précipitations. La conception du centre de stockage Cigéo intègre de fait l'aggravation de ces risques liés au changement climatique, car celui-ci a pour conséquences d'amplifier les évènements climatiques extrêmes et d'en augmenter leur fréquence, et les risques météorologiques qui en résultent.

La détermination des incidences résiduelles a été réalisée à dire d'expert.

2.4 Énergie et gaz à effet de serre

2.4.1 État initial

2.4.1.1 Profil énergétique

Le profil énergétique de la région Grand Est est établi selon les chiffres régionaux sur l'énergie et les GES édités par ATMO Grand Est en 2020 pour l'année 2018 (15) ; et l'édition 2022 des chiffres clés de l'Observatoire climat air énergie du SCOT du Pays Barrois (données de 2020) (16).

2.4.1.2 Potentiel en énergies renouvelables

Les données présentées dans le chapitre 2 du volume III de la présente étude d'impact proviennent du bilan 2022 des chiffres clés des énergies renouvelables et de récupération en région Grand Est de la DREAL du Grand Est (données 2021) (17) et de l'édition 2022 des chiffres clés de l'Observatoire climat air énergie sur le territoire du SCOT du Pays Barrois (données 2020) (16).

2.4.1.3 Capacité de séquestration carbone

La capacité de séquestration de carbone par les sols et les écosystèmes présents dans l'aire d'étude éloignée est évaluée à partir des données bibliographiques tirées du rapport national d'évaluation de la séquestration de carbone par les écosystèmes en France (18) et du rapport de l'état des sols de France (19). Ces documents soulignent le fait que les stocks actuels de carbone, d'une part, et la séquestration annuelle de carbone, d'autre part, dépendent principalement du type d'écosystème, du type de climat et des pratiques de gestion de l'écosystème par l'Homme.

Les évaluations nationales de l'EFESE permettent de définir les stocks actuels de carbone et les capacités de séquestration de carbone des grands types d'écosystèmes. Le stock actuel de carbone correspond à la quantité de carbone actuellement stockée dans l'écosystème en tCO2e/ha. La capacité de séquestration de carbone (autrement dit l'intensité du puits de carbone) est le flux annuel moyen de carbone entre l'atmosphère et l'écosystème en tCO2e/ha/an. Ce flux est positif si l'écosystème est un puits de carbone et négatif s'il est une source de carbone.

L'aire d'étude éloignée étant soumise à un climat plutôt continental, seules les valeurs indiquées dans le rapport de l'EFESE (18) pour les écosystèmes suivants ont été retenues :

- forêts fermées continentales : stock actuel de l'ordre de 730 à 770 tCO_2/ha, dont la capacité de séquestration peut être qualifiée de très forte (intensité moyenne du puits de carbone des forêts métropolitaines de l'ordre de 5 tCO_2eq/an/ha) ;
- prairies continentales : stock actuel de l'ordre de 330 tCO_2e/ha, dont la capacité de séquestration peut être qualifiée de Modérée (intensité moyenne du puits de carbone de l'ordre de 0,4 tCO_2eq/an/ha à l'échelle nationale) ;
- écosystèmes urbains et artificialisés continentaux : stock actuel de l'ordre de 157 tCO2e/ha, dont la capacité de séquestration peut être qualifiée de nulle (intensité moyenne du puits de carbone de 0 tCO_2/an/ha à l'échelle nationale) ;
- cultures annuelles continentales : stock actuel de l'ordre de 249 tCO_2e/ha, dont la capacité de séquestration peut également être qualifiée de nulle (intensité moyenne du puits de carbone de l'ordre de 0 tCO_2/an/ha à l'échelle nationale).

Par ailleurs, les stocks de carbone dépendent aussi des types de sols sur lesquels reposent ces écosystèmes. Par exemple, d'après les données du Réseau de Mesure de la Qualité des Sols national présentées dans le rapport sur l'état des sols de France (19), les stocks de carbone actuels dans les 30 premiers centimètres des sols limoneux de cultures intensives tels que ceux du bassin parisien ou de l'aire d'étude éloignée sont qualifiés de faibles à moyens (40-50 t/ha), alors que dans les grandes régions forestières telle que les Vosges, ils sont qualifiés de moyennement élevés (50-70 t/ha). On peut alors affiner la capacité de séquestration de carbone des grands types d'écosystèmes ci-dessus par le type de sol sur lequel ils reposent, en particulier en fonction de leur classe de profondeur et de leur teneur en matière organique. À partir de la nature des différents types de sols présents dans l'aire d'étude éloignée, la capacité de séquestration des écosystèmes a pu être évaluée en réalisant le classement présenté dans le tableau 2-3 suivant.

Tableau 2-3 Classement de la capacité de séquestration carbone des écosystèmes de l'aire d'étude éloignée

Capacité de l'écosystème à séquestrer du carbone	Climat continental			
	Forêts fermées	Prairies	Cultures annuelles	Écosystèmes urbains et artificialisés
Sols peu profonds de coteaux	Modérée	Faible	Nulle	Nulle
Sols moyennement profonds	Forte	Modérée	Nulle	Nulle
Sols profonds à moyennement profonds	Forte	Modérée	Nulle	Nulle
Sols de vallées ou de fond de vallons	Très forte	Modérée	Nulle	Nulle

En partant de cette classification, une représentation cartographique de la capacité de séquestration carbone des écosystèmes de l'aire d'étude éloignée a été réalisée en fusionnant sous SIG (logiciel QGIS v3.10) plusieurs sources de données :

- les cartes pédologiques régionales au 1/250000 : le Référentiel régional pédologique (RRP) de Lorraine, mis à disposition par la Chambre d'agriculture (20), et les RRP de la Haute-Marne (21) et de la Marne (22) fournis par l'unité InfoSol de l'INRAE ;
- la carte d'occupation des sols : Corine Land Cover 2018 (23).

La fusion de ces données cartographiques a ainsi permis de représenter les différents écosystèmes (par exemple, les forêts sur sols peu à moyennement profonds, les prairies sur sols peu profonds de coteaux, etc...) et de leur assigner un niveau de capacité de séquestration carbone de NULLE à TRÈS FORTE comme indiqué dans le tableau 2-3. Les calculs des surfaces concernées par ces différents niveaux de séquestration carbone ont ensuite été réalisés grâce au logiciel QGIS v3.10.

2.4.2 Incidences

Dans le cadre de la lutte contre le changement climatique la France est engagée dans une démarche de réduction des émissions des gaz à effet de serre à travers la loi dite « Climat et Résilience » (24) et la Stratégie nationale bas-carbone (SNBC) (25).

Pour s'ancrer dans cette dynamique, un bilan carbone a été initié dès les premières études d'esquisse (2013) du projet global Cigéo et a été mis à jour en 2022. Ce bilan correspond à une estimation des quantités de gaz à effet de serre (GES) pouvant être générées par le projet en prenant en compte les différentes phases de vie. L'objectif est de « challenger » la conception et de privilégier les solutions minimisant les émissions de gaz à effet de serre. La méthodologie utilisée est celle développée par l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (ADEME) : Bilan Carbone® (26).

2.4.2.1 Définition d'un scénario de référence et champ d'application

L'évaluation des émissions de GES du projet est réalisée en amont de sa réalisation. Pour ce faire, il est nécessaire de définir un scénario de référence. Ce scénario de référence est établi à partir des données d'entrée qui proviennent des études de conception actuelles, qui vont encore évoluer.

Le terme « données d'entrée » renvoie à l'association des deux éléments principaux suivants :

- **donnée d'activité** : mesure quantitative d'une activité donnée, occasionnant l'émission de GES ;
- **facteur d'émission** : coefficient permettant de convertir les données d'activité en émissions de GES.

De la même manière que toute méthode d'évaluation carbone, la logique calculatoire consiste à multiplier une donnée d'activité par un facteur d'émission pour obtenir le résultat de l'émission GES en tCO2eq.

$$Emission\ GES\ = DA \times FE$$

Où
DA est la donnée d'activité (quantité en tonnes, en m², en km parcouru, ...) ;
FE est le facteur d'émissions (t.eq CO_2/quantité).

Les émissions de GES sont le produit entre une donnée d'activité exprimée dans une unité caractérisant l'activité du poste (quantités de matériaux mis en œuvre, les transports de matières premières, les consommations de carburants des engins…) et un facteur d'émission qui est l'expression des émissions unitaires de la donnée d'activité associée.

En ce qui concerne les facteurs d'émissions le bilan carbone est majoritairement alimenté par la base de données de l'Ademe. Certains de ces facteurs d'émissions ont également été récupérés à partir des bilans carbone détaillés des études de conception du projet global Cigéo, lorsqu'il s'agissait de facteurs d'émissions plus spécifiques liés par exemple à certains matériaux. Considérant le temps long du projet, et la phase actuelle de conception.

Afin d'évaluer le bilan carbone du projet global Cigéo pour le scénario de référence, le travail de collecte des données d'entrée s'est appuyé sur les études antérieures déjà réalisées, en analysant les données et hypothèses utilisées précédemment. De par la nature des données d'activité disponibles à la date de réalisation du bilan carbone, la récupération des données s'est faite à partir de cette approche ascendante dite *bottom up* avec des données métiers à l'échelle microdisponible au sein des fichiers natifs. Cette méthodologie permet de favoriser le recueil des informations au plus près de la source d'émission afin de tirer le meilleur parti de la précision associée à la donnée et de pouvoir avoir une analyse plus fine.

Cette récupération des données d'entrée s'est donc établie de manière itérative sur l'exhaustivité des données sur lesquelles les bilans carbone ont été réalisés. Ce travail a été réalisé en contrôlant :

- la cohérence des données d'activités issues des données métiers transmises ;
- leur association aux facteurs d'émission.

2.4.2.2 Hypothèses générales

Le bilan carbone est établi pour toute la durée du projet global Cigéo, de la phase d'Aménagement préalable à la fin de la phase de Fonctionnement.

Le projet global Cigéo s'est logiquement vu représenter par les différents postes d'émission de la méthodologie Bilan carbone® portée par l'Association Bilan carbone (ABC)I (26). Pour chaque poste, il a été défini des sous-postes correspondants aux caractéristiques du projet global Cigéo.

Les résultats présentés dans le chapitre 2.3 du volume IV de la présente étude d'impact le sont selon les postes et sous-postes d'émission suivants qui s'appliquent ainsi dans le contexte de Cigéo :

- **énergie** : électricité ; gaz ; gazole routier ; gazole non-routier ; essence ;
- **intrants** : ciment ; sable ; graviers ; béton préfabriqué ; acier de ferraillage ; acier charpente ; enrobé bitumineux, autres ;
- **immobilisations** : bâtiments ; véhicules ; engins ; machines ;
- **déplacements** : domicile-travail ; intersites ;
- **fret** : routier ; ferroviaire ; maritime ; convoyeur ;
- **hors énergie** : changement d'affectation des sols ; perte fluide frigorigène… ;
- **déchets directs** : DID ; DIND ; DEEE ; déchets inertes.

Les chapitres suivants présentent les hypothèses prises dans le bilan carbone du projet global Cigéo par poste d'émissions et sous-postes principaux. À noter que devant l'exhaustivité des données que représentent le projet global Cigéo, l'intégralité des données d'activité n'a pu être systématiquement rattachée à un sous-poste L'ensemble des données présentées ici est établi pour pouvoir différencier les émissions les plus pertinentes, selon les postes pressentis comme les plus importants en émissions, dans la finalité de pouvoir y associer des mesures de réduction carbone.

2.4.2.2.1 Energie

a) Consommation de gazole non routier des engins de chantier

Les consommations comprennent celles de l'ensemble des engins nécessaires pour la réalisation des travaux. Ces derniers peuvent être de plusieurs natures : terrassements, manutention, concassage, travaux d'excavation, creusement des galeries souterraines. Les consommations de gazole des engins ont été calculées à partir de l'approche Tier 3. Cette méthode permet de déterminer la consommation de carburant en fonction de la puissance des engins de chantier, en définissant le temps de fonctionnement des engins et leur puissance moyenne en période de fonctionnement.

*Exemple : Un bulldozer de 131 kW est utilisé pendant 100 jours 8 heures par jour. Le facteur de consommation (FC) est de 250 g/kWh. La puissance moyenne en utilisation de l'engin est de 131*0,75 soit 98,25 kW. Il fonctionne pendant 800 heures soit une consommation de 19,65 tonnes de carburant (98,25*800*250/1000000).*

Dans ce sous-poste, deux types d'engins sont distingués : ceux utilisés en surface et ceux utilisés pour le creusement des galeries souterraines. Une distinction surface-fond est donc présentée dans le tableau ci-dessous et met en avant que la grande majorité des émissions GES est établie par la consommation des engins utilisés pour le creusement des galeries souterraines.

Tableau 2-4 Hypothèses retenues pour le calcul des émissions GES du sous-poste gazole non routier

Type	Consommation en tonne	Facteur d'émission en kgCO2eq/tonnes
Gazole Non routier en surface	36 058	3 770
Gazole Non routier au fond	797 228	

b) Consommation d'électricité

Les consommations d'électricité pour l'ensemble du projet comprennent celles de l'ensemble des équipements électriques présents et nécessaires au fonctionnement du site. À chaque récepteur ont été attribués des puissances nominatives et des temps d'utilisation.

Tableau 2-5 Hypothèses retenues pour le calcul des émissions GES du sous-poste consommation d'électricité

Type	Consommation en MWh	Facteur d'émission en kgCO2eq/kWh
Électricité de surface	10 333 870	0,0599
Électricité au fond	17 558 712	

c) Récupération de l'énergie du fond

La récupération de l'énergie du fond a été intégrée dans le bilan du scénario de référence. Elle constitue une des mesures principales de réduction déjà incluse à ce stade, puisque cette solution permet de proposer annuellement environ 52 300 MW thermique *via* une eau à 50 °C, ce qui permet de compenser une consommation de gaz qui aurait été importante pour assurer ce besoin. Cette solution a néanmoins recours à une consommation d'électricité et de gaz pour le fonctionnement des boucles afin d'alimenter les différents équipements, principalement les pompes de circulation.

Tableau 2-6 Hypothèses retenues pour le calcul des émissions GES du sous-poste récupération d'énergie au fond

Type	Energie récupérée en MWh PCI*	Émissions en CO2eq liée la consommation de gaz/électricité pour le fonctionnement des boucles ZT/ZE en $kgCO2eq/kWh_{thermiqueco}$
ZIOS zone exploitation	600 852	0,017
ZIOS zone travaux	138 309	0,069

** MWh PCI : Pouvoir Calorifique Inférieur qui représente la quantité totale de chaleur dégagée par la combustion*

d) Consommation de gaz

Au sein du scénario de référence il y a une consommation résiduelle de gaz qui est utilisé pour la production de chaleur et qui est de l'ordre de 1 700 000 MWh PCI.

Cette consommation correspond essentiellement à couvrir les besoins de chaleur au sein des bâtiments lors de l'exploitation du site, et plus particulièrement pour assurer la production d'eau chaude de chauffage.

Tableau 2-7 Hypothèses retenues pour le calcul des émissions GES du sous-poste consommation de gaz

Type	Consommation en MWh PCI	Facteur d'émission en kgCO2eq/kWh PCI
Gaz de surface	1 581 670	0,244
Gaz au fond	106 297	

2.4.2.2.2 Intrants

La part des émissions liées aux Intrants est significative pour le projet global Cigéo. Pour les intrants, les jouvences des matériaux ont également été considérées dans le scénario de référence. D'une manière générale, les besoins de jouvence partielle des ouvrages conventionnels et communs seront de 60 ans pour la rénovation du gros œuvre et second œuvre et de 20 ans pour la rénovation des infrastructures bâtiments. Pour les ouvrages dédiés aux travaux, la rénovation du gros œuvre et second œuvre des Puits sera réalisée tous les 60 ans et tous les 20 ans pour les infrastructures bâtiments. La voirie sera quant à elle en jouvence tous les 30 ans.

a) Ciment

Pour l'ensemble du centre de stockage Cigéo, le ciment est le matériau majoritairement présent et utilisé au sein des différentes infrastructures. Il est employé à la fois pour la construction des bâtiments, pour les galeries souterraines, pour les ouvrages en béton armé, pour les containers de stockage, pour certains éléments préfabriqués, etc.

Le constituant principal des ciments est le clinker, qui est obtenu à partir de la cuisson d'un mélange approprié de calcaire et d'argile, en proportion respective moyenne de 80 %/20 %. L'impact carbone de la production du ciment s'explique par deux phénomènes principaux :

- la cuisson du clinker à 1 450° C *via* des combustibles fossiles ou de substitution : responsable d'environ 40 % des émissions de GES ;
- la décarbonatation du calcaire lors de la cuisson : responsable d'environ 60 % des émissions de GES.

Si le procédé de fabrication du ciment est universel, le matériau n'en demeure pas moins complexe, avec cinq grands types conventionnels dont la composition (nature et proportions des constituants) varie en fonction de l'application de destination du matériau. Ils sont définis dans la norme européenne NF EN 197-1 de 2012 (27).

Pour la construction des ouvrages du projet global Cigéo, c'est le ciment type CEM I[5] qui a été considéré pour la quasi-totalité du projet. L'emploi de ciment type CEM IIIA[6] a été considéré seulement dans l'emploi du béton pour la construction de certains ouvrages, notamment les bordures, bétons et fossés lors de la phase d'aménagements préalables.

Tableau 2-8 Hypothèses retenues pour le calcul des émissions GES du sous-poste ciment

Type	Masse en tonnes	Facteur d'émission en kgCO2eq/tonnes
Ciment CEM I	1 533 110	866
Ciment CEM IIIA	42 950	464

b) Autres matériaux

Le sous-poste Autres matériaux, regroupe l'ensemble des matériaux distincts et ne représentant un grand ensemble pouvant être agrégé. Ils regroupent des matériaux plus « marginaux » d'un point de vue des émissions de GES, comme par exemple des consommables, des câbles, des menuiseries, des matériaux utilisés pour le second œuvre…

Ainsi on retrouve dans l'ensemble des données d'activités d'autres matériaux plus spécifiques à certains éléments, pour lesquels des facteurs d'émissions plus spécifiques ont été utilisés. Ils sont pour certains issus de la base « produits » INIES à partir de FDES génériques. Ci-dessous quelques exemples de facteurs d'émissions utilisés, issus de la base INIES (qui ne constitue toutefois pas l'exhaustivité des facteurs d'émission utilisés pour l'ensemble des matériaux) :

[5] Le CEM I ou ciment Portland, contient au moins 95 % de clinker (K) et au plus 5 % de constituants secondaires. Les CEM I conviennent pour le béton armé ou le béton précontraint, là où une résistance élevée est recherchée ainsi qu'un décoffrage rapide. C'est encore à ce jour le type de ciment majoritairement utilisés dans la construction.

[6] Le CEM III/A ou ciment de haut-fourneau, contient entre 36 % et 80 % de laitier de haut-fourneau et 20 % à 64 % de clinker

Tableau 2-9 Facteurs d'émission retenus pour le calcul des émissions GES du sous-poste autres matériaux

Type	Facteur d'émission
Tôle en acier corten	43,6 kgCO2eq/m² de paroi
Plinthe en bois massif	1,7 kgCO2eq/ml
Menuiserie triple vitrage	645,0 kgCO2eq/m² de paroi
Fourreaux pour les courants forts	32,30 kgCO2eq/ml
Divers lots courants forts	116 kgCO2eq/m² de plancher
Divers lots courants faibles	12 kgCO2eq/m² de plancher
Divers lots chauffage, ventilation climatisation	157 kgCO2eq/m² de plancher

c) Acier de ferraillage/Acier de charpente

Au sein du poste Intrants, il a été distingué les aciers servant pour les armatures de ferraillage des ouvrages du béton armé, et ceux servant pour les charpentes et structures métalliques d'autres ouvrages. Leur distinction est importante car l'emploi d'aciers de ferraillage autorise l'emploi d'aciers 100 % recyclé, ce qui n'est pas forcément le cas pour les autres aciers. Ainsi, en fonction des usages de l'acier, le pourcentage de matière issue du recyclage peut varier de 40 à 100 %.

Les facteurs d'émission correspondants sont les suivants :

Tableau 2-10 Facteurs d'émission retenus pour le calcul des émissions GES du sous-poste Acier

Type	Facteur d'émission en tCO2eq/tonne
Acier neuf	3 190
Acier 40 % recyclé	2 354
Acier 75 % recyclé	1 623
Acier 100 % recyclé	1 100

Ci-dessous le tableau représentant la part des émissions GES en fonction de ces 2 types d'acier

Tableau 2-11 Masses retenues par type d'acier pour le calcul des émissions GES du sous-poste Acier

Type	Masse en tonne
Acier de ferraillage	400 720
Acier de charpente	91 300

d) Graviers/Sable

Au sein de ce sous-poste, il a été agrégé aussi bien les granulats que le sable qui sont les deux constituants principaux employés dans le béton en plus du ciment. Si dans la formulation d'un m3 de béton ces constituants représentent un volume important, leurs poids en termes d'émissions GES restent relativement peu significatifs.

Les facteurs d'émission considérés ici sont issus de la base Ademe et sont les suivants :

- granulats en sortie de carrière : 4 kgCO2eq/tonnes ;
- sable : 2,46 kgCO2eq/tonnes.

La masse de graviers/sable considérée par le projet global Cigéo représente : 6 805 685 tonnes.

2.4.2.3 Immobilisations

Ce poste présente l'utilisation et la dégradation progressive des installations, des véhicules, des outils et des machines considérés dans le périmètre du projet global Cigéo. Étant donné la durée séculaire du projet, le total des émissions GES pour un élément du poste Immobilisations est donc intégralement compté dans le scénario de référence.

a) Bâtiments

Il s'agit des immobilisations dues aux bâtiments qui nécessitent une jouvence qui a été prise en compte dans le scénario de référence. Ce besoin en jouvence est estimé à 30 ans pour les bâtiments.

La surface de bâtiments concernée représente : 210 049 m².

b) Engins

Il s'agit des engins majoritairement utilisés et acquis pour le projet global Cigéo en vue de la réalisation de l'ensemble des travaux nécessaires. Les engins de chantier sont considérés comme faisant partie intégrante du parc d'engins du projet global Cigéo. Cette approche est majorante car elle considère qu'ils sont en permanence sur place, mais traduit de manière plutôt crédible le fonctionnement qui sera mis en œuvre.

Pour le calcul des émissions associées, les facteurs d'émission proposés par l'ADEME sont des facteurs d'émission définis en fonction des poids des engins. Au sein des données recueillies, le poids des engins a été pris dans les fiches techniques quand elles étaient disponibles, ou estimés à dire d'expert avec un poids moyen appliqué en fonction du type d'engin. Ces engins nécessitent également une jouvence qui a été prise en compte dans le scénario de référence.

La masse d'engins concernée représente : 145 911 tonnes.

c) Machines

Il s'agit de l'ensemble des machines/équipements acquis pour le fonctionnement du projet global Cigéo (équipements de manutention, systèmes de fermeture). Ces équipements sont davantage caractérisés par les matériaux qui les composent. La méthodologie est la même que celle des engins : estimation de la masse moyenne des machines à partir de laquelle est appliqué le facteur d'émission issu de la base Ademe.

La masse de machines concernée représente : 1 493 514 tonnes.

2.4.2.3.2 Déplacements

Le poste Déplacements regroupe les déplacements de l'ensemble des collaborateurs sur le projet global Cigéo au sein des différents services et ouvrages pour venir travailler ainsi que les déplacements dans la journée sur site et entre les sites du centre de stockage (déplacements entre zone puits et zone descenderies à travers la liaison intersites).

a) Domicile-travail

Les hypothèses majoritairement retenues dans le recueil des données d'activité ont été conservées en l'état pour le scénario de référence. Pour les déplacements domicile-travail elles sont les suivantes :

- 80 % des personnes prennent leur voiture individuelle pour se rendre sur le site avec une moyenne de 50 km aller-retour ;
- 20 % des personnes font du co-voiturage (deux personnes par voiture) pour la même distance ;
- les véhicules personnels sont diesel avec une puissance entre 6 et 10 chevaux fiscaux ;
- le facteur d'émission utilisé pour ces déplacements est le facteur de la base Ademe correspond aux déplacements dits en périphérie rurale.

Tableau 2-12 Hypothèses retenues pour le calcul des émissions GES des déplacements domicile-travail

Déplacements domicile-travail en véhicules.km	Facteur d'émission en kgCO2eq/véhicule.km
1 146 765 375	0,216

b) Intersites

Les hypothèses retenues sont les suivantes pour les déplacements internes sur le centre de stockage Cigéo :

- un collaborateur empruntant des véhicules légers parcourt en moyenne 8 km par jour ;
- 70 % des personnes utilisent des véhicules électriques sur le site ;
- 30 % des personnes utilisent des véhicules individuels diesel ;
- le facteur d'émission utilisé pour ces déplacements est le facteur correspondant aux déplacements dits en zone urbaine.

Tableau 2-13 Hypothèses retenues pour le calcul des émissions GES des déplacements intersites

Déplacements intersites en véhicules.km	Facteur d'émission en kgCO2eq/véhicule.km
634 003 515[7]	Véhicules diesel : 0,325
	Véhicules électriques : 0,049

2.4.2.3.3 Fret

Le poste Fret correspond à l'approvisionnement de l'ensemble des matériaux nécessaires à la construction du centre, au transport des déchets radioactifs, ainsi qu'à l'évacuation des déchets générés par l'exploitation.

a) Ferroviaire

Il ressort des études de flux, que le recours au fret ferroviaire n'est pertinent que pour un seul type de matériaux : les graviers. Cela s'explique principalement par le fait que le recours au train nécessite des volumes non négligeables pour être avantageux et concurrentiel par rapport au fret routier.

Au-delà de l'acheminement des matériaux intrants, le fret ferroviaire est toutefois bien utilisé pour l'acheminement des déchets radioactifs issus des différents producteurs.

Le facteur d'émission correspond au fret ferroviaire est celui issu de la base Ademe 2022 pour un train de marchandises en France, d'une valeur de 0,00373 kgCO2eq/tonnes.km.

b) Routier

Pour l'ensemble des matériaux de construction, le fret est donc majoritairement assuré par transport routier. Suite aux études menées sur la disponibilité des ressources dans la Région Grand Est, les hypothèses des distances d'approvisionnement pour les matériaux principaux sont indiquées ci-dessous :

- 80 km pour les aciers (armature et structure/charpente métallique) ;
- 80 km pour les ciments ;
- 50 km pour les sables et graviers.

Pour d'autres intrants, la distance d'approvisionnement a été fixée de manière plus libre en fonction des éléments disponibles au stade de l'étude, estimés à dire d'expert en restant toutefois conservateur, ou repris à partir des indications apportées pour certains matériaux spécifiques.

Enfin, plusieurs facteurs d'émission correspondant à des classes de véhicules différents ont été utilisés, en fonction des types de matériaux pouvant être transportés :

Tableau 2-14 Facteurs d'émission retenus pour le calcul des émissions GES du sous-poste Fret Routier

Type	Facteur d'émission en kgCO2eq/tonnes.km
Camion PTAC > 21 tonnes	0,186
Camion tracteur routier PTAC 40 t	0,106

c) Maritime

Il a été identifié une hypothèse d'un approvisionnement par fret maritime pour un élément particulier : les rails de roulement avec un parcours de 8 000 kilomètres.

Le facteur d'émission considéré pour ce fret maritime est celui du véhicule type Vraquier Panamax (63 500 – 127 500 tonnes) avec une valeur égale à 0,0054 kgCO2eq/tonnes.

d) Convoyeur

Le convoyeur est un équipement qui est principalement utilisé pour le transport des verses. Il est dimensionné pour l'utiliser également pour le transport du sable et du gravier lorsqu'il est libre ou en sous-charge (avec des stockages temporaires adaptés à chaque matériau). Le convoyeur est un convoyeur à bande transporteuse qui est mis en œuvre sur la liaison intersites. Il permet donc de réduire le transport de matériaux par camion qui aurait été nécessaire sans cette solution.

Ce convoyeur dispose d'une puissance électrique de bande de 160 kW. Le facteur d'émission de l'électricité utilisé est celui issu de la base ADEME 2022, et correspondant au mix français moyen pour l'année 2020 avec un facteur d'émission égal à 59,9 gCO2eq/kWh.

[7] Ces déplacements correspondent à 1 500 trajets de 8 km par jour pendant 150 ans. Cette hypothèse est majorante dans la mesure où le centre de stockage devrait générer 2 000 emplois par an direct sur site pendant la phase de construction initiale et 600 emplois par an direct et sur site pendant la phase de fonctionnement.

2.4.2.3.4 Hors Energie

a) Pertes de fluide frigorigène

Les systèmes de production de froid comportent au moins un circuit contenant un fluide caloporteur. Ces systèmes ne sont pas parfaitement hermétiques et présentent des fuites. Les gaz fluorés issus de ces fuites sont de puissants gaz à effet de serre.

Tableau 2-15 Masses retenues pour le calcul des émissions GES du sous-poste fluide frigorigène

Type	Masse en tonne
Fuite fluide frigorigène - R134a	114
Fuite fluide frigorigène - R404a	1
Fuite fluide frigorigène - R410a	7
Fuite fluide frigorigène - R407c	4
Fuite fluide frigorigène - R1234ze	8

b) Changement d'affectation des sols

Les changements d'affection des sols modifient les stocks de carbone contenus dans les sols et dans la végétation qui l'occupe. Il peut en résulter soit une émission de CO2, soit une captation de CO2. Par exemple, d'un point de vue majoritaire, le retournement d'une prairie et sa substitution par une culture entraînent un déstockage du carbone des sols. Les cinétiques de stockage/déstockage du carbone entraîné par des changements d'affection des sols sont des phénomènes qui s'inscrivent sur de longues périodes, de l'ordre de 50 à 150 ans selon le sens du changement de l'affectation (28).

La méthodologie utilisée pour évaluer les émissions GES du projet global Cigéo est celle établie par l'ADEME, qui distingue ainsi dans les espaces artificialisés, les sols imperméabilisés et les sols non imperméabilisés. Par définition, un sol est imperméabilisé dans le cas de construction de voirie, de parking ou de bâtiments sur la surface concernée. Il n'est en revanche pas retenu de changement de stock de carbone dans les sols lorsque celui-ci devient un espace végétalisé. Les sols non imperméabilisés comprennent les prairies et pelouses, les surfaces de compensation d'écologique ou encore les surfaces de verses en ZP.

Tableau 2-16 Facteurs d'émission retenus pour le calcul des émissions GES du sous-poste changement d'affectation des sols

Type	Facteur d'émission en tCO2eq/ha
Forêt vers sols non imperméabilisés	0
Prairie vers sols non imperméabilisés	0
Culture vers sols non imperméabilisés	0
Forêt vers sol imperméabilisés	290 (±120)
Prairie vers sol imperméabilisés	290 (±120)
Culture vers sol imperméabilisés	190 (±80)

Le total des surfaces imperméabilisées pour le centre de stockage Cigéo atteint une valeur de 116 ha (cf. Chapitre 3 du volume IV de la présente étude d'impact), répartie comme suit :

Tableau 2-17 Surfaces de changement d'affectation des sols retenus pour le calcul des émissions GES

Type	Surface en ha
Prairie vers imperméabilisé	63
Forêt vers imperméabilisé	34
Culture vers imperméabilisé	19

Une cartographie d'occupation du sol au sein de la zone d'intervention potentielle présentant le projet sur le fond Corine Land Cover (23) existant est également présentée au chapitre 3 du volume IV de la présente étude d'impact.

2.4.2.3.5 Déchets

Le poste Déchets englobe l'ensemble des déchets produits par l'activité durant l'ensemble des phases opérationnelles du projet, qu'ils soient inertes, dangereux ou non dangereux.

Les déchets pouvant faire l'objet d'une valorisation par recyclage sont les déchets suivants :

- les déchets divers non combustible et non fermentescible : il peut s'agir des gravats ou de sable pouvant être utilisés pour le remblayage ou pour un recyclage en vue de devenir un autre produit ;
- les déchets divers et Déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE) recyclés selon les filières métal, plastique, papier et bois en vue d'une réutilisation en matière première.

D'autres types de déchets peuvent également être rencontrés et sont traités de la manière suivante :

- les déchets industriels dangereux (DID) traités à 100 % par l'incinération ;
- les déchets industriels non dangereux (DIND) incluant les ordures ménagères traitées selon leur nature par Centre d'Enfouissement Technique (CET) ou par incinération.

À noter qu'il existe également un volume de déchets radioactifs induits par le fonctionnement du centre de stockage. Ils sont principalement issus des procédés nucléaires de manutention des colis de stockage générés par les épreuves de contamination par frottis de contrôle pour des fins de radioprotection. Ils ont été considérés comme des déchets technologiques très faiblement radioactifs (TFA).

Enfin, les déchets non valorisables sont placés en Centre d'Enfouissement Technique et regroupent :

- les déchets d'exploitation mélangés, déchets divers ;
- les déchets de bétons.

À noter que le conditionnement des déchets radioactifs n'est pas comptabilisé ici, car ils ne sont pas intégrés au projet global Cigéo. Le conditionnement des déchets radioactifs est à la charge des producteurs de déchets.

Tableau 2-18 Facteurs d'émission retenus pour le calcul des émissions GES du poste déchets

Type	Facteur d'émission en kgCO2eq/tonne
Stockage des déchets (dangereux solides ou minéraux, peu réactifs, peu évolutifs, peu solubles)	129
Incinération des déchets	363
Mise en Centre d'Enfouissement Technique	33

Tableau 2-19 Masses retenues pour le calcul des émissions GES du poste Déchets

Type	Masse en tonne
Déchets inertes	1 406 787
Déchets industriels dangereux (DID)	145 911
Déchets industriels non dangereux (DIND)	1 493 514
Déchets d'équipement électrique et électronique (DEEE)	86 433
Autres	99 328

2.4.2.4 Incertitudes

Au sein de l'outil mis en place chaque résultat de calcul dispose de sa propre incertitude qui combine celle estimée sur le facteur d'émission et celle estimée sur la donnée d'activité.

Les pourcentages appliqués pour l'identification des **incertitudes au niveau des données d'activité** sont inspirés de ceux du guide méthodologique (29) « Prise en compte des émissions de gaz à effet de serre » publié par le ministère de la Transition écologique. Ces pourcentages sont appréciés à dire d'expert pendant la compilation des données métiers en adoptant une approche se voulant conservatrice, avec des valeurs inscrites dans des fourchettes correspondantes aux cas de figure suivants :

- 0 % - 10 % : Faible - pour une donnée primaire connue et calculée avec précision ;
- 10 % - 30 % : Acceptable - pour une donnée ayant été estimée avec une bonne représentativité et considérée fiable (par exemple : consommation théorique de carburant de l'engin issue de la documentation technique de l'engin) ;
- 30 % - 50 % : Moyenne - pour une donnée ayant été estimée avec une représentativité moyenne ou recalculée par extrapolation (par exemple : calcul de la consommation de carburant de l'engin à partir de la consommation d'un autre type d'engin) ; c'est cette fourchette d'incertitude qui a été majoritairement appliquée ;
- 50 % - 80 % : Élevée - pour une donnée ayant été estimée avec une faible représentativité (par exemple : assimilation de la consommation de carburant de l'engin à la consommation d'un autre d'engin) ;
- 80 % - 100 % : Très Élevée - pour une donnée connue en ordre de grandeur.

Les classes d'incertitudes affectées aux données et les intervalles associés retenus sont identiques à ceux du guide à l'exception de la classe d'incertitude élevée. La classe d'incertitude élevée, associée à une incertitude ≥50 % dans le guide, est transformée ici en deux catégories : incertitude élevée entre 50 % et 80 %, incertitude très élevée entre 80 % et 100 %. Cette distinction a été mise en œuvre afin de correspondre au mieux au projet global Cigéo, pour lesquelles certaines données ne sont encore disponibles qu'au stade d'esquisse ou ont été établies en ordre de grandeur et représentent ainsi des incertitudes très élevées.

Concernant les **facteurs d'émission**, ces derniers sont pour la plupart issus de la base ADEME, qui résultent de différentes études. Ils présentent ainsi des taux d'incertitudes variables selon la validité et la source de l'étude utilisée pouvant aller de 5 % à 70 %. Les incertitudes pour les facteurs d'émission sont considérées comme faibles en dessous de 10 %, comme moyennes entre 10 et 50 % et élevées au-delà de 50 %.

La durée du projet global Cigéo (150 ans) est un facteur qui amplifie les incertitudes des données d'activités et des facteurs d'émissions, notamment pour les émissions de GES de la phase de Fonctionnement. L'anticipation des évolutions technologiques sur un temps aussi long étant difficile, par exemple pour la consommation de carburant des engins de chantier à horizon 2050 ou 2100.

[8] https://www.atmo-grandest.eu/etude/evaluation-de-la-qualite-de-lair-ambiant-houdelaincourt

Au niveau du projet global Cigéo, le cumul des incertitudes sur les résultats conduit à une **incertitude globale d'environ 35 % du total des émissions de GES**.

Les deux principaux postes d'émissions Energie et Intrants (cf. Chapitre 2.3 du volume IV de la présente étude d'impact) sont ceux étant dotés des incertitudes les plus faibles, ce qui est intéressant pour la mise en place d'actions en vue d'une réduction des émissions car c'est principalement sur ces deux postes que des études complémentaires doivent être engagés pour en réduire l'impact carbone.

Pour les autres postes, les incertitudes élevées liées au stade d'avancement actuel de la conception, limitent la précision sur les données d'activités. Ces incertitudes pourront être affinées au fil de l'avancement de la conception du projet global Cigéo qui va s'étaler sur de nombreuses années. Toutefois, ces incertitudes ont une faible influence sur les résultats finaux et ne modifieront pas la hiérarchie des deux premiers postes d'émission en termes de poids carbone.

Enfin, la majorité des données d'activité métiers utilisés dans le bilan carbone du projet global Cigéo ont été élaborées à partir d'une approche dite conservatrice, ainsi, les valeurs calculées par estimation et extrapolation tendent à surestimer les émissions GES.

2.5 Qualité de l'air

2.5.1 Émissions conventionnelles

2.5.1.1 État initial

Les concentrations moyennes annuelles et journalières des polluants présentés dans le volume III et utilisées pour la définition de la qualité de l'air actuelle sont issues :

- à l'échelle régionale, des données des stations du réseau régional ATMO Grand Est présentées dans le bilan de la qualité de l'air Grand Est. Le dernier rapport disponible est celui de l'année 2022, publié le 25 juillet 2023, qui présente les moyennes mesurées en 2022 (30) ;
- à l'échelle locale de l'aire d'étude rapprochée, des relevés effectués sur la station atmosphérique d'Houdelaincourt décrite au chapitre 2.2.1.2 du présent volume.

Ces concentrations en polluants sont ensuite comparées aux critères nationaux de surveillance de la qualité de l'air définis aux articles R. 221-1 relatif à la surveillance de la qualité de l'air et de ses effets sur la santé et sur l'environnement, pour obtenir la qualité de l'air actuelle.

Les valeurs de ces critères actuellement en vigueur sont présentées en annexe 1 du présent volume.

Les rapports annuels d'évaluation de la qualité de l'air à Houdelaincourt sont disponibles sur le site Internet ATMO Grand Est[8]. L'ensemble des données présenté dans le volume III de la présente étude d'impact est issu du rapport d'évaluation de la qualité de l'air ambiant à Houdelaincourt en 2020, réalisé par ATMO Grand Est (31).

Les méthodes analytiques utilisées pour obtenir les concentrations annuelles ou journalières des polluants précités, sur la station atmosphérique d'Houdelaincourt, sont indiquées dans le tableau 2-20 et le tableau 2-21.

Tableau 2-20 Méthode analytique utilisée pour la mesure des polluants SO_2, CO, NO_x, O_3 et $PM_{10}/PM_{2,5}$

Polluants	Analyseur	Niveau	Fréquence de mesures	Réseau/partenaire
CO	Thermo Scientific 48 i	3 m	1 s/15 min/1 h	Atmo Grand Est
O_3	Thermo Scientific 49 i	3 m	1 s/15 min/1 h	Atmo Grand Est
NO_x	Teledyne T200 UP	3 m	1 s/15 min/1 h	Atmo Grand Est
SO_2	Thermo Scientific 43 i	3 m	1 s/15 min/1 h	Atmo Grand Est
$PM_{10}/PM_{2,5}$	Thermo Scientific TEOM 1405-DF/ Fidas Palas	3 m	1 s/15 min/1 h	Atmo Grand Est

La quantification des métaux lourds réglementés (Pb, As, Cd et Ni) et du benzo(a)pyrène (B(a)p) est obtenue à partir des prélèvements de particules (PM_{10}), puis de l'analyse de ces prélèvements (cf. Tableau 2-21). Depuis 2020, la quantification des composés organiques volatils (COV) vient s'ajouter aux mesures réalisées sur les PM_{10}.

Tableau 2-21 Méthode analytique utilisée pour la mesure des COV et des métaux lourds (Pb, As, Ni, Cd)

Polluants	Fréquence d'échantillonnage	Préleveur de particules	Analyse	Laboratoire
COV/benzene:	Prélèvements de 14 jours répartis sur l'année	Tubes passifs	Chromatographie en phase gazeuse couplée à un spectromètre de masse (CG-MS)	SynAirGIE
ETM : Arsenic (As) Plomb (Pb) Nickel (Ni) Cadmium (Cd)	Prélèvements de 14 jours répartis toute l'année	Partisol PLUS (fraction PM_{10}) bas débit 1 m^3/h	ICP-MS (spectrométrie de masse induite par couplage plasma) après digestion acide	Micropolluants Technologie
HAP (B(a)p)	1 prélèvement sur 24 heures tous les 6 jours	Digitel DA 80 (fraction PM_{10}) haut débit 30 m^3/h	Chromatographie liquide haute performance (HPLC) et détecteur de fluorescence	SynAirGIE

En plus des mesures de la qualité de l'air effectuées à la station d'Houdelaincourt, quatre campagnes de suivis périodiques ont été réalisées à proximité des zones puits et descenderie, à des saisons différentes entre novembre 2014 et septembre 2015 (cf. Tableau 2-22) en vue de confirmer la représentativité de la station d'Houdelaincourt en termes de qualité de l'air et d'obtenir des valeurs de benzène non mesurées à la station atmosphérique d'Houdelaincourt.

Au cours de ces campagnes, des analyseurs automatiques embarqués dans la station mobile ont mesuré en continu les concentrations en polluants gazeux (NO_x, SO_2, CO et O_3) et en particules fines (PM_{10} et $PM_{2,5}$). Les concentrations en benzène sont déterminées par l'intermédiaire de tubes passifs de type « Radiello ».

Tableau 2-22 Campagnes « qualité de l'air » menées à proximité de la zone descenderie

Moyen de mesure (polluant concerné)	Dates des campagnes
Tubes passifs (benzène)	C1 : du 07/11/14 au 21/11/14
	C2 : du 21/01/15 au 06/02/15
	C3 : du 04/05/15 au 18/05/15
	C4 : du 26/08/15 au 16/09/15
Analyseur automatique (NO_x, SO_2, CO et O_3) et en particules fines (PM_{10} et $PM_{2,5}$)	C1 : du 06/11/14 au 01/12/14
	C2 : du 21/01/15 au 01/03/15
	C3 : du 10/05/15 au 27/05/15
	C4 : du 24/08/15 au 18/09/15

2.5.1.2 Incidences

2.5.1.2.1 Présentation du logiciel de modélisation « AirAdvanced® Map version Standard »

La modélisation de la dispersion atmosphérique des polluants conventionnels a été réalisée à partir du logiciel AirAdvanced® Map version standard. Ce modèle permet de réaliser l'analyse statistique de données météorologiques, puis de simuler la dispersion des polluants atmosphériques d'origine industrielle ou automobile (gazeux ou particulaires) issus d'une ou plusieurs sources diffuses ou canalisées selon des formulations gaussiennes (Aria Technologies, 2013 (32) ; Aria Technologies, 2009 (33)). AirAdvanced® Map version standard répond aux prescriptions de l'Ineris (Institut national de l'environnement industriel et des risques) pour la modélisation de la dispersion de la pollution atmosphérique des rejets des installations industrielles (cf. Annexe 2 du guide méthodologique Ineris « Évaluation des risques sanitaires dans l'étude d'impact des installations classées - Substances chimiques » (34)).

AirAdvanced® Map version standard permet d'étudier l'impact d'une installation en reconstruisant l'impact statistique des émissions à partir d'une chronique météorologique réelle de plusieurs années (cinq ans dans le cas de cette étude). Cette approche donne des résultats cohérents avec les observations des réseaux de la surveillance de la qualité de l'air pour des distances supérieures à 100 mètres.

La démarche utilisée par le logiciel AirAdvanced® Map version standard est présentée sur la figure 2-3.

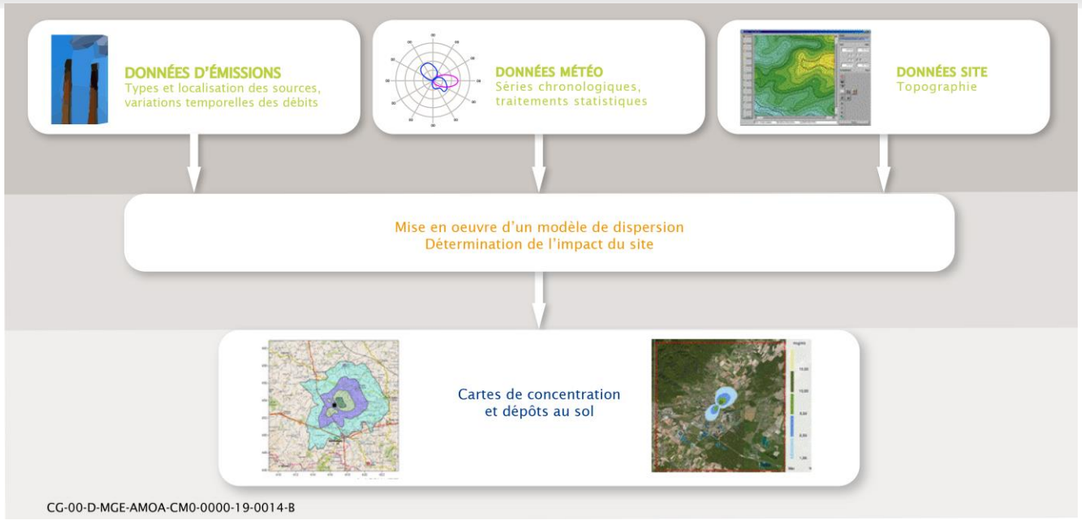


Figure 2-3 Démarche mise en œuvre par le logiciel AirAdvanced® Map version standard

Les concentrations obtenues par modélisation de la dispersion atmosphérique sont cartographiées (exprimées en µg/m³), en cumul avec les valeurs de fond, afin de permettre une comparaison aux valeurs de surveillance de la qualité de l'air (objectif de qualité de l'air et valeur limite définis à l'article R. 221-1 du code de l'environnement).

Les valeurs de surveillance de la qualité de l'air pour les différentes substances conventionnelles sont présentées au chapitre 2.4 du volume IV de la présente étude d'impact.

2.5.1.2.2 Substances et hypothèses retenues pour la modélisation

a) Substances retenues

Les gaz et particules considérés pour l'étude d'incidence de la qualité de l'air sont ceux susceptibles d'être émis en quantité plus ou moins importante à au moins une des phases du projet global Cigéo et lien avec l'article R. 221-1 du code de l'environnement : le monoxyde de carbone (CO), les oxydes d'azote assimilés au dioxyde d'azote (Nox), les oxydes de soufre assimilés au dioxyde de soufre (SO_2), les PM_{10} et $PM_{2,5}$, les composés organiques volatils (COV) assimilés au benzène et les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) assimilés au benzo(a)pyrène (Bap). Les substances non retenues sont présentées au chapitre 2.5.1.2.4.

Les modélisations de dispersion atmosphérique (cf. Volume IV de la présente étude d'impact) couvrent une aire d'étude suffisamment étendue pour prendre en compte les opérations du projet global modélisées à ce stade (zone puits, zone descenderie, liaison intersites et routes du domaine d'étude) et intégrer les zones urbaines situées à proximité (points cibles retenus). Ce domaine d'étude porte sur un carré de 16 km de côté centré sur le point de référence localisé aux centres des installations de la zone puits et de la zone descenderie. Cette surface de modélisation est suffisante pour couvrir la zone d'influence des impacts.

b) Sources d'émissions

Les sources d'émission retenues pour l'évaluation de l'impact sur la qualité de l'air en phases de construction initiale et de fonctionnement sont de trois types :

- sources linéiques dues aux véhicules circulant sur le site et sur le réseau principal (routes nationales et départementales) ;
- sources surfaciques liées à la présence d'engins de chantier et de stocks de matériaux à l'air libre ;

sources canalisées liées aux émissaires des bâtiments du centre de stockage Cigéo. Les différentes sources modélisées sont localisées sur la figure 2-4 et la figure 2-5.

Le modèle intègre la topographie simplifiée du site et les turbulences aérauliques dues à la présence d'éventuels obstacles entre les sources d'émission et les cibles.

Les émissions des trains circulant sur l'installation terminale embranchée et la voie ferroviaire 027000 n'ont pas été intégrées aux modélisations. Néanmoins la fréquence de passage des trains est suffisamment faible (cf. Chapitre 12.1.2.3 du volume IV de la présente étude d'impact) pour négliger les émissions associées à ces derniers.

c) Émissions sur le centre de stockage

Pour les émissions canalisées des chaudières et des centrales à béton, les valeurs d'émission retenues sont considérées, de façon pénalisante, les plus faibles valeurs limites d'émission de la réglementation des installations classées pour la protection de l'environnement.

Pour les rejets de ventilation de la descenderie de service et des puits (hors ventilation nucléaire), les valeurs limites d'exposition professionnelles (VLEP) définies à l'article R. 4412-4 du code du travail ont été retenues dans les évaluations, de façon majorante.

Pour les émissions canalisées, en dehors des chaudières et des centrales à béton, et les émissions linéiques sur le centre de stockage Cigéo, les poussières totales ont été assimilées à des particules fines de 10 µm et 2,5 µm de diamètre appelé respectivement PM10 et PM2,5. Ce choix est majorant en termes d'évaluation de l'exposition aux poussières, en particulier pour les PM2,5.

Les composés organiques volatils (COV) et les hydrocarbures provenant des gaz d'échappement des véhicules sont partiellement assimilés à du benzène qui présente des dangers bien connus à seuil et sans seuil de dose. Les COV émis font partie des hydrocarbures imbrûlés de la combustion de carburant. D'un point de vue quantitatif, un taux de 5 % a été appliqué sur le total des composés organiques volatils. Ce choix est majorant par rapport à la réglementation en vigueur sur les teneurs maximales en benzène utilisé comme additif dans les carburants qui ne doit pas dépasser 1 % depuis le 1er janvier 2000 (cf. Directive n° 98/70/CE du 13 octobre 1998 concernant la qualité de l'essence et des carburants diesel et modifiant la directive 93/12/CEE du Conseil (35)). À noter que la teneur moyenne actuelle en benzène dans les carburants atteint 2 % environ et que les quantités de benzène dans les gaz d'échappement sont réduites grâce aux pots catalytiques. Cette proportion est confirmée par les flux calculés par le logiciel AirAdvanced® Map - TREFIC pour la circulation en dehors des zones descenderie et puits du centre de stockage. Par conséquent, la prise en compte d'un taux de 5 % de benzène dans les gaz d'échappement reste un choix majorant.

En ce qui concerne les chaudières biomasse qui sont sources d'émissions de composés organiques volatils, la proportion de benzène de 25 % a été retenue basée sur les dernières estimations à disposition.

Pour les sources d'émissions autres que les gaz d'échappement et les chaudières, le choix très majorant a été d'assimiler la totalité des hydrocarbures et des COV au benzène.

Les caractéristiques des sources retenues et des flux sont précisées dans l'annexe 2 du présent volume.

d) Données météorologiques

Plusieurs paramètres rentrent en ligne de compte pour le choix de la station météorologique la plus représentative de la zone d'étude :

- sa position géographique : la station retenue doit être la plus proche possible de l'installation et il ne doit pas exister d'obstacle majeur entre la station et la zone d'étude ;
- la cadence d'acquisition des données météorologiques : Météo-France possède des stations où les mesures sont fournies toutes les heures et d'autres tous les jours. Les stations « journalières » ne sont pas retenues car il est difficile d'appliquer une direction représentative d'une journée ;
- la pertinence des données météorologiques : la station météorologique doit mesurer les paramètres nécessaires pour la modélisation. Ces données météorologiques doivent comporter un taux de valeurs invalides faible.

Les données météorologiques considérées sont celles de la station de Houdelaincourt (pour les paramètres vent, température, pluviométrie, humidité relative, nébulosité et rayonnement) située à environ 13 km au nord-est du point de référence localisé au centre des installations de la zone puits et de la zone descenderie du centre de stockage Cigéo. Ces données couvrent la période du 1er janvier 2020 au 31 décembre 2024. Les valeurs recueillies sont jugées représentatives du site.

Ces données météorologiques de 2020 à 2024 sont uniquement utilisées dans le cadre de l'actualisation de la modélisation de la dispersion atmosphérique des rejets chimiques du projet global Cigeo.

Le calcul des émissions de poussières à l'intérieur du centre de stockage Cigéo (roulage de véhicules ou envols de poussières pour les émissions surfaciques) est effectué à partir d'un nombre de jours de pluie estimé à 127 jours en moyenne par an (nombre de jours de pluie supérieure ou égale à 1 mm de pluie) sur la période 2020 à 2024. Le calcul des flux d'émissions associés à la circulation sur la liaison intersites et en dehors du centre de stockage Cigéo (routes départementales) est basé sur un nombre de jours de pluie estimé à 148 jours par an (nombre de jours de pluie supérieure ou égale à 0,254 mm) sur la période de 2020 à 2024). Cette différence de 21 jours de pluie génère des variations d'estimations de flux d'émissions inférieures à 5 % des poussières (PM2,5 et PM10) qui sont considérées comme négligeables au regard des calculs de risque.

e) Émissions liées au trafic circulant sur le réseau routier principal et la liaison intersites

Le calcul des émissions liées au trafic circulant sur le réseau routier principal s'appuie sur les données suivantes :

- le volume de trafic : il s'agit du trafic moyen journalier annuel (TMJA) ;
- les vitesses moyennes des véhicules ;
- le parc automobile ;
- les facteurs d'émissions.

Pour les particules fines (PM10 et PM2.5), les facteurs d'émissions issus du programme COPERT 5 prennent en compte :

- les émissions issues des gaz d'échappement ;
- les émissions liées à l'abrasion mécanique des freins, pneus, routes…

Le calcul des flux associés à la circulation sur le réseau routier principal et la liaison intersites ont fait l'objet d'une méthode adaptée au trafic routier pour tenir compte des évolutions du parc routier roulant actuel et futur. La méthodologie repose sur la mise en œuvre du logiciel AirAdvanced® Map - TREFIC. Le module TREFIC (*Traffic Emission Factors Improved Calculation*) s'appuie sur la méthodologie européenne COPERT la plus récente (version 5). Cette méthodologie est citée dans le guide méthodologique du CEREMA du 22 février 2019 (36) .

Les données retenues pour cette étude correspondent au trafic routier uniquement induit par le projet global Cigéo sur le réseau routier principal et la liaison intersites. Elles ont été estimées sur la base des simulations de trafic réalisées par le Cerema (cf. Chapitre 12 des volumes IV et VII de la présente étude d'impact).

Construction initiale

Les émissions ont été estimées en retenant le parc automobile disponible pour l'année de pic correspondant à l'horizon de la phase de construction initiale.

Fonctionnement

Les émissions ont été estimées en retenant le parc automobile disponible pour l'année de pic correspondant à l'horizon de la phase de fonctionnement.

f) Pollution de fond ou bruit de fond

La pollution de fond sur la zone d'étude, présentée dans le tableau 2-23, a été ajoutée aux résultats des modélisations pour estimer l'impact cumulé. Ces valeurs proviennent de la station de Houdelaincourt et ont été retenues pour les modélisations en phases de construction initiale et de fonctionnement.

Tableau 2-23 Valeurs de bruit de fond retenues

Composés chimiques	2019	2020	2021	2022	2023	Moyenne
NO_2 (µg/m³)	4	3	3	4	3	3,4
SO_2 (µg/m³)	1	1	1	1	1	1
CO (mg/m³)	0,1	0,1	0,2	0,1	0,1	0,12
PM10 (µg/m³)	11	11	12	12	10	11,2
PM2,5 (µg/m³)	-	-	7	8	7	7,33
Benzène (µg/m³)	-	0,3	0,34	0,34	0,38	0,34

2.5.1.2.3 Bilan des émissions

Les tableaux suivants présentent le bilan des émissions du projet global Cigéo pour les phases de construction initiale et de fonctionnement. Ils comprennent les émissions de la zone descenderie, de la zone puits, de la liaison intersites et les émissions sur le réseau routier principal emprunté par les véhicules liés au projet global Cigéo. L'ITE et la voie ferroviaire 027000 n'ont pas été prises en compte au vu des trafics ferroviaires attendus (maximum huit passages de train par jour).

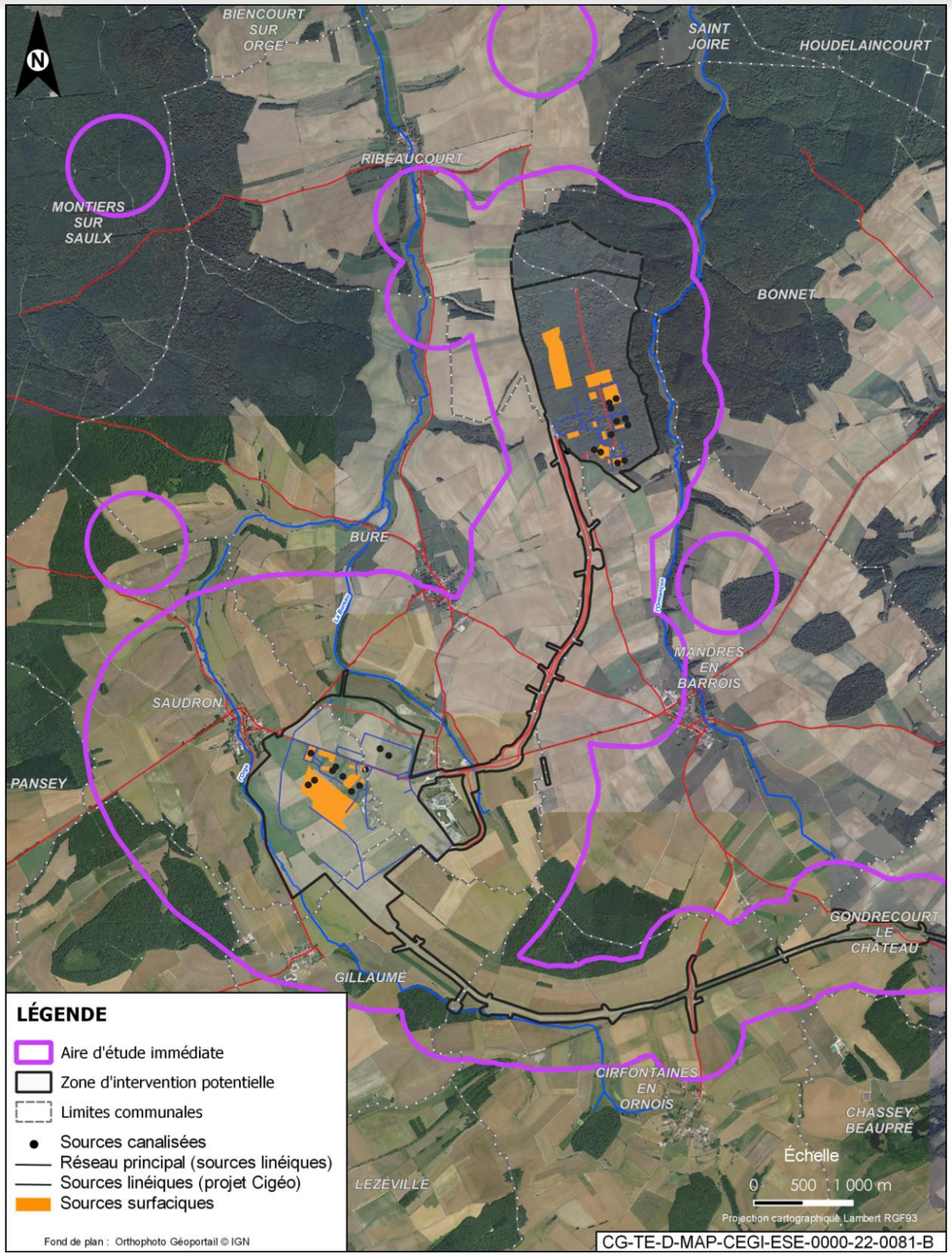


Figure 2-4 *Localisation des sources prises en compte dans la modélisation en phase de construction initiale*

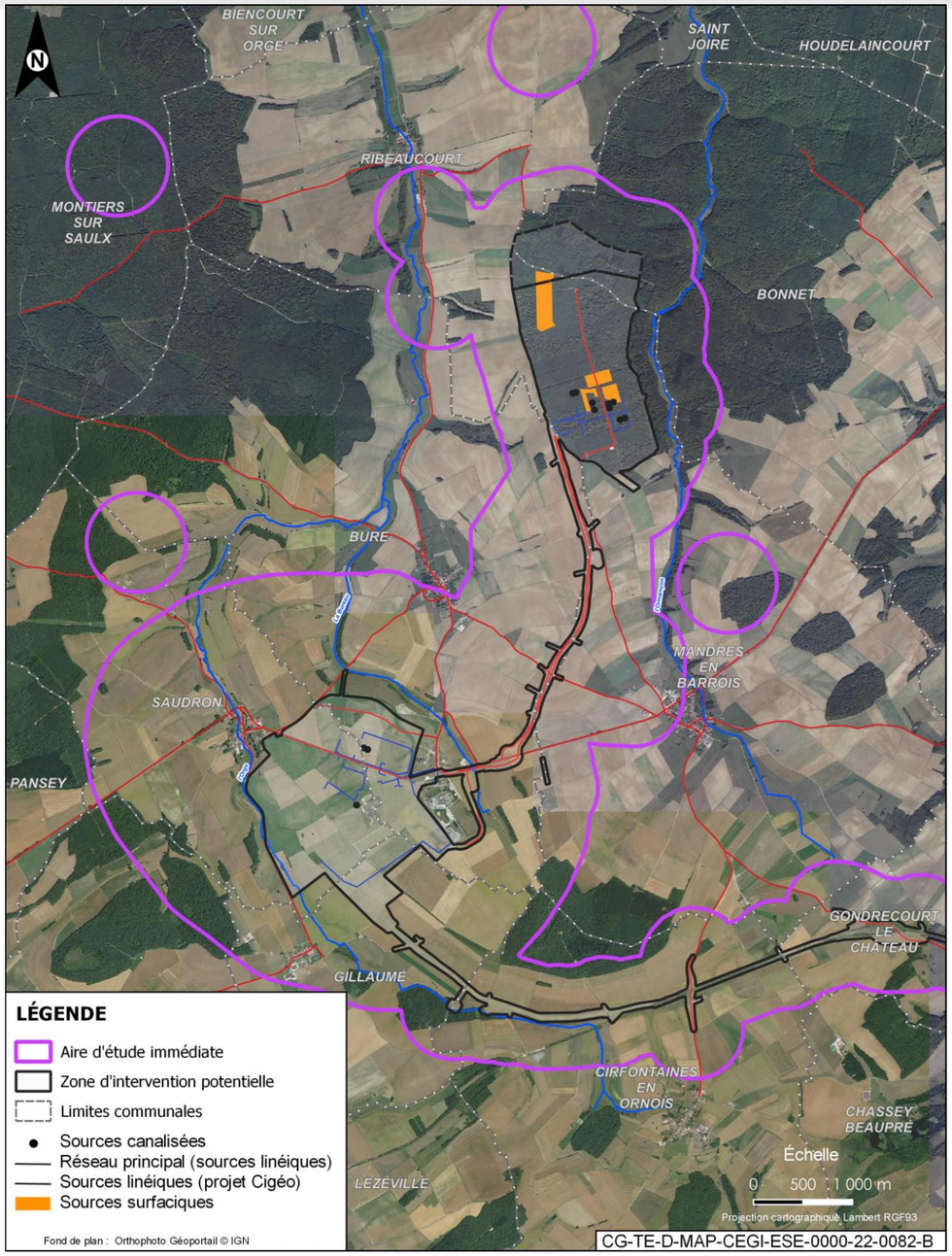


Figure 2-5 *Localisation des sources prises en compte dans la modélisation en phase de fonctionnement*

Tableau 2-24 Bilan des émissions conventionnelles en phase de construction initiale

	Émissions en tonnes/an	Nox	PM10	PM2.5	CO	SO_2	Benzène	COV	BaP
Zone descenderie	Sources ponctuelles[9]	36,93	48,16	48,16	88,48	5,91	24,91	24,91	0,00
	Sources linéiques (circulation véhicules)	2,51	48,79	11,85	9,84	0,00	0,04	0,89	0,00
	Sources surfaciques (engins, envols de poussières)	15,70	12,28	5,15	68,96	0,00	0,17	3,48	0,00
	Sous-total	55,15	109,23	65,16	167,27	5,91	25,13	29,29	0,00
Zone puits	Sources ponctuelles	30,57	25,91	25,91	95,66	0,00	7,18	7,18	0,00
	Sources linéiques (circulation véhicules)	1,72	32,07	7,79	6,48	0,00	0,03	0,56	0,00
	Sources surfaciques (engins, envols de poussières)	15,04	93,34	14,70	65,92	0,00	0,17	3,48	0,00
	Sous-total	47,34	151,32	48,40	168,06	0,00	7,39	11,23	0,00
Liaison intersites	Sources linéiques (circulation véhicules)	0,47	4,89	1,21	0,24	0	9,69E-05	0,01	8,60E-07
	Sous-total	0,47	4,89	1,21	0,24	0	9,69E-05	0,01	8,60E-07
Trafic extérieur (hors LIS)	Sources linéiques (circulation de véhicules)	3,29	10,26	2,63	2,03	0	1,40E-03	0,05	1,25E-05
	Sous-total	3,29	10,26	2,63	2,03	0	1,40E-03	0,05	1,25E-05
	Total	**106,25**	**275,71**	**117,40**	**337,60**	**5,91**	**32,52**	**40,57**	**1,34E-05**

Tableau 2-25 Bilan des émissions conventionnelles en phase de fonctionnement

	Émissions en tonnes/an	Nox	PM10	PM2.5	CO	SO_2	Benzène	COV	BaP	Dioxines et furanes
Zone descenderie	Sources ponctuelles	9,80	0,93	0,75	4,97	3,75	0,23	0,93	0.00	1,87E-09
	Sources linéiques (circulation véhicules)	0,49	9,44	2,29	1,91	0	0,01	0,17	0.00	0
	Sources surfaciques (engins, envols de poussières)	0	0	0	0	0	0	0	0.00	0
	Sous-total	10,29	10,38	3,04	6,88	3,75	0,24	1,10	0.00	1,87E-09
Zone puits	Sources ponctuelles	23,53	48,89	48,77	40,08	5,37	2,80	3,25	0.00	1,20E-09
	Sources linéiques (circulation véhicules)	1,87	37,36	9,08	7,52	0	0,04	0,70	0.00	0
	Sources surfaciques (engins, envols de poussières)	1,48	29,31	5,54	6,45	0	0,02	0,35	0.00	0
	Sous-total	26,87	115,56	63,39	54,06	5,37	2,85	4,30	0.00	1,20E-09
Liaison intersites	Sources linéiques (circulation véhicules)	0,27	6,15	1,51	0,29	0	1,14E-04	0,03	8,92E-07	0
	Sous-total	0,27	6,15	1,51	0,29	0	1,14E-04	0,03	8,92E-07	0
Trafic extérieur (hors LIS)	Sources linéiques (circulation de véhicules)	0,43	5,15	1,29	0,67	0	2,80E-04	0,03	2,88E-06	0
	Sous-total	0,43	5,15	1,29	0,67	0	2,80E-04	0,03	2,88E-06	0
	Total	**37,86**	**137,25**	**69,24**	**61,89**	**9,12**	**3,09**	**5,45**	**3,77E-06**	**3,07E-09**

[9] Les sources liées aux chaudières biomasse en phase de construction initiale n'ont pas été retenues car elles ne fonctionnent que temporairement pendant les périodes les plus froides, pour maintenir une température compatible avec le fonctionnement des centrales à béton.

2.5.1.2.4 Substances non retenues

L''ozone, les métaux (plomb, cadmium, nickel et arsenic), bien qu'indiqués dans l'article R. 221-1 du code de l'environnement, et l'hexafluorure de soufre n'ont pas fait l'objet de modélisation en phases de construction initiale et de fonctionnement.

Les raisons sont expliquées ci-dessous :

- **hexafluorure de soufre (SF_6)**

  Le projet de création de poste de transformation 400/90 kV prévoit l'utilisation d'hexafluorure de soufre. L'hexafluorure de soufre (SF_6) est un excellent isolant électrique utilisé dans les matériels de coupure électrique (disjoncteurs). Confiné dans des compartiments étanches et indépendants, le SF_6 se présente sous la forme d'un gaz incolore, inodore et cinq fois plus lourd que l'air.

  L'hexafluorure de soufre (SF_6) utilisé pour le projet est confiné dans des enveloppes étanches. Le fonctionnement normal du poste électrique 400/90 kV ne donnera lieu à aucune émission de polluants atmosphériques ;

- **ozone (O_3)**

  Le fort champ électrique présent à la surface des conducteurs des lignes électriques 400 kV, provoque dans l'air, au voisinage immédiat de ces conducteurs, des micro-décharges électriques qui entraînent la formation locale d'ozone dans de faibles quantités.

  Au niveau du sol, une campagne de mesure réalisée à l'aplomb de lignes 400 kV a montré un accroissement de l'ordre de 2 µg/m³. Il s'agit d'une valeur très faible, qui est à la limite de sensibilité des appareils de mesure, et qui ne s'observe que dans certaines conditions (absence de vent en particulier). À titre d'information, la quantité mesurée au voisinage immédiat des conducteurs de lignes 735 kV au Canada montre un accroissement de l'ordre de 14 µg/m³ à 18 µg/m³.

  Si l'on tient compte de la faible durée de vie de l'ozone et de sa dispersion par les courants atmosphériques, sa production par les lignes à très haute tension est parfaitement négligeable par rapport à la production naturelle (quelques µg/m³ la nuit et de 60 µg/m³ à 100 µg/m³ le jour, en fonction de l'ensoleillement).

  Au regard des seuils fixés par la réglementation, l'ozone formé localement au voisinage des lignes électriques à très haute tension ne contribue pas à la pollution atmosphérique ;

- **les métaux**

Concernant les rejets de métaux, tels que spécifiés aux 3) et au 8) de l'article R. 221-1 du code de l'environnement relatif à la surveillance de la qualité de l'air, il n'a pas été identifié de sources d'émissions de métaux tels que le nickel, le plomb, le cadmium ou l'arsenic. En effet :

- ✓ le plomb (Pb), était principalement émis par le trafic automobile jusqu'à l'interdiction de l'essence plombée (1er janvier 2000). Les autres sources d'émission de plomb sont principalement liées à la fabrication de batteries électriques, la fabrication de certains verres (cristal), etc. Ces activités sont non présentes sur le projet global Cigéo ;
- ✓ le nickel (Ni) est émis essentiellement par la combustion du fioul lourd qui contient de traces de ce métal mais aussi par les aciéries électriques. Ces activités sont non présentes sur le projet global Cigéo ;
- ✓ les émissions anthropiques de cadmium (Cd) sont essentiellement induites par la production de zinc et l'incinération de déchets. Ces activités sont non présentes sur le projet global Cigéo ;
- ✓ les émissions anthropiques de l'arsenic (As) sont induites, d'une part, par les traces de ce métal dans les combustibles minéraux solides ainsi que dans le fioul lourd et, d'autre part, par certaines matières premières utilisées notamment dans des procédés comme la production de verre, la métallurgie des métaux ferreux et non ferreux. Ces activités sont non présentes sur le projet global Cigéo.

2.5.2 Émissions radioactives

2.5.2.1 État initial du bruit de fond radiologique

2.5.2.1.1 Généralités

Il est rappelé que l'état initial radiologique présenté dans la présente étude d'impact n'a pas pour objectif de faire un état de référence vis-à-vis de la future surveillance de l'environnement mais de caractériser le bruit de fond radiologique du secteur de cette zone éloignée de toute activité nucléaire à l'aide de quelques points représentatifs pour chaque grand milieu environnemental : air (cf. Chapitre 2.5.2 du volume III de la présente étude d'impact), sols (cf. Chapitre 3.3.6 du volume III de la présente étude d'impact), sous-sols (cf. Chapitre 4 .4 du volume III de la présente étude d'impact), eaux souterraines (cf. Chapitre 5.3.3.3 du volume III de la présente étude d'impact), eaux superficielles (cf. Chapitre 5.4.4.2 du volume III de la présente étude d'impact), productions animales et végétales (cf. Chapitres 6.15 et 8.3.2.8.1 du volume III de la présente étude d'impact). En l'absence de sources nouvelles de radioactivité, ce bruit de fond radiologique est considéré comme stable.

Plusieurs campagnes de prélèvements et d'analyse ont été réalisées pour établir l'état initial du bruit de fond radiologique des différents milieux de l'environnement, ce qui a conduit à recueillir plusieurs milliers de résultats. Seuls les résultats les plus pertinents au regard des activités du futur centre de stockage Cigéo sont présentés dans le vol. III de la présente étude d'impact.

Un état initial radiologique actualisé pour chaque grand milieu environnemental sera présenté dans l'étude d'impact liée à la demande d'autorisation de mise en service de l'installation nucléaire de base Cigéo.

2.5.2.1.2 Origine des éléments radioactifs présents dans l'environnement actuel

La présence d'éléments radioactifs dans l'environnement, souvent à l'état de traces, peut avoir deux origines :

- **naturelle :** cosmogénique (éléments radioactifs créés quand un rayon cosmique de haute énergie interagit avec le noyau d'un atome de l'atmosphère) ou tellurique (éléments radioactifs présents depuis l'origine dans le magma qui a formé l'écorce terrestre : ^{232}Th, ^{235}U et ^{238}U) ;
- **artificielle** : liée à une activité humaine (accidents nucléaires, essais atmosphériques d'armes nucléaires, activités nucléaires industrielles, de recherche ou médicales).

Certains éléments radioactifs ont les deux origines. C'est le cas par exemple du ^{3}H (tritium), du ^{14}C (carbone 14), des isotopes de l'uranium (^{235}U, ^{238}U) ou encore du ^{85}Kr (krypton 85).

Seul le niveau de radioactivité des éléments radioactifs ou leur ratio isotopique (rapport entre deux isotopes du même élément) permettent d'en distinguer l'origine. Par exemple, un ratio $^{235}U/^{238}U$ autour de 0,72 % est caractéristique de l'uranium naturellement présent dans l'environnement. Un ratio $^{238}Pu/^{239+240}Pu$ de 0,03 et un ratio $^{241}Am/^{239+240}Pu$ de 0,4 sont révélateurs des retombées d'essais nucléaires. Un ratio $^{134}Cs/^{137}Cs$ de 1 est caractéristique des retombées de l'accident de Fukushima.

Des isotopes du plutonium, issus des retombées des tirs atmosphériques d'armes nucléaires effectués dans les années 1960, sont également encore détectables dans l'aire d'étude éloignée.

Les éléments radioactifs pouvant être présents à l'état naturel et/ou artificiel dans l'aire d'étude ont été recherchés et mesurés (cf. Tableau 2-26). Ils constituent le bruit de fond radiologique ambiant.

Tableau 2-26 Éléments radioactifs naturels et artificiels recherchés dans l'aire d'étude du projet global Cigéo

Sources		Radionucléides
Radioactivité naturelle	**Cosmogénique**	Béryllium 7 (^{7}Be), Sodium 22 (^{22}Na)
		Krypton 85 (^{85}Kr)
		Carbone 14 (^{14}C)
		Autres émetteurs gamma
		Tritium (^{3}H)
	Tellurique	Potassium 40 (^{40}K)
		Thorium 232 (^{232}Th) et descendants
		Uranium 235 (^{235}U) et descendants
		Uranium 238 (^{238}U) et descendants (^{234}U, ^{226}Ra, ^{222}Rn, ^{210}Pb, ^{210}Po)
Radioactivité artificielle	**Essais nucléaires**	Carbone 14 (^{14}C)
		Césium 137 (^{137}Cs)
		Plutonium et Américium ($^{239+240}$Pu, ^{238}Pu, ^{241}Am)
		Strontium 90 (^{90}Sr)
	Tchernobyl	Césium 137 (^{137}Cs)
		Strontium 90 (^{90}Sr)
	Fukushima	Césium 134 et 137 (^{134}Cs, ^{137}Cs)
	Industrie nucléaire	Tritium (^{3}H)
		Carbone 14 (^{14}C)
		Krypton 85 (^{85}Kr)
		Iodes (^{125}I, ^{131}I, ^{129}I)
		Thorium 232 (^{232}Th et descendants)
		Uranium 235 (^{235}U et descendants)
		Uranium 238 (^{238}U) et descendants (^{234}U, ^{226}Ra, ^{222}Rn, ^{210}Pb, ^{210}Po)

Plusieurs campagnes de prélèvements ont été réalisées pour établir le bruit de fond radiologique sur les différents compartiments de l'environnement : atmosphère, eaux souterraines et superficielles, sols, sous-sol et milieu biologique (produits agricoles et naturels). La principale campagne a été réalisée entre 2009 et 2013 par l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN). Les résultats du suivi annuel radiologique des eaux des Calcaires du Barrois dans les trois forages de surveillance du Laboratoire de recherche souterrain ont également été utilisés (2002-2024).

Pour l'air et les dépôts atmosphériques, les données présentées (hormis ^{85}Kr et ^{222}Rn) sont issues des résultats obtenus sur les différents prélèvements atmosphériques réalisés à la station OPE/OPERA d'Houdelaincourt, depuis 2011 (données sur la période 2019-2021).

Enfin, une campagne spécifique sur les eaux superficielles a été menée en 2017.

Il est à noter que la date précise des prélèvements a peu d'importance pour établir le bruit de fond radiologique du fait de l'absence de variations interannuelles des éléments radioactifs présents dans l'environnement, en particulier dans les sols, les eaux et les produits biologiques, sauf en cas d'accidents nucléaires. La qualité radiologique de l'air est mesurée en continu à la station atmosphérique d'Houdelaincourt.

Les éléments radioactifs spécifiques des futures activités du centre de stockage Cigéo font bien partie de la liste des éléments radioactifs recherchés. Il s'agit du ^{3}H, du ^{14}C, du ^{85}Kr et des émetteurs alpha (α) et bêta (β).

La méthode de mesure des éléments radioactifs est liée au type de rayonnement qu'ils émettent. La méthode de préparation des échantillons dépend de la matrice dans laquelle peuvent se trouver les éléments radioactifs à mesurer (air, roche, sol, eau, plante, tissu animal).

Les différentes méthodes de mesure utilisées à la date de réalisation des analyses[10] et les matrices dans lesquelles ont été recherchés les éléments radioactifs de l'état initial de l'environnement du projet global Cigéo sont présentées dans le tableau 2-27 ci-après.

[10] Certaines normes ont pu évoluer depuis les analyses réalisées (certaines datant de 2007)

Tableau 2-27 Méthodes de mesure des éléments radioactifs de l'état initial de l'environnement et matrices dans lesquelles ils sont recherchés

Éléments radioactifs	Méthodes d'analyse	Matrices
^{3}H	Scintillation liquide (Norme NF M60-802-1 de 2000 (37) et NF EN ISO 9698 pour les analyses 2016 (38))	Air (piégeage dans l'eau du barboteur), eau de pluie, feuilles d'arbre, matrices aquatiques
^{14}C	Scintillation liquide (Norme NF M60 812-1 et 2 de 2006 (39, 40) et NF EN ISO 13162 pour les analyses 2016 (41)) Spectrométrie de masse par accélérateur (SMA) (méthode interne ISOTOPTech) à partir de 2021	Air (piégeage dans la soude du barboteur), feuilles d'arbre, matrices aquatiques, sols
Autres émetteurs gamma incluant ^{134}Cs, ^{137}Cs	Spectrométrie gamma (NF M60-790-6 de 1999 (42))	Air (aérosols sur filtres), matrices biologiques, roches (sous-sol), matrices aquatiques, sols
	Détecteur au germanium (NF EN ISO 18589-3 de 2018 (43)) Spectrométrie gamma (méthode IAEA n° 295 (44)) Spectrométrie gamma (NF EN ISO 10703 pour les analyses réalisées en 2016 (45)) Méthode interne Subatech SMART adaptée de la norme NF ISO 18589-3 de 2018 pour les matrices « bio-indicateurs mousses »	Filtres atmosphériques, matrices biologiques
^{40}K	Spectrométrie gamma ou mesure du potassium chimique	Matrices biologiques, sols
^{232}Th et descendants **^{235}U et descendants** **^{238}U, ^{234}U et descendants**	Spectrométrie Alpha (méthode IRSN selon les normes NF EN ISO 17294-1 de 2007 (46) et NF EN ISO 17294-2 de 2016 (47))	Aérosols (filtres)
	Spectrométrie de masse à plasma à couplage inductif (ICP-MS)	Matrices biologiques (céréales, légumes feuilles, herbe, lait), roches (sous-sol), matrices aquatiques, aérosols
	Spectrométrie de masse à thermo-ionisation (TIMS)	Sols
Radon	Détecteur passif	Sol (exhalation)
^{210}Po (descendant du radon provenant du sol)		Matrices biologiques aériennes (herbe, légumes feuilles), matrices aquatiques
$^{239+240}Pu$, ^{238}Pu, ^{241}Am	Après radiochimie et spectrométrie Alpha (méthode IRSN selon la norme NF M 60-790-8 de 1999 (48))	Air (aérosols sur filtres), matrices biologiques (légumes feuilles, herbe, foie et os de sanglier), roches, matrices aquatiques
^{90}Sr	Méthode IRSN selon la norme NF M60-790-7 de 1999 (49) Scintillation liquide 90Sr des aérosols atmosphériques mesuré par comptage proportionnel après radiochimie (méthode interne LMRE selon norme NF ISO 18589-5 de 2009 (50))	Air (aérosols sur filtres), matrices biologiques (herbe, légumes feuilles, lait, fromage, os de sanglier), roches, matrices aquatiques
Apha et bêta global	NF M60-790-5 de 1999 (51) et NF M60-800 et 801 de 2004 pour les analyses 2008 (52, 53) NF EN ISO 10704 de 2019 (54) pour les analyses 2016	Matrices solides (sols, matrices biologiques) Eau

Les différents lieux de prélèvements des échantillons pour les mesures de la radioactivité sont représentés sur la cartographie ci-après.

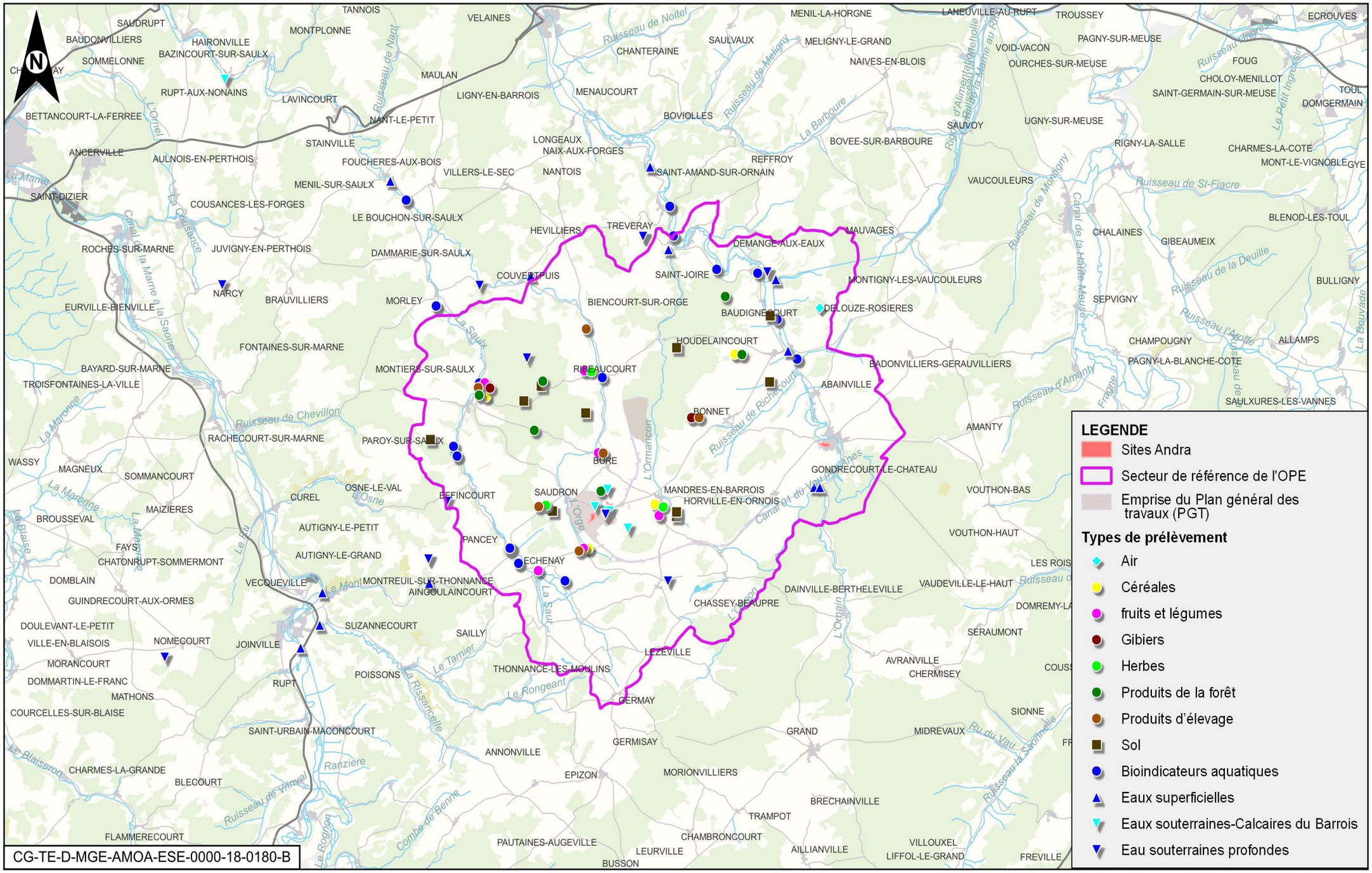


Figure 2-6 Localisation des points de prélèvement des échantillons pour les mesures de la radioactivité

2.5.2.1.3 Méthodes d'analyse des éléments radioactifs de l'état initial de l'environnement

Les mesures sur les prélèvements effectués ont été réalisées, soit par des laboratoires de l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN), soit par le laboratoire d'analyse de Subatech de Nantes (prélèvements effectués dans le cadre de la surveillance du Laboratoire souterrain), tous agréés.

Pour caractériser le fond radiologique atmosphérique, l'Andra exploite, depuis 2011, une station atmosphérique localisée à Houdelaincourt (à environ une dizaine de kilomètres à vol d'oiseau au nord-est des installations du centre de stockage Cigéo et à une altitude surplombant le secteur). Cette station est fortement instrumentée (pylône de 120 mètres, équipé de nombreux capteurs météorologiques et de prélèvement d'air à trois hauteurs, d'un laboratoire de prélèvement d'échantillons atmosphériques et d'analyses en ligne). La représentativité spatiale des mesures qui y sont réalisées va de quelques dizaines de km^2 à plusieurs milliers de km^2 selon le polluant.

Il est à noter que cette station météorologique a vocation à servir de référence pour le fond atmosphérique régional, et plus largement de par sa situation (altitude, éloignée de toute perturbation telle que des bâtiments ou bosquets), pour le quart nord-est de la France. C'est d'ailleurs une station météorologique utilisée pour de nombreux réseaux de suivi de la qualité de l'air nationaux comme ATMO Grand Est, association à but non lucratif agréée par le ministère chargé de l'environnement en charge de la surveillance de la qualité de l'air dans la région Grand Est, l'Observatoire Permanent de la Radioactivité de l'Air (réseau OPERA-Air de l'IRSN) et même internationaux tel que le réseau de suivi des gaz à effet de serre « *Integrated Carbon Observation System* » (ICOS).

Les prélèvements qui y sont réalisés depuis 2011 concernent les aérosols et les retombées atmosphériques (eau de pluie et gaz (^{14}C, ^{3}H)). Les mesures radiologiques qui y sont réalisées sur les aérosols sont publiées régulièrement sur le site Internet du Réseau national de mesures de la radioactivité de l'environnement (RNM).

a) Analyse des aérosols

La plupart des éléments radioactifs recherchés sont adsorbés sur des particules en suspension dans l'air qu'on appelle aérosols. Il s'agit d'éléments radioactifs d'origine naturelle : ^{7}Be, ^{40}K, ^{228}Ac, ^{241}Am, ^{22}Na, ^{234}Th, ^{210}Pb, isotopes de l'uranium et des éléments radioactifs d'origine artificielle : ^{110m}Ag, ^{137}Cs, ^{134}Cs, ^{60}Co, ^{58}Co, ^{57}Co, ^{131}I, ^{154}Eu, ^{54}Mn, ^{106}Rh, ^{124}Sb, ^{125}Sb, ^{90}Sr, $^{239+240}Pu$, ^{241}Am.

Afin de quantifier la radioactivité des particules atmosphériques et vu les faibles niveaux ambiants de radioactivité, des collecteurs à très grands débits ont été utilisés afin de disposer d'une quantité d'aérosols suffisante et de pouvoir mesurer de très faibles concentrations. Les aérosols sont collectés régulièrement sur un filtre, en fibres de polypropylène, de type électret, caractérisé par une très haute efficacité de collecte vis-à-vis du spectre granulométrique de l'aérosol ambiant. Le minimum d'efficacité est de 75 % pour des aérosols de 20 nm de diamètre aérodynamique et devient supérieur à 90 % pour des aérosols de 50 nm. La masse sèche de particules prélevées est estimée à partir de la différence des masses des filtres utilisés, avant et après collecte des aérosols, après un passage à l'étuve à 40 °C pendant 24 heures.

Les éléments radioactifs recherchés sont ensuite estimés par spectrométrie gamma selon la méthode IAEA n° 295 (44) sur les filtres prélevés toutes les semaines. Le ^{90}Sr, les $^{239+240}Pu$, l'^{241}Am et les isotopes de l'uranium présents à l'état d'ultratraces, sont recherchés tous les trois mois après regroupements de plusieurs échantillons préalablement mesurés par spectrométrie gamma, de façon à constituer un échantillon composite d'un volume suffisant pour dépasser les limites de détection.

» SPECTROMÉTRIE GAMMA

La spectrométrie gamma est une technique de mesure nucléaire très utilisée pour identifier des éléments radioactifs par la mesure de l'énergie de rayonnements gamma émis, à l'opposé de la technique utilisant un compteur Geiger qui lui ne détecte que la présence de rayonnement gamma sans pouvoir fournir une information sur la nature de la source détectée. Elle s'appuie notamment sur la physique des semi-conducteurs (généralement au germanium) mis en jeu dans la détection par des détecteurs composés d'un cristal. La mesure par spectrométrie gamma peut rendre compte des activités de quelques radionucléides alpha des chaînes naturelles de l'uranium et du ^{232}Th, de l'^{235}U et de l'^{238}U, lorsqu'ils sont émetteurs gamma, avec des énergies suffisantes et distinctes.

Le ^{90}Sr est mesuré, selon la norme NF ISO 18589-5 de 2009 (50), par comptage proportionnel après radiochimie suivant une méthode interne du Laboratoire de métrologie de la radioactivité dans l'environnement (LMRE) situé à Orsay. Les isotopes du plutonium et l'américium sont analysés après radiochimie par spectrométrie alpha selon la norme NF M 60790-8 de 1999 (48). Les isotopes de l'uranium sont analysés après radiochimie par spectrométrie de masse à plasma à couplage inductif (ICP-MS) suivant une méthode interne du LMRE et selon les normes NF EN ISO 17294-1 de 2007 (46) et NF EN ISO17294-2 de 2016 (47).

» SPECTROMÉTRIE DE MASSE À PLASMA À COUPLAGE INDUCTIF (ICP-MS)

La spectrométrie de masse à plasma à couplage inductif, ou ICP-MS, est un type de spectrométrie de masse capable de détecter les éléments à des concentrations très faibles, pouvant aller jusqu'à une partie par billiard (1 000 000 000 000 000 ; un million de milliards) lorsque le bruit de fond radiologique est assez faible ou interfère peu.

b) Analyse du ^{14}C

À la station atmosphérique d'Houdelaincourt, le ^{14}C gazeux est échantillonné en continu grâce à un barboteur de la marque SDEC modèle HAG 7000, muni de quatre pots. Après filtration des aérosols de l'air, le barbotteur piège le ^{14}C sous sa forme dioxyde de carbone (CO_2) dans une solution de soude dans les deux premiers biberons. Les autres formes carbonées présentes dans l'air (CH_4…) sont oxydées dans un four à catalyseur puis piégées dans une même solution de soude dans les deux derniers biberons. Le barbotteur est équipé d'un système de réfrigération qui permet de maintenir les solutions de piégeage à une température moyenne de 7 °C (pour une température ambiante de 20 °C) et de minimiser ainsi la perte possible d'échantillon par évaporation.

Les solutions de soude, qui ont piégé le ^{14}C sous ses différentes formes chimiques, sont ensuite envoyées tous les trois mois en laboratoire pour un comptage en scintillation liquide après précipitation au chlorure de baryum et dissolution suivant la norme NF M 60 812-1 de 2006 (39). L'activité du ^{14}C est rapportée au volume d'air échantillonné dans l'appareil.

Depuis le début de l'année 2021, les mesures de ^{14}C gazeux sont réalisées exclusivement par spectrométrie de masse par accélérateur (SMA) afin d'obtenir des valeurs plus représentatives qu'auparavant et de diminuer les incertitudes par rapport à celles de la mesure par scintillation liquide (entre 15 % et 50 %). Les incertitudes avec la SMA sont inférieures à 1 %.

c) Analyse du tritium

Le tritium atmosphérique est échantillonné par un barboteur (muni de quatre pots) similaire au barbotteur utilisé pour le ^{14}C mais la solution de piégeage utilisée est de l'eau. Après filtration des aérosols, l'air circule dans les deux premiers pots dans lesquels la vapeur d'eau tritiée (forme chimique HTO) est piégée. Ensuite l'air passe dans un four à catalyseur dans lequel le tritium présent sous d'autres formes gazeuses, comme l'HT (hydrogène tritié) ou le CH_3T (méthane tritié), est oxydé sous forme vapeur puis piégé par le principe de barbotage dans les deux derniers biberons. Le barbotteur est équipé d'un système de réfrigération qui permet de maintenir les solutions de piégeage à une température moyenne de 7 °C (pour une température ambiante de 20 °C) et de minimiser ainsi la perte possible d'échantillon par évaporation.

Les solutions d'eau sont ensuite envoyées en laboratoire pour un comptage en scintillation liquide suivant la norme EN ISO 9698 de 2015 (38) pour la méthode ALOKA. La radioactivité mesurée en tritium est rapportée au volume de la solution.

d) Analyse du krypton 85

Le ^{85}Kr, gaz rare, a fait l'objet de prélèvements spécifiques (échantillons de 1 m^3 à 4 m^3), au cours de campagnes ponctuelles définies par rapport à la provenance des vents dominants, notamment ceux pour lesquels la station pouvait être considérée comme située sous les vents de l'usine de la Hague qui constitue l'une des deux sources principales de ^{85}Kr dans l'air à l'échelle européenne avec l'usine de Sellafield située en Grande Bretagne. La mesure du ^{85}Kr présent à très faible niveau (de l'ordre de 2 $Bq.m^{-3}$) nécessite une étape de concentration sur du charbon actif à très basse température. Le comptage du ^{85}Kr enrichi est ensuite réalisé par spectrométrie gamma.

e) Analyse du radon

Les mesures d'exhalation de radon sont effectuées *in situ* à l'aide d'un dosimètre passif. Un micro-ordinateur associé à un microscope équipé d'une caméra permet ensuite de reconnaître et de compter les traces des particules alpha du radon.

» DOSIMÈTRE PASSIF

On appelle passifs des dosimètres n'ayant pas besoin de source externe d'énergie pour fonctionner. Ce sont des dosimètres intégrateurs, c'est-à-dire qu'ils ne donnent qu'une estimation d'une dose globale sur une période définie. Une durée de mesure minimale d'une semaine est nécessaire afin d'inclure un nombre minimum de cycles de variation journalière.

2.5.2.2 Incidences

2.5.2.2.1 Méthode d'évaluation des émissions atmosphériques radioactives

Les émissions radioactives pendant la phase de fonctionnement du centre de stockage Cigéo proviennent du relâchement de certains éléments radioactifs gazeux (tritium, ^{14}C, ^{85}Kr), par les colis de déchets MA-VL et de la présence potentielle d'éléments radioactifs particulaires (aérosols) sur les surfaces externes des colis de déchets qui sont réceptionnés, dans la limite acceptable de la réglementation des transports.

a) Démarche générale

L'évaluation de ces émissions est effectuée avec des hypothèses majorantes, à savoir :

- les colis de déchets présentant des émissions d'éléments radioactifs gazeux (principalement les déchets de structure des combustibles usés des réacteurs à eau pressurisée compactés et conditionnés en conteneurs standards de déchets compactés et les déchets activés issus des réacteurs) sont considérés comme susceptibles d'être présents à la fois dans l'installation nucléaire de surface (réception et transfert) et dans l'installation souterraine (stockage en alvéole) ;
- les caractéristiques des éléments radioactifs gazeux émis par ces colis de déchets sont évaluées, à partir des données de connaissances fournies par les producteurs de déchets radioactifs, et de façon majorée, notamment sans tenir compte de la capacité de rétention de ces gaz par le conteneur ;
- l'ensemble des colis de déchets reçus et stockés est considéré comme pouvant présenter une contamination surfacique labile (éléments radioactifs particulaires) au niveau maximal des seuils autorisés, et que cette contamination est totalement remise en suspension dans l'air ;
- concernant les éléments radioactifs particulaires (aérosols), l'efficacité des filtres très haute efficacité (THE) équipant les ventilations des installations est considérée égale à 99,9 % (minimum requis par la norme de fabrication).

Les rejets radioactifs atmosphériques annuels maximaux sont évalués au niveau de chaque émissaire (cheminée du bâtiment nucléaire EP1 et cheminée de ventilation de la zone en exploitation de l'installation souterraine) et sur toute la durée de fonctionnement de l'installation.

Le bâtiment nucléaire EP2, dont la construction n'est envisagée qu'après plusieurs décennies de fonctionnement, recevra une majorité de colis de déchets HA vitrifiés qui n'émettront pas d'éléments radioactifs gazeux et quelques colis de déchets MA-VL qui ne sont pas encore produits. Le conditionnement de ces derniers devra respecter les spécifications d'acceptation de l'Andra et s'appuyer sur les meilleures techniques disponibles du moment. Les rejets radioactifs atmosphériques annuels durant cette période seront faibles et du même ordre de grandeur que ceux réalisés durant le fonctionnement du bâtiment nucléaire EP1.

b) Quantification des émissions gazeuses

La démarche d'évaluation des émissions gazeuses comprend quatre étapes (cf. Figure 2-7).

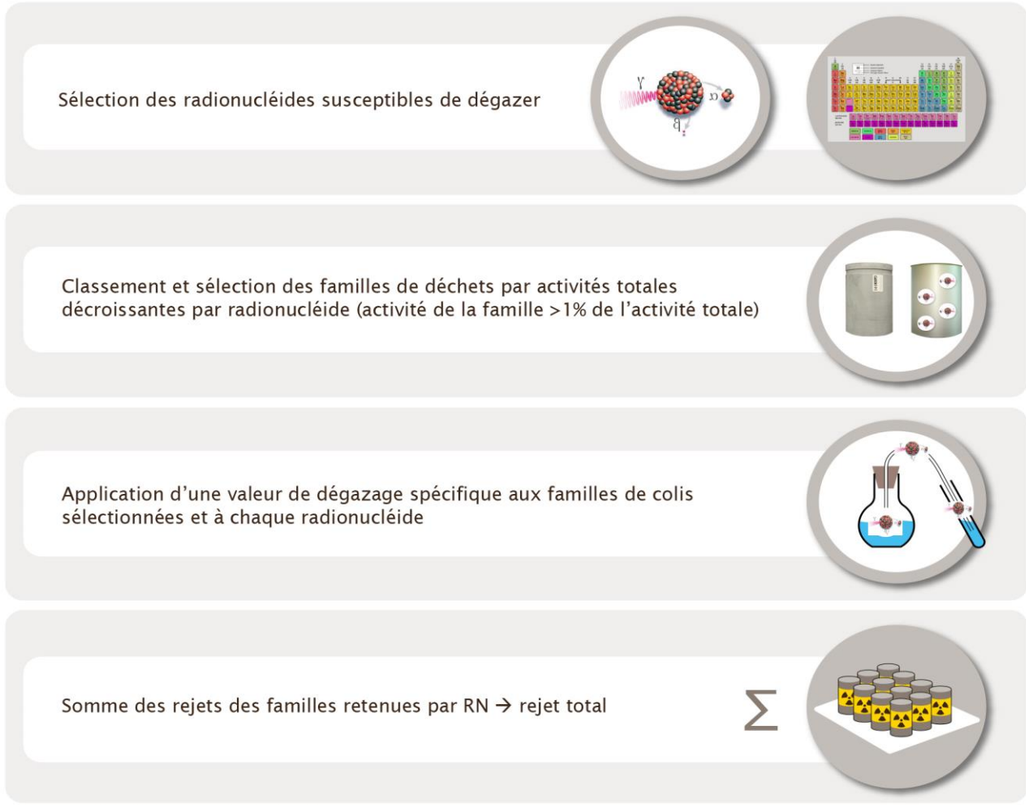


Figure 2-7 Principes de calcul de l'estimation des rejets gazeux

Les éléments radioactifs gazeux susceptibles d'être émis par les colis de déchets radioactifs sont le ^{3}H, le ^{14}C et le ^{85}Kr.

Les calculs à partir des activités en radium présentes dans certains colis dégazant potentiellement du radon montrent que l'activité ajoutée dans l'air en ^{222}Rn est négligeable, bien inférieure au $Bq.m^{-3}$. La valeur de référence en France est une concentration dans l'air de 300 $Bq.m^{-3}$ définie comme le niveau de référence de l'activité volumique moyenne annuelle en radon dans les immeubles bâtis dans l'article R. 1333-28 du code de la santé publique. Ce seuil a été établi sur la base de recommandations internationales, dont l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS). Rappelons que la concentration moyenne dans l'air extérieur, correspondant au bruit de fond, varie entre 5 et 15 $Bq.m^{-3}$.

Les différents types de colis contribuant aux émissions gazeuses du centre de stockage Cigéo et leurs niveaux de radioactivité sont présentés dans le tableau 2-28. Chacune des trois catégories de colis primaires, déchets de structure CSD-C, déchets activés C1PG et autres divers CEA, comporte différentes familles de colis primaires qui ne contribuent pas de la même façon à l'activité en tritium, carbone 14 et krypton 85.

Le nombre de colis par catégorie indiqué dans le tableau correspond donc à différentes familles de colis primaires en fonction de chaque élément radioactif.

Tableau 2-28 *Colis contribuant aux émissions gazeuses du centre de stockage Cigéo et activités associées*

Colis	Tritium			Carbone 14			Krypton 85		
	Nombre de colis	Part de l'activité totale en tritium	Activité en tritium	Nombre de colis	Part de l'activité totale en tritium	Activité en tritium	Nombre de colis	Part de l'activité totale en tritium	Activité en tritium
	Nb.	%	Bq	Nb.	%	Bq	Nb.	%	Bq
Déchets de structure (CSD-C ou assimilés)	51 803	98	1×10^{18}	40 570	6	1×10^{16}	52 203	98,8	6×10^{16}
Déchets activés issus des réacteurs (C1PG)	1 200	2	2×10^{16}	7 560	88	2×10^{14}			
Déchets divers CEA				3 300	4	6×10^{14}			
Total		100	1×10^{18}		98	2×10^{16}		98,8	6×10^{16}

Ces gaz radioactifs présents dans les déchets sont relâchés progressivement en dehors de leur matrice d'immobilisation. Les taux de relâchements gazeux des colis sont définis sur la base des données fournies par les producteurs des déchets, soit à partir de mesures directes, soit à partir de modèles de calculs. Ils sont restitués dans le tableau 2-29.

Tableau 2-29 *Taux de relâchement en tritium, carbone 14 et krypton 85, des colis de déchets radioactifs*

Types de colis de déchets	Fraction/jour	Fraction/an
^{3}H		
Déchets de structure compactés (CSD-C)	$1{,}10 \times 10^{-9}$	
Déchets activés des réacteurs		$4{,}00 \times 10^{-6}$
^{14}C		
Déchets de structure compactés (CSD-C)	$6{,}00 \times 10^{-7}$	
Déchets activés des réacteurs		$2{,}00 \times 10^{-7}$
^{85}Kr		
Déchets de structure compactés (CSD-C)	$3{,}90 \times 10^{-7}$	

c) Quantification des émissions particulaires

Les émissions en aérosols radioactifs peuvent provenir de la mise en suspension de la contamination surfacique non fixée des colis.

La contamination de surface non fixée retenue est la limite opérationnelle de l'installation qui correspond aux critères d'acceptation des colis dans l'installation. Ces limites sont de 4 $Bq.cm^{-2}$ pour les émetteurs bêta/gamma et de 0,4 $Bq.cm^{-2}$ pour les émetteurs alpha.

Dans l'évaluation, elle est considérée équivalente à un dixième de la contamination surfacique des colis primaires reçus (valeur actuellement non dépassée sur les colis primaires déjà produits et entreposés chez les producteurs).

L'activité rejetée est évaluée comme suit :

Activité rejetée = [SextCtS x (Aα + Aβγ) x F1 x F2] × Nombre de colis

où :

- SextCts : surface externe du colis primaire ;
- Aα : activité surfacique des émetteurs alpha ;
- Aβγ : activité surfacique des émetteurs bêta/gamma ;
- F1 : facteur de remise en suspension ;
- F2 : facteur de filtration des filtres THE.

La surface moyenne d'un colis de stockage de type MA-VL est de $1{,}6 \times 10^{5}$ cm^{2}.

Un facteur de mise en suspension des particules radioactives de 1×10^{-5} h^{-1} est considéré dans le calcul d'émission. Ce facteur correspond à une mise en suspension d'origine aéraulique pour une vitesse d'air supérieure ou égale à 1 $m.s^{-1}$ (vitesse de ventilation d'environ 15 m/s). Aucune diminution de facteur ou baisse de la contamination surfacique n'est considérée pour traduire l'appauvrissement de cette contamination sur la durée.

Un facteur de filtration de 1×10^{-3} est retenu pour un niveau de filtration très haute efficacité (THE), qui correspond à l'efficacité minimale requise.

Le bâtiment nucléaire de surface ne peut pas contenir plus de 100 colis de stockage (ce qui correspond à 400 colis primaires environ). L'ensemble des colis de déchets MA-VL stockés en alvéole dans l'installation souterraine contribuant significativement aux émissions gazeuses représente environ 60 000 colis de stockage. Les alvéoles de stockage des colis de déchets HA étant fermés et non ventilés, la contamination surfacique potentielle des colis n'est pas susceptible d'être mise en suspension et entraînée dans un système de ventilation.

d) Les rejets radioactifs atmosphériques issus de l'installation nucléaire de surface

Le nombre de colis présents chaque année dans l'installation nucléaire de surface est considéré égal au nombre maximal de colis pouvant y transiter. Les rejets radioactifs atmosphériques annuels maximaux issus de l'installation nucléaire de surface, située sur la zone descenderie, sont présentés dans le tableau 2-30 ci-après.

Ces rejets sont exprimés en becquerel ou giga becquerel par an.

Tableau 2-30 Rejets radioactifs annuels maximaux de l'installation nucléaire de surface

Cheminée de l'installation nucléaire de surface	Rejets radioactifs atmosphériques annuels maximaux
Tritium (^{3}H)	De l'ordre de 3 GBq/an
Carbone 14 (^{14}C)	De l'ordre de 3 GBq/an
Krypton 85 (^{85}Kr)	De l'ordre de 50 GBq/an
Émetteurs bêta	De l'ordre de 600 Bq/an
Émetteurs alpha	De l'ordre de 60 Bq/an

Les émissions radioactives atmosphériques issues de l'installation souterraine.

Les rejets radioactifs atmosphériques annuels maximaux issus de l'installation souterraine, située sur la zone puits, sont présentés dans le tableau 2-31 ci-après.

Tableau 2-31 Rejets radioactifs annuels maximaux de l'installation souterraine

Cheminée de l'installation souterraine	Rejets radioactifs atmosphériques annuels maximaux
Tritium (^{3}H)	De l'ordre de 300 GBq/an
Carbone 14 (^{14}C)	De l'ordre de 300 GBq/an
Krypton 85 (^{85}Kr)	De l'ordre de 5 000 GBq/an
Émetteurs bêta	De l'ordre de 85 000 Bq/an
Émetteurs alpha	De l'ordre de 8 500 Bq/an

2.5.2.2.2 Méthode d'évaluation de la dispersion atmosphérique

L'évaluation de la dispersion des rejets radioactifs dans l'air, et les dépôts dans l'environnement associés, est réalisée par modélisation. Le modèle et le code de dispersion atmosphérique utilisé, ainsi que les hypothèses associées, sont présentés dans les chapitres ci-dessous. L'annexe 2 du volume VI de la présente étude d'impact présente en détail les valeurs de paramètres entrées dans le module Gascon de la plateforme CERES, utilisé pour les calculs.

a) Modèle et code de dispersion atmosphérique utilisés

En fonctionnement normal, la dispersion des rejets émis par voie atmosphérique est évaluée sur la base d'un modèle à bouffée gaussienne à l'aide du code de calcul GASCON® (55) de la plateforme CERES® version 6.5.2 (code d'évaluations rapides environnementales et sanitaires) (56), développée par le CEA. Ce code permet, à partir d'un rejet émis par voie atmosphérique en fonctionnement normal à débit constant annuel, de déterminer en différents points de l'environnement, la radioactivité moyenne dans l'air ainsi que les dépôts au sol.

Le code de calcul GASCON® permet de modéliser plusieurs sources de rejets atmosphériques simultanées. Chaque rejet est caractérisé par les éléments radioactifs rejetés, leur forme physico-chimique (gazeuse, aérosols, vapeur et organique) qui détermine la vitesse de dépôt et leur activité annuelle en $Bq.an^{-1}$. Il permet d'évaluer pour l'ensemble des points de calcul, la radioactivité volumique dans l'air (en $Bq.m^{-3}$) et la radioactivité surfacique des dépôts (en $Bq.m^{-2}$).

Dans ce code, trois modèles d'évolution des écarts-types sont proposés dans le code : le modèle proposé par Doury et les modèles proposés respectivement par Briggs (1973) (57) et par Pasquill-Turner (1964) (58, 59). Les écarts-types de Pasquill-Turner sont retenus pour les calculs de dispersion atmosphérique du centre de stockage Cigéo comme recommandé par l'AIEA (60).

Le module de calcul GASCON® de la plateforme CERES® est également utilisé pour la réalisation des études d'impact et de danger des installations (INB, INBS et ICPE) du CEA. Contrairement au code de calcul Impact™® d'ARIA technologie, qui modélise uniquement la dispersion atmosphérique, la plate plateforme CERES® permet de modéliser la dispersion atmosphérique et de calculer la dose efficace engagée par l'homme, en tenant compte de l'ensemble des transferts *via* l'environnement.

b) Hypothèses retenues pour la modélisation de la dispersion atmosphérique

Hypothèses associées aux rejets atmosphériques

Les hypothèses retenues pour la modélisation de la dispersion atmosphérique sont les suivantes :

- l'appauvrissement du panache lié à la décroissance radioactive pendant le transfert atmosphérique (les filiations des éléments radioactifs au cours de ce transfert sont établies à l'aide des formules de Bateman) ;
- les calculs de dépôts au sol prennent en compte les dépôts secs et humides sur le sol conduisant à un appauvrissement du panache le long de son parcours ;
- la majorité des particules est filtrée avant rejet, mais la part potentiellement non piégée est prise en compte dans l'évaluation de la dispersion. Il s'agit de particules émettrices alpha qui sont assimilées à du ^{239}Pu et de particules émettrices bêta-gamma qui sont assimilées à du ^{90}Sr. Ces éléments radioactifs sont les plus pénalisants en termes de coefficients de dose à l'homme par inhalation parmi les émetteurs de la même famille. Ils permettent de surestimer les effets sur la santé humaine.

Les caractéristiques des émissaires de rejets (cheminées) sont présentées dans le tableau 2-32 ci-après.

Tableau 2-32 Caractéristiques des émissaires des rejets atmosphériques radioactifs

Paramètres	Unité	Donnée	
		Émissaire de rejet de l'installation souterraine (zone puits)	Émissaire de rejet de l'installation nucléaire de surface EP1 (zone descenderie)
Coordonnées X en L 93	m	875 915,1	872 897,3
Coordonnées Y en L 93	m	6 826 534,4	6 823 213,6
Hauteur par rapport au sol	m	12	30
Température des rejets	°C	20	20
Vitesse des rejets	m/s	De l'ordre de 15	De l'ordre de 15

Dans le cas des dépôts secs, les particules et les gaz se déposent sur les surfaces, par absorption chimique, et par d'autres processus biologiques, chimiques et physiques. Les vitesses de dépôt des différents polluants étudiés permettent de tenir compte de la capacité du sol à retenir les polluants qui s'y déposent. Ces vitesses de dépôts, issues de travaux de recherches, sont restituées dans le tableau 2-33.

Tableau 2-33 Valeurs des paramètres pris en compte pour la modélisation de la dispersion atmosphérique

Élément	Isotope	Forme chimique	Vitesse de dépôt	Période radioactive
			m.s^{-1}	an
Tritium	^{3}H	Eau tritiée, vapeur (HTO)	$3{,}00 \times 10^{-3}$	12,3
Carbone 14	^{14}C	$^{14}CO_2$ (gaz)	0	5 700
Krypton 85	^{85}Kr	Gaz	0	10,8
Particules bêta-gamma	^{90}Sr	Particule	$5{,}00 \times 10^{-3}$	28,8
Particules alpha	^{239}Pu	Particule	$5{,}00 \times 10^{-3}$	24 130

Hypothèses associées aux conditions météorologiques

Les paramètres les plus importants associés aux conditions météorologiques pour la modélisation de la dispersion atmosphérique sont la direction du vent, la vitesse du vent, la température extérieure, la pluviométrie et la stabilité de l'atmosphère.

Ces paramètres sont variables dans le temps et dans l'espace. Ils résultent de la superposition de phénomènes atmosphériques à grande échelle (régime cyclonique ou anticyclonique) et de phénomènes locaux (influence de la rugosité, de l'occupation des sols et de la topographie). C'est pourquoi il est nécessaire de rechercher des chroniques météorologiques :

- suffisamment longues et complètes ;
- représentatives de la climatologie du site.

» RUGOSITÉ

La rugosité est un facteur important en mécanique des fluides, au même titre que la turbulence de l'écoulement (ces deux facteurs pouvant avoir des effets assez proches). La rugosité absolue d'une surface est prise comme la hauteur moyenne de ses aspérités, mesurée depuis le fond d'un creux jusqu'au sommet d'un pic (comme on mesure la hauteur des vagues, ce que les marins appellent le "creux").

L'élaboration des chroniques météorologiques est effectuée en sélectionnant une station météorologique représentative de la zone d'étude. Plusieurs paramètres rentrent en ligne de compte pour le choix de cette station météorologique :

- sa position géographique : la station retenue doit être la plus proche possible des émissaires de rejets et il ne doit pas exister d'obstacle majeur entre la station et l'aire d'étude ;
- la cadence d'acquisition des données météorologiques : Météo-France possède des stations où les mesures sont fournies à pas de temps de 6 minutes à 1 jour. Les données météorologiques suffisamment fines au niveau horaire sont retenues pour avoir une bonne représentativité de la météorologie locale et pour prendre en compte les phénomènes météorologiques diurnes ;
- la pertinence des données météorologiques acquises par rapport au besoin de la modélisation de la dispersion atmosphérique (direction et force du vent, pluviométrie, température).

Les données météorologiques utilisées à la station d'Houdelaincourt sont des mesures relevées toutes les six minutes, sur lesquelles un post-traitement est réalisé afin d'obtenir un fichier météo à une cadence horaire (moyenne sur l'heure). Ces fichiers comportent 5 années de mesures : de 2015 à 2019. Cette période de cinq ans est conforme aux recommandations en la matière (61). Les résultats d'analyse statistique des données météorologiques sont présentés dans l'annexe 2 du volume VI de la présente étude d'impact.

Les variations des conditions de transfert au cours de l'année, moyennées sur une chronique de cinq années, sont prises en compte par la fréquence d'apparition de ces conditions météorologiques sur 18 secteurs de 20°(18 × 20° = 360°) couvrant l'ensemble des directions. Dans l'hypothèse d'une émission continue et à débit constant dans le temps, le calcul est réalisé pour chacune des conditions météorologiques et la radioactivité moyenne annuelle associée aux fréquences d'apparition de ces conditions météorologiques. À partir de cette radioactivité annuelle constante calculée, la concentration intégrée sur le temps est effectuée.

Pour toutes les simulations de dispersion atmosphérique, les hypothèses de calcul suivantes ont été prises en compte :

- une rugosité correspondant à une zone rurale (zones agricoles hétérogènes) ;
- un modèle de dispersion selon les écarts-types de Pasquill (modèle standard adapté pour les sites ruraux) ;
- une surélévation du panache liée à la vitesse d'éjection et à la température des fumées ;
- le calcul des dépôts au sol lié à la chute gravitaire des particules (dépôts secs) et au lessivage du panache par la pluie (dépôts humides) ;
- l'appauvrissement du panache lié à la décroissance radioactive ;
- une maille de calcul de 100 mètres (avec un domaine d'étude de 16 km x 16 km).

Par construction, les données météorologiques sont supposées identiques (direction et vitesse du vent, température…) en tout point du domaine, ce qui donne un champ de vent uniforme horizontalement avec un profil vertical constant dans le temps. La turbulence atmosphérique est considérée homogène. Elle est prise en compte par l'intermédiaire de classes de stabilité, issues de l'analyse des conditions météorologiques. Une analyse statistique des données météorologiques permet de répartir les occurrences horaires en différentes classes de stabilité et ainsi de connaître le pourcentage d'occurrence de chaque classe en fonction de la vitesse du vent (cf. Annexe 2 du volume VI de la présente étude d'impact).

Les écarts types de distribution gaussienne des concentrations dans l'air dépendent de la classe de stabilité atmosphérique. À chaque classe de stabilité est associé un jeu de paramètres permettant de calculer les écarts-types (horizontal et vertical) caractérisant la distribution gaussienne du polluant dans l'air en aval du point de rejet.

Les classes de stabilité de Pasquill varient de A à F de l'atmosphère la plus instable à la plus stable (cf. Figure 2-8).

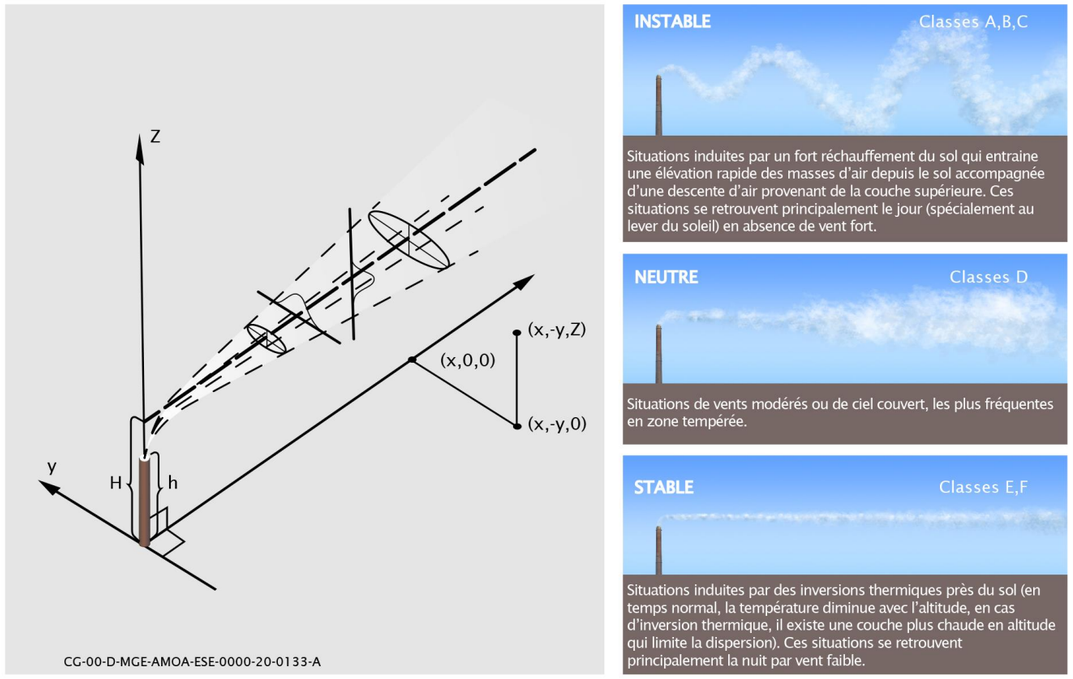


Figure 2-8 Représentation d'une bouffée gaussienne et classes de stabilité

Les unités retenues pour exprimer les concentrations de polluant dans l'air et les dépôts au sol sur les cartes présentées sont :

- pour les concentrations : le $Bq.m^{-3}$;
- pour les dépôts au sol (somme des dépôts secs et des dépôts humides) : le $Bq.m^{-2}.s^{-1}$.

c) Le cas particulier du tritium

La méthodologie générale valable pour la plupart des éléments radioactifs n'est pas applicable pour le tritium en raison de sa mobilité importante, de sa spécificité biologique (présence d'hydrogène en quantité massique dans l'environnement) et de ses changements de formes lors du transfert atmosphérique et dans l'environnement.

L'étude des rejets en tritium a nécessité le développement d'un module spécifique de calculs dans le code de calcul GASCON®. Ce module s'appuie sur les études de Chamberlain (1964) dans Montfort et Duchenne, 2011 (56) pour la contamination des eaux de pluie lors de la traversée du panache et sur les travaux de Belot et *al.,* 1996 (62) pour la contamination des sols, des végétaux et des animaux.

Transfert dans l'atmosphère – Appauvrissement dû au dépôt

Dans l'atmosphère, le tritium est principalement présent sous forme de gaz HT ou d'eau tritiée HTO, lesquels sont soumis à des phénomènes physiques et chimiques spécifiques. Dans l'atmosphère, la transformation chimique de la forme HT en eau tritiée HTO est extrêmement lente. En revanche, au niveau du sol, la forme HT est transformée en HTO par des micro-organismes porteurs de l'enzyme hydrogénase. Par la suite, une partie de l'HTO contenue dans le sol est réémise vers l'atmosphère par évaporation. Le reste percole dans le sol.

Dans le cas de la forme HT, la dispersion atmosphérique est calculée de la même façon que pour les vapeurs par temps sec quelles que soient les conditions météorologiques. En effet, la forme HT se dépose au sol et il y a oxydation au sol de HT en HTO qui ne se réémet pas complètement dans l'atmosphère. En revanche, du fait de sa faible solubilité dans l'eau, la forme HT n'est pas entraînée par la pluie.

Dans le cas de la forme HTO, par temps sec, on considère que le nuage n'est pas appauvri car il y a réémission d'une partie de l'eau tritiée HTO déposée au sol dans l'atmosphère. La dispersion atmosphérique est donc analogue à celle évaluée pour les gaz. Par temps de pluie, comme l'eau tritiée HTO a une forte affinité pour les gouttes d'eau, la dispersion atmosphérique prend en compte un appauvrissement évalué à partir des relations de Chamberlain.

Dans les calculs, la moitié de l'activité déposée en amont du point considéré sous forme HT ou HTO est supposée réémise sous forme HTO et réattribuée comme émission.

Dépôt sec de HT et HTO

Dès que de l'hydrogène tritié (HT) touche la surface du sol, il s'y dépose à une vitesse similaire à une vitesse de dépôt sec. Sur la plupart des types de sols, la vitesse de dépôt sec de l'hydrogène tritié est indépendante du temps de contact. Pour un type de sol donné, la vitesse de dépôt est faible si le sol est sec, augmente avec l'humidité et retombe à des valeurs très basses si le sol est gorgé d'eau. On retient une valeur de dépôt sec de 3×10^{-3} $m.s^{-1}$.

Comme l'hydrogène tritié HT, la vapeur d'eau tritiée HTO peut être absorbée à la surface du sol à une vitesse de dépôt sec spécifique. La vitesse de dépôt sec de la vapeur d'eau tritiée dépend de l'état de surface du sol (présence d'un couvert végétal, sol nu...) et des conditions climatiques. Selon Belot, la valeur serait comprise entre 10^{-3} $m.s^{-1}$ et 10^{-2} $m.s^{-1}$.

Les expériences ont montré que la vitesse de dépôt sec est d'autant plus faible que :

- le sol est recouvert de végétaux qui apportent une résistance au transfert de la vapeur d'eau ;
- la surface du sol présente une couche superficielle sèche, par exemple en été, après quelques jours sans pluie sur un sol découvert.

On retient pour l'HTO une vitesse de dépôt sec de 3×10^{-3} $m.s^{-1}$, qui constitue l'ordre de grandeur du phénomène et est raisonnablement pessimiste. Cette vitesse est probablement surestimée car elle diminue peu à peu lorsque l'exposition se prolonge.

Dépôt humide de HT et HTO

Le dépôt humide correspond à l'entraînement du tritium par les précipitations. En raison de sa faible solubilité, l'hydrogène tritié HT est peu entraîné par la pluie. Sa vitesse de dépôt par temps de pluie est nulle. Au contraire, la vapeur d'eau tritiée HTO présente une forte similitude avec l'eau légère et est facilement captée par les gouttes. La vitesse de dépôt de l'eau tritiée par temps de pluie est évaluée à partir du débit de dépôt au sol de l'eau tritiée.

Le tritium organiquement lié (OBT) est pris en compte dans la modélisation de l'exposition par ingestion de végétaux. En effet, l'activité en tritium d'un végétal est contenue non seulement dans son eau, mais aussi dans sa matière organique sèche.

3

Sols - Méthodes

3.1	Géomorphologie	58
3.2	Occupation et caractéristiques des sols	58
3.3	Sites et sols pollués ou potentiellement pollués	60
3.4	Analyse des incidences sur le sol	60

3.1 Géomorphologie

Les analyses géomorphologiques sont menées à partir des cartes topographiques de l'IGN, ainsi que de visites sur le terrain.

Toutes les altitudes sont exprimées à partir du nivellement général de la France 69 (NGF) qui est actuellement le réseau de nivellement officiel en France métropolitaine (hors Corse) entretenu par l'IGN.

Le nivellement est une technique susceptible de fournir des éléments chiffrés pour traduire le relief. Pour atteindre ce but, une méthode consiste à déterminer avec précision l'altitude d'un certain nombre de points appelés repères de nivellement. Plus de 450 000 repères altimétriques sont disséminés sur le territoire français métropolitain continental.

Les techniques de nivellement ont existé dès la plus haute antiquité mais les premiers traités de nivellement en langue française datent seulement du dix-septième siècle. La théorie du nivellement est fondée sur la notion de surface de niveau. Les surfaces de niveau sont des surfaces normales en chacun de leurs points à la direction du fil à plomb et sur lesquelles, par suite, un déplacement quelconque s'effectue sans travail de la pesanteur. Par chaque point du globe, il passe une surface de niveau et une seule. On appelle alors différence de niveau de deux points, ou dénivelée, la distance de l'un de ces points à la surface de niveau qui passe par le second. L'idée la plus claire des surfaces de niveau nous est donnée par l'état de repos d'un liquide libre à sa partie supérieure. Un étang, un lac, quand ils sont parfaitement tranquilles, nous offrent de véritables surfaces de niveau…

La mer est considérée, dès le dix-septième siècle, comme la surface de niveau pouvant servir de référence aux opérations de nivellement, mais pour des raisons pratiques, elle est encore très peu utilisée. Quand les travaux sont éloignés du littoral, il est alors d'usage de fixer un plan de comparaison local. Par exemple, l'abbé Jean Picard, chargé par Louis XIV d'étudier les possibilités de réalisation d'un aqueduc permettant d'amener l'eau de la Loire au château de Versailles, choisit d'exprimer les cotes issues de ses nivellements par rapport au rez-de-chaussée de la demeure royale. Les discordances générées par la multiplication de tels nivellements locaux ou régionaux, rapportés à des surfaces de comparaison différentes, sont source de constantes confusions. Avec la généralisation des chantiers de grande envergure (routes, canaux, puis plus tard voies ferrées), des besoins d'unification commencent à se faire sentir. Dans le même temps, il apparaît utile d'établir des témoins matériels des opérations de nivellement géométriques, sur lesquels pourront se rattacher toutes les opérations ultérieures. Ces points sont baptisés repères de nivellement.

Les opérations du nivellement général de la France débutent le 29 septembre 1857 par Paul Adrien Bourdalouë. L'origine du réseau interne de la France continentale est déterminée à l'issue d'observations réalisées au marégraphe de Marseille du 1er février 1885 au 1er janvier 1897.

3.2 Occupation et caractéristiques des sols

3.2.1 Occupation des sols

La description de l'occupation des sols est fondée sur la cartographie Corine Land Cover (CLC) 2018 (23).

La base de données géographique Corine Land Cover est produite sur 39 États européens, dans le cadre du programme européen de surveillance des terres de Copernicus, piloté par l'Agence européenne pour l'environnement. Le producteur pour la France est le service de la donnée et des études statistiques du ministère chargé de l'écologie, avec depuis 2018, l'Institut national de l'information géographique et forestière (IGN). Cet inventaire fournit une photographie complète de l'occupation des sols, à des fréquences régulières : 1990, 2000, 2006, 2012 et 2018.

Corine Land Cover (CLC) est un inventaire biophysique de l'occupation des sols et de son évolution selon une nomenclature en 44 postes répartis selon cinq grands types d'occupation du territoire. Ces catégories sont rapprochées de celle des catégories de surfaces selon l'annexe à l'article R. 101-1 du code de l'urbanisme dans le tableau suivant.

Tableau 3-1 Typologie des grands types d'occupation du sol et lien avec les catégories de surfaces selon l'annexe à l'article R. 101-1 du code de l'urbanisme

Grand type occupation du territoire	Catégories de surfaces selon l'annexe à l'article R. 101-1 du code de l'urbanisme
Territoire artificialisés	Surfaces artificialisées
Territoires agricoles	Surfaces non artificialisées. 7° Surfaces à usage de cultures, qui sont végétalisées (agriculture, sylviculture) ou en eau (pêche, aquaculture, saliculture)
Forêts et milieux semi-naturels	Surfaces non artificialisées soit : • 7° Surfaces à usage de cultures, qui sont végétalisées (agriculture, sylviculture) ou en eau (pêche, aquaculture, saliculture) ; • 8° Surfaces naturelles ou végétalisées constituant un habitat naturel, qui n'entrent pas dans les catégories 5°, 6° et 7°.
Zones humides	Surface non artificialisées soit : • 7° Surfaces à usage de cultures, qui sont végétalisées (agriculture, sylviculture) ou en eau (pêche, aquaculture, saliculture) ; • 8° Surfaces naturelles ou végétalisées constituant un habitat naturel, qui n'entrent pas dans les catégories 5°, 6° et 7°.
Surfaces en eau	Surfaces non artificialisées. 7° Surfaces à usage de cultures, qui sont végétalisées (agriculture, sylviculture) ou en eau (pêche, aquaculture, saliculture)

Cet inventaire est produit par interprétation visuelle d'images satellite. L'échelle de production est le 1/100 000. Corine Land Cover permet de cartographier des unités homogènes d'occupation des sols d'une surface minimale de 25 ha.

Rappelons qu'une surface artificialisée est, selon l'article L. 101-2-1 du code de l'urbanisme, définie comme « *l'altération durable de tout ou partie des fonctions écologiques d'un sol, en particulier de ses fonctions biologiques, hydriques et climatiques, ainsi que de son potentiel agronomique par son occupation ou son usage* ».

L'annexe au R. 101-1 du code de l'urbanisme définit 5 catégories de surfaces artificialisées :

- surfaces dont les sols sont imperméabilisés en raison du bâti (constructions, aménagements, ouvrages ou installations) ;
- surfaces dont les sols sont imperméabilisés en raison d'un revêtement (artificiel, asphalté, bétonné, couvert de pavés ou de dalles) ;
- surfaces partiellement ou totalement perméables dont les sols sont stabilisés et compactés ou recouverts de matériaux minéraux ;
- surfaces partiellement ou totalement perméables dont les sols sont constitués de matériaux composites (couverture hétérogène et artificielle avec un mélange de matériaux non minéraux) ;
- surfaces à usage résidentiel, de production secondaire ou tertiaire, ou d'infrastructures notamment de transport ou de logistique, dont les sols sont couverts par une végétation herbacée, y compris si ces surfaces sont en chantier ou sont en état d'abandon.

3.2.2 Carte pédologique

La diversité et la distribution des sols sur un territoire sont représentées sous forme de données cartographiques.

Sur les aires d'étude considérées dans l'étude d'impact du projet global Cigéo, deux cartes des sols à des échelles différentes ont été utilisées :

- le Référentiel régional pédologique (RRP) du Grand Est à l'échelle du 1/250 000 (20), produit du programme national IGCS (Inventaire, gestion et conservation des sols), mis à disposition par le Groupement d'intérêt Scientifique sur les sols (Gis Sol) et consultable depuis début 2020 sur Géoportail[11]. Ce référentiel est utilisé pour décrire les grands types de sols présents sur l'aire d'étude éloignée du milieu physique. Certains sols pouvant être classés dans différentes catégories, la légende initiale du RRP a été adaptée à la marge aux spécificités du territoire ;
- une carte pédologique au 1/50 000 réalisée par l'Observatoire pérenne de l'environnement (OPE) en 2019 sur une zone plus petite, d'environ 320 km^2, mais plus précise que le RRP du Grand Est. Cette carte est utilisée pour établir l'état initial ainsi que pour déterminer les incidences des installations de surface du projet global Cigéo sur l'aire d'étude immédiate pour certaines thématiques où la nature des sols est importante, telles que les activités agricoles et sylvicoles.

La collecte des informations nécessaires à l'établissement d'une carte des sols sur un secteur donné se fait généralement en plusieurs étapes :

- synthèse des études et des données existantes : géologie, topographie, pédologie, etc. ;
- acquisition de nouvelles données sur le terrain par des sondages et des fosses pédologiques ;
- synthèse des données recueillies et digitalisation des tracés des unités de sol sous système d'information géographique (SIG) ;
- constitution des bases de données.

Dans un premier temps, des reconnaissances basées sur la géologie et la topographie permettent d'estimer la distribution des différents types de sols dans le paysage. Puis, cette estimation est complétée par une prospection systématique de terrain déterminée en fonction du contexte (matériau parental, topographie, état de surface du sol, utilisation du sol, végétation) et non pas selon un maillage prédéfini. Les observations de terrain sont réalisées par des sondages à la tarière et par la description de fosses pédologiques. Les sondages à la tarière permettent d'observer : la profondeur du sol et de chaque horizon, leur texture, la présence/absence d'hydromorphie, la présence de carbonates et la distribution de la matière organique. Les fosses pédologiques permettent de faire une observation complète du sol, en particulier de décrire les caractéristiques de chaque horizon : texture, structure, réaction à HCl, propriétés mécaniques, humidité, couleur, tâches, revêtements, traces d'activités, présence de nodules, racines, éléments grossiers, porosité et conduits de vers de terre. Des analyses physico-chimiques des échantillons de sols prélevés lors de ces observations de terrain aident également à l'identification des différents types de sols rencontrés.

À partir des données ponctuelles de terrain, les contours de chaque zone plus ou moins homogène, correspondant à une unité cartographique de sol (UCS), sont dessinés et digitalisés à l'aide d'un logiciel de SIG à partir des cartes topographiques et géologiques. Les unités cartographiques de sols sont donc le plus souvent constituées de plusieurs unités typologiques de sols.

Les unités typologiques de sols (UTS = les différents « types de sols ») sont définies avec un plus ou moins grand degré de détail à partir de l'ensemble des observations et mesures faites sur le terrain ou au laboratoire. Cette définition prend en compte tous les horizons superposés et, pour chaque horizon, toute une série de caractères élémentaires (texture, structure, teneurs en calcaire ou en carbone, éléments grossiers, épaisseur, etc.). La définition d'une unité typologique résulte donc d'une action de « classification », c'est-à-dire une mise en ordre ou un arrangement d'objets dans notre esprit et leur distribution dans des compartiments, selon l'usage que l'on veut en faire. Chaque unité est dénommée selon la classification du Référentiel pédologique français (RPF).

[11] https://www.geoportail.gouv.fr/

3.2.3 Caractéristiques physico-chimiques et biologiques des sols

Un état de référence de la qualité des sols a été réalisé par l'OPE entre 2009 et 2013 sur une zone d'environ 240 km², avec différents partenaires de l'INRA, de l'INPL/ENSAIA (Institut national polytechnique de Loraine/École nationale supérieure d'ingénieurs agronomes et industries alimentaires) et du CNRS. Cet état de référence a permis de déterminer les caractéristiques actuelles des sols de l'aire d'étude rapprochée. Il repose sur un réseau systématique de sites d'échantillonnage répartis suivant une grille régulière de 1,5 km.

Les sols ont été échantillonnés selon un protocole de prélèvement et de traitement défini par le GIS Sol (Groupement d'intérêt scientifique sur les sols) dans le cadre du Réseau national de mesure de la qualité des sols (RMQS) qui repose sur le suivi de 2 200 sites répartis uniformément sur le territoire français selon un maillage carré de 16 km de côté. Les sites de prélèvement dans l'aire d'étude rapprochée ont été choisis selon un maillage plus fin, de 1,5 km de côté, adapté à l'échelle du territoire, et ont été complétés en 2013 par des sites choisis aléatoirement ou choisis pour leur typologie particulière. Au total, 146 sites ont été échantillonnés.

L'état initial de la qualité des sols porte sur les caractéristiques physico-chimiques, les teneurs en contaminants organiques et minéraux, ainsi que sur la diversité microbienne et de la mésofaune (taille intermédiaire entre la microfaune et le macrofaune, tel que des insectes et des petites araignées) du sol.

3.2.4 Caractéristiques radiologiques des sols

Différentes mesures de radioactivité ont été réalisées par le laboratoire Subatech entre 2007 et 2009 et par l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN) entre 2010 et 2013.

Les critères qui ont présidé aux choix des sites de prélèvements des sols sont les paramètres susceptibles d'influencer les activités des éléments radioactifs naturels et artificiels, à savoir :

- la nature de la roche sous-jacente, (source des radionucléides d'origine tellurique ^{40}K, ^{238}U et descendants) ;
- la nature de la végétation, qui influence le dépôt des aérosols.

Les prélèvements de sols ont été effectués, en collaboration avec l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire, sur différentes roches mères, représentatives du substrat géologique sous-jacent et des différents types d'occupation du sol (cultures, prairies et forêts). Les échantillons ont été prélevés à des profondeurs variables selon les sites (de la surface à 60 cm de profondeur).

C'est donc en tenant compte de la variabilité de l'occupation du sol et de la nature du sous-sol qu'ont été retenus dix sites de prélèvements (cinq sites en forêt, trois sites en prairie et deux sites en cultures).

L'ensemble des échantillons de sols a fait l'objet d'analyses par spectrométrie gamma. En fonction des activités en ^{137}Cs mesurées par cette technique, 24 échantillons ont été choisis dans le but de mesurer l'activité en ^{90}Sr, en isotopes du plutonium et en ^{241}Am (spectrométrie alpha).

Par ailleurs, 13 échantillons ont fait l'objet de mesures très précises de l'activité des isotopes de l'uranium, du thorium et du ^{226}Ra par Spectrométrie de Masse à Thermo-Ionisation (TIMS) réalisées au Laboratoire d'Hydrologie et de Géochimie de l'Université de Strasbourg.

3.3 Sites et sols pollués ou potentiellement pollués

Le risque de pollution lié à des sites industriels a été évalué à partir du recensement des sites et sols pollués.

Ce recensement a été réalisé à partir du jeu de données de Carte des anciens sites industriels et activités de services (CASIAS), anciennement BASIAS et de la base de données des sites et sols pollués (ou potentiellement pollués) appelant une action des pouvoirs publics, à titre préventif ou curatif (ex BASOL). Ces données sont consultables sur le site Géorisques du ministère de la Transition écologique et Solidaire[12].

La base de données CASIAS (carte des anciens sites industriels et activités de service en activité ou non) fait l'inventaire de tous les sites industriels ou de services, anciens ou actuels, ayant eu une activité potentiellement polluante. Cette base de données est développée par le BRGM pour le ministère de la Transition écologique et Solidaire.

La base de données sur les sites et sols pollués (ou potentiellement pollués) appelant une action des pouvoirs publics, à titre préventif ou curatif est mise en place par le ministère chargé de l'environnement.

Les secteurs d'information sur les sols (SIS) sont les terrains où l'État a connaissance d'une pollution des sols justifiant, notamment en cas de changement d'usage, la réalisation d'études de sols et la mise en place de mesures de gestion de la pollution pour préserver la santé et l'environnement. La démarche SIS poursuit deux objectifs : améliorer l'information du public et garantir l'absence de risque sanitaire et environnemental par l'encadrement des constructions. Les SIS ont été recensés à partir des informations cartographiques du site Géorisques[13].

3.4 Analyse des incidences sur le sol

L'analyse des incidences sur le sol repose sur les études de conception :

- les principes de conception des terrassements ;
- les carnets de gestion et de valorisation des terres ;
- les principes de gestion des terres végétales.

La démarche d'évaluation consiste à caractériser les sources d'impact sur le sol (direct et indirect) et leurs effets potentiels, notamment la modification de la nature et de la structure du sol, la vulnérabilité des terrains mis à nu vis-à-vis des risques d'érosion, du lessivage et des risques de pollution, ainsi que des modifications liées aux aménagements de surface (imperméabilisation).

Les choix de conception sont développés pour préciser les optimisations des modelés de nivellement, la gestion des matériaux terreux, leur mise en œuvre et la préservation de la qualité des sols (enrichissement).

Quant à l'impact radiologique, sa quantification repose sur le calcul avec CERES[14] (cf. Chapitre 2 du présent volume de l'étude d'impact) de l'activité déposée sur le sol au point récepteur le plus pénalisant et de la comparaison de l'activité massique par groupe de radionucléides après 1 an, 50 ans et 150 ans de rejets atmosphériques avec l'état initial.

[12] https://www.georisques.gouv.fr/
[13] https://basias.brgm.fr/

[14] CERES (code d'évaluations rapides environnementales et sanitaires) : logiciel de modélisation des impacts radioactifs sur l'homme, développé par le Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives.

4

Sous-sol - Méthodes

4.1 État initial 62
4.2 Incidences 63

4.1 État initial

4.1.1 Milieu géologique du secteur de Meuse/Haute-Marne : tectonique et stratigraphie

L'acquisition des connaissances sur le milieu géologique du secteur de Meuse/Haute-Marne s'est organisée autour de plusieurs démarches qui ont permis d'acquérir une compréhension fine de l'environnement et du milieu géologique dans lequel vient s'implanter le centre de stockage Cigéo, en complément d'informations bibliographiques et cartographiques.

Plus d'une quarantaine de forages profonds de plusieurs centaines de mètres accompagnés de carottages ont été réalisés depuis les années 90 et ont confirmé la géométrie, l'épaisseur et les propriétés des formations géologiques composant le sous-sol et plus particulièrement la couche du Callovo-Oxfordien ainsi que l'absence de faille. En 2007, un forage a été réalisé jusqu'à la profondeur de la formation du Trias (2 000 mètres), ce qui a permis de caractériser l'ensemble des formations géologiques à l'aplomb du secteur d'étude. Un ensemble de mesures en forages (diagraphies) a permis d'acquérir, en continu et au pas d'analyse de l'ordre du décimètre, différentes caractéristiques des formations traversées (radioactivité naturelle, densité, porosité, vitesses des ondes, résistivité électrique…). Ces méthodes sont communes au milieu pétrolier et ont été mises en œuvre sur site par des grands opérateurs de ces domaines.

Les carottes extraites des forages ont fait l'objet de nombreuses analyses : sédimentologie, composition chimique, quantification minéralogique, observations aux microscopes, mesures de porosité, mesures de perméabilité et de diffusion de traceurs, essais géomécaniques… Ces essais ont été conduits par des prestataires d'études et des laboratoires de recherche selon des méthodes normées (par exemple : essais de lixiviation, mesure par porosimétrie mercure…) ou bien établies scientifiquement (par exemple : essais de diffusion, quantification minéralogique…). Des prélèvements d'eau ont également été réalisés pour caractériser la chimie des eaux interstitielles (pH, ions majeurs, alcalinité…) et la dynamique à grande échelle des traceurs naturels (incluant des isotopes).

Ces opérations ont permis de préciser la géométrie des couches composant le sous-sol, de confirmer l'homogénéité de la couche d'argilites du Callovo-Oxfordien et l'absence de faille au sein de celle-ci et d'approfondir les connaissances sur le comportement géomécanique des argilites.

Différentes campagnes sismiques 2D (1994-1996) et 3D en 2000 (4 km² sur l'emprise du Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne) et 2008-2010 (37 km² sur l'emprise de la ZIRA) sur le site ont permis de préciser l'organisation des couches géologiques et caractériser leur géométrie (épaisseur, profondeur, extension, pendage…). Elles ont successivement permis d'obtenir une image haute résolution en volume du sous-sol et de confirmer que la couche argileuse du Callovo-Oxfordien est régulière avec une épaisseur supérieure à 130 mètres et une géométrie conforme à l'histoire et aux environnements géologiques de l'époque. La présence d'hétérogénéités structurales (failles) a notamment été recherchée à partir de ces méthodes qui ont confirmé qu'aucune hétérogénéité structurale (d'un rejet supérieur à 2-4 mètres) n'est présente ni dans la couche du Callovo-Oxfordien, ni dans les formations sous-jacentes et sus-jacentes à l'aplomb de la ZIRA.

Des études de terrains ont permis d'observer les formations à l'affleurement, d'appréhender les grands traits de l'environnement géologique, de prélever des échantillons et de disposer des données à intégrer dans les modèles.

Ces études ont été complétées par des études géotechniques de type G2 sur la zone descenderie et G1 EDS sur l'installation terminale embranchée, Ces études géotechniques ont eu pour but d'analyser la structure du sol et du sous-sol afin d'adapter les dispositions constructives à la réalité précise de la zone d'intervention potentielle. Des campagnes G1 et G2 seront réalisées ultérieurement sur le reste de la zone d'intervention potentielle. Ces études géotechniques respectent la norme NF P 94-500 de 2013 (63) qui définit notamment le niveau d'investigation selon l'avancement du projet.

De nombreuses investigations et expérimentations scientifiques sont réalisées au Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne afin de quantifier en conditions *in situ* les caractéristiques du Callovo-Oxfordien (conductivité hydraulique, conductivité thermique, caractéristiques géomécaniques, chimie des eaux interstitielles, transferts des éléments chimiques…), en particulier sa capacité de confinement des radionucléides et de constructibilité d'ouvrages souterrains. Dans ce cadre, de nombreuses méthodes et outils de mesures ont été développés spécifiquement pour répondre aux contraintes d'un environnement souterrain. Des échantillons sont également prélevés depuis le front de taille des galeries en cours de creusement ou dans des forages réalisés dans différentes directions depuis les galeries (à mi 2019, 1 680 forages ont été réalisés dans le Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne). Ceux-ci, comme pour les forages depuis la surface, font l'objet d'analyse et de caractérisation. Durant tout le creusement des puits à partir d'août 2000, les relevés continus de toutes les formations traversées ont permis d'établir une carte géologique détaillée de la paroi sur toute la hauteur des deux puits, d'évaluer la variabilité lithologique des couches à l'échelle décamétrique, d'observer leur nature selon les directions, de caractériser leur fracturation et micro-fracturation naturelle et d'en évaluer l'incidence sur les circulations de fluides. Les données obtenues au Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne depuis sa création sont confrontées à celle issues des autres campagnes de caractérisation venant conforter et consolider, à différentes échelles d'observations, le modèle géologique.

Chaque échantillon prélevé est référencé dans une base de données (GEO) qui liste le type de mesures réalisées sur celui-ci et les résultats d'analyse. Au total, à mi 2021, plus 70 000 échantillons solides et 14 000 échantillons de fluides ont été collectés.

4.1.2 Caractéristiques radiologiques du sous-sol

Compte tenu des différentes couches géologiques (marnes du Kimméridgien, Calcaires de l'Oxfordien et argilites du Callovo-Oxfordien) traversées par le projet, des échantillons de roche, prélevés lors de campagnes de forage entre 1994 et 2008, à des profondeurs comprises entre une dizaine de mètres sous le sol et un peu plus de 600 mètres, et représentatifs de ces différentes couches, ont été analysés.

Des échantillons de verses correspondant au matériau extrait de la couche d'argilite du Callovo-Oxfordien lors du creusement des galeries souterraines du Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne, ont également été étudiés.

Les mesures sur les prélèvements effectués ont été réalisées par le Laboratoire de métrologie de la radioactivité dans l'environnement (LMRE) de l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN). Les éléments radioactifs naturels et artificiels ont été mesurés en spectrométrie gamma et alpha. Les isotopes de l'uranium et du thorium, ainsi que de leurs descendants ont été également été mesurés par spectrométrie de masse à plasma à couplage inductif (ICP-MS) après traitement radiochimique des échantillons.

4.1.3 Caractéristiques chimiques des argilites

La composition chimique des argilites en éléments majeurs et traces a été déterminée par analyses en spectrométrie de masse à plasma à couplage inductif (ICP-MS) sur certains échantillons issus des carottes de forages.

La lixiviation à court terme des argilites a été déterminée par des tests de lixiviation normalisés selon NF EN 12457-2 de 2022 (64) (avec un rapport liquide/solide de 10 L/kg de masse sèche), réalisés sur des échantillons d'argilites prélevés au Laboratoire souterrain ou sur les verses selon un gradient d'altération de la roche :

- argilites peu altérées : prélevées en galerie au Laboratoire souterrain ou dans le sas du puits où elles ont été exposées à une déstructuration mécanique, à une désaturation et à l'oxygène mais non exposées aux conditions climatiques de surface ;
- argilites moyennement altérées : prélevées sur la zone de dépôt des verses, exposées aux conditions climatiques pendant quelques mois avant profilage de la verse ;
- argilites très altérées : prélevées sur la verse profilée du CMHM, exposées aux conditions climatiques depuis des années, avec développement de végétation spontanée.

Les échantillons prélevés sur la verse ont été échantillonnés manuellement à différents points sur une profondeur d'environ 0-30 cm, puis analysés individuellement.

Les tests de lixiviation réalisés ont porté sur une première série de trois échantillons en 2017, puis une seconde série de neuf échantillons en 2023.

Les neuf échantillons de 2023 ont également fait l'objet d'analyses selon la norme NF EN 15875 de 2011 (65) pour déterminer le potentiel de génération acide et le potentiel de neutralisation des argilites.

4.1.4 Caractéristiques radiologiques des eaux porales

Un échantillon d'eau a été prélevé au Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne dans le forage GIS1002. Les mesures sur le prélèvement effectué ont été réalisées par comptage alpha et bêta selon la norme NF EN ISO 10704 de 2019 (54) et la circulaire DGS/EA4/2007/232 (66) par le laboratoire SUBATECH/SMART accrédité pour ces mesures.

4.1.5 Ressources naturelles potentielles du sous-sol

Les ressources naturelles du sous-sol définies dans le code minier incluent les matériaux de carrières, les substances minérales, le charbon, les hydrocarbures et les ressources géothermiques. Elles ont été recensées dans le « Tome II du référentiel de site – Bilan des observations de l'OPE sur l'état de l'environnement de surface » (67).

Le recensement se base également sur la consultation des documents suivants :

- les dossiers départementaux des carrières de la Meuse (2014 (68)) et de la Haute-Marne (2003 (69)) pour les ressources en matériaux[15] ;
- la banque de données du sous-sol (BSS) du BRGM pour les ressources en matériaux et la géothermie ;
- les données géologiques et géophysiques d'exploration pétrolière des années 50 à 80, ainsi que les campagnes sismiques 3D haute résolution sur la zone, couplées aux données des campagnes de reconnaissance géologique menées par l'Andra depuis environ 30 ans (forages, campagnes sismiques et géophysique…) ;
- les données d'un forage de reconnaissance du potentiel géothermique de la future zone d'implantation du centre de stockage Cigéo réalisé en 2007-2008 (forage EST 433).

[15] Le schéma régional des carrières de la région Grand Est (70) a été approuvé par arrêté préfectoral en date du 27/11/2024 Cet arrêté abroge les schémas départementaux des carrières de la Meuse et de la Haute-Marne.

4.1.6 Risques naturels liés à la géologie

Le recensement des risques naturels liés à la géologie a été réalisé grâce à la consultation des documents suivants :

- les dossiers départementaux des risques majeurs (DDRM) de la Meuse (2019) et de la Haute-Marne (2017) (13, 14) ;
- le site internet Géorisques qui répertorie tous les risques naturels et technologiques en France.

Le risque sismique a été étudié grâce :

- au zonage sismique français en vigueur depuis le 1er mai 2011 défini par l'article D. 563-8-1 du code de l'environnement ;
- aux publications scientifiques sur la tectonique européenne ;
- aux chroniques historiques des tremblements de terre et les catalogues de sismicité ;
- aux campagnes de forages et études sismiques réalisées pour l'Andra ;
- aux études portant sur la sismotectonique et la géodynamique interne du Bassin parisien oriental réalisées pour l'Andra ;
- à la caractérisation statique et dynamique de l'ensemble des failles du secteur ;
- aux réseaux d'écoute sismique (RES et ACC, couplés aux réseaux nationaux (RSN, RENASS)) décrits au volume III de la présente étude d'impact.

4.2 Incidences

La démarche consiste à caractériser les sources d'impacts sur le sous-sol (direct et indirect) et leurs effets potentiels :

- la pollution physico-chimique et contamination radiologique ;
- la vulnérabilité aux risques sismiques d'origine naturelle ou anthropique ;
- la vulnérabilité aux risques de retrait-gonflement des argiles, de cavités et risque de tassements suite à l'effondrement des galeries se répercutant sur les couches au-dessus et aggravation des risques de mouvements de terrain ;
- les incidences sur les ressources du sous-sol au droit du stockage et utilisation de quantités importantes de matériaux de construction.

4.2.1 Pollution accidentelle physico-chimique

L'analyse des incidences est réalisée en prenant en compte :

- la nature et les quantités de substances physicochimiques susceptibles de se répandre. Il est tenu compte de la nature des sols ;
- la nature du sous-sol est également analysée (les Calcaires du Barrois qui affleurent sous et autour du centre de stockage Cigéo laissent plus facilement les polluants s'infiltrer en profondeur du fait de la karstification) ;
- les mesures d'évitement et de réduction présentées dans le chapitre 3 du présent volume qui permettent la gestion des pollutions accidentelles physico-chimiques sur les sols ;
- les mesures d'évitement et de réduction présentées dans le chapitre 5 du présent volume qui permettent la gestion des pollutions accidentelles physico-chimiques sur les eaux.

Ces éventuelles pollutions accidentelles restent très superficielles et ponctuelles (les quantités de polluants pouvant se répandre sont limitées).

4.2.2 Confinement des radionucléides et substances toxiques chimiques

La minimisation de l'incidence de la présence du stockage de déchets radioactifs dans la couche du Callovo-Oxfordien sur le site de Meuse/Haute-Marne constitue un élément clé dans la recherche de solutions qui a été intégré dès le démarrage du projet *via* des itérations sureté/conception/connaissances scientifiques et technologiques périodiques permettant de vérifier la performance du milieu géologique d'implantation du stockage et des composants ouvragés du stockage mis en place.

La protection de l'homme et l'environnement à long terme repose sur la couche du Callovo-Oxfordien, qui joue un rôle central de cette protection, complétée par des dispositifs ouvragés comme les ouvrages de fermeture des liaisons surface-fond (puits et descenderies) et les conditionnements colis des déchets.

La démarche globale retenue pour l'évaluation de sûreté après fermeture repose sur une déclinaison des fonctions de sûreté et des exigences associées.

Les incidences sont évaluées dès le début de la conception du stockage puis vérifiées tout au long de son développement progressif afin de mettre en place les mesures nécessaires pour réduire ces incidences et maîtriser celles résiduelles. Il s'agit notamment de préserver les propriétés favorables de la couche du Callovo-Oxfordien, mais aussi de tirer parti de ces dernières, vis-à-vis du relâchement et de la migration des radionucléides et substances chimiques toxiques.

L'évaluation des incidences une fois le stockage fermé définitivement (cf. Chapitre 18 du présent volume) se fonde en dans un premier temps sur l'état de connaissances du comportement du stockage et de la couche de Callovo-Oxfordien dans le temps et des incertitudes résiduelles associées. Dans ce cadre, une analyse des risques est réalisée, qui permet d'identifier les phénomènes pouvant affecter la réalisation d'une fonction de sûreté et les performances qui lui sont affectées (séisme, érosion…), d'en analyser les causes et de définir les modalités de gestion de ces risques. Ceci conduit à définir dans un second temps à quantifier les incidences dans le cas de différents scénarios représentant différentes évolutions du stockage sur le long terme :

- un scénario qui vise à représenter l'évolution normale du stockage à long terme une fois fermé définitivement, en se fondant sur les fonctions de sûreté attendues, et au mieux de l'état de la connaissance scientifique et technologique en lien avec la conception retenue ;
- des scénarios qui permettent de couvrir différentes déviations de cette évolution normale en prenant en compte d'éventuels aléas internes et externes au stockage ainsi que les risques d'intrusion humaine.

Pour chaque scénario, les performances des composants du système de stockage, en incluant les mesures de conception retenues, sont évaluées ainsi que l'incidence sur l'homme en termes d'exposition. Cette analyse permet de confirmer la robustesse du système de stockage et de vérifier l'efficacité des dispositions de conception prises pour gérer les incertitudes, afin de s'assurer que la protection de l'homme et l'environnement est assurée pour l'ensemble des scénarios d'évolution du stockage.

4.2.3 Vulnérabilité au risque sismique d'origine naturelle et anthropique

Le choix du secteur d'implantation du centre de stockage Cigéo a été le résultat de plusieurs décennies de recherches pour garantir la sûreté à long terme du stockage. C'est un long processus décisionnel qui a permis de choisir, dans un premier temps, le stockage dans les argiles, puis, dans un second temps, de préciser la zone d'implantation des ouvrages souterrains (ZIOS) dans une zone géologique d'activité sismique très faible.

Les nombreuses campagnes d'investigations géologiques, complétées par l'étude des données de la littérature scientifique ouverte, ont permis de délimiter, à l'écart des zones de failles géologiques identifiées, une région très stable d'environ 250 km² nommée zone de transposition (ZT).

Ensuite, à partir de 2009, les investigations géologiques ont permis de caractériser plus finement une zone plus restreinte, dénommée « zone d'intérêt pour la recherche approfondie » (ZIRA) d'environ 30 km^2. Cette campagne a permis de confirmer l'absence de structure (faille présentant un rejet supérieur à 2-4 m) sur la ZIRA, aussi bien que dans le Callovo-Oxfordien et ses encaissants (Dogger, Oxfordien carbonaté et Kimméridgien) que plus largement sur l'ensemble de la pile sédimentaire mésozoïque.

À partir de 2011, les études de la conception industrielle du centre de stockage Cigéo (études d'avant-projet) ont notamment visé l'implantation des ouvrages de stockage de façon optimale au sein de la couche de Callovo-Oxfordien de la ZIRA. La ZIOS, zone d'implantation des ouvrages souterrains, constitue donc l'emprise souterraine de la ZIRA.

Le centre de stockage Cigéo est construit, conçu et exploité, conformément aux règles spécifiques applicables aux installations nucléaires, de sorte qu'en cas de séisme, les installations soient maintenues dans un état dit « sûr » et que ce phénomène n'entraîne pas de conséquence sur l'homme et l'environnement. Cette approche est par ailleurs complétée par une prise en compte spécifique du séisme en après-fermeture dans le cadre de l'analyse des risques décrite dans le présent chapitre.

4.2.4 Risque de retrait-gonflement des argiles, de cavités et tassements

L'analyse est basée sur le recensement des risques et l'adéquation des dispositions constructives mises en place au regard des risques.

4.2.5 Ressources du sous-sol

Le centre de stockage Cigéo est implanté dans une zone ne présentant pas un caractère exceptionnel ou particulier en termes de ressources souterraines.

Concernant les besoins en matériaux, l'analyse est réalisée sur une première estimation des besoins en matériaux de construction au regard des filières d'approvisionnement disponibles de ces ressources.

L'identification des carrières de granulats a été réalisée grâce à un fichier transmis par la DREAL Grand Est (source BRGM - Bureau de recherches géologiques et minières). Ces informations ont été vérifiées et complétées à l'aide de la base de données sur les installations classées du ministère de la transition écologique.

L'adéquation entre les besoins en ciment pour le projet global Cigéo et les ressources disponibles a été réalisée par comparaison à la production annuelle du ciment de la région Grand Est.

5

Eaux - Méthodes

5.1 Définition de l'état initial 66
5.2 Évaluation des incidences 87

5.1 Définition de l'état initial

La détermination de l'état des masses d'eau superficielles ou souterraines nécessite des données d'observations. Dans le cadre de la présente étude d'impact, les données d'observations mobilisées sont soit issues de bases de données publiques, soit du réseau d'observation mis en place par l'Andra. La figure 5-1 présente de manière synthétique les stations de suivi des eaux superficielles et souterraines par l'Andra dans l'aire d'étude éloignée du milieu physique.

L'état d'une masse d'eau superficielle est déterminé selon deux aspects : son état écologique et son état chimique.

L'état écologique requiert la prise en compte de l'ensemble des compartiments écologiques : eau, faune, flore, habitat. Ainsi le bon état écologique requiert non seulement une bonne qualité de l'eau, mais aussi un bon fonctionnement des milieux aquatiques. L'état (ou le potentiel) écologique est évalué à partir d'éléments de qualité biologiques animaux (poissons, invertébrés) et végétaux (plantes aquatiques…), physico-chimiques (polluants spécifiques de l'état écologique (PSEE), phosphore, nitrate, pH…) et hydromorphologiques (état des berges ou de la côte, continuité de la rivière, régime des marées…).

L'état chimique d'une masse d'eau de surface est évalué en mesurant la concentration d'environ quarante substances chimiques d'origine anthropique fixées au niveau européen (dont des métaux lourds : cadmium, mercure, nickel… ; des pesticides : atrazine, alachlore… ; des polluants industriels : benzène, HAP…) dans le milieu aquatique.

Deux indicateurs sont également mobilisés pour déterminer l'état des eaux souterraines : leur état quantitatif et leur état chimique.

La méthodologie d'acquisition de ces différents indicateurs est présentée dans la suite de ce chapitre ainsi que les étapes préalables d'identification et de description des différentes masses d'eau concernées.

5.1.1 Réglementation et exigences

La politique de l'eau en France est encadrée par la directive-cadre européenne sur l'eau publiée en 2000. Ce texte définit la notion de « bon état des eaux », vers lequel doivent tendre tous les États membres, dont la France.

La loi de 2004 (71) a transposé la directive-cadre sur l'eau prise par l'Europe en 2000 (72) aux articles L. 210-1 et suivants du code de l'environnement et orientant toute la politique de l'eau vers des objectifs de résultat, parmi lesquels l'atteinte du bon état des eaux à l'horizon 2015. Elle fixe dans un plan de gestion, **les SDAGE,** au travers des articles L. 212-1 et suivants du code de l'environnement, des objectifs ambitieux pour la préservation et la restauration de l'eau et des milieux aquatiques, mis en œuvre par un programme de mesures.

La directive-cadre donne la priorité à la protection de l'environnement et à une utilisation durable de l'eau, en demandant de veiller à la non-dégradation de la qualité des eaux. L'objectif est d'atteindre d'ici 2015 un bon état général tant pour les eaux souterraines que pour les eaux superficielles, y compris les eaux estuariennes et côtières. Si cette échéance ne peut être atteinte dans les délais, il est possible de demander une dérogation pour repousser l'échéance à 2021 voire 2027, voire au-delà sous certaines conditions. En application de la directive-cadre, une première liste de 33 substances a été adoptée en 2011. Elle comprend des métaux, des pesticides, des hydrocarbures (décision n° 2455/2001/CE du 20 novembre 2001 (73)), complétée par une directive n° 2008/105/CE (74) qui fixe des normes de qualité environnementale, applicables à huit autres produits.

L'aire d'étude du milieu physique et de la ligne 400 kV est concerné par deux SDAGES : SDAGE Seine-Normandie 2022-2027 et Rhin-Meuse 2022-2027 (75, 76). Ces documents sont les principales sources de données publiques pour décrire l'état initial des masses d'eau concernées par le projet global Cigéo et les objectifs à atteindre.

Dans le cadre du SDAGE 2022-2027, les objectifs d'état des masses d'eau sont les suivants :

- le maintien du bon état ou du bon potentiel depuis 2015 ou 2021 ;
- l'atteinte du bon état ou du bon potentiel en 2027, pour les masses d'eau sur lesquelles les actions engagées ou prévues permettent d'effacer ou réduire les pressions de manière à atteindre le bon état ou le bon potentiel d'ici 2027 ;
- le report de délai au-delà de 2027, limité aux cas suivants, conformément à la DCE :
  - ✓ masses d'eau à risque de non atteinte du bon état/potentiel du fait de substances prioritaires introduites dans la directive n° 2013/39/UE (77), et qui peuvent faire l'objet de reports de délais pour « faisabilité technique » et « coûts disproportionnés » jusqu'en 2033, voire 2039 en fonction des possibilités de réduction de la pression ;
  - ✓ masses d'eau à risque de non atteinte du bon état/potentiel du fait de substances prioritaires dont la Norme de Qualité Environnementale (NQE) a été modifiée par la directive n° 2013/39/UE, et qui peuvent faire l'objet de reports de délais pour « faisabilité technique » et « coûts disproportionnés » jusqu'à 2033 en fonction des possibilités de réduction de la pression ;
  - ✓ masses d'eau à risque de non atteinte du bon état/potentiel du fait de conditions naturelles liées à l'inertie des milieux malgré la mise en œuvre des mesures nécessaires pour atteindre cet objectif d'ici 2027.
- la dérogation pour objectif moins strict, pour les masses d'eau qui nécessiteront des actions sur plus d'un cycle pour atteindre le bon état. Cette dérogation concerne des éléments de qualité des masses d'eau causés par des pressions qui seront insuffisamment effacées ou réduites en 2027. Un objectif moins strict correspond à l'état attendu de la masse d'eau une fois que toutes les mesures techniquement faisables à un coût non disproportionné ont été mises en œuvre. À long terme, l'objectif à atteindre demeure le bon état ou le bon potentiel, l'objectif moins strict correspondant à un état intermédiaire à horizon 2027. La décision de recourir à des objectifs moins stricts pour le troisième cycle de la DCE s'appuie sur l'expérience des deux premiers cycles de la DCE (fonctionnement et résilience des écosystèmes et efficacité des mesures sur l'amélioration de l'état). Ainsi, les masses d'eau ciblées sont celles dont certains éléments de qualité nécessiteront encore des mesures après 2027, pour atteindre le bon état ultérieurement, dans des délais raisonnables (contrairement aux masses d'eau en report de délai pour « conditions naturelles » dont toutes les mesures auront été mises en place d'ici 2027). Ces dérogations pour objectif moins strict sont précisées à l'annexe 2 du SDAGE en fonction des différentes catégories de masses d'eau.

Un inventaire des réglementations et des exigences complémentaires (SAGE, PPRI…) a été réalisé sur toutes les communes circonscrites dans l'aire d'étude éloignée définie pour le milieu physique du projet global Cigéo et dans l'aire d'étude spécifique de la ligne 400 kV.

Parmi les exigences réglementaires potentielles se trouve celle des zones de répartition des eaux (ZRE), levier pour l'État permettant d'assurer une gestion plus fine des demandes de prélèvements dans une ressource en eau souterraine, grâce à un abaissement des seuils de déclaration et d'autorisation de prélèvements.

Elle souligne un déséquilibre durable entre la ressource et les besoins en eau. Elle suppose au préalable à la délivrance de nouvelles autorisations, l'engagement d'une démarche d'évaluation précise du déficit constaté, de sa répartition spatiale et si nécessaire de sa réduction en concertation avec les différents usagers, dans un souci d'équité et un objectif de restauration d'un équilibre. Une zone de répartition des eaux est définie dans un arrêté préfectoral.

En novembre 2019, l'Andra a vérifié la cartographie des zones de répartition des eaux sur le site Internet SIGES Seine-Normandie (Système d'information pour la gestion des eaux souterraines en Seine-Normandie). Il n'existait pas de ZRE dans l'aire d'étude éloignée du milieu physique. Un travail similaire a été entrepris en avril 2020 pour le SDAGE Rhin-Meuse et il n'existait pas de ZRE dans l'aire d'étude de la ligne 400 kV. En avril 2022, la vérification des ZRE existantes a été entreprise *via* l'état des lieux des SDAGE 2022-2027. Aucune nouvelle ZRE n'est recensée.

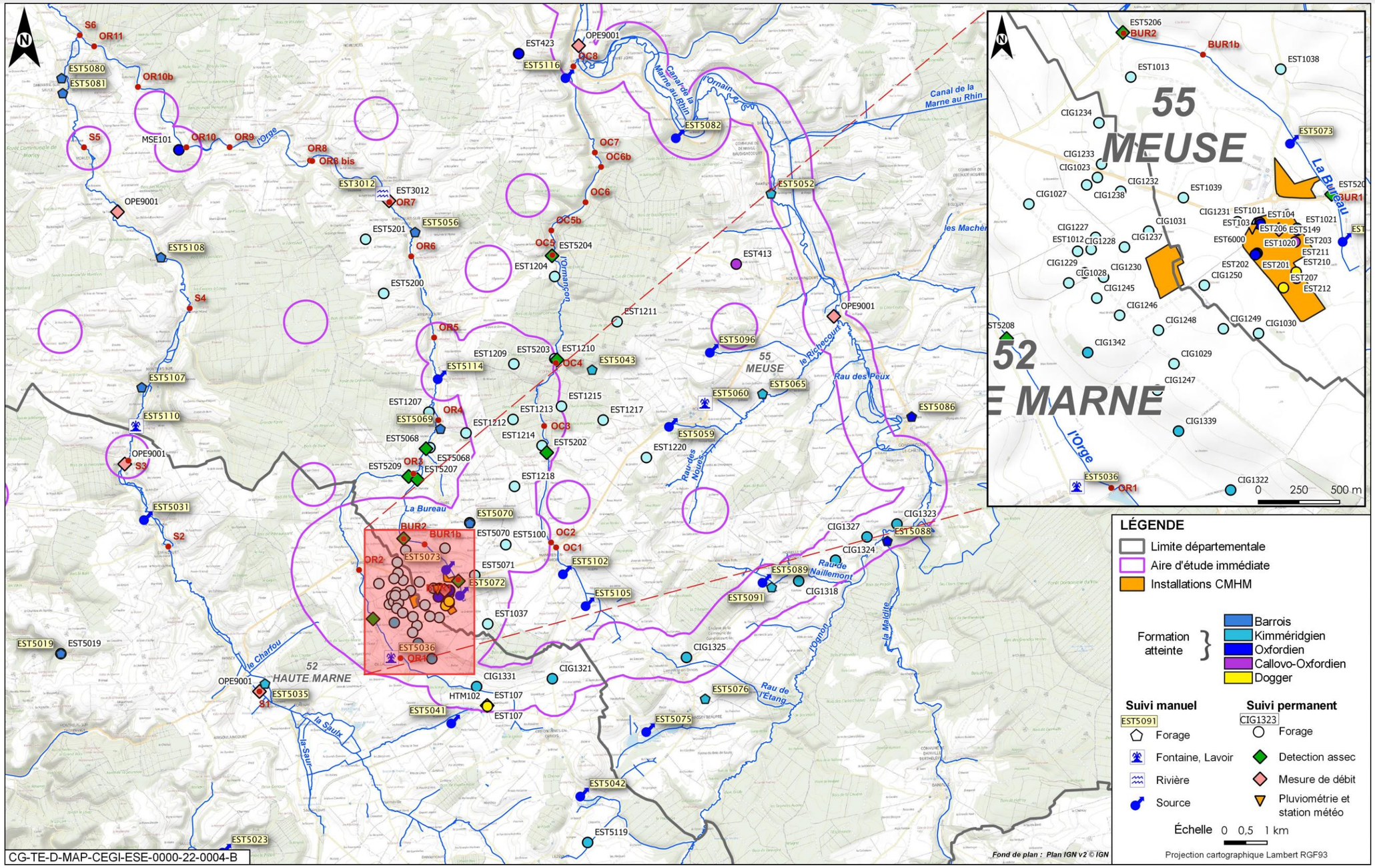


Figure 5-1 *Localisation des stations et forages de suivi des eaux souterraines et superficielles (source : Andra)*

5.1.2 Eaux souterraines

5.1.2.1 Description du système hydrogéologique

5.1.2.1.1 Établissement de la liste des masses d'eau souterraine concernées

Le recensement des masses d'eau souterraine présentes sous l'aire d'étude éloignée du milieu physique a été réalisé à partir des informations et des représentations cartographiques disponibles sur le site du service d'administration nationale des données et référentiels sur l'eau (Sandre).

L'aquifère présent à l'affleurement a fait l'objet d'une description et du suivi le plus détaillé car il sera le principal aquifère concerné par les modifications induites par les installations de surface du centre de stockage Cigéo et qu'il est le plus accessible avec un plus grand nombre de forages.

5.1.2.1.2 Recensement et méthode d'analyse des objectifs des SDAGEs

La méthodologie utilisée par l'Andra est la vérification point par point des dispositions, des orientations, des défis des SDAGEs du bassin de la Seine et du bassin Rhin-Meuse pour 2022-2027 (75, 76) (cf. Volume III et IV de la présente étude d'impact) et des objectifs et état des masses d'eau.

5.1.2.2 Détermination et analyse des niveaux piézométriques

Le réseau d'ouvrages utilisé pour déterminer les niveaux piézométriques[16] des différentes nappes rencontrées au droit de l'aire d'étude éloignée est celui mis en place dans le cadre de la création et l'exploitation du Laboratoire souterrain de Meuse/Haute-Marne.

Ce réseau comporte des ouvrages créés pour les différentes campagnes de caractérisation depuis la création du laboratoire souterrain, ainsi que des ouvrages préexistants (cf. Tableau 5-1 pour la nappe des Calcaires du Barrois et tableau 5-2 pour la nappe de l'Oxfordien Calcaire).

Les données piézométriques collectées sur ce réseau de mesures sont utilisées pour :

- caractériser le comportement des aquifères et leurs interactions avec les eaux de surface par une analyse temporelle corrélée avec les données météorologiques (pluviométrie, évapotranspiration réelle) et hydrologiques (débit et niveau des cours d'eau) ;
- établir des cartes piézométriques à des dates choisies pour leur représentativité : basses, moyennes, hautes eaux. Ces « photographies » permettent notamment de préciser la structure et la variabilité saisonnière des écoulements en direction et en gradient.

Elles constituent aussi un jeu de données de référence pour le calage des différents modèles hydrogéologiques.

[16] Mesure de la profondeur de l'eau par rapport au repère de tête de puits coté au nivèlement général de la France (NGF)

Tableau 5-1 Stations de suivi de la piézométrie de la nappe des Calcaires du Barrois

Référence	Profondeur du forage (m)	Masse d'eau	Localisation	Début du suivi
EST1011	24,72	FRHG303	Bure	1996
EST1012	25,24	FRHG303	Saudron	1996
EST1013	24,48	FRHG303	Bure	1996
EST1020	30,00	FRHG303	Bure	2000
EST1021	29,00	FRHG303	Bure	2000
EST1038	30,00	FRHG303	Bure	2000
EST1039	23,50	FRHG303	Bure	2000
EST1037[17]	20,20	FRHG303	Bure	2000
EST1040	20,20	FRHG303	Bure	2020
EST5019	32,00	FRHG303	Montreuil-Sur-Thonnance	1995
EST5068	15,69	FRHG303	Bure	1996
EST5069	9,25	FRHG303	Bure	1995
EST5071	20,44	FRHG303	Bure	1996
EST5100	39,71	FRHG303	Mandres-en-Barrois	1996
CIG1023	21,00	FRHG303	Saudron	2016
CIG1027	30,00	FRHG303	Saudron	2016
CIG1028	21,00	FRHG303	Saudron	2016
CIG1029	15,00	FRHG303	Gillaumé	2016
CIG1030	28,00	FRHG303	Bure	2016
CIG1031	30,00	FRHG303	Saudron	2016
CIG1090	51,18	FRHG303	Saudron	2016
CIG1091	50,62	FRHG303	Saudron	2016
CIG1114	44,00	FRHG303	Saudron	2016
CIG1227	30,00	FRHG303	Saudron	2016
CIG1228	30,30	FRHG303	Saudron	2016

[17] Ce forage a fait l'objet d'acte de malveillance en avril 2018, il a été remplacé par le EST1040 (début de surveillance 05/04/2000)

Référence	Profondeur du forage (m)	Masse d'eau	Localisation	Début du suivi
CIG1229	30,30	FRHG303	Saudron	2016
CIG1230	32,00	FRHG303	Saudron	2016
CIG1231	20,30	FRHG303	Bure	2016
CIG1232	25,00	FRHG303	Saudron	2016
CIG1233	25,30	FRHG303	Saudron	2016
CIG1237	30,30	FRHG303	Saudron	2016
CIG1238	40,5	FRHG303	Saudron	2016
CIG1245	20,30	FRHG303	Saudron	2016
CIG1246	20,30	FRHG303	Saudron	2016
CIG1247	15,40	FRHG303	Gillaumé	2016
CIG1248	30,35	FRHG303	Saudron	2016
CIG1249	15,30	FRHG303	Gillaumé	2016
CIG1250	30,30	FRHG303	Bure	2016
BSS000SBCP	15,10	FRHG303	Nantois	1969
BSS000SBTY	4,50	FRHG303	Tréveray	1995
BSS000UNAR	63,00	FRHG303	Ribeaucourt	1991
BSS000UNAT	24,00	FRHG303	Mandres-en-Barrois	1980
BSS000UNAU	63,00	FRHG303	Ribeaucourt	1980
BSS000UNMZ	5,00	FRHG303	Mandres-en-Barrois	1974
BSS000UNND	30,00	FRHG303	Mandres-en-Barrois	1980

Le piézomètre BSS000UNJB, situé sur la commune de Pancey, a une profondeur de 107 m et permet une surveillance des niveaux piézométriques du Kimméridgien.

Tableau 5-2 *Stations de suivi de la piézométrie de la nappe de l'Oxfordien Calcaire*

	Profondeur du forage (m)	Masse d'eau	Localisation	Début du suivi
MSE101	922	FRHG306/FRHG305	Morley	2003
EST103	526	FRHG306/FRHG305	Bure	1993-1995
EST104	425	FRHG306/FRHG305	Bure	1996
EST107	425	FRHG306/FRHG305	Cirfontaines-en-Ornois	1993-1995
EST201	410	FRHG306/FRHG305	Bure	2000
EST203	410	FRHG306/FRHG305	Bure	2000
EST311	400	FRHG306/FRHG305	Demange-aux-Eaux	1999-2005
EST423	451	FRHG306/FRHG305	Tréveray	2007
EST451	577	FRHG306/FRHG305	Narcy	2007-2008
EST461	420	FRHG306/FRHG305	Thonnance-les-Moulins	2007-2008

5.1.2.3 Détermination de l'état des masses d'eau souterraines

5.1.2.3.1 Cadre réglementaire

Au sens de la directive-cadre sur l'eau 2000/60/CE (DCE) (72), le bon état d'une eau souterraine est l'état atteint par une masse d'eau souterraine lorsque son état quantitatif et son état chimique sont au moins « bons ».

La directive-cadre sur l'eau (DCE) et sa directive fille 2006/118/CE (78) pour l'évaluation de l'état chimique des masses d'eau souterraine définissent l'état qualitatif des eaux souterraines comme « bon » lorsque, à la fois (article R. 212-12 du code de l'environnement) :

- les concentrations en certains polluants dues aux activités humaines ne dépassent pas les normes définies ;
- ces concentrations n'empêchent pas d'atteindre les objectifs fixés pour les eaux de surface ou écosystèmes terrestres associés à ces mesures d'eau de qualité ;
- il n'est constaté aucune intrusion d'eau salée (ou autre eau polluée) due aux activités humaines.

[18] http://sigessn.brgm.fr/

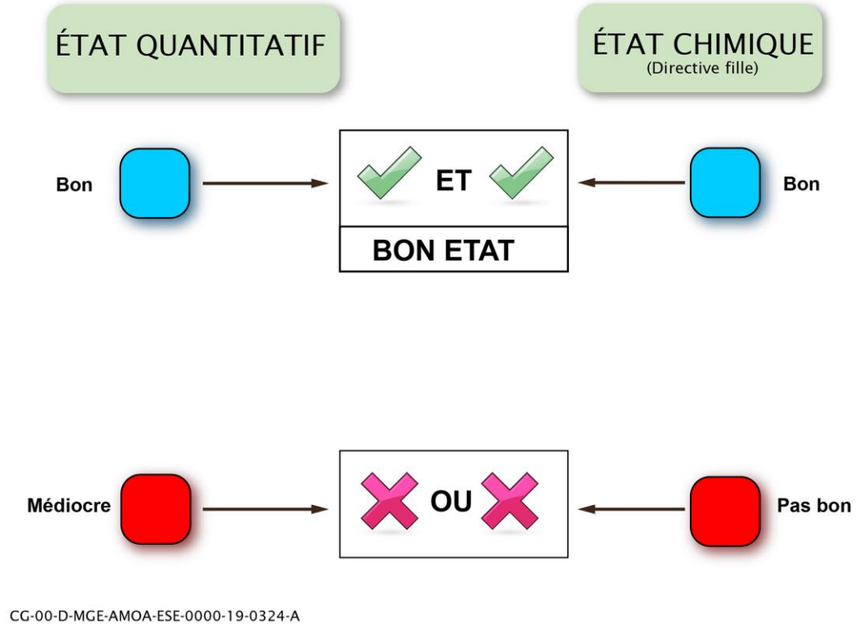


Figure 5-2 *Processus de définition de l'état des masses d'eau souterraines*

Les paramètres et valeurs seuils, présentés dans le tableau annexe 6-1, sont fixés par l'arrêté du 17 décembre 2008 (79), et mis en application par le guide technique d'évaluation de l'état des eaux souterraines de juillet 2019 (80), établissant les critères d'évaluation et les modalités de détermination de l'état des eaux souterraines et des tendances significatives et durables de dégradation de l'état chimique des eaux souterraines.

5.1.2.3.2 Données utilisées

Les connaissances acquises sur les masses d'eau souterraines proviennent des informations disponibles sur le site du SIGES (Système d'information pour la gestion des eaux souterraines en Seine-Normandie)[18] et dans les annexes des SDAGEs compilant les résultats des états des lieux des Agences de l'eau (EDL 2019). Ces données sont complétées par des suivis réalisés par l'Andra ces suivis « Andra » permettent de préciser localement les données recueillies sur les aquifères au droit du centre de stockage Cigéo.

La liste des laboratoires indépendants accrédités étant intervenus pour les prélèvements et les analyses d'eau souterraine des suivis de l'Andra figure dans le tableau 5-3.

Tableau 5-3 *Liste des laboratoires indépendants accrédités étant intervenus pour les prélèvements et les analyses d'eau souterraine*

Année	Micropolluants	Autres paramètres
2014	Synlab	Aspect environnement
2015	Synlab	Aspect environnement
2017	Synlab	Aspect environnement
2018	Synlab	Aspect environnement
2019	Synlab	Aspect environnement

5.1.2.3.3 Stations de suivi

Le réseau de suivi de la qualité des eaux souterraines de l'Andra compte dix stations permettant d'échantillonner la masse d'eau FRHG303 « Calcaires du Tithonien karstique entre Seine et Ornain » et la masse d'eau FRHG306 « Calcaires Kimméridgien-Oxfordien karstique entre Seine et Ornain ».

Ces stations[19] sont indiquées sur la figure 5-3 et les fréquences des mesures réalisées à chaque station sont indiquées dans le tableau 5-4. Elles ont fait l'objet de campagnes de mesure de 2014 à 2019.

Les données des états des lieux des agences de l'eau ont également été utilisées pour qualifier l'état des masses d'eau.

Les données analysées pour qualifier les eaux du Dogger ne sont pas étudiées au regard des normes de qualité environnementale (NQE) de par sa nature peu fracturée et sous couverture au droit de l'aire d'étude éloignée du milieu physique. Elle n'est de plus pas exploitée dans l'aire d'étude éloignée du milieu physique.

[19] Huit stations pour la masse d'eau FRHG303 et deux stations pour la masse d'eau FRHG306

Tableau 5-4 Fréquence des observations par station de suivi

Code Andra	OPE02355	OPE02520	OPE02357	OPE02363	OPE02372	OPE02518	OPE02519	OPE03357	OPE03358	OPE03359
Code BSS	02661X0023/F1	02665X0030/S	02654X0007/F4	02654X0031/1204	02658X1003/F3	02653X0001/F1	02654X0038-1	02661X0033-1	02661X0038-1	02661X0039-1
Ouvrage	EST5065	EST5076	EST5069	EST1204	EST5100	EST5078	EST1210	EST1207	EST1217	EST1220
Niveau aquifère étudié	Kimméridgien	Oxfordien	Barrois	Barrois	Barrois	Barrois	Barrois	Barrois	Barrois	Barrois
Nb. total d'observations	10	27	18	26	24	24	9	15	8	18
Nb. d'observations/an										
2014	3	3	2	4	4	4	3			
2015	3	4	4	4	4	4	2			
2016										
2017		6	2	4	4	4		5		6
2018		6	2	4	4	4		4	2	6
2019		4	4	6	4	4		6	6	6

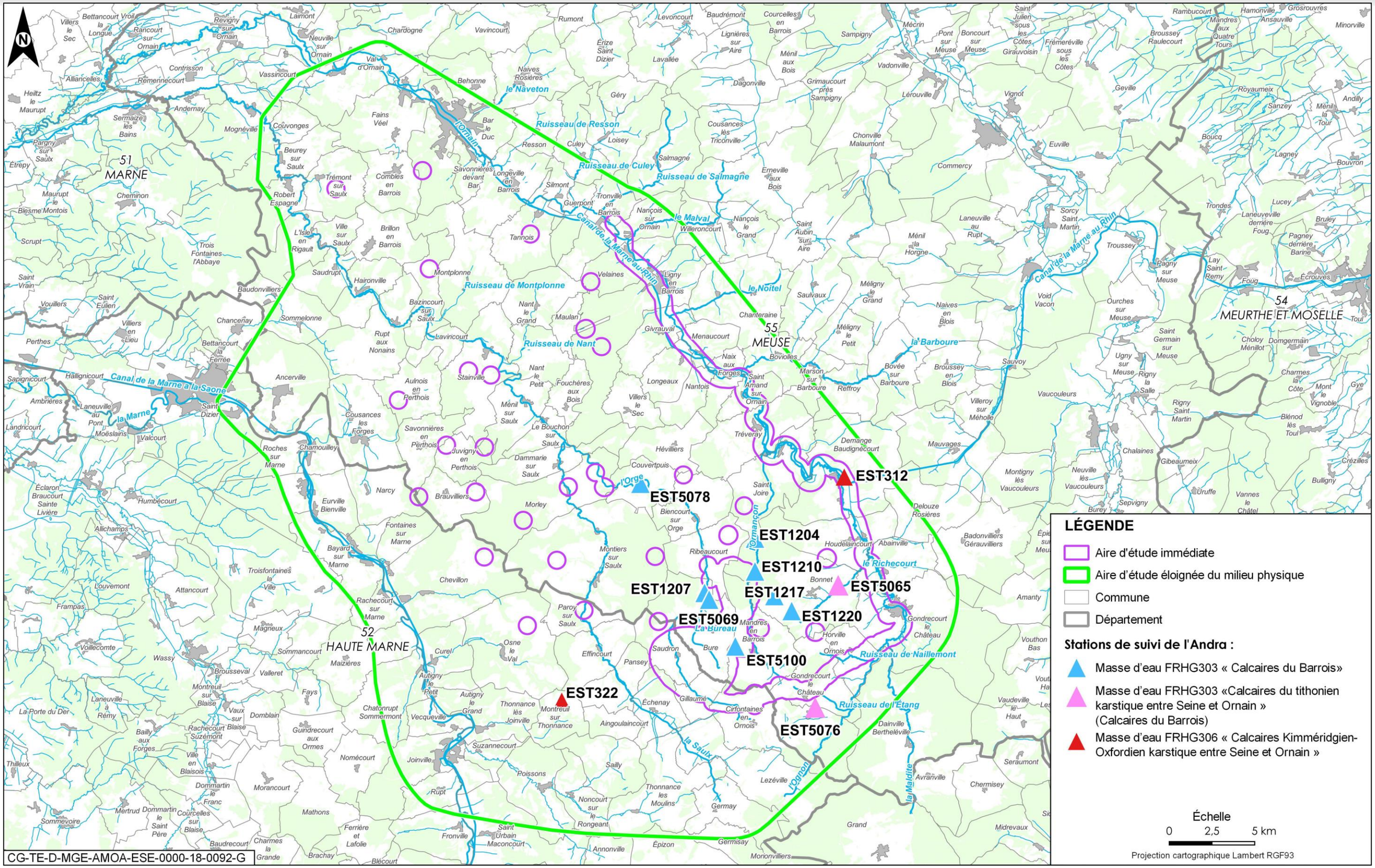


Figure 5-3 Localisation des stations de suivi de la qualité des eaux souterraines de l'Andra

5.1.2.3.4 Le programme analytique pour les paramètres conventionnels

L'ensemble des étapes relatives au prélèvement et à la conservation des échantillons d'eaux souterraines, pour la qualification des paramètres conventionnels, respectent les prescriptions des textes suivants :

- NF EN ISO 5667-3 (juin 2018) (81) : « Échantillonnage, Partie 3 : lignes directrices pour la conservation et la manipulation des échantillons d'eau » ;
- FD T90 523-3 (janvier 2009) (82) : « Guide de prélèvement pour le suivi de la qualité des eaux dans l'environnement » ;
- FD X 31 615 (décembre 2000) (83) : « Méthodes de détection et de caractérisation des pollutions : prélèvements et échantillonnages des eaux souterraines dans un forage » ;
- procédure interne de prélèvement n° PP004 de l'Observatoire pérenne de l'environnement : « Prélèvement des piézomètres ».

Les laboratoires (Synlab et Aspect environnement) analysent ensuite les échantillons selon des normes AFNOR internationales ou des méthodes internes validées selon la norme NF T90-210 de novembre 2018 (84) et reconnues par les instances officielles (COFRAC ou DAKKS).

Les résultats des analyses sont interprétés à l'aide de la circulaire du 23 octobre 2012 (85) relative à l'application de l'arrêté du 17 décembre 2008 (79) établissant les critères d'évaluation et les modalités de détermination de l'état des eaux souterraines et des tendances significatives et durables de dégradation de l'état chimique des eaux souterraines, ainsi qu'à l'aide du guide technique d'évaluation de l'état des eaux souterraines de juillet 2019 (80).

Les moyennes annuelles des différents paramètres analysés sont ainsi comparées aux NQE-MA (Norme de qualité environnementale – moyenne annuelle) définis par la circulaire et chaque dépassement représente un déclassement de la masse d'eau souterraine en mauvaise qualité, pour ce paramètre.

5.1.2.3.5 Le programme analytique pour les paramètres non-conventionnels

Afin de qualifier l'état initial « radiologique », des analyses ont été menées dans les eaux souterraines.

a) Eaux souterraines des Calcaires du Barrois

Les trois forages destinés au suivi des eaux des Calcaires du Barrois (EST1011, EST1037, remplacé par EST1040[20] et EST1038) sont suivis dans le cadre de la surveillance radiologique annuelle du Laboratoire de recherche souterrain de Bure depuis 2002. Les résultats de la campagne de 2007 pour le forage EST 1039 ont également été utilisés. Leur localisation est présentée sur la figure 2-6 du volume VII de la présente étude d'impact.

Les prélèvements ainsi que les analyses sont réalisés par le laboratoire agréé SMART de Subatech.

Plusieurs analyses sont réalisées : spectrométrie gamma longue durée selon la norme NF EN ISO 10703 de 2016 (45), mesure du tritium par scintillation liquide selon la norme NF EN ISO 9698 de 2015 (38) et détermination de l'indice alpha global et de l'indice bêta global sur compteur proportionnel à gaz selon la norme ISO 10704 de 2019 (86).

b) Eaux souterraines « profondes » (Oxfordien et Dogger)

Une campagne spécifique pour mesurer les niveaux de radioactivité alpha global et bêta global des eaux de l'Oxfordien et du Dogger a été menée en 2015. Les prélèvements ont été envoyés pour analyse à un laboratoire allemand Hydroisotop.

Le tritium et le carbone 14, naturels ou artificiels, étant produits dans l'atmosphère, ils ne sont pas présents dans ces eaux souterraines profondes (Calcaires Oxfordien et Dogger), sans communication avec la surface. Seules des mesures des niveaux de radioactivité alpha global et bêta global ont été effectuées.

[20] Le forage a EST1037 fait l'objet d'acte de malveillance en avril 2018, il a été remplacé en 2020 par le forage EST1040, situé à proximité immédiate.
[21] http://infoterre.brgm.fr/

5.1.2.4 Recensement des usages des eaux souterraines

Dans l'aire d'étude éloignée du milieu physique, le recensement des usages des eaux souterraines a été fait sur une base documentaire et par des investigations de terrain pour les usages suivants :

- l'eau potable : l'inventaire des captages d'eau potable, et de leurs périmètres de protection associés a été réalisé à partir des bases de données « Infoterre » du BRGM (Bureau de recherches géologiques et minières)[21] et de l'ADES (Accès aux données sur les eaux souterraines)[22] complétées par des échanges avec l'Agence régionale de santé (ARS) de la région Grand Est et les directions départementales des territoires des départements concernés ;
- les eaux souterraines prélevées pour des usages divers comme les usages agricoles (captages pour l'irrigation et l'abreuvement du bétail) et les usages industriels (eau de process) : le recensement des prélèvements d'eau souterraine a été réalisé à partir des bases de données « Infoterre » du BRGM (Bureau de recherches géologiques et minières)[23].

Une campagne de terrain a été diligentée par l'Andra entre novembre 2020 et avril 2021 dans le but d'effectuer des levées de doute concernant certains points d'eau de la banque du sous-sol (BSS) et de recenser d'éventuels points d'eau encore non référencés dans celle-ci.

5.1.2.5 Recensement des risques d'inondation par remontée de nappe

L'analyse du risque inondation s'est appuyée sur la consultation de la carte nationale de sensibilité aux remontées de nappe produite par le BRGM permettant de localiser les zones où il y a de fortes probabilités d'observer des débordements par remontée de nappe.

Cette carte repose sur l'exploitation de données piézométriques et de leurs conditions aux limites d'origines diverses (BSS, ADES, déclarations CATNAT, résultats de modèles hydrodynamiques, isopièzes, etc.) qui, après avoir été validées ont permis par interpolation de définir les isopièzes des cotes maximales probables, elles-mêmes permettant par soustraction aux côtes du Modèle Numérique de Terrain (RGE ALTI®) d'obtenir les valeurs de débordement potentielles[24].

5.1.3 Eaux superficielles

5.1.3.1 Description du réseau hydrographique

5.1.3.1.1 Définition des masses d'eau de surface

La définition d'une masse d'eau de surface au sens administratif et à fin d'identification pour leur gestion environnementale est fournie par le service d'administration nationale des données et référentiel sur l'eau (SANDRE).

MASSE D'EAU DE SURFACE

Il s'agit d'une portion de cours d'eau, canal, plan d'eau ou zone côtière homogène. Elle correspond à un découpage élémentaire des milieux aquatiques et est destinée à être l'unité d'évaluation de la directive-cadre sur l'eau 2000/60/CE (72). Une masse d'eau de surface est une partie distincte et significative des eaux de surface, telles qu'un lac, un réservoir, une rivière, un fleuve ou un canal, une partie de rivière, de fleuve ou de canal, une eau de transition ou une portion d'eaux côtières. Pour les cours d'eau la délimitation des masses d'eau est basée principalement sur la taille du cours d'eau et la notion d'hydro-écorégion. Les masses d'eau sont regroupées en types homogènes qui servent de base à la définition de la notion de bon état.

L'identification des masses d'eau de surface a été vérifiée avec les nouveaux référentiels projetés des SDAGE de la Seine et des cours d'eau côtiers normands et Rhin-Meuse 2022-2027 (75, 76).

[22] https://ades.eaufrance.fr/
[23] http://infoterre.brgm.fr/
[24] http://www.georisques.gouv.fr/cartes-interactives#

5.1.3.1.2 Identification des bassins versants topographiques

L'identification des bassins versants topographiques interceptés par le projet global Cigéo a été réalisée à partir des données de la base Sandre BD Carthage (octobre 2019 et avril 2020 pour la ligne électrique 400 kV).

Cet inventaire recoupe à la fois le référentiel hydrographique national permettant de localiser des données relatives à l'eau et le découpage des masses d'eau de surface considéré dans l'état actuel du SDAGE de la Seine et des cours d'eau côtiers normands 2022-2027 (75) et du SDAGE Rhin-Meuse 2022-2027 (76) pour l'extrémité est de la ligne électrique 400 kV.

5.1.3.1.3 Établissement de la liste des cours d'eau concernés

Les cours d'eau pérennes ou non, recensés dans l'aire d'étude éloignée du milieu physique Cigéo et l'aire d'étude de la ligne électrique 400 kV ont été identifiés à partir :

- des SCAN IGN au 1/25 000 ;
- de la BD Carthage (base de données du réseau hydrographique français produite par les agences de l'eau)). À noter que la BD Carthage est remplacée par la BD TOPAGE®, qui vise à passer d'un référentiel hydrographique français à moyenne échelle (la BD CARTHAGE®) à un référentiel à grande échelle (métrique), plus exhaustif, conforme à la directive INSPIRE et compatible avec le référentiel à grande échelle (RGE®) de l'IGN ;
- du site[25] du ministère de la Transition Écologique et Solidaire/ministère de la Cohésion des Territoires des Préfectures de la Meuse (dép. 55), de la Haute-Marne (dép. 52) ;
- de la liste des cours d'eau définie pour les départements de la Haute-Marne et de La Meuse ;
- des visites de terrains pour consolider les connaissances du réseau hydrographique.

La liste des cours d'eau ainsi établie est en cohérence avec la définition réglementaire de sorte que l'analyse des incidences est faite à la fois à travers le prisme des listes des schémas directeurs d'aménagement et de gestion des eaux et des subdivisions hydrographiques de la base de données Sandre.

» COURS D'EAU

Selon l'article L. 215-7-1 du code de l'environnement, « *constitue un cours d'eau un écoulement d'eaux courantes dans un lit naturel à l'origine, alimenté par une source et présentant un débit suffisant la majeure partie de l'année. L'écoulement peut ne pas être permanent compte tenu des conditions hydrologiques et géologiques locales* ».

Un écoulement est considéré comme un cours d'eau si les trois critères cumulatifs suivants sont réunis :

- la présence et permanence d'un lit, naturel à l'origine (les cours d'eau dont le tracé a été modifié ou dont des parties ont été busées restent donc des cours d'eau) ;
- un débit suffisant une majeure partie de l'année ;
- l'alimentation par une source (qui peut être une source ponctuelle ou diffuse, une résurgence de nappe).

L'instruction gouvernementale du 3 juin 2015 (87) relative à la cartographie et l'identification des cours d'eau et à leur entretien a demandé aux services de l'État de réaliser une cartographie des cours d'eau pour chaque département. Les écoulements présentés ci-après sont en cohérence avec les cours d'eau définis par des directions départementales des territoires de la Meuse et de la Haute-Marne.

Le Conseil d'État a confirmé dans sa décision n° 395021 du 22 février 2017 (88) la validité des éléments de cette instruction qui précise que dans des cas résiduels où les trois critères majeurs ne permettent pas de statuer avec certitude sur la qualification ou non de l'écoulement en cours d'eau qu'un faisceau d'indices peut être considéré. Celui-ci permet d'aider à caractériser les critères majeurs.

[25] http://cartelie.application.developpement-durable.gouv.fr/

Les cours d'eau de l'aire d'étude immédiate interceptés par le projet global Cigéo ont été étudiés plus en détail, et ont fait l'objet notamment de suivis qualitatifs et quantitatifs de la part de l'Andra.

Les autres cours d'eau se trouvant dans l'aire d'étude éloignée n'ont pas fait l'objet d'une description aussi complète, notamment lorsqu'il s'agit de cours d'eau dont les bassins versants ne se trouvent pas en aval des aménagements projetés.

Le recensement des plans d'eau a été réalisé, dans l'aire d'étude immédiate du projet global Cigéo, par l'étude de la carte IGN. Les surfaces en eau répertoriées par l'IGN ont fait l'objet d'un tri sur la base des attributs de la donnée SIG et d'une analyse visuelle de l'orthophoto (forme, localisation de la surface en eau), de façon à éliminer les surfaces en eau de types bassin de station d'épuration ou bassins de rétention des eaux pluviales par exemple. En cas de doute sur la destination d'une surface en eau, celle-ci a été conservée dans l'analyse, par mesure de précaution.

5.1.3.2 Appréciation du risque inondation

5.1.3.2.1 Règlementation et exigences

À l'échelon national français, la mise en œuvre de la directive a été traitée au niveau de chaque grand bassin hydrographique. L'application de la directive inondation se déroule en trois étapes successives :

- évaluation préliminaire des risques (EPRI), conduisant au recensement d'évènements historiques marquants et à la production d'indicateurs caractérisant les enjeux à l'échelle du bassin, notamment sur la population et les emplois exposés. L'EPRI conduit au choix des territoires à risques importants d'inondation (TRI) ;
- cartographie des surfaces inondables et des risques d'inondation sur les TRI ;
- plans de gestion des risques d'inondation (PGRI), en déclinaison de la stratégie nationale, sur la base de l'EPRI et des cartographies effectuées sur les TRI. Ces PGRI sont détaillés au niveau local sur chaque TRI par une stratégie locale de gestion des risques d'inondation, laquelle se traduit de manière opérationnelle dans des plans d'action tels que les PAPI (programmes d'actions de prévention des inondations), et des projets PSR (plan des submersions rapides), et au niveau réglementaire dans les PPR (plans de prévention des risques). Les PGRI sont aussi traduits de manière opérationnelle au niveau grand bassin par les plans grands fleuves (PGF). Les PGRI ont été arrêtés par les préfets coordonnateurs de bassin en décembre 2015 et les stratégies locales sont mises en œuvre depuis 2016. Les PGRI pour la période 2022-2027 sont en cours d'élaboration et seront approuvés pour mars 2022.

Un inventaire de la réglementation et des exigences a été réalisé sur toutes les communes circonscrites dans l'aire d'étude éloignée du milieu physique et de l'aire d'étude de la ligne électrique 400 kV définie pour l'analyse des milieux physiques du projet global Cigéo. Ainsi, un inventaire des textes réglementaires et documents de prescriptions applicables et des bases de données disponibles a été entrepris en trois étapes :

- étape 1 – inventaire des documents administratifs d'organisation de cette gestion :
  - ✓ les atlas des zones inondables (AZI)[26] ;
  - ✓ les plans de prévention du risque inondation (PPRI) des secteurs de la Marne moyenne, des vallées de la Saulx et de l'Orge, des secteurs amont et centre de l'Ornain, source Direction départementale du territoire (DDT) Meuse et Haute-Marne, auxquels s'ajoutent les plans de prévention des risques inondation de Vaucouleurs et Vold et de la vallée de la Meuse pour l'extrémité est de la ligne 400 kV ;
  - ✓ les plans de gestion risque inondation (PGRI) du grand bassin Seine-Normandie et du grand bassin Rhin-Meuse ;
  - ✓ les territoires à risque important d'inondation (TRI) ;
  - ✓ les programmes d'actions de prévention des inondations (PAPI) avec en Haute-Marne et en Meuse un PAPI d'Intention, de la Marne, Vallage et Perthois.

[26] https://www.georisques.gouv.fr/donnees/bases-de-donnees/base-gaspar

- étape 2 – inventaire des documents de prescriptions tels que :
  - ✓ le Schéma directeur d'aménagement et de gestion des eaux (SDAGE Seine Normandie et des cours d'eau côtiers normands – SDAGE Rhin-Meuse) ;
  - ✓ les règlements d'urbanismes locaux.
- étape 3 – inventaire des bases de données tels que :
  - ✓ base de données historiques sur les inondations (BDHI) ;
  - ✓ base géorisques pour les territoires à risque important d'inondation (TRI) et les plans de prévention des risques naturels de type inondation (PPRNi).

L'analyse du risque inondation s'est appuyée sur la consultation de :

- l'atlas des zones inondables ;
- les plans de prévention des risques inondation (PPRI) ;
- les plans de gestion des risques d'inondation (PGRI) ;
- les territoires à risque important d'inondation (TRI) ;
- le programme d'actions de prévention contre les inondations (PAPI).

5.1.3.2.2 Définition de l'état initial pour le risque inondation

Les différents documents cités au chapitre 5.1.3.2.1 du présent volume ont été étudiés pour permettre notamment la description des phénomènes d'inondation et pour établir la liste des contraintes ou prescriptions réglementaires s'appliquant dans l'aire d'étude éloignée. Les documents sont téléchargeables depuis les sites Internet des préfectures.

Une simulation hydraulique a permis de modéliser les zones inondées sur la Bureau, l'Orge et l'Ormançon à l'état initial aux abords du centre de stockage Cigéo pour une pluie de période de retour 10 ans et 100 ans.

Des évaluations de débits spécifiques de ces cours d'eau ont été obtenues sur la base de calculs paramétrés sur des critères géographiques (surfaces des bassins-versants aux futurs points de rejets, état des surfaces actuelles, topographie, statistiques et chroniques pluviales). Ces débits spécifiques sont ceux qui servent pour le dimensionnement des ouvrages de gestion des eaux pluviales du centre de stockage Cigéo au niveau de définition des aménagements et installations connus au stade de la déclaration d'utilité publique du centre de stockage Cigéo.

Les choix méthodologiques sur l'analyse des précipitations et autres données climatologiques figurent au chapitre 2. La directive européenne 2007/60/CE, dite « directive inondation » (83) a été transposée en droit Français dans la loi LENE du 12 juillet 2010 (84) et dans le décret n° 2011-227 du 2 mars 2011 (89) relatifs à l'évaluation et à la gestion des risques d'inondation du présent volume.

[27] http://hydro.eaufrance.fr/

5.1.3.3 Détermination des débits des cours d'eau

La détermination des débits des cours d'eau est réalisée à partir de données de plusieurs sources :

- réseau public d'information sur l'eau (EauFrance) : synthèses par station disponible sur le site[27] (Eaufrance est le service public d'information sur l'eau (90)) :

Tableau 5-5 Points de suivi des débits des cours d'eau (Eaufrance)

N° du point de suivi de la Banque HYDRO	Bassin versant concerné	Cours d'eau suivi	Fréquence de mesure
H5071040	La Marne	La Marne	Continu
H5071050		La Marne	Continu
F5210601		Le Rongeant	Ponctuelle
H5102040	La Saulx	La Saulx	Continu
H5112310	Ornain	Ornain	Continu
H5122340		Ornain	Continu

- réseau de suivi de l'Andra, permettant d'apprécier principalement les débits instantanés des cours d'eau :

Les données issues des stations du réseau de suivi de l'Andra permettent principalement d'apprécier les débits instantanés des cours d'eau. Ce sont souvent des mesures ponctuelles et elles sont données à titre indicatif notamment pour alimenter la connaissance sur les cours d'eau non référencés sur Eaufrance.

Le tableau 5-6 ci-dessous indique les laboratoires et/ou bureaux d'études indépendants étant intervenus pour les jaugeages des eaux superficielles.

Tableau 5-6 Liste des prestataires indépendants intervenus pour les jaugeages

Année	Laboratoires/Bureaux d'étude
2014	Gestion Hydro
2015	Gestion Hydro
2017	GEREEA et Eurofins
2018	GEREEA et Eurofins
2019	Eurofins

Le réseau de suivi des débits des cours d'eau incluant de l'Andra comporte deux types de stations : stations de suivi continu (de l'Orge, de la Saulx et de l'Ornain) et stations de suivi ponctuel. Leurs localisations sont présentées sur la figure 5-4.

Les **stations de mesure en continu** sont placées sur les cours d'eau pérennes. La mesure est réalisée à l'aide d'un capteur permettant d'enregistrer la hauteur d'eau. Cette hauteur d'eau est ensuite convertie en débit à l'aide d'une courbe de tarage établie à chaque station. Les données sont donc des débits calculés. La fiabilité de la mesure est assurée grâce aux contrôles du matériel, à celui de l'étalonnage du matériel, de l'état de la section ou du canal de mesure, etc. Des mesures ponctuelles sont également réalisées sur les stations en continu pour déterminer et contrôler les courbes de tarage.

Les **stations non équipées de mesure en continu** sont notamment celles placées sur les cours d'eau intermittents. Les mesures de débits au micro-moulinet sont réalisées selon la méthode « d'intégration » basée sur le principe de la mesure du champ des vitesses sur une verticale de la colonne d'eau en plusieurs points d'une même section et de hauteur mesurée. Afin que les résultats soient représentatifs du tronçon étudié, le choix de la section respecte différents critères morphologiques : linéarité du tronçon, absence d'obstacle, nature du lit, type d'écoulement, etc. Chaque hélice utilisée pour les relevés de vitesse possède sa propre courbe d'étalonnage, laquelle est utilisée pour le dépouillement des mesures. Pour ce qui est des stations de mesures ponctuelles, quatre à six mesures de débit ponctuel par an ont été réalisées.

Les points de suivi et leur fréquence de mesure sont classés par bassin versant et présentés dans la figure 5-7.

Tableau 5-7 Points de suivi « Andra » des débits des cours d'eau

N° du point de suivi de l'Observatoire pérenne de l'environnement (OPE)	Bassin versant concerné	Cours d'eau suivi	Fréquence de mesure
OPE90011	La Saulx	La Saulx	Continu
OPE90012		La Saulx	Continu
OPE90013		La Saulx	Continu
OPE01890		La Saulx	Ponctuelle
OPE01881		L'Orge	Ponctuelle
OPE01882		L'Orge	Ponctuelle
OPE01750		L'Orge (source de la Fontaine)	Ponctuelle
OPE01883		L'Orge	Ponctuelle
OPE01751/EST3012		L'Orge	Continu
EST5072		La Bureau (source)	Ponctuelle
EST5073		La Bureau (source)	Ponctuelle
OPE90014	Ornain	Ornain	Continu
OPE90015		Ornain	Continu
OPE01884		Ormançon	Ponctuelle
OPE01885		Ormançon	Ponctuelle
OPE01886		Ormançon	Ponctuelle
OPE02790		Ruisseau de Naillemont	Ponctuelle
OPE02791		Ruisseau de Naillemont	Ponctuelle
OPE02792		Ruisseau de l'Étang	Ponctuelle
OPE02793		Ruisseau de l'Étang	Ponctuelle

- données de l'Office français de la biodiversité :

  L'OFB met à disposition des cartographies à l'échelle nationale faisant figurer les débits caractéristiques de référence (QMNA5 et Module) sur des tronçons ;

- données de l'Observatoires des assecs :

  Le site de l'Observatoire national des étiages (ONDE) présente les observations visuelles réalisées par les agents départementaux de l'Office français de la biodiversité (OFB) pendant la période estivale sur l'écoulement des cours d'eau.

  Les diverses stations et points de tronçons présents dans l'aire d'étude éloignée du milieu physique sont présentés sur la figure 5-4.

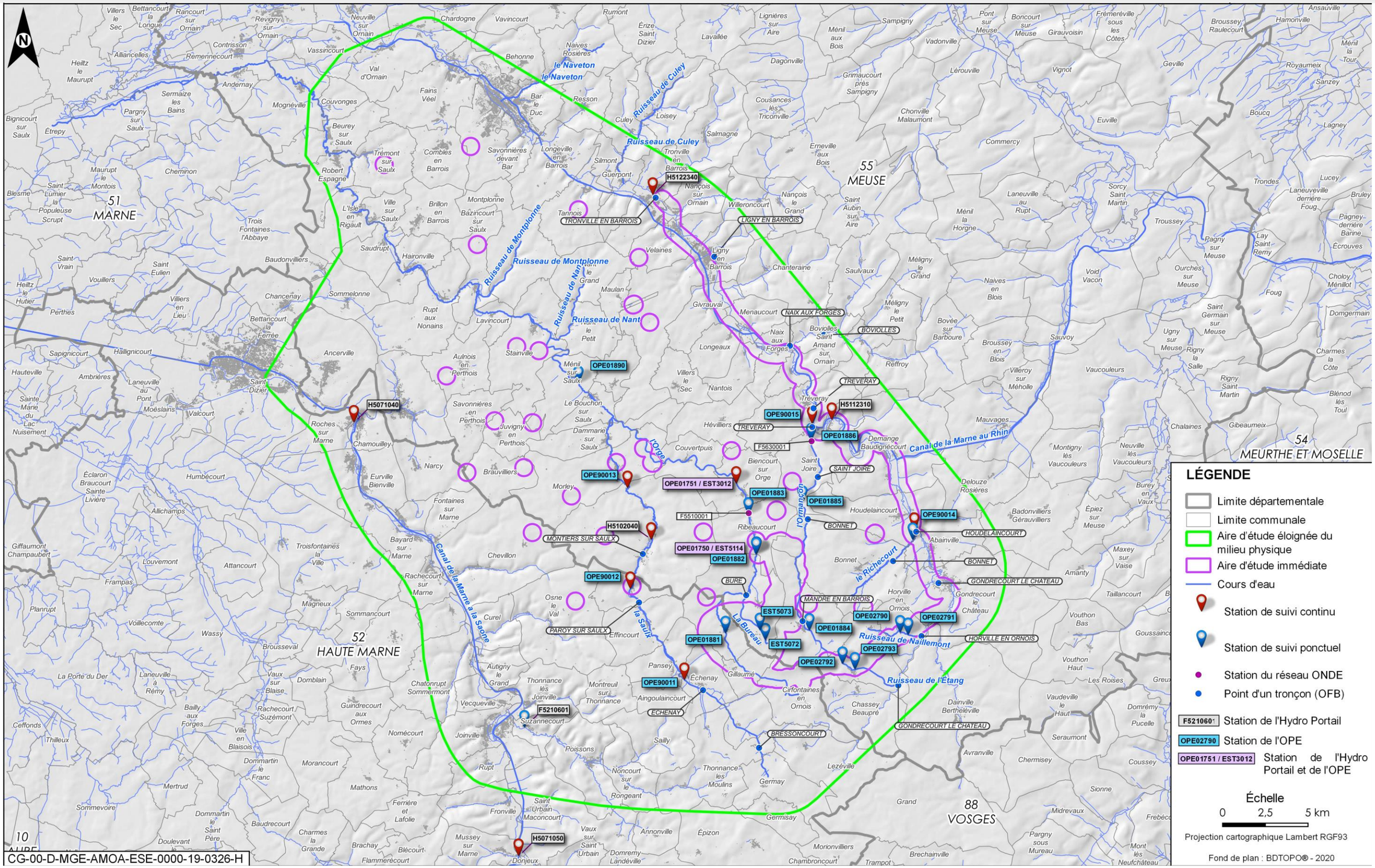


Figure 5-4 *Carte des stations de jaugeage de l'Andra et des services de l'État et recensées dans « Eaufrance »*

5.1.3.4 Détermination de l'état qualitatif des cours d'eau

5.1.3.4.1 Réglementation et exigences

La directive cadre sur l'eau (DCE) 2000/60/CE du 23 octobre 2000 (72) fixe les exigences de « bon état des masses d'eau ». Transposées en droit français, les règles d'évaluation de l'état des eaux de surface sont définies par l'arrêté ministériel du 25 janvier 2010 relatif aux méthodes et critères d'évaluation de l'état écologique, de l'état chimique et du potentiel écologique des eaux de surface pris en application des articles R. 212-10, R. 212-11 et R. 212-18 du code de l'environnement (91). Cet arrêté a été modifié par l'arrêté du 27 juillet 2015 (92), puis par celui du 27 juillet 2018 (93).

Les SDAGEs tiennent compte de ces exigences et fixent le calendrier d'objectifs d'atteinte du « bon état » des masses d'eau.

Ainsi, chaque cours d'eau de l'aire d'étude éloignée du projet global Cigéo est caractérisé par son état chimique et écologique et son objectif de qualité à atteindre indiqué dans le SDAGE 2022-2027 du bassin de la Seine et des cours d'eau côtiers normands et dans le SDAGE 2022-2027 du bassin Rhin-Meuse (75, 76).

Le texte référentiel est l'arrêté du 27 juillet 2018 modifiant l'arrêté du 25 janvier 2010 relatif aux méthodes et critères d'évaluation de l'état écologique, de l'état chimique et du potentiel écologique des eaux de surface pris en application des articles R. 212-10, R. 212-11 et R. 212-18 du code de l'environnement (93).

L'état d'une masse d'eau de surface est défini sur la base de deux composantes : l'état écologique et l'état chimique.

La directive cadre sur l'eau définit alors le « bon état » d'une masse d'eau de surface lorsque l'état écologique et l'état chimique de celle-ci sont au moins bons (cf. Figure 5-5).

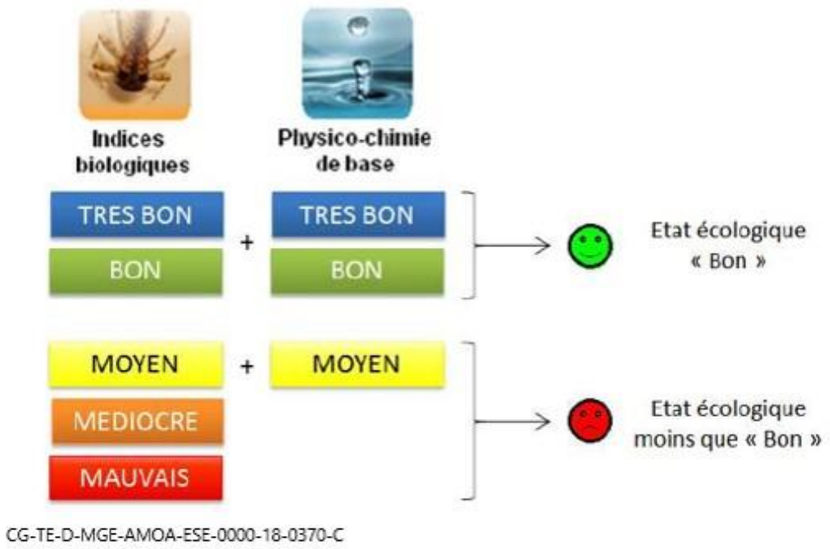


Figure 5-5 Règle de détermination de l'état des masses d'eau superficielles selon la directive-cadre sur l'eau)

a) L'état écologique

L'état écologique d'une masse d'eau de surface résulte de l'appréciation d'éléments de qualité biologiques (espèces végétales et animales), hydromorphologiques et physico-chimiques, comme indiqué sur la figure 5-6.

Pour chaque type de masse d'eau (par exemple : petit cours d'eau de montagne, lac peu profond de plaine, côte vaseuse…), l'état écologique se caractérise par un écart aux « conditions de référence » de ce type, qui est désigné par l'une des cinq classes suivantes : très bon, bon, moyen, médiocre et mauvais.

Les conditions de référence sont les conditions représentatives d'une eau de surface pas ou très peu influencée par l'activité humaine :

- les éléments de qualité « biologiques » s'intéressent aux organismes aquatiques présents dans la masse d'eau (algues poissons, invertébrés). Les éléments biologiques évalués autour du projet global Cigéo sont l'Indice biologique invertébrés (IBG-DCE ou I2M2 depuis 2018), l'indice poisson rivière (IPR), et l'indice biologique diatomées (IBD) ;
- les éléments « physico-chimiques » s'intéressent aux relevés des paramètres généraux tels que le bilan en oxygène, l'acidification, la salinité et la température. En complément, quatre polluants spécifiques non synthétiques et 16 polluants synthétiques sont suivis pour établir l'état écologique (cf. Tableau Annexe 5-3) ;
- les éléments hydromorphologiques relatifs au régime hydrologique, c'est-à-dire dépendant des quantités et dynamique des cours d'eau, des échanges avec les masses d'eau souterraines, des temps de concentrations) et des facteurs géomorphologiques ont été abordés sur des bases documentaires et avec des observations de terrain.

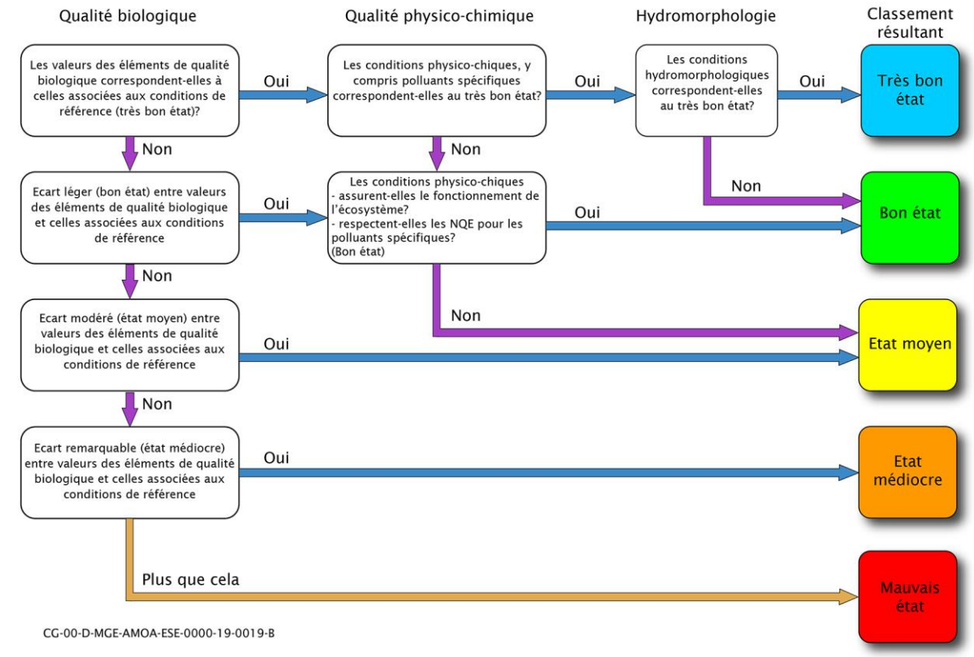


Figure 5-6 Règles de détermination de l'état écologique des masses d'eau superficielles[28]

[28] Source : « Guide technique relatif à l'évaluation de l'état des eaux de surfaces continentales », janvier 2019, ministère de la Transition écologique et solidaire (94).

b) L'état chimique

L'état chimique d'un cours d'eau est établi par comparaison des valeurs mesurées *in situ* à des normes de qualité environnementales (NQE) de 45 substances visées par la directive cadre sur l'eau (72), La liste de ces 45 substances et leurs normes de qualité environnementales sont indiquées dans le tableau annexe 5-2.

Ces normes de qualité environnementale sont exprimées en valeur moyenne (NQE_MA) ou en valeur maximale (NQE-CMA), L'objectif de « bon état chimique » est atteint lorsque les concentrations de ces substances mesurées dans le cours d'eau ne dépassent pas les NQE. L'agrégation de ces deux valeurs et leur comparaison aux limites de quantification analytiques permettent de déterminer la classe d'état par paramètre, puis la classe d'état chimique.

Il existe deux niveaux d'état : bon (bleu) et mauvais (rouge).

L'état des masses d'eau a été caractérisé par Eurofins, ou un laboratoire partenaire, à l'aide d'un outil informatique développé pour l'Agence de l'eau Seine Normandie : le logiciel S3R.

5.1.3.4.2 Données utilisées

L'état des masses d'eau présentées dans l'état initial est issu du dernier état des lieux 2019 du bassin de la Seine et des cours d'eau côtiers normands approuvé par le comité de bassin le 4 décembre 2019 (95) et pour le bassin Rhin-Meuse, en prévision du SDAGE 2022-2027.

Ces données sont précisées localement sur certains cours d'eau au droit du centre de stockage Cigéo. Les résultats, issus du réseau de suivi des eaux superficielles de l'Andra mis en place en 2011, sont indiqués pour les années 2014, 2015, 2017, 2018 et 2019. Comme pour les données des agences de l'eau, les données acquises par Andra respectent les méthodes et les règles d'évaluation de l'état des masses d'eau fixées par l'arrêté du 25 janvier 2010 (91).

a) Prélèvement

Divers types de prélèvements ont été réalisés. La liste des laboratoires indépendants accrédités étant intervenus pour les prélèvements et les analyses d'eau réalisés par Andra figure dans le tableau 5-8.

Tableau 5-8 Liste des laboratoires indépendants accrédités étant intervenus pour les prélèvements et les analyses d'eau

Année	Micropolluants	Autres paramètres
2014	Synlab	Aspect environnement
2015	Synlab	Aspect environnement
2017	Eurofins	Eurofins
2018	Eurofins	Eurofins
2019	Eurofins	Eurofins

Ont été réalisés :

- des prélèvements d'eau (EAUX) par des laboratoires extérieurs accrédités au niveau de chaque station, face au courant à une profondeur voisine de 30 centimètres dans une zone de mélange des eaux afin d'être les plus représentatifs possible de la qualité du cours d'eau. En cas de non-accessibilité au lit du cours d'eau, notamment en raison d'une profondeur ou d'un courant trop important, les prélèvements sont effectués depuis un pont à l'aide d'un seau propre ou depuis la berge à l'aide d'une perche de prélèvement ;
- des prélèvements de sédiments (SED), une fois par an sur les stations dites permanentes (toujours en eau) en fin d'étiage afin de maximiser les chances d'obtenir des sédiments fins. Les conditions météorologiques au moment de chaque prélèvement ont été relevées. Les sites de prélèvements sont les mêmes que ceux du suivi des eaux. Afin d'obtenir un échantillon représentatif de chaque site, trois points au minimum ont été prélevés de la rive gauche à la rive droite du cours d'eau pour composer ensuite un échantillon. Les échantillons sont ensuite acheminés au laboratoire accrédité COFRAC ou ils sont préparés pour analyse. Les analyses chimiques se font ensuite sur les sédiments tamisés à 2 µm et les résultats sont rendus en teneurs en poids sec ;
- des prélèvements des communautés biologiques (BIO) : une campagne hydrobiologique a été menée en période de basses eaux en avril, juin et août 2019. Des indices biologiques de type I2M2 (indice invertébrés multi-métrique) et IBD (Indice biologique diatomées) ont ainsi été réalisés sur 16 stations.

b) Pour les prélèvements d'eau (EAUX)

Les prélèvements d'eau sont réalisés par des laboratoires extérieurs accrédités qui mettent en œuvre les normes et guides suivants :

- NF EN ISO 5667-6 de 2016 (96) qualité de l'eau – échantillonnage – Partie 6 : guide général pour l'échantillonnage des rivières et des cours d'eau ;
- FD T90 523-1 de 2019 guide de prélèvement (97) pour le suivi de la qualité des eaux dans l'environnement – Partie 1 : prélèvement d'eau superficielle ;
- guide technique de l'Agence de l'eau Loire-Bretagne (98) : guide technique d'échantillonnage en vue d'analyses physico-chimiques - Agence de l'eau Loire-Bretagne, novembre 2006 (en absence de guide à l'Agence de l'eau Seine Normandie).

Les prélèvements d'eau sont effectués au niveau de chaque station, face au courant à une profondeur voisine de 30 centimètres dans une zone de mélange des eaux afin d'être les plus représentatifs possible de la qualité du cours d'eau. En cas de non-accessibilité au lit du cours d'eau, notamment en raison d'une profondeur ou d'un courant trop important, les prélèvements sont effectués depuis un pont à l'aide d'un seau propre ou depuis la berge à l'aide d'une perche de prélèvement.

c) Prélèvement de sédiments (SED)

Les sédiments ont été prélevés une fois par an sur les stations dites permanentes (toujours en eau) en fin d'étiage afin de maximiser les chances d'obtenir des sédiments fins. Les conditions météorologiques au moment de chaque prélèvement ont été relevées. Les sites de prélèvements sont les mêmes que ceux du suivi des eaux. Afin d'obtenir un échantillon représentatif de chaque site, trois points au minimum ont été prélevés de la rive gauche à la rive droite du cours d'eau pour composer ensuite un échantillon.

Les échantillons sont ensuite acheminés au laboratoire accrédité COFRAC ou ils sont préparés pour analyse. Les analyses chimiques se font ensuite sur les sédiments tamisés à 2 µm et les résultats sont rendus en teneurs en poids sec.

d) Prélèvement des communautés biologiques (BIO)

Depuis 2009, l'Agence de l'eau Seine Normandie n'applique plus l'indice IBGN, mais l'IBG-DCE. En effet, l'IBGN ne répond pas pleinement aux exigences de la directive en termes de prélèvement et de détermination. L'OPE applique donc également cet indice, lequel est conforme aux exigences européennes (DCE) (72) et permet une estimation plus fine de la qualité des milieux naturels (normes NF T90-333 de 2016 (99) et XP T90-388 de 2015 (100)).

Par ailleurs, dans le cadre de l'application de la directive cadre sur l'eau (DCE), l'université de Lorraine a développé un nouvel indice concernant le compartiment « invertébrés benthiques » en cours d'eau : l'Indice Invertébrés Multi-Métrique (I2M2), en collaboration avec l'IRSTEA et avec la coordination du ministère de l'Écologie du développement durable et de l'énergie ainsi que de l'Onema. Cet indice doit permettre d'évaluer de manière fiable et performante l'état écologique des cours d'eau français.

Une campagne hydrobiologique a été menée en période de basses eaux en avril, juin et août 2019. Des indices biologiques de type I2M2 et IBD ont ainsi été réalisés sur 16 stations.

Les raisons de ce changement de méthode sont que d'une part, la réalisation de l'IBGN peut conduire parfois à échantillonner des habitats peu abondants dans le cours d'eau alors que la DCE requiert que l'indice soit représentatif de la station. D'autre part, l'IBGN est basé sur la sensibilité des taxons à la pollution et leur diversité alors que la DCE demande que soient évaluées l'abondance et la composition des invertébrés.

Les bio indicateurs développés pour l'étude des milieux aquatiques sont des indicateurs constitués par un groupe d'espèces ou un groupement végétal dont la présence renseigne sur certaines caractéristiques écologiques de l'environnement, ou sur l'incidence de certaines pratiques sur la qualité de l'écosystème considéré. Ainsi, toute modification de la composition des communautés vivantes hébergées par un milieu aquatique est la preuve d'une perturbation subie par l'écosystème. Parmi ces bio indicateurs, deux compartiments sont particulièrement étudiés :

- les invertébrés benthiques au travers de l'IBG-DCE (indice biologique global compatible avec la directive cadre sur l'eau) ou I2M2 (Indice invertébrés multimétrique) depuis 2018. Cette méthode standardisée est utilisée en hydrobiologie afin de déterminer la qualité biologique globale d'un cours d'eau. La méthode utilise l'identification des différents macro invertébrés d'eau douce présents sur un site pour calculer une note. Cette note est basée sur la présence ou l'absence de certains taxons bio indicateurs polluo-sensibles (qui tendent à disparaitre sous l'effet d'une altération de la qualité du milieu) ainsi que sur la richesse faunistique globale du site (biodiversité) ;
- les diatomées épilithiques au travers de l'IBD (Indice biologique diatomées). Les diatomées sont des algues brunes unicellulaires microscopiques qui colonisent notamment la surface des pierres des cours d'eau. Essentiellement sensible à la composition physico-chimique des eaux, chaque espèce présente une capacité propre à supporter différents paramètres comme les concentrations de matières organiques et de nutriments (azote et phosphore).

Ces prélèvements sont mis en œuvre une fois par an selon des normes et des guides. Néanmoins, la réalisation de tous ces prélèvements est très fortement contrainte par les conditions hydrologiques. En période d'assec, ils ne sont pas réalisables. Le nombre de prélèvements annuels est donc variable.

Pour l'IBG-DCE les documents appliqués sont :

- circulaire DCE n°2007/22 en date du 11 avril 2007 (101) et l'arrêté du 27 juillet 2018 modifiant l'arrêté du 25 janvier 2010 relatif aux méthodes et critères d'évaluation de l'état écologique, de l'état chimique et du potentiel écologique des eaux de surface pris en application des articles R. 212-10, R. 212-11 et R. 212-18 du code de l'environnement (93) ;
- norme NF T90-333 (septembre 2016 (99)) « *Qualité de l'eau – Prélèvement des macro invertébrés aquatiques en rivières peu profondes* » et la norme complément XP T 90-388 (juin 2010) (100) « *Qualité de l'eau - Traitement au laboratoire d'échantillons contenant des macro-invertébrés de cours d'eau » ;*
- fascicule de documentation FD T90-733 (septembre 2017) « Qualité de l'eau : guide d'application de la norme NF T 90-333:2016 de 2017 (102) (Prélèvement des macro invertébrés aquatiques en rivières peu profondes) » ; Indice Biologique Global DCE compatible XP T90-333 de 2012 (103), XP T90-388 de 2015 (100) ;
- norme XP T90-388 (juin 2010) « Qualité de l'eau : traitement au laboratoire d'échantillons contenant des macro invertébrés de cours d'eau » ;
- guide d'application GA T 90-788 (mars 2015) « Qualité de l'eau : guide d'application de la norme expérimentale XP T 90-388 (Traitement au laboratoire d'échantillons contenant des macro-invertébrés de cours d'eau) » (100) ;
- programme 100-3 du COFRAC « Analyses biologiques des milieux aquatiques » (104).

Pour la détermination de l'IBD, les laboratoires ont appliqué :

- NF T90-354 de 2016 (105) qualité de l'eau : détermination de l'Indice biologique Diatomées (IBD) ;
- NF EN 14407 de 2014 qualité de l'eau (106) : guide pour l'identification et le dénombrement des échantillons de diatomées benthiques de rivières, et leur interprétation ;
- NF EN 13946 de 2014 (107) qualité de l'eau : guide pour l'échantillonnage en routine et le prétraitement des diatomées benthiques de rivières ;

Programme 100-3 du COFRAC « Analyses biologiques des milieux aquatiques ».

e) Définition de l'IPR (Indice poisson rivière) comme indice de qualité des cours d'eau

Cet indice est applicable sur des cours d'eau pérennes et ne convient pas sur ceux très fréquemment en assec ou présentant des pertes et résurgences sur des tronçons hectométriques à kilométriques. Il consiste globalement à mesurer l'écart entre la composition du peuplement sur une station donnée, observée à partir d'un échantillonnage par pêche électrique et la composition du peuplement attendue en situation de référence, c'est-à-dire dans des conditions pas ou très peu modifiées par l'homme. Ainsi, l'observation des poissons constitue un moyen d'évaluer l'état de l'environnement aquatique.

Pour la détermination de l'IPR, des pêches électriques ont été réalisées comme décrit au chapitre 6.1.4.7 du présent volume.

f) Détermination des caractéristiques hydromorphologiques des cours d'eau

La description des caractéristiques hydromorphologiques des cours d'eau s'appuie sur :

- le système relationnel d'audit de l'hydromorphologie des cours d'eau (Syrah-ce) : un système d'aide à la décision qui vise à identifier le risque d'altération hydromorphologique et à évaluer l'inhérente dégradation de l'« état écologique », *via* une approche par tronçon de cours d'eau. Le système comprend deux types de données :
  - ✓ une composante géographique et cartographique permettant l'évaluation des pressions s'exerçant sur les cours d'eau et réalisée à partir de données disponibles à l'échelle nationale ;
  - ✓ une composante statistique et probabiliste permettant l'évaluation des risques d'altération hydromorphologique à partir des pressions.
- les données issues des stations du réseau de suivi de l'Andra (OPE).

Les données hydromorphologiques disponibles ont été compilées et présentés sous forme de synthèse par cours d'eau ou tronçons homogènes de cours d'eau, avec :

- la largeur du cours d'eau ;
- la profondeur du cours d'eau ;
- le colmatage ;
- le faciès ;
- les caractéristiques des berges ;
- la présence de végétation aquatique ;
- la diversité du substrat.

5.1.3.4.3 Stations

Le réseau de suivi de la qualité des eaux de surface de Andra comporte 23 points de suivis répartis sur sept cours d'eau. Leurs localisations sont présentées sur la figure 5-7.

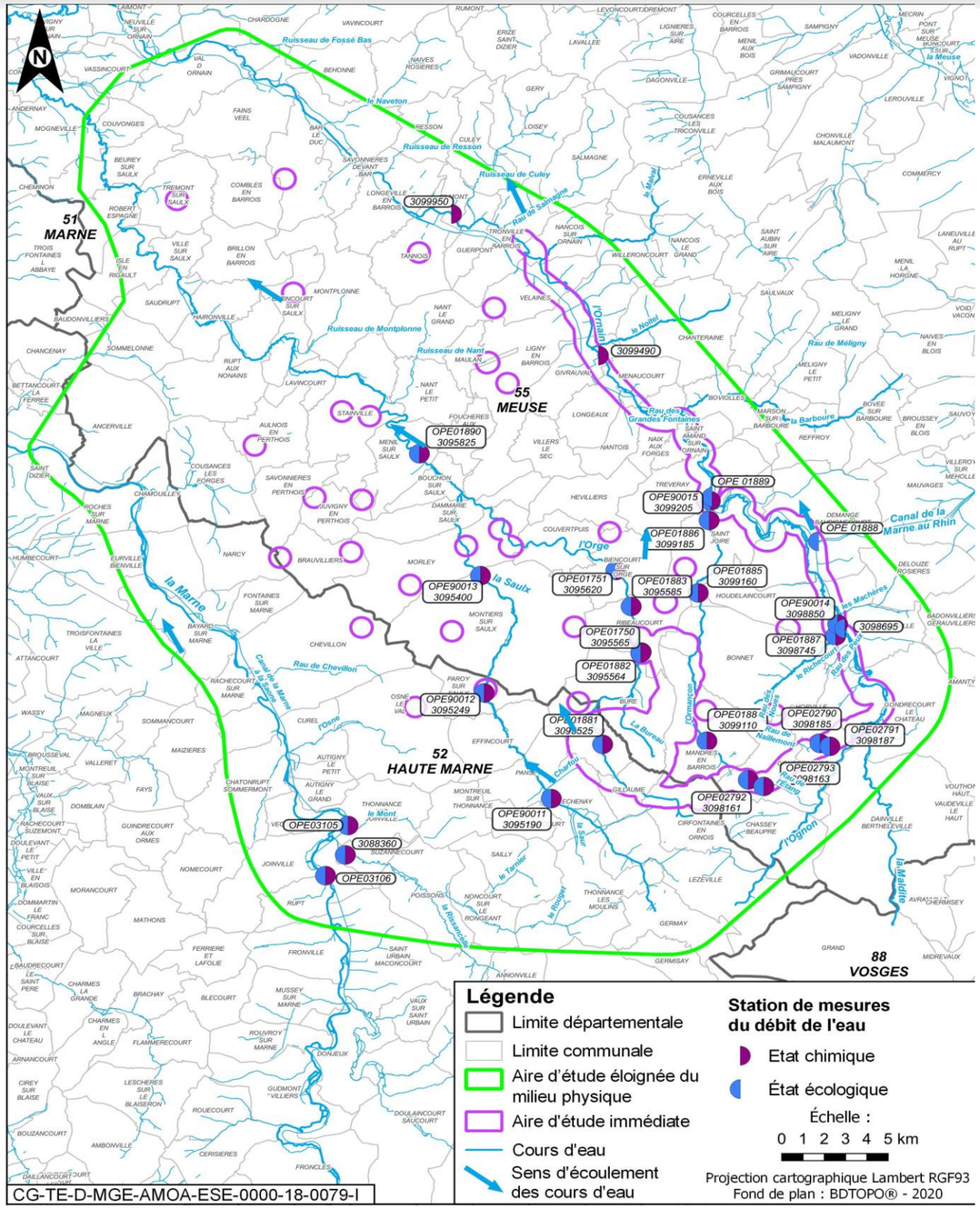


Figure 5-7 *Carte des stations de l'Observatoire pérenne de l'environnement pour les prélèvements et les analyses qualitatives des eaux de surface*

À ces données s'ajoutent des données issues de la base de données de l'Agence de l'eau Seine Normandie (NAIADES). Le réseau de suivi de la qualité des eaux superficielles Andra a été exploité en partenariat avec l'Agence de l'eau Seine Normandie et les données acquises par l'Andra sont comparables à celles de l'Agence de l'eau. Certaines stations disposent donc de la double codification OPE/AESN, d'autres uniquement de la codification OPE ou Agence de l'eau.

Les prélèvements sont réalisés par des prestataires à une fréquence maximale de 12 interventions par an.

Les paramètres analysés sont les suivants :

- eau : physico-chimie, Ions majeurs, micropolluants, production végétale ;
- sédiments : physico-chimie, micropolluants, granulométrie ;
- biologie : indice biologique global compatible avec la directive cadre sur l'eau (IBG-DCE), indice biologique diatomées (IBD), indice invertébrés multi-métrique (I2M2)[29].

5.1.3.4.4 Programme analytique pour les paramètres conventionnels

Le nombre de prélèvements par station est reporté dans le tableau 5-9 pour le bassin versant de La Marne, dans le tableau 5-10 pour le bassin versant de La Saulx et dans le tableau 5-11 pour le bassin versant de l'Ornain.

Les substances analysées sont présentées dans l'annexe 5 du présent volume.

La position hydrologique de chaque point de mesures est signalée par rapport au projet global Cigéo. Ces points encadrent les futures opérations du projet global Cigéo.

La fréquence d'échantillonnage a été renforcée en 2017 et les prélèvements biologiques ont été étendus aux cours d'eau intermittents.

La prise d'eau d'Houdelaincourt est également considérée dans le programme analytique car il s'agit d'un vecteur potentiel de pollution de l'Ornain vers le canal. Elle se trouve à l'aval de l'installation terminale embranchée et de la ligne ferroviaire n° 027000. Les prises d'eau de Saint-Joire, de Naix-aux Forges, de Tannois, etc. se trouvent plus à l'aval sur l'Ornain et sont également concernées par de la ligne ferroviaire n° 027000. Celle de Saint-Joire est concernée par la confluence de l'Ormançon et de l'Ornain en position aval de la zone puits et de la zone des verses. La liste des paramètres mesurés est reportée en annexe 5 du présent volume.

[29] L'indice invertébrés multi-métrique I2M2 remplace l'IBG-DCE depuis l'arrêté du 27 juillet 2018 (93).

Tableau 5-9 Bassin versant de La Marne - Fréquence de prélèvement réalisé par l'Andra (OPE) sur les stations suivies

Cours d'eau	Code	Position/projet global	Nombre de prélèvements réalisés par station																	
			2014			2015			2017			2018			2019			Total		
			EAUX	SED	BIO	EAUX	SED	BIO	EAUX	SED	BIO	EAUX	SED	BIO	EAUX	SED	BIO	EAUX	SED	BIO
La Marne	OPE 03105	Amont							4		1				5		1	9		2
	OPE 03106	Aval							4		1				3		1	7		2

EAUX : prélèvement d'eau ; SED : prélèvement de sédiments ; BIO : prélèvement des communautés biologiques

Tableau 5-10 Bassin versant de La Saulx - Fréquence de prélèvement réalisé par l'Andra (OPE) sur les stations suivies

Cours d'eau	Code	Position /projet global	Nombre de prélèvements réalisés par station																	
			2014			2015			2017			2018			2019			Total		
			EAUX	SED	BIO	EAUX	SED	BIO	EAUX	SED	BIO	EAUX	SED	BIO	EAUX	SED	BIO	EAUX	SED	BIO
Orge	OPE 01750	Aval ZD, verses	4			5			5		1	5			6			25		1
	OPE 01751	Aval ZD, verses	4			4			10	1	1	11	1	1	9	1	1	38	3	3
	OPE 01881	Aval ZD, RTE	4			5			9	1	1	7	1	1	8	1	1	33	3	3
	OPE 01882	Aval ZD, verses	4			5			3		1	5			5			22		1
	OPE 01883	Aval ZD, verses	4			5			5		1	6			5			25		1
Saulx	OPE 01890	Aval ZD, ZP	6	1		6	1		10	1	1	9	1	1	8	1	1	39	5	3
Saulx	OPE 90011	Amont ZD, RTE	6	1	1	6	1	1	10	1	1	12	3	1	12	3	1	46	9	5
	OPE 90012	Aval ZD, RTE	6	1	1	6	1	1	10	1	1	12	3	1	12	3	1	46	9	5
	OPE 90013	Aval ZD	6	1	1	6	1	1	10	1	1	12	3	1	12	3	1	46	9	5

EAUX : prélèvement d'eau ; SED : prélèvement de sédiments ; BIO : prélèvement des communautés biologiques

Tableau 5-11 Bassin versant de l'Ornain - Fréquence de prélèvement réalisé par Andra (OPE) sur les stations suivies

Cours d'eau	Code	Position /projet global	Nombre de prélèvements réalisés par station																	
			2014			2015			2017			2018			2019			Total		
			EAUX	SED	BIO	EAUX	SED	BIO	EAUX	SED	BIO	EAUX	SED	BIO	EAUX	SED	BIO	EAUX	SED	BIO
Ormançon	OPE 01884	Amont ZP, RTE	4			4			10		1	8		1	7	1	1	33	1	3
	OPE 01885	Aval	4			4			5			6		1	7	1	1	26	1	2
	OPE 01886	Amont 27000	4			4			5		1	4			5			22		1
Richecourt	OPE 01887	Amont 27000	4			4			3		1	3			5			19		1
Canal de la Marne au Rhin	OPE 01888	Aval 27000	5			4					1							9		1
	OPE 01889	Aval 27000	5			4					1							9		1
Ruisseau du Naillemont	OPE 02790	Aval ITE				6			4		1	6	1	1	5	1	1	21	2	3
	OPE 02791	Amont ITE				6			4	1	1	4	1	1	5	1	1	19	3	3
Ruisseau de l'Étang	OPE 02792	Aval ITE				6			5	1	1	5	1	1	6	1	1	22	3	3
	OPE 02793	Amont ITE				6			5		1	5	1	1	6	1	1	22	2	3
Ornain	OPE 90014	Aval 27000	6	1	1	6	1	1	10	1	1	12	1	1	12	3	1	46	7	5
	OPE 90015	Aval ZP, verses	6	1	1	6	1	1	10	1	1	12	3	1	12	3	1	46	9	5
	03099950	Aval 27000																		
	03099490	Aval 27000	13		1	40												43		1

EAUX : prélèvement d'eau ; SED : prélèvement de sédiments ; BIO : prélèvement des communautés biologiques

5.1.3.4.5 Programme analytique pour les paramètres non-conventionnels

En 2007-2008 puis en 2016-2017, des campagnes de mesures ont été réalisées sur les eaux de surface par Subatech.

Comme les méthodes de mesures classiques ne permettent pas d'obtenir des valeurs significatives dans l'eau pour certains paramètres non-conventionnels (la plupart résultats montrent des niveaux inférieurs aux seuils de détection), des bioindicateurs ont été prélevés pour pallier cette limite méthodologique (campagne IRSN 2012-2013). En effet, les bioindicateurs concentrent les polluants (cas de certains végétaux par exemple), ou rendent compte d'un niveau d'activité moyen sur de grandes distances ou de longues périodes (cas des poissons). Les prélèvements et mesures de sédiments permettent aussi de connaître les radionucléides présents dans l'eau qui s'adsorbent et s'accumulent sur ces matériaux.

- **analyse des éléments par spectrométrie gamma**

  Des mesures par spectrométrie gamma ont été réalisées afin de donner une indication qualitative et quantitative des radionucléides émetteurs gamma naturels et artificiels présents dans l'échantillon (^{134}Cs, ^{137}Cs, ^{57}Co, ^{58}Co, ^{60}Co, ^{110m}Ag, ^{54}Mn, ^{124}Sb, ^{125}Sb, ^{154}Eu, ^{106}Rh, ^{241}Am, ^{131}I). Toutes les matrices sont concernées par les analyses par spectrométrie gamma.

  Les éléments transuraniens ^{238}Pu, $^{239+240}$Pu, ^{241}Am sont mesurés par spectrométrie alpha. La radiochimie précédent ces mesures est longue, aussi sont-elles conduites sur un nombre limité d'échantillons, en priorité les sédiments, les bryophytes (piégeage des matières en suspension) et les poissons (matrices sensibles du point de vue de la radioprotection). Les mesures sur les sédiments permettent d'évaluer les niveaux moyens stockés sur le fond des cours d'eau et celles sur les poissons permettent une estimation du transfert à la chaîne trophique. Les rapports ^{238}Pu/$^{239+240}$Pu et ^{241}Am/$^{238+240}$Pu précisent l'origine de ces radionucléides. Le ^{210}Po (élément de filiation de l'^{238}U et descendant direct du ^{210}Pb et du ^{210}Bi) est présent à l'état de traces dans le milieu naturel. Il est mesuré par spectrométrie alpha sur les sédiments, les mousses et les poissons (muscles et viscères).

  Des analyses par spectrométrie de masse à plasma à couplage inductif (ICP MS) ont également été réalisées afin de rendre compte des équilibres ou déséquilibres isotopiques des éléments de filiation au sein des chaînes des éléments radioactifs, en permettant le calcul de rapports de masse ou d'activité (^{234}U/^{238}U, ^{235}U/^{238}U et ^{238}U/^{232}Th) ;

- **analyse du tritium (^{3}H) et du carbone 14 (^{14}C)**

  Dans l'eau, le tritium est présent sous forme libre et sous une forme liée à la matière organique. Le tritium libre, dont les valeurs sont très fluctuantes et peu représentatives du milieu ambiant moyen, n'a été recherché que dans les plantes aquatiques. Le tritium organiquement lié est mesuré par scintillation liquide pour les échantillons biologiques, c'est-à-dire les plantes et les poissons, après combustion et distillation avant scintillation liquide ou en mesurant l'^{3}He (descendant du ^{3}H) par spectrométrie de masse dans le cas des matrices abiotiques, en particulier les sédiments (faible teneur en matière organique).

  Le ^{14}C est mesuré par scintillation liquide pour les plantes et les poissons et par spectromètre de masse par accélérateur (AMS) pour les sédiments.

  Les différentes formes du tritium et de ^{14}C n'ont pas été recherchées dans les mousses aquatiques. En effet, les faibles quantités de matière en suspension en transit dans les cours d'eau de l'aire d'étude n'ont pas permis de quantifier ces éléments radioactifs au sein de cette matrice ;

- **mesure du strontium 90 (^{90}Sr)**

  Le ^{90}Sr, issu des retombées des essais atmosphériques, est détectable dans la plupart des matrices en couplant une radiochimie à un comptage bêta. Il a été recherché dans les sédiments, les phanérogames (plantes supérieures aquatiques) et les muscles des poissons.

5.1.3.5 Recensement des classements des cours d'eau pour les catégories piscicoles et les continuités écologiques

Le classement piscicole des cours est issu du décret n° 58-873 du 16 septembre 1958 modifié (108) déterminant le classement des cours d'eau en deux catégories, et notamment l'article 56 qui concerne le département de la Meuse.

Le référentiel de classement des cours d'eau pour la continuité écologique est l'arrêté préfectoral du 4 décembre 2012 (109) modifié au 7 mai 2017 du Préfet coordinateur de bassin Seine-Normandie qui établit deux listes de classements des cours d'eau sur lesquels tout ouvrage doit être géré.

5.1.3.6 Recensement des usages des eaux superficielles

Dans l'aire d'étude éloignée du milieu physique, le, le recensement des usages des eaux superficielles a été fait sur une base documentaire et/ou par des investigations de terrain pour les usages suivants :

- l'alimentation en eau potable ;

  L'inventaire des usages a été réalisé par l'Andra avec recoupements d'informations et échanges avec l'agence régionale de la santé de la région Grand Est et les directions départementales des territoires des départements concernés ;

- les eaux de baignades ;

  Le recensement des zones de baignades à l'aval des cours d'eau susceptibles d'être impactés par le projet a été réalisé à partir du site[30] ;

- les pisciculture ;
- les biefs industriels (usages pour la plupart obsolètes mais avec des aménagements pérennes) ;
- les autres usages divers ;

  Le recensement des prélèvements d'eau de surface de la BNPE (Banque nationale de prélèvements quantitatifs en eau) a été consulté sur le site[31].

[30] http://baignades.sante.gouv.fr

[31] https://bnpe.eaufrance.fr/

5.2 Évaluation des incidences

L'objectif est d'identifier les Incidences directes et indirectes, temporaires et permanentes, du projet sur la ressource en eau, en termes de quantité, qualité et *in fine* d'usage. Dans le cadre de cette étude, une partie de l'évaluation de ces incidences fait appel à des outils de modélisations afin notamment d'évaluer le comportement futur des unités hydrogéologiques locales (Calcaires du Barrois et Oxfordien) en fonction de différents scénarios climatiques ou d'aménagements du site et de le comparer aux simulations de référence.

5.2.1 Incidences quantitatives sur les écoulements d'eau souterraines et de surface

5.2.1.1 Modélisations des incidences du centre de stockage Cigéo sur les eaux souterraines

Dès 2009, l'Andra a engagé un programme de modélisation hydrogéologique qui a conduit en 2012 au développement d'un modèle intégré région-secteur (couvrant l'ensemble du Bassin parisien) dans l'objectif de fournir des conditions initiales et aux limites robustes pour le développement de modèles hydrogéologiques à des échelles spatiales et temporelles variées (à l'actuel jusqu'au prochain million d'années, à l'échelle du Bassin parisien jusqu'à l'échelle de la zone descenderie).

Parallèlement au programme de modélisation dont les résultats permettent de mettre en lumière les besoins et pistes d'améliorations, sont définies et planifiées des campagnes de reconnaissance de terrain (sismique 3D, sondages, expériences de traçage) visant à disposer de données nouvelles et ciblées. De ce point de vue, l'amélioration des modèles doit être regardée comme le produit d'un processus itératif et interactif entre données de terrain et résultats de simulations numériques.

Parmi ces modèles hydrogéologiques, les modèles des calcaires du Barrois et de l'Oxfordien sont développés afin d'évaluer les incidences quantitatives potentielles et résiduelles des ouvrages de surface et des ouvrages souterrains du projet de centre de stockage Cigéo sur l'environnement.

Compte tenu de l'extrême complexité du sujet qui relève typiquement d'une action de recherche et développement (unique en son genre), ces deux modèles n'étaient pas encore suffisamment matures à l'échéance de certains dossiers réglementaires, en particulier pour la modélisation couplée des écoulements de surface et de subsurface dans l'aquifère des Calcaires du Barrois. Aussi, pour répondre à ce besoin, des modèles de secteur anticipés ont été utilisés pour proposer une approche enveloppe des impacts hydrogéologiques et hydrologiques du projet global Cigéo. Ces modèles développés selon une démarche et avec les outils de l'ingénierie sont au nombre de deux :

- le modèle dit des Calcaires du Barrois développé au moyen du logiciel Feflow ;
- le modèle dit de l'Oxfordien développé au moyen du logiciel Marthe.

Ce découpage découle de considérations hydrogéologiques qui amènent à admettre un découplage hydraulique entre un système aquifère superficiel (les Calcaires du Barrois) et un système aquifère plus profond (les Calcaires de l'Oxfordien) permis par la présence de la série intercalaire très peu perméable des marnes du Kimméridgien.

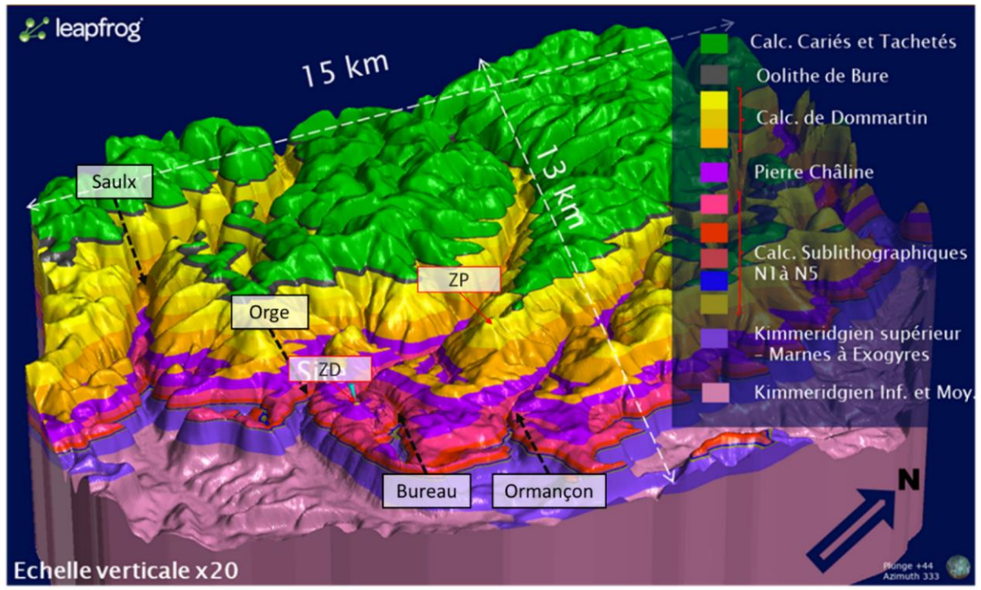
À ce jour, les résultats du modèle initial (modélisation Feflow) des Calcaires du Barrois sont les seuls disponibles et sont donc utilisés pour alimenter le présent dossier. En revanche, les avancées sur le modèle de l'Oxfordien permettent de disposer de résultats nouveaux qui viennent en remplacement des résultats initiaux présentés en 2020 dans l'étude d'impact de la déclaration d'utilité publique.

5.2.1.1.1 Modèle des Calcaires du Barrois

a) Construction et conditionnement du modèle numérique

Ce modèle développé avec le logiciel Feflow regroupe l'ensemble des formations des Calcaires du Barrois, depuis les Calcaires Cariés et Tachetés jusqu'aux Calcaires Sublithographiques. Il a été construit à partir des données géologiques disponibles en intégrant la fracturation qui affecte les unités stratigraphiques à proximité de la surface et augmente notamment la perméabilité des terrains.

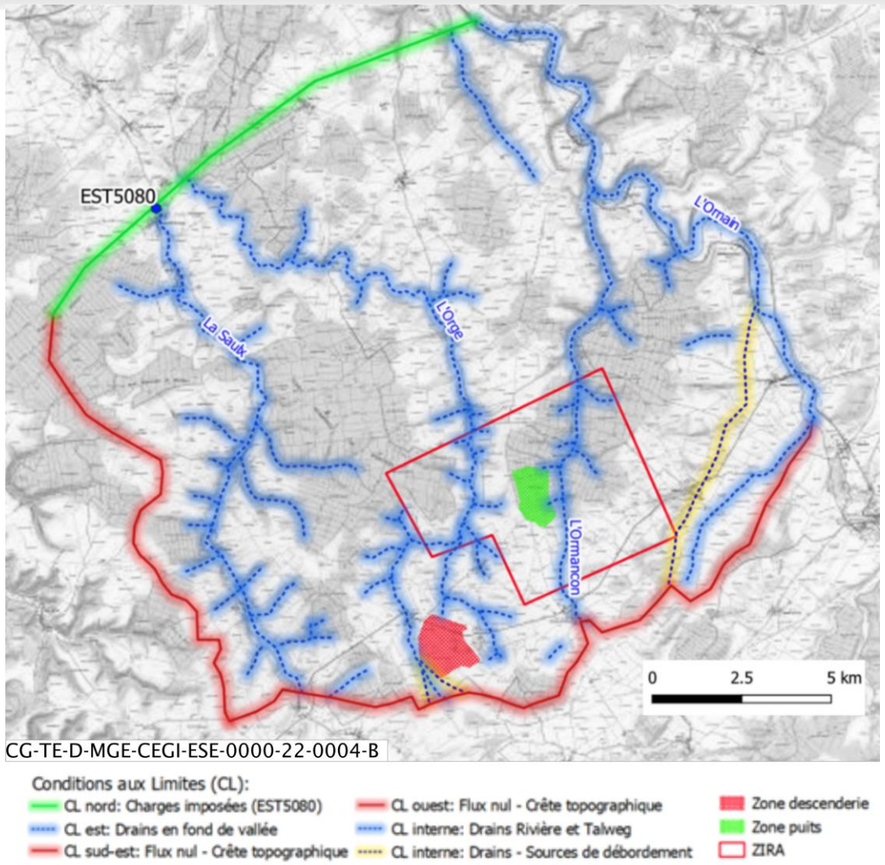
Le domaine représenté s'étend sur une surface de 290 km² et inclut les limites de l'aquifère des Calcaires du Barrois et les bassins versants de la Saulx, de l'Orge, de l'Ormançon et la rive gauche de l'Ornain. La figure 5-8 donne une vue d'ensemble 3D du modèle considéré.



CG-TE-D-MGE-CEGI-ESE-0000-22-0003-A

Figure 5-8 Extension et contenu géologique du modèle 3D

Le modèle est constitué de 30 couches numériques et de 450 000 nœuds. La discrétisation horizontale est fonction de la zone d'intérêt du modèle et la discrétisation verticale varie en moyenne de 2,5 mètres au sein d'une même couche numérique. Des conditions d'écoulement sont appliquées aux limites et à l'intérieur même du modèle (cf. Figure 5-9).



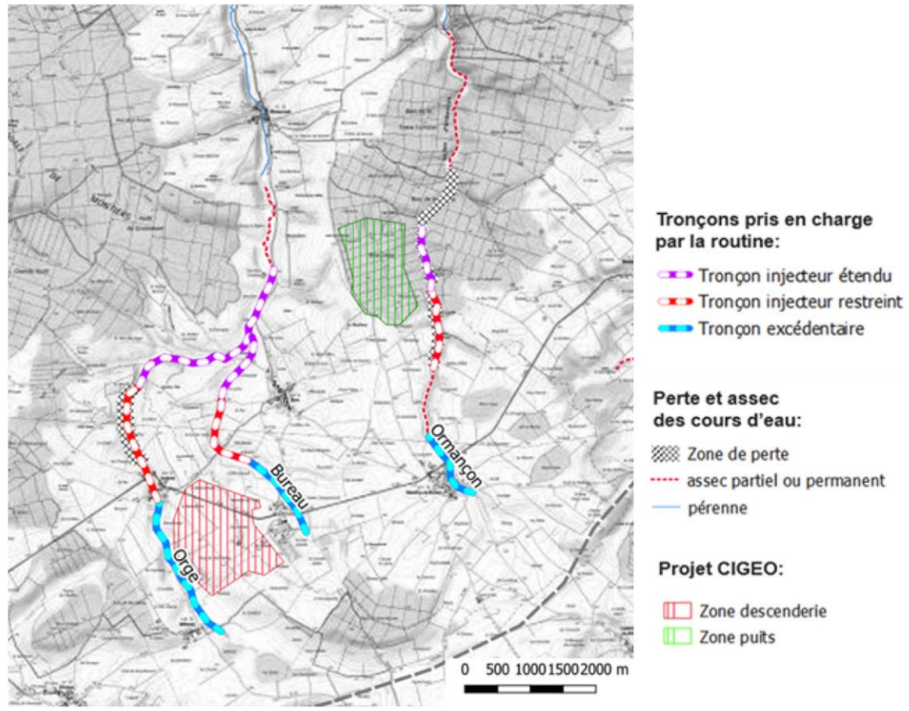
CG-TE-D-MGE-CEGI-ESE-0000-22-0004-B

Figure 5-9 Cartographie des conditions aux limites définies pour le modèle hydrogéologique

Une condition de recharge spatialisée est appliquée sur l'ensemble des surfaces affleurantes. Cette condition permet de prendre en compte l'alimentation du système aquifère par l'infiltration d'une partie des précipitations (pluie nette). La loi de recharge considérée résulte d'un bilan hydrique établi à partir des données de précipitation et d'évapotranspiration potentielle de la station d'Houdelaincourt (55248001). Le cumul annuel moyen des précipitations est d'environ 845 mm pour une recharge annuelle moyenne estimée à 279 mm. En règle générale cette recharge se produit durant la période automne-hiver et le début du printemps, quand les précipitations sont significatives et l'évapotranspiration potentielle faible.

La prise en compte de cet apport par les précipitations ne suffit pas pour autant à expliquer le comportement hydrogéologique des Calcaires du Barrois. Une hypothèse complémentaire a été admise pour tenir compte des apports par les anciens réseaux hydrographiques très fracturés. En effet, les observations montrent qu'en période de basses eaux les niveaux piézométriques sont stabilisés alors que la recharge météorique est inopérante. Il a donc été considéré que ces anciens réseaux sont à l'origine d'apports d'eau différés dans le temps.

Par ailleurs, dans le contexte karstique du Barrois, l'aquifère peut être alimenté localement par des pertes locales ou diffuses des cours d'eau générant, par période, des tronçons en assecs (cf. Figure 5-10). La prise en compte de ces pertes karstiques a nécessité d'intégrer des flux entrants et des flux sortants du modèle et de considérer différents types de tronçons par l'intégration d'une routine de calcul qui permet de collecter i) les flux sortant le long d'un tronçon de rivière prédéfinie en situation hydrologique excédentaire ; ii) d'injecter les flux collectés par l'intermédiaire de débits imposés sur un tronçon injecteur prédéfini.



CG-TE-D-MGE-CEGI-ESE-0000-22-0005-A

Figure 5-10 Tronçons excédentaires et injecteurs contrôlés par la routine de réinjection de flux

Les positions des tronçons excédentaires et injecteurs sont déterminées en cohérence avec la connaissance des zones d'alimentation des cours d'eau par l'aquifère et les zones de perte ou d'assecs temporaires (cf. Figure 5-10). Pour chaque cours d'eau, deux seuils de flux d'exhaure contrôlent le fonctionnement de la routine en réinjectant les flux sur un tronçon restreint ou en injectant les flux sur un tronçon étendu, ou encore en annulant l'injection :

- le premier seuil correspond à un intervalle de flux relatif à une situation d'étiage de la nappe ;
- le second seuil correspond à la situation où les flux sortants ne peuvent plus être réinjectés en aval dans les tronçons injecteurs, la nappe est en crue.

L'intervalle de flux entre ces deux seuils est représentatif des situations hydriques intermédiaires. La perméabilité le long des tronçons injecteurs est modifiée de manière à permettre de réinfiltrer les flux sortants amont.

b) Paramétrage du modèle

Les Calcaires du Barrois ont la particularité de constituer un aquifère fissuré et localement karstique donc très difficile à modéliser. Partant de ce constat, l'approche a consisté à :

- assimiler l'aquifère à un milieu continu de porosité matricielle (défini par un maillage 3D décrivant cette structure poreuse) ;
- ajouter localement à l'ensemble des éléments discrets permettant de représenter des écoulements en conduits (1D : rivières, tunnels, puits et réseau karstiques) ou en fracture plane (2D : surfaces de ruissellement, plans de failles ou de fractures).

L'interaction entre les deux milieux s'opère par l'échange d'un débit entre le milieu matriciel et les fractures du domaine. C'est une approche mixte dite « double porosité/double perméabilité » mêlant circulations en milieu poreux et écoulements en fractures.

Il a été choisi de considérer le modèle comme un aquifère confiné pour reproduire les mises en charges rapides et fortes de l'aquifère. Ce choix a été dicté par les faibles valeurs d'emmagasinement estimées lors des tests de pompage (entre 1.10^{-5} et $5.10\text{-}4$ m^{-1}[1]).

Chaque formation du modèle géologique (cf. Tableau 5-12) est caractérisée par une perméabilité. Ces propriétés hydrodynamiques s'appuient sur des connaissances bibliographiques et de simulations disponibles au moment de la création du modèle (2016-2017), notamment pour la zone de fracture en zone descenderie.

La perméabilité des roches saines est homogène pour chaque horizon lithologique (N1, calcaire de Dommartin, etc.) et un coefficient d'anisotropie des perméabilités (Khorizontal/Kvertical) de 10 est retenu. La zone fracturée constitue le premier paramètre de calage. Elle est représentée par un champ de perméabilités hétérogènes mais considérée isotrope (Khorizontal = Kvertical). Le tableau 5-12 présente une synthèse des perméabilités des formations géologiques à l'issue du calage du modèle.

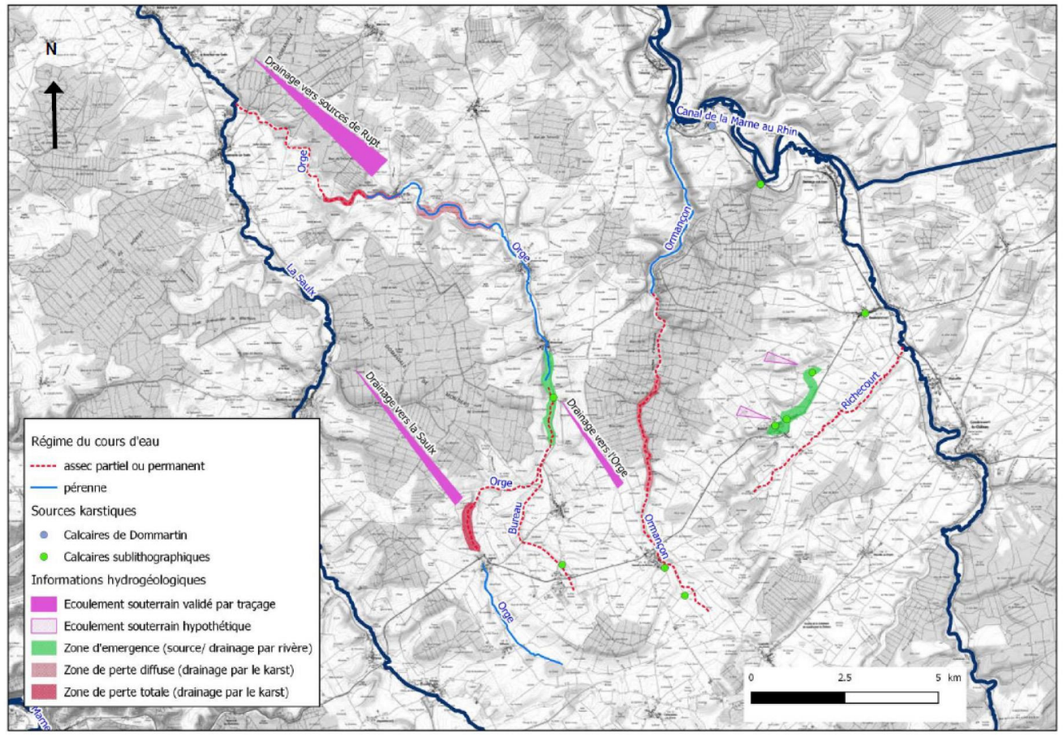
Tableau 5-12 Synthèse des perméabilités des formations géologiques à l'issue du calage

Formation		Perméabilité	
		Kh [m/s]	Kv [m/s]
Calcaires cariés et tachetés		1,00E-07	1,00E-08
Oolithe de Bure		1,00E-09	1,00E-10
Calcaires de Dommartin (Inf., Med., Sup)		5,00E-08	5,00E-09
Pierre Châline		1,00E-09	1,00E-10
Calcaires Sublithographiques	N5	2,00E-07	2,00E-08
	N4	1,00E-08	1,00E-09
	N3	7,00E-08	7,00E-09
	N2	1,00E-08	1,00E-09
	N1	4,00E-08	4,00E-09
Kimméridgien	Marnes à Exogyres	1,00E-10	1,00E-11
	Inférieur et moyen	1,00E-12	1,00E-12
Zones fracturées	Min	3,00E-07	3,00E-07
	Moy	2,00E-04	2,00E-04
	Max	3,00E-03	3,00E-03

Les vallons secs sont représentés par des éléments 1D circulaires de 80 cm de diamètre (0,5 m^2). La loi d'écoulement appliquée est la loi de Darcy avec une perméabilité de $3,27,10^{-3}$ m/s. Les fractures sont ajoutées localement pour améliorer le calage. Elles permettent de simuler des écoulements en fracture ouverte sur joint stratigraphique (2D) ou en zone de diaclases (développement vertical, 3D) et de représenter les spécificités qui caractérisent le fonctionnement des Calcaires du Barrois.

La figure 5-11 représente une synthèse des informations hydrogéologiques des relations de l'Orge et de l'Ormançon avec le karst du Barrois : le caractère karstique des formations du Barrois induit un fonctionnement particulier des eaux de surface avec des :

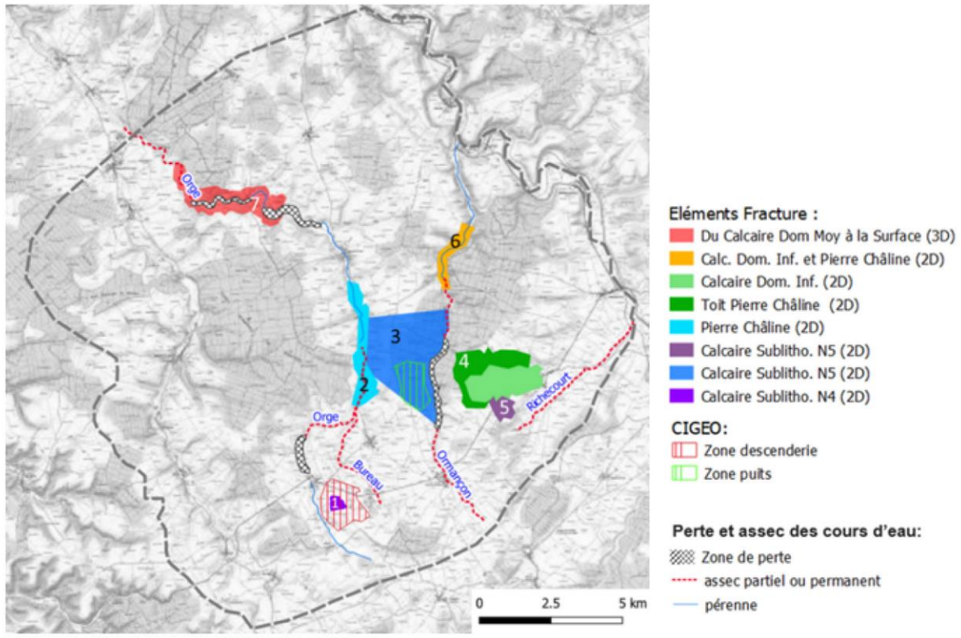
- tronçons de cours d'eau caractérisés par des phénomènes de pertes importantes et des tronçons en assec permanent ou quasi permanent ;
- zones d'émergences plus ou moins pérennes qui contrôlent la fonction de drainage/alimentation des cours d'eau.



CG-TE-D-MGE-CEGI-ESE-0000-22-0006-A

Figure 5-11 Synthèse des informations hydrogéologiques des relations de l'Orge et de l'Ormançon avec le karst du Barrois

Le modèle intègre ces éléments : la figure 5-12 présente la distribution spatiale et lithologique pour chaque fracture. Ces fractures coïncident avec certaines zones d'assec ou de pertes totales affectant les cours d'eau de l'Orge et de l'Ormançon. Chaque élément de fracture (éléments discrets) matérialisé sur la figure est caractérisé par des propriétés hydrauliques (cf. Tableau 5-13).



CG-TE-D-MGE-CEGI-ESE-0000-22-0007-A

Figure 5-12 *Distribution spatiale et lithostratigraphique des éléments discrets de type fracture ouverte sur joint stratigraphique (développement horizontal 2D) ou de type diaclase (développement 3D)*

Tableau 5-13 *Propriétés hydrauliques des éléments discrets simulant l'écoulement en fracture*

Emplacement	Couche affectée	Loi d'écoulement	Épaisseur (m)	Perméabilité (m/s)
Zone descenderie	Calc. Sub. N4	Darcy	0,20	6×10^{-3}
Vallée de l'Orge/proche zone puits	Pierre Châline fracturée	Darcy	0,20	1×10^{-3}
Zone puits/entre l'Orge et Ormançon	Calc. Sub. N5	Darcy	0,20	1×10^{-3}
Rive droite de l'Ormançon	Toit Pierre Châline et Calc. Dom. Inf.	Darcy	0,20	1×10^{-2}
Rive droite de l'Ormançon	Calc. Sub. N5	Darcy	0,3	1×10^{-2}
Vallée de l'Ormançon	Calc. Dom. Inf. et Pierre Châline	Darcy	0,20	1×10^{-1}
Vallée de l'Orge	Calc. Dom. Moy. à Sup.	Manning-Strickler	Rayon = 0,4	K_s= 1 [$m^{1/3}/s$][32]

[32] K_s = coefficient de Strickler selon la formule de la loi écoulement de Manning-Strickler

c) Calage du modèle

La phase de calage permet d'ajuster un jeu prédéterminé de paramètres de manière à reproduire au mieux les données de référence. Le modèle a ainsi été calé en régime transitoire à partir des données journalières disponibles sur une sélection de 30 piézomètres de novembre 2011 à octobre 2018 (sept cycles hydrologiques). À ce jeu de données s'ajoute la prise en compte de contraintes additionnelles que constituent les jaugeages en rivière et les débits des sources :

- la cohérence des transferts eaux de surface/eaux souterraines ainsi que le bilan global du modèle ;
- le respect des assecs en période d'étiage le long des cours d'eau.

Les paramètres de calages sont tout d'abord les perméabilités et l'emmagasinement spécifique. Puis, plusieurs processus d'optimisation sont lancés successivement pour affiner le calage et/ou tester différentes hypothèses concernant :

- la géométrie des fractures ;
- la position des drains ;
- la géométrie des vallons secs (position et cote) ;
- la recharge météorique.

Calcaires sublithographiques

Sur la zone descenderie et la zone puits, le modèle hydrogéologique calé reproduit de manière satisfaisante le comportement des Calcaires sublithographiques :

- en période de hautes eaux, les montées et descentes des niveaux d'eau sont synchrones ;
- les amplitudes du signal piézométrique sont bien reproduites ;
- le caractère très réactif de la piézométrie sous l'effet de la recharge, avec localement des difficultés à reproduire la décroissance lente du niveau de base est marqué.

On retient aussi que localement, le modèle a tendance à surestimer les pics de crue ou, à l'inverse, les sous-estimer. Certains pics ne sont pas simulés du fait de l'absence d'une recharge correspondante en données d'entrée.

Le bilan de masse final (bilan des flux entrants et sortants du modèle) montre que les entrées d'eau du modèle sont assurées, approximativement, pour moitié par la recharge pluviométrique et, pour le reste, par l'injection d'eau au droit des vallons secs. Les sorties d'eau ont lieu principalement au droit des cours d'eau drainants et, en quantité moindre, à travers la limite nord de l'aquifère représentée par un potentiel imposé (10 % du flux total). Le bilan des entrées/sorties du modèle numérique montre une erreur d'1 %.

Calcaires de Dommartin

L'unité aquifère des Calcaires de Dommartin a une extension plus limitée : la limite d'affleurement des Calcaires de Dommartin n'apparaissant qu'à partir de la zone puits. De plus, l'unité aquifère simulée (calcaire de Dommartin) présente une saturation variable sur une frange de 2 km à 5 km à partir de la limite d'affleurement des c

Calcaires de Dommartin :

- à l'étiage les isopièzes inclus dans cette zone représentent davantage des hauteurs piézométriques situées dans la Pierre Châline ou dans les
- Calcaires sublithographiques que les niveaux d'eau dans les Calcaires de Dommartin ;
- en hautes eaux ces niveaux peuvent représenter des niveaux de nappes perchées temporaires.

Il est important de préciser que le nombre de piézomètres avec des chroniques piézométriques exploitables pour le calage est relativement faible. Pour certains de ces piézomètres le calage montre une certaine adéquation entre les niveaux mesurés et simulés notamment en matière de dynamique de crue/décrue, bien que les pics soient surestimés ou sous-estimés (cf. Figure 5-13). Pour d'autres le calage est moins bon.

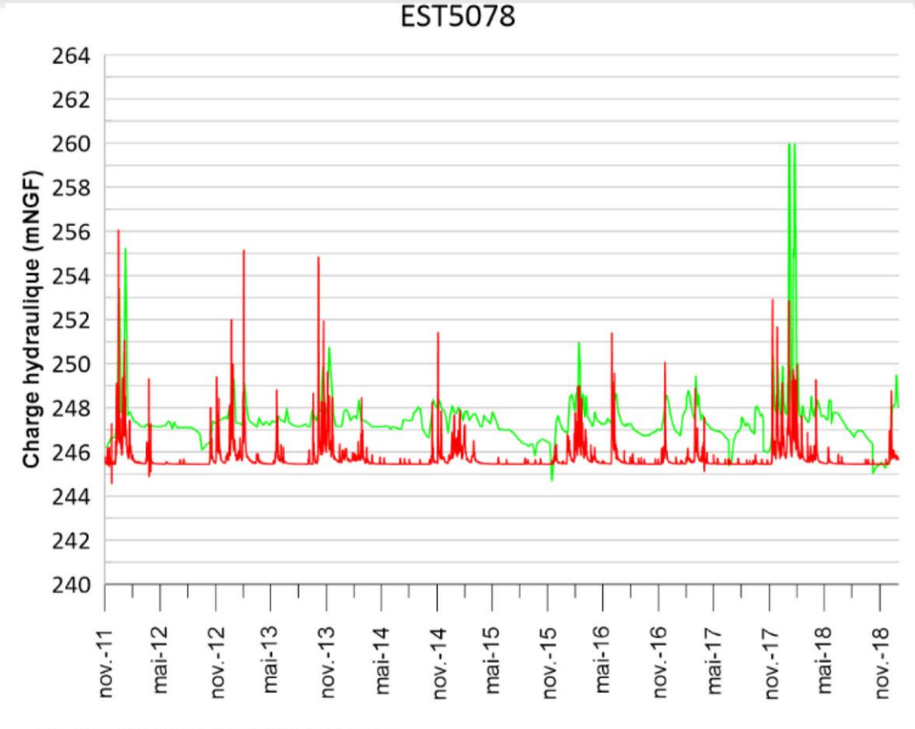


Figure 5-13 *Comparaison des hauteurs d'eau simulées (courbe verte) et des mesures (courbe rouge) - au piézomètre EST5078 localisé au nord-ouest du modèle*

Ce fonctionnement coïncide avec les analyses des chroniques piézométriques menées pour caractériser les réponses piézométriques pour les Calcaires de Dommartin. En effet, sur les dix chroniques analysées, trois grands types de dynamique peuvent être identifiés : on distingue les piézomètres avec un niveau de base, les piézomètres localisés dans l'unité des Calcaires de Dommartin non saturés mais qui répondent aux précipitations (dont certains uniquement durant les hautes eaux) et les piézomètres jamais ou très ponctuellement en eau.

d) Évaluation de l'impact des installations de surface de Cigéo

Objectif et cadrage

L'objectif des simulations est d'évaluer le comportement futur des unités hydrogéologiques locales en fonction de différents scénarios climatiques ou d'aménagements du site et de le comparer aux simulations de référence à travers i) les différences de charges piézométriques qui permettent d'évaluer les rabattements/remontées induits par le projet ; ii) les différences de bilan en eau le long des rivières pour quantifier les incidences du projet sur les échanges nappes/rivières.

Trois types de simulations sont effectués, à savoir :

- deux cycles hydrogéologiques correspondant respectivement à une année « humide » (soit l'année 2013 avec plus de 90 jours de précipitations avec un cumul annuel des précipitations supérieur à 1 000 mm) et à une année sèche (soit l'année 2015 avec plus 70 jours de précipitation avec un cumul annuel des précipitations de 700 mm). L'évolution temporelle et spatiale de l'impact, ainsi que ses effets cumulatifs, sont pris en compte dans l'évaluation ;
- un évènement ponctuel avec l'atteinte d'un niveau caractéristique HE (hautes eaux) et sa décrue complète.

Intégration des installations dans le modèle

Le modèle intègre en zone descenderie et en zone puits, l'ensemble des ouvrages (LSF et bassins) et aménagements (ouvrage de protection contre les remontées de la nappe d'eau souterraine et ses tranchées drainantes et ouvrages de réinfiltration, plateforme du terminal ferroviaire et chemin d'amenée) présents dans le Barrois. En zone descenderie, les ouvrages inscrits dans l'ouvrage de protection contre les remontées de la nappe d'eau souterraine n'ont pas été pris en compte dans la modélisation car ils seront « isolés » de la nappe grâce à cet aménagement.

Recharge météorique et imperméabilisation

Une recharge identique à celle du modèle de référence est appliquée au modèle de simulation du projet. Les zones imperméabilisées correspondant à des voiries, des plateformes et des ouvrages et la surface de l'ouvrage de protection contre les remontées de la nappe d'eau souterraine (ZD) sont caractérisées par des recharges météoriques nulles. Pour les zones terrassées (non compactées, non imperméabilisées), il est considéré une réduction de la recharge de 5 %.

e) Limites du modèle actuel

Limites du modèle actuel

Le modèle hydrogéologique utilisé actuellement et présenté ci-dessus pour le Barrois au droit des sites de surface du centre de stockage Cigéo est basé sur le principe de conceptualisation du milieu poreux continu équivalent. Il n'intègre donc pas explicitement, ou de façon très simplifiée, la nature karstique des aquifères locaux présents notamment dans les Calcaires sublithographiques au droit de la zone descenderie, ainsi que les hétérogénéités spatiales liées aux épikarsts de surface dans la succession d'aquifères plus ou moins indépendants (du fait des échanges entre les eaux de surfaces et les eaux de sub-surface) séparé des couches semi-imperméables plus ou moins continues (en raison de leurs faibles épaisseurs). Le modèle présente donc un caractère enveloppe et général et son utilisation présente donc intrinsèquement, en regard des échelles de description des phénomènes hydrauliques, des limites qui sont développées ci-dessous.

Calage des piézométries disponibles

Comme le montre l'exemple de la figure 5-14, les charges calculées au niveau de certains piézomètres de la zone puits ne reproduisent pas correctement les variations mesurées. Ce manque de représentativité du modèle est possiblement lié à l'approximation faite quant à la représentation du fonctionnement karstique des Calcaires sublithographiques et de Dommartin, représentation qui ne correspond plus à la conceptualisation actuelle développée postérieurement à la construction du modèle.

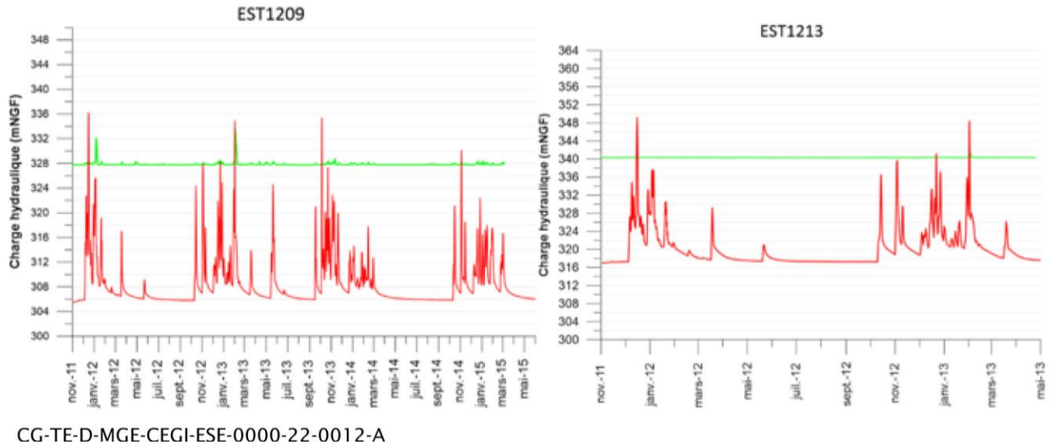


Figure 5-14 *Comparaison des hauteurs d'eau simulées et des mesures - piézomètres localisés au niveau de la zone puits (mesure en rouge, modèle en vert)*

Limites du modèle conceptuel

D'un point de vue général, les éléments à affiner dans les simulations sont :

- les zones remblayées ;
- les rejets de surface des eaux de gestion du site.

Notamment, les rejets des différents types d'eau générés par le projet global Cigéo ainsi que les eaux pluviales et ruissellements de surface (eaux collectées *via* les bassins) restent à conforter dans la modélisation. Leur réinfiltration en aval n'est pas prise en compte dans l'alimentation de la nappe (directe ou indirecte).

De plus, le modèle géologique comporte certaines incertitudes, notamment concernant l'épaisseur de la frange de fracturation. En effet, une frange de fracturation altère les propriétés hydrauliques des différentes unités stratigraphiques à proximité de la surface. La présence de fractures augmente notamment la perméabilité des terrains comme en témoignent les essais Lefranc et Lugeon réalisés à différentes profondeurs sur la zone descenderie. Ainsi, en complément du modèle géo-stratigraphique, l'épaisseur de la zone fracturée est prise en compte dans le modèle afin de différencier les propriétés hydrauliques des roches saines de celles des roches fracturées. En zone descenderie, la profondeur de cette zone a été interpolée à partir des données issues des forages. En dehors de la zone descenderie, cette profondeur est extrapolée en considérant une distance moyenne à la topographie de 10 mètres.

De façon plus précise, sur la zone puits :

- les verses sont intégrées dans le modèle comme une zone à recharge nulle. En effet, il est considéré que les verses ne permettront pas l'infiltration des eaux météoriques (coefficient de ruissellement fort) ;
- l'analyse des effets du projet sur l'unité des Calcaires de Dommartin s'avère limitée car dans cette zone, l'aquifère est principalement en condition non saturée et le modèle est donc peu représentatif. L'analyse se focalise donc sur les Calcaires sublithographiques.

Sur la zone descenderie :

- l'intérieur de l'ouvrage de protection contre les remontées de la nappe d'eau souterraine en zone descenderie n'est pas représenté ;
- la zone de déblais correspondant aux fossés d'amenée vers le terminal ferroviaire nucléaire va drainer des eaux (eaux de suintement). Comme ces eaux sont gérées avec les eaux pluviales, elles sont sorties du modèle, c'est-à-dire qu'elles ne participent pas à la recharge de la nappe. Cependant, ces eaux seront nécessairement rejetées dans le cours d'eau et permettront de réduire les incidences de l'ouvrage de protection contre les remontées de la nappe d'eau souterraine et de ses aménagements connexes sur l'hydrologie du cours d'eau ;
- les volumes d'eaux pluviales rejetés vers l'Orge (à débit régulé) *via* le fossé de diffusion restent à conforter dans la modélisation. Toutefois, les volumes d'eaux pluviales rejetés ne permettront pas uniquement une alimentation de la nappe du Barrois : une partie ruissellera, alimentant ainsi les écoulements superficiels de l'Orge et ne participant pas directement à la recharge de la nappe, et une autre s'infiltrera, alimentant la nappe.

Ainsi, les impacts mis en évidence par la simulation sont conservatifs et seront certainement réduits par les volumes d'eaux pluviales rejetés vers l'Orge *via* le fossé de diffusion (élément non pris en compte dans la modélisation).

Par ailleurs, afin de pallier un écart de représentativité d'un modèle « classique » (milieu poreux) certaines hypothèses ont été prises en compte dans le modèle conceptuel sans qu'aucune mesure ne vienne les conforter. Notamment la prise en compte des anciens réseaux hydrographique et la gestion des débits des cours d'eau entre les zones en eau et les zones d'assecs ainsi que l'hypothèse de nappes captives peuvent être remises en question.

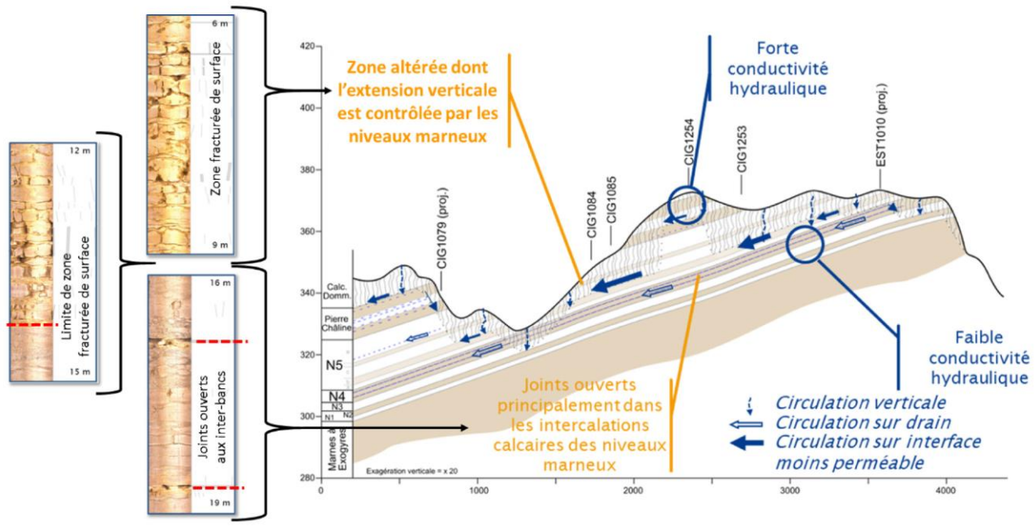
Le modèle actuel doit être vu comme une représentation simplifiée permettant une première évaluation conservative de l'hydrogéologie locale et des incidences des futurs aménagements. De fait, elle tient compte uniquement des données acquises avant la conceptualisation détaillée des zones puits et descenderies (notamment l'ouvrage de protection contre les remontées de la nappe d'eau souterraine) et c'est suite aux premiers résultats de ces simulations qu'un programme dédié visant à améliorer la connaissance hydrogéologique des Calcaires sublithographiques a été engagé. La représentation des karsts étant complexe, l'acquisition de données spécifiques et la modélisation en tenant compte explicitement demande plusieurs années.

Le chapitre suivant décrit :

- la nouvelle conceptualisation des karsts du Barrois en cours de développement à partir des données disponibles ainsi que celles de la nouvelle version du modèle hydrogéologique ;
- le programme de caractérisation/modélisation hydrogéologique qui permettra d'affiner le modèle local et de mieux contraindre le comportement hydrogéologique aux limites du modèle, notamment vers le nord et l'ouest.

f) Développement d'un modèle numérique détaillé des écoulements des Calcaires du Barrois

Le nouveau modèle conceptuel des écoulements des Calcaires sublithographiques au droit de la zone descenderie est schématisé sur la figure 5-15. Ce modèle découle des nombreux forages géotechniques réalisés sur cette zone et limité à la date de l'établissement du modèle) à cette zone. Des forages géotechniques futurs seront réalisés le long des tronçons routiers et ferrés ainsi que sur la zone puits et permettront de conforter cette conceptualisation pour l'étendre à l'ensemble de la zone couverte par les installations de surface du projet global Cigéo. D'autres forages spécifiquement dédiés à une meilleure connaissance du fonctionnement hydrogéologique des Calcaires du Barrois sont prévus sur une plus large étendue.



CG-TE-D-MGE-CEGI-ESE-0000-22-0014-A

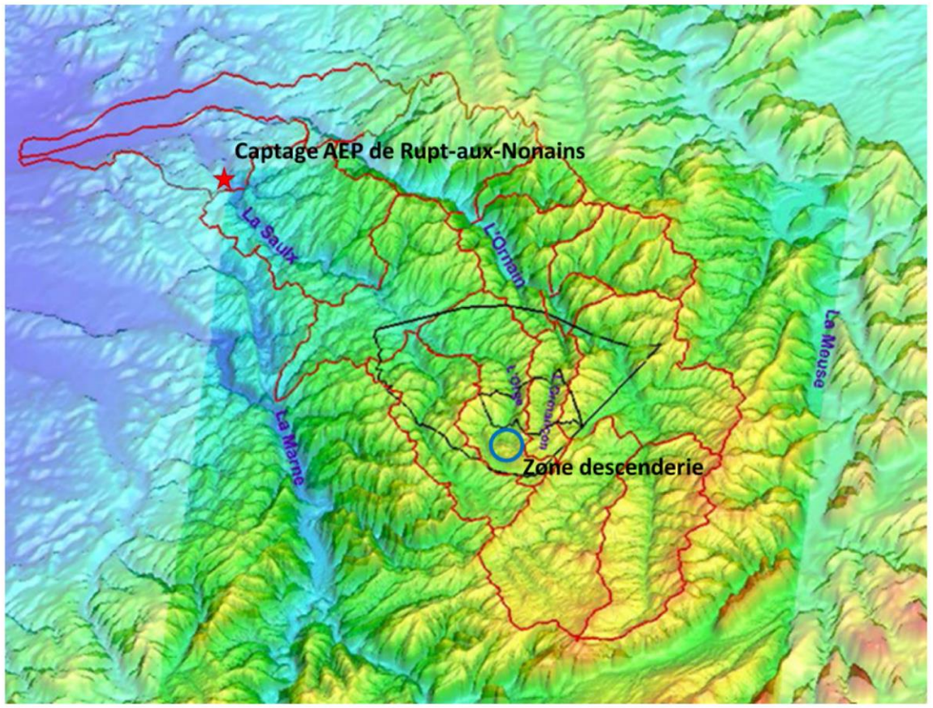
Figure 5-15 Représentation schématique de la nouvelle conceptualisation de l'épikarst des Calcaires sublithographiques au droit de la zone descenderie

Les dernières analyses des mesures piézométriques des forages géotechniques sur la zone descenderie peuvent en effet être interprétées en considérant que les bancs marno-calcaires sont relativement peu perméables et que la plupart des écoulements se produisent aux interbancs avec cependant quelques conduits « karstiques » verticaux à travers ces différents bancs calcaires notamment proches de la surface. Le développement des karsts étant encore préliminaire, ces conduits sont peu développés et doivent être vus comme des macropores (centimétriques à pluri-centimétriques) connectés verticalement plutôt que comme des conduits ouverts de taille métrique.

Par ailleurs, le périmètre de protection éloignée du captage AEP de Rupt-aux-Nonains (situé plusieurs dizaines de kilomètres en aval de du centre de stockage Cigéo sur la Saulx après sa confluence avec l'Orge) intègre la zone descenderie, les limites du modèle sont donc étendues jusqu'à la confluence entre la Saulx et l'Ornain (cf. Figure 5-16).

De plus, les données pluviométriques utilisées par le modèle actuel étant basées sur des chroniques de durées limitées (une dizaine d'années en ordre de grandeur), un travail visant à compléter ces chroniques en intégrant des données régionales est également prévu afin de mieux cerner les pluies de temps de retour centennales nécessaires à l'évaluation de l'impact des installations de surface de la zone descenderie sur les écoulements de surface et de subsurface en aval de ces derniers.

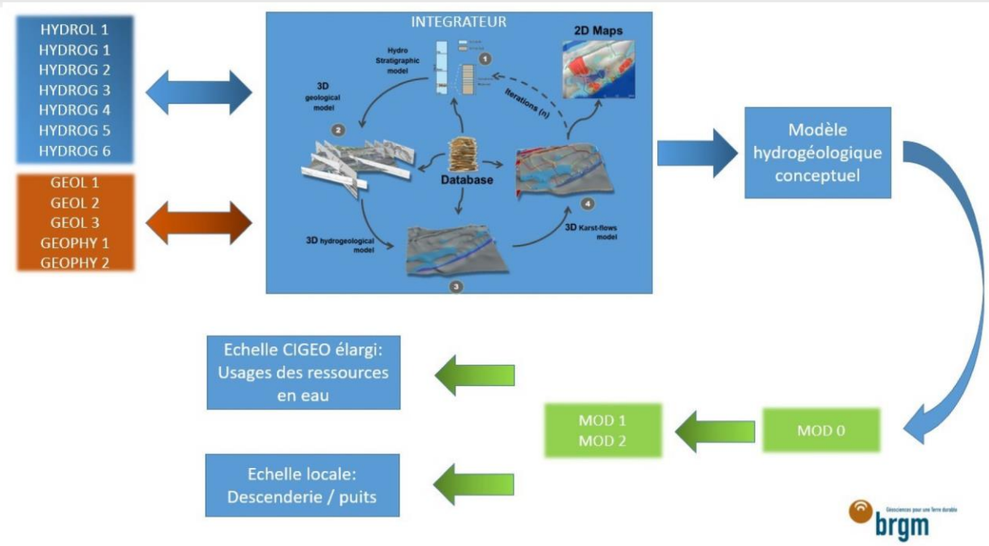
Enfin, les installations de surface seront représentées de façon plus précise notamment en lien avec les eaux pluviales dans les zones puits et descenderies et leur réinfiltration dans le milieu naturel.



CG-TE-D-MGE-CEGI-ESE-0000-22-0015-A

Figure 5-16 *Extension prévisionnelle du nouveau modèle hydrogéologique des Calcaires du Barrois intégrant la totalité des sous-bassins versant de la Saulx et de l'Ornain jusqu'à leur confluence*

Afin de répondre aux dispositions réglementaires et aux objectifs de conceptions du projet global Cigéo, il est prévu de développer un ensemble de modèles et d'outils capables d'apporter des éléments de réponses relatives aux problématiques en lien avec l'hydrosystème superficiel des Calcaires du Barrois. La réalisation de ces outils et modèles s'appuie sur la définition d'un programme de caractérisation et modélisation qui structurera l'ensemble des études prévues (cf. Figure 5-17). À cet effet, l'Andra s'est appuyé sur l'expertise du BRGM concernant la caractérisation et le fonctionnement des milieux karstiques. L'approche méthodologique générale de ce programme est présentée dans la suivante. L'ensemble de la démarche s'appuie sur la méthodologie Karsys développé par l'ISSKA qui permet l'établissement d'un modèle conceptuel explicite 3D de l'aquifère et des circulations souterraines. Cet outil d'intégration permettra de confronter de manière itérative le modèle aux différentes données existantes et à acquérir.



CG-TE-D-MGE-CEGI-ESE-0000-22-0016-A

Figure 5-17 *Structure du programme scientifique proposé par le BRGM et l'Andra*

D'un point de vue pratique il est prévu dans un premier temps de réinterpréter, sous le prisme d'une analyse karstique, l'ensemble des données hydrologiques, hydrogéologique et géologique déjà acquises qui constitueront la première itération de l'analyse Karsys.

En parallèle, et afin de compléter la connaissance du fonctionnement multi-échelle des Calcaires du Barrois, il est prévu de réaliser une campagne de forages de caractérisation à l'échelle de l'aire d'étude éloignée qui permettra notamment :

- de préciser la géométrie de l'aquifère au droit du synclinal de Savonnière ;
- de compléter la représentation des fluctuations piézométriques servant de données de calage des modèles hydrogéologiques numérique ;
- l'acquisition des paramètres hydrodynamiques qui régissent les écoulements dans les milieux souterrains ;
- la caractérisation des différents pôles géochimiques des eaux souterraines pour la définition des échanges surface/souterrains ;
- réaliser des traçages artificiels permettant de vérifier les relations entre pertes et exutoires au sein de l'hydrosystème karstique ;
- mettre en service de nouvelles stations de mesures hydrologiques sur les cours d'eau de l'Orge, de la Bureau et de l'Ormançon ainsi que sur certains exutoires du système karstique ;
- réaliser des mesures géophysiques ponctuelles qui viseront à répondre à des questions de conceptualisation ou à des besoins locaux spécifiques.

Il s'agit de la campagne menée dans le cadre des opérations de caractérisation et de surveillance environnementale.

Les travaux de modélisation ont quant à eux déjà commencé avec le développement d'un code de calcul permettant la représentation explicite du système karstique et des échanges entre les eaux de surface et les eaux souterraines.

Du point de vue planning, le programme prévisionnel d'acquisition des données peut être divisé en deux grandes phases :

- phase 1 : acquisition de données par des moyens non destructifs (absence de forages) ;
- phase 2 : acquisition de données (géologiques, géophysiques et hydrogéologiques) dans les forages de la campagne de caractérisation.

Lors de la phase 1, en l'absence de la nouvelle campagne de forages du programme Barrois, les études suivantes seront réalisées :

- instrumentation des exutoires ; à réaliser dès le démarrage du programme pour disposer de chroniques de données les plus longues possibles ;
- réalisation des bilans hydrologiques sur base des données disponibles ;
- des campagnes piézométriques régulières sont envisagées sur des points non encore suivis à l'échelle régionale ;
- analyse critique et réinterprétation des tests hydrauliques disponibles sur les Calcaires du Barrois ;
- la cartographie des modalités d'infiltration, qui alimentera la modélisation d'un réseau de drains karstiques ;
- analyse critique et nouvelle campagne des traçages artificiels ;
- campagnes de prélèvements pour analyses hydrochimiques ;
- reprise de l'analyse du contexte géologique aux échelles locale et régionale ;
- préparation et modélisation des campagnes géophysiques ;
- démarrage de la modélisation du réseau de drains karstiques.

Ces tâches viseront à mettre à jour régulièrement le modèle conceptuel hydrogéologique à travers l'approche itérative Karsys puis à alimenter les modèles numériques existant.

L'acquisition des données géologiques, hydrogéologiques et géophysiques prévues en lien avec la campagne de forages lors de la phase 2 sera intégrée dans l'approche Karsys pour permettre la mise à jour des modèles numériques existant et le cas échéant la réalisation de modèles numériques complémentaires en fonction des résultats acquis lors de la phase 1.

Ces différentes itérations de conceptualisations seront intégrées dans différents modèles développés à différentes échelles en tant que de besoin pour répondre aux différents enjeux en lien avec la construction et l'exploitation des installations de surface des zones descenderie et puits. Ces intégrations se feront en plusieurs étapes.

5.2.1.1.2 Le modèle intégré région-secteur et le modèle de l'Oxfordien

Deux modèles numériques successifs ont été utilisés pour quantifier l'impact du creusement des ouvrages d'accès au stockage du projet global Cigéo sur l'aquifère de l'Oxfordien. Le premier dans le cadre du dossier de demande de déclaration d'utilité publique (DUP) au moyen du logiciel MARTHE (BRGM) et le second dans le cadre du dossier de demande d'autorisation de création (DAC) au moyen du code de calcul *Ground Water* (GW) développé par le Centre hydrogéologique de Neuchâtel (CHYN).

Le modèle MARTHE a été utilisé au stade de déclaration d'utilité publique pour fournir une première estimation des rabattements de la nappe de l'Oxfordien au droit de la zone des descenderies et de la zone des puits lors de la phase travaux et de la phase exploitation. Le besoin d'utilisation d'un nouveau modèle découle d'un constat quant aux limites conceptuelles, fonctionnelles et numériques du modèle MARTHE mais aussi des particularités du système aquifère mises en évidence par l'approfondissement itératif des connaissances mais aussi des exigences spécifiques du projet global Cigéo.

Le modèle CHYN est un modèle hydrogéologique local (extension spatiale des impacts hydrauliques générés par les LSF) dont les couches numériques, les conditions aux limites et initiales ainsi que les champs de paramètres ont été extraits du modèle intégré région-secteur (Bassin parisien).

Le modèle intégré région-secteur constitue la base du développement du modèle de l'Oxfordien, ses caractéristiques sont présentées dans ce chapitre et celles du modèle de l'Oxfordien (modèle CHYN) sont présentées dans la partie h) de ce chapitre.

Le modèle CHYN vient à présent en remplacement du modèle déclaration d'utilité publique DUP-MARTHE et sert de base à la présente étude d'impact pour la caractérisation des écoulements à l'actuel et sur le prochain million d'années (études de sureté du stockage).

a) Extension et contenu physique du modèle

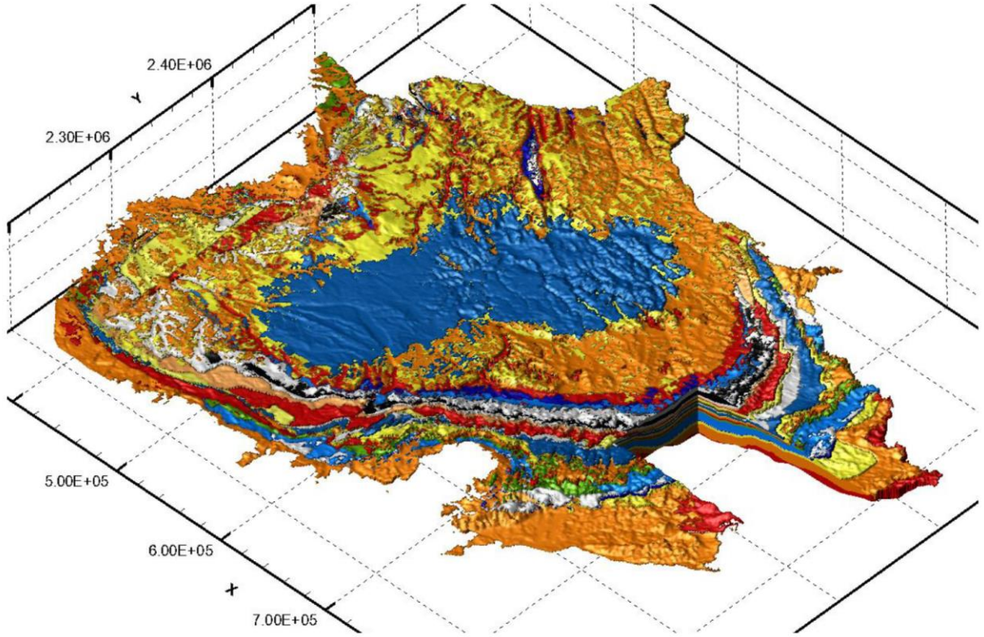
Le modèle hydrogéologique multicouche représente l'ensemble du Bassin parisien afin de disposer de conditions aux limites précises pour le modèle hydrogéologique de secteur. Il intègre l'ensemble des formations géologiques allant du Tertiaire au Trias selon la décomposition résumée dans le tableau 5-14, soit un total de 56 couches numériques en tenant compte de la sous-décomposition verticale. Les codes LS203 et LS104, au niveau de la formation hôte du Callovo-Oxfordien, correspondent à deux niveaux individualisés à partir de considérations hydrogéologiques.

Tableau 5-14 *Série lithostratigraphique prise en compte dans le modèle hydrogéologique intégré région-secteur*

Stratigraphie	Formation	Système aquifère particulier	N° couche	Affinage vertical
Tertiaire	Tertiaire supérieur	-	40	1
	Tertiaire inférieur	-	39	1
Crétacé	Crétacé supérieur	-	38	2
	Crétacé inférieur	-	37	1
	Albien	-	36	1
	Aptien	-	35	1
Jurassique sup. (Malm)	Néocomien/Berriasien	-	34	1
	Calcaires Cariés	Aquifère des Calcaires du Barrois (Portlandien)	33	1
	Oolithe de Bure		32	1
	Calcaires de Dommartin		31	1
	Pierre Châline		30	1
	Calcaires lithographiques		29	1
	Kimméridgien	-	28	2
	Sommet du Séquanien supérieur	Aquifères de l'Oxfordien calcaire	27	2
	Base Séquanien supérieur		26	4
	Séquanien inférieur		25	8
	Rauracien supérieur		24	2
	Rauracien inférieur		23	1
	Argovien supérieur		22	2

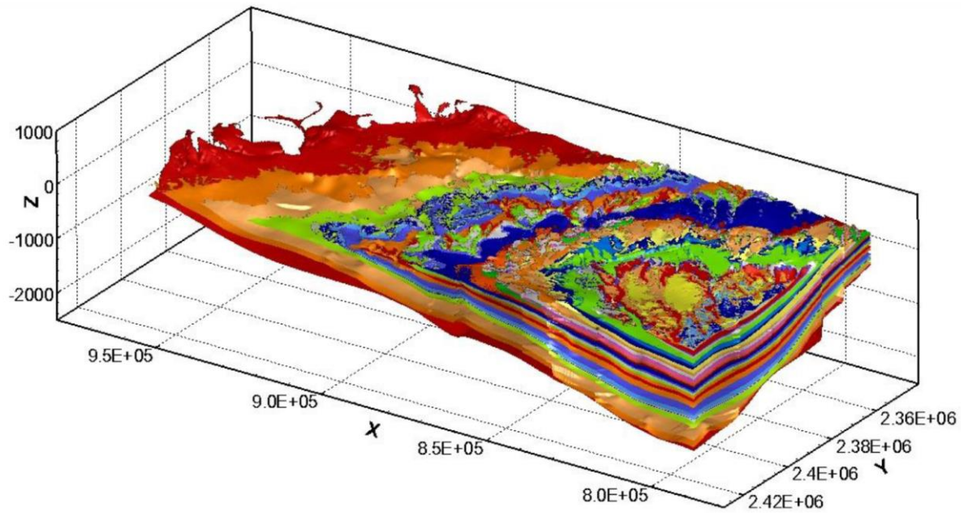
Stratigraphie	Formation	Système aquifère particulier	N° couche	Affinage vertical
	Argovien inférieur	-	21	1
	LS203	-	20	1
Jurassique moyen (Dogger)	Callovien argileux	-	19	1
	LS104	-	18	1
	Dalle nacrée-Callovien calcaire	-	17	1
	Bathonien moyen-supérieur	-	16	1
	Bathonien inférieur	-	15	1
	Marnes de Longwy	-	14	1
	Bajocien supérieur	-	13	1
	Bajocien inférieur	-	12	1
Jurassique inf. (Lias)	Toarcien	-	11	1
	Domérien supérieur	-	10	1
	Domérien moyen	-	9	1
	Domérien supérieur	-	8	1
	Hettangien	-	7	1
Trias	Rhétien	-	6	1
	Norien	-	5	1
	Carnien supérieur	-	4	1
	Carnien inférieur	-	3	2
	Muschelkalk	-	2	1
	Buntsandstein	-	1	1

La figure 5-18 et la figure 5-19 présentent successivement l'extension du modèle régional et du modèle de secteur.



CG-TE-D-MGE-CEGI-ESE-0000-22-0017-A

Figure 5-18 Vue 3D du modèle à l'échelle du Bassin parisien

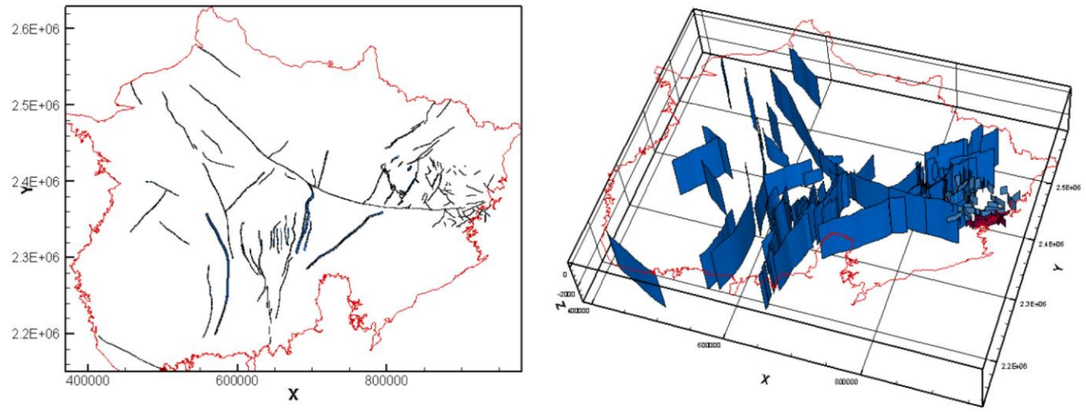


CG-TE-D-MGE-CEGI-ESE-0000-22-0018-A

Figure 5-19 Vue 3D du modèle à l'échelle du secteur étendu

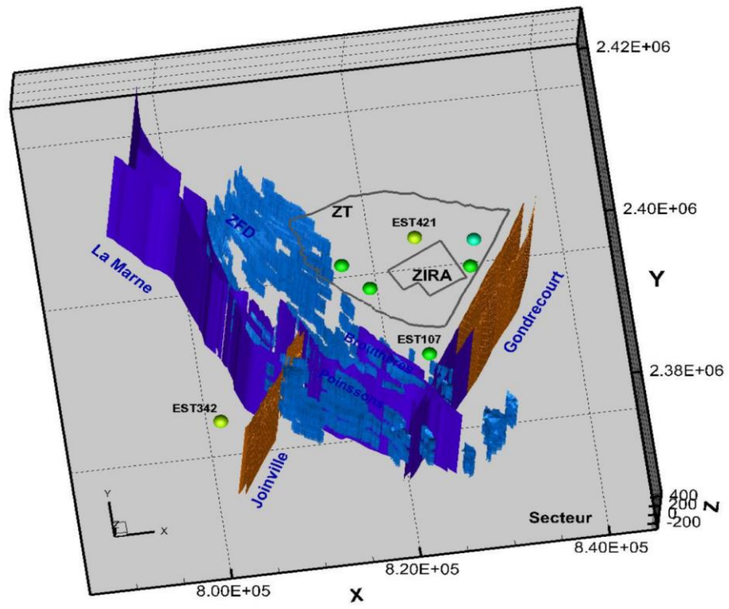
Chaque composante est définie par des couches surfaciques correspondant au toit et au mur (base) de la formation. Ces surfaces ont été construites avec une résolution de 250 mètres à l'échelle du bassin et de 50 mètres à l'échelle du secteur étendu à partir de données topographiques, de forage, de sismique 3D, de relevés structuraux (tracé des failles) et d'expériences de traçage artificiel.

Les failles majeures qui ont notamment un effet sur la géométrie des couches sont prises en compte par l'intégration de cinq surfaces faillées de référence représentant le toit de la couche du Buntsandstein, le toit du Trias, le mur et le toit du Dogger calcaire et le toit de l'Oxfordien calcaire. Ces surfaces de référence ont permis de définir la géométrie de l'ensemble des couches au droit des failles régionales (cf. Figure 5-20). Les failles intégrées dans le modèle de secteur sont au nombre de 73. Leur géométrie est présentée sur la figure 5-21. L'une des étapes clefs de l'étude du rôle de ces failles sur les écoulements à diverses échelles est de leur attribuer une fonction hydraulique en les rendant soit plus transmissives soit plus étanches que la roche encaissante.



CG-TE-D-MGE-CEGI-ESE-0000-22-0019-A

Figure 5-20 *Failles majeures intégrées dans le modèle régional : à gauche, vue en plan ; à droite, vue 3D*



CG-TE-D-MGE-CEGI-ESE-0000-22-0020-A

Figure 5-21 *Failles majeures à l'échelle du secteur de Meuse Haute/Marne. En bleu foncé, les failles transmissives 2D, en orange les failles étanches 3D, et la fracturation mineure en bleu clair*

b) Les unités aquifères

On distingue trois ensembles aquifères à l'échelle du secteur : les Calcaires du Barrois dans la partie supérieure, les Calcaires de l'Oxfordien et les formations du Dogger plus en profondeur (cf. Tableau 5-14). Ces trois systèmes hydrogéologiques sont en grande partie déconnectés à la faveur des niveaux intercalaires très peu perméables du Kimméridgien, séparant les Calcaires du Barrois des Calcaires de l'Oxfordien, et les argilites du Callovo-Oxfordien séparant les Calcaires de l'Oxfordien des formations du Dogger. On s'intéresse ici uniquement aux Calcaires du Barrois et aux Calcaires de l'Oxfordien qui sont les formations aquifères directement concernées par les impacts hydrauliques générés par la construction des installations de surface et les ouvrages d'accès au stockage. Ils ont aussi la particularité d'être le siège de phénomènes karstiques ce qui constitue en soi une difficulté notoire pour l'analyse conceptuelle. Par ailleurs les Calcaires du Barrois ont aussi la particularité d'être en interaction avec le réseau hydrographique de surface, ce qui lui confère une complexité accrue. À ce titre, l'amélioration de la conceptualisation de l'aquifère du Barrois fait l'objet d'un programme d'actions passant par l'acquisition et l'analyse de données nouvelles (programme de caractérisation et de modélisation hydrogéologique des Calcaires du Barrois présenté ci-dessus). Les avancées sur l'Oxfordien calcaire sont par contre suffisantes à ce jour pour exploiter le modèle à des fins de calculs d'impact et de sûreté du projet global Cigéo.

Les chapitres qui suivent font une description synthétique de ces deux unités particulières telles qu'elles sont conceptualisées et représentées dans le modèle intégré région-secteur. Comme précisé plus haut, ce modèle est encore amené à évoluer pour en améliorer la représentativité et la pertinence, en particulier pour l'aquifère des Calcaires du Barrois.

Aquifère des Calcaires du Barrois

La présentation de ce système aquifère est ici volontairement simplifiée puisque le modèle intégré CHYN dans sa partie « Calcaires du Barrois » n'est pas encore abouti et fait encore l'objet de réflexions conceptuelles.

Dans ses grandes lignes, les Calcaires du Barrois intègrent trois aquifères karstiques : les Calcaires Cariés, les Calcaires de Dommartin et les Calcaires Lithographiques (cf. Figure 5-22). Ces aquifères sont séparés par les niveaux intercalaires semi-perméables de l'Oolithe de Bure et de la Pierre Châline.

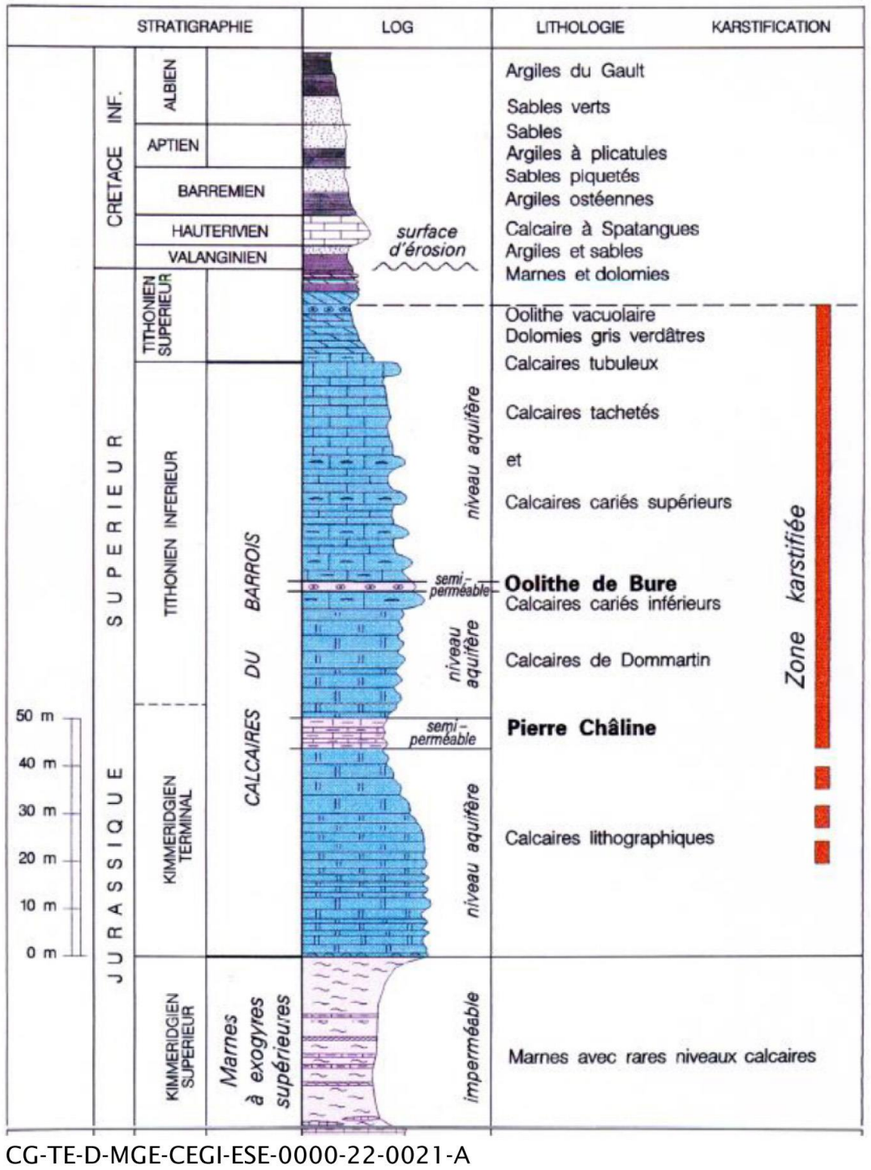


Figure 5-22 *Organisation lithostratigraphique des Calcaires du Barrois indiquant les niveaux karstifiés et semi-perméables*

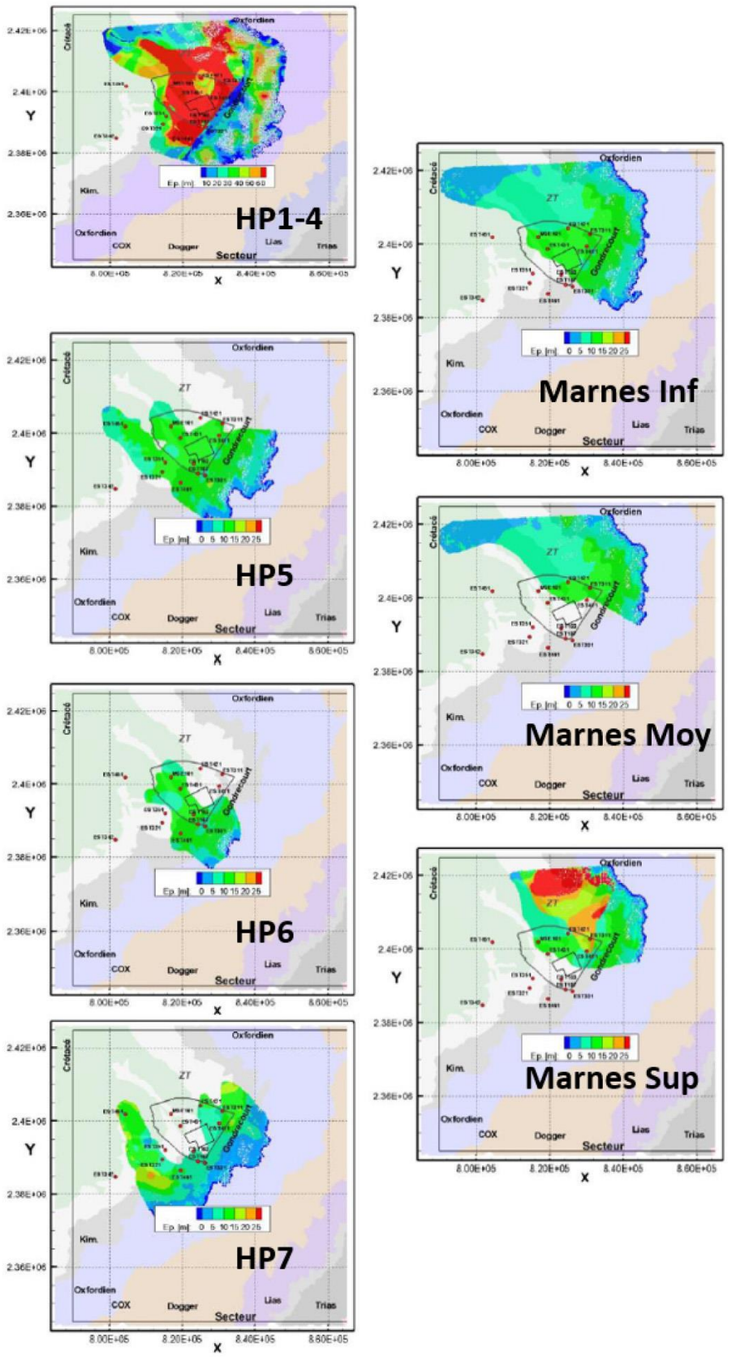
Le modèle actuel distingue 16 surfaces, depuis la surface topographique jusqu'à la base des Calcaires lithographiques.

La structure des réseaux karstiques des Calcaires du Barrois intégré au modèle résulte d'une approche stochastique (aléatoire) basée sur les processus physico-chimiques couplés de karstification. Trois réseaux karstiques sont distingués : un réseau inférieur, un réseau moyen et un réseau supérieur, correspondant respectivement aux réseaux de karsts des Calcaires sublithographiques, des Calcaires de Dommartin et des Calcaires Cariés.

Aquifère de l'Oxfordien

L'aquifère de l'encaissant Oxfordien comporte quatre horizons poreux (HP1-4, HP5, HP6 et HP7), définis comme des zones au sein desquelles la porosité des roches calcaires est supérieure à 13 %, intercalés avec trois couches marneuses peu perméables de la série grise. Ces horizons poreux ont été repérés lors des campagnes de reconnaissance géologique des couches encaissantes du Callovo-Oxfordien par d'importantes venues d'eaux souterraines. La géométrie de ces couches a été définie à partir de données sismiques 3D. Une représentation en est donnée sur la figure 5-23.

L'aquifère Oxfordien comporte ainsi deux nappes distinctes au nord-est du secteur. Ces deux nappes sont représentées par les horizons poreux 1-4 (nappe inférieure) et les horizons poreux 5, 6 et 7 (nappe supérieure) et sont hydrauliquement séparées par la couche des marnes inférieures. Ces deux nappes sont confondues sur le reste du secteur du fait de l'absence des formations marneuses.



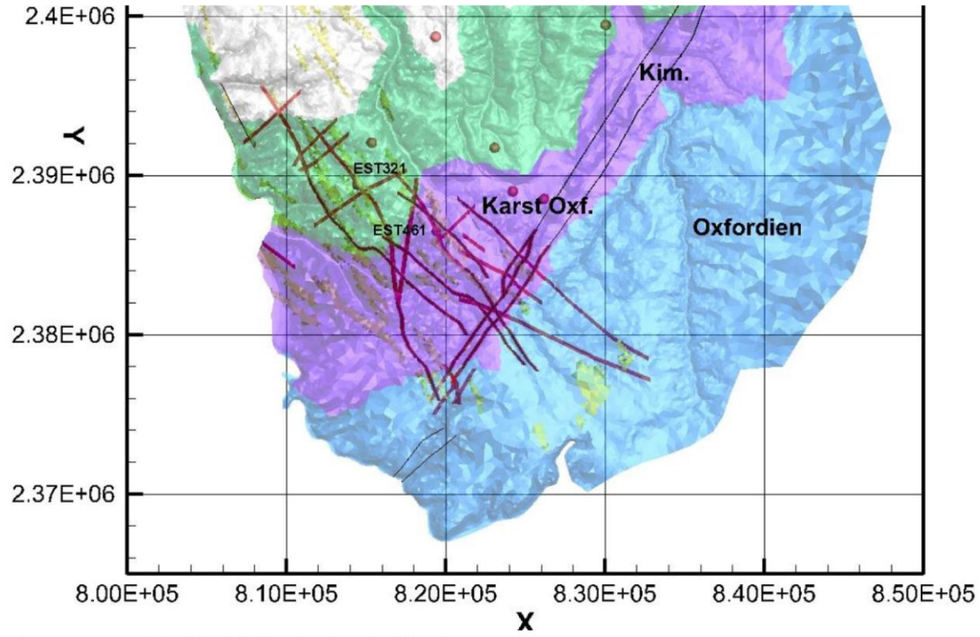
CG-TE-D-MGE-CEGI-ESE-0000-22-0022-A

Figure 5-23 *Extension et épaisseur des horizons poreux et des niveaux intercalaires de la Série grise de l'Oxfordien calcaire à l'échelle du secteur*

La structure du système hydrogéologique de l'Oxfordien calcaire est caractérisée par une forte hétérogénéité spatiale liée à la présence de failles majeures, de fractures diffuses, et de réseaux karstiques fortement perméables contenus dans une matrice calcaire peu perméable. Cette hétérogénéité spatiale influence fortement le fonctionnement hydrodynamique de la formation.

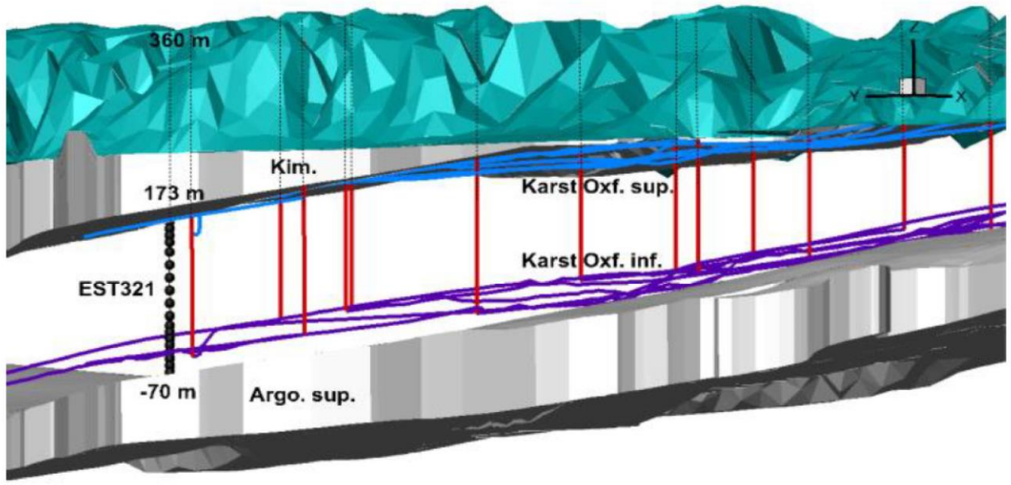
Le concept du karst oxfordien considère uniquement les conduits principaux. La construction du réseau karstique s'est essentiellement basée sur une analyse de géologie structurale au sud-ouest du secteur et dans la zone de fracturation diffuse au sud de la vallée de la Saulx. En outre, la géométrie du réseau karstique oxfordien a été contrainte par les données d'essai de traçage artificiel ainsi que par le modèle conceptuel développé par l'Andra.

L'extension latérale du réseau karstique Oxfordien est en accord avec l'extension des failles majeures et de la fracturation diffuse. La figure 5-24 et la figure 5-25 illustrent successivement la géométrie des réseaux karstiques oxfordiens et le principe de représentation qui distingue un karst supérieur et un karst inférieur connectés par des éléments verticaux (puits karstiques).



CG-TE-D-MGE-CEGI-ESE-0000-22-0023-A

Figure 5-24 *Vue en plan des réseaux karstiques oxfordiens à l'échelle du secteur*



CG-TE-D-MGE-CEGI-ESE-0000-22-0024-A

Figure 5-25 Les réseaux karstiques oxfordiens

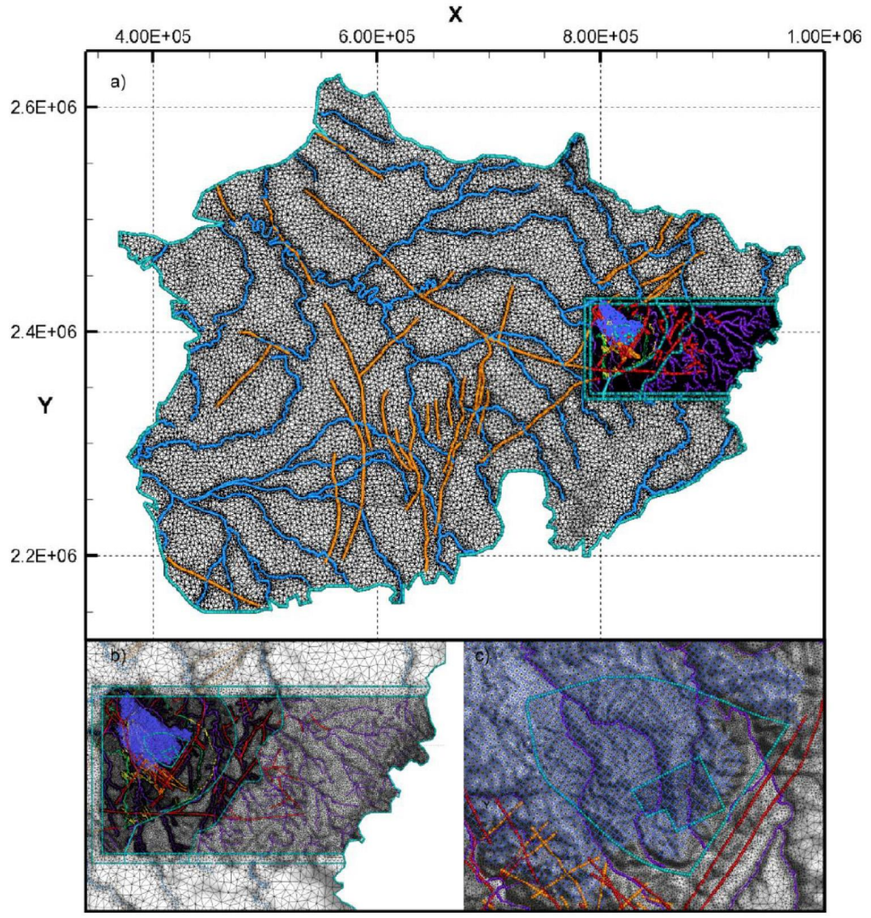
Le réseau karstique inférieur en bleu foncé, le réseau supérieur en bleu clair, et en rouge les puits karstiques verticaux.

c) Maillage du modèle numérique

Maillage régional

Le maillage du modèle région-secteur résulte d'un processus phasé. Dans une première étape une discrétisation en éléments finis 2D plan a été générée à partir de l'ensemble de données géoréférencées sous forme de polygones, de lignes ou de points préalablement préparées dans un système d'information géographique (SIG). Le maillage intègre le tracé des cours d'eau et des failles (majeures et secondaires), le tracé des réseaux karstiques, les contours du secteur étendu, de la zone de transposition (ZT) et de la zone d'intérêt et de reconnaissance approfondie (ZIRA), la localisation des forages de la zone de transposition ainsi que des puits d'accès au Laboratoire souterrain. Il contient également les contours de sous-domaines qui serviront à l'élaboration de modèles de secteurs.

Le maillage 2D est composé uniquement d'éléments triangulaires et comporte un total 241 223 éléments pour 121 055 nœuds (cf. Figure 5-26) dont 183 782 éléments et 92 310 nœuds (77 %) forment le maillage du secteur avec une résolution encore plus fine autour de la zone de transposition.



CG-TE-D-MGE-CEGI-ESE-0000-22-0025-A

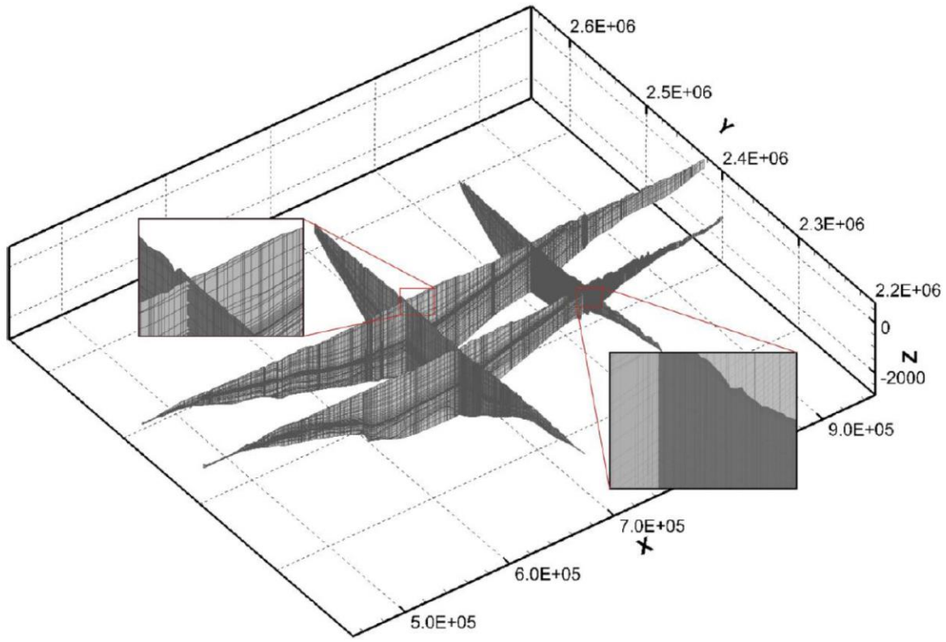
Figure 5-26 Maillage régional 2D plan, avec raffinement le long des cours d'eau, le long des failles et dans le secteur b) et c)

Le réseau hydrographique est figuré en bleu, le karst en points bleus, les failles majeures en rouge, les failles secondaires en jaunes, les puits et forages Andra en points rouges.

Dans un second temps le maillage 3D a été généré par un processus d'extension verticale du maillage 2D en injectant les surfaces géologiques structurales correspondant à la décomposition définie dans le tableau 5-14. Le maillage 3D contient au final 34 unités structurales discrétisées en 56 couches numériques.

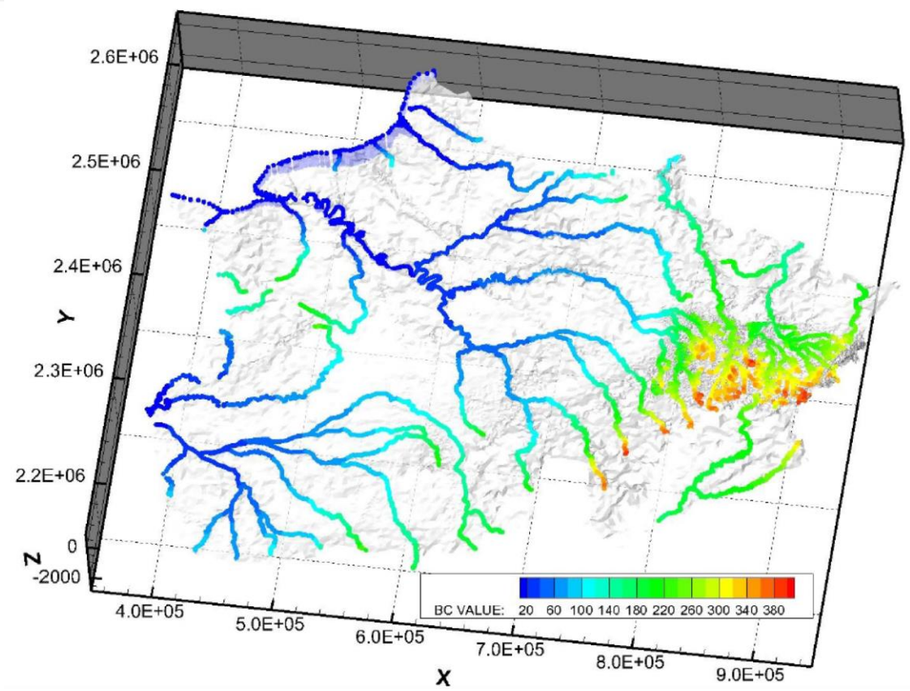
Le modèle final région-secteur contient un total de 4 274 350 nœuds pour 8 643 090 éléments.

La figure 5-27 présente des exemples de coupes verticales du maillage 3D à l'échelle régionale.



CG-TE-D-MGE-CEGI-ESE-0000-22-0026-A

Figure 5-27 *Coupes transversales montrant le raffinement du maillage vertical à l'échelle du secteur*



CG-TE-D-MGE-CEGI-ESE-0000-22-0027-A

Figure 5-28 *Réseau hydrographique : charges hydrauliques imposées au niveau des rivières*

d) Conditions aux limites

Tout modèle numérique, quel qu'en soit le domaine d'application, impose de travailler sur des objets de dimensions finies et de définir les conditions qui s'appliquent aux frontières du domaine représenté. S'agissant ici d'un modèle hydrogéologique ces conditions aux limites peuvent être de nature différente : charge imposée, flux nul, conditions mixtes…. Le choix du type de condition repose sur des considérations géologiques, hydrologiques et hydrogéologiques.

L'un des intérêts du modèle intégré région-secteur est justement de considérer une grande échelle d'espace, celle du Bassin parisien, qui permet de se rattacher à des conditions aux limites naturelles mais aussi de disposer de conditions précises et robustes pour le modèle hydrogéologique de secteur.

Ces conditions aux limites sont les suivantes :

- charges constantes imposées sur le tracé du réseau hydrographique à l'altitude correspondante (H = z). Le réseau hydrographique utilisé intègre la majorité du réseau principal sur la région mais avec un plus grand raffinement sur le secteur étendu ;
- charges constantes imposées sur la limite nord-ouest du modèle pour représenter la Manche (charge hydrostatique de référence Hs = 0) ;
- flux nul le reste des limites extérieures du modèle.

La figure 5-28 montre les charges constantes qui ont été imposées sur le tracé du réseau hydrographique.

Par ailleurs et bien que ne constituant pas à proprement parler une condition aux limites, des conditions de débit à hauteur de 50 000 m^3/jour sont prises en compte pour représenter les pompages dans l'aquifère de l'Albien en région parisienne.

e) Recharge par la pluie efficace

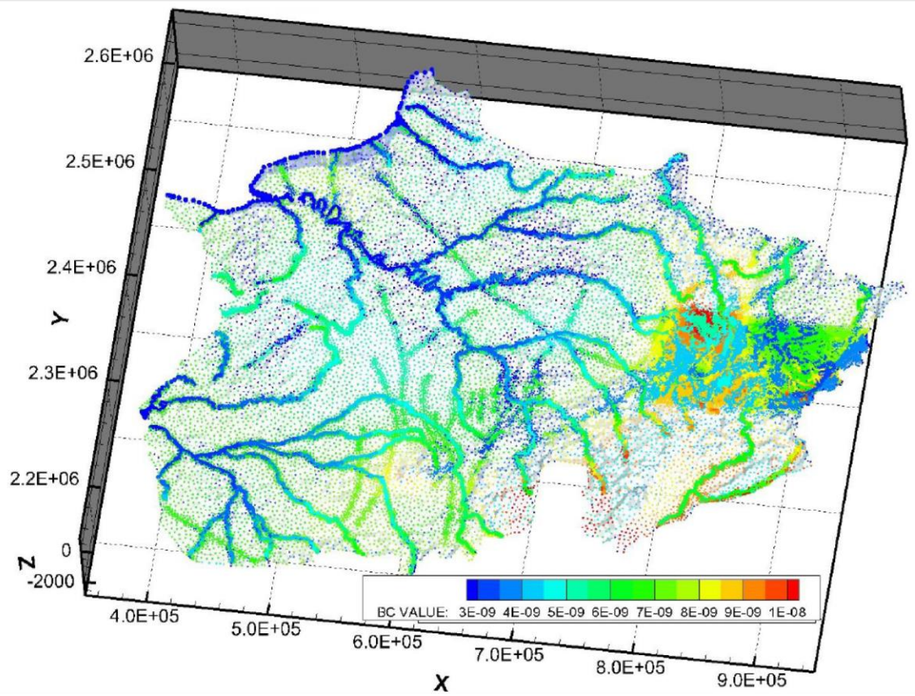
L'infiltration de la pluie efficace constitue l'un des principaux termes d'alimentation des systèmes aquifères. Cette recharge naturelle peut être regardée comme une condition de surface.

Sa distribution spatiale à l'échelle régionale a été évaluée au moyen de deux méthodes combinées :

- évaluation de l'infiltration par calcul des bilans hydrologiques à l'échelle des bassins versants ;
- élaboration d'un modèle numérique d'écoulement calibré en régime permanent.

Pour mémoire la dimension de ce flux correspond à des m^3 (d'eau) par m^2 (de surface) et par an, soit à des m/an ou de manière plus générale à une longueur par unité de temps (en l'occurrence des m/s pour le modèle).

À l'échelle du Bassin parisien, la recharge varie de 10 % à 33 % des pluies annuelles moyennes, avec une moyenne de 190 mm/an soit 24 % de la pluie annuelle (792 mm/an en moyenne pour l'ensemble du bassin de Paris). La figure 5-29 montre la distribution des flux imposés à la surface du modèle pour matérialiser cette recharge.



CG-TE-D-MGE-CEGI-ESE-0000-22-0028-A

Figure 5-29 Recharge [m/s] imposés sur les nœuds de surface du modèle intégré

f) Paramétrage du modèle

Cette étape de modélisation consiste à affecter des propriétés hydrodynamiques aux objets 1D, 2D et 3D constitutifs du modèle. Ces paramètres sont au nombre de deux : la conductivité hydraulique (ou perméabilité) et la porosité totale.

À l'échelle du bassin et du secteur étendu

La paramétrisation initiale du système multicouche découle de la lithologie des formations et des données disponibles (y compris des tests hydrauliques *in situ* ou de mesures sur carottes) caractérisant les unités géologiques à différentes échelles. Elle est issue des études et travaux réalisés par l'Andra dans le cadre du développement du modèle initial de 2012.

À l'échelle du secteur étendu, la distribution des conductivités hydrauliques est marquée par un fort contraste avec des valeurs allant de 10^{-14} à 10^{-4} m/s. L'encaissant supérieur Oxfordien est caractérisé par des conductivités hydrauliques comprises entre 10^{-12} et 10^{-6} m/s et des porosités entre 5 % et 25 %. Pour le Dogger, encaissant inférieur, ces paramètres varient de 10^{-11} à 10^{-5} m/s pour la conductivité hydraulique, et de 12 % à 22 % pour la porosité. La couche Callovo-Oxfordienne est caractérisée par des valeurs de conductivité hydraulique comprises entre 10^{-14} et 10^{-12} m/s et des valeurs de porosité totale allant de 10 % à 14 %.

La très forte variabilité des conductivités hydrauliques dans les deux aquifères calcaires souligne la nature discontinue de ces milieux.

Ces paramètres ont été utilisés par la suite comme données d'entrée pour le calage modèle.

Les failles majeures

Les conductivités hydrauliques des failles sont attribuées aux éléments du maillage sous forme de tenseur pouvant être anisotrope dans les trois dimensions d'espace. La paramétrisation des failles se fait en affectant une transmissivité correspondant au produit de la conductivité hydraulique et de l'épaisseur de l'élément.

g) Calibration du modèle en régime permanent

Dans son principe, la phase de calibration (ou calage) consiste à ajuster les paramètres « *a priori* » du modèle de sorte à reproduire au mieux des observations piézométriques de référence qui proviennent ou découlent de mesures de terrain. Son objectif final est de s'assurer de la représentativité et de la robustesse du modèle dans la perspective de son utilisation pour simuler des situations projetées en vérifiant sa capacité à rendre compte de situations réelles.

Ce calage est le résultat d'un processus itératif basé sur une approche essai-erreur assistée par des outils de calibration automatique par méthode inverse (logiciel PEST en l'occurrence). À cet effet et comme précisé plus haut, le logiciel GW est conçu pour s'interfacer avec PEST.

Pour ce modèle intégré région-secteur la calibration a porté sur un état d'écoulement en régime permanent.

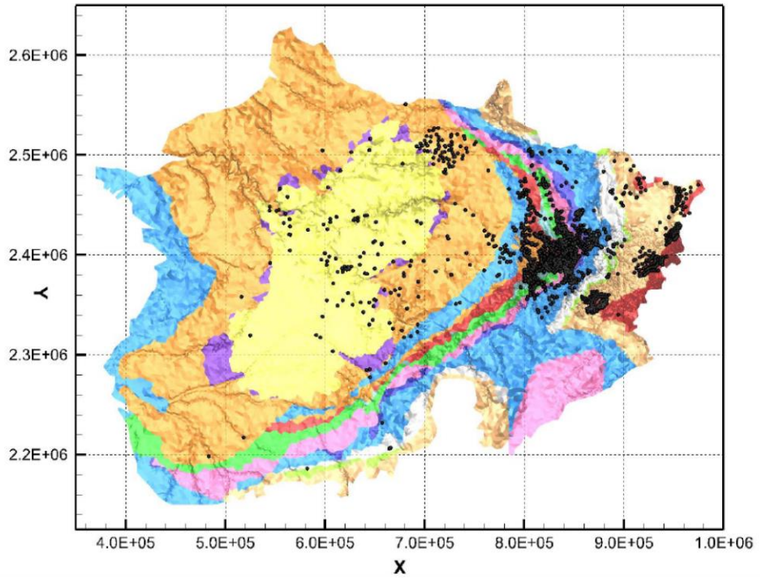
Données de calage

Les données utilisées proviennent de deux sources principales :

- base de données du BRGM ;
- campagnes de mesures Andra.

Les données ont été compilées et géoréférencées puis contrôlées pour détecter les éventuelles anomalies et supprimer les valeurs manifestement aberrantes.

La base de données finale regroupe un total 1 250 points couvrant l'ensemble du bassin de Paris avec une densité accrue dans le périmètre du secteur avec plus de 500 points de profondeur supérieure à 25 mètres (cf. Figure 5-30).



CG-TE-D-MGE-CEGI-ESE-0000-22-0029-A

Figure 5-30 Répartition des points de mesures piézométriques à l'échelle du bassin. Le fond de carte correspond à la géologie de surface simplifiée

Ce jeu de données a par ailleurs été complété par un ensemble de points issus de la digitalisation de cartes piézométriques de plusieurs aquifères tels que l'Albien, l'Oxfordien et le Dogger.

Stratégie de calage

Le calage du modèle d'écoulement s'est déroulé en deux étapes :

- la première a porté sur le calage des écoulements à l'échelle régionale et notamment les aquifères de surface ;
- la seconde sur un calage plus fin à l'échelle du secteur.

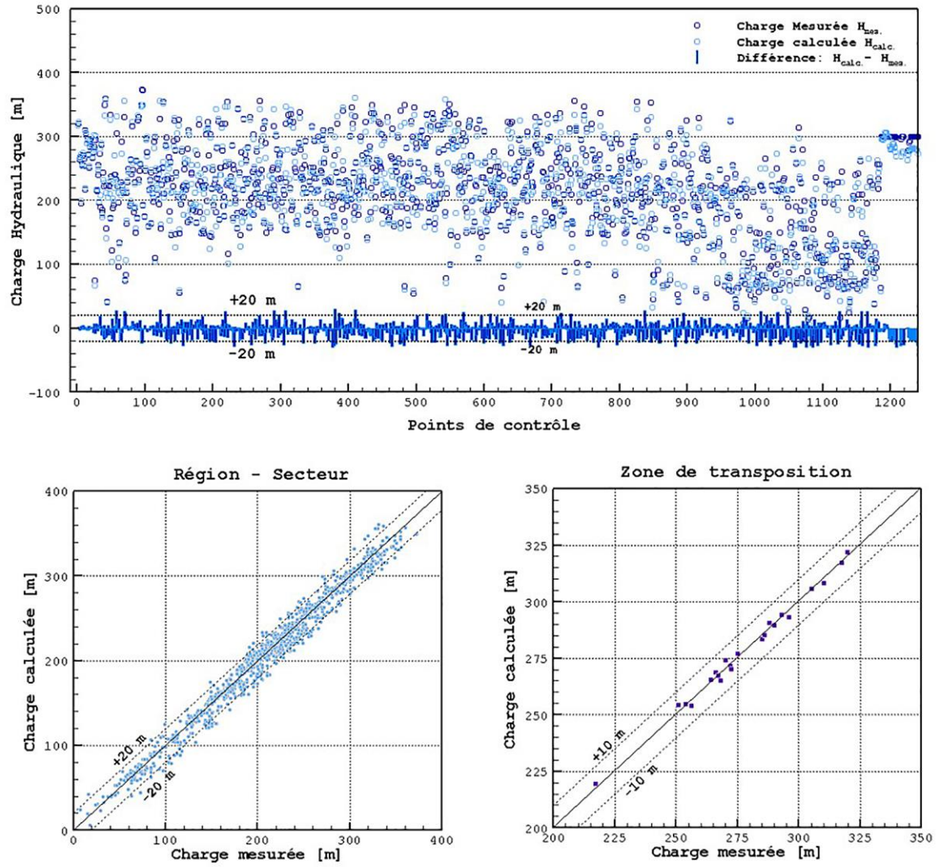
Les résultats obtenus au terme de ce calage découlent d'un processus itératif complexe qui a nécessité de réviser certaines hypothèses de base ou d'intégrer de nouvelles hypothèses notamment sur le rôle hydraulique des failles majeures, la prise en compte de la fracturation diffuse, l'activation des réseaux karstiques, les conditions aux limites, l'anisotropie des conductivités hydrauliques ou encore la décomposition du multicouche. Une grande partie de ces résultats de calage sont d'ailleurs pris en compte dans les chapitres qui décrivent le modèle région-secteur.

Le calage s'est largement appuyé sur l'approche automatique inverse mais en imposant un ensemble de contraintes pour garantir la cohérence et la représentativité des paramètres obtenus. Le calage à l'échelle du secteur s'est organisé en quatre étapes successives avec :

- le calage des horizons poreux et des couches des marnes de la série grise constitutives de l'aquifère de l'Oxfordien calcaire ;
- le calage des unités lithostratigraphiques par zone et plus particulièrement des encaissants du Dogger et de l'Oxfordien ;
- l'ajustement des anisotropies et la mise en cohérence de l'ensemble des paramètres ;
- la prise en compte d'hétérogénéité locale dans l'encaissant de l'Oxfordien (réseau karstique).

Calage à l'échelle régionale

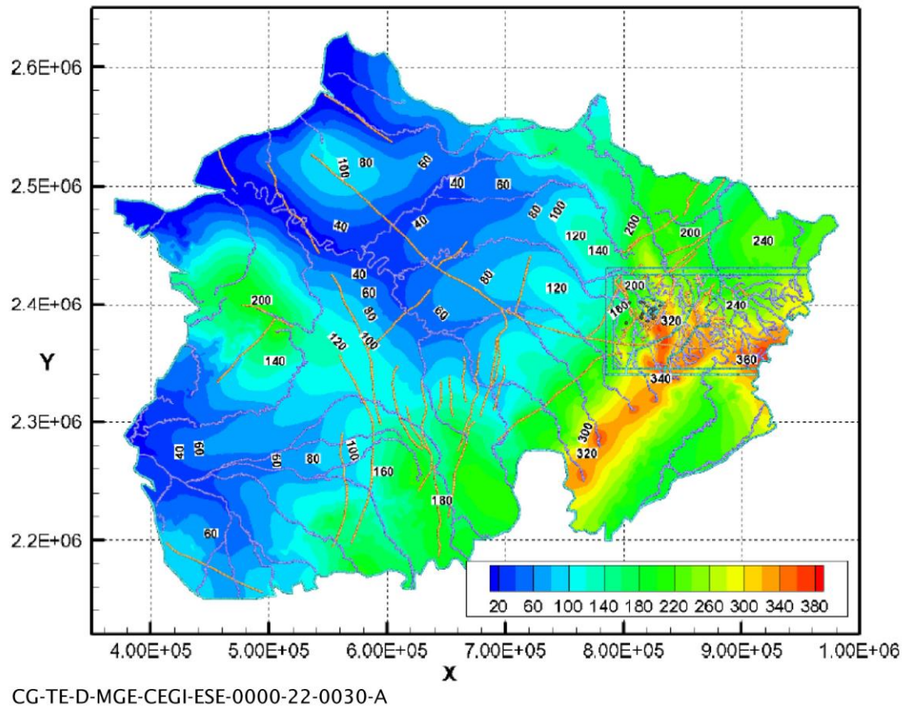
La figure 5-31 donne un aperçu des résultats de calage à l'échelle régionale sous forme de diagrammes de résidus et de validation croisée (charge observée *vs* charge simulée).



CG-TE-D-MGE-AMOA-DRD-0000-21-0628-A

Figure 5-31 *Diagrammes de calibration pour le domaine intégré région/secteur avec 1250 mesures directes de charge hydraulique*

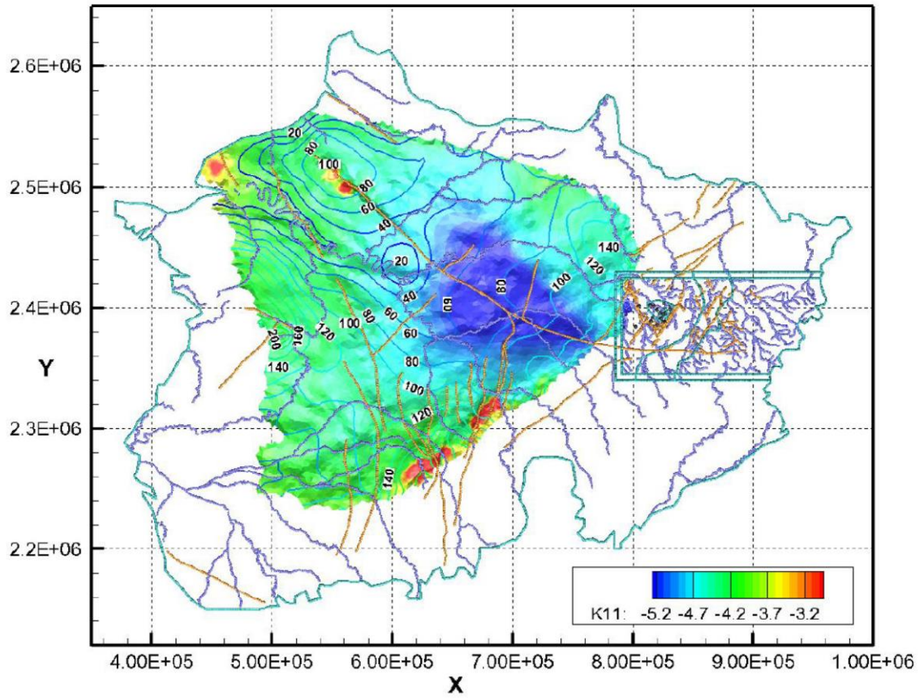
La figure 5-32 permet d'apprécier la structure des écoulements souterrains de subsurface à l'échelle du bassin. Les écoulements sont globalement orientés est-ouest, fortement contrôlé par le réseau hydrographique de surface. Les charges hydrauliques varient de 400 mètres dans la région des Vosges à l'est du bassin à 0 mètre dans La Manche qui représente l'exutoire principal du système aquifère.



CG-TE-D-MGE-CEGI-ESE-0000-22-0030-A

Figure 5-32 *Piézométrie simulée à la surface du domaine intégré région/secteur. Le réseau hydrographique ainsi que les failles régionales sont respectivement représentés en bleu et en rouge*

La figure 5-33 donne un exemple de distribution des conductivités hydrauliques et de la piézométrie obtenue pour l'aquifère de l'Albien. Les directions d'écoulement sont en concordance avec les résultats d'études antérieures.



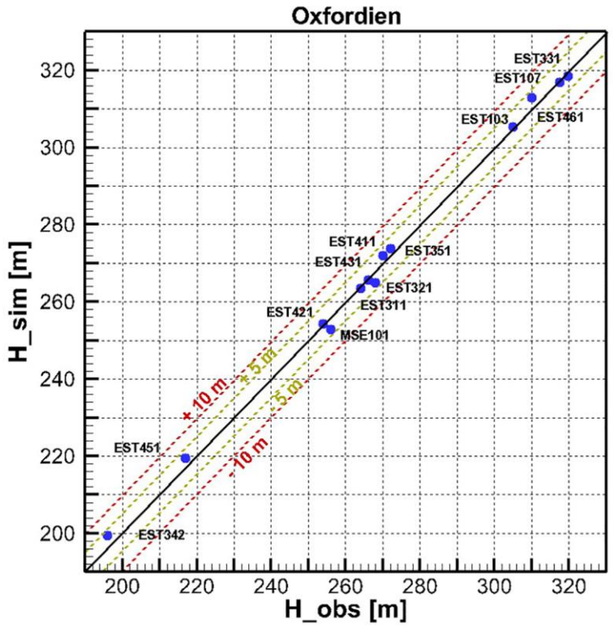
CG-TE-D-MGE-CEGI-ESE-0000-22-0031-A

Figure 5-33 *Piézométrie calculée (contours) et champs de conductivités hydrauliques (fond de carte) de l'Albien. L'échelle de conductivité est en logarithme*

Calage à l'échelle du secteur

Pour l'essentiel le calage a permis d'améliorer sensiblement la représentativité du modèle en particulier pour les encaissants de l'Oxfordien et du Dogger où les mesures de charge sont les plus nombreuses à l'échelle du secteur.

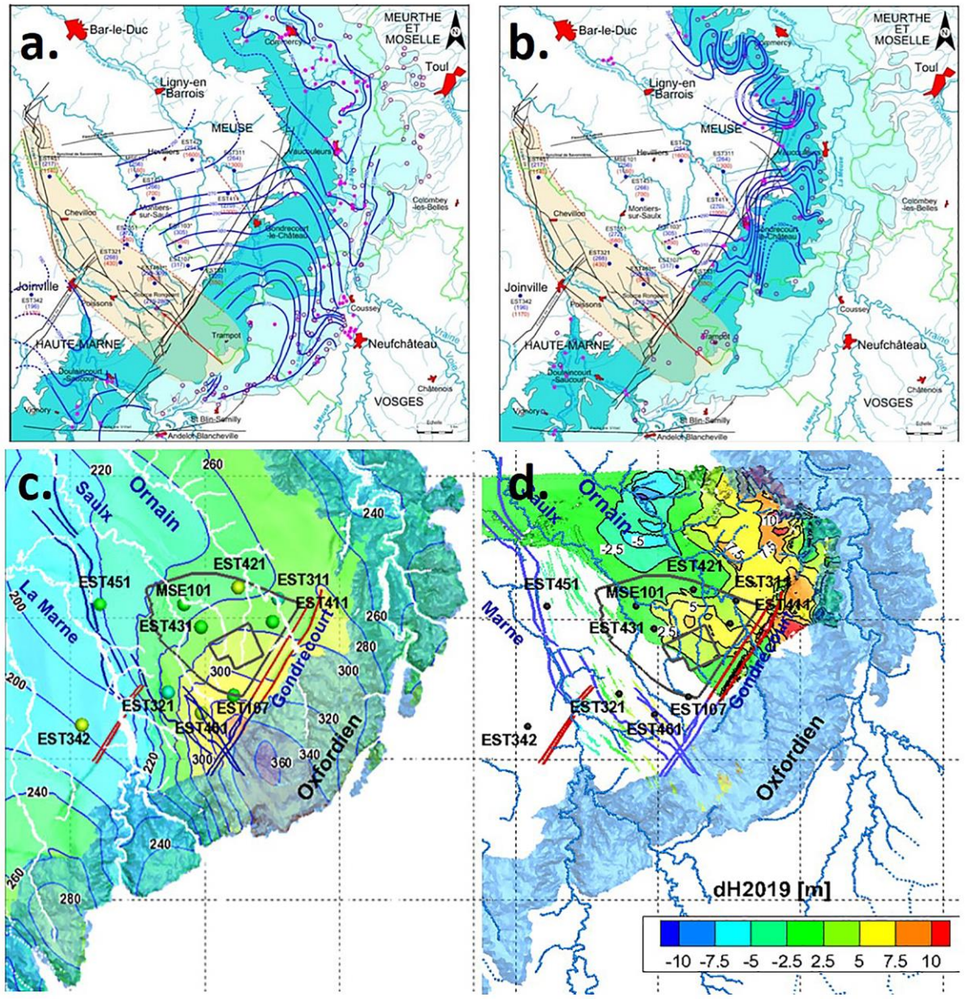
La figure 5-34 présente le diagramme de validation croisée obtenu pour l'Oxfordien. Les écarts entre les moyennes de charge hydraulique simulées et celles mesurées dans les 13 forages profonds de l'Andra sont inférieurs à 5 mètres pour la majorité des points de contrôle (12 points/13) avec un écart absolu moyen de 2,66 mètres.



CG-TE-D-MGE-AMOA-DRD-0000-21-0635-A

Figure 5-34 Diagramme de validation croisée de l'Oxfordien

La piézométrie simulée (cf. Figure 5-35) indique une direction principale d'écoulement dans l'encaissant de l'Oxfordien orientée sud-est/nord-ouest. La recharge directe de ce système aquifère se produit au niveau des affleurements surtout au sud du fossé de Gondrecourt, ce qui explique le dôme piézométrique bien distingué dans cette zone. Au-delà, les écoulements se font en direction du centre du bassin de Paris avec un effet de drainage marqué par les vallées de la Meuse au nord-est et de La Marne au sud-ouest.



CG-TE-D-MGE-AMOA-DRD-0000-21-0637-A

Figure 5-35 Piézométries mesurées dans les nappes inférieures (a) et supérieure (b) de l'Oxfordien et simulées dans la nappe inférieure (c). La piézométrie simulée dans la nappe supérieure (d) est présentée par une différence de charge entre les niveaux piézométriques de la nappe supérieure de la nappe

En fond de carte, les affleurements des unités hydrogéologiques. Les points d'observation sont représentés par des ronds colorés. En trait bleu, les failles drainantes ; en orange, les failles étanches ; et en vert clair, les fractures mineures. Les contours du secteur, de la ZT et de la ZIRA sont également montrés en gris foncé.

Bilan et perspectives

La qualité du calage obtenu est satisfaisante dans les aquifères de l'Oxfordien et du Dogger mais reste encore inégale et perfectible dans les formations aquifères des Calcaires du Barrois avec des perspectives de développements futurs et de l'acquisition de données nouvelles. Ces actions font d'ailleurs l'objet d'un programme de travaux ciblé visant notamment à améliorer la connaissance et la conceptualisation des Calcaires du Barrois et plus particulièrement son fonctionnement karstique et ses interactions avec le réseau hydrographique de surface.

Au stade actuel, le modèle de secteur est suffisamment abouti pour engager les simulations d'impact du projet global Cigéo sur l'aquifère de l'Oxfordien calcaire. Par contre, le calage sur le système des Calcaires du Barrois doit encore progresser avant d'envisager l'exploitation du modèle pour les calculs d'impact. C'est pour cette raison que la présente étude d'impact s'appuie sur les résultats des simulations, considérés comme enveloppe en termes d'impact hydraulique de l'ouvrage de protection contre les remontées de nappe, fournis par le modèle initial.

h) Modèle de l'Oxfordien : simulations prédictives des impacts des structures d'accès au stockage

Stratégie de simulation

Les simulations prédictives s'inscrivent sur des durées longues qui imposent de disposer d'un modèle calé en transitoire pour tenir compte à la fois du phasage des travaux de creusement des ouvrages du centre de stockage Cigéo, de la durée d'exploitation du stockage, du temps de retour à l'équilibre après fermeture mais aussi des fluctuations et des évolutions naturelles du milieu hôte. Pour répondre à cette exigence il a été fait le choix de travailler sur un modèle local dérivé du modèle de région-secteur afin de disposer d'un support de taille plus réduite.

Le programme de simulation s'est donc organisé en deux phases, avec :

- le développement et le calage du modèle local en régime transitoire ;
- la simulation des impacts hydrauliques des structures d'accès du centre de stockage Cigéo puis du retour à l'équilibre après exploitation et fermeture du stockage.

La particularité de ce modèle est de faire largement appel à des méthodes probabilistes pour rendre compte de la variabilité spatiale des paramètres et d'en intégrer l'effet sur la présentation des résultats. Elle est aussi de considérer des écoulements en milieu variablement saturé pour rendre compte des phénomènes de désaturation qui se déploieront en périphérie des puits et descenderies.

Développement du modèle local et calage en régime transitoire

L'étendue de ce modèle local a été définie sur la base d'une combinaison d'arguments numériques et hydrogéologiques dans l'objectif de disposer d'un modèle de taille réduite compatible avec l'affinage du maillage pour intégrer avec précision les structures d'accès, mais d'extension suffisante pour circonscrire le périmètre d'impact du centre de stockage Cigéo sans risque d'interférence avec les conditions aux limites.

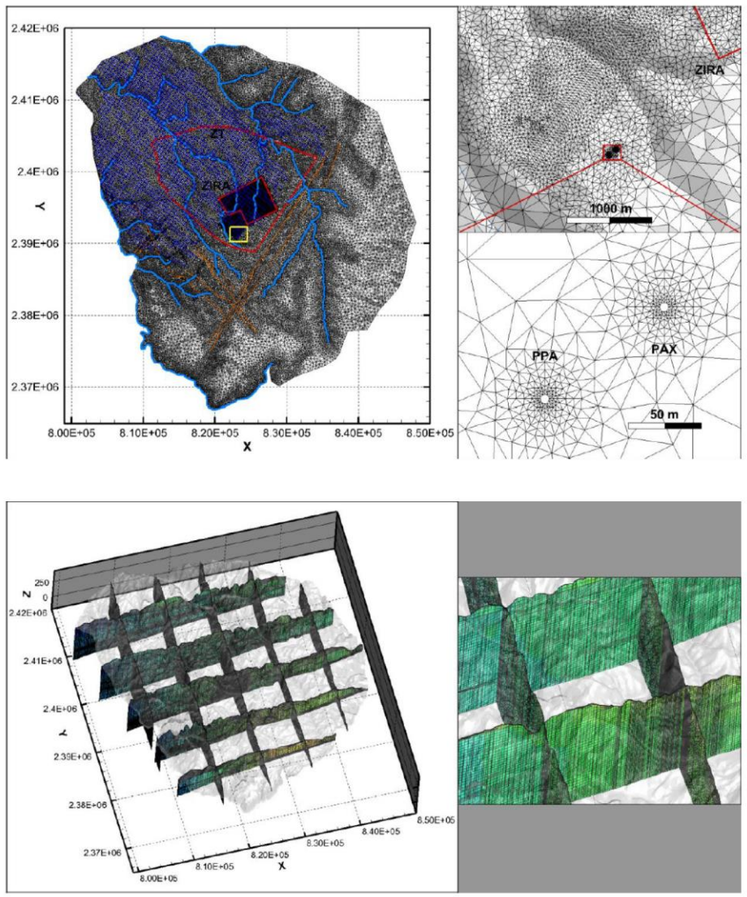
Concernant l'extension verticale, il a été admis que les perturbations induites par les structures du stockage (c'est-à-dire les descenderies et les puits d'accès) n'affecteront pas les écoulements dans la couche du Callovo-Oxfordien ni les formations sous-jacentes. Par conséquent, il a été décidé de modéliser uniquement l'Oxfordien calcaire, le Kimméridgien marneux et le Portlandien/Berriasien correspondant essentiellement aux Calcaires du Barrois (cf. Tableau 5-15).

La calibration de ce modèle local est faite en utilisant les données de rabattement induit par le creusement du Laboratoire souterrain et suivi par un réseau de piézomètres permettant une cartographie spatiale et temporelle de la perturbation hydraulique sur environ 17 années.

Tableau 5-15 Décomposition stratigraphique prise en compte dans le modèle local

Stratigraphie	Formation	Système aquifère particulier	N° couche	Affinage vertical
Crétacé	Aptien	-	35	1
Jurassique sup. (Malm)	Néocomien/Berriasien	-	34	1
	Calcaires Cariés	Aquifère des Calcaires du Barrois (Portlandien)	33	1
	Oolithe de Bure		32	1
	Calcaires de Dommartin		31	1
	Pierre Châline		30	1
	Calcaires lithographiques		29	1
	Kimméridgien	-	28	2
	Sommet du Séquanien supérieur	Aquifères de l'Oxfordien calcaire	27	2
	Base Séquanien supérieur		26	4
	Séquanien inférieur		25	8
	Rauracien supérieur		24	2
	Rauracien inférieur		23	1
	Argovien supérieur		22	2

Le maillage des couches a été affiné dans le plan vertical pour permettre une meilleure reproduction des gradients hydrauliques verticaux et donc des rabattements observés autour des puits. Le puits principal d'accès au Laboratoire souterrain (PPA) et le puits auxiliaire (PAX), de diamètres respectifs 6 mètres et 5 mètres, sont discrétisés par des éléments 2D. La figure 5-36 donne une vue d'ensemble du maillage final.



CG-TE-D-MGE-CEGI-ESE-0000-22-0032-A

Figure 5-36 *Vues 2D et 3D du maillage en éléments finis du modèle local*

Pour le reste, le modèle contient tous les éléments constitutifs hérités du modèle région-secteur.

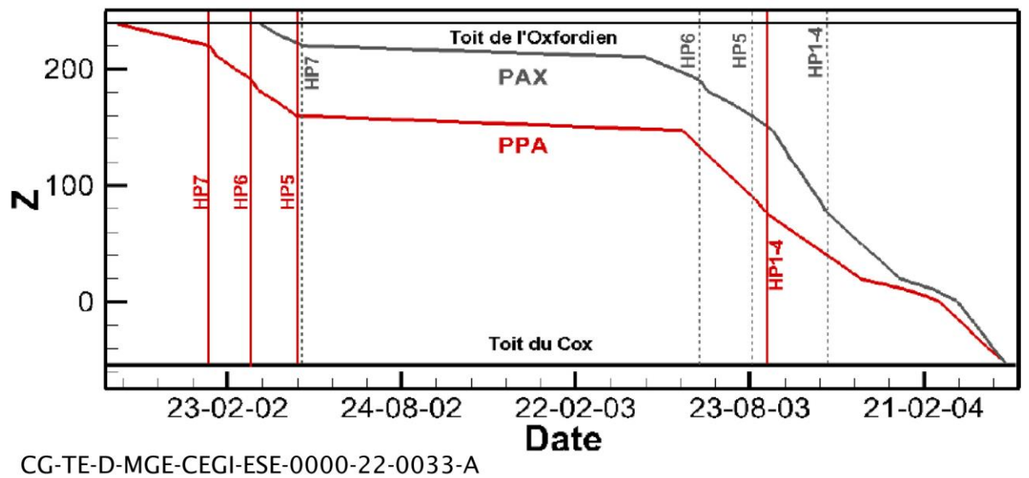
Les conditions aux limites retenues sont :

- en surface :
  - ✓ la recharge par infiltration de la pluie qui représente 33 % de cumul pluviométrique annuel moyen ;
  - ✓ des charges hydrauliques imposées sur le tracé du réseau hydrographique.
- latéralement, des charges hydrauliques résultant du calage du modèle d'écoulement région-secteur.

Par ailleurs, la simulation du creusement des puits d'accès au Laboratoire nécessite l'attribution de conditions aux limites appropriées et variable dans le temps. Les conditions aux limites appliquées au niveau des puits d'accès sont des conditions dites de suintement qui permettent de régler le flux entrant en fonction de la charge hydraulique et de l'élévation altimétrique. Ces conditions de suintement sont variables dans le temps car leur activation est associée au calendrier d'avancement du creusement et aux dates d'interception des horizons poreux (cf. Tableau 5-16 et figure 5-37).

Tableau 5-16 *Dates d'atteinte des horizons poreux (toit) par les puits d'accès (puits principal PPA et puits auxiliaires PAX) au Laboratoire souterrain*

	Formation ou horizon poreux	Puits principal	Puits auxiliaire
Oxfordien calcaire	Niveau intercalaire	31 octobre 2001	29 mars 2002
	Horizon Hp7	4 février 2002	14 mai 2002
	Niveau intercalaire	12 février 2002	5 mai 2003
	Horizon Hp6	19 mars 2002	2 juillet 2003
	Niveau intercalaire	27 mars 2002	10 juillet 2003
	Horizon Hp5	7 mai 2002	26 août 2003
	Niveau intercalaire	14 juin 2003	16 septembre 2003
	Horizon Hp4	9 septembre 2003	11 novembre 2003
	Niveau intercalaire	21 novembre 2003	10 janvier 2004
	Horizon Hp2	28 novembre 2003	17 janvier 2004
	Niveau intercalaire	6 février 2004	3 mars 2004
	Callovo-Oxfordien	Mi-mai 2004	Mi-mai 2004



CG-TE-D-MGE-CEGI-ESE-0000-22-0033-A

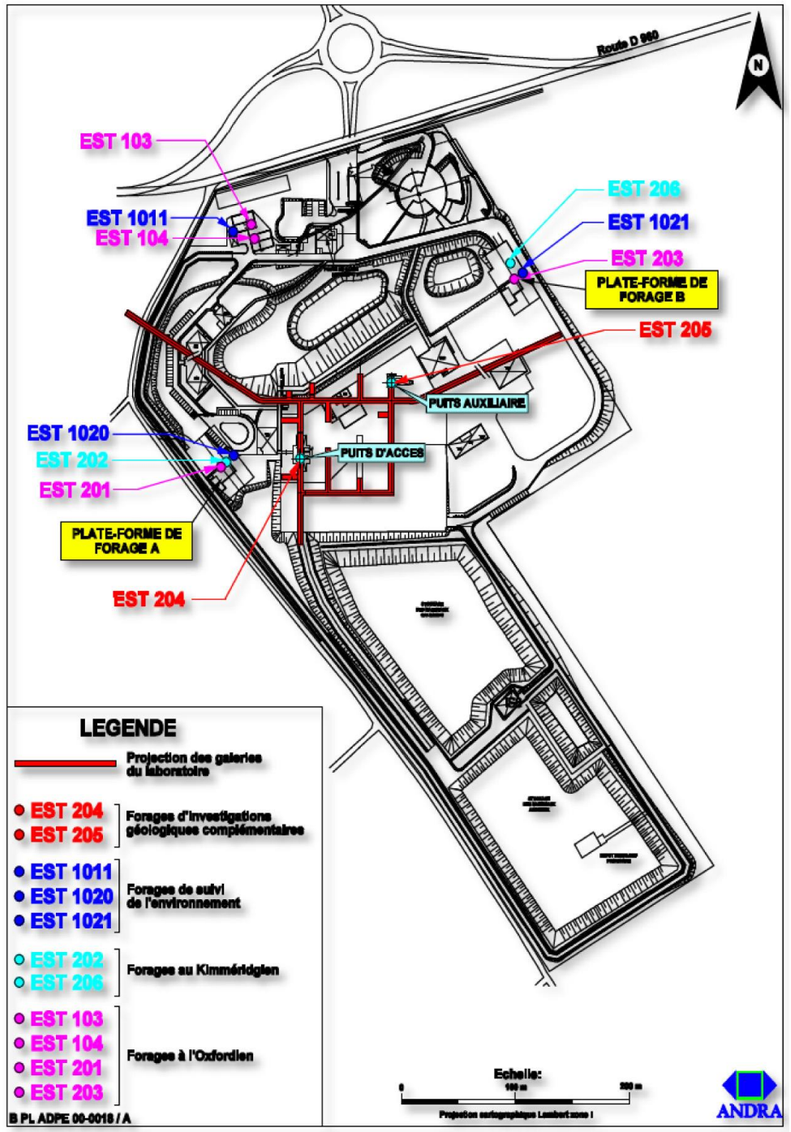
Figure 5-37 *Progression des travaux de creusement des puits*

Les conditions initiales du modèle ont été obtenues par des simulations d'écoulement à long terme jusqu'à atteindre une solution d'équilibre hydraulique.

Les données utilisées pour le calage du modèle sont principalement issues des mesures en continu réalisées depuis le creusement des puits d'accès au Laboratoire souterrain intervenu entre 2000 et 2004. Il s'agit :

- de charges hydrauliques relevées sur un ensemble de forage répartis en périphérie des puits (cf. Figure 5-38) ;
- de mesures du débit drainé par les puits au droit des horizons poreux producteurs.

Ces données en continu couvrent une période d'environ 17 ans (2001-2018).



CG-TE-D-MGE-CEGI-ESE-0000-22-0034-A

Figure 5-38 *Localisation des puits d'accès au Laboratoire souterrain et des forages de surveillance*

Le paramétrage du modèle s'est appuyé sur une approche stochastique (processus aléatoire) afin d'intégrer la variabilité spatiale du champ de conductivité hydraulique. Cette variabilité est le reflet des nombreuses hétérogénéités (fractures, joints, diaclases) qui affectent notamment les systèmes aquifères du Barrois et de l'Oxfordien. À titre d'exemple, la conductivité hydraulique de l'Oxfordien tel qu'elle résulte du calage du modèle région-secteur varie de 10^{-10} m/s à 10^{-5} m/s.

Un processus probabiliste a été utilisé pour générer un ensemble de réalisations aléatoires du champ de conductivité hydraulique à partir d'un jeu de données de base. Ces champs de valeurs ont été injectés dans le modèle et les 10 réalisations donnant les erreurs de calibration les plus faibles ont été retenues. Une méthode inverse a été ensuite appliquée pour ajuster chaque champ de paramètres. Compte tenu de la complexité du traitement, seuls les niveaux poreux (HP) de l'aquifère de l'Oxfordien ont été considérés à ce stade.

Méthode de simulation

La simulation des impacts hydrogéologiques se focalise sur :

- l'extension des zones non saturées autour des ouvrages (puits et descenderie) ;
- l'extension de la perturbation en régimes d'écoulement permanent et transitoire ;
- les débits drainés par ces structures.

Par ailleurs, ces impacts sont déterminés pour trois périodes distinctes : au cours de la construction des ouvrages, durant l'exploitation du stockage (100 ans) et, enfin, après sa fermeture.

À cet effet les simulations démarrent à partir d'un état d'écoulement initial correspondant soit à celui de la date de démarrage des travaux du futur stockage pour les deux premières périodes, soit à celui de la date de fermeture du stockage pour la troisième et dernière période.

Dans un premier temps, les 10 réalisations de champ de paramètres retenues à l'issue de la phase de calibration précédente ont été utilisées en considérant un régime d'écoulement permanent. L'objectif de cette première étape est de délimiter la zone d'influence de l'infrastructure du stockage et d'examiner la sensibilité du résultat à la variabilité du champ de paramètre associé aux horizons poreux de l'Oxfordien.

Dans un second temps, les mêmes 10 champs de paramètres ont été considérés pour réaliser des simulations transitoires conditionnées par le calendrier prévisionnel du projet global Cigéo jusqu'au retour à l'équilibre (*i.e.* À un état non perturbé) après fermeture et remblayage du centre.

Les résultats de ces simulations probabilistes sont ensuite moyennés en leur associant une incertitude qui découlent de leur variabilité de sorte à ne disposer que d'un seul champ de valeurs spatio-temporelles. Les incidences sont alors évaluées en termes :

- d'extension et d'amplitude de la perturbation à différentes dates ;
- d'évolution des charges hydrauliques au droit des forages d'observation et de surveillance ;
- d'évolution des débits des eaux drainées par les ouvrages d'accès au stockage et par les puits d'accès au Laboratoire souterrain ;
- de distribution des taux de saturation dans les formations oxfordiennes au terme des 100 années d'exploitation du futur stockage.

Ces résultats de simulation d'impact sont présentés et commentés dans le volume IV de la présente étude d'impact.

5.2.1.2 Risque inondation

5.2.1.2.1 Évaluation des incidences potentielles pour le risque inondation

Une étude spécifique a été réalisée pour évaluer l'incidence du centre de stockage Cigéo sur les risques d'inondation des biens et des personnes liés à un débordement des cours d'eau de l'Orge, de la Bureau et de l'Ormançon.

Les critères de caractérisation des incidences potentielles du projet global Cigéo sur le risque d'inondation ont été évalués à partir des éléments suivants :

- données climatologiques ;
- données sur l'imperméabilisation prévisionnelle des surfaces raccordées aux dispositifs de gestion des eaux pluviales en zones descenderie et en zone puits aux différentes phases (aménagements préalables, construction initiale, fonctionnement) ;
- données sur l'imperméabilisation prévisionnelle des surfaces non raccordées aux dispositifs de gestion des eaux pluviales autour des zones descenderie et puits ;
- données sur l'imperméabilisation prévisionnelle des surfaces raccordées aux dispositifs de gestion des eaux pluviales de la liaison intersites, de l'installation terminale embranchée, du poste électrique RTE, de la ligne ferroviaire n° 027000 telles que connues au stade de la présente étude d'impact.

5.2.1.2.2 Évaluation de l'incidence résiduelle sur le risque d'inondation

Les critères de caractérisation des incidences résiduelles (c'est-à-dire après application des mesures d'évitement et de de réduction) du projet global Cigéo au risque d'inondation ont été définis comme suit :

- inventaires des mesures d'évitement et de réduction pour le centre de stockage Cigéo et des principes de mesures pour les opérations des autres maîtres d'ouvrage ;
- description des mesures d'évitement et de réduction ;
- évaluation de l'incidence résiduelle ;
- description des modalités de suivi de ces mesures.

Certains facteurs de ruissellement peuvent évoluer tout au long de la phase de déploiement du projet global Cigéo et du fonctionnement du centre de stockage Cigéo. Ces variations ne peuvent pas encore être évaluées. À moyen et long terme, l'évolution climatique elle-même ou celle des techniques de traitement, celle de l'état de surface des bassins-versants en dehors de la zone d'intervention potentielle du projet global Cigéo et encore celle de la réglementation pourront justifier l'adaptation des dispositifs de gestion des eaux pluviales par des redimensionnements à la hausse ou à la baisse, le cas échéant, en utilisant les meilleures techniques disponibles.

Afin d'évaluer l'incidence résiduelle (après mise en œuvre des mesures de gestion des rejets liquides décrites ci-avant) du centre de stockage Cigéo sur le risque d'inondation des biens et de personnes liées à un débordement direct des cours d'eaux, une série de modélisations hydrauliques a été réalisée.

Le risque d'inondation, après mises en œuvre des mesures de réduction, est évalué au droit de :

- l'Orge, en amont de la commune de Saudron ;
- l'Ormançon, en amont de la ferme Saint-Thiébaut ou en amont du chemin situé à proximité du lieu-dit Maison Blanche ;
- la Bureau, en amont de la route départementale D175a.

L'incidence du centre de stockage Cigéo a été évaluée pour :

- l'état initial, avec une période de retour pluviométrique de 10 ans et 100 ans ;
- la phase de construction initiale, avec une période de retour pluviométrique de 10 ans ;
- la phase de fonctionnement, avec une période de retour pluviométrique de 100 ans.

Comme évoqué au chapitre 5.1.3.2.2 du présent volume, l'état initial est simulé avec les pluies de temps de retour 10 ans et 100 ans afin de bénéficier d'une base de référence des changements possibles de débits et d'extension des zones inondées. Pour ces scénarios de simulation, les surfaces des bassins versants sont égales aux surfaces naturelles.

Les deux phases (construction initiale et fonctionnement) comprennent la construction des ouvrages de gestion des eaux. Ces ouvrages sont des bassins de rétention qui permettent d'éviter une aggravation du risque d'inondation en aval des points de rejet des eaux pluviales du centre de stockage Cigéo. Les eaux pluviales des nouvelles surfaces imperméabilisées créées par la construction du centre de stockage Cigéo sont acheminées vers les bassins de rétention. Les bassins de rétention de la liaison intersites et de l'installation terminale embranchée sont considérés transparents aux écoulements. C'est une hypothèse conservatrice car le bassin de rétention induit une diminution des débits de pointes. L'ensemble des rejets se fait dans l'Ormançon, l'Orge et la Bureau. Ils sont présentés sur la figure suivante. À noter que pour le bassin de rétention des eaux pluviales de verse, un seul point de rejet (le plus en aval) est considéré.

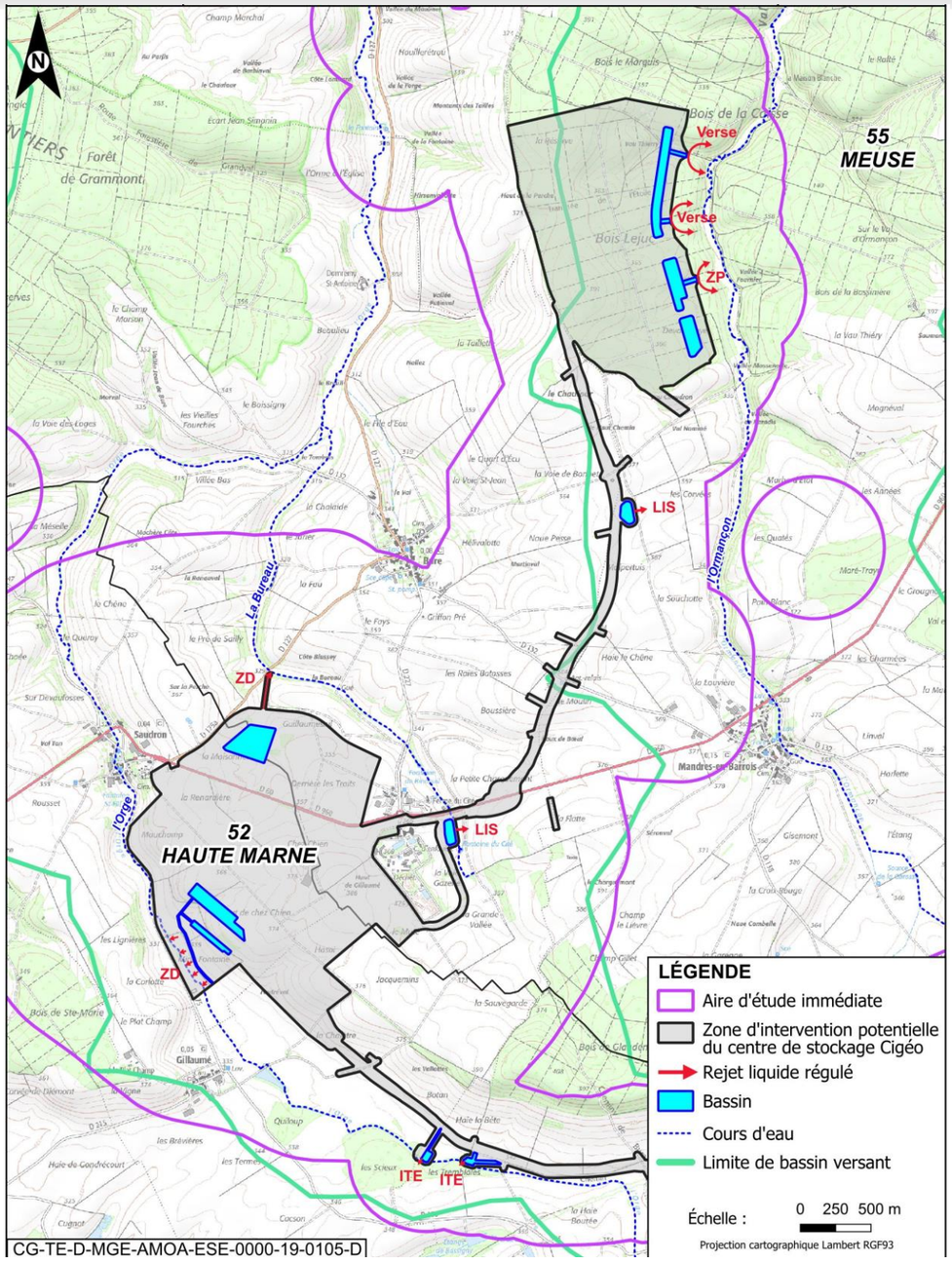


Figure 5-39 *Localisation des points de rejets des bassins de rétention du centre de stockage Cigéo*

Pour les scénarios de simulation en phase de construction initiale et en phase de fonctionnement, les surfaces drainées vers les bassins de rétention sont soustraites des surfaces naturelles.

La délimitation des bassins versants a été réalisée à l'aide d'un logiciel SIG (QGIS) avec l'hypothèse d'une surface d'accumulation d'écoulement de 2 km^2.

Les bassins versants sont subdivisés en deux points spécifiques :

- les intersections entre les routes et le lit de la rivière ;
- le point de rejet des bassins de rétention.

La subdivision a deux objectifs :

- pouvoir saisir le débit des bassins de rétention dans le modèle hydraulique ;
- donner un débit aux points juste en amont des ouvrages d'art existants au droit des cours d'eau.

La simulation hydraulique est réalisée à l'aide du logiciel HEC-RAS (*River Analysis System*). HEC-RAS est un logiciel de modélisation hydraulique destiné à simuler l'écoulement dans les cours d'eau en modélisation 1D. L'écoulement est simulé en régime transitoire avec prise en compte de la résistance à l'écoulement par le lit de la rivière (coefficient de Manning). De cette manière, l'accumulation d'eau en amont des ouvrages d'art est entièrement modélisée. Les distributions spatiales des hauteurs d'eau simulées lors des crues décennales et centennales dans l'Orge, la Bureau et l'Ormançon sont présentées dans le chapitre 5 du volume IV de la présente étude d'impact.

5.2.1.2.3 Détermination de la « Pluie de référence » ou pluie projet

La définition des « pluies de projet » sert de données d'entrée aux différentes études de dimensionnement et de modélisation hydraulique des réseaux de collecte des eaux pluviales du centre de stockage Cigéo ainsi qu'au dimensionnement des bassins multifonctions.

D'après le guide n° 13 de l'Autorité de sûreté nucléaire (110) concernant la protection des installations nucléaires de base contre les inondations externes, les pluies de références doivent être quantifiées à partir d'une étude statistique des données de pluies mesurées à une station météorologique représentative des conditions du site et avec une période de retour suffisante. Les pluies de référence sont prises en compte pour le dimensionnement des réseaux d'évacuation des eaux pluviales et des ouvrages hydrauliques.

Au niveau local, la pluie de référence à prendre en compte, selon le guide n° 13 de l'ASN, est définie par la borne supérieure de l'intervalle de confiance à 95 % des pluies centennales calculées à partir des données d'une station météorologique représentative des conditions du site.

Après avoir déterminé la station de référence, la démarche globale de définition des pluies de projet s'est déroulée en trois étapes :

- détermination des cumuls de hauteur de pluie pour une certaine durée de cumul et une période de retour donnée. Ce travail d'analyse fréquentielle a été réalisé par Météo-France ;
- définition des coefficients de Montana pour chaque station pluviométrique, afin de déterminer la station la plus dimensionnante.

a) Définition des pluies centennales dimensionnantes pour les réseaux. Caractéristiques des stations pluviométriques pour la définition de la pluie projet du centre de stockage Cigéo

Le choix de la station de référence repose essentiellement sur les trois critères suivants : sa situation géographique et en particulier sa proximité au site d'étude, le nombre d'années de mesures et la fiabilité des données ajustées.

Les données pluviométriques disponibles recensées autour du centre de stockage Cigéo sont les suivantes :

- les données des stations pluviométriques Météo-France de Saint-Dizier et de Cirfontaines-en-Ornois ;
- les données des stations pluviométriques exploitées par l'Andra : stations d'Houdelaincourt et de Bure (*i.e.* Site du Laboratoire souterrain) ;
- les données SHYREG disponibles au droit des sites puits et descenderie de la zone de projet.

Les caractéristiques de ces données pluviométriques sont présentées dans le tableau 5-18. La localisation des stations pluviométriques est indiquée sur la figure 5-40.

Tableau 5-17 Tableau d'aide à la décision pour le choix de la station

Station	Cirfontaines-en-Ornois	Saint-Dizier
Proximité au site Cigéo	Proche (5,70 km)	Éloignée (36,8 km)
Nombre d'années d'analyse	19	34
Ajustement	GEV local régional	GEV local régional
Prévisibilité attendue	80 ans	140 ans
Comportement relatif – cumul < 60 min	+	-
Comportement relatif – cumul > 60 min	+	-
Sensibilité relative au dimensionnement de réseau	Oui (plus sécuritaire pour Cirfontaines)	
Sensibilité relative par rapport au dimensionnement du bassin	Oui (plus sécuritaire pour Cirfontaines)	

La station météorologique retenue pour l'évaluation de la pluie de référence est la station de Cirfontaines-en-Ornois, située à proximité du site (5,70 km du centre de stockage Cigéo). Cette station est considérée plus sécuritaire pour le dimensionnement des réseaux, qui constituent les seuls ouvrages susceptibles d'impacter les installations nucléaires en cas d'insuffisance (ce choix est consolidé par les analyses décrites ci-après).

Un ajustement statistique a été effectué pour les stations pluviométriques du Laboratoire et d'Houdelaincourt afin de juger de la représentativité de la station de référence considérée (station de Cirfontaines-en-Ornois) et des stations pluviométriques entre elles. Chacune des étapes de confortement du choix de la station de Cirfontaines-en-Ornois est présentée ci-après.

Tableau 5-18 Caractéristiques des données pluviographiques disponibles pour la définition des pluies de référence

Station	Code station (réf. Organisme)	Altitude (m NGF)	Organisme exploitant	Distance au centre de stockage Cigéo [1] [km]	Intervalle de mesure			Données mesurées		
					Borne inférieure	Borne supérieure	Nombre d'années de mesure	Pas de temps		Type
								Nature	Durée (min)	
Saint-Dizier	52448001 (Météo-France)	139	Météo-France	36,8	1982	2016	34	Non centré	6	Pluviomètre
Cirfontaines-en-Ornois	52131002 (Météo-France)	374	Météo-France	5,70	1997	2016	19	Non centré	6	Pluviomètre
Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne (Bure)	EST6000 (Andra)	-	ANDRA	À proximité immédiate	6/1/2001	31/05/2016	15	Non centré	60	Pluviomètre
Houdelaincourt	55248001 (Météo-France)	390	Météo-France	12,7	29/04/2011	9/6/2017	6	Non centré	60	Pluviomètre
Saudron[2]	-	-	IRSTEA	À proximité immédiate	-	-	-	Non centré	60	Pluviomètre Shyreg
Mandres[2]	-	-	IRSTEA	À proximité immédiate	-	-	-	Non centré	60	Pluviomètre Shyreg

[1] La distance au centre de stockage Cigéo s'entend comme la distance entre la station pluviométrique et un point fictif situé entre la zone puits et la zone descenderie

[2] Ces stations indiquant des quantités de cumuls de hauteur d'eau à partir des modèles SHYREG sont, en réalité, virtuelles. Elles représentent, en effet, la pluviométrie sur une zone de surface de 1 km².

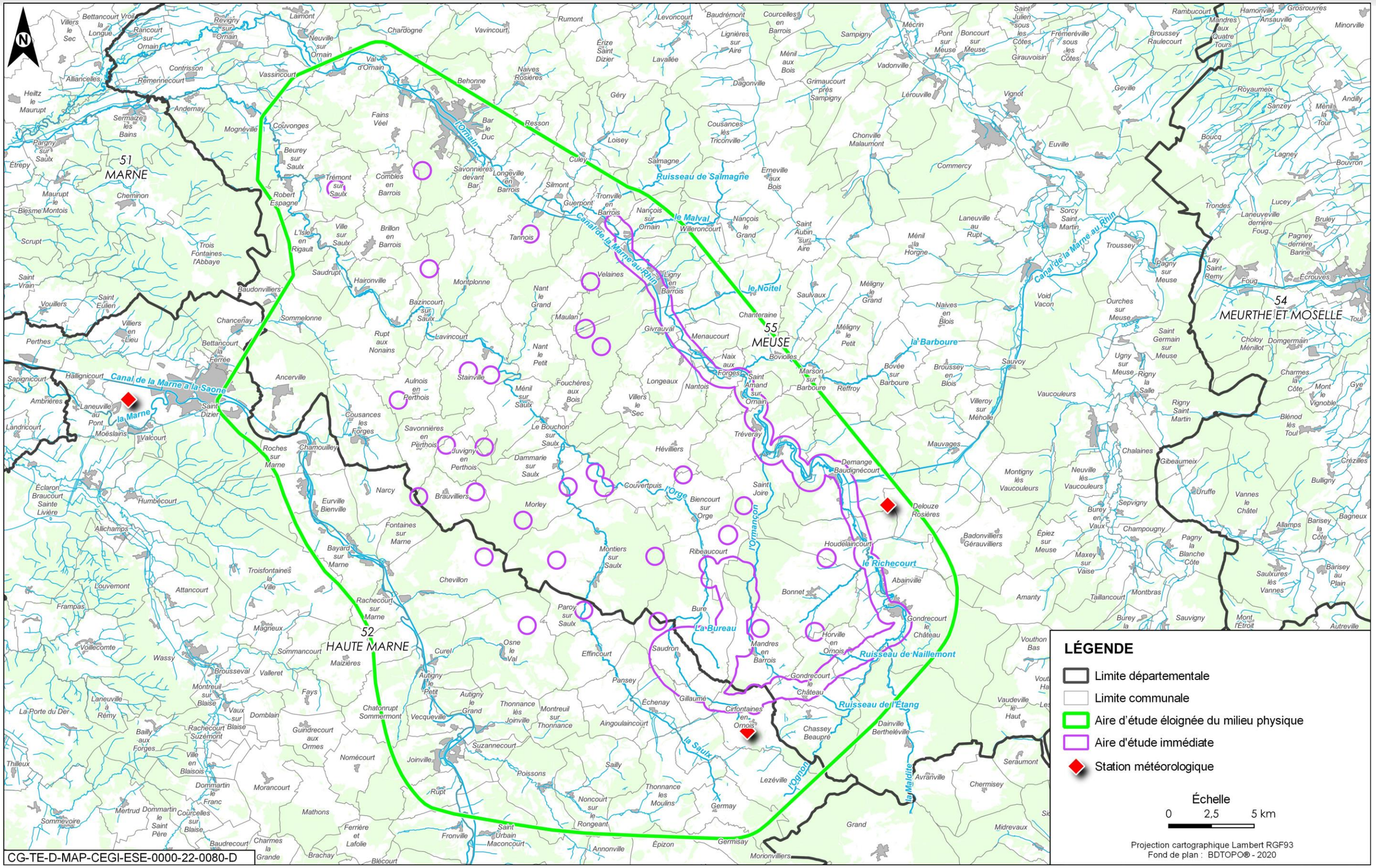


Figure 5-40 *Carte de localisation des stations météorologiques dans lesquelles se trouvent les stations de mesure pluviographiques*

b) Détermination des cumuls de hauteur de pluie selon la période de retour à durée de cumul fixée

Les données d'entrée de quantiles de hauteur utilisées sont les suivantes.

Tableau 5-19 Données d'entrée – Quantiles de hauteur d'eau

Station	Période de retour	Durée de cumul	Ajustement fréquentiel		
			Organisme	Type d'ajustement	Résultat
Saint-Dizier	2,5,10,20, 30,50,100	6,15,30,60,120, 180,240,360,720, 1440,2880,5760	Météo-France	Extrêmes généralisées – locale régionale (GEV – Loc. Reg.)	Val. médiane, borne inf. IC 95 % borne sup IC 95 %
Cirfontaines	2,5,10,20, 30,50,100	6,15,30,60,120, 180,240,360,720, 1440,2880,5760	Météo-France	Extrêmes généralisées – locale régionale (GEV – Loc. Reg.)	Val. médiane, borne inf. IC 95 % borne sup IC 95 %
Saudron	2,5,10,20, 30,50,100	60,120, 180,240,360,720, 1440,2880,5760	Météo-France	Shyreg	Val médiane
Mandres	2,5,10,20, 30,50,100	60,120, 180,240,360,720, 1440,2880,5760	Météo-France	Shyreg	Val médiane

La détermination des durées de retour de phénomènes extrêmes consiste à calculer quelles sont les valeurs du paramètre susceptibles d'être dépassées en moyenne une fois tous les 5, 10, 20, 30, 50 ou 100 ans… Les estimations obtenues sont toujours accompagnées d'un intervalle de confiance, calculé notamment à partir de l'échantillon de mesures à disposition. Pour se faire, il existe plusieurs méthodes.

Les différentes méthodes utilisées pour déterminer la pluie de référence (*i.e.* La durée de retour) sont :

- la loi de Gumbel (ou loi double exponentielle), loi d'ajustement à deux paramètres qui exploite des données maximales annuelles. Ces maximas annuels sont extraits d'une série de relevés à pas de temps régulier (cumul sur 6 minutes à 10 jours) relevés en une station bien définie. Il s'agit de la méthode la plus « rustique » permettant de réaliser un ajustement fréquentiel (*i.e.* Pour mémoire, de donner une période de retour à des événements exceptionnels) ;
- la loi locale-régionale GEV, qui fait l'hypothèse que les pluies maximales annuelles d'une même zone homogène (voisinage) sont distribuées suivant des lois GEV de même forme. Le principe des méthodes locales régionales est d'augmenter la taille des échantillons de pluies extrêmes des stations jaugées (pour tous les cumuls de précipitations, de 6 minutes à 10 jours), en intégrant le « signal » des stations voisines situées dans une zone estimée « homogène » pour :
  - ✓ réduire la variabilité de l'échantillonnage des stations et ;
  - ✓ améliorer la fiabilité des estimations de quantiles extrêmes.
- La méthode SHYPRE régionalisée (méthode SHYREG) basée sur la régionalisation du générateur de chroniques de pluie horaire. Il a été montré que trois variables issues de données quotidiennes expliquent correctement à elles seules les paramètres nécessaires au générateur. Ces trois variables sont :
  - ✓ NE : le nombre moyen d'événements pluvieux par saison ;
  - ✓ μ PJMAX : la moyenne des pluies journalières maximales des événements d'une saison ;
  - ✓ μ DTOT : la moyenne des durées des événements pluvieux par saison.

c) Détermination des coefficients de Montana

Les données d'entrées prises en compte sont présentées dans le tableau suivant.

Tableau 5-20 Données d'entrée – Caractéristiques des coefficients de Montana

Station	Période de retour (ans)	Intervalle de validité		Ajustement fréquentiel			Ajustement loi Quantile = f (Durée de cumul)	
		Borne Inférieure (min)	Borne Supérieure (min)	Organisme	Type d'ajustement	Résultat	Organisme	Type d'ajustement
Saint-Dizier	5,10,20, 30,50,100	6	30	Météo-France	Extrême généralisé, Locale Régionale (GEV)	Valeur médiane	Météo-France	Montana - Moyen
		30	1440					
		1440	5760					
Cirfontaines	5,10,20,30,50,100	6	30	Météo-France	Extrême généralisé, Locale Régionale (GEV)	Valeur médiane	Météo-France	Montana - Moyen
		30	1440					
		1440	5760					

La formule de Montana est utilisée et ajustée afin de relier l'intensité de la pluie i(t) (mm/min) à la durée de l'épisode pluvieux t (min) pour une période de retour donnée. La formulation de la loi de Montana est la suivante : $i(t) = a \times t^{-b}$.

Avec l'ajustement de Montana, deux paramètres (*i.e.* Les paramètres de Montana) sont nécessaires pour définir la loi de l'évolution de la hauteur maximale moyenne de pluie précipitée sur une durée de cumul en fonction de la durée de cumul.

Pour une même station de mesure, une projection des données de hauteur de pluie sur un repère graphique « log-log » (*i.e.* Sur l'axe des abscisses et l'axe des ordonnées), repère graphique naturel de la loi de Montana est effectuée. En effet, dans ce type de repère, la loi de Montana – exponentielle formellement – prend la forme d'un segment de droite.

Différents ajustements sont entrepris :

- sur les quantiles de hauteurs d'eau médians :
  - ✓ ajustement majorant et continu des données ;
  - ✓ ajustement moyen et continu des données.
- sur les quantiles de hauteur d'eau issus de la borne supérieure de l'intervalle de confiance à 95 % :
  - ✓ ajustement majorant et continu des données ;
  - ✓ ajustement moyen et continu des données.

La continuité (*i.e.* Continuité « C_0 » au sens mathématique du terme) de l'ajustement garantit l'absence de « saut » entre données de hauteur ou d'intensité de pluie qui seraient calculées à partir de deux ajustements voisins de Montana.

L'ajustement majorant d'un jeu de donnée de hauteur de pluie s'entend comme étant l'ajustement permettant d'obtenir, à partir de celui-ci, une hauteur de pluie égale ou supérieure à la hauteur de pluie de la donnée brute, pour chaque durée de cumul.

L'ajustement moyen d'un jeu de donnée de hauteur de pluie s'entend, quant à lui, comme étant l'ajustement optimum obtenu à partir d'une méthode des moindres carrés, pour chaque intervalle de validité puis réajusté pour tenir la condition de continuité entre ajustements voisins. Les intervalles de validité sont choisis de manière à maximiser le coefficient de corrélation de l'ajustement.

Enfin les règles suivantes ont également été employées pour la détermination des différents ajustements :

- pour la station de Cirfontaines-en-Ornois, les données médianes utilisées sont les valeurs médianes les plus élevées entre les jeux de données Shyreg et les jeux de données médians issus des derniers ajustements de Météo-France ;
- pour la station de Cirfontaines-en-Ornois, les données issues de la borne supérieure de l'intervalle de confiance à 95 % doivent être plus élevées que les données Shyreg. Le cas échéant, le jeu de données Shyreg est utilisé ;
- pour la station de Saint-Dizier, les règles définies ci-avant ne sont pas utilisées. Le jeu de données Shyreg disponible ne s'applique pas ;
- concernant l'ajustement médian des coefficients de Montana, le coefficient de régression linéaire de l'ajustement doit être supérieur à 0,95. Le cas échéant, les valeurs « exotiques » sont écartées.

Huit ajustements des quantiles de cumuls de hauteurs de pluie à une loi de Montana ont été réalisés, par période de retour (*i.e.* Un ajustement – majorant ou moyen - par jeu de données de cumul de hauteur d'eau– médian ou borne sup.95 % et par station de mesure pluviométrique

Résultats

Les résultats sont présentés en annexe 3 du présent volume sous la forme suivante :

- tableau des différents coefficients de Montana. Pour mémoire, on rappelle que ces coefficients de Montana ont été ajustés sur des données de pluie non centrées mais pour lesquelles le coefficient de Weiss a été appliqué et permet donc de considérer ces paramètres comme étant établis sur une pluie centrée ;
- graphique d'ajustement à la loi de Montana pour chaque station ;
- tableau d'analyse des ajustements.

Le choix de la station de Cirfontaines-en-Ornois est consolidé à l'issue de ce raisonnement. Les coefficients de Montana retenus pour cette station sont ceux issus de l'ajustement majorant des cumuls de hauteur de pluies issus de la borne supérieure de l'intervalle de confiance à 95 % (Météo-France 2017). Ils sont présentés dans le tableau suivant.

Tableau 5-21 Coefficients de Montana – Cirfontaines-en-Ornois

Station	Période de retour - T_{rerour} [ans]	Domaine de validité - cumul de temps [min]		a [mm/min]	b [-]
		Borne Inf.	Borne Sup.		
Cirfontaines_Tr2_Hc_Mont_MF_PluE_Fix6_MF_GEVlr_SUP95_ING_Maj	2	6	18	3,326	0,437
Cirfontaines_Tr2_Hc_Mont_MF_PluE_Fix6_MF_GEVlr_SUP95_ING_Maj	2	18	2880	7,297	0,709
Cirfontaines_Tr10_Hc_Mont_MF_PluE_Fix6_MF_GEVlr_SUP95_ING_Maj	10	6	28	4,750	0,388
Cirfontaines_Tr10_Hc_Mont_MF_PluE_Fix6_MF_GEVlr_SUP95_ING_Maj	10	28	2880	18,629	0,798
Cirfontaines_Tr100_Hc_Mont_MF_PluE_Fix6_MF_GEVlr_SUP95_ING_Maj	100	6	43	5,539	0,271
Cirfontaines_Tr100_Hc_Mont_MF_PluE_Fix6_MF_GEVlr_SUP95_ING_Maj	100	43	2880	62,625	0,916

d) Définition des pluies centennales de référence

L'emploi des deux types de pluies de projet est utilisé pour le centre de stockage Cigéo :

- une ou plusieurs pluies de projet de type « double-triangulaire » pour les modélisations hydrauliques. Les différentes pluies double-triangulaire varient selon le critère « durée intense de la pluie ». Disposer d'une gamme de pluies de projet plutôt que d'une seule pluie permet de mieux appréhender le fonctionnement d'un réseau de collecte des eaux pluviales et ses points de débordements potentiels ;
- une pluie de projet de type « Keiffer » pour la modélisation globale du réseau du centre de stockage Cigéo.

Il s'agit de deux types de pluies préconisés par le guide n °13 de l'ASN (110).

La pluie de projet de type « double-triangulaire » repose sur le fait que la forme des averses est très variable (et aléatoire) alors que celle des hydrogrammes l'est beaucoup moins, le bassin versant et son réseau de drainage jouant un rôle de filtre. Il convient donc de s'intéresser aux paramètres de la pluie ayant une réelle influence sur le ruissellement. Ce sont ses paramètres qui serviront de base de construction à la pluie de projet de forme « double-triangle ».

L'utilisation de la pluie de type « Kiefer » pour le dimensionnement est également préconisée par le guide n° 13 de l'ASN. La conception de cette pluie repose entièrement sur la courbe Intensité-Durée-Fréquence de la station de référence

L'annexe 4 du présent volume comprend, pour les deux types de pluie, les objectifs des pluies définies, la méthodologie employée et les résultats obtenus.

Ainsi, les pluies de projet adoptées pour les modèles hydrauliques des réseaux du centre de stockage Cigéo sont des pluies « double-triangulaire » de durée globale de quatre heures et de durée intense variant entre six minutes à une heure. À titre d'information, en France, le principal organisme producteur de données - Météo-France – mesure la hauteur de pluie précipitée sur un pas de temps de six minutes. En dessous de cette valeur, on ne dispose donc d'aucune information sur la pluie mesurée.

e) Conclusions générales

Les conclusions générales de l'étude de définition des pluies de référence qui servent de données d'entrées pour le dimensionnement et la modélisation des réseaux de collecte des eaux pluviales et des bassins multifonctions du projet global Cigéo sont les suivantes :

- la station de Cirfontaines-en-Ornois est retenue comme station de référence. Le cumul des pluies à cette station est présenté sur la figure 5-41.

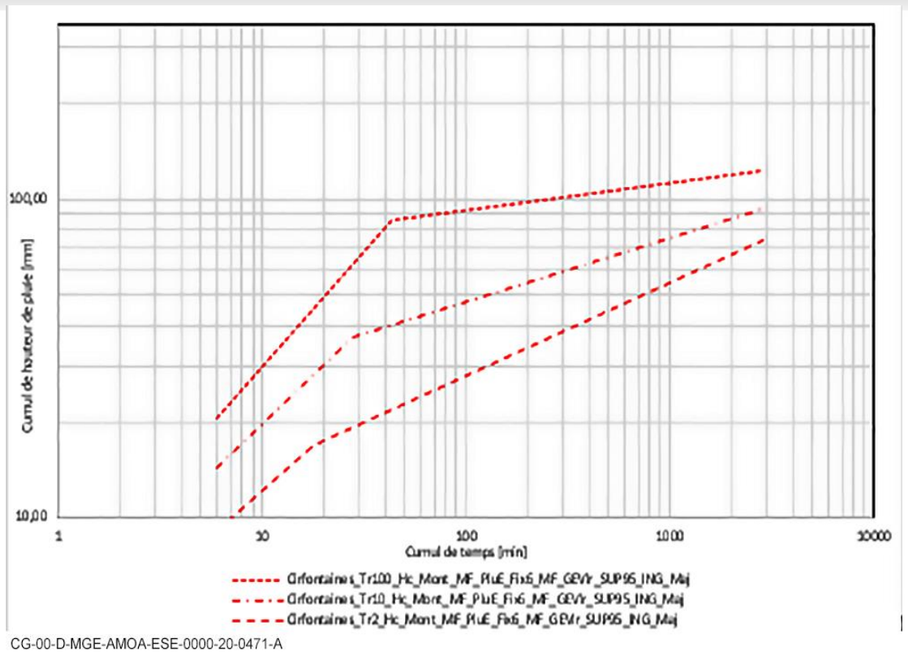


Figure 5-41 Cumul des pluies à Cirfontaines-en- Ornois

- les coefficients de Montana de la station de référence sont rappelés ci-après. Il s'agit, pour mémoire, des coefficients issus d'un ajustement de Montana majorant des cumuls de hauteur de pluies issus de la borne supérieure de l'intervalle de confiance à 95 % (Météo-France, 2017) ;
- les pluies de projet adoptées pour les modèles hydrauliques des réseaux du centre de stockage Cigéo sont des pluies « double-triangulaire » de durée globale de quatre heures et de durée intense variant entre six minutes à une heure ; une analyse de la représentativité de la station de référence choisie a été menée. Après analyse, il s'avère que la station de mesure *in situ* du centre de stockage Cigéo valide les données des différentes stations étudiées alentour (*i.e.* Dans les domaines où il est possible d'effectuer des comparaisons ; durées de cumul comprises entre une heure et deux jours, périodes de retour comprises entre deux ans et cinquante ans).

5.2.1.3 Principe de dimensionnement des ouvrages de gestion des eaux pluviales

Les solutions d'évitement ou de réduction d'impact du projet global Cigéo sur les masses d'eau superficielles sont étudiées en fonction de l'état initial et de telle sorte que les différentes opérations ne dégradent pas la situation hydrologique actuelle.

Pour le centre de stockage Cigéo, les ouvrages de gestion de l'eau sont dimensionnés pour que la contribution moyenne en débit des surfaces de projet ne dépasse pas la contribution moyenne actuelle en débit des surfaces du bassin versant global (absence d'impact sur le débit spécifique des bassins versants concernés). Ce faisant, les solutions respectent la sûreté des installations et participent à l'écrêtage des crues à l'aval des installations. Cette démarche itérative entre les contraintes environnementales et technologiques a permis des dimensionnements optimaux d'ouvrages pour toutes les phases de développement du centre de stockage Cigéo.

DÉBIT SPÉCIFIQUE

Le débit spécifique est une mesure de l'écoulement moyen des précipitations au sein du bassin versant d'un cours d'eau. Il se définit comme le volume d'eau qui s'écoule en moyenne chaque seconde par kilomètre carré du bassin. Il s'agit donc du rapport du débit Q du cours d'eau (exprimé en l/s ou m^3/s) sur la surface A de son bassin versant (exprimée en km^2). Il est couramment exprimé en l/s/ha dans les prescriptions de rejet des documents d'urbanisme.

La situation hydraulique actuelle est caractérisée au moyen d'une étude hydrologique qui a permis de (cf. Figure 5-42) :

- délimiter et caractériser les bassins versants concernés par le centre de stockage Cigéo ;
- déterminer les débits spécifiques de pointe de crue biennale, décennale et centennale à l'exutoire des bassins versants des cours d'eau concernés par le centre de stockage Cigéo.

Ces données ont ensuite permis de déterminer les débits de pointe de rejet décennal et centennal de chacune des installations du centre de stockage Cigéo. Les valeurs obtenues sont dimensionnantes pour les ouvrages de stockage et pour les dispositifs régulateurs de rejet.

Pour déterminer, à période de retour donnée, un débit de rejet maximal à ne pas dépasser en sortie de filière de gestion des eaux pluviales au point de rejet dans le cours d'eau (point intégrateur du ruissellement à l'échelle du bassin versant topographique concerner), deux étapes sont essentielles :

- estimation du débit de ruissellement sur le bassin versant topographique actuel concerné ;
- vérification que le débit spécifique du bassin versant global topographique intégrant les surfaces projet ne dépasse pas le débit spécifique du bassin versant global topographique en état initial.

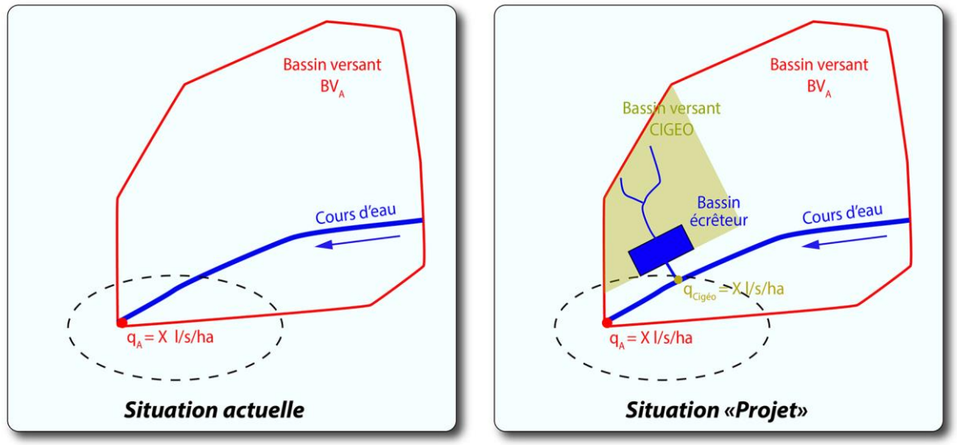


Figure 5-42 Illustration de la situation hydraulique avant et après projet

Les données utilisées pour la délimitation et la caractérisation des bassins versants concernés par le centre de stockage Cigéo sont présentées dans le tableau 5-22.

Tableau 5-22 *Données d'entrée pour la réalisation de l'étude hydrologique pour le centre de stockage Cigéo*

Intitulé de la source	Source
Cartographie IGN SCAN 25	IGN
Carte géologique imprimée au 1/50 000e	BRGM
Cartographie Corine Land Cover	Agence européenne de l'environnement (2012)
Pluie journalière décennale et centennale PJ 10 et PJ 100.	Météo-France (2017)
Données hydrométriques des stations du bassin versant locales	Banque hydro (2017)
Orthophotographie de la zone	IGN
Cartographie BD Carthage des cours d'eau	IGN

5.2.1.3.1 Délimitation et caractérisation des bassins versants concernés par le centre de stockage Cigéo

Les deux zones Cigéo (puits et descenderie) sont actuellement situées sur des bassins versants naturels drainés par les trois cours d'eau suivants :

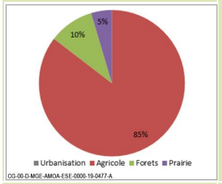
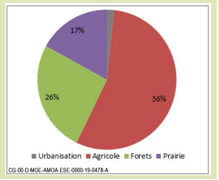
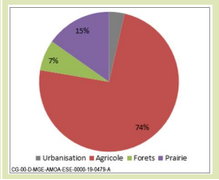
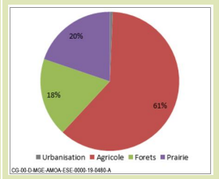
- zone descenderie « Nord » : La Bureau, affluent de l'Orge ;
- zone descenderie « Sud » : L'Orge ;
- zone puits : L'Ormançon.

Les trois bassins versants des cours d'eau locaux sont donc délimités avec comme exutoire les trois points de rejets Cigéo. Cette délimitation s'effectue essentiellement sur des bases topographiques à partir des données d'entrées suivantes :

- carte géologique imprimée au 1/50 000e (BRGM) (111) ;
- occupation des sols (cartographie Corine Land Cover (23)) ;
- fond topographique (IGN-BDALTI25) (112) ;
- fond topographique Réseaux hydrographique (BD Carthage).

Les caractéristiques globales du bassin versant ainsi que celles de ses écoulements sont décrites dans le tableau 5-23.

Tableau 5-23 Caractéristiques générales des bassins versants

	La Bureau Point de rejet du centre de stockage Cigéo	L'Ormançon Point de rejet du centre de stockage Cigéo	L'Orge Point de rejet du centre de stockage Cigéo	La Saulx Station de Montiers-sur-Saulx
Surface [km²]	6,903	16,144	13,359	75,7
Plus long chemin hydraulique [km]	4,16	7,37	9,03	19,63
Pente des versants	>5 %	>5 %	>5 %	>5 %
Pente moyenne du cours d'eau	1,21	0,76	0,44	0,30
Allongement du bassin versant Indice de compacité Gravelius	1,20	1,36	1,90	1,65
Occupation des sols				
Géologie – Formation géologique affeurante	Dominante J9a : Portlandien inférieur	Dominante J9a : Portlandien inférieur	Dominante J8b : Kimméridgien supérieur et moyen	Dominante J8b en amont : Kimméridgien supérieur et moyen Dominante J9a en aval : Portlandien inférieur

5.2.1.3.2 Détermination des débits de pointe de crue biennale, quinquennale, décennale et centennale

» DÉBIT DE POINTE ET CHOIX DE LA MÉTHODE DE CALCUL

Le débit de pointe est le débit maximal d'un bassin versant pour une précipitation donnée (exprimé en L/s ou m³/s). Il peut être évalué en utilisant soit :

- la méthode rationnelle adaptée aux bassins versants de moins de 1 km² ;
- la méthode Crupédix pour les bassins versants de plus de 10 km² ;
- la méthode intermédiaire dite de transition pour les autres.

La détermination des débits de pointe de crue des cours d'eau concernés par le centre de stockage Cigéo, est effectuée selon le formalisme issu du guide technique de l'assainissement routier (GTAR, Sétra, 2006 (113)).

Les méthodes retenues dépendent de la surface des bassins versants. Dans le cadre de la conception du centre de stockage Cigéo, les formalismes retenus pour la détermination des débits de point de crue décennale et centennale sont :

- « Transition » pour La Bureau (formalisme utilisant à la fois les méthodes rationnelles et Crupédix) ;
- « Crupédix » pour l'Ormançon et l'Orge.

Tableau 5-24 *Méthodes hydrologiques GTAR 2006 utilisés pour le centre de stockage Cigéo*

	La Bureau Point de rejet nord de la zone descenderie du centre de stockage Cigéo	L'Ormançon Point de rejet est de la zone puits du centre de stockage Cigéo	L'Orge Point de rejet sud de la zone descenderie du centre de stockage Cigéo	La Saulx Station de Montiers-sur-Saulx
Surface des bassins versants étudiés (en km²)	6,903	16,14	13,36	75,70
Formalisme utilisé	Transition	Crupédix	Crupédix	-

a) Méthodologie de détermination des débits de pointe des crues décennale et centennale

La détermination des débits de pointe des crues pour les périodes de retour Tr = 10 ans et Tr = 100 ans, en l'absence de jaugeage des bassins versants naturels concernés par la zone de projet et de mesures de débits en continu sur une période suffisamment longue, a été effectuée selon la méthode issue du guide technique de l'assainissement routier.

Méthode rationnelle

Cette méthode de détermination des débits est relativement intuitive. Elle exprime le débit comme étant le produit d'une intensité pluviométrique avec une surface contributive. Les hypothèses de départ sont relativement fortes et limitent cette formulation à de petits bassins versants (moins de 1 km²). Ces hypothèses sont les suivantes :

- uniformité de l'averse dans le temps et sur l'ensemble du bassin versant ;
- durée de l'averse égale au temps de concentration du bassin versant ;
- période de retour du débit de pointe considérée comme égale à la période de retour de la précipitation.

La formulation est décrite par l'équation 1 du tableau 5-25.

Tableau 5-25 *Équation 1 - Formalisme de la méthode rationnelle*

$$Q_{(T)} = \frac{C_{(T)}.i_{(T)}.S_{BV}}{3{,}6}$$

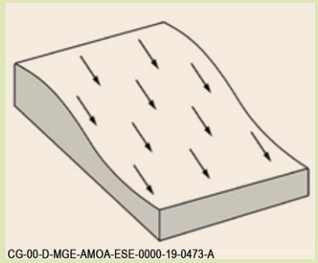
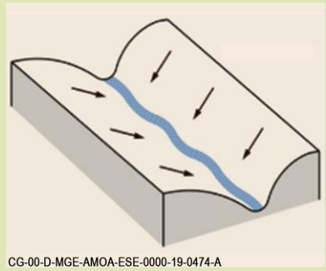
1. $Q_{(T)}$ [m³/s] : Débit de projet de période de retour
2. $C_{(T)}$ [-] : Coefficient de ruissellement du bassin versant pour la période de retour T
3. $i_{(T)}$ [mm/h] : intensité moyenne de la pluie pour la période de retour T pendant le temps de concentration t_c,
4. S_{BV} [km²] : Surface du bassin versant,

$$i_{(T)} = a_{(T)}.t_c^{-b_{(t)}}$$

5. $a_{(T)}$ [mm/h]. $b_{(T)}$ [-]: paramètres pluviométriques de Montana à la période de retour T
6. tc [mn] : temps de concentration du bassin versant pour la période de retour

Les méthodes d'obtention de ses différents termes (coefficient de ruissellement, temps de concentration notamment) sont explicitées par l'équation 2 du tableau 5-26.

Tableau 5-26 Équation 2 - Formalisme de la méthode rationnelle – Fonction de production (ou d'infiltration)

<table>
<tr><th></th><th colspan="5">Période de retour T = 10 ans</th><th>Période de retour T >10 ans</th></tr>
<tr><td>Fonction de production
Coefficient de ruissellement [-]</td><td colspan="5"><table>
<tr><th>Couverture végétale</th><th>Pente</th><th>Terrain sable grossier</th><th>Terrain limoneux</th><th>Terrain argileux</th></tr>
<tr><td rowspan="3">Bois</td><td><5 %</td><td>0,10</td><td>0,30</td><td>0,40</td></tr>
<tr><td>5 <p <10 %</td><td>0,25</td><td>0,35</td><td>0,50</td></tr>
<tr><td>10 <p <30 %</td><td>0,30</td><td>0,50</td><td>0,60</td></tr>
<tr><td rowspan="3">Pâturage</td><td><5 %</td><td>0,10</td><td>0,30</td><td>0,40</td></tr>
<tr><td>5 <p <10 %</td><td>0,15</td><td>0,36</td><td>0,55</td></tr>
<tr><td>10 <p <30 %</td><td>0,22</td><td>0,42</td><td>0,60</td></tr>
<tr><td rowspan="3">Culture</td><td><5 %</td><td>0,30</td><td>0,50</td><td>0,60</td></tr>
<tr><td>5 <p <10 %</td><td>0,40</td><td>0,60</td><td>0,70</td></tr>
<tr><td>10 <p <30 %</td><td>0,53</td><td>0,72</td><td>0,82</td></tr>
</table></td><td>$C_{100} = 0{,}8 \times (1 - \frac{P_0}{P_{(t)}})$ si $C_{10} < 0{,}8$
$C_{100} = C_{10}$ si $C_{10} > 0{,}8$
Avec
7. P_0 : Rétention initiale [mm] (i.e. Hauteur de pluie minimale pour générer un ruissellement)
$P_0 = \left(1 - \frac{C_{10}}{0.8}\right) \times P_{10}$
8. P_{10} : Hauteur de pluie journalière décennale [mm]
9. $P_{(T)}$ [mm] : Hauteur de pluie journalière à la période de retour T</td></tr>
<tr><td>Vitesse d'écoulement [m/s]</td><td colspan="5">Écoulement en nappe : $V_{10} = 1{,}4 \times p^{1/2}$
Écoulement concentré : $V_{10} = k \times p^{1/2} \times {R_h}^{2/3}$
Avec :
10.k [m$^{1/3}$/s] : Rugosité Strikler de la portion d'écoulement considérée
11.p [m/m] : Pente de la portion d'écoulement considéré
12.Rh [m] : Rayon hydraulique de la section mouillée d'écoulement
 
CG-00-D-MGE-AMOA-ESE-0000-19-0473-A
Écoulement en nappe
Écoulement peu ou pas marqué
Ruissellement étalé sur le bassin versant
 
CG-00-D-MGE-AMOA-ESE-0000-19-0474-A
Écoulement concentré
Thalweg et ravins alimentés par les versants
Lits mineurs des cours d'eau</td><td>-</td></tr>
</table>

	Période de retour T = 10 ans	Période de retour T >10 ans
Temps de concentration	$t_{c.10} = \sum \frac{L_j}{V_j}$ Avec 13.$t_{c.10}$ [mn] : temps de concentration du bassin versant pour la période de retour décennale 14.Lj [m] : Longueur d'écoulement sur un tronçon où la vitesse est Vj [m/s]	$t_{c.T} = t_{c.10}.\left[\frac{P_{(T)} - P_0}{P_{10} - P_0}\right]^{-0.23}$ Avec 15.$t_{c.T}$ [mn]: temps de concentration du bassin versant pour la période de retour T 16.P_0 : Rétention initiale [mm] (*i.e.* Hauteur de pluie minimale pour générer un ruissellement) 17.$P_{(T)}$ [mm] : Hauteur de pluie journalière à la période de retour T 18.P10 : Hauteur de pluie journalière décennale [mm]

La formule rationnelle est utilisée avec les coefficients de Montana émanant de l'étude de définition des pluies de référence.

Tableau 5-27 Coefficients de Montana pour les Tr = 10 ans et Tr = 100 ans

Station	T_{retour} [ans]	Durée Pluie inf [min]	Durée Pluie sup [min]	a [mm/min]	b [-]
Cirfontaines_Tr10_Hc_Mont_MF_PluE_Fix6_MF_GEVlr_MED_ING_Moy	10	6	26	4,642	0,469
Cirfontaines_Tr10_Hc_Mont_MF_PluE_Fix6_MF_GEVlr_MED_ING_Moy	10	26	2880	11,023	0,735
Cirfontaines_Tr100_Hc_Mont_MF_PluE_Fix6_MF_GEVlr_MED_ING_Moy	100	6	36	4,996	0,334

Le débit centennal est obtenu en suivant la formulation suivante :

$$Q_{100} = b.\ Q_{10}$$

La détermination du paramètre « b » obéit à la démarche présentée au tableau 5-28.

Tableau 5-28 Détermination du coefficient régional b

Type	Surface du bassin versant (km²)	Valeur du coefficient régional b
1	10 à 20	Application de la formule rationnelle $b = \frac{Q_{100.rationnelle}}{Q_{10.rationnelle}}$
2	> 20	Détermination partir des cours d'eau jaugés des environs $b = \frac{Q_{100.Bassin\ versant\ jaugé}}{Q_{10.Bassin\ versant\ jaugé}}$
3	Par défaut	b = 2

Méthode Crupédix : détermination du débit décennal de pointe

La méthode Crupédix permet l'estimation du débit de pointe décennal sur la base d'une analyse statistique « pluie – débit » de 630 bassins versants de moins de 2 000 km². Son formalisme est décrit par l'équation 1 du tableau 5-29. Il associe pour les bassins versants de taille moyenne un lien très fort entre le cumul décennal de pluie journalier local et le débit de pointe décennal du cours d'eau principal drainant le bassin versant.

Tableau 5-29 Équation 1- Formalisme de la méthode de Crupédix

$Q_{10.pointe} = S^{0,8}\left(\frac{P_{J.10}}{80}\right)^2.R$	19.Q_{10} (m³/s): Débit de pointe décennale 20.S (m²) : Superficie du bassin versant 21.$Pj_{.10}$ (mm) : Pluie journalière maximale annuelle décennale 22.R : coefficient régional de Crupédix

Classiquement, le coefficient régional « R » est déterminé localement à partir des données {Q10, pointe, Surface, et PJ10} disponibles sur des bassins versants locaux présentant des caractéristiques homogènes en termes de topographie, de surface, de géologie, de pédologie et d'occupation des sols, En cas de d'impossibilité de détermination régionale de ce coefficient, du fait notamment de l'absence de cours d'eau jaugé représentatif à proximité, des valeurs par défaut de ce coefficient peuvent être retenues (cf. Tableau 5-30).

Tableau 5-30 Équation 2 - Formalisme de la méthode de Crupédix

Type de terrain	Valeur du coefficient régional R
Terrain perméable	0,2
Terrain intermédiaire	1
Terrain imperméable	1,5 à 1,8

Il convient de noter un point important concernant le formalisme de Crupédix. La formule de Crupédix (Équation 2 du tableau 5-30) sous-entend une croissance du débit à l'exutoire du bassin versant.

Tableau 5-31 Équation 3- Formalisme de la méthode de Crupédix

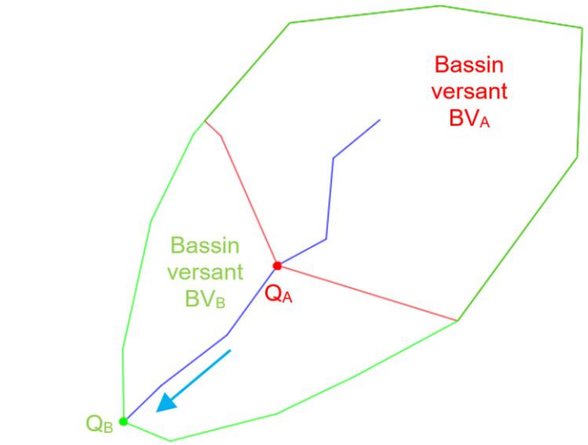
$Q_{10.pointe} = S^{0.8}\left(\frac{P_{J.10}}{80}\right)^2 \times R = \alpha\ S^{0.8}$ Avec $\alpha = \left(\frac{P_{J.10}}{80}\right)^2.R$	23.Q_{10} (m³/s): Débit de pointe décennale 24.S (m²) : Superficie du bassin versant 25.$Pj_{.10}$ (mm) : Pluie journalière maximale annuelle décennale 26.R : Coefficient régional de Crupédix

De ce fait, le choix des concepteurs de la méthode Crupédix était d'inclure la loi de croissance des débits à l'exutoire en fonction de la surface (*i.e.* Q = f(S)), dite de Myer (cf. Tableau 5-32). Le postulat de départ de la méthode de Myer considère que l'évolution du débit de crue décennale « Q_{10} » d'un même cours d'eau depuis l'amont jusqu'à l'exutoire, obéit à une loi de type puissance « $Q_{10} = \alpha\ S_{BV}^{\beta}$ » avec S la surface du bassin versant. Cela signifie que la croissance du débit est plus faible que la croissance des surfaces. Les raisons en sont les suivantes :

- ✓ l'étendue du bassin versant. Une cellule orageuse a peu de chance de couvrir l'entièreté de la surface d'un bassin versant quand celui-ci devient de plus en plus grand ;
- ✓ la longueur du chemin hydraulique. La crue d'un long cours d'eau drainant un grand bassin versant aura davantage de chance d'être amortie (*i.e.* Phénomène d'écrêtement d'un écoulement) après avoir parcourue une distance plus longue.

Le coefficient de Myer « β » est déterminé à partir de l'analyse des débits décennaux pour un même cours d'eau le long de son cours. Par défaut, la bibliographie hydrologique propose une valeur β = 0,8 pour les cours d'eau français et c'est cette même valeur qui est reprise par la formule de Crupédix.

Tableau 5-32 Équation 3 Formalisme de la méthode d'extrapolation de Myer



CG-00-D-MGE-AMOA-ESE-0000-19-0475-A

$Q_A = \alpha\ S_A^{\beta}$

$Q_B = \alpha\ S_B^{\beta}$

$$\frac{Q_B}{Q_A} = \left(\frac{S_B}{S_A}\right)^{\beta}$$

Q_i [m³/s] : Débit du bassin versant à l'exutoire considéré

S_i [m²]: Surface du bassin versant à l'exutoire considéré

α [-] : Coefficient de proportionnalité

β [-]: Coefficient de Myer

Méthode de transition : détermination du débit centennal de pointe

La méthode de transition s'applique pour des bassins versant de taille intermédiaire. Elle exprime simplement un raccordement progressif entre débits décennaux issus de la formule rationnelle et de la formule de Crupédix et implique ainsi le calcul de ces derniers (cf. Tableau 5-33).

Tableau 5-33 Équation 1 : Formalisme de transition– formule mixte

$$Q_{(T)} = \alpha . Q_{(T).R} + \beta \times Q_{(T).C}$$

27. $Q_{(T).R}$: débit issue du formalisme basé sur méthode rationnelle
28. $Q_{(T).C}$: débit issue du formalisme basé sur méthode Crupédix.
29. $\alpha = \frac{10-S}{9}$
30. $\beta = 1 - \alpha$
31. *Rq :* « α » varie linéairement de 1 à 0 lorsque la superficie croît de 1 à 10 km². à l'inverse de « β »

Les fiches hydrologiques des bassins versants rappellent l'ensemble des données d'entrées nécessaires aux calculs des débits de pointes de ruissellement des bassins versants concernés ainsi que les résultats associés. Les fiches hydrologiques sont composées, pour chacun des bassins versants, de quatre items :

- les paramètres hydrologiques ;
- l'occupation du sol ;
- les caractéristiques de l'écoulement principal (pente, longueur, vitesse de l'écoulement…) ;
- les calculs des débits de pointe selon les différentes formules et pour une fréquence décennale et centennale.

Fiche hydrologique de la Bureau

Tableau 5-34 Fiche hydrologique de la Bureau - Paramètres hydrologiques

	Méthode rationnelle		Méthode Crupédix		
	Coefficients de Montana		Pluies journalières	Coefficient régional	
	a	b			
T = 10 ans – Tc <26 mn	278,505	0,469	P10 = 56 mm	R = 1,45	
T = 10 ans – Tc >26 mn	661,380	0,735		Rapport Q100/Q10	
T = 100 ans – Tc <26 mn	299,784	0,334		S <20 km²	1,75
T = 10 ans – Tc >26 mn	1681,020	0,816	P100 = 74 mm	S >20 km²	/

Tableau 5-35 Fiche hydrologique de la Bureau – État du bassin versant

	Surface		Coefficient de ruissellement C pour T=10 ans
Route	0,000 km²	Soit 0 %	1
Zones urbanisées	0,000 km²	Soit 0 %	0,4
Culture	5,896 km²	Soit 85 %	0,70
Prairie	0,318 km²	Soit 5 %	0,55
Zones boisées	0,689 km²	Soit 10 %	0,50
Caractéristiques du bassin versant total	6,903 km²		0,67

Tableau 5-36 Fiche hydrologique de la Bureau - Caractéristiques de l'écoulement principal

Altitude du point haut	402,50 mNGF
Altitude du point bas	325,00 mNGF
Pente moyenne	0,019 m/m
Longueur totale	4,162 km
Vitesse moyenne d'écoulement	0,18 m/s
Temps de concentration Tc pour T = 10 ans	376 mn

Tableau 5-37 Fiche hydrologique de la Bureau - Calcul des débits de pointe

	T=10 ans	T=20 ans	T=50 ans	T=100 ans
Formule rationnelle	Tc = 376 mn – C = 0.67 - Ic = 8 mm/h	/	/	Tc = 349 mn – C = 0,70 - Ic = 14 mm/h
	10,877 m³/s			19,034 m³/s
Formule Crupédix	3,333 m³/s	/	/	5,833 m³/s
Formule de transition	5,929 m³/s	/	/	10,376 m³/s

Tableau 5-38 Fiche hydrologique de la Bureau - Débits de crue retenus et débits spécifiques

	Débits de crue retenus	Débits spécifiques
Q10	5,929 m³/s	8,589 l/s/ha
Q100	10,38 m³/s	15,037 l/s/ha

Fiche hydrologique de l'Ormançon

Tableau 5-39 Fiche hydrologique de l'Ormançon - Paramètres hydrologiques

	Méthode rationnelle		Méthode Crupédix		
	Coefficients de Montana		Pluies journalières	Coefficient régional	
	a	b			
T=10 ans – Tc <26 mn	278,505	0,469	P10 = 56 mm	R = 1,45	
T=10 ans – Tc >26 mn	661,380	0,735		Rapport Q100/Q10	
T = 100 ans – Tc <26 mn	299,784	0,334		S <20 km²	1,80
T = 10 ans – Tc >26 mn	1681,020	0,816	P100 = 74 mm	S >20 km²	/

Tableau 5-40 Fiche hydrologique de l'Ormançon – État du bassin versant

	Surface		Coefficient de ruissellement C pour T = 10 ans
Route	0,000 km²	Soit 0 %	1
Zones urbanisées	0,252 km²	Soit 1 %	0,4
Culture	9,569 km²	Soit 49 %	0,70
Prairie	2,745 km²	Soit 14 %	0,55
Zones boisées	7,075 km²	Soit 36 %	0,50
	Surface		**Coefficient de ruissellement C pour T = 10 ans**
Caractéristiques du bassin versant total	**19,641 km²**		**0,60**

Tableau 5-41 Fiche hydrologique de l'Ormançon – Caractéristiques de l'écoulement principal

Altitude du point haut	403,00 mNGF
Altitude du point bas	320,00 mNGF
Pente moyenne	0,011 m/m
Longueur totale	7,367 km
Vitesse moyenne d'écoulement	0,29 m/s
Temps de concentration Tc pour T = 10 ans	**420 mn**

Tableau 5-42 Fiche hydrologique de l'Ormançon – Calcul des débits de pointe

	T = 10 ans	T = 20 ans	T = 50 ans	T = 100 ans
Formule rationnelle	Tc = 420 mn – C = 0,60 - Ic = 8 mm/h	/	/	Tc = 387 mn – C = 0,65 - Ic = 13 mm/h
	25,549 m³/s			46,020 m³/s
Formule Crupédix	7,693 m³/s	/	/	13,847 m³/s
Formule de transition	/	/	/	/

Tableau 5-43 Fiche hydrologique de l'Ormançon – Débits de crue retenus et débits spécifiques

	Débits de crue retenus	Débits spécifiques
Q10	7,693 m³/s	3,917 l/s/ha
Q100	13,85 m³/s	7,052 l/s/ha

Fiche hydrologique de l'Orge

Tableau 5-44 Fiche hydrologique de l'Orge - Paramètres hydrologiques

	Méthode rationnelle		Méthode Crupédix		
	Coefficients de Montana		Pluies journalières	Coefficient régional	
	a	b			
T = 10 ans – Tc <26 mn	278,505	0,469	P10 = 56 mm	R = 1,45	
T=10 ans – Tc >26 mn	661,380	0,735		Rapport Q100/Q10	
T=100 ans – Tc <26 mn	299,784	0,334		S <20 km²	1,62
T=10 ans – Tc >26 mn	1681,020	0,816	P100 = 74 mm	S >20 km²	/

Tableau 5-45 Fiche hydrologique de l'Orge – État du bassin versant

	Surface		Coefficient de ruissellement C pour T = 10 ans
Route	0,000 km²	Soit 0 %	1
Zones urbanisées	0,487 km²	Soit 4 %	0,4
Culture	9,883 km²	Soit 74 %	0,70
Prairie	2,036 km²	Soit 15 %	0,55
Zones boisées	0,954 km²	Soit 7 %	0,50
Caractéristiques du bassin versant total	**13,360 km²**		**0,65**

Tableau 5-46 Fiche hydrologique de l'Orge – Caractéristiques de l'écoulement principal

Altitude du point haut	377,00 mNGF
Altitude du point bas	329,00 mNGF
Pente moyenne	0,005 m/m
Longueur totale	9,026 km
Vitesse moyenne d'écoulement	0,13 m/s
Temps de concentration Tc pour T = 10 ans	**1138 mn**

Tableau 5-47 Fiche hydrologique de l'Orge – Calcul des débits de pointe

	T = 10 ans	T = 20 ans	T = 50 ans	T = 100 ans
Formule rationnelle	Tc = 1138 mn – C = 0.65 - Ic = 4 mm/h	/	/	Tc = 1054 mn – C = 0,69 - Ic = 6 mm/h
	9,049 m³/s			14,624 m³/s
Formule Crupédix	5,652 m³/s	/	/	9,156 m³/s
Formule de transition	/	/	/	/

Tableau 5-48 Fiche hydrologique de l'Orge – Débits de crue retenus et débits spécifiques

	Débits de crue retenus	Débits spécifiques
Q10	5,652 m³/s	4,231 l/s/ha
Q100	9,16 m³/s	6,856 l/s/ha

b) Relation pluies de projet/débit à la station hydrométrique de Montiers-sur-Saulx

Les méthodologies applicables aux périodes de retour supérieures à 10 ans n'étant pas applicables pour des périodes de retour inférieures, les débits effectifs de rejet des zones Cigéo pour les périodes de retour Tr = 2 ans et Tr = 5 ans sont déterminés à partir des débits spécifiques extraits à la station hydrométrique « La Saulx à Montiers-Sur-Saulx » qui est présentée dans le tableau 5-50, celle-ci drainant une surface bien supérieure à celle des bassins versants des cours d'eau concernés par les sites Cigéo.

Par conséquent, les débits spécifiques biennal et quinquennal extraits de cette station hydrométrique seront inférieurs aux débits spécifiques correspondants des bassins versants des rivières concernées par les zones Cigéo en leur point de rejet.

Ajustement fréquentiel des débits de pointe à une station hydrométrique

À partir d'une série de données de débit de pointe établie sur un nombre suffisant d'années, il devient possible d'associer « théoriquement » une période de retour à un débit de pointe (loi débit de pointe en fonction de la période de retour : $Q_{pointe} = f(Tr)$).

Le cadre d'application de l'analyse fréquentielle des débits de pointe est synthétisé dans le tableau 5-49.

Tableau 5-49 Caractéristiques des ajustements détermination d'un débit de pointe correspondant à une période de retour donnée

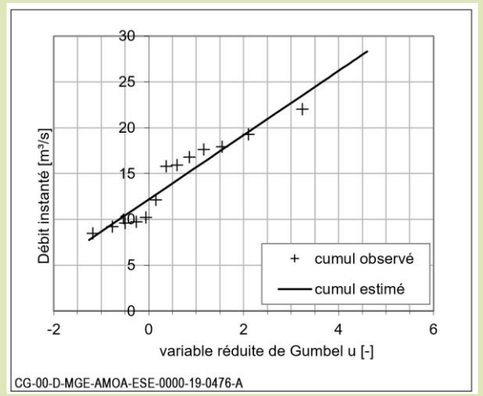
Données brutes	Chronique de débits instantanés
Type de série constituée	Série de *maxima* annuels de débits instantanés
Fréquence empirique	Fréquence de Hazen
Type d'ajustement	Loi de Gumbel
Méthode d'ajustement	Méthode des moments

Dans le cadre du centre de stockage Cigéo, l'ajustement fréquentiel sera utilisé pour déterminer les débits suivants :

- débit instantané de période de retour – Station de Montiers-Sur-Saulx – Tr : 2 ans ;
- débit instantané de période de retour – Station de Montiers-Sur-Saulx – Tr : 5 ans ;
- débit instantané de période de retour – Station de Montiers-Sur-Saulx - Tr : 10 ans.

Les résultats sont présentés dans le tableau 5-50.

Tableau 5-50 Ajustements fréquentiels effectuées à la station de Montiers-sur-Saulx – Détermination de $Q_{2.\ pointe.\ spécifique}$, $Q_{5.\ pointe.\ spécifique}$, et $Q_{10.\ pointe.\ spécifique}$



Les résultats extraits de l'ajustement fréquentiel sont présentés ci-après.

Station hydrométrique	La Saulx à Montiers-sur-Saulx (55)
Exploitant	Météo-France
Période de retour [ans]	2 ans (soit u(Tr = 2 ans) = 0,37) 10 ans (soit u(Tr = 10 ans) = 2,25)
Valeur médiane débit Q_{Tr} [m³/s]	• $Q_{2.\ Montiers\text{-}sur\text{-}Saulx}$ = 13,5 m³/s 32.$Q_{5.\ Montiers\text{-}sur\text{-}Saulx}$ = 17,4 m³/s 33.$Q_{10.\ Montiers\text{-}sur\text{-}Saulx}$ = 20,1 m³/s
Valeurs médianes débit spécifique $Q_{Tr.spécifique.\ Montiers\text{-}sur\text{-}Saulx}$ [l/s/ha]	34.$Q_{2.spécifique.\ Montiers\text{-}sur\text{-}Saulx}$ = 1,8 l/s/ha 35.$Q_{5.spécifique.\ Montiers\text{-}sur\text{-}Saulx}$ = 2,33 l/s/ha 36.$Q_{10.spécifique.\ Montiers\text{-}sur\text{-}Saulx}$ = 2,7 l/s/ha

Ajustement fréquentiel de la pluie journalière à une station pluviométrique

Pour une durée de cumul donnée, à partir d'une série de données de hauteur de pluie précipitée, il devient possible d'associer « théoriquement » une période de retour à une hauteur précipitée (Loi cumul de hauteur de pluie en fonction de la période de retour : Cumul de hauteur de pluie = f(Tr)).

Le cadre d'application de l'analyse fréquentielle des débits de pointe est synthétisé dans le tableau 5-51.

Tableau 5-51 Caractéristiques des ajustements réalisés pour la détermination d'un débit de pointe correspondant à une période de retour donnée

Données brutes	Chronique de pluies journalière à pas de temps fixe non glissant, (relevé pluviométrique chaque jour, à heure fixe) – Pluie non centrée sur 24 h
Type de série constitué	Série de *maxima* annuels sur une journée
Fréquence empirique	Fréquence de Hazen
Type d'ajustement	Loi de Gumbel
Méthode d'ajustement	Méthode des L-moments

Dans le cadre du centre de stockage Cigéo, l'ajustement fréquentiel est utilisé pour déterminer les cumuls de hauteur suivants :

- pluie journalière décennale : PJ10 [mm]. Il s'agit donc de la hauteur de pluie qui a, chaque année, une probabilité Pr = 1/10 de se produire. Sur une longue période d'observation, ce type d'évènement se produit donc « en moyenne » une journée tous les dix ans ;
- pluie journalière centennale : PJ100 [mm]. Il s'agit donc de la hauteur de pluie qui a, chaque année, une probabilité Pr = 1/100 de se produire. Sur une longue période d'observation, ce type d'évènement se produit donc « en moyenne » une journée tous les cent ans.

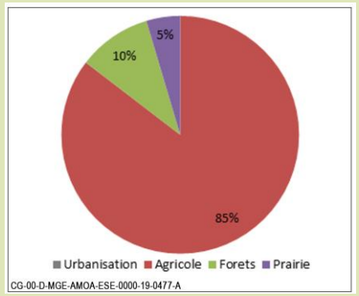
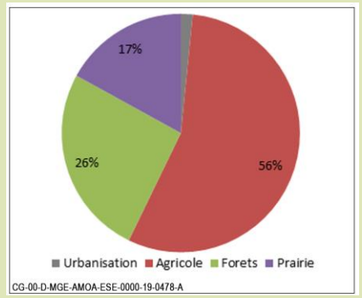
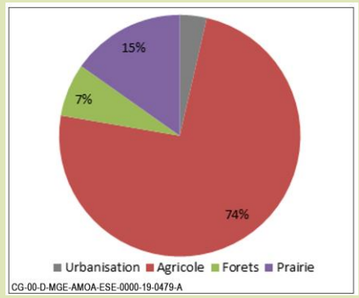
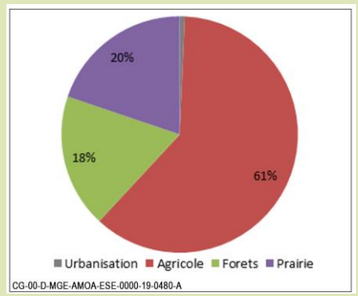
Détermination du paramètre de Crupédix - R

Pour la détermination régionale du paramètre de Crupédix – R, une étude locale des critères globaux conditionnant l'écoulement est nécessaire. Le coefficient régional de Crupédix agrège en fait de nombreuses informations caractéristiques des bassins versants et de la transformation pluie-débit parmi lesquelles les suivants :

- l'occupation des sols, la nature du sol et de la roche mère ;
- l'incidence de la topographie générale des versants ;
- l'incidence de la topographie générale du cours d'eau ;
- la forme du bassin versant.

Le tableau 5-52 synthétise, à l'aide d'indicateurs globaux, l'ensemble des caractéristiques des bassins versants susceptibles d'influencer le régime d'écoulement.

Tableau 5-52 Caractéristiques des bassins versants susceptibles d'influencer le régime d'écoulement

	La Bureau Point de rejet du centre de stockage Cigéo	L'Ormançon Point de rejet du centre de stockage Cigéo	L'Orge Point de rejet du centre de stockage Cigéo	La Saulx Station de Montiers-sur-Saulx
Surface [km²]	6,903	16,144	13,359	75,7
Plus long chemin hydraulique [km]	4,16	7,37	9,03	19,63
Pente des versants	>5 %	>5 %	>5 %	>5 %
Pente moyenne du cours d'eau	1,21	0,76	0,44	0,30
Allongement du bassin versant Indice de compacité Gravelius (1)	1,20	1,36	1,90	1,65
Occupation des sols	 Hypothèse : terrain limoneux $Cr_{10.lim}$ = 0,56 $Cr_{100.lim}$ = 0,62 Hypothèse : terrain argileux $Cr_{10.arg}$ = 0,67 $Cr_{100.arg}$ = 0,70	 Hypothèse : terrain limoneux $Cr_{10.lim}$ = 0,47 $Cr_{100.lim}$ = 0,55 Hypothèse : terrain argileux $Cr_{10.arg}$ = 0,60 $Cr_{100.arg}$ = 0,65	 Hypothèse : terrain limoneux $Cr_{10.lim}$ = 0,54 $Cr_{100.lim}$ = 0,60 Hypothèse : terrain argileux $Cr_{10.arg}$ = 0,65 $Cr_{100.arg}$ = 0,69	 Hypothèse : terrain limoneux $Cr_{10.lim}$ = 0,51 $Cr_{100.lim}$ = 0,58 Hypothèse : terrain argileux $Cr_{10.arg}$ = 0,63 $Cr_{100.arg}$ = 0,67
Géologie – Formation géologique affeurante	Dominante J9a : Portlandien inférieur	Dominante J9a : Portlandien inférieur	Dominante J8b : Kimméridgien supérieur et moyen	Dominante J8b en amont : Kimméridgien supérieur et moyen Dominante J9a en aval : Portlandien inférieur

(1) *L'indice de compacité de Gravelius (1914) se définit comme le rapport du périmètre du bassin au périmètre du cercle ayant la même surface. Plus cet indice se rapproche de l'unité et plus le bassin versant tend à avoir une forme circulaire.*

5.2.1.3.3 Détermination des débits de fuite à l'exutoire

Pour rappel, le débit journalier décennal est obtenu à partir d'un ajustement fréquentiel.

Le calcul du coefficient régional « R » est effectué à partir des données suivantes :

- pluie journalière décennale PJ10, médiane, Cirfontaines = 52,7 mm ;
- débit décennal à l'exutoire Q10, médian, Montiers-sur-Saulx = 20,1 m³/s.

La valeur de coefficient régional de crupédix « R » est alors la suivante :

$$R = 1,45$$

Une fonction de production est utilisée pour l'estimation des débits à l'aide de la formule rationnelle. La formule rationnelle est ici utilisée dans les formalismes suivants :

- formule mixte (bassin versant d'une surface S[km²] telle que 1 <S <10 ;
- formule de passage du débit décennal de pointe d'un bassin versant au débit centennal de pointe.

La fonction de production (ou fonction d'infiltration) est présentée en « partie - Formule rationnelle » pour la période de retour Tr = 10 ans. Pour la période de retour Tr = 100 ans, les coefficients de ruissellement ont tendance à augmenter, ce qui signifie que l'infiltration est moins présente en proportion de la pluie brute précipitée.

Sur la base de ces calculs, les débits spécifiques de fuite utilisés dans le cadre de la conception des filières de gestions des eaux pluviales sont présentés dans le tableau suivant.

Tableau 5-53 Débits spécifiques de fuite à appliquer aux points de rejet des eaux pluviales Cigéo

Période de retour Tr (ans)	Débit spécifique (m³/s)
2	1,78
5	2,30
10	3,00
100	6,00

5.2.1.3.4 Dimensionnement pour les opérations de caractérisation et de surveillance environnementale

Les éléments faisant l'objet de l'étude d'assainissement pluvial sont les suivants :

- diagnostics volontaires archéologiques ;
- fouilles archéologiques ;
- forages profonds de caractérisation en limite de ZIOS (programme ZBS_FOND_UP1) ;
- bases vies principales de Bure (Ferme du Cité) et de Saudron (zone 3 ETE) et de Mandres-en-Barrois (Plateforme bois Lejuc) ;
- neuf bases vies secondaires ;

Le dimensionnement de l'assainissement tient compte des eaux pluviales et des apports d'eau souterraine.

L'étude n'est toutefois pas la même selon les éléments concernés. Les fouilles archéologiques, les plateformes ZBS et les bases vies principales de Bure « la ferme du Cité » et la zone 3 de la base vie « ETE » feront l'objet d'une étude hydraulique de niveau étude de faisabilité. La base vie principale de Mandes-en-Barrois fera simplement l'objet d'une analyse de la vulnérabilité de la ressource en eau tout comme les bases vies secondaires. Quant aux diagnostics archéologiques, il sera seulement vérifié que les travaux ne recoupent pas le toit de la nappe.

Les principaux guides méthodologiques ayant été utilisés pour cette étude sont les suivants :

- guide technique de l'assainissement routier (Setra - 2006) désigné ultérieurement par GTAR (113) ;
- guide technique pollution d'origine routière (Setra – 2007) désigné ultérieurement par GTPOR (114) ;
- guide des chantiers routiers et préservation du milieu aquatique (Setra – 2007) (115) ;
- guide technique des bonnes pratiques en lien avec la protection des milieux aquatiques en phase chantier de l'AFB de février 2018 (116).

Par ailleurs, les services de l'État des départements de la Meuse et de la Haute-Marne ont demandé de suivre les prescriptions de la note de doctrine « la gestion des eaux pluviales en région Grand Est » de février 2020 (117) qui énonce la politique régionale en matière de gestion des eaux pluviales.

Ce document s'adresse aux acteurs de l'aménagement (urbanistes, architectes, bureaux d'études, aménageurs publics ou privés, collectivités) concernés en particulier par un dossier au titre de la loi sur l'eau situé dans la région Grand Est. Fruit d'un travail collégial entre les services de l'État (DREAL, DDT…), les Agences de l'eau, le SAGE III Nappe Rhin, et avec l'appui du Cerema, ce document traduit la volonté des acteurs institutionnels d'harmoniser les pratiques à l'échelle de la région Grand Est et de donner une traduction concrète des plans d'adaptation au changement climatique des trois comités de bassin.

Trait d'union entre les SDAGE, le SRADDET, et les PGRI, il décline la séquence « Éviter, Réduire, Compenser » dans une opération d'aménagement. Il réhabilite les fonctions de filtration du sol et intègre la notion de risque acceptable dans la conception des projets. Il promeut la gestion intégrée des eaux pluviales, qui est une priorité des programmes d'intervention des agences de l'eau.

Ce document intègre en particulier la gestion des eaux pluviales en amont, solution à favoriser dans la conception des projets.

Il vise à :

- énoncer la politique régionale en matière de gestion des eaux pluviales ;
- fixer des préconisations techniques homogènes relatives à la conception des projets et rappeler certains éléments à expliciter dans les dossiers ;
- présenter quelques solutions en gestion intégrée qui ont démontré leur efficacité.

Il est fondé sur la prise en compte des différents niveaux de service : gestion des pluies courantes (problématiques pollution, adaptation au changement climatique, recharge des nappes), moyennes à fortes et exceptionnelles (protection des biens et des personnes). Les systèmes de gestion des eaux pluviales doivent remplir différents rôles en fonction des conditions pluviométriques depuis les pluies faibles jusqu'aux pluies exceptionnelles.

La pluie courante est une pluie faible correspondant *a minima* à une lame d'eau de 10 mm tombée sur une période de 24 heures (période de retour de l'ordre de 1 mois). Elle correspond au volume minimum de pluie à infiltrer ou réutiliser dans l'enceinte du projet, dans les 24 heures. La gestion de cette hauteur d'eau journalière correspond à un abattement moyen de 80 % du volume d'eau tombé dans la région Grand Est.

La pluie moyenne correspond au niveau de service N2. Il faut pouvoir gérer cette pluie sur l'emprise du projet en excluant tout rejet vers des réseaux.

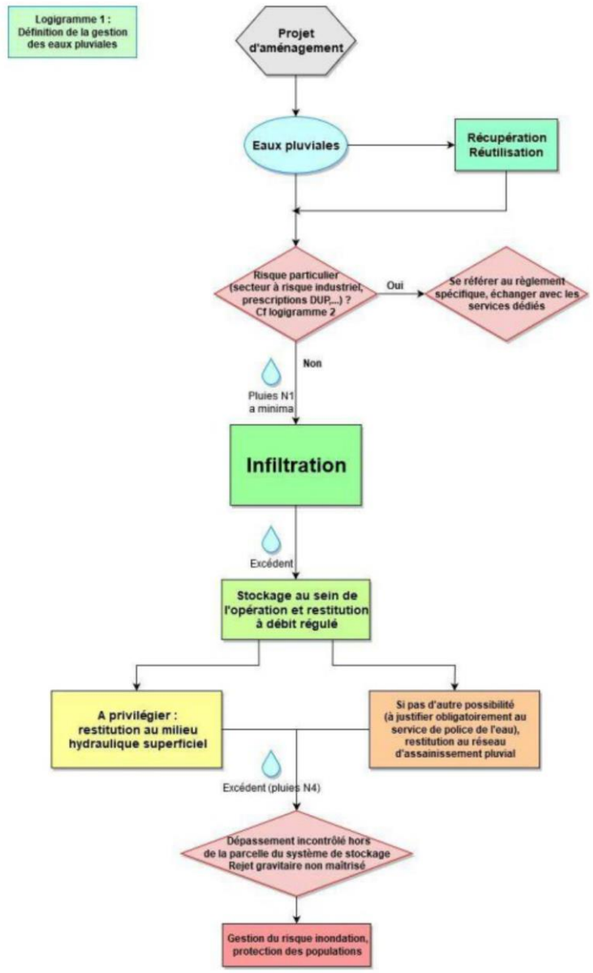
Ces deux premiers niveaux de service correspondent à près de la totalité du volume annuel de pluie que peut recevoir une surface. Le projet devra prévoir, pour ces niveaux, le principe de gestion de l'eau sur la parcelle et la maîtrise de la pollution.

La pluie forte correspond au niveau de service N3. Elle correspond aux pluies de période de retour au minimum de 10 ans (à définir par le maître d'ouvrage). Les ouvrages de stockage peuvent commencer à déborder, et on peut avoir une inondation des chaussées par exemple, mais pas des habitations. La pluie est toujours gérée sur l'emprise du projet.

La pluie exceptionnelle, de période de retour au-delà de la pluie forte retenue, et *a minima* 30 ans, correspond à un risque fort pour la sécurité des populations ; c'est le niveau de service N4.

Le projet doit prévoir un abattement volumique par infiltration le plus fort possible, calculé selon les capacités du site ; cet abattement ne pourra être inférieur à la lame d'eau de la pluie courante de 10 mm/jour.

La figure 5-43 présente la méthodologie générale définie par la doctrine du Grand Est.



CG-01-D-MGE-CEGI-ESE-0100-23-0093-A

Figure 5-43 Logigramme indiquant l'articulation de la méthodologie pour définir le partage de destination des eaux

La méthodologie de gestion des eaux pluviales s'appuie sur les principes suivants :

- prendre en compte la situation avant-projet : préservation du sol pour permettre l'infiltration, ne pas aggraver les écoulements vers l'aval, désimperméabiliser et déconnecter les surfaces actives existantes ;
- considérer l'infiltration toujours possible *a minima* dans la couche superficielle qui se comporte « comme une éponge » pour les pluies courantes, nonobstant des capacités d'infiltration en profondeur. Il faut donc préserver les sols et privilégier les systèmes ouverts/enherbés, les plus résilients, écologiques et présentant d'autres aménités. Les limites et les impossibilités doivent être argumentées et démontrées par des études spécifiques ;
- gérer les eaux pluviales « au plus près d'où elles tombent » → à la parcelle, au groupement de parcelles, au sous-ensemble du quartier en priorité (adaptation des espaces publics proches) ;
- admettre un « risque acceptable » : toutes les eaux pluviales sont polluées ; elles se chargent au fur et à mesure de leur circulation sur les surfaces urbaines. Néanmoins ce risque ne doit pas être exagéré et mis en relief avec les conséquences d'un rejet dans le milieu superficiel (canalisations, gestion traditionnelle, concentration et augmentation des flux rejetés...) avec un prétraitement dont les limites sont aujourd'hui connues.

Les hypothèses de dimensionnement pour la gestion des eaux pluviales sont les suivantes :

- stations pluviométriques de Cirfontaines prises en référence ;
- coefficients de Montana pris sur la période 1997-2018 :
  - ✓ pluies de durées 6 min à 1 h/30 min à 12 h/6 h à 24 h ;
  - ✓ durées de retour hebdomadaire/bi-mensuelle/mensuelle/trimestrielle/semestrielle/ annuelle/bisannuelle/ 5 ans/10 ans/20 ans/30 ans/50 ans/100 ans.
- hauteurs de pluies maximales journalières avec durée de retour 5/10/20/30/50/75/100 ans ;
- pluies de référence définie pour la pluie décennale => correspond à la contrainte minimale définie dans la doctrine Grand Est ;
- niveaux de services attendus comme objectifs :
  - ✓ les pluies courantes (10 mm de pluie en 24 heures) sont infiltrées ;
  - ✓ *a minima* une pluie décennale est gérée en l'absence de zonage pluvial plus contraignant.
- débit spécifique de rejet dans les eaux superficielles : régulé afin de ne pas dépasser par défaut le débit qu'aurait généré la pluie biennale sur la surface du projet ;
- régulation des apports dans le milieu récepteur : seuil qualitatif suivant le différentiel entre un point amont et aval de 50 mg/l de MES en moyenne sur 24 heures (sur la base de trois analyses) ;
- débit des ruissellements des bassins versants naturels interceptés :
  - ✓ délimitation des basins versant naturels faite sur base IGN et MNT (pas de 1 mètre) ;
  - ✓ formule rationnelle pour des bassins versants naturels d'une surface allant jusqu'à 1 km^2 ;
  - ✓ formule de transition pour des bassins versants de 1 km^2 à 10 km^2 qui fait le lien avec la formule rationnelle et la formule Crupédix ;
  - ✓ formule Crupédix pour des bassins versants de superficie supérieure à 10 km^2 ;
  - ✓ coefficients de ruissellement : base GTAR, pluie décennale (terrains argileux) ;
  - ✓ débits spécifiques des bassins versants concernés définis en fonction des débits de pointe calculés pour les occurrences de 2, 5, 10 et 100 ans de période de retour.

Le dimensionnement des ouvrages de collecte a été réalisé sur la base des hypothèses méthodologiques suivantes :

- utilisation formule de Manning-strickler ;
- coef de ruissellement rugosité issues du GTAR ;
- vitesses maximales dans les ouvrages d'assainissement pluvial : 4 m/s (hypothèse sécurisante) dans des ouvrages en béton et de 1,5 m/s dans des ouvrages enherbés.

Le dimensionnement des ouvrages de rétention a été réalisé sur la base des hypothèses méthodologiques suivantes :

- utilisation méthode des pluies ;
- perméabilité moyenne des sols : 35 essais MATSUO réalisés ;
- facteurs de sécurité définis localement afin de ne pas surestimer les capacités d'infiltration du sol :
  - ✓ facteur de sécurité de 5 avec la perméabilité mesurée au point bas du lot 1 de fouilles archéologiques ;
  - ✓ concernant la perméabilité au droit de la GNT des ZBS, elle est considérée comme étant de 1,10-5 m/s.

Concernant les apports des eaux souterraines, la méthode d'analyse des incidences s'appuie sur les éléments suivants :

- résultats disponibles sur les piézomètres de suivi plus hautes eaux connues réalisés par Andra permettant d'évaluer si des arrivées d'eau sont recoupées par les ouvrages de gestion des eaux ou par les travaux d'archéologie ;
- à défaut de données relevés piézomètriques, les données d'Infoterre relatives à l'épaisseur moyenne de zone non saturée (BRGM) ont été utilisées.

Le volume d'arrivée d'eau souterraine en cas de recoupement avec la nappe a été estimé par une approche volumétrique de l'apport des bassins versants. En cas de pompage, l'incidence indirecte sur les zones humides est estimée à dire d'expert.

5.2.2 Incidences qualitatives

Pour que le centre de stockage Cigéo soit compatible avec les objectifs du schéma directeur d'aménagement et de gestion des eaux Seine Normandie, l'étude des impacts vise à orienter la conception des différentes opérations du projet global Cigéo pour que ses rejets respectent le bon état des cours d'eau à l'aval des points d'exutoire.

Pour rappel, l'ensemble des valeurs seuils permettant de définir l'état écologique et chimique des eaux de surfaces est défini par l'arrêté du 27 juillet 2015 (92).

L'objectif de bon état chimique et écologique des masses d'eau conditionne la conception des dispositifs de traitement des eaux pluviales et des effluents du centre de stockage Cigéo.

La conception des filières de traitement des effluents conventionnels liquides (eaux usées et industrielles, eaux pluviales, eaux pluviales de verses, eaux de fond) prévoit la conformité aux textes législatifs ou normatifs en vigueur. Ceci implique que chaque effluent puisse, après traitement, garantir de respecter les valeurs de bon état écologique et chimique au sens de la DCE (Directive-cadre sur l'eau) (72). Afin de justifier la performance des traitements, l'Andra s'est adjoint les services d'un industriel concepteur/réalisateur/exploitant d'installations de traitement d'effluents liquides. L'état des connaissances sur le sujet, le retour d'expérience des exploitants, ainsi que les essais pilotes réalisés sur les effluents spécifiques, démontrent que la conformité des rejets du centre de stockage Cigéo est compatible en toutes circonstances (y compris en période d'assec des milieux récepteurs) avec les objectifs de la Directive-cadre sur l'eau.

Pour les autres maîtres d'ouvrage du projet global Cigéo, le respect du bon état chimique et écologique des masses d'eau détermine aussi la conception de chaque opération.

5.2.2.1 Les eaux pluviales

5.2.2.1.1 Gestion de la pollution chronique

Le principe de la gestion de la pollution chronique des eaux de ruissellement est de traiter le premier flot d'eaux pluviales susceptible de collecter la majorité des polluants accumulés sur les surfaces imperméabilisées.

À Cirfontaines-en-Ornois, cet abattement de la pollution est atteint pour une pluie de cumul de hauteur 11 mm, soit très proche de la pluie de période de retour Tr = 2 ans et de durée 15 mn.

C'est pour cette raison que chaque bassin de traitement qualitatif des eaux des zones puits et descenderie est dimensionné par la méthode des pluies pour une pluie de fréquence de retour de deux ans :

- en zone descenderie et en zone puits, ces bassins sont dédoublés afin de permettre la gestion d'une pollution accidentelle dans un dispositif étanche où il sera possible de pomper les eaux polluées dans un délai optimal pour les envoyer dans une filière de traitement adaptée. Ce principe permet de maintenir l'exploitation, à savoir d'assurer notamment le traitement de la pollution chronique avant transfert des eaux vers le bassin quantitatif et cela malgré un confinement d'une pollution accidentelle ou des eaux d'extinction incendie par l'un des deux bassins. La pluie de retour choisie pour l'abattement de la pollution permet de répondre à l'orientation deux du Schéma directeur d'aménagement et de gestion des eaux Seine Normandie « Maîtriser les rejets par temps de pluie dès l'origine du ruissellement » (75). Avec ce doublement et les marges de conception retenues, le dispositif est sécuritaire puisqu'il permet en réalité de collecter une pluie de 22 mm ;
- chaque bassin d'écrêtement dit bassin quantitatif des zones puits et descenderie est dimensionné par la méthode des pluies pour une pluie de fréquence de retour centennale et pour un débit spécifique de 6 $L.s^{-1}.ha$-1. La pluie centennale et le débit considéré permettent de respecter les prescriptions du guide n° 13 de l'Autorité de sûreté nucléaire (110) qui précise au chapitre 2.3.3.1 : « pour les réseaux rejetant dans un autre réseau, un étang ou un cours d'eau dont le niveau est sensible aux pluies locales, le comportement de ces exutoires en réponse à des pluies de référence définies pour les différents bassins versants situés en amont des exutoires ou, à défaut, le débit ou le niveau d'eau centennal du milieu récepteur » ;
- chaque bassin quantitatif de la liaison intersites est dimensionné par la méthode des pluies pour une pluie de fréquence de retour décennale et pour un débit spécifique de 3 $L.s^{-1}.ha^{-1}$;
- chaque bassin quantitatif de l'installation terminale embranchée est dimensionné par la méthode des pluies pour une pluie de fréquence de retour décennale et pour un débit spécifique de 3 $L.s^{-1}.ha^{-1}$et un débit de fuite minimum de 10 $L.s^{-1}$. La prise en compte de la pluie décennale est compatible avec le défi 8 du SDAGE (« Limiter et prévenir le risque d'inondation »).

Tableau 5-54 Types de pluie utilisés pour la conception et valeurs ajoutées

Type de pluie	Objectif	Période de retour	Commentaires
« Famille de pluies bloc d'intensité constante sur une certaine durée de pluie » **À période de retour fixée, intensité pluviométrique et durée de pluie sont liées par la loi de Montana.**	Gestion du risque d'inondation et non dégradation de la morphologie des cours d'eau. Les calculs d'écrêtement permettent de dimensionner des bassins capables de maîtriser l'impact de l'imperméabilisation et de limiter ainsi le risque d'inondation à l'aval.	2, 5, 10, 100 ans	Il s'agit ici de tester autant de pluies que nécessaire à la bonne conception des bassins. La pluie dimensionnante est la pluie qui nécessite le plus grand volume « tampon », c'est-à-dire de rétention avant rejet à débit régulé.
« Pluie qualitative » ou « Pluie de 11 mm »	Traiter la pollution chronique : Hauteur de pluie correspondant au premier flot d'eaux pluviales susceptibles de collecter la majorité des polluants accumulés sur les surfaces imperméabilisées. Le bassin qualitatif doit être en mesure de stocker le volume nécessaire pour traiter la charge polluante entrante.	-	Les résultats en termes de volume sont proches de la pluie de période de retour Tr = 2 ans et de durée 15 mn. En zone descenderie et zone puits, les bassins qualitatifs sont doublés. Ce principe permet soit de gérer une pollution accidentelle ou des eaux d'extinction incendie concomitamment au traitement de la pollution chronique (pluie de 11 mm), soit de collecter une pluie de 22 mm (sécuritaire)).

Type de pluie	Objectif	Période de retour	Commentaires
« Pluie de période de retour : 2 ans de durée 2 heures »	Gérer une pollution accidentelle ou la récupération d'eaux d'extinction incendie Intervention pour une pollution accidentelle ou pour des eaux d'extinction incendie	2 ans	On suppose qu'un déversement de pollution ou une extinction incendie a lieu, et que la vanne de sortie du bassin qualitatif devant récupérer la pollution est en position « fermée ». Ces bassins qualitatifs sont en fonctionnement continu et sont, de fait, équipés de bypass, en amont et en aval, permettant d'isoler le bassin ayant piégé une pollution accidentelle ou des eaux d'extinction incendie. Le scénario critique consiste donc au stockage d'une pollution accidentelle ou des eaux d'extinction incendie concomitante à une pluie de durée deux heures et de période de retour Tr = 2 ans tout en permettant le maintien de l'exploitation et le traitement de la pollution chronique (pluie de 11 mm), ce que permet le principe de redondance de ces bassins. Il est à noter que les marges de conception retenues actuellement permettent pour chaque bassin de reprendre soit deux épisodes de pollution chronique (2*11 mm) soit une pollution accidentelle ou la récupération des eaux incendie avec concomitance à une pluie de durée deux heures et de période de retour de deux ans.

5.2.2.1.2 Gestion d'une pollution accidentelle ou des eaux incendies

Quand une pollution survient en dehors des aires sensibles évoquées précédemment, le réseau de collecte des eaux pluviales étant imperméable, le flux de polluant aboutit à la filière de gestion des eaux pluviale intégralement.

Ces bassins qualitatifs doivent de fait permettre le confinement d'une pollution accidentelle ou des eaux d'extinction incendie. Le dimensionnement correspondant consiste au stockage d'une pollution concomitante à une pluie de durée deux heures et de période de retour deux ans considéré comme scénario critique. Les eaux confinées sont ensuite pompées dans des camions-citernes et évacuées à l'extérieur du site pour dépollution par une filière de traitement spécifique.

Ces bassins qualitatifs sont doublés et dimensionnés à l'identique pour chaque zone descenderie et puits. Ce principe permet de maintenir l'exploitation, à savoir d'assurer notamment le traitement de la pollution chronique avant transfert des eaux vers le bassin quantitatif et cela malgré un confinement d'une pollution accidentelle ou des eaux d'extinction incendie par l'un des deux bassins.

Les marges de conception retenues actuellement permettent pour chaque bassin de reprendre soit deux épisodes de pollution chronique (2 × 11 mm) soit une pollution accidentelle ou la récupération des eaux incendie avec concomitance à une pluie de durée deux heures et de période de retour de deux ans. Les bassins quantitatifs ont une capacité globale de stockage de l'ordre de 20 000 m³ en zone descenderie et 10 000 m³ en zone puits.

Le bypass, en amont et en aval, permet d'isoler le bassin ayant piégé une pollution accidentelle ou des eaux d'extinction incendie et pouvoir faire intervenir une société spécialisée pour les évacuer.

Le bypass est également utilisé pour assurer les opérations d'entretien sur chaque bassin, de manière non concomitante et en période favorable (en dehors d'épisodes pluvieux importants).

Hors pollution accidentelle, les eaux pluviales passent sur des filtres à sable, les eaux collectées sont dirigées vers le bassin quantitatif pour un rejet régulé vers le milieu naturel (dans la Bureau et l'Orge pour la ZD, dans l'Ormançon pour la ZP et la LIS, l'Orge pour l'ITE).

Les bassins quantitatifs permettent quant à eux d'écrêter les pluies majeures (temps de retour 10 ans et 100 ans) et ainsi assurer la non-aggravation des risques d'inondation.

Les principes de conception évoqués permettent bien de confiner une pollution accidentelle ou des eaux d'extinction incendie tout en permettant le traitement de la pollution chronique des eaux de ruissellement. Pour rappel, les premières sont confinées et évacuées par camion-citerne, les secondes sont, après traitement, stockées vers des bassins quantitatifs dimensionnés de manière conséquente (pluie centennale) avant un rejet régulé vers le milieu naturel. De fait, les pollutions chronique ou accidentelle des eaux de ruissellement ne seront pas rejetées sans traitement dans le milieu naturel sans transiter préalablement par ces bassins.

Les dispositifs de gestion des eaux pluviales sont dimensionnés et équipés pour obtenir un rejet d'eau compatible avec les critères de bon état écologique et chimique des eaux superficielles au sens de la directive-cadre sur l'eau (DCE) (72).

Les surfaces collectées d'eau pluviales qui rejoignent les différents milieux naturels sont les suivantes :

- la Bureau : nord de la zone descenderie et une partie de la LIS ;
- l'Orge : sud de la zone descenderie, la TFF et l'ITE ;
- l'Ormançon : La zone puits et une partie de la LIS.

La filière est composée de séparateurs hydrocarbures sur les emplacements les plus à risque (parkings, etc.) avant de rejoindre les bassins qualitatifs où une première décantation aura lieu pour retirer les MES (elles-mêmes composées de matière organique, de métaux et d'autres polluants). Enfin, le traitement sera complété par une filtration sur sable, pour retirer la fraction particulaire résiduelle.

Les concentrations des eaux pluviales en entrée de filière de traitement, pour la zone descenderie et la zone puits sont présentées dans le tableau 5-55.

Tableau 5-55 Tableau des concentrations des eaux pluviales (hors eaux de ruissellement des verses) en entrée de filière de traitement (données issues de l'AESN, 2013)

Paramètres étudiés	Concentration des eaux en entrée de filière	
	Zone descenderie	Zone puits
DCO	160 mg/l	125 mg/l
MES	235 mg/l	190 mg/l
HCT	20 µg/l	40 µg/l

Les concentrations en entrée de filière ont été estimées en fonction du trafic routier présent sur le site (différent entre les deux zones). Les concentrations en sortie des filières sont en cohérence avec le bon état écologique des cours d'eau. Les normes de rejet des eaux pluviales sont présentées au chapitre 5.2.2.6.1 du présent volume.

Le système de gestion des eaux pluviales lié à la mise en place des opérations de caractérisation et de surveillance environnementale, a été dimensionné dans le respect de la Doctrine Grand Est de gestion des eaux pluviales (118) (infiltration des eaux recueillies lors d'une pluie décennale, facteur de charge inférieur à 50, temps de vidange des bassins inférieur à quatre jours, épaisseur de zone non saturée sous le fond du bassin d'infiltration d'un mètre au minimum, adaptation du système pour des perméabilités supérieures à 10^{-3} m/s).

5.2.2.2 Les eaux de ruissellement des verses

Les dispositifs de gestion des eaux de ruissellement des verses sont dimensionnés et équipés pour obtenir un rejet d'eau compatible avec les critères de bon état écologique et chimique des eaux superficielles au sens de la directive-cadre sur l'eau (DCE) (72). Le milieu récepteur des eaux de verses traitées est l'Ormançon.

Les concentrations des eaux de ruissellement des verses en entrée et en sortie de filière de traitement sont présentées dans le tableau 5-56.

Tableau 5-56 Tableau des concentrations des eaux de ruissellement des verses en entrée et en sortie de filière de traitement sur la zone puits

Paramètres étudiés	Concentration des eaux de ruissellement des verses		Rendement minimal attendu***
	Concentration estimée en entrée de filière	Concentration cible en sortie de filière***	
DCO	81 mg/l	30 mg/l	>63 %
MES	1 900 mg/l	35 mg/l	>98 %
Cu	10 µg/l	1 µg/l	>90 %
Pb	24 µg/l	1,2 µg/l	>95 %
Zn	170 µg/l	7,8 µg/l	>95 %
HCT	100 µg/l	1 000 µg/l	-
Cd	0,08 µg/l	0,25 µg/l	-
Al	61 mg/l	0,1 mg/l	>99 %
Sulfate*	2 000 mg/l	250 mg/l	>88 %
Fe	52 mg/l	0,1 mg/l	>99 %
COT	1 mg/l	7 mg/l	-
DBO_5	1 mg/l	6 mg/l	-
NO_3^-	2 mg/l	50 mg/l	-
NH_4^+	0,5 mg/l	0,5 mg/l	0 %
NO_2^-	0,2 mg/l	0,3 mg/l	-
P_{tot}	1 mg/l	0,2 mg/l	>83 %
As	20 µg/l	0,83 µg/l	>96 %
Benzo(a)pyrène	<0,005 µg/l	0,001 µg/l **	-
Cr	95 µg/l	3,4 µg/l	96 %
Hg	<0,005 µg/l	0,07 µg/l	-
Ni	83 µg/l	4 µg/l	95 %
Se	2 µg/l	10 µg/l	-
Uranium	1,7 µg/l	30,0 µg/l	-

** Il a été identifié que les sulfates sont présents dans les eaux de verse dans des quantités importantes (présence d'argilite dans le sol). Même si ce paramètre ne possède pas de norme d'un point de vue environnementale, le projet global Cigéo prend les dispositions nécessaires pour traiter ce paramètre pour ne pas perturber l'activité aquatique du milieu. Il est même précisé que certaines eaux minérales ont des concentrations similaires à l'effluent brut en sulfate, ce dernier a donc un impact limité sur la santé. Afin de se fixer sur une valeur, la référence de qualité des eaux potables de l'OMS a été choisie comme limite à respecter, soit 250 mg/l.*

*** Valeur limite de quantification et non une NQE (1.10-4 µg/l).*

**** Dans certains cas, la concentration cible est supérieure à celle de l'eau de verse brute. En effet, les valeurs cibles retenues permettent d'assurer le respect du bon état chimique et écologique des cours d'eau, mais les eaux à traiter peuvent présenter initialement des concentrations plus faibles que ces cibles. Dans ce cas, seul un suivi de ces paramètres sera réalisé pour s'assurer du respect de ces valeurs cibles, mais il n'y aura pas de traitement spécifique nécessaire sur ces paramètres.*

Les concentrations des eaux de ruissellement des verses à traiter sont issues d'études/expérimentations menées afin notamment de consolider/optimiser la filière de traitement dans des conditions de montage et de géométrie de verses plus proches des futures verses du centre de stockage Cigéo.

Du fait des principes constructifs retenus et du contrôle qualité associé, la percolation des eaux dans les verses sera très faible.

La chimie des eaux contenues au sein des argilites (eaux porales naturelles, eaux de percolation…) dépend principalement de la nature et de la teneur en minéraux, des processus d'oxydo-réduction (notamment en présence ou non d'oxygène) et des processus de sorption[33] qui peuvent piéger des éléments chimiques en surface de certains minéraux. Les minéraux argileux, de par leur nature, peuvent ainsi incorporer et retenir à leur surface de nombreux éléments chimiques (cations alcalins et alcalino-terreux, métaux, terres rares…). Quant aux sulfures (qui par oxydation se retrouvent sous forme de sulfates), ils contiennent souvent des éléments traces métalliques (As, Ni, Co, Pb, Zn, Cu, Cd, Mo…), de même que la matière organique. Différentes études réalisées à partir d'argilites excavées depuis le Laboratoire souterrain ont établi que lorsque les argilites sont exposées à l'atmosphère (*i.e.* En présence d'oxygène), notamment à la lixiviation par les eaux de pluie (Scholtus *et al.*, 2009 (119))), il se produit les processus géochimiques suivants :

- l'oxydation des sulfures et la dissolution partielle des carbonates dont le pouvoir tampon permet de neutraliser sur le long terme l'acidité produite par l'oxydation des sulfures : des expériences en laboratoire (Marty *et al.*, 2018 (120)) ont en effet montré que des phénomènes de drainage acide liés à l'oxydation des pyrites ne peuvent pas se produire dans les argilites du Callovo-Oxfordien grâce à la neutralisation du pH par les carbonates. Cela est confirmé par un suivi en dispositif d'essai en colonne sur le terrain toujours en cours depuis 2014 (Tremosa *et al.*, 2020) (121). L'oxydation des sulfures génère néanmoins de larges quantités de sulfates ;
- l'oxydation des pyrites et la minéralisation de la matière organique peuvent libérer les éléments traces métalliques qu'ils contiennent.

[33] Phénomène physico-chimique au cours duquel une espèce chimique se concentre à la surface d'un solide (dans ce cadre des minéraux) conduisant à son immobilisation.

Il a été montré que les concentrations des éléments métalliques dans les eaux sont limitées, ces éléments étant rapidement réabsorbés sur les minéraux secondaires formés (oxyhydroxydes) (Tremosa *et al.,* 2020).

Les matériaux mis en verses peuvent générer des composés indésirables comme certains métaux, comme identifié sur des essais laboratoires et dont la caractérisation est présente dans le tableau ci-dessus. Ce sont principalement les quantités de sulfates et de matières en suspension ainsi que quelques espèces ioniques cumulées (conductivité) dans les eaux de ruissellement et de percolation issues des verses qui sont pris en compte et font l'objet d'attention vis-à-vis d'incidences possibles sur les milieux aquatiques.

Les flux journaliers de pollution apportés par les eaux de verses sont difficilement quantifiables puisqu'ils dépendant directement de la pluviométrie. Il est proposé dans le chapitre 5.5.2 du volume IV de l'étude d'impact de raisonner de la manière suivante :

- pour le flux moyen, les calculs reposent sur un volume d'eau correspondant à la pluviométrie annuelle divisée sur 365 jours. Ainsi, cela sera représentatif de la pollution moyenne que recevra le cours d'eau tout au long de l'année ;
- pour le flux maximum, les calculs sont basés sur le débit maximal qui pourra être rejeté au milieu naturel, correspondant au débit rejeté en sortie du bassin quantitatif. Pour cela, le volume a été calculé sur un rejet pendant 24 heures consécutives au débit de fuite à hauteur maximale dans l'ouvrage, soit 96 l/s en phase T1. En phase exploitation, le débit de fuite a été calculé en fonction de la surface active supplémentaire de zone de stockage de verse, deux valeurs qui sont proportionnelles entre elles.

La plateforme de stockage des verses est sur une surface étanche où les eaux pourront être collectées vers la filière de traitement que se compose de prétraitements (décantation avec coagulation/floculation, filtres 10 microns), puis affinage par la mise en place d'une osmose inverse basse pression (nanofiltration).

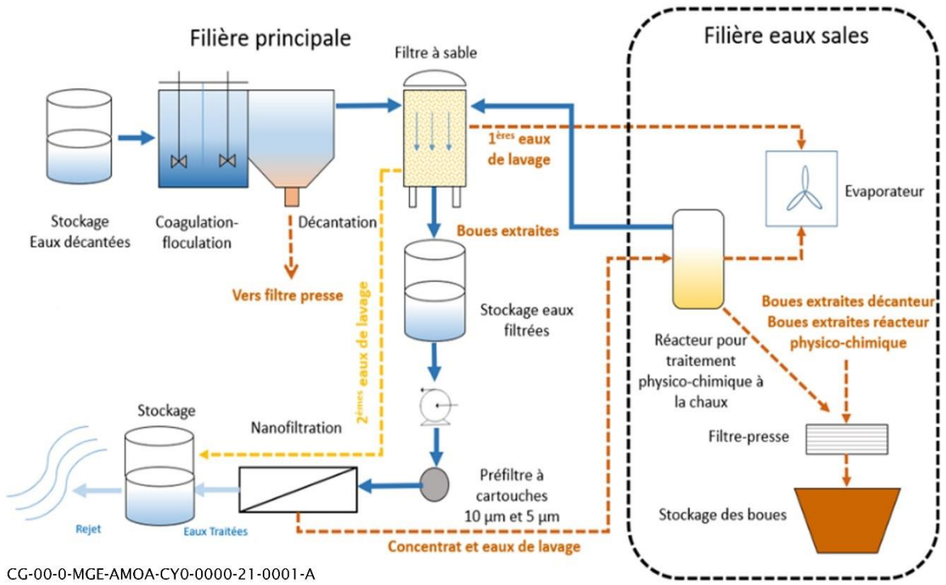


Figure 5-44 *Schéma illustratif de la filière de traitement qualitatif des eaux de ruissellement des verses*

Le traitement des eaux de verse permettra d'assurer une qualité suffisante de l'eau pour être rejetée. Le volume d'eau traité correspond au volume que les bassins qualitatifs peuvent recevoir, soit une pluviométrie de 22 mm (11 mm × 2 bassins). Ce seront les eaux les plus chargées en cas de fortes précipitations.

5.2.2.3 Les eaux de fond

Les eaux de fond regroupent les eaux d'exhaure conventionnelles (infiltrations souterraines suite aux travaux de creusement) et les eaux industrielles (résultant du fonctionnement ou du nettoyage des installations), générées en zone souterraine. Elles regroupent également les eaux liées au fonctionnement du tunnelier.

L'ensemble de ces eaux produites et collectées au fond fait l'objet d'une gestion (collecte, traitement) mutualisée avant réutilisation de l'eau dans les procédés industriels (nettoyage ou autre) ou avant rejet au milieu naturel. Les eaux générées en zone souterraine sont remontées quotidiennement en surface à l'aide de réseaux de relevage.

Du fait de leur réutilisation, le rejet des eaux de fond est limité, réduisant ainsi l'impact sur le milieu naturel. Ces eaux traitées seront stockées sur une durée maximale de sept jours pour être réutilisées. Au-delà, il y a des risques de développement bactérien et les eaux traitées rejoindront le milieu naturel. Les eaux de fond épurées rejoignent alors La Bureau en zone descenderie et à l'Ormançon en zone puits selon les mêmes règles de respect des niveaux de bon état chimique des cours d'eau.

Les dispositifs de traitement des eaux de fond sont dimensionnés en prévision de la charge hydraulique de pointe à traiter sur chacune des deux zones descenderie et puits au cours des phases de construction initiale et de fonctionnement du centre de stockage Cigéo.

Compte tenu des niveaux de rejet, la filière de traitement proposée est la suivante :

- un traitement primaire : prétraitements des eaux brutes permettant la récupération mécanique des éléments les plus accessibles, avec :
  - ✓ une première décantation pour éliminer les particules en suspension facilement décantables ;
  - ✓ un poste de refoulement.
- un traitement secondaire, avec :
  - ✓ une coagulation/floculation à l'aide de sels d'aluminium ou de fer ;
  - ✓ une décantation lamellaire ;
  - ✓ une filtration à 10 µm pour finaliser le traitement.
- un traitement tertiaire, avec une désinfection à la javel pour assurer une absence de micro-organismes ainsi qu'une rémanence dans les cuves de stockage.

Les concentrations des eaux de fond en entrée et en sortie de filière de traitement, pour la zone descenderie et la zone puits sont présentées dans le tableau 5-57.

Les concentrations en entrée de filière ont été simulées par constitution d'un échantillon représentatif à base de boues de carbonates de calcium issues d'une station d'eau potable, de laitance de béton et d'effluent pétrochimique, et de concentrat d'osmose inverse.

Tableau 5-57 Tableau des concentrations des eaux de fond en entrée et en sortie de filière de traitement

Paramètres étudiés	Concentration estimée en entrée de filière	Concentration cible en sortie de filière	Rendement épuratoire minimal attendu**
DBO_5	5 mg/l	6 mg/l	
DCO	41 mg/l	30 mg/l	>27 %
NTK	0,8 mg/l	2,0 mg/l	
P_{tot}	0,6 mg/l	0,20 mg/l	>67 %
PO_4^{3-}	0,83 mg/l	0,50 mg/l	>40 %
MES	140 mg/l	35 mg/l	>5 %
As	11 µg/l	0,83 µg/l	>92 %
HCT	<0,1 mg/l	1 mg/l	
Al	470 µg/l	100 µg/l	>79 %
NH_4	<0,5 mg/l	0,5 mg/l	
Cd	<0,05 µg/l	0,25 µg/l	
Cr	1,6 µg/l	3,4 µg/l	
Cu	2,6 µg/l	1,0 µg/l	>62 %
Fe	3 mg/l	0,1 mg/l	>96 %
Hg	<0,2 µg/l	0,07 µg/l	
Ni	12 µg/l	4 µg/l	>67 %
Pb	<1 µg/l	1.2 µg/l	
Zn	24 µg/l	8 µg/l	>68 %
Se	48 µg/l	10 µg/l	>79 %
Benzo(a)pyrène	<0,005 µg/l	0,001 µg/l *	

** Valeur limite de quantification et non une NQE (1.10-4 µg/l).*

*** Dans certains cas, la concentration cible est supérieure à celle de l'eau de verse brute. En effet, les valeurs cibles retenues permettent d'assurer le respect du bon état chimique et écologique des cours d'eau, mais les eaux à traiter peuvent présenter initialement des concentrations plus faibles que ces cibles. Dans ce cas, seul un suivi de ces paramètres sera réalisé pour s'assurer du respect de ces valeurs cibles, mais il n'y aura pas de traitement spécifique nécessaire sur ces paramètres.*

L'ensemble des critères des valeurs de bon état écologique et chimique des cours d'eau sera respecté ainsi que la norme de rejet, et par conséquent les normes de réutilisation de l'eau qui sont moins contraignantes.

5.2.2.4 Les eaux usées

Les stations d'épuration sont construites en phase d'aménagements préalables, puis mises en exploitation pendant les autres phases du projet global Cigéo. Leur dimensionnement est fondé sur les besoins en eau et sur les usages en incluant leurs charges polluantes.

Les eaux usées regroupent les eaux-vannes (WC), les eaux grises (douches, lavabos, cuisine…) et les eaux industrielles de surface. L**es eaux industrielles** sont les eaux produites par les travaux et activités du projet global Cigéo par exemple au niveau des aires de lavages, des centrales de béton, des ateliers.

5.2.2.4.1 Évaluation des quantités d'eau usées produites/à traiter

Pour les eaux usées, l'aspect quantitatif nécessite l'évaluation de deux termes :

- le volume d'eaux usées produit pendant la période où a lieu la plus grande consommation d'eau potable ;
- le volume d'eaux industrielles des installations de surface produit pendant la période où les procédés et chantiers consomment la plus grande quantité d'eau potable ou d'eau recyclée.

Le premier terme (exprimé en $m^3.j^{-1}$) est défini par le produit des effectifs maximums pouvant être présents simultanément au sein de chaque période (pour phases de construction initiale et fonctionnement) et par le besoin journalier en eau par jour par personne lequel est 0,075 $m^3.j^{-1}$, correspondant à ½ équivalent temps plein.

Le second terme (exprimé en $m^3.j^{-1}$) cumule :

- condensats des batteries froides provenant des centrales de traitement d'air ;
- condensats des réseaux d'air comprimé ;
- lavage de sols ;
- lavage de matériels lors des étapes d'entretiens ;
- eaux issues des ateliers mécaniques ou de maintenance ;
- eaux issues des magasins/entrepôts ;
- lavage des véhicules ;
- rejets des laboratoires (après contrôle radiologique négatif) ;
- eaux de procédé issues des opérations chimiques telles que, par exemple régénération de résines échangeuses d'ions (adoucisseur d'eau).

La somme de ces deux estimations fournit le dimensionnement recherché, soit une charge hydraulique exprimée en $m^3.j^{-1}$. L'équivalent-habitant est une unité de mesure définie en France par l'article R. 2224-6 du code général des collectivités territoriales comme la charge organique biodégradable ayant une demande biologique en oxygène en cinq jours (DBO5) de 60 grammes d'oxygène par jour. Elle permet de déterminer facilement le dimensionnement des stations d'épuration en fonction de la charge polluante.

Pour les eaux usées, la charge hydraulique à traiter exprimée en équivalent habitant (EH) est obtenue ensuite en divisant par 0,150 $m^3/j/EH$ celle exprimée en m^3/j.

Pour la **zone descenderie,** les capacités maximales à prendre en compte pour le dimensionnement de la station d'épuration est de l'ordre de 1 700 EH (durant la construction initiale), avec contrainte de variations de charges, hydrauliques et polluantes, importantes. Ce dimensionnement correspond au maximum atteint en phase de construction initiale.

Pour la **zone puits,** les capacités maximales à prendre en compte pour le dimensionnement de la station d'épuration est de l'ordre de 675 EH (durant la construction initiale), mais elle devra pouvoir accepter des variations de charges, hydrauliques et polluantes, importantes.

5.2.2.4.2 Aspect qualitatif

Les ouvrages d'épuration du centre de stockage Cigéo doivent être considérés comme des installations traitant d'un mix d'effluents industriels et urbains. Il est à ce titre retenu pour le dimensionnement des dispositifs que la charge de pollution produite pour 1 équivalent habitant est aussi de (122) :

- 150 L/j d'eaux usées ;
- 90 g/j de matières en suspension.

Pour l'évaluation de la charge polluante à traiter, une hypothèse a été établie pour permettre son calcul :

- les eaux usées de types eaux vannes (issues des toilettes) et eaux grises (issues des lavabos et douches) peuvent être assimilées à des eaux domestiques, puisqu'elles sont issues des rejets par les effectifs (personnel) présents sur place. Ainsi, le volume et la charge polluante de ces eaux usées ont été déterminés à partir des ratios habituellement utilisés pour des eaux usées domestiques appliqués à des effectifs industriels. Il a été choisi de tenir compte de valeurs plutôt élevées en concentration par rapport à ce qui peut être énoncé par la littérature.

Tableau 5-58 Concentrations en pollution – Eaux usées domestiques

Paramètres	Ratio d'un équivalent habitant	Concentration
Débit journalier	150 l/l	-
Demande biologique en oxygène sur 5 jours (DBO5)	60 g/j	400 mg/l
Demande chimique en oxygène (DCO)	150 g/j	1 000 mg/l
Matières en suspension (MES)	90 g/j	600 mg/l
Azote Kjeldahl (NTK)	15 g/j	100 mg/l
Phosphore total (Pt)	2 g/j	15 mg/l

- pour la qualité des effluents industriels, la moitié du débit des eaux, issue des condensats, ne présente pas de charge polluante spécifique. L'autre moitié du débit des eaux industrielles correspond à des eaux de lavage avec les concentrations suivantes (respect de l'arrêté ministériel du 2 février 1998 modifié relatif aux prélèvements et à la consommation d'eau ainsi qu'aux émissions de toute nature des installations classées pour la protection de l'environnement soumises à autorisation (123)).

Tableau 5-59 Concentrations en pollution – eaux industrielles associées aux eaux de lavage

Paramètres	Concentration en mg/l
Demande biologique en oxygène sur cinq jours (DBO5)	800
Demande chimique en oxygène (DCO)	2 000
Matières en suspension (MES)	600

Paramètres	Concentration en mg/l
Azote Kjeldahl (NTK)	100
Phosphore total (Pt)	15

Sur la base des hypothèses formulées concernant la charge polluante des eaux industrielles, c'est-à-dire 50 % du volume sans charge polluante spécifique, les concentrations retenues (soit 50 %) sont celles du tableau ci-après.

Tableau 5-60 Concentrations en pollution retenues pour les eaux industrielles à traiter

Paramètres	Concentration en mg/l
Demande biologique en oxygène sur 5 jours (DBO5)	400
Demande chimique en oxygène (DCO)	1 000
Matières en suspension (MES)	300
Azote Kjeldahl (NTK)	50
Phosphore total (Pt)	7,5

La capacité règlementaire de la station d'épuration est déterminée à partir du paramètre DBO_5.

Les eaux usées et industrielles sont traitées en mélange. Ainsi, pour le dimensionnement des équipements de dépollution et pour identifier le rendement attendu, la valeur de concentration la plus défavorable entre les eaux usées et les eaux industrielles ont été identifiées dans le tableau ci-dessous en entrée de filière. Cela permet de s'assurer de l'efficacité du traitement en toute situation. Le tableau suivant présente également des données de qualité microbiologique selon le retour d'expérience des spécialistes de l'eau.

Tableau 5-61 Tableau des concentrations des eaux usées et industrielles de surface en entrée et en sortie de filière de traitement

Paramètres étudiés	Concentration estimée en entrée de filière	Norme de rejet en sortie de filière	Rendement épuratoire minimal attendu
	Zone descenderie et zone puits	Zone descenderie et zone puits	
DBO_5	400 mg/l	6 mg/l	>99 %
DCO	1 000 mg/l	30 mg/l	>97 %
MES	600 mg/l	35 mg/l	>94 %
NTK	150 mg/l	2 mg/l	>99 %
NO_3^-	133 mg/l	50 mg/l	>62 %
NO_2^-	-	0,3 mg/l	-
P_{tot}	15 mg/l	0,2 mg/l	>99 %
PO_4^{3-}	37 mg/l	0,5 mg/l	>99 %
Chrome	0,05 mg/l	0,003 mg/l	>93 %
HCT	<0,1 mg/l	1 mg/l	-
Coliformes totaux	10^9 UFC/100 ml	500 UFC/100 ml	>7 log
Coliformes fécaux	10^8 UFC/100 ml	Les coliformes totaux serviront de témoin de contamination et de mesure d'efficacité des traitements. Les traitements en place ne sont pas sélectifs et seront efficaces sur toute la flore microbiologique.	
Kystes et oocysres de protozoaires	10^4 kystes/100 ml		
Virus	10^5 virus/100 ml		

** L'élimination d'un log sur le paramètre biologique consiste à diviser par 10 la pollution concernée. C'est une mesure couramment utilisée dans le domaine microbiologique.*

PRINCIPE DE DIMENSIONNEMENT

Tous les dimensionnements sont réalisés en considérant la période la plus défavorable pour tout rejet dans le milieu naturel, soit celle de la période d'assec des cours d'eau. Les critères qualitatifs des rejets sont ceux permettant l'atteinte du bon état chimique et écologique des eaux superficielles.

Les niveaux de qualité requis pour la réutilisation des eaux usées industrielles traitées pour différents usages sont également définis comme paramètre de dimensionnement de la chaîne de traitement.

Les traitements ont été définis en fonction des normes de rejet applicables au site.

L'abattement de cette pollution sera possible à l'aide la filière envisagée et testée par un constructeur. Elle comprend :

- un traitement primaire : prétraitements des eaux brutes permettant la récupération mécanique des éléments les plus accessibles, avec ;
- un traitement secondaire, avec :
  - ✓ un ajout de chlorure ferrique (traitement du phosphore) ;
  - ✓ un traitement sur disques biologiques (traitement pollution organique) ;
  - ✓ une filtration sur un lit planté de roseaux (filtration des boues).
- un traitement tertiaire, avec :
  - ✓ une filtration sur charbon actif (adsorption de micropolluants) ;
  - ✓ une ultrafiltration (protection de la nanofiltration) ;
  - ✓ une nanofiltration (traitement de finition pour l'épuration des ions métalliques et des nitrates) ;
  - ✓ une désinfection à la javel pour assurer une absence de micro-organismes ainsi qu'une rémanence dans les cuves de stockage.

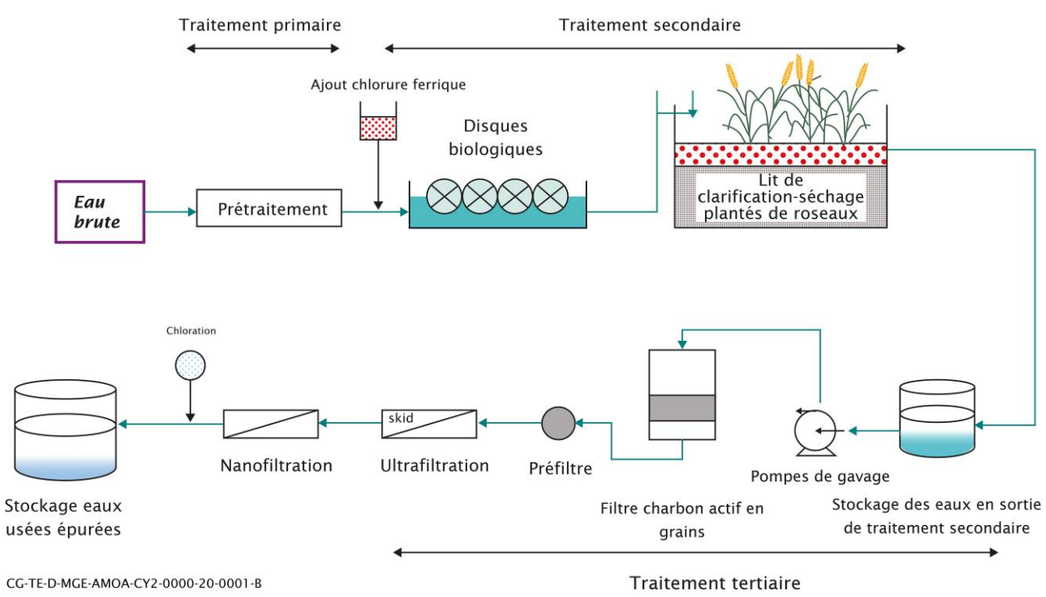


Figure 5-45 Schéma illustratif de la filière de traitement qualitatif des eaux usées industrielles

5.2.2.4.3 Méthodologie de calcul des flux de pollution rejetés en fonction des volumes à traiter

Les eaux usées constituent la source d'eaux recyclées prioritaire. Le rejet dans le milieu naturel n'a lieu qu'en cas de trop-plein du réservoir de stockage des eaux usées épurées,

Les quantités d'eaux usées produites et d'eaux recyclées nécessaires ont été évaluées par zone (puits et descenderie) et par période (aménagements préalables, fonctionnement).

Ainsi les volumes minimaux et maximaux rejetés correspondent respectivement aux situations lors desquelles les eaux usées épurées sont entièrement recyclées ou au contraire pas du tout recyclées.

À noter que le rejet dans le milieu naturel n'a lieu qu'en cas de trop-plein du réservoir de stockage des eaux usées épurées.

Les flux de polluants rejetés sont calculés en multipliant les volumes rejetés par les concentrations de rejet admissibles.

5.2.2.5 La production de boues

Les stations de traitement pour les eaux conventionnelles et les eaux pluviales peuvent créer des déchets sous forme de boues qu'il faudra, en fonction des analyses physico-chimiques de ces dernières, déshydrater et évacuer dans des filières de valorisation ou de stockage de déchets ultimes. Ces filières peuvent être :

- l'épandage agricole sous réserve que les boues constituent un amendement suffisant et de trouver des champs à proximité ;
- la valorisation en compostage ou en méthanisation si elles présentent une concentration en carbone organique suffisante ;
- l'incinération si elles sont suffisamment déshydratées ;
- l'installation de stockage de déchets en cas de boues très minérales sans filière de valorisation.

Au vu des analyses sur les eaux à traiter, il semblerait que les eaux usées et industrielles soient les seules qui pourraient trouver une voie de valorisation du fait de leur composition en matière organique.

Les volumes des boues ainsi que leur composition sont en cours d'études afin de trouver la filière la plus adaptée à chacune. La valorisation sera privilégiée. Concernant les filières sur les eaux pluviales et les eaux de verses, la quantification de la production de boues n'est pas quantifiée car elle dépend essentiellement de la pluviométrie (en cas de forte intensité, le lessivage sera plus important avec des eaux plus chargées). De plus, plusieurs expérimentations sont prévues sur ces boues, comme l'étude sur le comportement du dépôt d'argilites pour les eaux de verses, avec des simulations en laboratoire du comportement des eaux pluviales sur les verses en se plaçant dans des conditions proches de la mise en œuvre du centre de stockage Cigéo. Les objectifs de cette expérimentation sont de consolider les filières de traitement. De même que des expérimentations sont à mener pour les résidus des traitements membranaires (ultrafiltration, nanofiltration), difficilement quantifiable sans essais au préalable en laboratoire.

Le tableau ci-dessous reprend les bases de calcul des boues sur l'année pour les eaux usées et les eaux de fond avec un taux de matière sèche théorique de 20 % après déshydratation.

Les centres de traitement et de valorisation sont à définir, mais les priorités iront vers les solutions environnementalement viables comme l'épandage, le compostage, la valorisation matière, etc.

Tableau 5-62 Volumes de boues estimés

Type d'eau	Zone	Critères	Valeur en phase de construction initiale	Valeur en phase de fonctionnement
Eau usée et industrielle [1]	Zone descenderie	Volume moyen (m^3/an)	59 982	16 133
		[MES] (mg/l)	600	600
		[DBO5] (mg/l)	400	400
		Rendement (%)	99 %	99 %
		Boues (t/an)2	262	71
	Zone puits	Volume moyen (m^3/an)	19 254	12 410
		[MES] (mg/l)	600	600
		[DBO5] (mg/l)	400	400
		Rendement (%)	99 %	99 %
		Boues (t/an) 2	84	54
Eau de fond [2]	Zone descenderie	Volume moyen (m^3/an)	59 738	33 580
		[MES] (mg/l)	140	140
		Rendement (%)	99 %	99 %
		Boues (t/an)	41	23
	Zone puits	Volume moyen (m^3/an)	43 891	34 513
		[MES] (mg/l)	140	140
		Rendement (%)	99 %	99 %
		Boues (t/an)	30	24

1 : Sur la base du volume moyen produit par phase et par jour, pour 365 jours par an

2 : S'agissant de traitement biologique, une biomasse épuratrice se formera et retrouvera dans les boues. Le ratio de production de biomasse a été estimée à 0,7 kgBiomasse/kg [DBO_5] éliminée, valeur couramment observée dans les stations d'épuration urbaine.

5.2.2.6 Un rappel réglementaire des objectifs environnementaux

- la directive-cadre sur l'eau (DCE) 2000/60/CE du 23 octobre 2000 (72) vise à donner une cohérence à l'ensemble de la législation avec une politique communautaire globale dans le domaine de l'eau. Elle définit un cadre pour la gestion et la protection des eaux par grand bassin hydrographique au plan européen avec une perspective de développement durable (articles R. 212-10, R. 212-11 et R. 212-18 du code de l'environnement) ;
- l'application de la loi sur l'eau est un prérequis dans la définition des solutions de traitement des eaux et du cycle de l'eau de manière plus globale ;
- la cohérence avec les Schémas directeurs d'aménagement et de gestion de l'eau du bassin de la Seine et des cours d'eau côtiers normands et du bassin Rhin-Meuse 2022-2027 (75, 76) prescrivant les objectifs à atteindre pour le réseau hydrographique du bassin versant ;
- le calcul de l'incidence des rejets sur la qualité des eaux du milieu hydraulique superficiel est réalisé par rapport à l'objectif de qualité fixé pour le milieu : respect du bon état écologique pour les eaux superficielles.

5.2.2.6.1 Pour les eaux pluviales

Pour les paramètres DCO et MES, les eaux pluviales respecteront les valeurs de définition de l'état du milieu naturel issues du système d'évaluation de la qualité de l'eau (SEQ Eau) version 2 (124). Pour les hydrocarbures, c'est une norme correspondante aux performances d'un séparateur d'hydrocarbures (avec cellule de coalescence) qui sert de référence.

Les eaux pluviales sont plus difficiles à gérer et à traiter du fait de débits quotidiens très irréguliers. De plus, ces eaux sont déjà présentes en situation actuelle. L'apparition du centre de stockage est prévue avec des bassins qualitatifs et quantitatifs permettant de réguler les débits rejetés pour réduire le risque d'inondation, tout en limitant le flux de pollution journalier. Le débit de fuite régulé et le respect des paramètres globaux de pollution permettent de ne pas dégrader la qualité du milieu par rapport à la situation actuelle.

Ainsi les normes de rejet sont :

- DCO : 30 mg/l ;
- MES : 35 mg/l ;
- Hydrocarbures : 5 mg/l.

À noter que la norme sur les hydrocarbures est plus stricte sur les eaux industrielles (présentée dans le tableau ci-avant) car ces dernières sont sujettes à des traitements plus avancés. La norme hydrocarbure pour les eaux pluviales correspond aux retours d'expérience et aux garanties des constructeurs sur ce paramètre avec un séparateur d'hydrocarbures (avec cellule de coalescence).

Les pollutions éventuelles apportées lors du ruissellement des espaces imperméabilisés (matières en suspensions, hydrocarbures...) sont traitées afin que les rejets n'aient pas d'incidence sur le milieu naturel celui-ci. De plus, la mise en place des bassins quantitatifs permettra de lisser les débits en cas de fortes pluies afin de permettre l'évitement d'inondation en aval du centre de stockage Cigéo. Le flux de pollution apporté (produit des concentrations avec les volumes rejetés) n'aggravera donc pas le milieu naturel.

5.2.2.6.2 Pour les eaux conventionnelles

Les eaux conventionnelles (eaux industrielles, eaux de fond et eaux de verses) feront l'objet d'un traitement spécifique à chaque effluent en fonction d'essais pilotes en laboratoire réalisés sur des échantillons représentatifs.

L'objectif de la directive-cadre sur l'eau est l'atteinte du bon état écologique et chimique des cours d'eau. En règle générale, en fonction de la qualité de l'eau, le milieu naturel est capable d'accepter des charges de pollution plus ou moins importantes. Or, les cours d'eau récepteurs (l'Orge, La Bureau et L'Ormançon) présentent des périodes d'assecs relativement importantes pendant lesquelles des rejets d'eaux usées traitées pourront avoir lieu. Dans l'objectif de respecter le bon état écologique des cours d'eau tout au long de l'année, les normes appliquées aux rejets seront donc les valeurs de bon état chimique des cours d'eau (qui revient à considérer l'eau traitée comme l'eau du milieu naturel, référentiel très restrictif et rarement appliqué dans d'autres stations d'épuration).

Les normes utilisées ont été définies en fonction de l'acceptabilité du milieu naturel dans un objectif de conservation d'un bon état écologique et chimique des cours d'eau selon la directive-cadre sur l'eau (72). À noter que le bon état écologique des cours d'eau n'est pas identifié pour tous les paramètres. Afin d'anticiper l'évolution des réglementations, les normes sur d'autres polluants spécifiques liés à l'activité des installations seront également respectées, permettant d'être le plus respectueux possible de l'environnement tout en protégeant le milieu naturel pour les utilisations en aval des rejets des installations.

Ainsi, les référentiels utilisés sont les suivants :

- l'arrêté du 25 janvier 2010 et son arrêté modificatif du 27 juillet 2018 relatif aux méthodes et critères d'évaluation de l'état écologique, de l'état chimique et du potentiel écologique des eaux de surface. Les valeurs de bon état chimique et écologique des cours d'eau sont utilisées comme références (91). Lorsqu'il existe plusieurs valeurs de référence de norme de qualité environnementale (NQE), la valeur la plus contraignante est choisie entre NQE-MA (moyenne annuelle) et NQE-CMA (concentration maximale admissible) ;
- d'autres valeurs de définition de l'état du milieu naturel issues du système d'évaluation de la qualité de l'eau (SEQ Eau) version 2 (124). Cette classification n'est plus en vigueur depuis plusieurs années, mais elle permet d'obtenir des valeurs de référence qui ne sont pas toujours prises en compte dans les dans les nouveaux textes réglementaires ;

- l'arrêté du 11 janvier 2007 relatif aux limites et références de qualité des eaux brutes et des eaux destinées à la consommation humaine (125). Cela concerne en particulier la qualité des eaux brutes à destination d'un traitement de potabilisation qui pourrait être implanté en aval du site. Ces exigences permettent d'assurer une utilisation mutuelle de l'eau entre différents acteurs ;
- les valeurs guides des eaux de baignade, en visant les valeurs de bon état pour les paramètres microbiologiques (paramètres rarement traités dans les stations d'épuration actuelles). L'objectif est d'assurer la continuité de ces activités si elles s'avéraient être présentes à l'avenir à l'aval du site ;
- le guide de qualité des eaux de l'Organisation mondiale de la santé de 2017 pour les paramètres radiologiques (126).

Le tableau 5-63 reprend l'ensemble des paramètres de rejet.

Tableau 5-63 Normes de rejet applicables au site

Paramètre	Valeur	Document de référence
pH	]6-9[	Arrêté du 25 janvier 2010 (91) et son arrêté modificatif du 27 juillet 2018 => NQE paramètre général (93)
Turbidité	35 NFU	Valeur de bon état chimique de la SEQ Eau Version 2
Température de l'eau	25,5 °C	Arrêté du 25 janvier 2010 et son arrêté modificatif du 27 juillet 2018 => paramètre général pour les cyprinicoles
Conductivité à 25 °C	]120-3000[	Valeur de bon état chimique de la SEQ Eau Version 2
Coliformes totaux	500 UFC/100 ml	Valeur guide pour le bon état des eaux de baignade
Escherichia coli	100 UFC/100 ml	Valeur guide pour le bon état des eaux de baignade
DBO_5	6 mg/l	Arrêté du 25 janvier 2010 et son arrêté modificatif du 27 juillet 2018 => NQE paramètre général
DCO	30 mg/l	Valeur de bon état chimique de la SEQ Eau Version 2
COD	7 mg/l	Arrêté du 25 janvier 2010 et son arrêté modificatif du 27 juillet 2018 => NQE paramètre général
MES	35 mg/l	Valeur de bon état chimique de la SEQ EauVersion 2 à 50 mg/l
NTK	2 mg/l	Valeur de bon état chimique de la SEQ Eau Version 2
NH_4	0,5 mg/l	Arrêté du 25 janvier 2010 et son arrêté modificatif du 27 juillet 2018 => NQE paramètre général
NO_3^-	50 mg/l	Arrêté du 25 janvier 2010 et son arrêté modificatif du 27 juillet 2018 => NQE paramètre général
NO_2^-	0,3 mg/l	Arrêté du 25 janvier 2010 et son arrêté modificatif du 27 juillet 2018 => NQE paramètre général
Pt	0,2 mg/l	Arrêté du 25 janvier 2010 et son arrêté modificatif du 27 juillet 2018 => NQE paramètre général
PO_4^{3-}	0,5 mg/l	Arrêté du 25 janvier 2010 et son arrêté modificatif du 27 juillet 2018 => NQE paramètre général
HCT	1 mg/l	Arrêté ministériel du 11 janvier 2007 => Qualité de l'eau brute pour la production d'eau potable (125)
Al	0,1 mg/l	Valeur de bon état chimique de la SEQ Eau Version 2
Sulfates *	250 mg/l	Arrêté ministériel du 11 janvier 2007 => Qualité de l'eau brute pour la production d'eau potable
Fe	0,1 mg/l	Arrêté ministériel du 11 janvier 2007 => Qualité de l'eau brute pour la production d'eau potable
Cu	1,0 µg/l	Arrêté du 25 janvier 2010 et son arrêté modificatif du 27 juillet 2018 => NQE
Pb	1,2 µg/l	Arrêté du 25 janvier 2010 et son arrêté modificatif du 27 juillet 2018 => NQE-MA
Zn	7,8 µg/l	Arrêté du 25 janvier 2010 et son arrêté modificatif du 27 juillet 2018 => NQE
HAP	0,2 µg/l	Arrêté ministériel du 11 janvier 2007 => Qualité de l'eau brute pour la production d'eau potable
Cd	0,25 µg/l	Arrêté du 27 juillet 2018 => NQE-MA **
As	0,83 µg/l	Arrêté du 27 juillet 2018 => NQE
Benzo(a)pyrène	0,00017 µg/l	Arrêté du 27 juillet 2018 => NQE-MA ***
Cr	3,4 µg/l	Valeur NQE (arrêté 27 juillet 2018)
Hg	0,07 µg/l	Arrêté du 27 juillet 2018 => NQE-CMA
Ni	4 µg/l	Arrêté du 27 juillet 2018 => NQE-MA
Se	10 µg/l	Arrêté ministériel du 11 janvier 2007 => Qualité de l'eau brute pour la production d'eau potable
Uranium	30 µg/l	*World Health Organization* (2017) => Valeur guide sur l'eau potable et arrêté du 11 janvier 2007
Activité alpha globale	0,1 Bq/l	Arrêté ministériel du 11 janvier 2007 => Valeur de référence de qualité de l'eau potable
Activité bêta globale résiduelle	1,0 Bq/l	Arrêté ministériel du 11 janvier 2007 => Valeur de référence de qualité de l'eau potable

** Norme applicable uniquement sur les eaux de verses. Il a été identifié que les sulfates sont présents dans les eaux de verse dans des quantités importantes. Même si ce paramètre ne possède pas de norme d'un point de vue environnementale, le projet global Cigéo a pris les dispositions nécessaires pour traiter ce paramètre pour ne pas perturber l'activité aquatique du milieu. Il est même notable que certaines eaux minérales ont des concentrations similaires à l'effluent brut en sulfate, ce dernier a donc un impact limité sur la santé.*

*** Cadmium : eau du milieu naturel avec une dureté moyenne de 25-30°f, soit une classe V*

**** À noter que dans l'état actuel des technologies d'analyse, cette valeur est inférieure aux limites de quantification (0,001 µg/l selon la norme NF EN ISO 17993 de 2004 (127)). Il n'est donc pas possible de viser mieux que la limite de quantification actuellement.*

À noter que l'arrêté du 27 juillet 2018 (93) présente également des normes de qualité environnementale d'autres composants qui ne sont pas mentionnées dans le tableau précédent puisque l'activité du site ne sera pas à l'origine de ces substances (c'est l'exemple de certains pesticides).

5.2.2.6.3 Cas particulier de la radioactivité naturelle dans les eaux conventionnelles

Le projet global Cigéo s'engage à suivre la qualité radiologique des eaux de son site, même si les eaux conventionnelles ne seront en contact avec aucun élément radioactif.

Une qualité d'eau potable de 30 µg/l d'uranium est prescrite par l'OMS et par l'arrêté du 30 décembre 2022 modifiant l'arrêté du 11 janvier 2007 relatif aux limites et références de qualité des eaux brutes et des eaux destinées à la consommation humaine mentionnées aux articles R. 1321-2, R. 1321-3, R. 1321-7 et R. 1321-38 du code de la santé publique (128). Cette concentration couvre très largement les effets indésirables chimiques et toxicologiques pour l'être humain, mais également pour la faune et la flore aquatiques ainsi que l'environnement en général. Cette valeur servira alors de guide lors des analyses d'eau.

De même, une analyse plus générale sera réalisée avec des mesures de la radioactivité alpha et radioactivité résiduelle bêta pour des normes issues de la réglementation française de la qualité d'eau potable, respectivement de 0,1 Bq/l et 1 Bq/l. Ces normes ne définissent pas un seuil de dangerosité pour la consommation humaine, mais l'atteinte de ces valeurs engendre un diagnostic complet des éléments radioactifs de l'eau pour en identifier la cause. En effet, on notera que des éléments radioactifs sont des éléments naturellement présents à l'état de trace sur l'ensemble du globe. Dans le cas du site d'étude, des traces ont été observées (cf. Chapitre 5 du volume III de la présente étude d'impact), dans des quantités bien inférieures aux valeurs précisées ci-avant. De plus, ces activités couvrent largement les possibilités de pollution en uranium 238 (élément radioactif majoritaire) puisqu'une pollution de cet élément à une concentration de 30 µg/l correspondrait à une activité alpha d'environ 1 Bq/l, soit 10 fois supérieure à la norme prévue.

Pour tous les rejets d'eau dans le milieu naturel, l'activité alpha et bêta sera donc suivie selon les recommandations de l'OMS, normalement valable pour de l'eau potable.

5.2.3 Incidences sur les usages

5.2.3.1 Estimation des besoins en eau potable du projet et adéquation avec les besoins du territoire

Dans la présente étude d'impact du projet global Cigéo, la disponibilité durable des ressources s'envisage selon cinq angles :

- de l'économie de l'eau potable dans les procédés du centre de stockage Cigéo ;
- de l'approvisionnement multiple par un maillage sécuritaire et capable de répartir la contrainte de prélèvement entre différents points de captage d'eau potable ;
- du réseau partagé dit de renforcement sécuritaire pour les différents syndicats associés au projet global Cigéo et pour le centre de stockage Cigéo ;
- de la disponibilité de ressources qualitatives et productives à long terme ;
- des modalités d'amélioration de la qualité de la ressource des aires d'alimentation des captages d'eau potable.

Pour définir comment économiser de l'eau potable au niveau du centre de stockage Cigéo, la méthode intègre à la fois :

- des éléments de conception (par exemple en ce qui concerne les filières de traitement des eaux usées ou de faisabilité des usages en cohérence avec les normes) ;
- des exigences de sûreté (exemple : qualité de l'eau recyclée nécessaire pour la fabrication des bétons spéciaux) ;
- des contraintes d'hygiène-sécurité (exemple : usages de l'eau dans les installations de fond, espaces confinés).

Ceci implique une évaluation quantitative du besoin annuel par période au sein des phases du projet global Cigéo (aménagements préalables, construction initiale et fonctionnement) selon une étude fine des besoins techniques et de la variation de l'effectif et de sa répartition sur les différentes installations du centre de stockage Cigéo.

Cette évaluation, d'une part des besoins spécifiques ou irréductibles d'eau potable et d'autre part d'eau recyclée (effluents épurés), permet de dégager des pointes de consommation. Ces pointes de consommation sont utilisées pour « calibrer » le futur dispositif technique et la production liée au projet global Cigéo et aux collectivités, au stade actuel de la faisabilité.

Cette étude de faisabilité quantitative intègre l'évolution du besoin des syndicats des eaux. L'évolution du besoin est en partie liée aux perspectives de développement économique et des populations, mais aussi à l'amélioration du rendement (fuite des réseaux actuels) de distribution.Une convention, signée depuis le 20 février 2023, lie directement l'Andra et le syndicat en responsabilité pour la distribution d'eau potable sur le territoire d'implantation du centre de stockage Cigéo. Cette convention prévoit les études à réaliser ou compléter aussi bien en matière de vérification des disponibilités quantitatives et qualitatives que sur le plan des schémas d'adduction et d'interconnexions possibles. Les besoins en eau pour le centre de stockage Cigéo ayant déjà été exprimés et de nombreuses vérifications faites sur le plan de la disponibilité de la ressource, les études viseront à confirmer sa suffisance et cela, en envisageant différentes évolutions possibles tant sur le plan des besoins globaux du territoire (nouveaux projets, accroissement de certaines activités…) que sur un impact du changement climatique sur la ressource.

Cette convention résulte d'une longue concertation avec le territoire (près de 10 ans) qui a conduit à considérer que l'alimentation en eau du centre de stockage Cigéo par les infrastructures du territoire était à privilégier plutôt qu'une alimentation par une installation en propre de l'Andra, avec l'objectif que les études et les aménagements à réaliser intègrent, au-delà du seul objectif d'alimentation du centre de stockage Cigéo, une sécurisation quantitative et qualitative pour les différents utilisateurs du territoire.

Le besoin en eau potable du centre de stockage Cigéo est estimé à 500 m^3/jour durant ses phases les plus consommatrices. Pour répondre à ce besoin, il a été vérifié soit par analyse bibliographique, soit par des essais de pompage, que l'alimentation en eau du centre de stockage Cigéo était réalisable en recourant à trois captages existants : Échenay, Gondrecourt-le-Château et Thonnance-lès-Joinville.

La connaissance de la capacité de production des trois captages pressentis est fondée sur des études hydrogéologiques et avis d'hydrogéologue agréé (état des ouvrages, fonctionnement des captages, marge de production, protection par déclaration d'utilité publique, etc.) :

- étude de restructuration du SIAEP de la région d'Échenay pour une alimentation depuis les sources de Thonnance, Artélia, février 2018) (129) ;
- forage d'alimentation en eau potable de Gondrecourt-Le-Château : assistance à maîtrise d'ouvrage pour le suivi hydrogéologique des essais de pompage, rapport d'interprétation des essais, Artelia, mars 2018 (130) ;
- procédure de définition des périmètres de protection des captages AEP d'Échenay, Révision, P. Fredet, novembre 2016 (131).

Les caractéristiques de ces trois captages sont les suivantes :

Tableau 5-64 Caractéristiques principales des captages visés pour l'alimentation en eau du centre de stockage Cigéo

	Échenay	Gondrecourt-le-Château	Thonnance-lès-Joinville
Nom du captage	Forage F2 de 1977/Source Massonfosse	Forage du Muleau/de Dainville	Sources Clairefontaine et du Mont
DUP	05/12/2008 Débit cumulé disponible 41 m³/h	Forage du Muleau 26 janvier 1983 Débit autorisé de 100 m³/h pour un total de 1 200 m³/j Forage de Danville 26 janvier 1983 Débit autorisé de 30 m³/h pour un total de 300 m³/j	17 avril 1987 Pas de débit limité par la DUP
Débit maximum actuellement prélevé (m³/j)	410	600	200
Débit maximum autorisé (m³/j)	540	1 500	Illimité
Tests productivité (m³/j) + mois du test	/ /	Forage La Muleau 2 300 Novembre 2017 Forage de Dainville : /	1855 Octobre 2015
Profondeur du captage	47,5 m	Forage La Muleau : 60 m Puits alluvial de Gondrecourt : 5 m	Source
Aquifère capté	Kimméridgien	Oxfordien supérieur (forage la Muleau) Nappe alluviale Ornain (puits alluvial)	Kimméridgien

Les valeurs dites « tests » sont à prendre à titre d'information car tous les tests n'ont pas nécessairement été réalisés dans les périodes les plus défavorables mais ils permettent de mettre en évidence que l'alimentation en eau du centre de stockage Cigéo pourra être assurée sur le plan quantitatif par les trois captages existants cités ci-dessus et ce d'autant plus facilement que le principe retenu actuellement, s'il était confirmé par les études à venir, conduirait à alimenter le centre de stockage Cigéo pour partie par les disponibilités de la ressource des captages d'Échenay et Thonnance-lès-Joinville et pour partie par des disponibilités du captage de Gondrecourt-le-Château.

Aussi, bien que certains essais n'aient pas été réalisés en période de contraintes les plus fortes sur le captage de Gondrecourt-le-Château notamment, la disponibilité de la ressource en eau potable pour alimenter le centre de stockage Cigéo n'est pas remise en cause : la somme des débits autorisés des trois captages autorisés (>2 000 m³) excède largement les besoins cumulés des syndicats et du centre de stockage Cigéo. Pour autant, toutes les études de détails nécessaires pour arrêter le schéma industriel idoine et le justifier restent à venir en concertation avec le ou les Maîtres d'ouvrage de cette opération du projet global Cigéo.

L'analyse des incidences sur la ressource en eau tient compte des besoins du centre de stockage Cigéo et des besoins liés à une augmentation potentielle des populations (en lien avec les effets induits du projet global Cigéo sur le territoire, sur les emplois et donc, sur la démographie).

» HYPOTHÈSES PRISES POUR L'ESTIMATION DES BESOINS EN EAU POTABLE DU CENTRE DE STOCKAGE CIGÉO

L'étude de faisabilité a été faite avec des besoins en eau du centre de stockage Cigéo encore non optimisée de l'ordre de 750 m³/j.

5.2.3.1.1 Besoins du centre de stockage Cigéo

La réalisation du centre de stockage Cigéo, puis son fonctionnement requièrent un approvisionnement en eau potable (la mesure de réduction avec le recyclage des eaux transitant par les stations d'épuration pour des usages nécessitant une eau non potable est déjà considérée).

Les besoins optimisés actuellement estimés, tenant compte des pics de consommation, s'élèvent, en pic de consommation, à environ 500 $m^3.j^{-1}$ en phase d'aménagements préalables (l'absence des dispositifs de traitement, puis de recyclage des eaux pour un usage interne), 500 $m^3.j^{-1}$ en phase de construction et 200 $m^3.j^{-1}$ en phase de fonctionnement.

Les incidences liées à l'utilisation de la ressource par le centre de stockage Cigéo ont été évaluées au moyen des volumes présentés ci-avant en considérant un premier pic de besoin pendant la phase d'aménagements préalables et de construction initiale, puis un second pic de besoin en phase de fonctionnement. Ces pics de consommation du centre de stockage Cigéo sont limités dans le temps, de sorte que l'incidence potentielle quantitative du projet sur la ressource en eau est à considérer comme étant évaluée de façon « enveloppe » ou majorée.

5.2.3.1.2 Besoin des collectivités

Les besoins connus du territoire ont également été pris en compte lors de la réalisation du bilan « besoins/ressources » et considérés à l'identique pour les phases d'aménagements préalables et de construction initiale d'une part, et en phase de fonctionnement d'autre part.

Parmi les besoins connus ont été recensés les besoins liés :

- au projet d'aménagement d'une zone d'activité sur la commune de Saudron, alimentée par le SIAEP d'Échenay. Le besoin en eau supplémentaire est de l'ordre de 50 $m^3.j^{-1}$;
- à l'aménagement d'une zone d'activités avec notamment l'implantation d'une blanchisserie industrielle sur la commune de Suzannecourt, alimentée par le SIAEP de Thonnance-lès-Joinville/Suzannecourt. Le besoin en eau supplémentaire est de l'ordre de 150 $m^3.j^{-1}$ en moyenne.

Aucun projet n'a été identifié au droit du SIVU de Gondrecourt-le-Château au moment de l'étude de disponibilité de la ressource.

5.2.3.2 Disponibilité de la ressource

La disponibilité de la ressource est étudiée au travers du bilan besoins/ressources qui consiste à vérifier que les besoins en eau du centre de stockage Cigéo sont compatibles avec la disponibilité de la ressource aux captages considérés et avec les besoins prévisionnels des collectivités. Le bilan a été établi suivant les besoins en eau des phases d'aménagements préalables et construction initiale d'une part et de la phase de fonctionnement d'autre part.

5.2.3.2.1 Bilan besoins/ressources pour un raccordement depuis la Haute-Marne

Le tableau 5-65 présente le bilan besoins/ressources pour une alimentation depuis les captages d'Échenay et les sources de Thonnance-lès-Joinville en secours.

Tableau 5-65 *Bilan besoins ressources depuis les captages ou sources des SIAEP d'Échenay et de Thonnance-lès-Joinville/Suzannecourt*

	Nom des ressources	Captage de Massonfosse et forage 1977 d'Échenay (Échenay) Source du Mont et source Claire Fontaine Thonnance (Thonnance)
Situation actuelle	Capacité de production des équipements en place ($m^3.j^{-1}$)	2 652
	Besoins moyens des SIAEP d'Échenay et de Suzannecourt ($m^3.j^{-1}$)	460
	Besoins de pointe des SIAEP d'Échenay et de Suzannecourt ($m^3.j^{-1}$)	777
	Bilan besoins/ressources	Excédent de 2 192 m^3 un jour moyen et de 1 875 m^3 un jour de pointe par rapport à la capacité des équipements en place
Situation future (aménagements préalables/construction initiale)	Besoins moyens des SIAEP d'Échenay et de Suzannecourt ($m^3.j^{-1}$)	660
	Besoin en eau du centre de stockage Cigéo ($m^3.j^{-1}$)*	500
	Besoins de pointe des SIAEP d'Échenay et de Suzannecourt ($m^3.j^{-1}$)	977
	Bilan besoins/ressources	Excédent de 1 742 m^3 un jour moyen et de 1 425 m^3 un jour de pointe par rapport à la capacité des équipements en place
Situation future (phase de fonctionnement)	Besoin en eau du centre de stockage Cigéo ($m^3.j^{-1}$)	200
	Bilan besoins/ressources	Excédent de 1 942 m^3 un jour moyen et de 1 625 m^3 un jour de pointe par rapport à la capacité des équipements en place

* Le besoin en eau du centre de stockage Cigéo est réparti à 50 % côté Marne et 50 % côté Ornain.

SYNTHÈSE SUR LA FAISABILITÉ QUANTITATIVE DE L'OPÉRATION D'ADDUCTION D'EAU DU CENTRE DE STOCKAGE CIGÉO DEPUIS LA HAUTE-MARNE

La lecture du bilan besoins/ressources en eau permet de confirmer que les ressources combinées du SIAEP d'Échenay et du SIAEP de Thonnance-lès-Joinville/Suzannecourt en complément, sont suffisantes (et même très excédentaires) pour subvenir à la fois aux besoins en eau des collectivités et à ceux du centre de stockage Cigéo.

5.2.3.2.2 Bilan besoins/ressources pour un raccordement depuis la Meuse

Le tableau 5-66 présente le bilan besoins/ressources pour une alimentation depuis le captage de la Muleau géré par le SIVU de Gondrecourt-le-Château.

Tableau 5-66 *Capacité de production des captages d'eau potable de Gondrecourt-le-Château et besoins actuels et futurs en eau potable*

	Construction initiale/aménagements préalables	Phase de fonctionnement
Débit autorisé par la DUP (forage de la Muleau) (26 janvier 1983 (132)) ($m^3.j^{-1}$)	1 200	
Besoins totaux un jour moyen de Bonnet, Houdelaincourt et besoin de pointe de Gondrecourt-le-Château ($m^3.j^{-1}$)	495	
Besoins du centre de stockage Cigéo ($m^3.j^{-1}$)	500	200
Bilan besoins/ressources	Excédent de 205 m^3 un jour moyen par rapport à la capacité des équipements en place	Excédent de 455 m^3 un jour par rapport à la capacité des équipements en place

SYNTHÈSE SUR LA FAISABILITÉ QUANTITATIVE DE L'OPÉRATION D'ADDUCTION D'EAU DU CENTRE DE STOCKAGE CIGÉO DEPUIS LA MEUSE

La lecture du bilan besoins/ressources en eau permet de confirmer que les ressources issues du captage de la Muleau géré par le SIVU Haut Ornain sont suffisantes (et même très excédentaires) pour subvenir à la fois aux besoins en eau des collectivités et à ceux du centre de stockage Cigéo.

6

Biodiversité et milieu naturel - Méthodes

6.1	État initial du milieu naturel	140
6.2	Incidences sur le milieu naturel	195
6.3	Compensation écologique	200
6.4	Évaluation des incidences sur les sites Natura 2000	211

6.1 État initial du milieu naturel

L'établissement de l'état initial du milieu naturel est effectué par recueil des données faune, flore, habitats disponibles auprès des organismes compétents, complété par des analyses documentaires et des inventaires de terrain réalisés par des bureaux d'études spécialisés (voir liste au volume I de la présente étude d'impact).

6.1.1 Recensement des zonages environnementaux

Différents types de zonages environnementaux sont mis en œuvre afin de protéger ou d'identifier des espaces naturels d'intérêt. Ont été répertoriés tous les zonages présents dans l'aire d'étude éloignée du milieu naturel :

- les zonages environnementaux réglementaires qui correspondent à des sites au titre de la législation ou de la réglementation en vigueur, dans lesquels les interventions dans le milieu naturel peuvent être contraintes. Ce sont les sites objets d'arrêtés préfectoraux de protection de biotope, des sites du réseau européen Natura 2000, les réserves naturelles nationales et régionales… ;
- les zonages d'inventaires du patrimoine naturel, élaborés à titre d'avertissement pour les aménageurs et qui n'ont pas de valeur d'opposabilité. On trouve dans cette catégorie les zones importantes pour la conservation des oiseaux (ZICO) et les zones naturelles d'intérêt écologique, faunistique et floristique (ZNIEFF de type II - grands ensembles écologiquement cohérents - et ZNIEFF de type I - secteurs de plus faible surface au patrimoine naturel remarquable) ;
- les zonages fonciers, correspondant par exemple à des territoires d'expérimentation du développement durable (ex. : parcs naturels régionaux – PNR) ou à des secteurs gérés en faveur de la biodiversité (espaces naturels sensibles, sites des Conservatoires des espaces naturels, sites du Conservatoire du littoral et des rivages lacustres…) ;
- les zonages internationaux (sites Ramsar, réserves naturelles de biosphère) ;
- les zones humides notamment les zones à dominantes humides (ZDH).

Le recensement de ces espaces s'appuie sur les données administratives concernant les milieux naturels et le patrimoine écologique. Les sites institutionnels suivants ont été consultés :

- les sites des DREAL de Lorraine et Champagne-Ardenne, à présent regroupées en DREAL Grand Est ;
  - ✓ Carte générale DREAL Grand Est ;
  - ✓ CARMEN Lorraine ;
  - ✓ CARMEN Champagne-Ardenne ;
  - ✓ le site de l'INPN (Inventaire national du patrimoine naturel) pour la consultation des fiches descriptives des différentes zones présentes.

6.1.2 Analyse bibliographique et réalisation d'inventaires faune-flore

6.1.2.1 Analyse bibliographique

Afin de prendre en compte des données existantes sur l'aire d'étude immédiate du centre de stockage Cigéo, une étude bibliographique a été menée sur la période 2012 à 2022. Les données bibliographiques au niveau des communes concernées par le centre de stockage Cigéo ont été consultées (Inventaire national du patrimoine naturel[34], faune Champagne-Ardenne[35], faune Lorraine[36], Conservatoires botaniques (133, 134), Observatoire pérenne de l'environnement), afin de recueillir les informations naturalistes relatives au secteur d'étude et de préparer les campagnes de terrain. Elles donnent une première vision des espèces potentiellement présentes sur l'aire d'étude immédiate. Cette analyse bibliographique permet également de statuer sur la présence d'espèces patrimoniales et/ou protégées non observées lors des inventaires réalisés entre 2016 et 2022 dans l'aire d'étude immédiate, mais relevées antérieurement dans la bibliographie ou à proximité de l'aire d'étude immédiate.

[34] https://inpn.mnhn.fr/accueil/index
[35] https://www.faune-champagne-ardenne.org/

Une analyse de la bibliographie et des informations disponibles a été réalisée en préalable aux inventaires de terrain, afin d'avoir une connaissance du contexte écologique et des espèces potentiellement présentes.

Les sites institutionnels et les bases de données régionales ont également été consultés :

- les sites des DREAL de Lorraine et Champagne-Ardenne, à présent regroupées en DREAL Grand Est :
  - ✓ CARMEN Lorraine ;
  - ✓ CARMEN Champagne-Ardenne ;
  - ✓ carte générale DREAL Grand Est ;
  - ✓ faune Lorraine[36] ;
- CPEPESC « Connaitre et protéger les chauves-souris de Lorraine », janvier 2009 (135)

Les informations (espèces et habitats) issues des fiches descriptives des zonages environnementaux présents dans l'aire d'étude éloignée ont été exploitées à partir du site de l'INPN[34].

L'ensemble des données collectées par l'Andra dans le cadre du suivi environnemental du Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne ou de l'OPE avant 2015 est également pris en compte comme données bibliographiques sur la période 2012/2015.

6.1.2.2 Pré-diagnostic – reconnaissance des sites d'intérêt

La première étape d'une expertise consiste en une reconnaissance préalable, avant toutes prospections sur le terrain, à partir de données cartographiques (cartes IGN au 1/25 000e) ou d'orthophotoplans. L'analyse de l'ensemble de ces données à disposition sert de base à l'identification des habitats et des secteurs potentiellement favorables à la présence d'espèces floristiques et faunistiques (friches, lisières favorables, linéaires de haies, zones humides…) sur les aires d'étude immédiate.

En complément, l'étude des photographies aériennes permet de dégager les principaux grands types d'habitats (forestiers, herbacés, humides, aquatiques).

6.1.2.3 Inventaires de terrain

Pour le centre de stockage Cigéo, les prospections écologiques commanditées par l'Andra sur les habitats, la flore et la faune et prises en compte dans le cadre de cette étude ont été effectuées de 2015 à fin 2020. Les données collectées antérieurement ont été prises en compte comme données bibliographiques.

Pour le programme de reconnaissance de la formation des Calcaires du Barrois, les prospections écologiques commanditées par l'Andra sur les habitats, la flore et la faune et prises en compte dans le cadre de cette étude ont été effectuées en 2022.

L'Andra a mandaté plusieurs associations et bureaux d'études spécialisés en vue d'obtenir la caractérisation de l'état initial du milieu naturel sur l'aire d'étude immédiate du projet global Cigéo. La liste des prestataires qualifiés qui sont intervenus est présentée dans le volume I de la présente étude d'impact. Les groupes biologiques inventoriés sont : les insectes, les amphibiens, les reptiles, les oiseaux, les mammifères (y compris les chiroptères), les mollusques et les poissons.

Afin de garantir, dans le diagnostic écologique, les données naturalistes les plus robustes possibles, les inventaires sont renouvelés tous les deux ans, en tenant compte de l'écologie des espèces et des périodes propices aux observations.

[36] https://www.faune-lorraine.org/

Les tableau 6-1 et tableau 6-2 mettent en évidence, le pourcentage de passages d'inventaires réalisés dans des conditions météorologiques favorables. En effet, certains groupes sont plus sensibles aux variations des conditions météorologiques (insectes/reptiles), ce qui peut engendrer des modifications de leur activité et donc des difficultés à les repérer lors des inventaires.

Tableau 6-1 *Efficacité des inventaires sur la période 2016-2022 selon le groupe faunistique ciblé pour le centre de stockage Cigéo*

Groupe cible	Nombre de jours d'inventaires sur la période 2016-2022	Pourcentage des inventaires réalisés dans des conditions favorables
Insectes	125	86 %
Amphibiens	120	83 %
Reptiles	168	86 %
Oiseaux	330	90 %
Mammifères	292	91 %
Chiroptères	164	96 %

Tableau 6-2 *Efficacité des inventaires réalisés sur la période 2018 - 2021 selon le groupe faunistique ciblé pour la ligne 027000*

Groupe cible	Nombre de jours d'inventaires sur la période 2018-2021	Pourcentage des inventaires réalisés dans des conditions favorables
Insectes	18	94 %
Amphibiens	8	100 %
Reptiles	20	95 %
Oiseaux	155	100 %
Mammifères	101	100 %
Chiroptères	12	92 %

Les tableau 6-3 à tableau 6-6 présentent les périodes de prospection mises en œuvre. Pour chaque groupe, plusieurs passages ont été réalisés, en privilégiant les périodes les plus propices pour la réalisation des inventaires de terrain (indiquées sur la figure 6-1). Les inventaires ont été réalisés sur un cycle biologique complet, permettant d'observer les espèces aux différents stades de leur développement : floraison, reproduction, croissance des jeunes, migration, hivernage… Ces tableaux mettent en évidence, la périodicité et l'adéquation des périodes de prospections aux cycles de vie des différents groupes taxonomiques.

Compte tenu du nombre très important de jours consacrés aux relevés de terrain, le détail des jours d'interventions et les conditions météorologiques sont présentés en annexe 7 du présent volume.

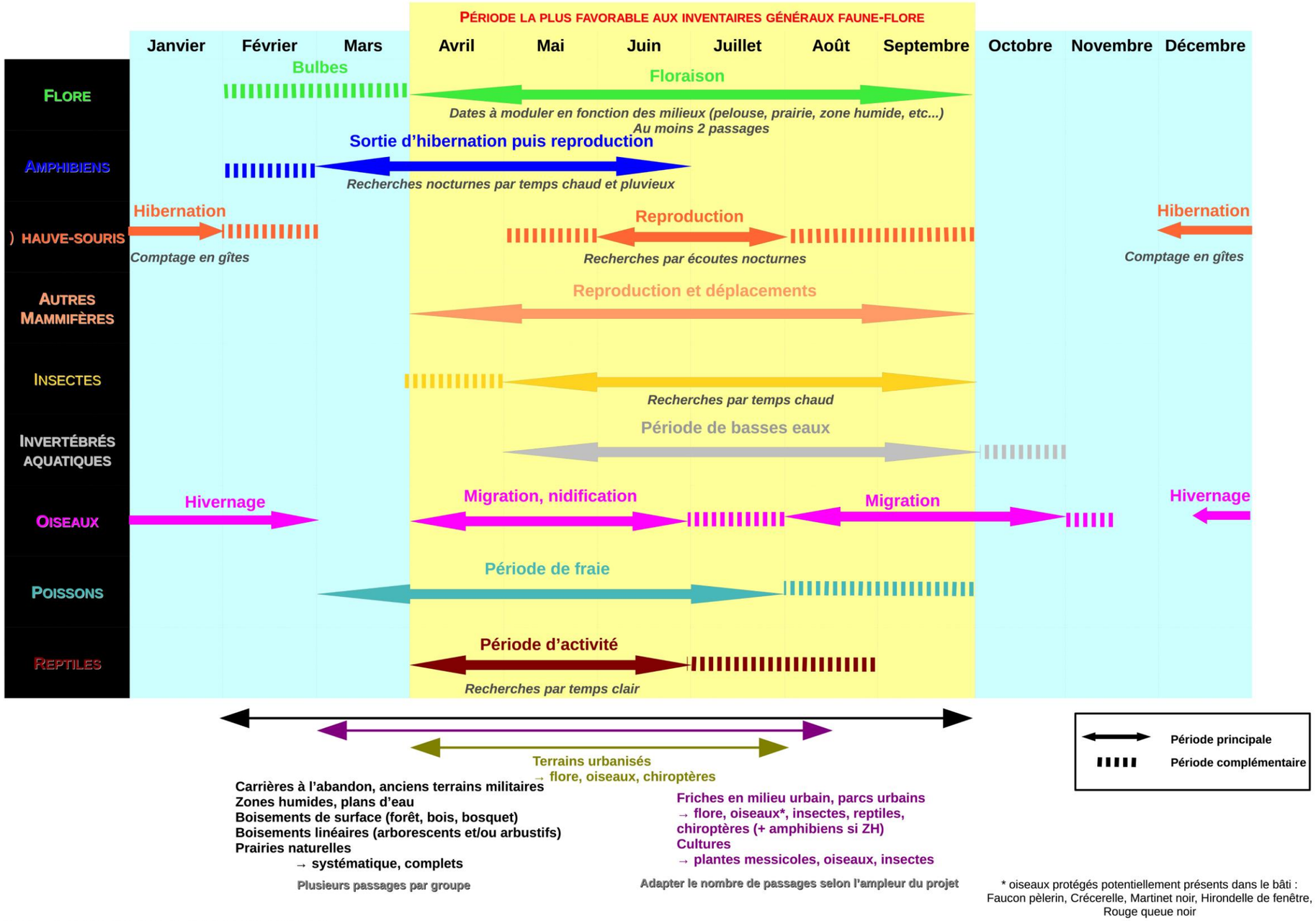
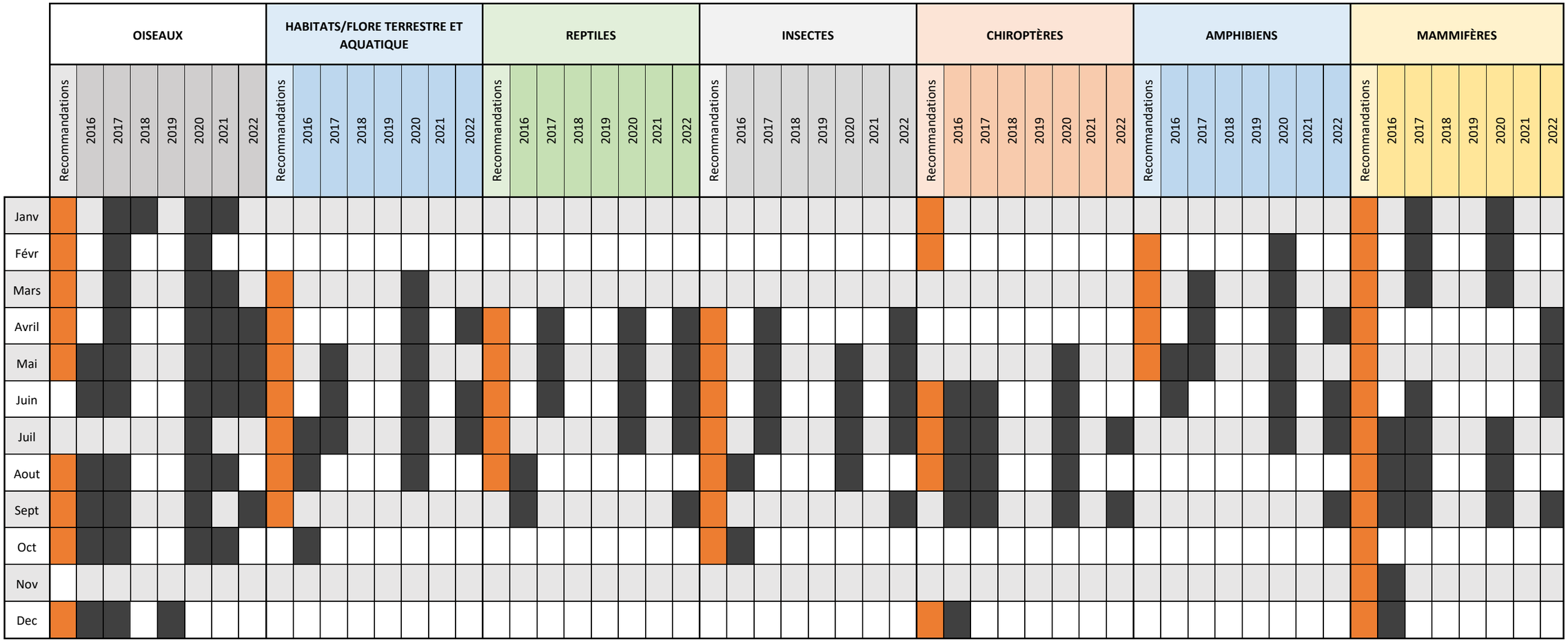


Figure 6-1 *Calendrier des périodes les plus favorables aux inventaires faune/flore (source : DRIEE)*

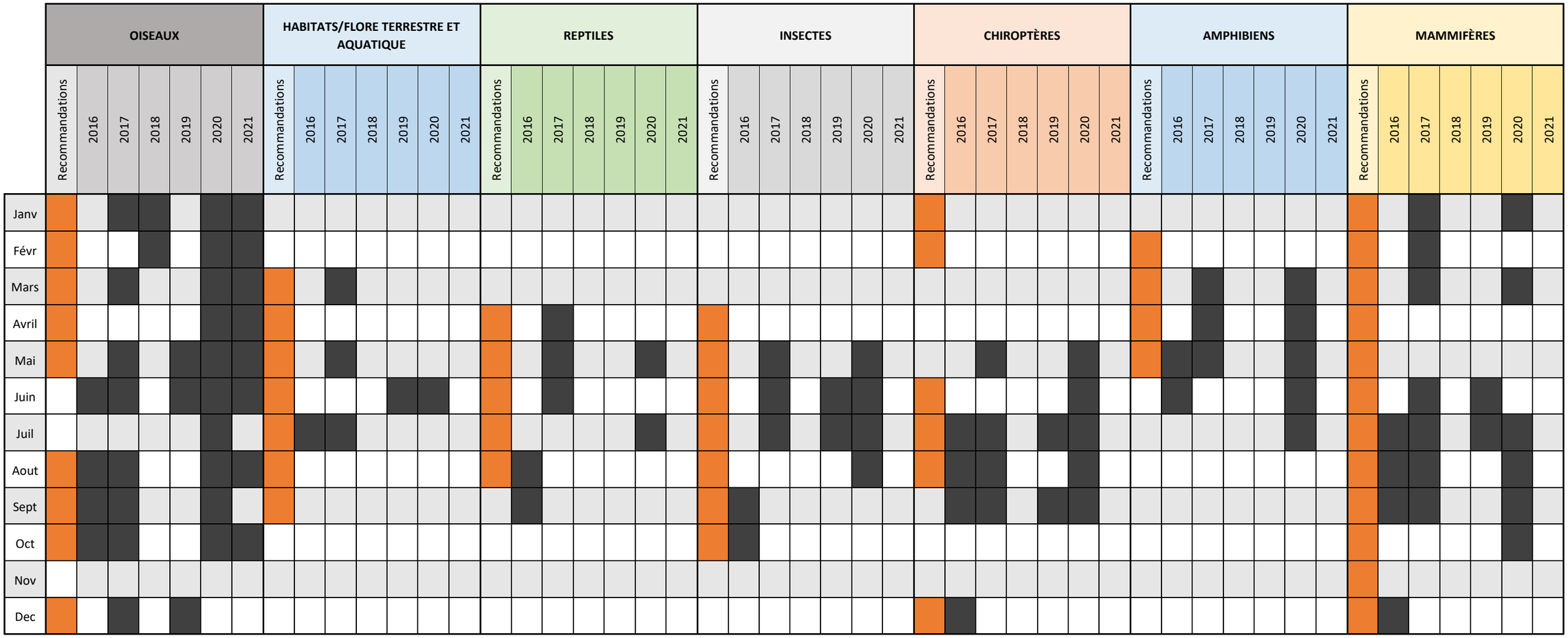
Tableau 6-3 Efforts de prospections sur la période 2016-2022 pour la zone descenderie et opérations attenantes



La colonne libellée « recommandations » en orange identifie pour chaque groupe les périodes les plus propices pour la réalisation des inventaires de terrain.

En noir sont indiquées les périodes pendant lesquelles les inventaires de terrain ont été réalisés.

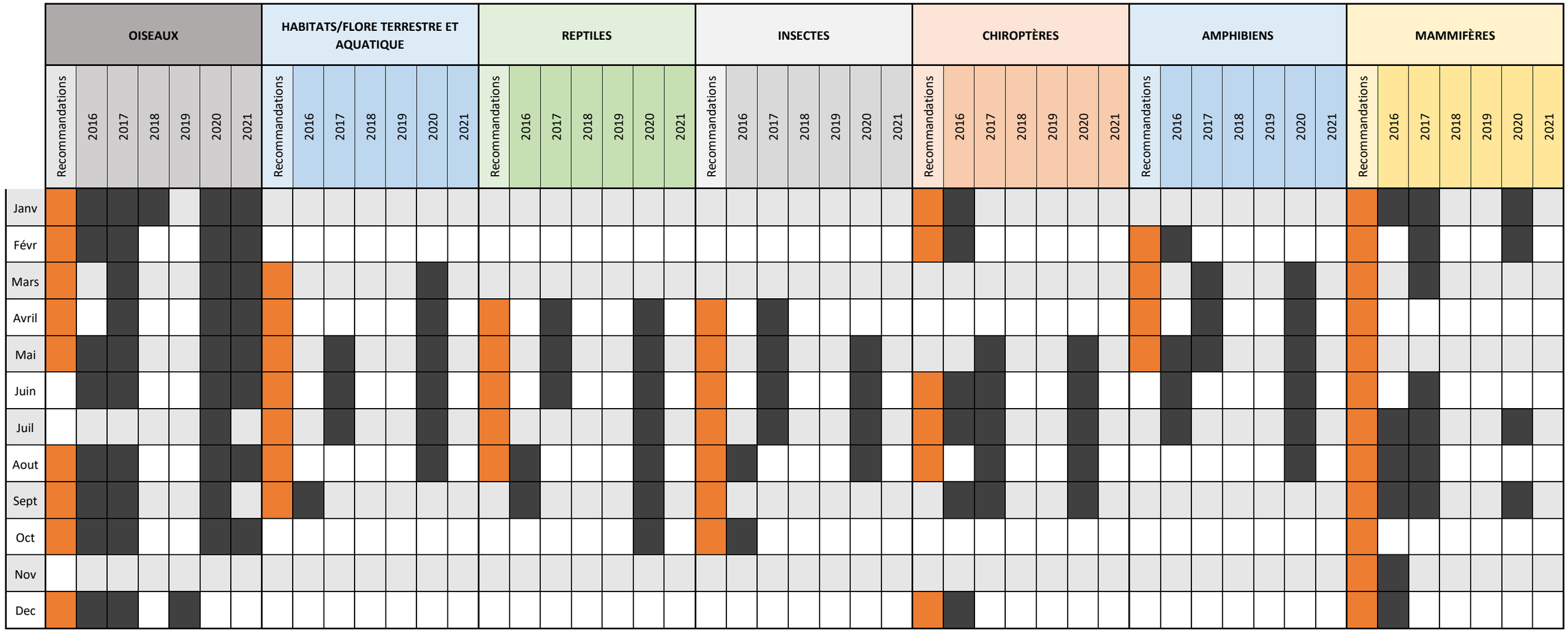
Tableau 6-4 Efforts de prospections sur la période 2016-2021 pour la zone puits



La colonne libellée « recommandations » en orange identifie pour chaque groupe les périodes les plus propices pour la réalisation des inventaires de terrain.

En noir sont indiquées les périodes pendant lesquelles les inventaires de terrain ont été réalisés.

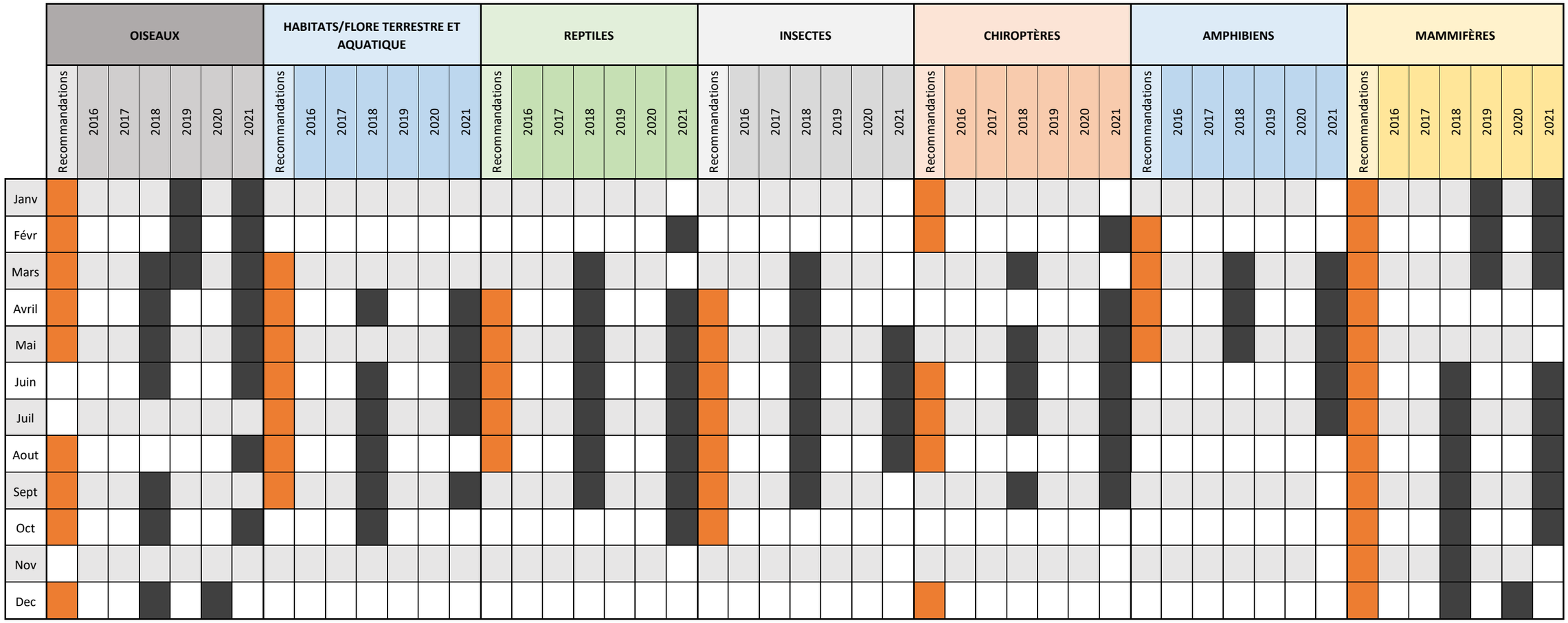
Tableau 6-5 Efforts de prospections sur la période 2016-2021 pour l'ITE



La colonne libellée « recommandations » en orange identifie pour chaque groupe les périodes les plus propices pour la réalisation des inventaires de terrain.

En noir sont indiquées les périodes pendant lesquelles les inventaires de terrain ont été réalisés.

Tableau 6-6 Efforts de prospections sur la période 2016-2021 pour la ligne 027000



La colonne libellée « recommandations » en orange identifie pour chaque groupe les périodes les plus propices pour la réalisation des inventaires de terrain.

En noir sont indiquées les périodes pendant lesquelles les inventaires de terrain ont été réalisés.

Tableau 6-7 *Efforts de prospections sur 2022 pour campagne de forages de reconnaissance de la formation des Calcaires du Barrois (CFB), les piézomètres de caractérisation des zones humides (ZH), et les bases vie Maulan et Morley*

	OISEAUX		HABITATS/FLORE TERRESTRE ET AQUATIQUE		REPTILES		INSECTES		CHIROPTÈRES		AMPHIBIENS		MAMMIFÈRES	
	Recommandations	2022	Recommandations	2022	Recommandations	2022	Recommandations	2022	Recommandations	2022	Recommandations	2022	Recommandations	2022
Janv														
Févr														
Mars														
Avril														
Mai														
Juin														
Juil														
Aout														
Sept														
Oct														
Nov														
Dec														

La colonne libellée « recommandations » en orange identifie pour chaque groupe les périodes les plus propices pour la réalisation des inventaires de terrain.

En noir sont indiquées les périodes pendant lesquelles les inventaires de terrain ont été réalisés.

Tableau 6-8 Efforts de prospections sur la période 2020-2021 pour les forages profonds de caractérisation en limite de ZIOS (Programme ZBS_FOND_UP1)

	OISEAUX		HABITATS/FLORE TERRESTRE ET AQUATIQUE		REPTILES		INSECTES		CHIROPTÈRES		AMPHIBIENS		MAMMIFÈRES	
	Recommandations	2020-2021	Recommandations	2020-2021	Recommandations	2020-2021	Recommandations	2020-2021	Recommandations	2020-2021	Recommandations	2020-2021	Recommandations	2020-2021
Janv														
Févr														
Mars														
Avril														
Mai														
Juin														
Juil														
Aout														
Sept														
Oct														
Nov														
Dec														

La colonne libellée « recommandations » en orange identifie pour chaque groupe les périodes les plus propices pour la réalisation des inventaires de terrain.

En noir sont indiquées les périodes pendant lesquelles les inventaires de terrain ont été réalisés.

Pour les inventaires poissons et mollusques plusieurs passages ont été effectués, sur un périmètre inclus dans l'aire d'étude éloignée.

Pour les mollusques, la phase de terrain s'est déroulée du 24 au 29 septembre 2020.

Pour les poissons, des pêches électriques ont été réalisées dans les principaux cours d'eau de l'aire d'étude éloignée de 2017 à 2020, ainsi qu'une recherche des zones de frayères (juin 2017 à janvier 2018 et janvier 2020).

Pour les opérations des autres maîtres d'ouvrage, RTE a fait réaliser une étude faune-flore sur l'aire d'étude des raccordements électriques, pour la période allant de juillet 2016 à août 2017. Cette étude a concerné les groupes suivants : flore, insectes, reptiles, oiseaux et chiroptères.

Des prospections de terrain ont également été menées de juillet à septembre 2017 le long de la ligne 400 kV Houdreville-Méry, afin d'identifier les sensibilités écologiques, puis au printemps 2019 (cinq passages en mai et juin) afin d'identifier les oiseaux nicheurs dans les zones sensibles. Ces prospections ont été complétées en avril 2021 par le passage d'un écologue au niveau des accès pressentis et des emprises de pylônes concernées par des renforcements de structures et/ou de fondations (sites Natura 2000 de la forêt de Gondrecourt et de la Vallée de la Meuse).

Le long de la ligne ferroviaire 027000, des inventaires de terrain ont été menés de mars 2018 à mars 2019, afin de couvrir un cycle biologique complet (cf. Tableau 6-3). Sur cette même période, des compléments d'inventaires ont également été réalisés afin de couvrir l'ensemble de l'aire d'étude des variantes de localisation pour la déviation de la route départementale D60/960.

Le détail des passages et des conditions d'observation pour les raccordements électriques, la ligne 400 kV et le long de la ligne ferroviaire 027000 est précisé en annexe 7 du présent volume.

La carte suivante présente la localisation des aires d'étude et des zones où les inventaires ont été réalisés (hors ligne 400 kV).

Sur l'aire d'étude éloignée, comme précisé au chapitre 6.1.1 du présent volume, tous les zonages du milieu naturel présents ont été recensés.

Les inventaires de terrain ont été menés sur l'aire d'étude immédiate (hors poissons et mollusques). La pression d'inventaire est identique pour l'ensemble de l'aire d'étude immédiate (zone puits, zone descenderie et opérations attenantes, installation terminale embranchée et ligne ferroviaire 027000).

Lors des inventaires 2019-2020, le périmètre retenu a été agrandi par rapport aux inventaires de 2016-2017, afin d'intégrer les autres maîtres d'ouvrage et correspond ainsi à l'aire d'étude immédiate associée au centre de stockage Cigéo.

La cartographie complète des habitats a été réalisée sur l'aire d'étude immédiate du centre de stockage Cigéo et de la ligne ferroviaire 027000 (500 mètres de part et d'autre de l'opération). Les inventaires de la flore et de la faune ont été réalisés de manière systématique sur les emprises des installations et élargis sur l'ensemble de l'aire immédiate en fonction des habitats d'intérêts présents pour chaque groupe.

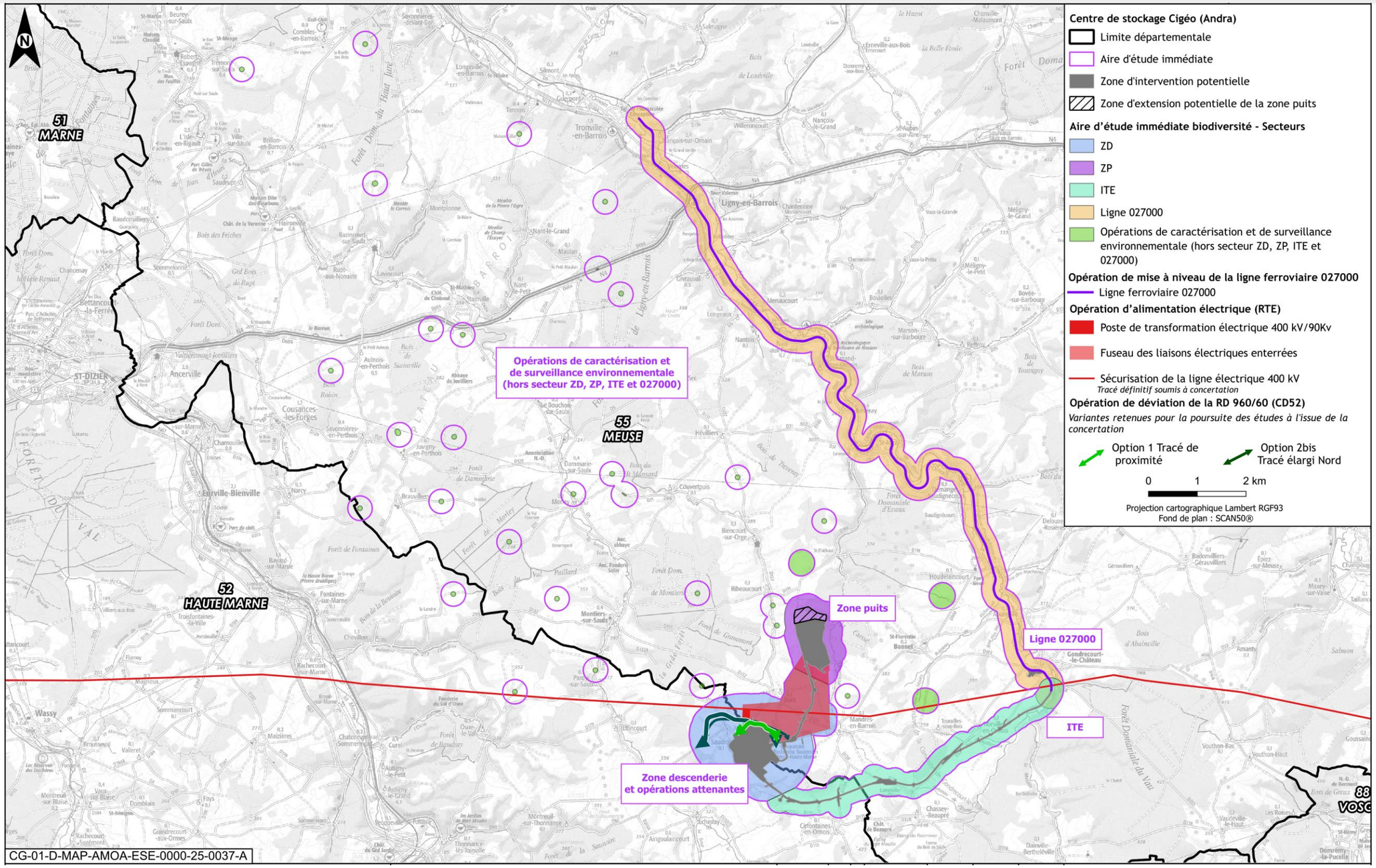


Figure 6-2 Localisation des zones d'inventaires sur le milieu naturel

6.1.3 Inventaires des habitats et de la flore

6.1.3.1 Méthodologie pour l'étude des habitats terrestres

Plusieurs passages d'écologues ont été réalisés entre le début du printemps et la fin de l'été (cf. Chapitre 6.1.2.2 du présent volume).

Pour l'établissement de l'état initial des habitats et de la flore, plusieurs types de relevés sont mis en œuvre :

- le **relevé phytocénotique (simple de végétation)** qui consiste à dresser une liste de végétation sans tenir compte de l'abondance des espèces. Le relevé simple de végétation apporte peu d'informations quant à la relation existante entre la végétation et les facteurs du milieu. Pour chaque unité de végétation[37] observée l'inventaire s'est fait en plein (inventaire exhaustif de l'unité) hormis pour une partie des végétations préforestières, prairiales, forestières et pour les cultures pour lesquelles la trop grande superficie de ces habitats a nécessité un inventaire par échantillonnage ;
- le **relevé phytosociologique** qui consiste à répertorier l'ensemble des espèces présentes au sein d'une aire minimale définie, afin de définir plus précisément certains habitats pour évaluer au mieux leurs états conservation et définir leurs niveaux d'enjeux écologiques. À chaque espèce est ensuite attribué un coefficient d'abondance-dominance en fonction de sa proportion relative et de la surface qu'elle occupe. L'utilisation de la phytosociologie permet d'obtenir des informations sur les facteurs écologiques du milieu (édaphiques – c'est-à-dire qui concerne le sol, climatiques, anthropiques).

L'analyse de l'ensemble des relevés a permis d'identifier les habitats naturels et semi-naturels, suivant les typologies Corine biotopes et Eunis. Chaque habitat a ensuite été cartographié à une échelle adaptée en fonction de la complexité du milieu.

Les observations permettent également d'apprécier l'état de conservation des habitats patrimoniaux. Celui-ci prend en compte la composition, la rareté, la diversité et le niveau d'artificialisation des groupements végétaux présents et est basé en partie sur les travaux de Carnino (2009) (136) qui utilise l'état de la structure et de la fonctionnalité de l'habitat, ainsi que les atteintes portées à l'habitat.

Les habitats d'intérêt communautaire sont décrits à l'aide des cahiers d'habitats Natura 2000.

Les habitats relevés ont par la suite été regroupés en 26 grandes catégories d'habitats qui sont présentées à l'annexe 8.1 du présent volume.

6.1.3.2 Méthodologie pour l'étude de la flore terrestre

Plusieurs passages d'écologues ont été réalisés entre le début du printemps et la fin de l'été (cf. Chapitre 6.1.2.2 du présent volume), afin de pouvoir observer les espèces végétales des plus précoces aux plus tardives. Les relevés sont effectués à pied, en mettant l'accent sur les potentiels habitats à enjeu prédéterminés.

Une attention particulière est portée à la recherche d'espèces protégées, patrimoniales ou déterminantes de zone humide.

Les stations des espèces exotiques envahissantes sont systématiquement relevées. Ce sont les espèces introduites en dehors de leur territoire d'origine, naturalisées, dont la prolifération crée des dommages aux écosystèmes naturels ou semi-naturels (CBN Bassin parisien, 2016 (137)).

[37] L'unité de végétation est définie comme un ensemble végétal possédant une composition floristique, une écologie, une phénologie… propres, nettement discernables au sein du reste de la végétation.

Les textes officiels ou listes d'espèces utilisés permettant de déterminer le caractère protégé ou la patrimonialité d'une espèce sont les suivants :

- la directive européenne Habitats/Faune/Flore du 21 mai 1992 (138), modifiée par la directive 2006/105/CE du conseil du 20 novembre 2006 (139), concernant la conservation des habitats naturels, ainsi que de la faune et de la flore sauvages (l'annexe II fixe les espèces d'intérêt communautaire dont la conservation nécessite la désignation de zones spéciales de conservation ; l'annexe IV définit les espèces qui nécessitent une protection stricte) ;
- l'arrêté du 20 janvier 1982 (140) modifié relatif à la liste des espèces végétales protégées sur l'ensemble du territoire national ;
- l'arrêté du 3 janvier 1994 (141) précisant la liste des espèces végétales protégées en Lorraine complétant la liste nationale ;
- l'arrêté du 8 février 1988 (142) modifié fixant la liste des espèces végétales protégées en région Champagne-Ardenne, complétant la liste nationale ;
- la liste rouge de la flore vasculaire de Champagne-Ardenne (2019 (143)) ;
- la liste rouge de la flore vasculaire de Lorraine (2015 (144)) ;
- la liste des espèces déterminantes de Lorraine (DREAL, Floragis, 2015 (145)) ;
- la liste des plantes exotiques envahissantes (CBNBP, 2018 (146)).

6.1.4 Inventaires de la faune

6.1.4.1 Protocoles d'observation des insectes

Plusieurs passages ont été effectués d'avril à septembre-octobre et sur plusieurs années, afin de couvrir les périodes favorables aux insectes (cf. Chapitre 6.1.2.2 du présent volume).

Le groupe des insectes étant compliqué à étudier dans son ensemble, les inventaires ont ciblé quatre taxons :

- les lépidoptères rhopalocères (papillons de jour) ;
- les coléoptères carabidés et saproxyliques (espèces associées au bois mort recherchées dans les zones boisées) ;
- les odonates (les libellules et les demoiselles).

Ce choix se justifie par le fait que certaines espèces de ces groupes sont protégées, ce qui n'est pas le cas de tous les groupes, en particulier des orthoptères. Cependant, même s'ils ne font pas l'objet de recherches spécifiques, les espèces remarquables des autres groupes (orthoptères, diptères…) qui ont pu être observées lors des inventaires de terrain ont été listées et prises en compte.

Les prospections ont été menées pour évaluer la diversité des insectes présents. Il s'agit essentiellement de prospections à vue et capture au filet avec relâché immédiat sur place pour les espèces à détermination plus complexe. Quelques pièges PIMUL (pièges d'interception aériens pour les insectes volants) ont également été utilisés, ainsi que des pièges colorés qui attirent les insectes et permettent de les collecter dans un liquide conservateur pour détermination ultérieure.

Comme pour les autres groupes, les prospections ont été menées avec des conditions météorologiques favorables : pas de précipitation, ni vent fort et température douce (supérieure à 12 °C).

Les figure 6-3 à figure 6-5 présentent la localisation des pièges entomologiques.

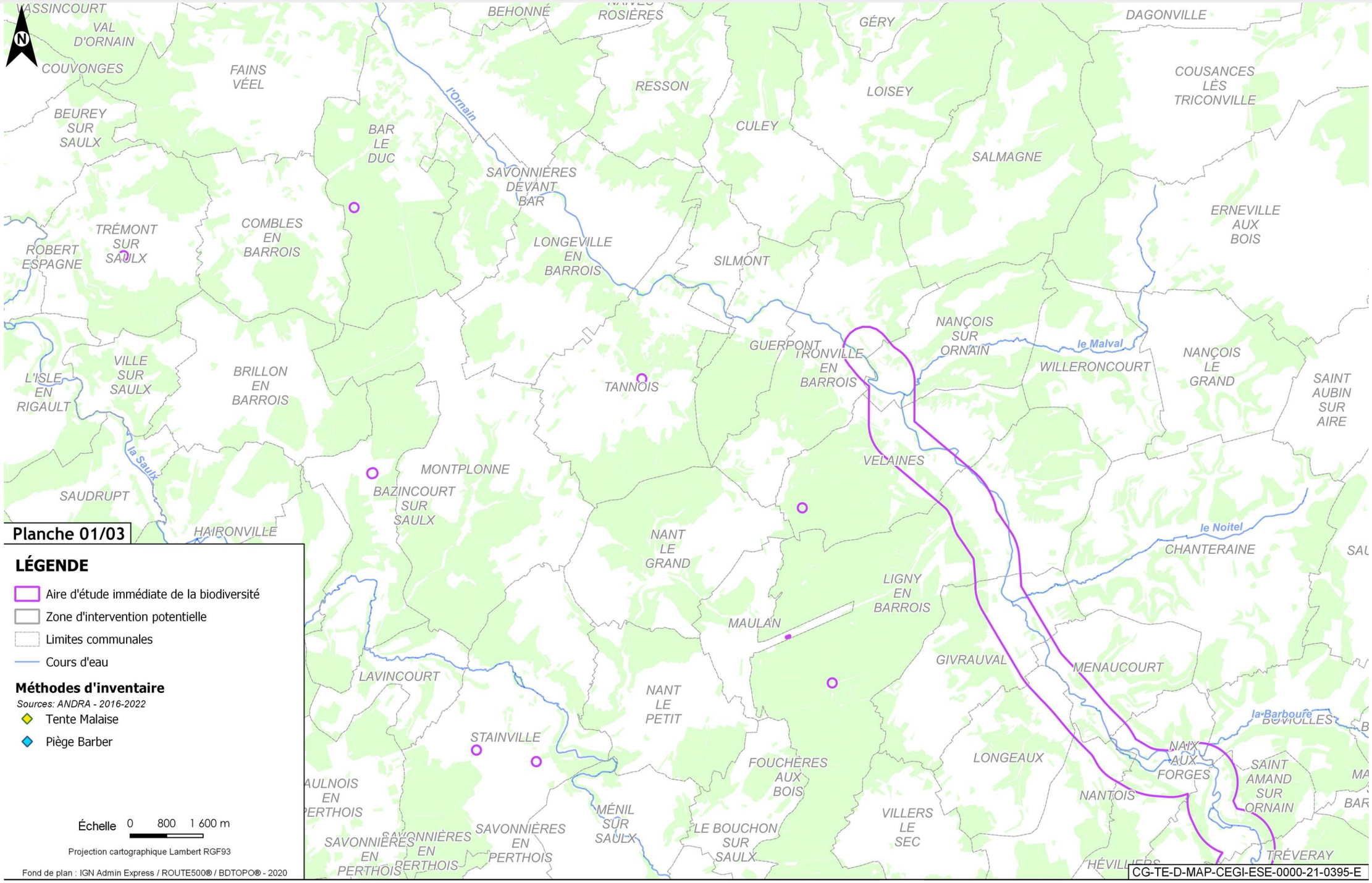


Figure 6-3 Localisation des inventaires entomologiques - 1/3

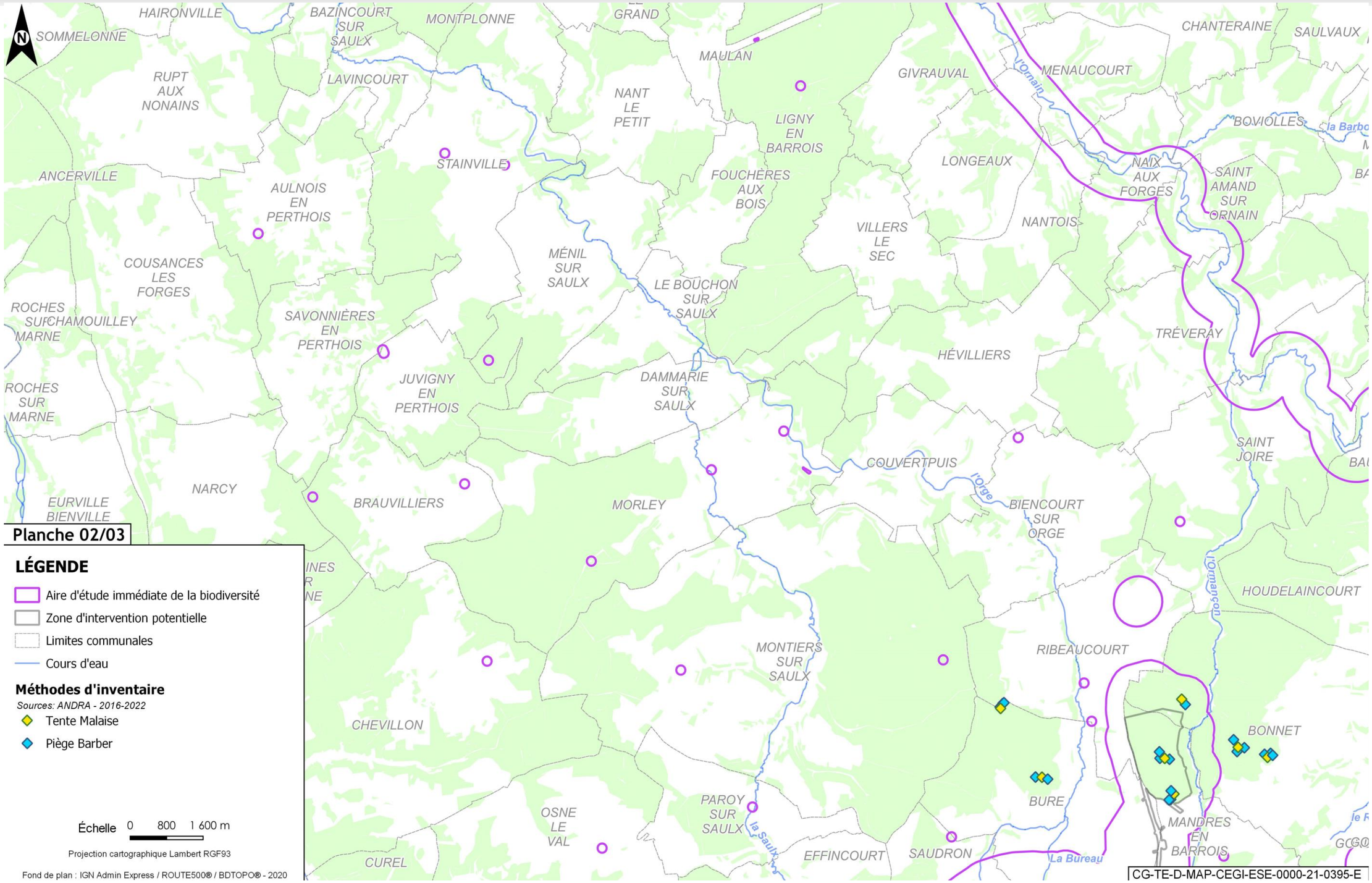


Figure 6-4 Localisation des inventaires entomologiques – 2/3

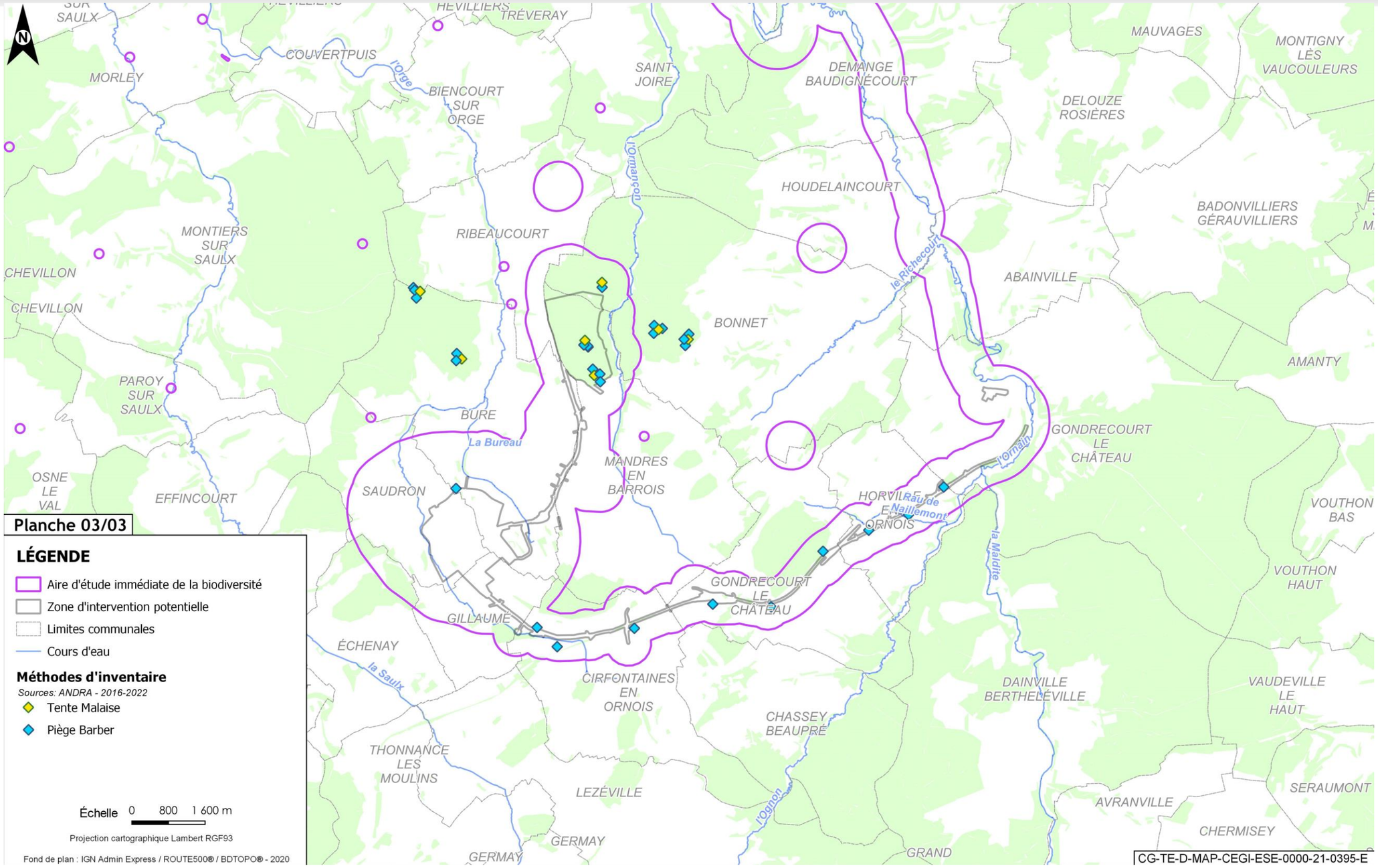


Figure 6-5 *Localisation des inventaires entomologiques - 3/3*

6.1.4.2 Protocoles d'observation des amphibiens

Plusieurs passages ont été effectués à des saisons différentes et sur plusieurs années, afin de couvrir toutes les périodes d'activités des amphibiens (cf. Chapitre 6.1.2.2 du présent volume).

Deux types de recherches ont été mis en œuvre en vue de caractériser l'état initial des populations d'amphibiens, à savoir :

- la recherche des sites de reproduction et l'inventaire des espèces ;
- la recherche des voies de migrations prénuptiales par la réalisation de parcours pédestres à proximité des habitats fréquentés préférentiellement par les amphibiens.

Lors des recherches à vue, un repérage est effectué de jour, afin d'identifier les habitats favorables au stationnement, à la reproduction et aux passages d'amphibiens. Une expertise des habitats et micro-habitats localisés est ensuite réalisée au cours des phases d'activité les plus propices aux espèces. Lors de chaque passage, l'ensemble des zones en eau du site et de sa périphérie sont visitées (étang, mares, ruisseau, fossés...), ainsi que tout habitat favorable. Les individus y sont recherchés à vue et au chant. Les pontes et les larves ont fait également l'objet de recherches approfondies. Dans la mesure du possible, les amphibiens ou leurs pontes ont fait l'objet de comptages individuels. Les individus contactés, ainsi que les stations de reproduction découvertes ont été cartographiés. Une caractérisation des points d'eau a également été réalisée.

Pour la recherche des voies de migration, des prospections spécifiques ont été réalisées en voiture et à vitesse réduite, sur les infrastructures routières situées sur l'aire d'étude immédiate ou à proximité, de manière à localiser toutes les voies migratoires et d'éventuels phénomènes de mortalité liés à la circulation. Le suivi du passage migratoire prénuptial par rapport au postnuptial permet une caractérisation plus précise de la fréquentation d'un secteur par les amphibiens. Au printemps, la migration est nettement plus concentrée dans le temps et l'espace. En effet à cette saison, les individus adultes rejoignent directement leurs sites de reproduction dès que les conditions météorologiques leur sont favorables. Les inventaires ont été menés lors de la période la plus adaptée (début mars à début mai) et lors de conditions météorologiques favorables (premières nuits tempérées et humides suivant un épisode froid et plutôt sec).

Afin d'optimiser le taux de détectabilité des individus, ces inventaires ont principalement été réalisés en milieux ouverts (chemins, routes, talus et fossés ras...) et à proximité des habitats préférentiellement fréquentés (boisements et forêts en phase terrestre ; cours d'eau, mares, étangs... en phase aquatique). Pour chaque site, le suivi a consisté à relever l'espèce, le nombre d'individus, l'état de santé particulièrement au niveau des voies routières (vivant, blessé, mort...).

Les prospections ont été menées dans des conditions météorologiques favorables, soit : températures supérieures à 8 °C, absence de vent ou vent faible et pluie modérée le jour de prospection ou les jours précédents.

6.1.4.3 Protocoles d'observation des reptiles

Plusieurs passages ont été effectués sur plusieurs années, afin de couvrir les périodes favorables aux reptiles (cf. Chapitre 6.1.2.2 du présent volume).

En vue de réaliser le diagnostic des populations de reptiles, deux types de méthodologie ont été mis en œuvre :

- des relevés à vue par le parcours de transects sur des zones propices à l'insolation et sur des zones refuges (pierres, tas de bois...). Les éléments sont soulevés et remis en place ;
- des relevés sous plaques disposées d'avril à septembre sur des zones propices.

Les prospections à vue ciblent les sites et milieux favorables aux reptiles comme les talus herbeux, pierriers, lisières bien exposées, murets, voies ferrées. Elles sont réalisées à pied à une allure réduite, en portant le regard à 1 mètre devant et sur un périmètre d'environ 1,50 mètre autour de l'observateur. L'observateur utilise des jumelles à mise au point rapprochée et est attentif au moindre bruissement dans la végétation car cela permet également la détection (voire l'identification) des reptiles.

La méthode des « plaques refuges » ou « abris artificiels » qui a également été utilisée, consiste à déposer à même le sol de grands objets plats de nature diverse, légèrement surélevées à l'aide de branches et de pierres afin de laisser un espace interstitiel pour que les reptiles puissent s'y glisser (cf. Figure 6-6).

Ces plaques sont disposées dans des sites potentiellement favorables aux reptiles, telles que les lisières, friches, clairières, bordures de haies, et permettent généralement des observations dans des conditions où les animaux ne sont habituellement plus observés à découvert. L'attrait des reptiles pour les plaques refuges réside dans l'apport d'un abri contre les prédateurs en même temps qu'un moyen d'assurer la thermorégulation. Certaines espèces trouvent également sous ces abris de quoi se nourrir, les micromammifères élisant souvent domicile sous ces plaques. Cette méthode des plaques refuges est surtout efficace pour les serpents et l'Orvet fragile *(Anguis fragilis)*, mais l'est beaucoup moins pour les lézards. Ces derniers peuvent cependant s'exposer directement sur la plaque (et non dessous) et ainsi se rendre plus facilement observables. À noter que les abords de voies ferrées (désaffectées ou non) sont également des habitats assez prisés par les reptiles. La plupart des reptiles marque une nette préférence pour les postes d'insolation exposés au sud. Une exposition sud-est et sud-ouest est renseignée pour le Lézard des murailles *(Podarcis muralis)* et la Coronelle lisse *(Coronella austriaca)*. Une attention toute particulière a donc été portée sur ce point lors du positionnement des plaques refuges.

Les figure 6-7 à figure 6-9 présentent la localisation des plaques des reptiles.



Figure 6-6 Exemple de plaque refuge (source Egis)

Pour cette étude, les plaques refuges sont constituées de caoutchouc noir relativement souple, ce qui procure un triple avantage : elles accumulent rapidement la chaleur (si elles sont bien exposées au rayonnement solaire), la conservent pour la restituer au cours de la journée et procurent un abri sec pour les reptiles. Les dimensions de ces abris artificiels sont d'environ 80 cm de côté soit 0,64 m².

Chaque plaque est lentement et délicatement soulevée afin d'y détecter les reptiles et l'observateur inspecte minutieusement le sol à l'emplacement de la plaque. Certains individus peuvent en effet être partiellement cachés dans la végétation séchée sous la plaque. Celle-ci est ensuite délicatement repositionnée. Le risque d'écrasement d'individu est faible, les animaux ayant généralement fui lorsque la plaque a été soulevée.

Plus de 180 plaques au total ont été posées sur l'aire d'étude immédiate du centre de stockage : 13 sur la zone puits, 17 sur la zone descenderie, 7 sur la liaison intersites, 68 sur l'installation terminale embranchée et 79 sur la ligne ferroviaire 027000.

Les individus sont recherchés de jour et par temps ensoleillé (température comprise de préférence entre 11 °C et 19 C, sans vent). Les matinées ne rassemblant pas ces conditions sont exclues.

Dans le cadre des inventaires reptiles réalisés pour la campagne de reconnaissance des Calcaires du Barrois, seuls des relevés à vue au sein des tampons de 100m sont réalisés, sans pose de plaques.

En effet, compte de la taille et de la répartition dispersée des zones à inventorier, du fait que ces inventaires sont non reconduits les années suivantes et en raison du temps nécessaire à ce que ces dispositifs soient colonisés par les reptiles, il a été choisi de ne pas utiliser ce protocole.

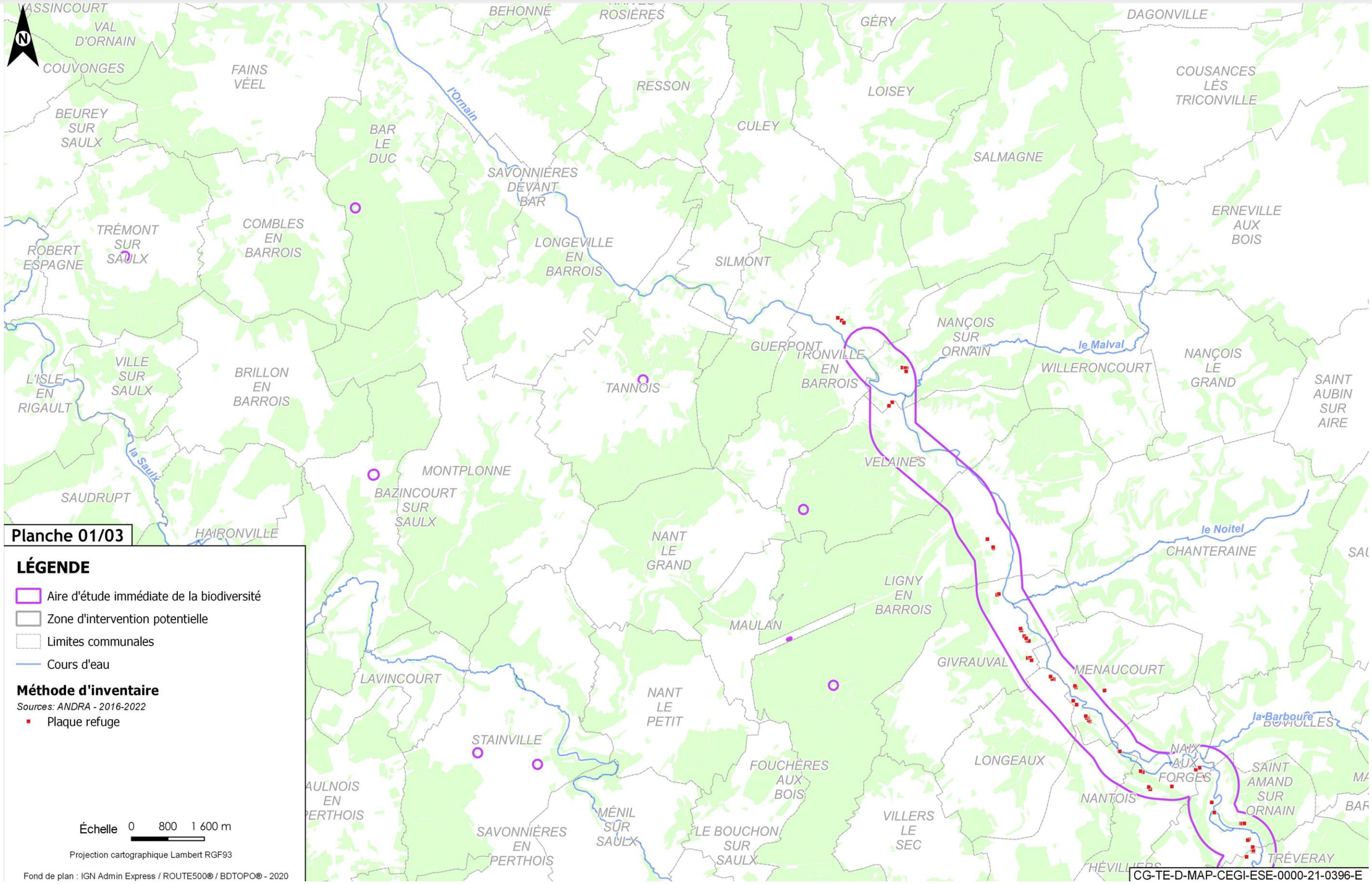


Figure 6-7 Localisation des inventaires des reptiles – 1/3

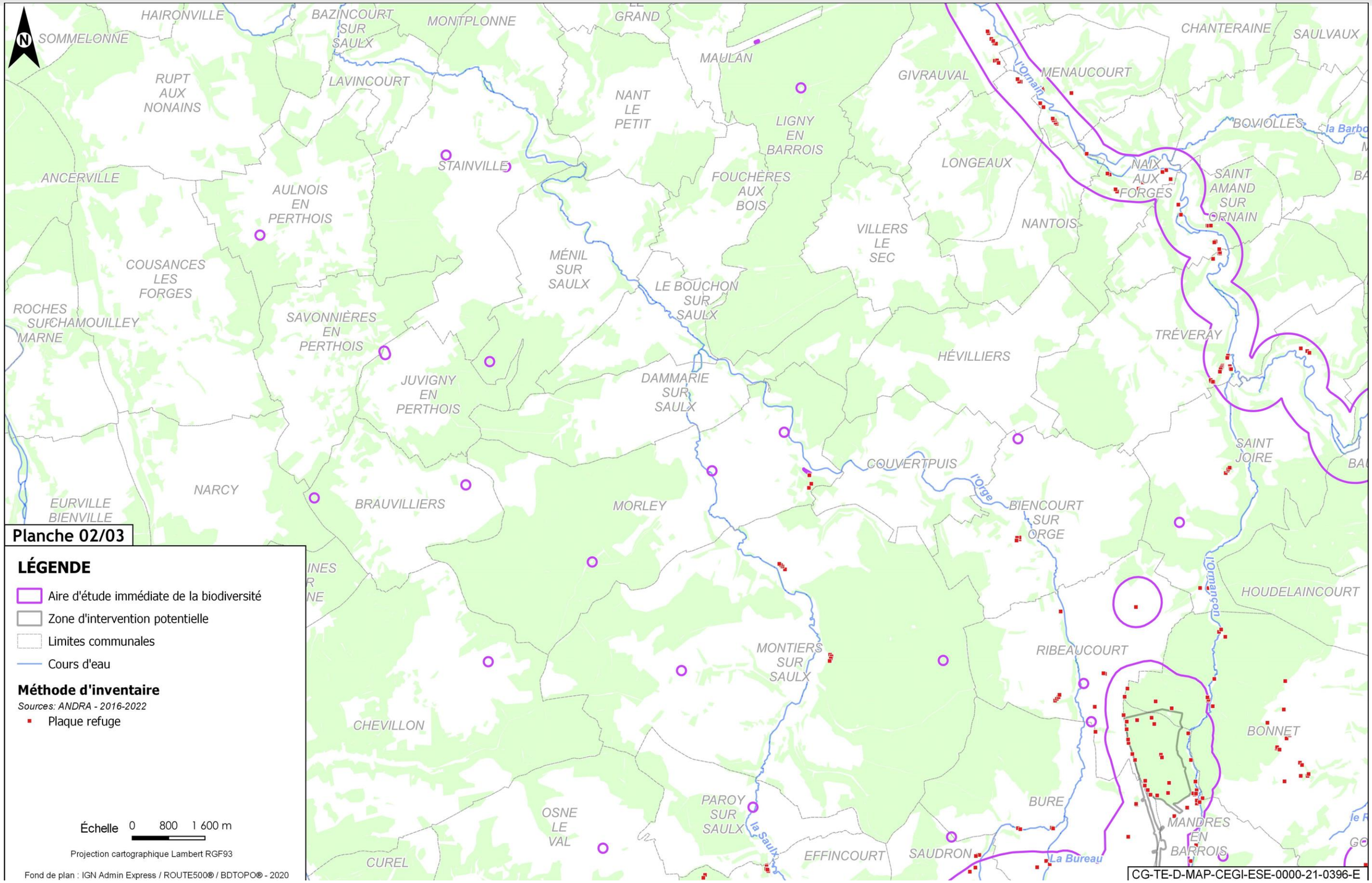


Figure 6-8 Localisation des inventaires des reptiles – 2/3

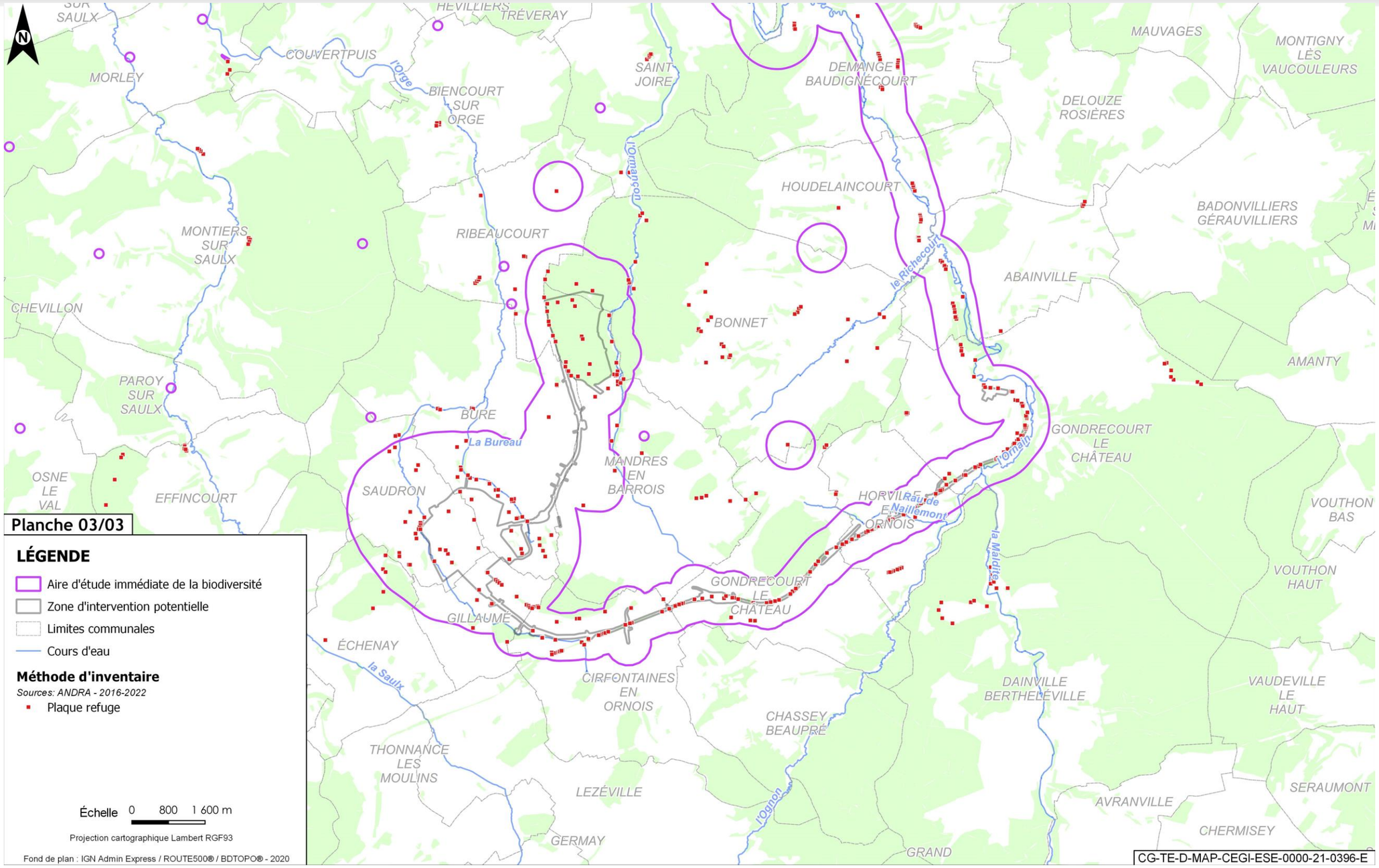


Figure 6-9 *Localisation des inventaires des reptiles – 3/3*

6.1.4.4 Protocoles d'observation des oiseaux (avifaune)

Les prospections ont été menées à différentes périodes et sur plusieurs années (cf. Chapitre 6.1.2.2 du présent volume), afin de caractériser :

- l'avifaune nicheuse diurne et nocturne pour laquelle les inventaires sont respectivement basés sur une série de parcours pédestres aux premières heures de la journée et la réalisation de points d'écoute d'une dizaine de minutes après la tombée de la nuit ;
- l'avifaune migratrice par des séances d'observation fixes et mobiles au cours des périodes prénuptiales et postnuptiales ;
- l'avifaune hivernante par des séances mobiles d'observation effectuées en journée (de début décembre à fin février).

6.1.4.4.1 Avifaune nicheuse

L'étude de l'avifaune nicheuse diurne repose sur une série de parcours pédestres (allure moyenne de l'ordre de 2 km/heure). Les relevés ont été effectués le matin pour l'essentiel, au cours de trois passages réalisés de mars à juin. Ces trois passages ont permis d'appréhender à la fois les nicheurs précoces et les nicheurs tardifs. Au cours de ces prospections, tout repérage d'individus à vue et/ou à l'ouïe a été noté.

Le mode opératoire s'apparente à la méthode des quadrats, tous les contacts ont été notés le long de trajets couvrant aires d'étude immédiate. Une valeur d'un est attribuée aux oiseaux manifestant un comportement évident de reproduction (chant, nourrissage, ...) et de 0,5 aux autres contacts.

Tous les repérages d'une espèce considérée comme patrimoniale ont fait l'objet d'un relevé cartographique (fond IGN au 25 000e agrandi au 5 000e environ) ou à l'aide d'un GPS. Une attention particulière a été portée aux espèces patrimoniales inféodées aux haies et bosquets telles que les Pies-grièches. Pour chaque espèce, le statut nicheur (certain, probable ou possible) a été précisé.

Concernant l'avifaune nicheuse nocturne, les espèces concernées sont relativement peu nombreuses mais la plupart présentent un intérêt patrimonial (espèce de l'annexe 1 de la directive oiseaux (147), liste rouge nationale, déterminantes ZNIEFF). Il s'agit en particulier de la plupart des rapaces nocturnes (Grand-duc d'Europe, Chevêche d'Athéna...), mais également d'autres espèces comme l'engoulevent d'Europe.

Afin de bien apprécier la présence des rapaces nocturnes sur la zone d'étude, un point d'écoute a été réalisé tous les kilomètres de tracé. Pour la plupart des espèces, à partir de la tombée de la nuit, après une écoute passive de quelques minutes, la méthode de la repasse a été utilisée. Elle consiste en la diffusion à l'aide d'un magnétophone du chant nuptial du mâle, ce qui a généralement pour conséquence de provoquer une réponse de la part de l'éventuel mâle nicheur présent. Cette méthode, si elle est efficace, n'est pas absolue et a été utilisée avec parcimonie afin de ne pas perturber les couples nicheurs, voire de provoquer l'abandon du site par les animaux.

Les prospections nocturnes ont débuté au plus tôt 30 minutes à 1 heure après le coucher du soleil et n'ont pas excédé minuit (1er passage) et une heure du matin (2e et 3e passages). Elles ont été réalisées par météo clémente (pas de pluie, peu ou pas de vent).

6.1.4.4.2 Avifaune migratrice

Aucun protocole standard n'est défini pour appréhender l'avifaune non nicheuse. La méthode suivie a consisté, pour le suivi de la migration prénuptiale, en des séances mobiles d'observation, sous forme de parcours pédestres, effectuées en journée. Des séances fixes d'observation ont également été réalisées sur au moins deux points répartis sur la zone d'étude.

Un accent particulier a été mis sur la recherche des espèces patrimoniales potentiellement présentes en halte migratoire. Les oiseaux en migration active ne sont en effet pas influencés par les milieux qu'ils survolent et le passage d'espèces, même rares ou sensibles, ne présente qu'un intérêt limité pour définir la richesse biologique d'un milieu.

Afin d'être vigilant et de noter la présence de l'ensemble des oiseaux en halte migratoire, l'allure moyenne a été de l'ordre de 2 $km.h^{-1}$, sous forme d'un aller simple sur l'ensemble du tracé, couvrant ainsi une bande de 200 mètres de largeur minimum, parfois jusqu'à 500 mètres.

6.1.4.4.3 Avifaune hivernante

La méthode suivie a consisté, comme pour le suivi de l'avifaune migratrice, en des séances mobiles d'observation, sous forme de parcours pédestres à allure lente, effectuées en journée. Une attention particulière a été accordée aux oiseaux utilisant les buissons d'épines noires, telles que les turdidés (passereaux de taille moyenne à grande), qui consomment les nombreuses baies en hiver.

Afin d'être vigilant et de noter la présence de l'ensemble des oiseaux hivernants, comme pour l'avifaune migratrice, une allure moyenne de l'ordre de 2 km/heure a été adoptée, sous forme de parcours couvrant l'ensemble de l'aire d'étude immédiate.

6.1.4.5 Protocoles d'observation des mammifères (hors chiroptères)

En vue d'établir l'état initial des populations de mammifères (autres que chiroptères), des prospections ont été menées sur plusieurs années et à des saisons différentes (été/hiver) (cf. Chapitre 6.1.2.2 du présent volume), afin de prendre en compte l'ensemble des espèces en fonction de leur cycle biologique (périodes d'activités, de rut...) et de pouvoir bénéficier de l'enneigement en période hivernale.

Avant la phase d'inventaires de terrain, un premier repérage sur fond IGN et photos aériennes a été entrepris. L'étude géomorphologique, ainsi que l'étude bibliographique ont également pu apporter des informations sur les secteurs de présence potentielle et/ou avérée de mammifères à rechercher spécifiquement. Ensuite, un passage de repérage de terrain, afin d'inventorier les sites (ou secteurs) sur lesquels ont été mises en œuvre les méthodologies d'étude, en particulier les protocoles spécifiques (Campagnol amphibie, Crossope aquatique, pièges en lignes ...), selon le potentiel pressenti lors de la phase de repérage cartographique, a été effectué.

Pour l'étude des mammifères, un panel de protocoles d'études, plus ou moins spécifiques, a été mis en place lors de deux campagnes (été et hiver). Ces protocoles visent à inventorier l'ensemble des mammifères présents sur les zones d'étude mais des recherches spécifiques ont dû être menées sur les espèces protégées ou patrimoniales.

Plusieurs méthodes ont été mises en œuvre pour l'observation des mammifères :

- l'observation directe d'animaux au cours de parcours (transects) effectués de jour ;
- la recherche d'indices de présence (empreintes, déjections, terriers...) : ces recherches ont été menées *via* des parcours pédestres visant à couvrir au mieux les aires d'étude immédiate ou, au moins, les différents milieux naturels (ou biotopes) les composant, en adaptant l'intensité de prospection au type de milieu ;
- des **comptages nocturnes au phare** : cette technique permet de réaliser des observations de nuit, période d'activité principale pour un grand nombre d'espèces de mammifères. Le protocole consiste à parcourir au cours des premières heures de la nuit, en véhicule et à vitesse réduite (de l'ordre de 10 km/h à 15 km/h) des axes de circulation préalablement déterminés et traversant les différents biotopes. Pendant le déplacement du véhicule, un opérateur utilise un projecteur puissant afin d'avoir une vision correcte jusqu'à une distance de 500 mètres environ ;
- l'utilisation de **pièges photographiques** : en 2020, 16 appareils ont été posés sur l'ensemble de l'aire d'étude immédiate ;
- la **collecte de poils et fèces des micromammifères** : en 2020, 49 lignes de tubes capteurs de poils et de fèces (appâtés avec des asticots et des cacahuètes) ont été disposées sur l'ensemble de l'aire d'étude immédiate, dans divers biotopes, suivant idéalement des écotones (zones de transition écologique entre deux biotopes), généralement plus attractifs pour les micromammifères ;
- l'**analyse des ossements de micromammifères** contenus dans les pelotes de réjection des rapaces ;
- la recherche des **indices de présence par temps de neige** : outre les identifications d'espèces, cette méthode permet de repérer les axes de passages (corridors) les plus fréquentés par les mammifères de taille moyenne à grande ;
- l'analyse par identification génétique (ADNe) pour les mammifères aquatiques en milieu aquatique courant.

Des recherches spécifiques ont également été menées pour identifier des espèces patrimoniales particulièrement difficiles à observer comme les petits rongeurs suivants : le Muscardin, le Crossope aquatique (ou Musaraigne d'eau) ou le Campagnol amphibie, mais également pour le Chat forestier :

- pour le Muscardin, sont recherchés les nids et les restes de noisettes ;
- pour le Crossope aquatique, des pièges à crottes et pièges à poils ont été disposés au sol (cf. Figure 6-10), dans les milieux favorables associés aux cours d'eau locaux, à raison de 20 pièges (10 de chaque type) par site. Ces pièges sont en fait des tubes avec appât, permettant de collecter les crottes ou les poils des animaux lors de leur passage. Ils ont été maintenus sur place cinq jours puis collectés ;
- pour le Campagnol amphibie ont été recherchés les indices de présence spécifiques (*crottiers* essentiellement et tiges d'herbacées coupées). L'observation des crottes ne permettant pas de différencier le Campagnol amphibie (espèce protégée) de la forme aquatique du Campagnol terrestre, des analyses génétiques complémentaires ont été réalisées afin de les distinguer ;
- pour le Chat forestier, la période de rut, générant une plus grande activité, notamment chez les mâles, est privilégiée pour l'observation d'individus.



Figure 6-10 Illustration des pièges à crottes et pièges à poils (source GREGE)

Les figure 6-11 à figure 6-13 présentent la localisation des inventaires des mammifères de 2016 à 2022.

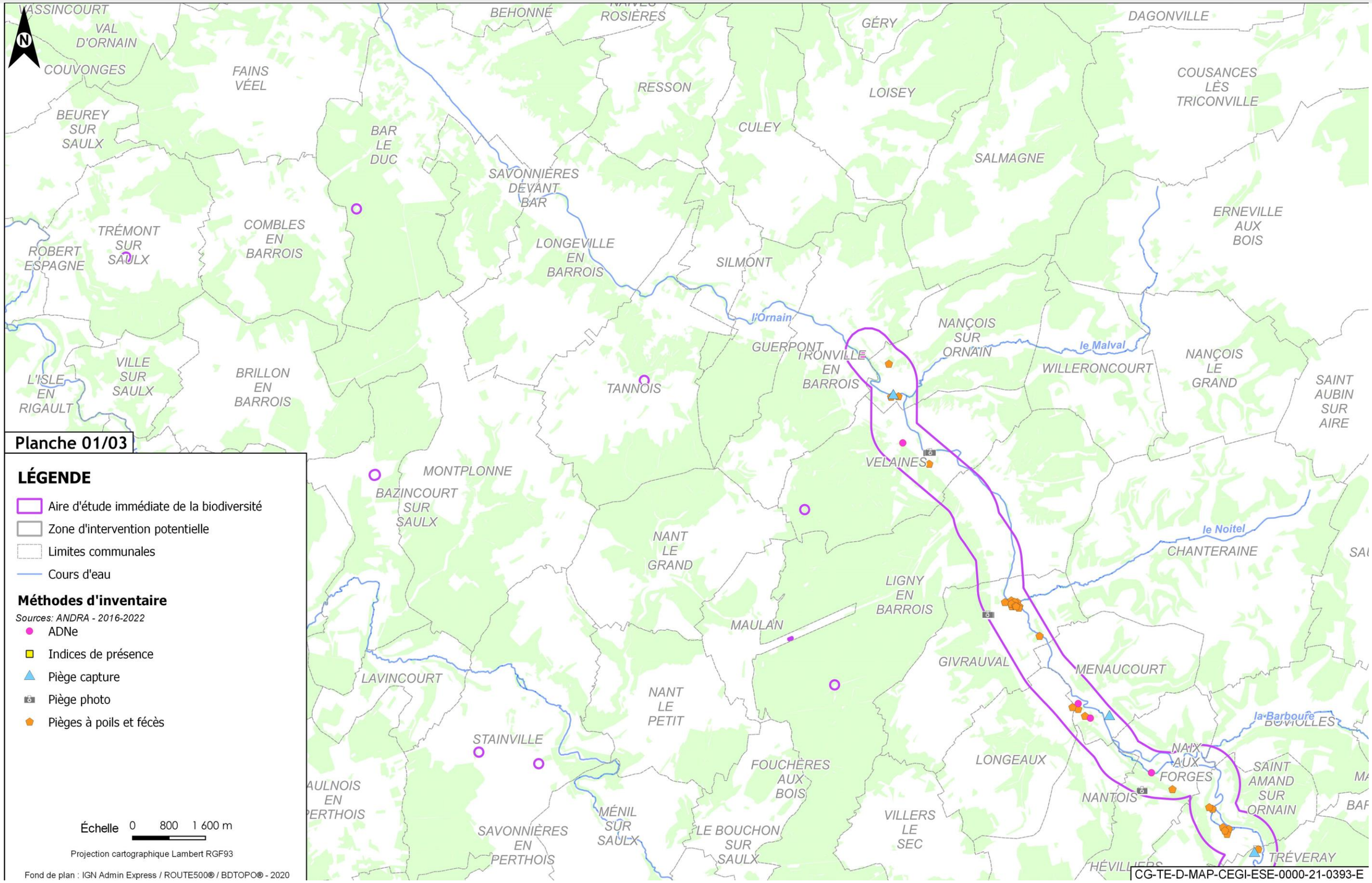


Figure 6-11 Localisation des inventaires des mammifères terrestres – 1/3

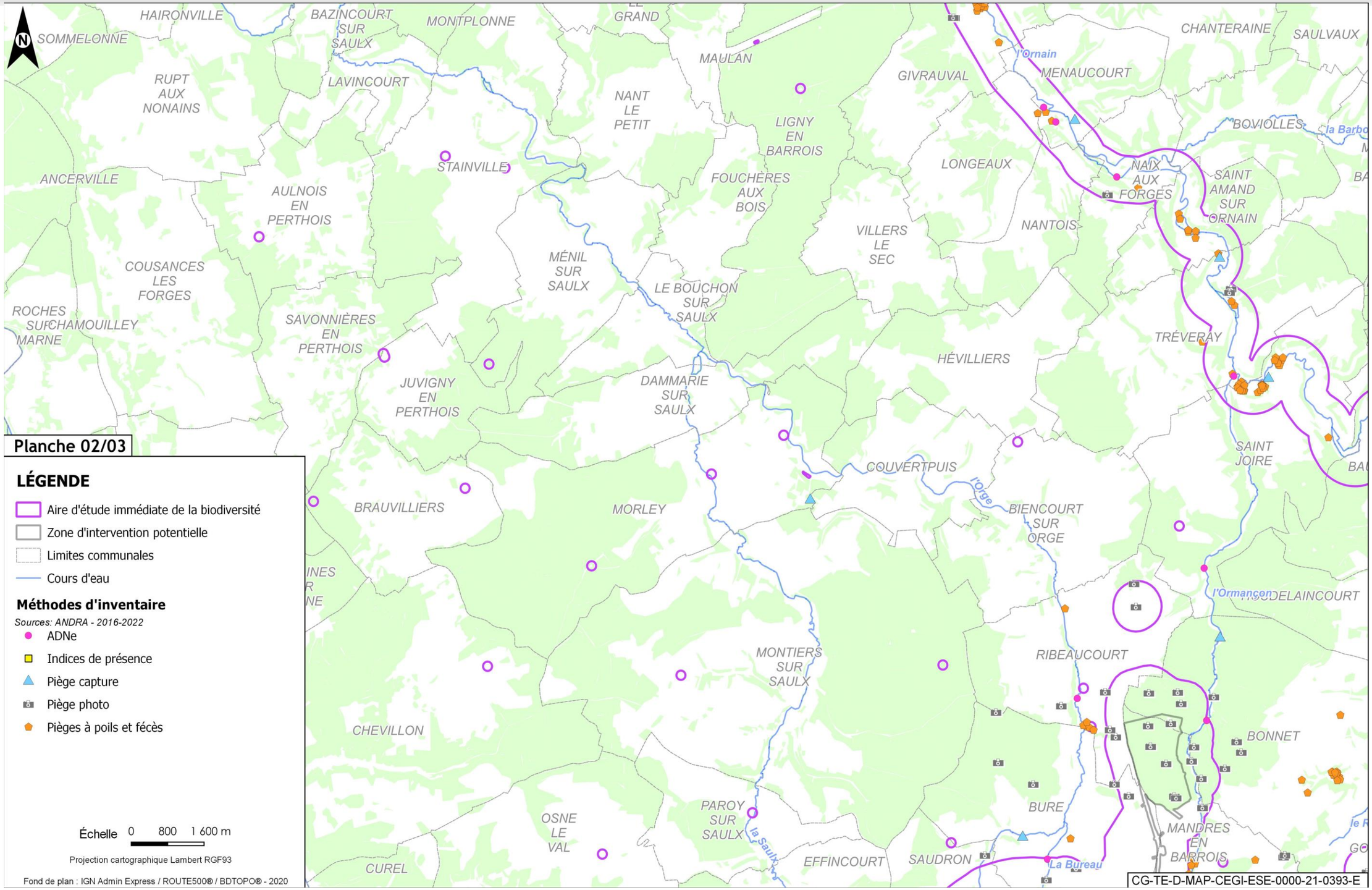


Figure 6-12 Localisation des inventaires des mammifères terrestres – 2/3

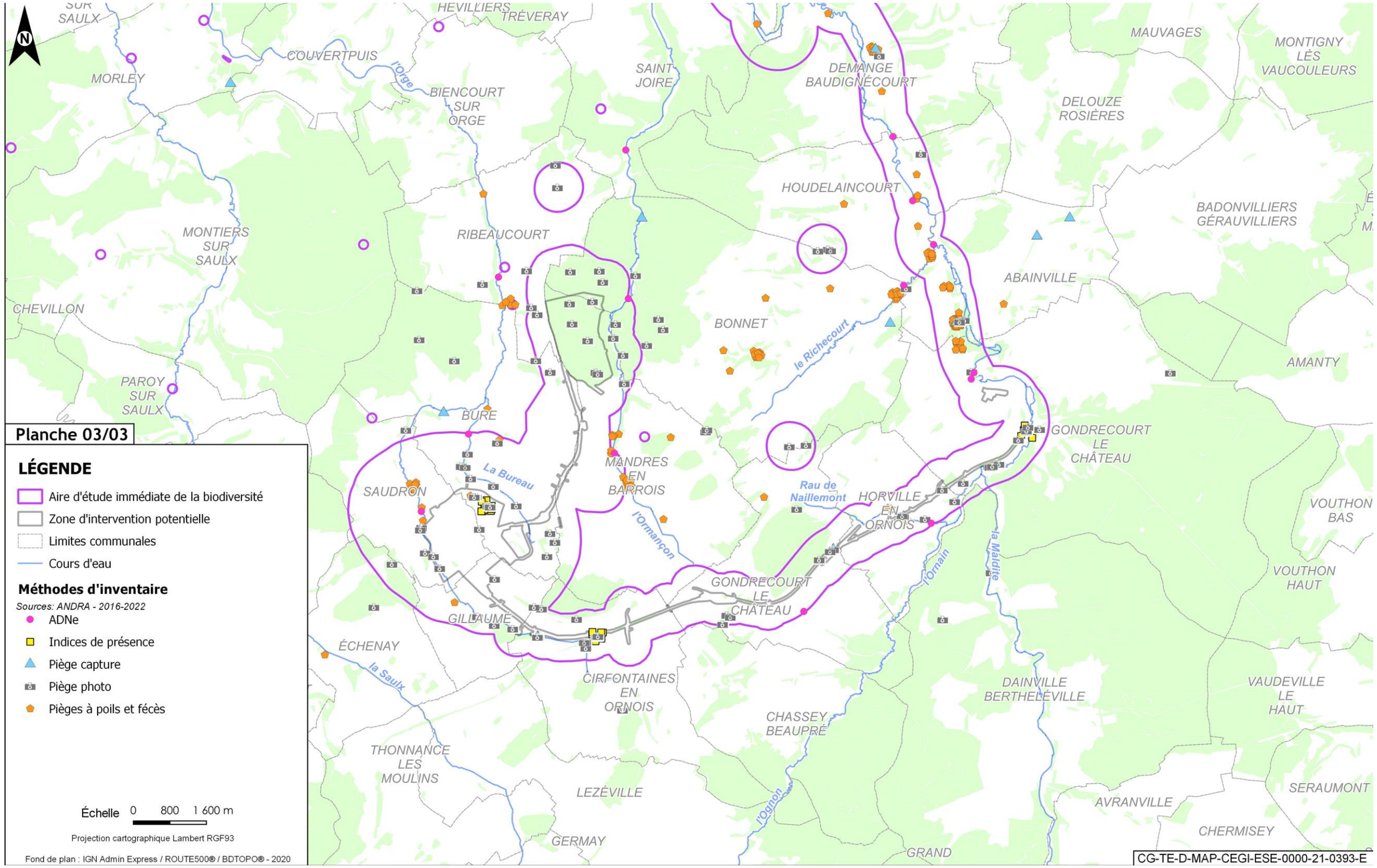


Figure 6-13 Localisation des inventaires des mammifères terrestres – 3/3

6.1.4.6 Protocoles d'écoute et de suivi des chiroptères

Plusieurs passages ont été effectués à des saisons différentes et sur plusieurs années, afin de couvrir toutes les périodes d'activités des chiroptères (cf. Chapitre 6.1.2.2 du présent volume). Le détail des dates et conditions de prospections est disponible à l'annexe 7 du présent volume.

L'objectif de ce suivi est d'établir un état initial de la diversité des populations de chiroptères au sein de l'aire d'étude du projet global, ainsi que d'évaluer les déplacements et l'étendue de leur territoire de vie à partir d'écoutes ou de recherches d'indices de présence de gîtes.

Avant la phase d'inventaire de terrain, un repérage sur fond IGN et photos aériennes a été entrepris, afin d'avoir une bonne vue d'ensemble des secteurs favorables aux chiroptères de l'aire d'étude immédiate.

En vue de réaliser le diagnostic des populations de chiroptères, deux types de méthodologies ont été mises en œuvre :

- prospection de gîtes (inventaires pied à pied en zone puits) ;
- inventaire sur terrains de chasse.

Concernant les gîtes, trois grands types sont susceptibles d'accueillir les chiroptères, en fonction des espèces, des disponibilités et de la phase du cycle biologique :

- les gîtes arboricoles (arbres creux, fissurés…) : compte tenu du très grand nombre de gîtes potentiellement utilisés dans une année par les chiroptères forestiers et de la surface importante de la zone puits notamment, un inventaire exhaustif des gîtes arboricoles n'est pas réalisable. La méthodologie consiste donc à identifier et caractériser au mieux les potentialités de l'offre en gîtes sur un massif forestier. Sur la base de la cartographie des habitats et des peuplements forestiers, des parcours (transects) aléatoires sont réalisés dans les zones considérées comme les plus favorables. Sont relevés systématiquement les arbres pouvant être utilisés comme gîtes, dans un rayon de 25 mètres autour de l'observateur.

  En parallèle, un inventaire des arbres pied à pied dans la zone puits a été réalisé afin de caractériser le potentiel « chiroptérologique » des arbres du massif. Cette méthodologie conduit à mettre en évidence les arbres présentant les potentialités les plus fortes en termes de gîte arboricole et qui feront l'objet d'une vérification avant abattage lors des travaux ;

- les gîtes anthropiques (bâtiments avec combles, caves, fissures, anciennes fortifications, ponts non jointés…) : les recherches se sont concentrées sur les gîtes potentiels situés au sein même de l'aire d'étude immédiate. Celle-ci ayant déjà fait l'objet d'inventaires des chiroptères depuis plusieurs années, les prospections ont essentiellement consisté à contrôler, par une recherche active de jour, les sites (gîtes potentiels) connus. La recherche prend en compte deux phases importantes du cycle biologique annuel des chauves-souris : la reproduction et l'hibernation. Quelques gîtes sont également visités en période de transit printanier et automnal ;

- les gîtes hypogés (fissures et failles rupestres, carrières souterrains, grottes…) : aucun site naturel de ce type n'est connu sur l'aire d'étude immédiate, mais quelques petites carrières souterraines pouvant s'apparenter à des grottes, même si elles sont d'origine artificielle, y existent. Le contrôle de ces gîtes a été réalisé.

Afin d'inventorier les chiroptères en chasse ou en vol de déplacement, deux méthodes complémentaires ont été mises en œuvre :

- mesure de l'activité sur points fixes : la méthode consiste à réaliser une écoute (à l'aide d'un détecteur d'ultrasons) sur un point fixe durant 10 minutes exactement, sur des secteurs *a priori* favorables aux chiroptères en chasse ou en vol. Sur cette durée, est notée, par période d'une minute, l'absence/présence de contact avec chaque groupe d'espèces (ou groupe « phonique »). L'identification de l'appartenance à un groupe d'espèces, ou éventuellement à une espèce, est faite au moment de l'écoute. Si celle-ci n'est pas possible à ce moment, une séquence est enregistrée et la détermination s'opère *a posteriori* à l'aide d'un logiciel adapté. 95 points d'écoute ont ainsi été réalisés en 2020 ;
- parcours d'inventaires : la méthode consiste à parcourir à pied l'ensemble de l'aire d'étude immédiate globale (à l'aide d'un détecteur d'ultrasons). Celle-ci a été divisée en 19 secteurs. Ces secteurs, de surface variable, ont été définis de sorte qu'un observateur puisse couvrir correctement chacun d'eux en une soirée. Les surfaces sont ainsi plus importantes dans les secteurs ouverts dominés par les cultures et plus réduites dans les milieux diversifiés ou forestiers. Sur chaque secteur, les parcours ont été différents à chacun des passages afin de couvrir la zone le plus complètement possible.

Ces deux méthodes ont été couplées, les points d'écoute étant intégrés aux parcours pédestres. Si les parcours n'ont pas forcément été les mêmes à chacun des passages, les points d'écoute ont été fixes.

La localisation des points d'écoute a été définie sur la base d'une analyse écologique et paysagère du territoire (notamment à partir des photographies aériennes). Cette recherche a permis de mettre en évidence des lisières forestières, des haies et des zones humides intéressantes pour ces espèces.

Afin d'effectuer des inventaires précis, les enregistreurs à ultrasons utilisés sont de type type BatCorder 2.0 et 3.0 et Mini BatCorder et sont été positionnés sur les sites à haut potentiel (linéaires de haies et lisières). Cette technique permet la détermination de l'ensemble des espèces fréquentant un site au cours d'une ou plusieurs nuits, ainsi que la fréquence de l'utilisation de cet habitat. Les enregistrements issus de ces campagnes sont exploités au moyen de logiciels spécialisés (BcAdmin et BatIdent).

Dans le cadre des inventaires des chiroptères menés pour la campagne de reconnaissance des Calcaires du Barrois, l'ensemble des tampons ont fait l'objet d'écoutes nocturnes pour déterminer les espèces et connaître l'utilisation par les espèces des zones inventoriées.

La méthodologie employée pour la détermination des chiroptères comprend :

- **La pose de BatCorders** 2.0 et 3.1 (enregistreurs de détection ultrasonore) au niveau des placettes les plus favorables aux chiroptères, en général en milieu forestier ou dans un paysage de type bocager, et dans une diversité de milieux afin de pouvoir relever l'ensemble des cortèges. Ces enregistreurs mis en place durant une nuit complète à chaque fois ont permis d'apporter un maximum de données sur les espèces présentes localement ainsi que sur leur activité au sein des placettes ;
- **La réalisation de points d'écoute semi-active** (identification partielle sur le terrain, complétée par une analyse plus poussée des enregistrements sur ordinateur après la phase de terrain) d'une dizaine de minutes, à l'aide d'un détecteur/enregistreur à ultrason manuel (EchoMeter Touch 2 pro) pour la majorité et le restant des placettes, supposées « moins favorables » à l'accueil des chiroptères. Les points d'écoute ont été réalisés la plupart du temps en parcourant une partie de la placette en marchant à vitesse lente, entrecoupé de petits arrêts sur place. Des points d'écoute ont également été effectués en plus de la pose de BatCorders sur certains sites forestiers, jugés intéressants pour les chiroptères, afin de tenter de maximiser davantage le nombre de contacts et d'espèces.

Pour l'étude des chiroptères, les prospections sont menées dans des conditions météorologiques favorables : nuit sans précipitation, ni vent fort et température douce (supérieure à 12° C). Les soirées ne rassemblant pas ces conditions sont exclues.

Les figure 6-14 à figure 6-16 présentent la localisation des points d'écoute des chiroptères de 2016 à 2022 et les figure 6-17 à figure 6-19 la localisation des gîtes arboricoles recensés.

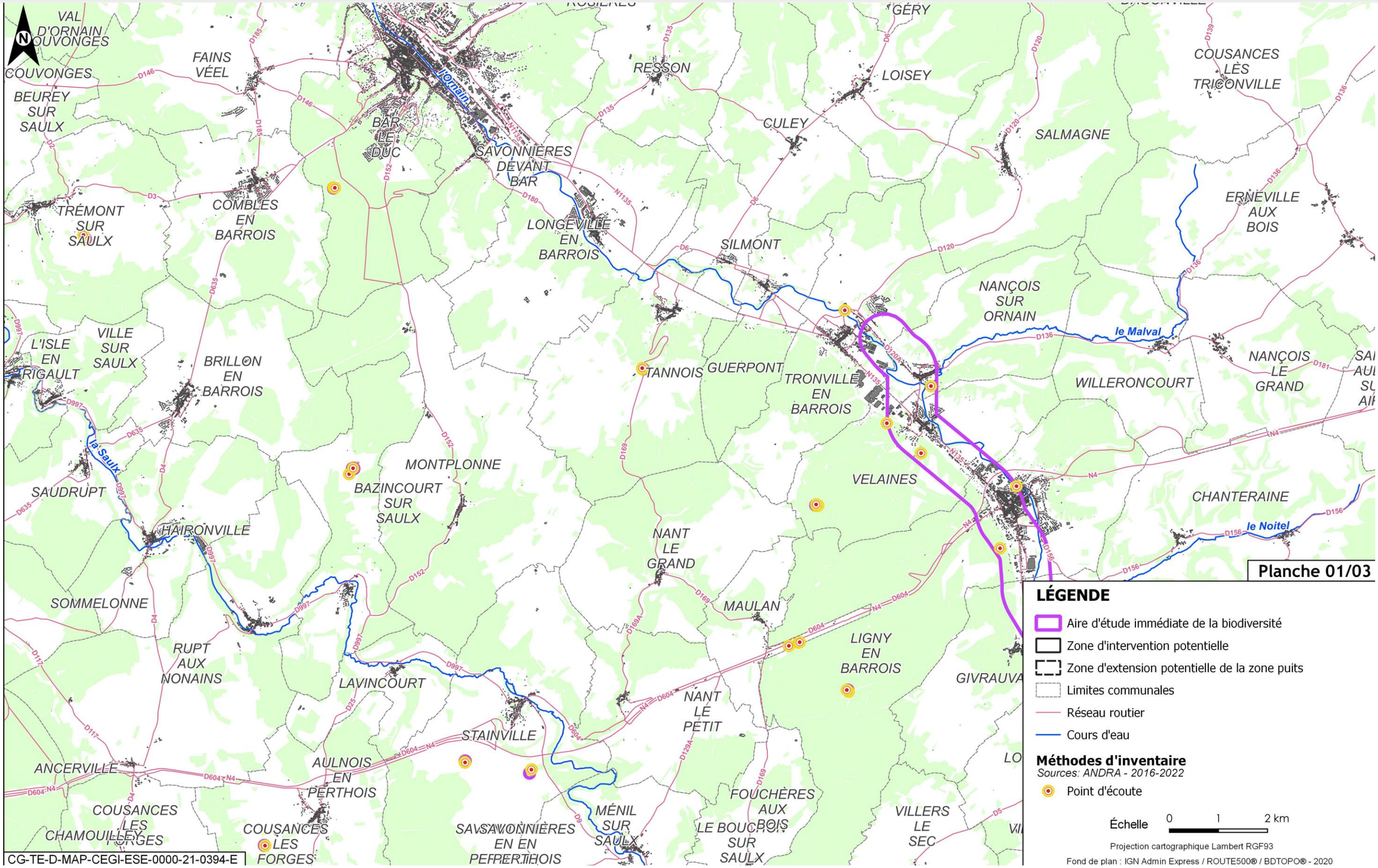


Figure 6-14 Localisation des points d'écoute des chiroptères - 1/3

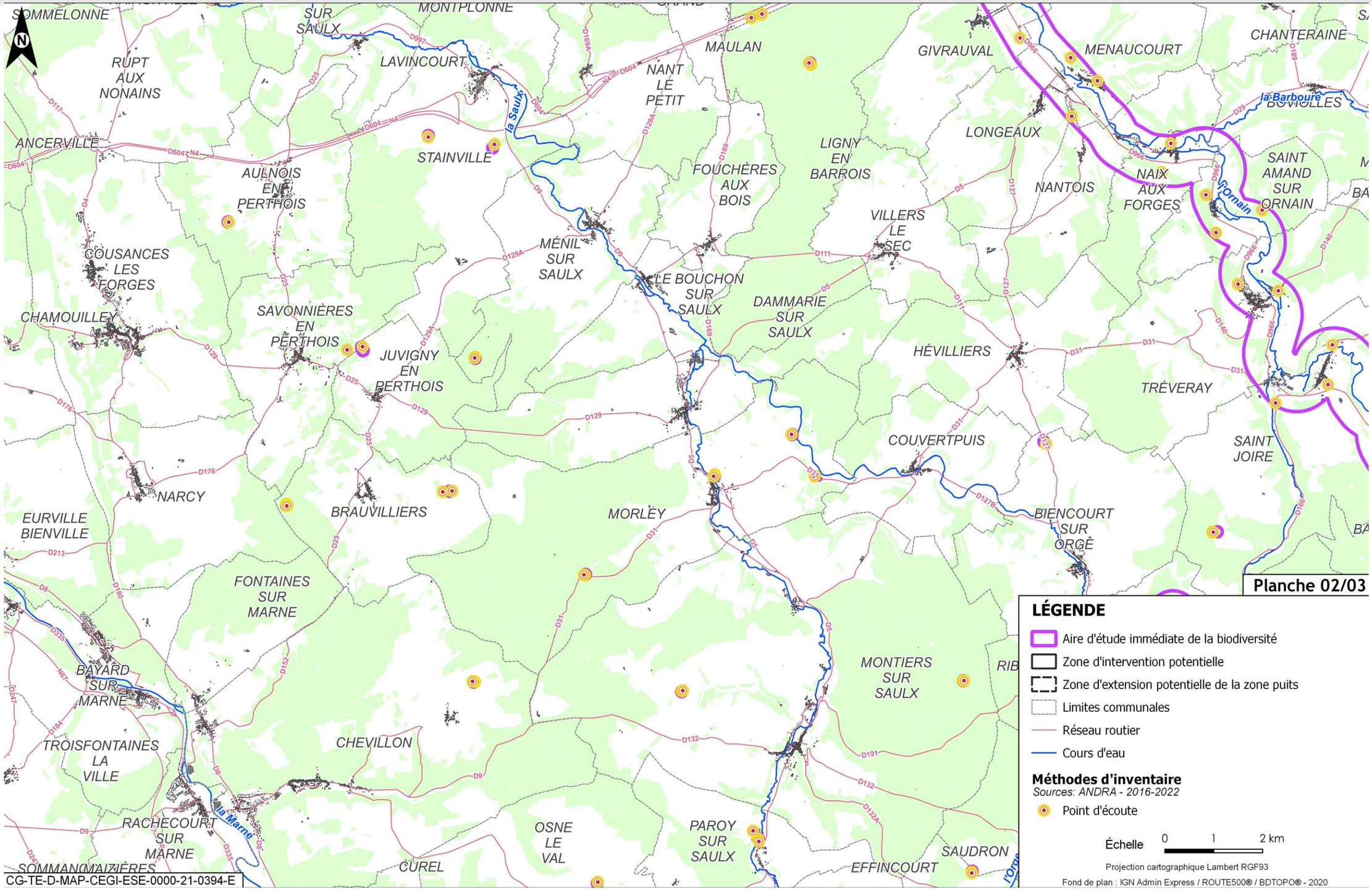


Figure 6-15 Localisation des points d'écoute des chiroptères – 2/3

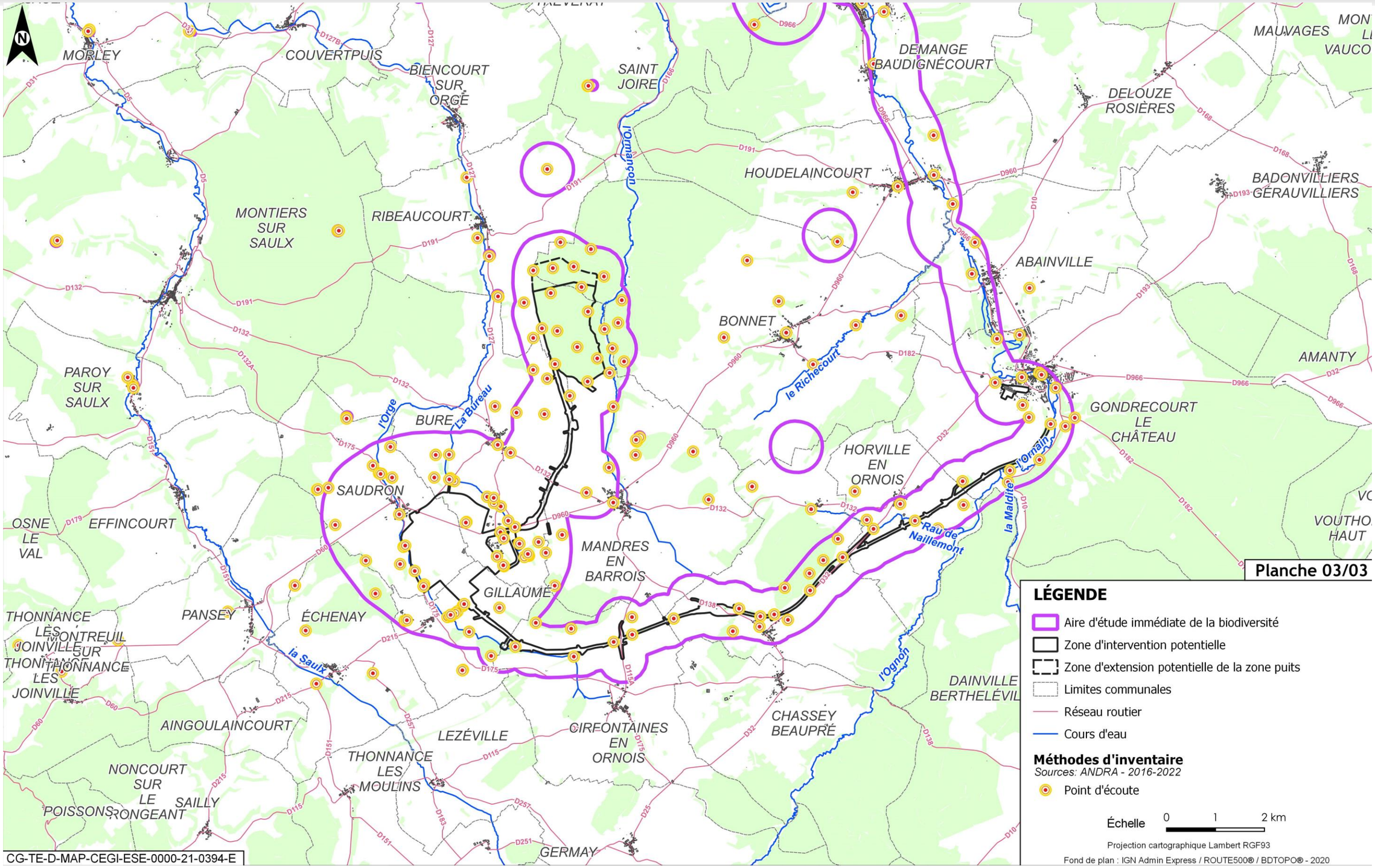


Figure 6-16 Localisation des points d'écoute des chiroptères – 3/3

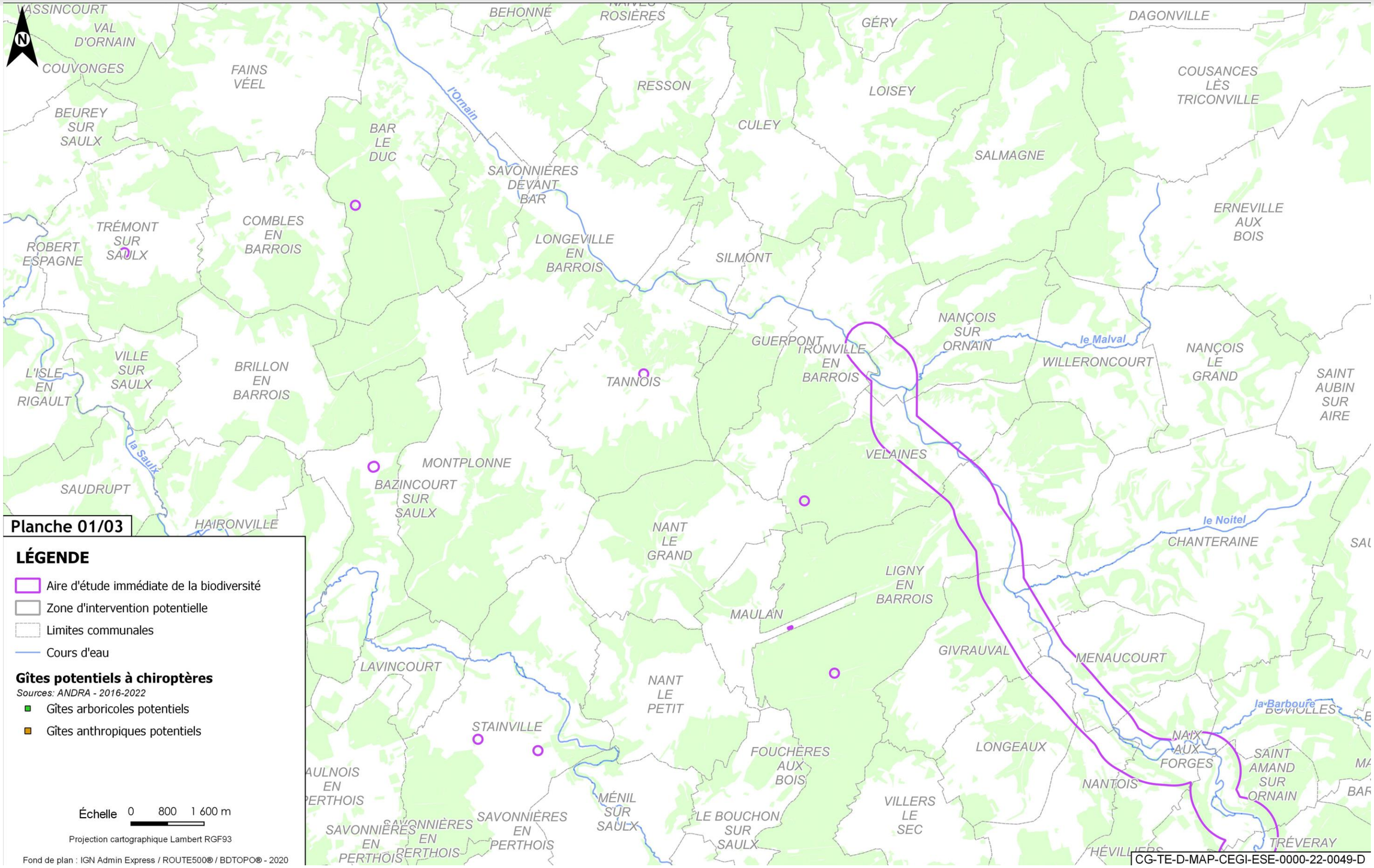


Figure 6-17 Localisation des gîtes à chiroptères - 1/3

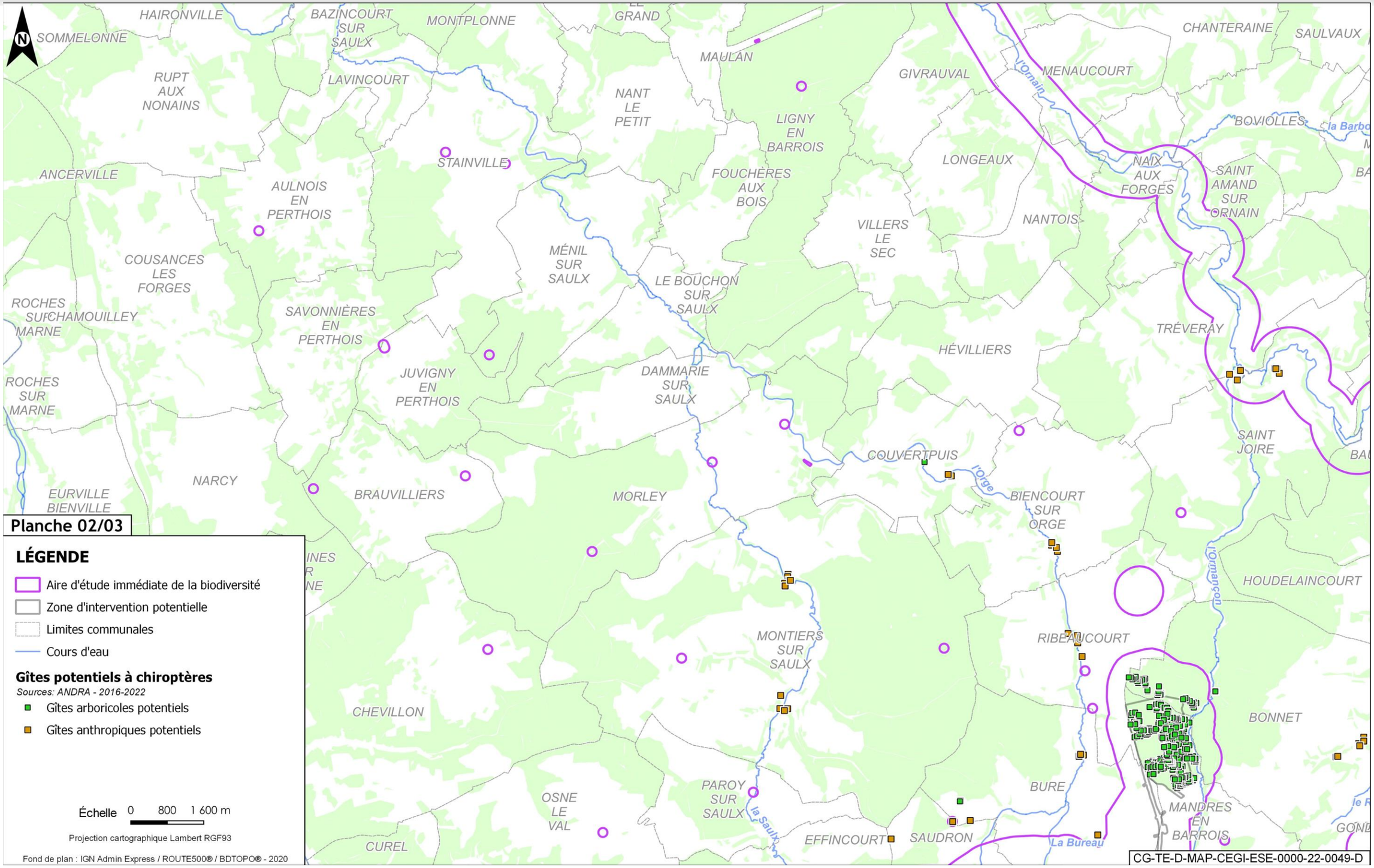


Figure 6-18 Localisation des gîtes à chiroptères – 2/3

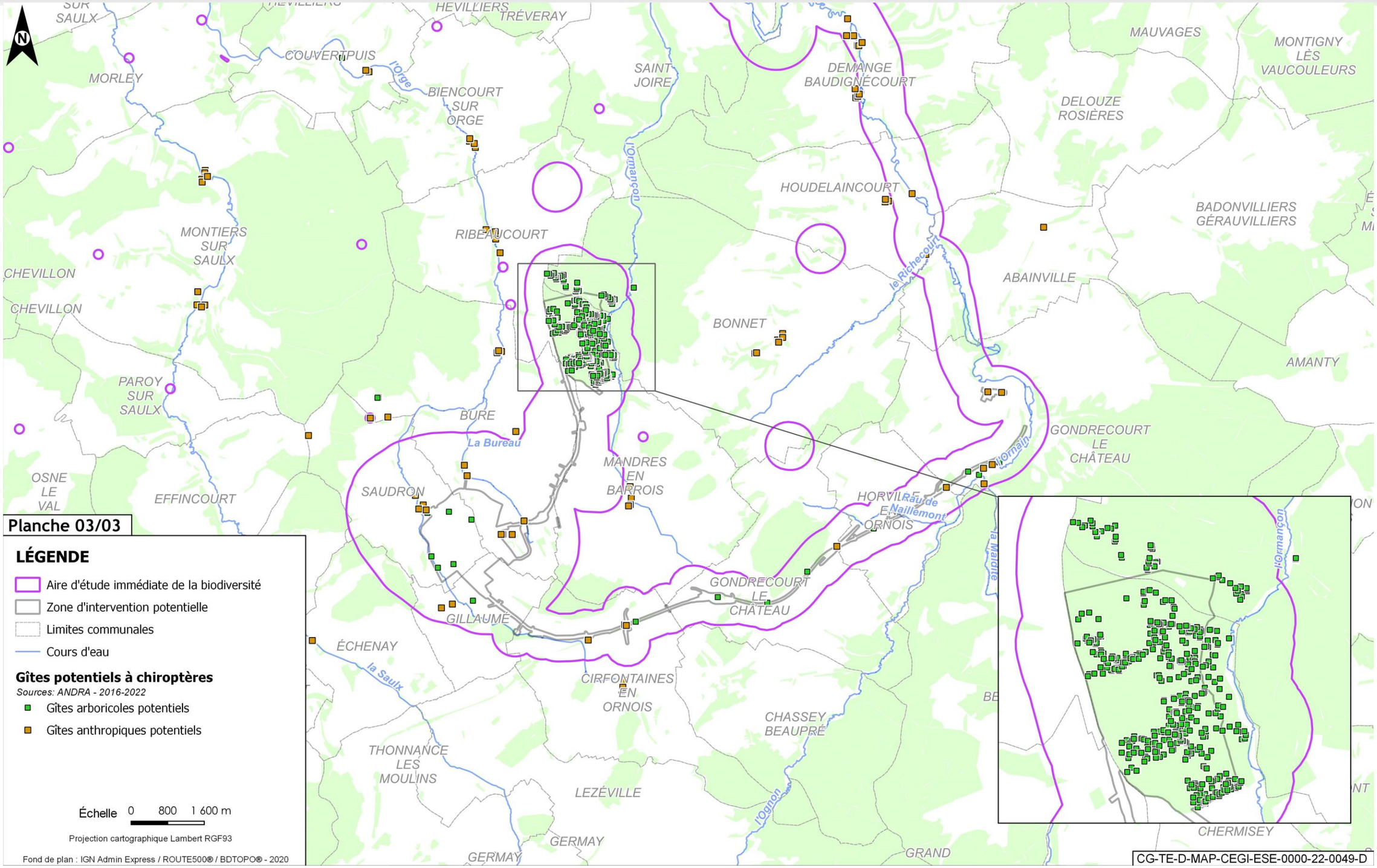


Figure 6-19 Localisation des gîtes à chiroptères – 3/3

6.1.4.7 Protocoles d'observation de la faune piscicole et des zones de frayères

L'inventaire de la faune piscicole a été réalisé de 2015 à 2020 grâce à des pêches électriques (matériel équipé d'une anode pour 4 mètres de large) dans les cours d'eau suivants : la Saulx, l'Orge, l'Ornain, l'Ormançon, la Barboure, le Richecourt, la Maldite, le ruisseau du Naillemont et le ruisseau de l'Étang. La Bureau, située à proximité de la zone descenderie, à sec la plus grande partie de l'année, n'est pas un réservoir de faune piscicole. (En 2017, compte tenu des conditions hydrologiques, tous les cours d'eau n'ont pas pu être échantillonnés. C'est le cas de l'Ormançon, l'Ornain, la Barboure et le Richecourt).

La pêche à l'électricité se pratique à l'aide d'un appareil portatif autonome fonctionnant sur batterie mis en route par le pêcheur. Le principe de la pêche électrique est de créer un champ électrique dans l'eau entre les deux électrodes (la cathode et l'anode) qui attirent les poissons. Les poissons peuvent ainsi facilement être pêchés. La surface en eau est prospectée à pied et de manière complète sur toute la largeur. Deux passages successifs sont réalisés avec retrait des poissons entre chaque passage. L'ensemble des poissons capturés est identifié, mesuré et pesé. À la fin de l'opération, tous les poissons sont relâchés dans le milieu d'origine.

L'identification des sites de frai s'est déroulée en deux temps, suivant la circulaire du 21 janvier 2009 relative aux frayères et aux zones de croissance ou d'alimentation de la faune piscicole (MEEDDAT, 2009) (148). En premier lieu, la campagne de prospection de frayères potentielles (menée entre juin et juillet 2017, au niveau des cours d'eau suivants : la Saulx, l'Ornain, l'Orge, l'Ognon, la Maldite, le Naillemont, le ruisseau de l'Étang, la Barboure, le Richecourt, l'Ormançon, l'Osne, le Mont et la Marne à Joinville) a permis d'effectuer une identification des surfaces pouvant être susceptibles d'accueillir le frai au regard des espèces cibles. Cette approche probabiliste se focalise essentiellement sur l'observation de la granulométrie de fond de lit du cours d'eau.

Les conditions hydrologiques de l'été 2017 (assec) ont été peu favorables à la reconnaissance des zones de frayères potentielles. Les relevés complémentaires visant à repérer les frayères avérées ont été réalisés du 8 au 12 janvier 2018. Cependant les conditions hydrologiques de janvier 2018 (crue) ont été peu favorables à l'observation des zones de frayères avérées.

Dans un second temps, une étude de localisation des frayères a été réalisée lors de la période hivernale 2019-2020 afin de compléter l'étude réalisée en 2017 par la société PEMA sur les frayères potentielles. L'objectif est de démontrer que le caractère potentiel des frayères relevées en 2017 est avéré pour certaines espèces.

À partir des données disponibles sur la faune piscicole, seules les espèces bénéficiant d'un statut de protection particulier ont été considérées (espèces protégées ou listées en annexe de la directive habitats (138)). Les inventaires sont établis en tenant compte des arrêtés préfectoraux des départements de la Meuse et de la Haute-Marne portant inventaire et classement des zones de frayères, de croissance ou d'alimentation de la faune piscicole.

Les figure 6-20 à figure 6-22 localisent les pêches électriques réalisées entre 2015 et 2020.

6.1.4.8 Protocoles d'observation des mollusques

Une première étude des mollusques aquatiques a été réalisée de 2012 à 2014, au cours de laquelle les prospections de terrain ont mis en évidence 58 espèces de gastéropodes terrestres, et 27 espèces de mollusques aquatiques dont trois grands bivalves (*Anodonta anatina, Unio mancus* et *Unio crassus)*. Parmi les mollusques aquatiques, deux espèces protégées la Bythinelle des moulins (*Bythinella viridis)* et la Mulette épaisse (*Unio crassus)* avaient été collectées.

Afin de compléter ces données, des prospections de sources pour actualiser les données de présence de la Bythinelle des moulins ont été réalisées en 2020 et en 2021, ainsi que des prélèvements d'eau pour l'analyse de l'ADN environnemental et, enfin, des recherches spécifiques ont été menées pour la Mulette épaisse dans les sections de cours d'eau franchis par les ouvrages d'art ferroviaire.

La première phase de terrain s'est déroulée du 24 au 29 septembre 2020. En 2021, les compléments d'inventaire sur les sources du périmètre centre de stockage Cigéo et les recherches de mulette se sont tenus respectivement du 12 au 14 avril 2021 et du 19 mai 2021 au 23 mai 2021.

Les **prospections de sources** ont consisté en une visite du site. Les Bythinelles des moulins ont été recherchées à vue sous les pierres immergées, sous la végétation et sur le sédiment. Dans certains cas, lorsqu'il n'y avait aucun animal visible, un tamisage de sédiments à l'aide d'une épuisette métallique d'1 mm de vide de maille a été réalisé pour rechercher des coquilles.

Quant aux **prélèvements d'eau pour l'analyse de l'ADN environnemental**, la méthode standard d'échantillonnage mise au point pour les bivalves en milieu courant consiste pour chaque site à réaliser deux prélèvements de 30 litres d'eau chacun. Les prélèvements sont réalisés par pompage direct dans le cours d'eau à l'aide d'une pompe péristaltique portative. L'eau prélevée est filtrée immédiatement dans une capsule dédiée. Une solution tampon est ajoutée dans la capsule à la fin de la filtration de manière à garantir une bonne préservation de l'ADN et la capsule est envoyée au laboratoire pour analyse. Tout le matériel utilisé est stérile et garanti DNA-free.

La présence de la **Mulette épaisse** sur l'Ornain avait été mise en évidence à Tréveray par les études préliminaires (2013-2014). Sur la base des résultats des analyses ADNe, des prospections spécifiques ont été menées au niveau de tous les ouvrages de franchissement de la ligne SNCF, ouvrages qui pourraient faire l'objet de travaux de réfection. Les prospections ont été réalisées à l'aide d'aquascopes (totalité des stations prospectées), avec parfois la mise en œuvre de plongée hyperbare quand la profondeur le nécessitait. L'importance des populations sur chaque site a été évaluée par *Catch Per Unit Effort* (capture par unité d'effort, CPUE) soit ici le nombre d'individu observé par unité de temps.

Les figure 6-23 à figure 6-25 localisent les sources prospectées pour l'inventaire des mollusques.

6.1.4.9 Regroupement en cortèges d'espèces faune

Sur la base de la caractérisation des enjeux sur les espèces protégées et patrimoniales, il a été décidé de les regrouper en cortèges de même affinité écologique avec pour chaque cortège la définition d'espèces cibles patrimoniales et ou protégées. Les espèces plus communes et ayant une certaine plasticité écologique et capacité d'adaptation seront tout de même pris en compte par « effet parapluie », conditionnées par les espèces patrimoniales à l'écologie plus spécifique.

À noter qu'au regard de l'écologie de certaines espèces, certaines sont présentes au sein de plusieurs cortèges car en capacité d'utiliser plusieurs habitats pour effectuer leur cycle de vie.

25 cortèges ont été définis et sont présentés en annexe 8.2 du présent volume.

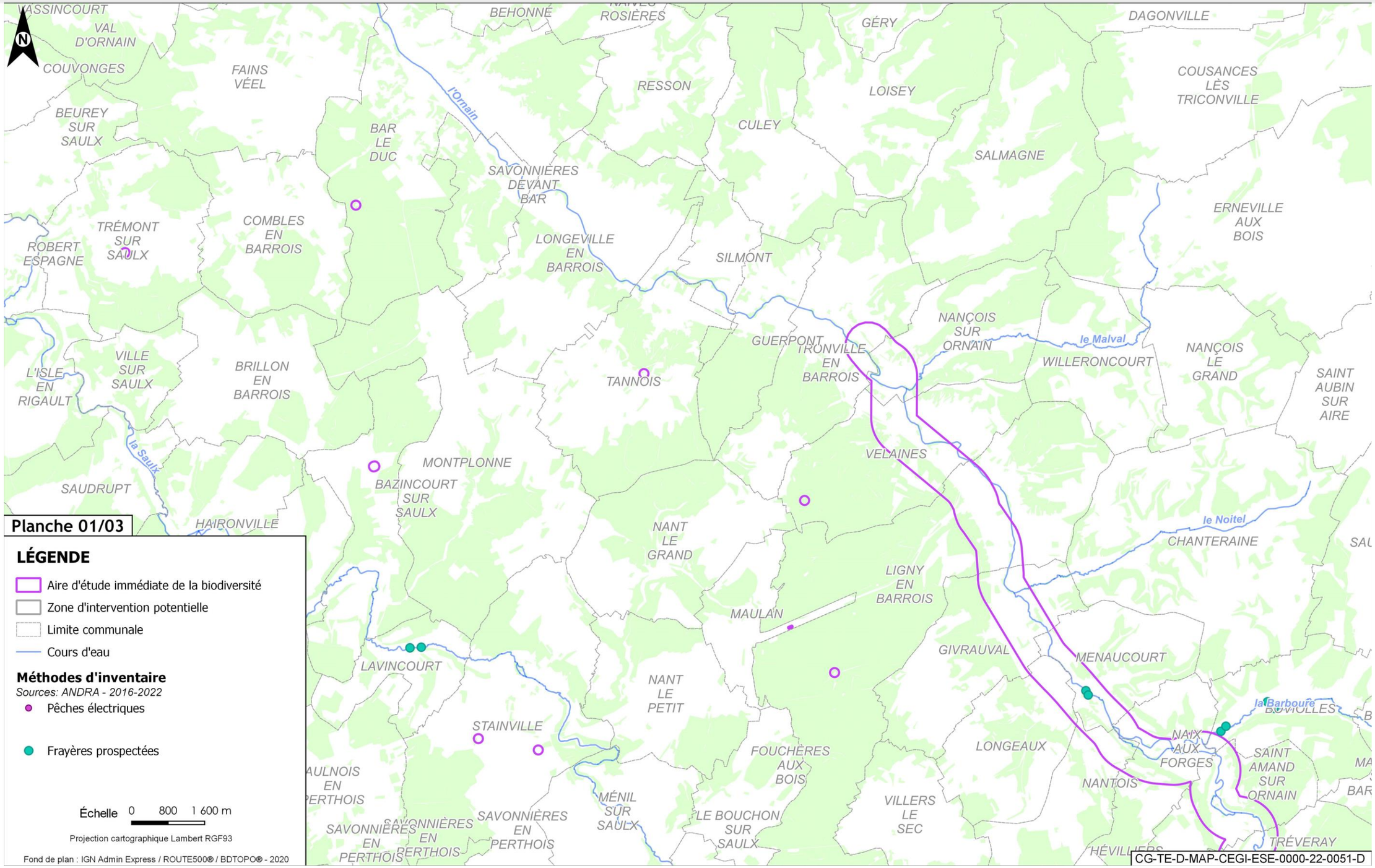


Figure 6-20 Localisation des pêches électriques - 1/3

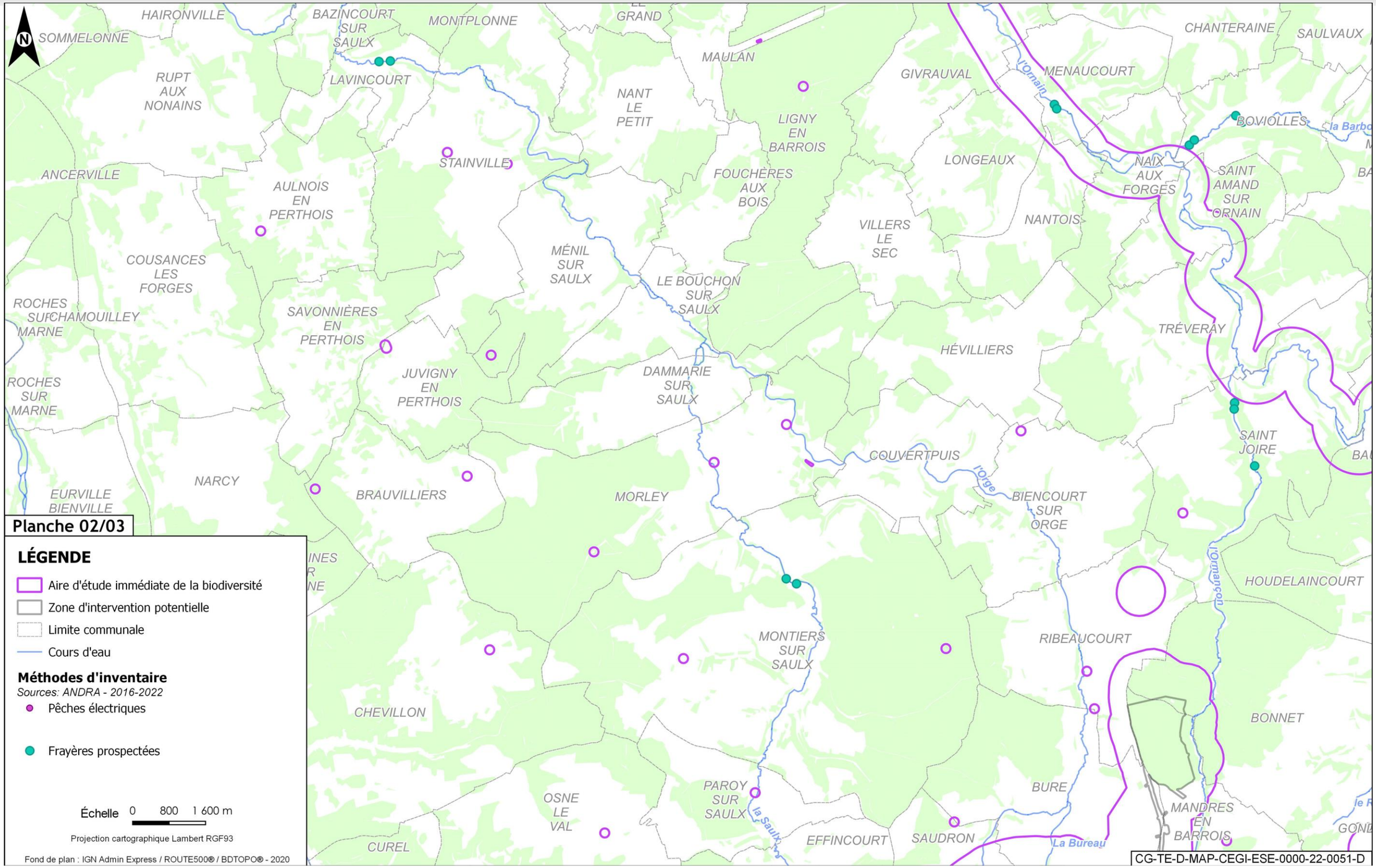


Figure 6-21 Localisation des pêches électriques - 2/3

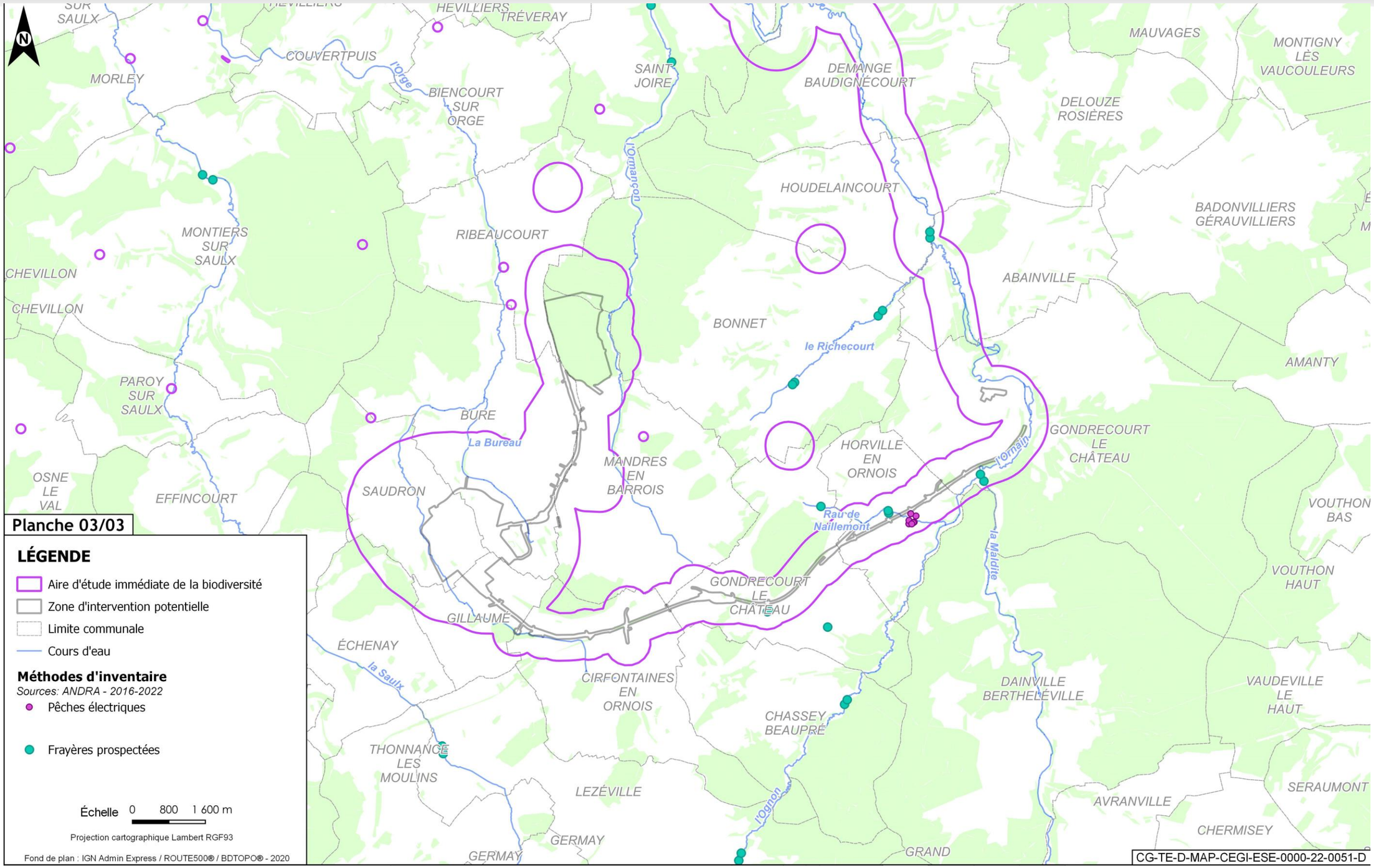


Figure 6-22 Localisation des pêches électriques - 3/3

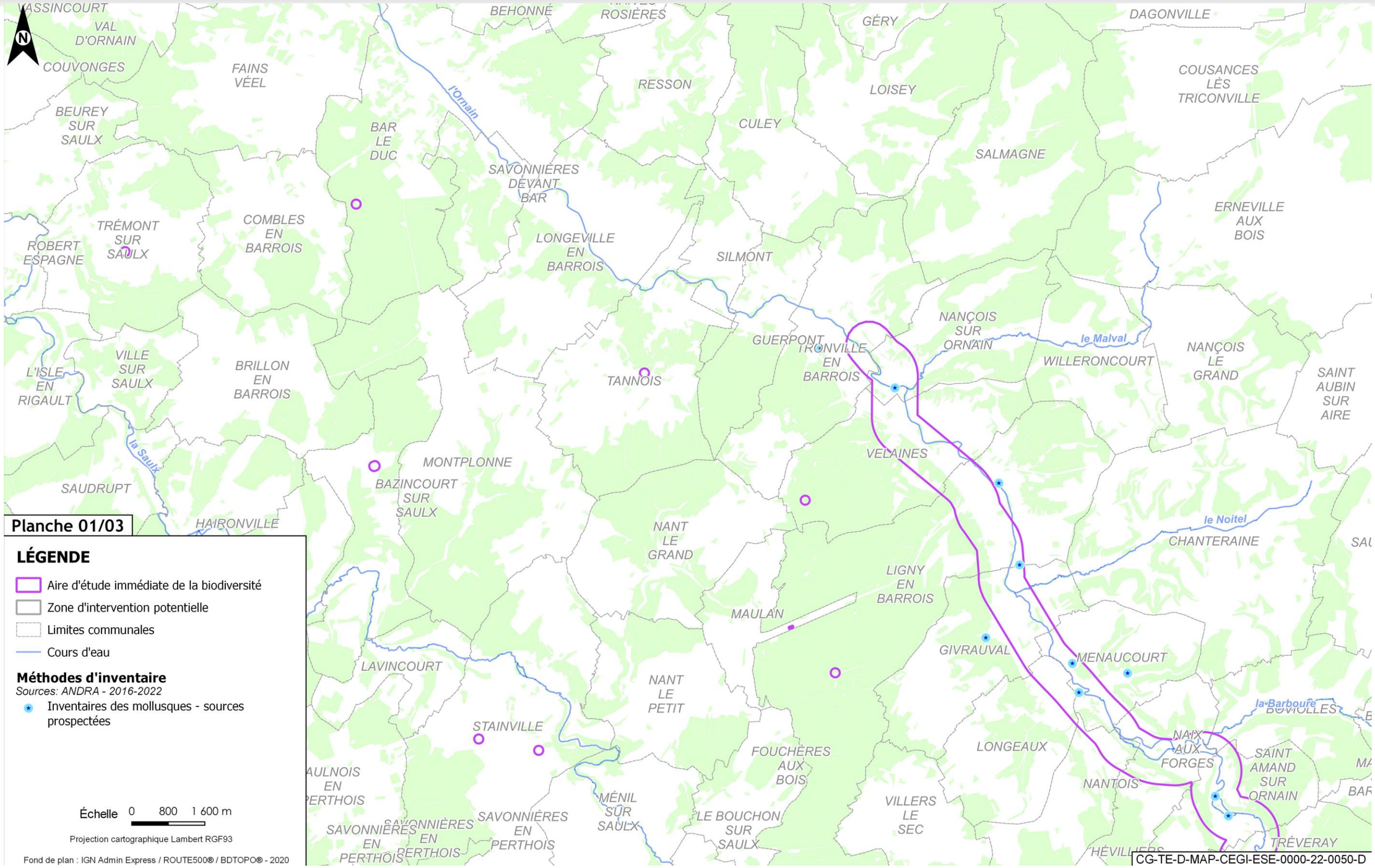


Figure 6-23 Localisation des sources prospectées pour la recherche de mollusques - 1/3

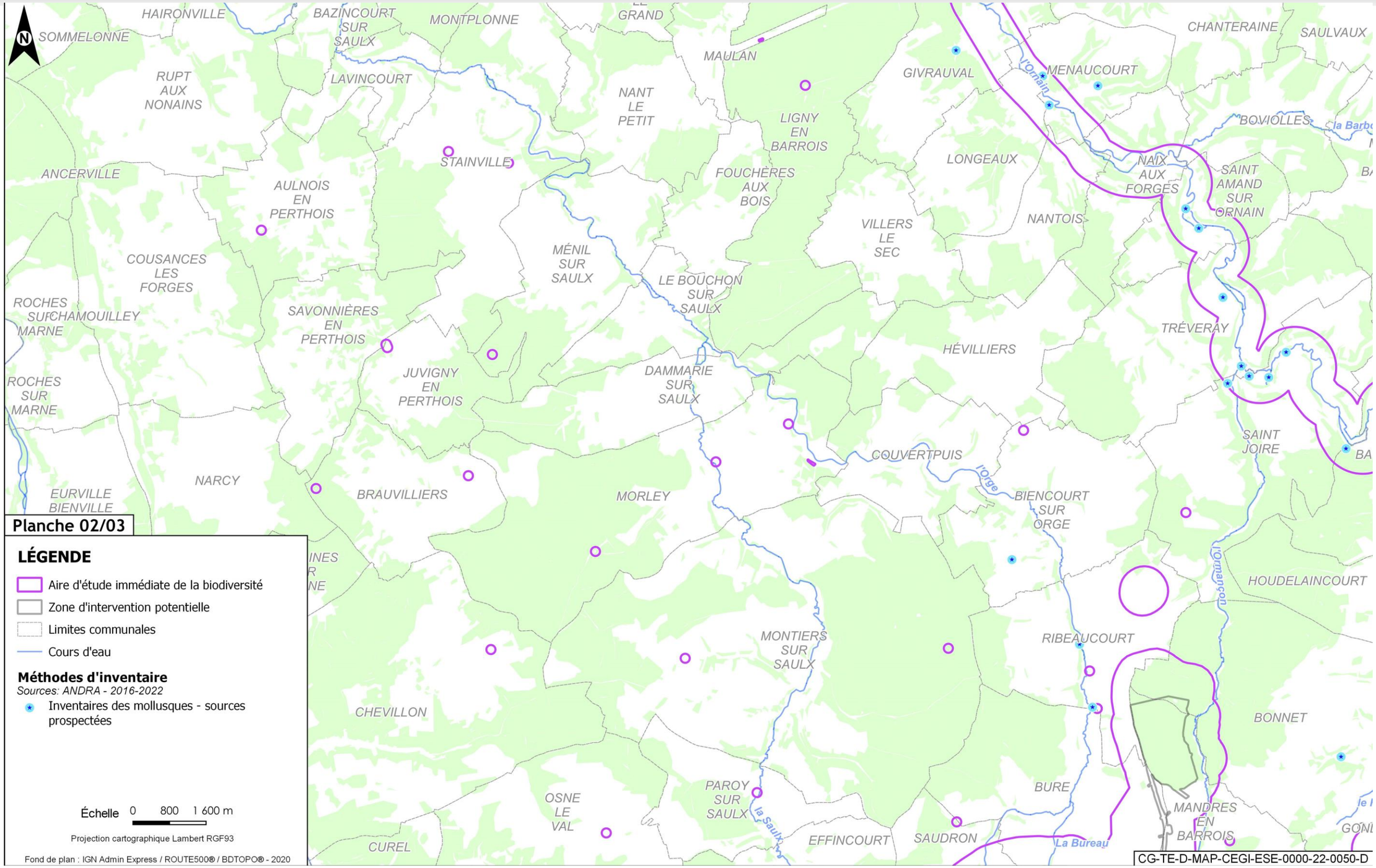


Figure 6-24 Localisation des sources prospectées pour la recherche de mollusques - 2/3

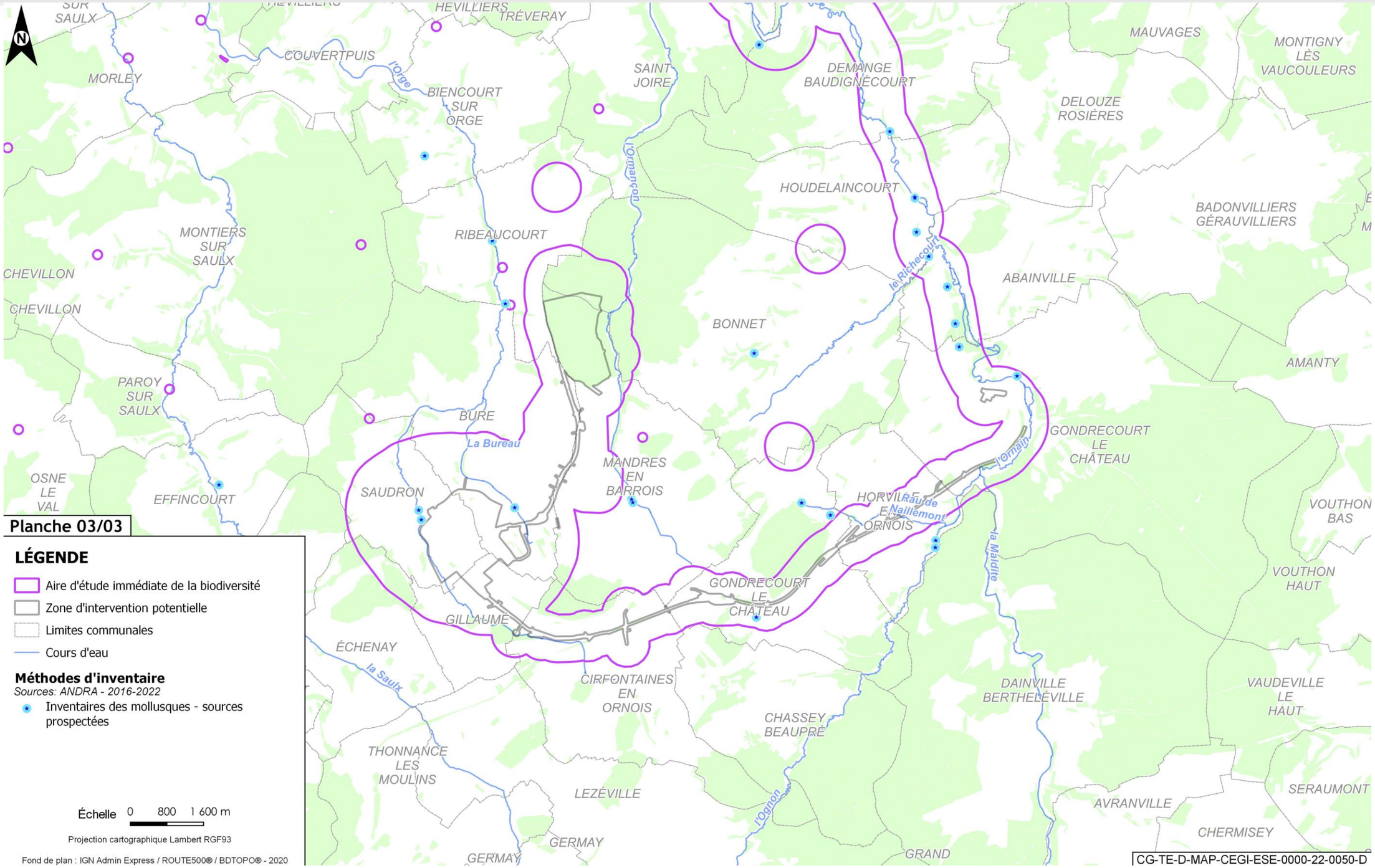


Figure 6-25 Localisation des sources prospectées pour la recherche de mollusques - 3/3

6.1.5 Délimitation des zones humides

Conformément à la réglementation en vigueur lors de la réalisation des études, une identification et une délimitation des zones humides sont réalisées en application des articles L. 211-1 et R. 211-108 du code de l'environnement en trois temps.

L'article L. 211-1 du code de l'environnement, qui instaure et définit l'objectif d'une gestion équilibrée de la ressource en eau, vise en particulier la préservation des zones humides, dont il donne la définition en droit français (définition de la loi sur l'eau de 1992 (149)) : *« On entend par zone humide les terrains, exploités ou non, habituellement inondés ou gorgés d'eau douce, salée ou saumâtre de façon permanente ou temporaire ou dont la végétation, quand elle existe, y est dominée par des plantes hygrophiles pendant au moins une partie de l'année »* (article L. 211-1 du code de l'environnement, modifiée par la loi n° 2019-773 du 24 juillet 2019 (150), art. 23).

La définition légale des zones humides est donc fondée sur deux critères alternatifs que constituent, d'une part, les sols habituellement inondés ou gorgés d'eau et la végétation hygrophile (espèces adaptées à la vie dans des milieux très humides ou aquatiques).

La méthode retenue est donc de réaliser une cartographie de la végétation permettant de caractériser les habitats afin de différencier les habitats dits « humides » (H) des habitats « potentiellement ou partiellement humides » (p) ou bien des habitats « non humides ». Ces deux derniers types font ensuite l'objet d'un examen pédologique.

L'arrêté du 24 juin 2008, modifié par l'arrêté du 1er octobre 2009 (151) précise la méthodologie et les critères pour la délimitation des zones humides sur le terrain. Ces arrêtés sont complétés par la circulaire du 18 janvier 2010 (152), qui précise : « Dans tous les cas, lorsque le critère relatif à la végétation n'est pas vérifié, il convient d'examiner le critère pédologique ; de même, lorsque le critère pédologique n'est pas vérifié, le critère relatif à la végétation doit être examiné (cf. Arbre de décision simplifié présenté en annexe 2 de la circulaire) ».

De ce fait les parcelles notées comme « Non zone humide » d'après les habitats observés ne peuvent être directement caractérisées comme non-humides sans prospections pédologiques (et/ou piézométriques) complémentaires. Ces parcelles devront donc, au regard de la réglementation, demeurer dans une « couche d'alerte » afin de souligner les risques de présence de zone humide dans le cas où des aménagements seraient prévus sur la zone.

A contrario une fois l'habitat ou le sol classé comme caractéristique d'une zone humide d'après les catégories présentées dans la circulaire, la zone peut être directement classée comme zone humide avérée. En chaque point, la vérification de l'un des critères relatifs aux sols ou à la végétation suffit pour statuer sur la nature humide de la zone.

Une zone est ainsi considérée comme humide au sens du code de l'environnement si elle présente l'un des critères suivants (on parle de critères alternatifs).

6.1.5.1 Critère « végétations »

La végétation d'une zone humide, si elle existe, est caractérisée :

- soit par des « habitats », caractéristiques de zones humides, identifiées selon la méthode et la liste correspondante figurant à l'annexe 2.2 de l'arrêté du 24 juin 2008 (151) ;
- soit par des espèces indicatrices de zones humides, selon la méthode et la liste d'espèces figurant à l'annexe 2.1 du 24 juin 2008 (151), complétée en tant que de besoin par une liste additionnelle d'espèces arrêtée par le préfet.

La présence d'une végétation de zone humide est suffisante pour caractériser une zone humide réglementaire (avérée).

La figure 6-27 et la figure 6-28 présentent la localisation des relevés floristiques zones humides de 2015 à 2020 réalisés dans l'aire d'étude immédiate, en différenciant la zone d'intervention potentielle.

Pour les inventaires de la campagne de reconnaissance des Calcaires du Barrois en 2022, l'utilisation unique du critère « habitat » a été retenue.

6.1.5.2 Critère « sols »

L'arrêté du 24 juin 2008 (151) modifié présente les méthodes de terrain pour la délimitation des zones humides selon des critères pédologiques ainsi que la liste des sols caractéristiques des zones humides.

Ces sondages pédologiques de caractérisation ont été effectués à la tarière manuelle, conformément à l'arrêté du 1er octobre 2009, modifiant l'arrêté du 24 juin 2008 précisant les critères de définition et de délimitation des zones humides, en application des articles L. 211-1 et R. 211-108 du code de l'environnement (153), et à la circulaire du 18 janvier 2010 relative à la « délimitation des zones humides en application des articles L. 211-1 et R. 211-108 du code de l'environnement » (152). Ces sondages ont été réalisés à la tarière, jusqu'à 120 cm de profondeur chaque fois que possible et *a minima* jusqu'à 60 cm lorsqu'aucune trace de trait rédoxique n'était visible. En effet, pour définir le type de sol humide, il est nécessaire si on observe des traits rédoxiques à moins de 50 cm, de regarder également plus en profondeur.

La présence, le type et l'importance des traces d'hydromorphie éventuellement visibles ont été relevés. D'après les arrêtés ministériels, les sols sont caractéristiques de zones humides lorsqu'ils présentent une des caractéristiques ci-dessous :

- présence d'horizons histiques (ou tourbeux) débutant à moins de 50 cm de la surface du sol et d'une épaisseur d'au moins 50 cm. On parle alors d'histosols ;
- présence de traits réductiques débutant à moins de 50 cm de la surface du sol. On parle alors de réductisols ;
- présence de traits rédoxiques débutant à moins de 25 cm de la surface du sol et se prolongeant ou s'intensifiant en profondeur. On parle alors de rédoxisols ;
- présence de traits rédoxiques débutant à moins de 50 cm de la surface du sol, se prolongeant ou s'intensifiant en profondeur, et de traits réductiques apparaissant entre 80 et 120 cm de profondeur. On parle également de rédoxisols.

Le rattachement des sols hydromorphes à des sols de zones humides au sens règlementaire est effectué au travers du **tableau du GEPPA** (tableau Groupement d'études des problèmes de pédologie appliquée, 1981) adapté à la réglementation en vigueur.

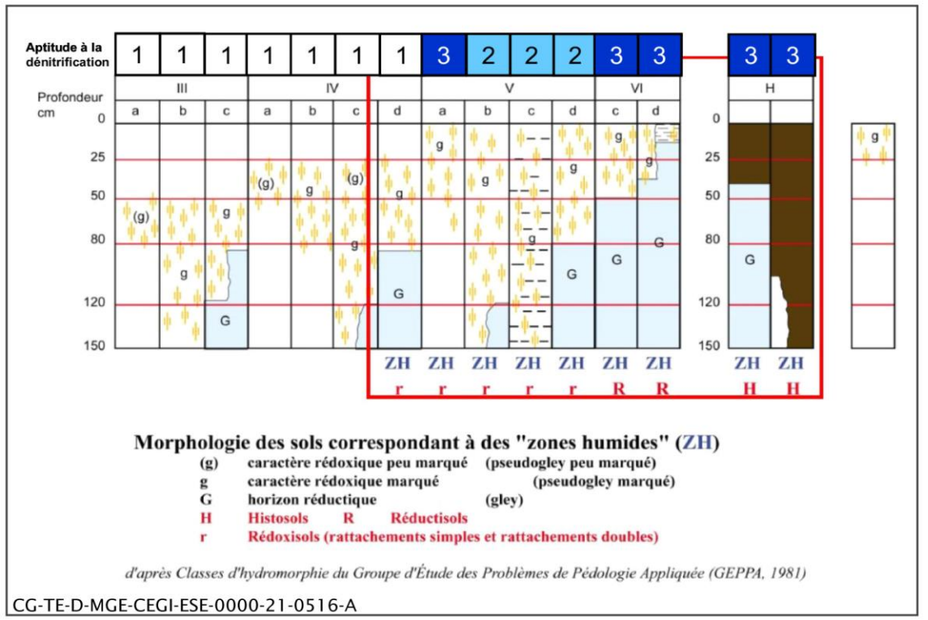


Figure 6-26 Classes d'hydromorphie du GEPPA

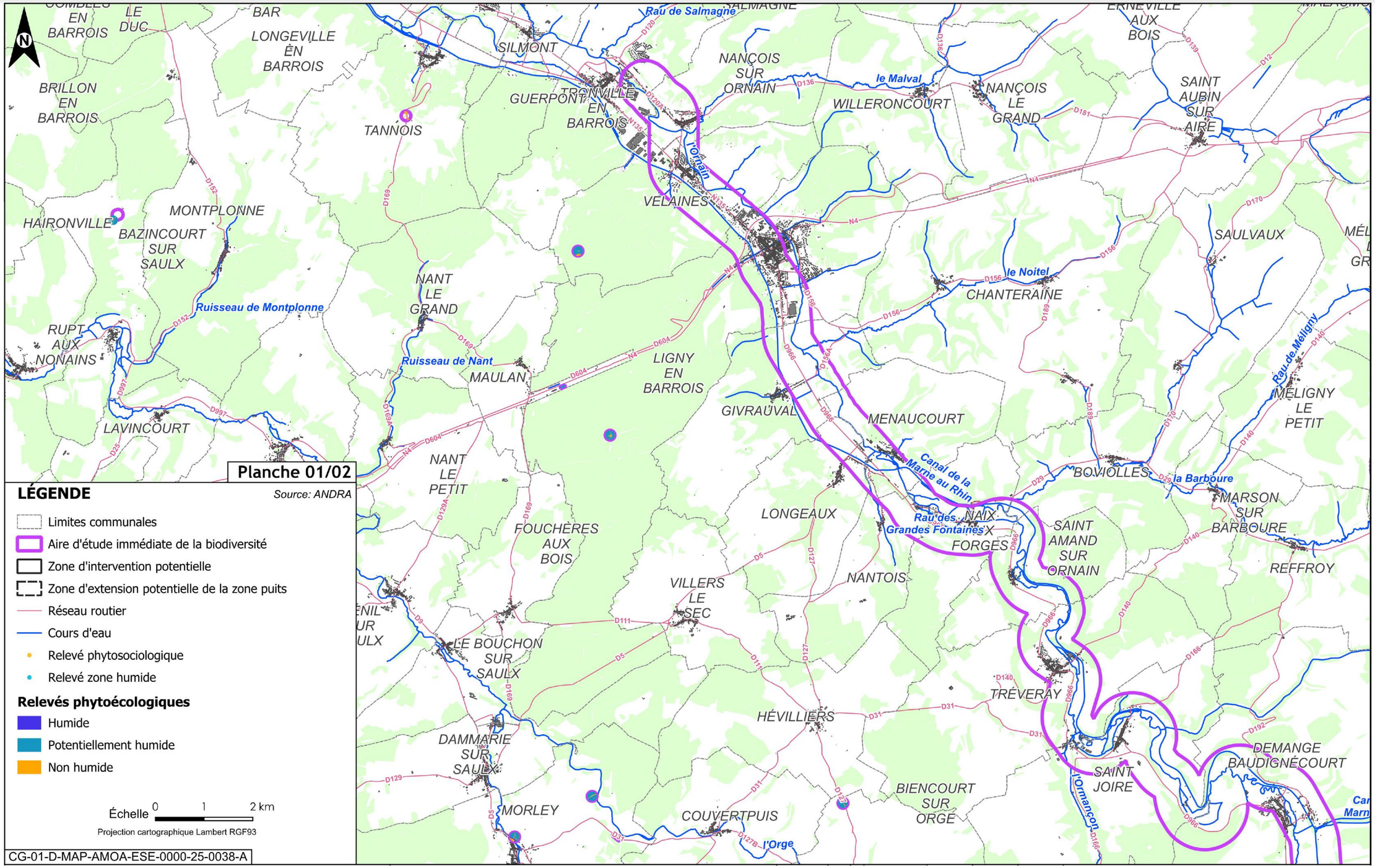


Figure 6-27 *Localisation des relevés floristiques zones humides – 1/2*

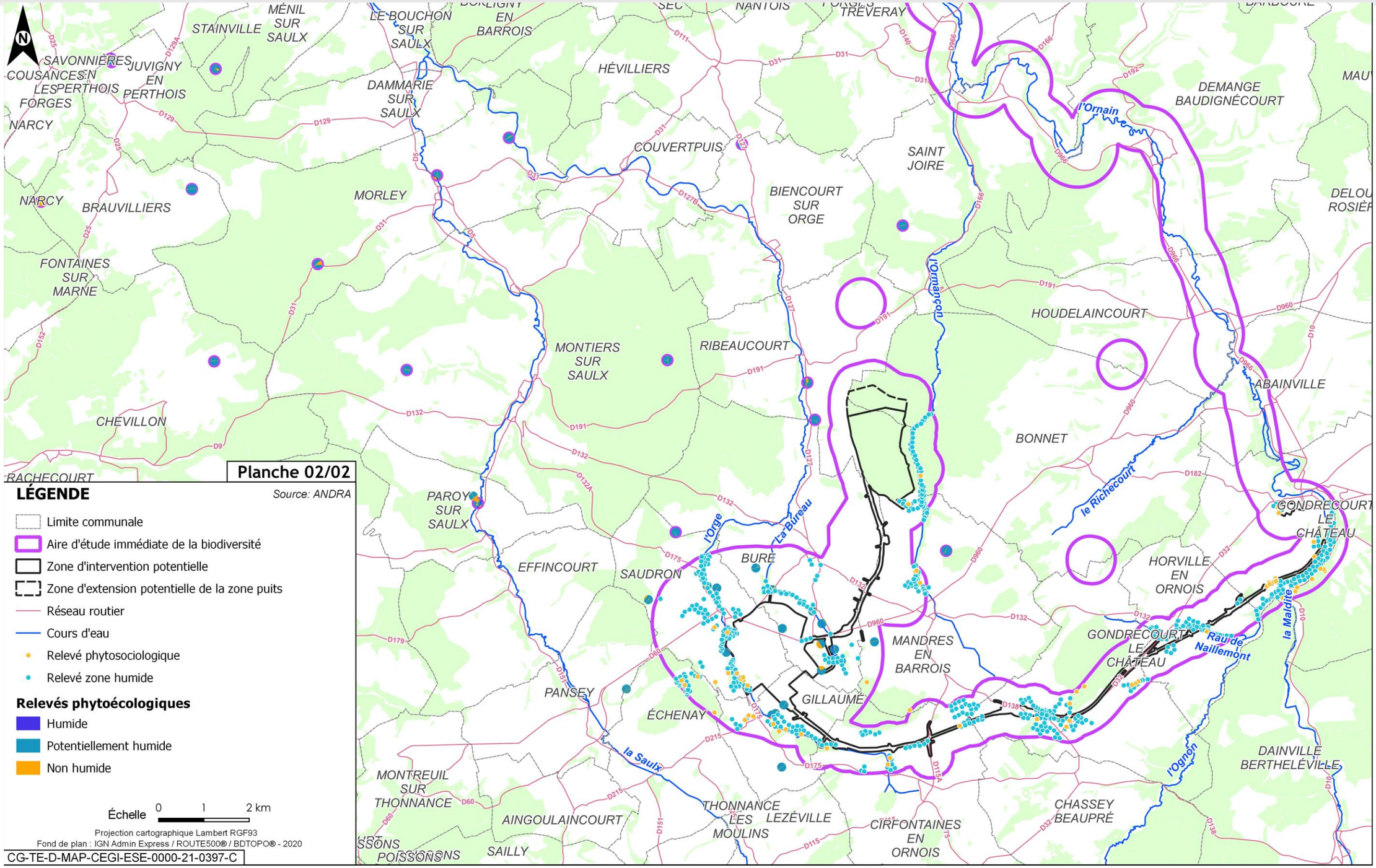


Figure 6-28 Localisation des relevés floristiques zones humides – 2/2

6.1.5.3 Prospections de terrain

Plusieurs campagnes d'identification des zones humides locales ont été réalisées de 2015 à 2022 en fonction des zones du projet global Cigéo. Les dates sont précisées dans le tableau en annexe 7.4 du présent volume.

Un plan de sondages pédologiques, présenté sur la figure 6-29, a été établi en croisant les informations suivantes :

- les zones à dominantes humides identifiées par la DREAL décrites au chapitre 6.5.3.2 du volume III de la présente étude d'impact ;
- les informations fournies par la carte pédologique ;
- les relevés des habitats potentiellement humides et d'habitats non caractéristiques afin d'effectuer des levées de doutes sur le caractère humide de ces habitats notamment au droit des secteurs de vallées permanentes et temporaires, ainsi que sur les zones de replats topographiques.

Sur la base des relevés des habitats humides, complétés si besoin par des sondages pédologiques (en différenciant les sondages caractéristiques de zones humides de ceux non caractéristiques), le périmètre des zones humides est délimité, au titre de l'article L. 214-7-1, au plus près des points de relevés ou d'observation répondant aux critères relatifs aux sols ou à la végétation.

La délimitation s'est également appuyée sur les éléments de reliefs et microtopographiques présents aux abords des points de sondages et des habitats humides, afin de tracer les contours et limites de ces zones humides de la manière la plus précise possible.

Comme présenté sur la figure 6-30, sur les 253 prélèvements pédologiques réalisés sur la zone d'intervention potentielle du projet de centre de stockage :

- 29 prélèvements sont caractérisés comme humides ;
- 213 prélèvements sont caractérisés comme non humides.

Sept prélèvements n'ont pas pu être réalisés du fait d'altercations avec les opposants au projet et de sols anthropiques, ainsi que quatre considérés comme indéterminés (sol trop caillouteux).

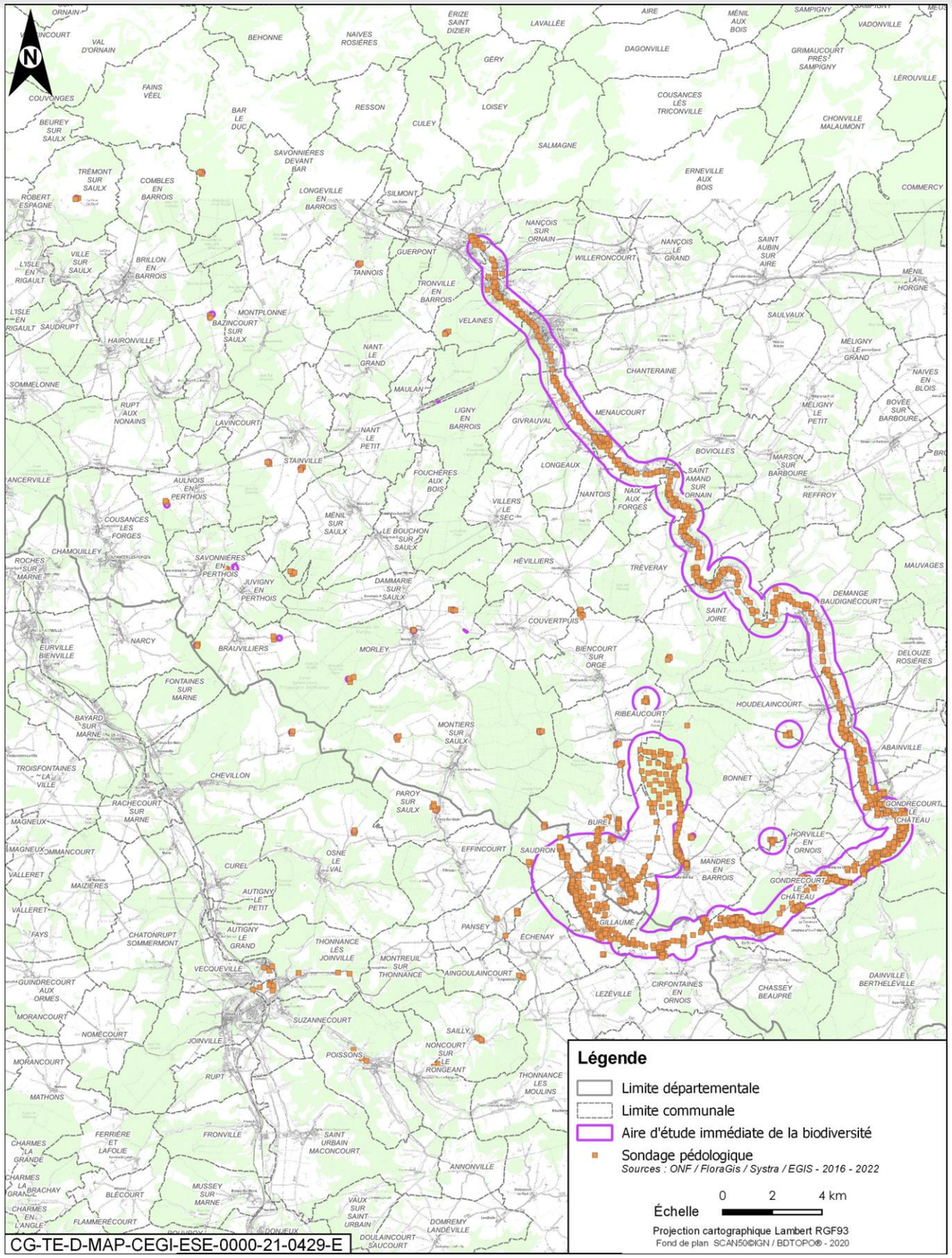


Figure 6-29 Plan des sondages pédologiques

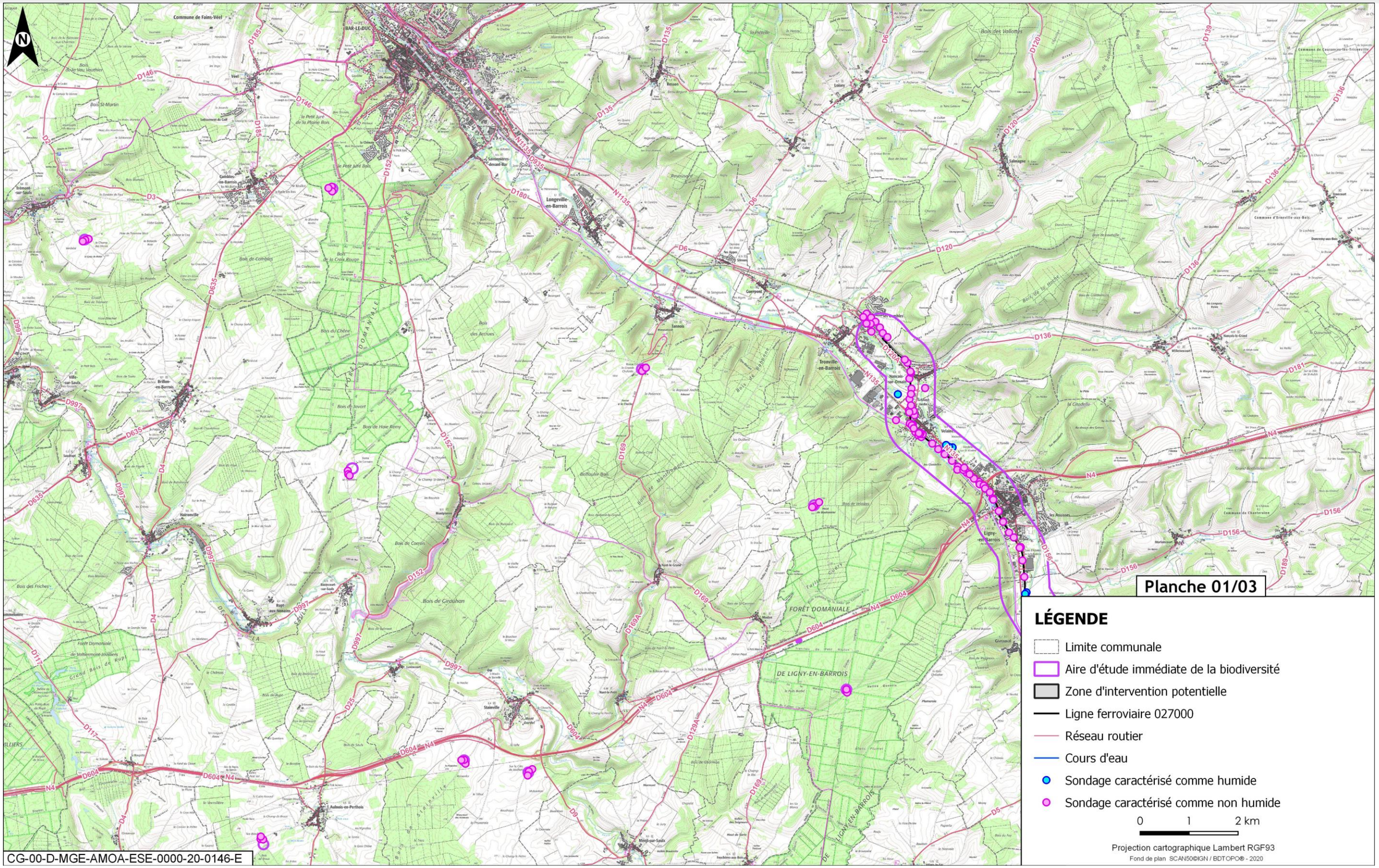


Figure 6-30 Localisation des sondages pédologiques réalisés dans l'aire d'étude immédiate de la biodiversité 1/3

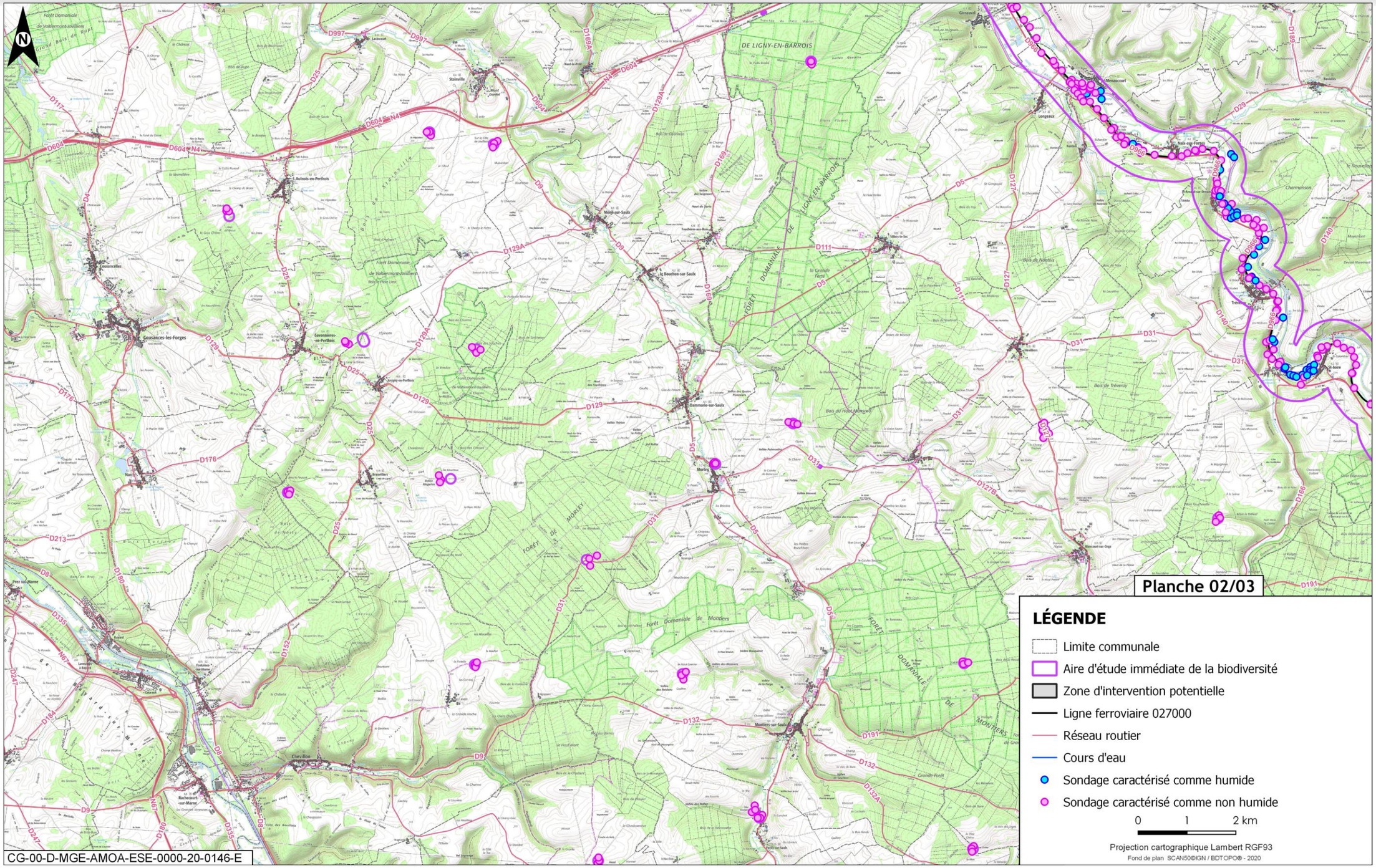


Figure 6-31 Localisation des sondages pédologiques réalisés dans l'aire d'étude immédiate de la biodiversité 2/3

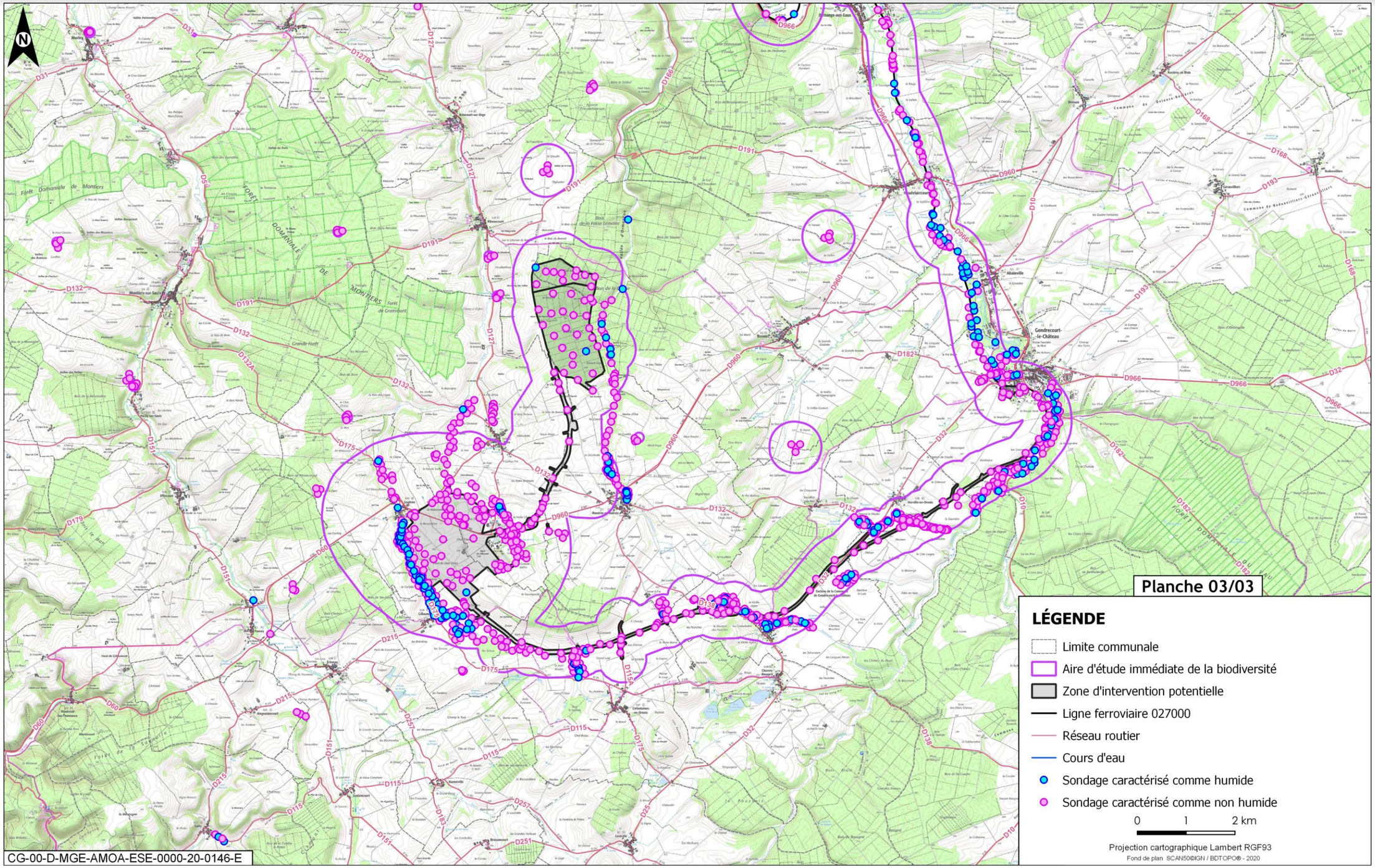


Figure 6-32 Localisation des sondages pédologiques réalisés dans l'aire d'étude immédiate de la biodiversité 3/3

6.1.6 Continuités écologiques

Les continuités écologiques ont été identifiées à plusieurs échelles :

- à l'échelle nationale, avec la définition des continuités écologiques d'importance nationale issues de la mise en cohérence nationale de la Trame verte et bleue ;
- à l'échelle régionale, avec les corridors identifiés dans le SRADDET de la région Grand Est (8) ;
- à une échelle plus locale, suite aux observations de terrain des espèces et des habitats favorables à leurs déplacements. Une modélisation des continuités écologiques locales a également été réalisée.

Au niveau local, l'identification des corridors de déplacements préférentiels de la faune se base sur les observations de terrain et la connaissance des habitats d'espèces pour chaque groupe. Pour les mammifères terrestres, des appareils photographiques à détecteur de présence ont été positionnés dans des zones considérées comme favorables aux déplacements. En hiver, par temps de neige, les observations des traces informent également sur les déplacements de la faune terrestre, en particulier des mammifères. Pour les chiroptères, les enregistreurs permettent de comptabiliser les contacts et d'identifier les routes de vol préférentielles. Enfin, pour les amphibiens, des campagnes d'observations spécifiques mises en œuvre lors de périodes de migrations prénuptiales au printemps, permettent d'identifier les éventuelles voies de migration locales.

À proximité de l'aire d'étude immédiate du projet global Cigéo, une modélisation des continuités écologiques a été réalisée en utilisant les données d'occupation des sols et de la Trame verte et bleue : registre parcellaire et BD Topo de l'IGN, données du SRADDET Grand Est 2019 qui a actualisé et homogénéisé, les informations issues des SRCE, zones humides remarquables de l'Agence de l'eau et mares identifiées par le conservatoire des espaces naturels. À partir de ces éléments, trois sous-trames représentatives ont été modélisées :

- sous-trame boisée ;
- sous-trame ouverte ;
- sous-trame aquatique et humide.

À partir de cette détermination, une espèce représentative (espèce cible) est définie selon le territoire et à dire d'expert par sous-trame.

La sélection des espèces cibles associées aux sous-trames a été réalisée selon les critères suivants :

- appartenance de l'espèce aux espèces cibles de la Trame verte et bleue ;
- représentativité de l'écologie de l'espèce par rapport à l'écologie « moyenne » des espèces associées à la sous-trame considérée ;
- caractère « communiquant » de l'espèce pour le grand public ;
- disponibilité d'informations dans la bibliographie sur les modalités de dispersion de l'espèce dans le milieu ;
- présence sur l'aire d'étude (données issues des inventaires de terrain).

Les quatre espèces cibles retenues sont présentées dans le tableau 6-9.

Tableau 6-9 Choix des espèces cibles par sous-trame

Données source	Sous-trame	Éléments du paysage d'intérêt pour la faune et la flore	Espèces potentielles associées	Distance maximale de dispersion de l'espèce
SRADDET	Boisée	Forêts	Chat forestier	5,5 km
	Ouverte	Prairies, landes ou pelouses	Coronelle lisse	2,8 km
	Aquatique et humide	Fossés, cours d'eau, plans d'eau, mares et zones humides	Agrion de mercure Conocéphale des roseaux	3 km

La méthodologie pour mettre en évidence les corridors écologiques potentiels au sein du périmètre du projet global Cigéo s'appuie sur la théorie mathématique couramment utilisée en écologie du paysage du « chemin de moindre coût ».

Pour chaque espèce cible, le modèle trace un grand nombre de chemins entre des zones sources qui sont ici les réservoirs de biodiversité. Le modèle calcule ensuite le « coût » associé au parcours de chacun des chemins identifiés. Les chemins conservés pour relier deux réservoirs sont ceux qui correspondent à ceux qui ont le coût le plus faible. La carte des coûts de déplacement est représentée par la couche d'occupation du sol dans laquelle chaque habitat est affecté du coefficient de résistance au déplacement. Ce coefficient de résistance est proportionnel à la difficulté qu'ont les espèces animales à traverser une distance unitaire de l'habitat en question. Chaque habitat se voit ainsi affecté d'une note de perméabilité qui est d'autant plus faible que le milieu est perméable pour l'espèce ou le groupe considéré.

À partir de ces cartes de déplacements par sous-trame, sont définies les cartes des continuités et fragmentations pour chaque sous-trame qui identifient les passages préférentiels ainsi que les points de conflit correspondant à des obstacles ou à des difficultés de circulation pour les espèces cibles.

6.1.7 État radiologique initial

Les éléments radioactifs pouvant être présents à l'état naturel et/ou artificiels dans l'aire d'étude éloignée ont été recherchés et mesurés. Ils constituent le bruit de fond radiologique ambiant. Plusieurs campagnes de prélèvements ont été réalisées pour établir le bruit de fond radiologique sur les différents milieux de l'environnement : atmosphère, eaux souterraines et superficielles, sols, sous-sol et milieu biologique (produits agricoles et naturels). La méthode complète d'analyse de l'état radiologique initial est détaillée au chapitre 2.5.2 du présent volume.

Les différents lieux de prélèvements des échantillons pour les mesures de la radioactivité sont représentés sur la figure 2-6. Les mesures sur les prélèvements effectués ont été principalement réalisées, soit par des laboratoires de l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN), soit par le laboratoire d'analyse de Subatech de Nantes (prélèvements effectués dans le cadre de la surveillance du Laboratoire souterrain et lors de la campagne sur les eaux superficielles), tous agréés.

Les matrices biologiques terrestres (tissus animaux ou végétaux) prélevées et analysées sont :

- d'une part, des bioindicateurs qui peuvent être des espèces végétales ou animales susceptibles soit de concentrer des polluants, soit de rendre compte d'une contamination moyenne sur une surface assez large ;
- d'autre part, des produits végétaux et animaux faisant partie de la chaîne agroalimentaire. Deux critères sont importants à prendre en compte : le premier est la représentativité des productions locales et le deuxième l'importance dans la ration alimentaire humaine.

Les bioindicateurs et les produits de la chaîne alimentaire analysés sont présentés dans le tableau 6-10.

Tableau 6-10 Choix des prélèvements de matrices biologiques terrestres pour le fond radiologique

Bioindicateurs	Chaîne alimentaire agricole
• mousses (bryophytes) ; • feuilles d'arbre (en particulier pour les analyses tritium et ^{14}C) ; • baies (ex. : framboises, mûres) ; • champignons : • gibier (sanglier, chevreuil), échantillons fournis par des chasseurs lors de chasses de loisirs organisées régulièrement sur la zone d'étude.	• herbe de prairie ; • céréales (ex. blé tendre) ; • oléagineux (ex. colza) ; • tubercules (ex. pomme de terre) ; • légumes-feuilles (ex. salade) ; • fruits produits localement (ex. mirabelles) ; • fourrages destinés aux animaux (ex. ensilage de maïs) ; • lait de vache ; • fromage ; • viande bovine ; • miel.

L'ensemble des éléments radioactifs recherchés dans ces matrices biologiques terrestres et les échantillons analysés sont présentés dans le tableau 6-11.

Tableau 6-11 Analyses réalisées sur les matrices biologiques

Matrice	Nombre d' échantillons	Spectrométrie gamma	Tritium lié	^{14}C/sur C total	Spectrométrie alpha ^{238}Pu, $^{239,240}Pu$, ^{241}Pu, ^{241}Am	ICP-MS (U, Ra, Th)	^{90}Sr	^{210}Po
Céréales (grains de blé)	2	2				2		
Oléagineux (graines de colza)	1	1						
Tubercules (pommes de terre)	2	2						
Légumes feuilles (salade, chou, rhubarbe)	2	2			2	2	2	2
Fruits (mirabelles)	1	1						
Fourrage (ensilage de maïs)	2	2						
Herbe	4	4			4	4	4	4
Lait de vache	4	4				4	4	
Fromage de vache	4	4					4	
Viande (vache, mouton)	2	2						
Feuilles d'arbres	4	4	4	4				
Sanglier (muscle)	2	2						
Chevreuil (muscle)	2	2						
Sanglier (foie)	2	2			2			
Sanglier (os)	2	2			2		2	
Champignons	2	2						
Baies forestières	2	2						
Miel	2	2						
Mousses terrestres	2	2						

6.1.8 Appréciation des enjeux écologiques

6.1.8.1 Démarche

Sur la base de la description des habitats et des espèces présentes, les enjeux de préservation du patrimoine naturel sont identifiés et hiérarchisés en tenant compte de la vulnérabilité des espèces et de la fonctionnalité des milieux.

L'enjeu représente la valeur attribuée à une espèce, un groupe biologique ou un cortège d'espèces, un habitat d'espèce, une végétation, un habitat naturel ou encore un cumul de ces différents éléments. Il s'agit d'une donnée objective, évaluée sans préjuger des effets du projet et définie sur la base de plusieurs critères.

Les listes de protection ne sont pas nécessairement indicatrices du statut de rareté/menace des espèces. Si pour la flore, ces statuts réglementaires sont assez bien corrélés à la rareté des espèces, la même considération de rareté n'intervient pas toujours dans la définition des listes d'espèces animales protégées. Cette situation a amené à utiliser d'autres outils, établis par des spécialistes, pour évaluer la rareté et/ou le statut de menace des espèces présentes : les listes rouges, les synthèses régionales ou départementales, la littérature naturaliste. Elles rendent compte de l'état des populations d'espèces dans le secteur géographique auquel elles se réfèrent, mais ces documents de référence pour l'expertise n'ont pas de valeur juridique.

Dans le cadre de cette étude, l'évaluation des enjeux de préservation du patrimoine naturel sur les différentes zones du projet global Cigéo a été réalisée à deux échelles (cf. Figure 6-33) :

- une échelle régionale se basant sur les statuts réglementaires et les statuts de conservation ;
- une échelle locale correspondant à l'aire d'étude immédiate.

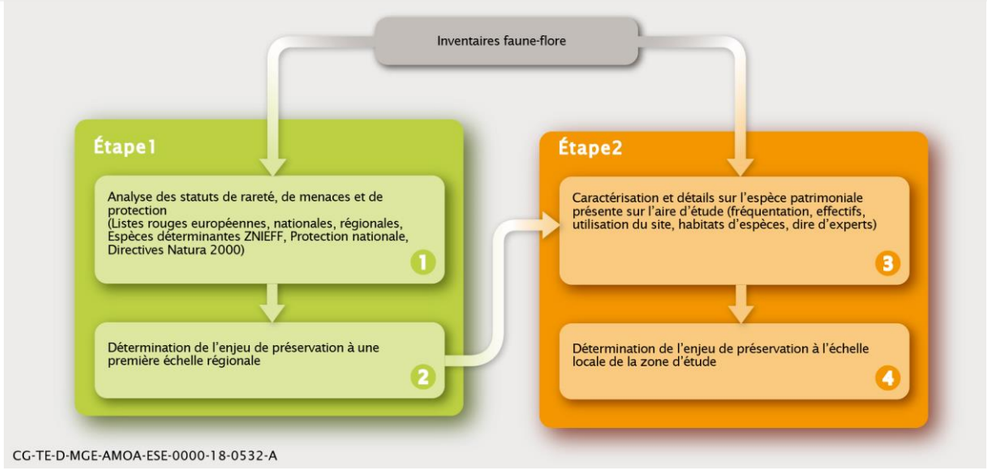


Figure 6-33 Schéma de la démarche d'appréciation des enjeux écologiques

6.1.8.2 Évaluation des enjeux à l'échelle régionale

L'évaluation des enjeux à l'échelle régionale est effectuée sur cinq niveaux, en fonction de la portée géographique et de la patrimonialité des espèces.

Cette évaluation se base essentiellement sur les aspects réglementaires et de conservation présentés dans les listes rouges des espèces. Ont également été pris en compte les statuts de rareté (communs, rare, à surveiller…) des espèces souvent mentionnées dans les atlas. Enfin, les tendances des effectifs d'oiseaux nicheurs ont également été prises en compte sur la base du programme Vigie-Nature[38]. Celui-ci dresse une tendance d'évolution depuis 2001.

En l'absence de certaines listes rouges régionales en Lorraine, le critère ZNIEFF (espèces déterminantes) a été retenu afin d'évaluer le statut régional de l'espèce.

Les documents de référence consultés pour définir le statut de rareté ou de menaces de la flore et de la faune sont regroupés dans le tableau ci-dessous.

La grille d'analyse des enjeux à l'échelle régionale est présentée dans le tableau 6-12.

[38] http://www.vigienature.fr/

6.1.8.3 Évaluation des enjeux à l'échelle de l'aire d'étude immédiate

Une fois l'enjeu régional qualifié, il est affiné afin de prendre en compte la réalité spécifique des zones d'implantation du projet.

À l'échelle locale, les enjeux définis au niveau régional peuvent être modulés (dans un sens ou dans l'autre), en fonction des critères suivants :

- la présence de l'espèce patrimoniale sur le site : anecdotique, ponctuelle, régulière, etc. et en période de reproduction, hivernale, de migration, estivale… ;
- l'effectif de l'espèce patrimoniale ;
- l'utilisation du site et de son habitat d'espèce : habitat d'alimentation, habitat de reproduction, habitat de repos, arbres gîtes (cf. Chapitre 6.1.9 du présent volume) ;
- l'utilisation des corridors écologiques ;
- le dire d'expert basé sur des retours d'expériences ou son « ressenti terrain ».

  Dans certains cas, la multiplicité des menaces à l'échelle européenne, nationale, régionale peut amener à rehausser le niveau d'enjeu. Par exemple, si une espèce est vulnérable (enjeu moyen) aux trois échelles, un niveau fort peut être appliqué.

Tableau 6-12 Documents de référence pour la définition du statut de rareté ou menace de la flore et la faune

Niveau européen	Niveau national	Niveau régional
Habitats naturels, flore, bryophytes		
« Cahiers d'habitats » Natura 2000. Connaissance et gestion des habitats et des espèces d'intérêt communautaire (Bensettiti *et al.*, 2001(154), 2002 (155–157), 2004 (158, 159), 2005 (160))	La liste rouge des espèces menacées en France : Flore vasculaire de France métropolitaine. UICN ; Museum national d'histoire naturelle ; Agence française pour la biodiversité ; FCBN (2018).(161)	Liste rouge régionale de la flore vasculaire de Lorraine (Pole Lorrain du futur Conservatoire botanique national du Nord-Est, 2015 (144))
European Red List of Vascular Plants (Bilz *et al.*, 2011 (162))	Liste rouge des orchidées de France métropolitaine (UICN France, MNHN FCBN & SFO, 2009 (163))	Liste rouge de Champagne-Ardenne, Flore vasculaire 2018 (164)
		Atlas de Floraine (165)
Insectes		
European Red List of dragonflies (Kalkman *et al.*, 2010 (166))	Liste rouge des Papillons de jour de France métropolitaine (UICN France, MNHN, OPIE & SEF, 2012 (167))	Liste rouge Champagne-Ardenne – Insectes (Coppa *et al.*, 2007 (168))
European Red List of saproxilics beetles (Nieto et Alexander, 2010 (169))	Liste rouge des Libellules de France métropolitaine (UICN France, MNHN, OPIE et SFO, 2016 (170))	Guide méthodologique pour la modernisation de l'inventaire ZNIEFF en Lorraine (Gaillard & Jager, 2012 (171, 172))
European Red List of Grasshoppers, Crickets and Bush-crickets (Hochkirch *et al.*, 2016 (173))	Les orthoptères menacés de France. Liste rouge nationale et liste rouge par domaine biogéographique (Sardet et Defaut, 2004 (174))	
« Cahiers d'habitats » Natura 2000. Connaissance et gestion des habitats et des espèces d'intérêt communautaire (Bensettiti et Gaudillat, 2002 (157))		
Reptiles - amphibiens		
European Red List of Reptiles (Cox et Temple, 2009 (175))	Liste rouge Reptiles et Amphibiens de France métropolitaine (UICN France, MNHN et SHF, 2015 (176))	Liste rouge Champagne-Ardenne – Amphibiens (Cart, 2007 (172))
European Red List of Amphibiens (Temple et Cox, 2009 (177))		Liste rouge Champagne-Ardenne – Reptiles (Grange et Mionnet, 2007 (178))
« Cahiers d'habitats » Natura 2000. Connaissance et gestion des habitats et des espèces d'intérêt communautaire (Bensettiti et Gaudillat, 2002 (157))		Liste rouge des amphibiens et reptiles de Lorraine (Aumaître & Lambrey, 2016 (179))
Oiseaux		
European Red List of Birds (Birdlife International, 2015 (180))	Liste rouge des Oiseaux de France métropolitaine (UICN France, MNHN, LPO, SEOF et ONCFS, 2016 (181))	Liste rouge Champagne-Ardenne – Oiseaux nicheurs (Fauvel *et al.*, 2007 (182))
		Guide méthodologique pour la modernisation de l'inventaire ZNIEFF en Lorraine (Gaillard et Jager, 2012 (171))
Mammifères		
« Cahiers d'habitats » Natura 2000. Connaissance et gestion des habitats et des espèces d'intérêt communautaire (Bensettiti et Gaudillat, 2002 (157))	Liste rouge des espèces menacées en France – Chapitre Mammifères de France métropolitaine. UICN France, MNHN, SFEPM & ONCFS (2017 (183))	Liste rouge Champagne-Ardenne – Mammifères (Bécu *et al.*, 2007 (184))
		Guide méthodologique pour la modernisation de l'inventaire ZNIEFF en Lorraine (Gaillard et Jager, 2012 (171))

Tableau 6-13 Grille d'analyse pour l'appréciation des enjeux de préservation des espèces

Enjeu	Principales caractéristiques
Très fort **De portée nationale à supranationale**	**Faune :** • présence d'au moins une espèce très rare et/ou très menacée de faune (= liste rouge UICN régionale ou nationale : CR, EN et RR à RRR) ; • présence d'au moins un milieu favorable au groupe biologique considéré ; • espèce inscrite à l'annexe II ou IV de la directive habitats (138) et à l'annexe I de la directive oiseaux (147) ; • espèce emblématique ou pouvant faire l'objet d'un plan national d'action.
	Habitats et flore : • habitat d'intérêt communautaire prioritaire au titre de la directive Habitat en bon état de conservation ; • habitat (semi-)naturel extrêmement rare dans la région administrative du site d'étude ; • présence d'au moins une espèce très menacée de flore (= liste rouge UICN régionale ou nationale : CR, EN et/ou RRR).
Fort **Enjeu de portée régionale à suprarégionale**	**Faune :** • présence d'au moins une espèce rare et/ou menacée (= liste rouge UICN régionale ou nationale : EN, CR, et/ou R) ; • présence d'au moins un milieu favorable au groupe biologique considéré ; • espèce déterminante ZNIEFF niveau 1 (espèce prioritaire) ; • espèce inscrite à l'annexe II ou IV de la directive habitats ; • espèce inscrite à l'annexe I de la directive oiseaux ; • espèce pouvant faire l'objet d'un plan national d'action.
	Habitats et flore : • habitat naturel d'intérêt communautaire prioritaire en état de conservation moyen, ou habitat d'intérêt communautaire en bon état de conservation ; • habitat (semi-)naturel très rare dans la région administrative du site d'étude en bon état de conservation ; • habitat ou espèce déterminant ZNIEFF de niveau 1 (très rare) ; • présence d'au moins une espèce menacée de flore (= liste rouge UICN régionale ou nationale : NT, VU et/ou RRR.
Moyen/Modéré **Enjeu de portée départementale à supra-départementale**	**Faune :** • cortège(s) associé(s) principalement constitué(s) d'espèces communes, présence de quelques espèces moins fréquentes (= liste rouge UICN régionale ou nationale : NT, VU, et/ou AR, AS, AP, R, RR) ; • espèces communes (TC, C, AC, PC) non concernées ; • présence d'au moins un milieu favorable au groupe biologique considéré (secteur dominé par les milieux naturels spontanés) ; • espèce déterminante ZNIEFF niveau 2 (espèce rare) ; • espèce inscrite à l'annexe II ou IV de la directive habitats ; • espèce inscrite à l'annexe I de la directive oiseaux.
	Habitats et flore : • habitat naturel d'intérêt communautaire en mauvais état de conservation ; • habitat (semi-)naturel rare dans la région administrative et en bon état de conservation ; • présence d'au moins une espèce rare mais non menacée de flore (= liste rouge UICN régionale ou nationale : LC et RR) ou présence d'un habitat ou d'une espèce déterminante de ZNIEFF de niveau 2 (espèce rare).

Enjeu	Principales caractéristiques
Faible **Enjeu de portée locale, à l'échelle d'un ensemble cohérent du paysage écologique** **(vallée, massif forestier, etc.)**	**Faune :** • espèces ou cortège(s) associé(s) constitué(s) d'espèces communes (= liste rouge UICN régionale ou nationale : LC, TC, C, AC, PC) ; • présence d'au moins un milieu favorable au groupe biologique considéré (secteur occupé par une mosaïque de milieux naturels et de milieux artificiels) ; • espèce déterminante ZNIEFF de niveau 3 (moins rare). **Habitats et flore :** • habitat (semi-) naturel rudéralisé rare à très commun dont la flore est rendue banale et commune ; • présence d'espèces de flore communes rares à assez rares mais non menacées ; • habitat ou espèce déterminant ZNIEFF de niveau 3 (moins rare).
Très faible **Enjeu de portée locale, à l'échelle de la seule entité (parc, square, etc.)**	**Faune :** • absence de milieu favorable au groupe biologique considéré, qui est donc présumé absent du fuseau d'étude. **Habitats et flore :** • milieu très artificialisé (route, parking goudronné…) peu favorable à la biodiversité.

***Légende** : **CR :** en danger critique d'extinction, **EN** : en danger, **VU** : vulnérable, **NT** : quasi menacé, **LC** : préoccupation mineure, **TC** : très commun, **C** : commun, **AC** : assez commun, **PC** : peu commun, **AR** : assez rare, **R** : rare, **RR** : très rare, **RRR** : extrêmement rare, **AS** : à surveiller, **AP** : à préciser.*

6.1.9 Appréciation des niveaux d'intérêt des habitats d'espèces (NIH)

Chaque catégorie d'habitat se voit appliquer un niveau d'intérêt compris entre 0 et 4 à la fois sur les sites impactés et sites de compensation pour chaque groupe et chaque cortège. La grille, ci-dessous, est une aide à la qualification du niveau d'intérêt de chaque type d'habitat d'espèce. Elle se base sur plusieurs critères qui ont permis de qualifier :

- sa fonctionnalité (habitat de reproduction, déplacement, alimentation, hivernage, migration), c'est-à-dire le rôle que joue cet habitat dans le cycle de vie d'une espèce ;
- l'état de conservation de l'habitat (dégradé, altéré, moyen, bon, optimal) et la capacité de celui-ci à assurer les fonctions suffisantes à une espèce pour lui permettre d'accomplir son cycle de vie ;
- le degré d'isolement de l'habitat dans le contexte écologique plus large ;
- la diversité et la densité d'espèces observées.

Ainsi pour chaque cortège des référentiels de niveaux d'intérêt ont été définis sur la base des exigences écologiques de chaque espèce (niche écologique théorique) (selon la bibliographie).

Dans l'exemple ci-dessous pour le cortège des oiseaux des fourrés et haies en milieu ouvert, chaque catégorie des grands types d'habitats a été notée en fonction de l'intérêt qu'il procure pour le cortège en question. Les milieux boisés étant moins intéressant que les milieux de type buissons, haies ou encore pelouses et prairies de fauches pour l'accomplissement du cycle biologique de ce cortège.

L'ensemble des grilles de qualification des niveaux d'intérêt par grande catégorie d'habitats et par cortège est présenté en annexe 8.3 du présent volume.

- **cas spécifique pour les oiseaux des milieux ouverts/semi-ouverts**

  Le cortège est composé essentiellement d'espèces ayant besoin d'éléments arbustifs pour se reproduire, associé à des éléments herbacés voire agricoles pour l'alimentation. Les modes d'exploitation des milieux agricoles conditionnent la richesse et l'abondance des espèces. Aussi selon l'écologie de certaines espèces, les milieux agricoles même intensifs, bordés d'éléments arbustifs peuvent tout de même être fréquentés par ces espèces pour l'alimentation. Les domaines vitaux des espèces du cortège sont en moyenne de 1-2 ha (ex : Verdier d'Europe, Pie-grièche écorcheur, Linotte mélodieuse). Il a donc été décidé, en consensus avec Neomys, de définir un rayon de 100 autour des cantonnements ; que représentent les éléments arbustifs et arborés pour les principales espèces de ce cortège ;

- **cas spécifique pour les amphibiens et leurs zones de reproduction**

  Chez les amphibiens, le fonctionnement en métapopulation est primordial, en permettant de compenser les extinctions locales par le recrutement d'individus issus d'immigration. Les amphibiens ont en effet besoin de plusieurs milieux pour réaliser leur cycle de vie. Pour la majorité des espèces, les mares ne sont fréquentées qu'une partie de l'année pour leur reproduction et le développement des têtards et des larves. Les amphibiens ont aussi besoin de terrain de chasse, de sites d'estivation et enfin de sites d'hibernation. Les mouvements sont donc réguliers entre les différents sites. Le paysage et l'implantation des mares en son sein jouent donc un rôle primordial. Les capacités de dispersion des amphibiens sont généralement inférieures à 400 mètres, même si dans certains cas plusieurs kilomètres peuvent être parcourus (ex dans notre cas : Crapaud commun, Pélodyte ponctué, Grenouille rousse). La plupart des populations d'amphibiens restent concentrées dans un périmètre de 200-300 mètres autour du biotope de reproduction. Au regard des espèces d'amphibiens au sein de la zone d'étude, il a été décidé de retenir un tampon 300 mètres d'habitats terrestres, autour des mares.

  Dès lors que ces référentiels ont été construits et que les habitats d'espèces ont été caractérisés selon cette classification, les niveaux d'intérêts ont été appliqués en fonction de l'habitat identifié sur le terrain pour chaque cortège (approche déductive). Toutefois, dans la pratique, des dégradations d'un niveau d'intérêt ont pu avoir lieu en fonction de divers paramètres (approche inductive) :

  ✓ la surface et structure de l'habitat qui sont soient :

  - trop restreinte et qui ne peut être le support des fonctionnalités et exigences écologiques des espèces du cortège ; tel que l'optimum défini dans le référentiel ;
  - trop importante entrainant une dispersion ou déplacement contrainte des espèces par rapport à des éléments structurants de leur domaine vital (ex : une prairie d'un seul tenant de plusieurs dizaines d'hectares dont le cœur de parcelle sera difficilement exploitable pour des reptiles – exposés à une prédation forte ;
  - un habitat linéaire qui ne pourrait pas jouer les mêmes fonctions qu'une disposition non linéaire.

  ✓ le contexte environnemental dans lequel s'insère l'habitat : isolement d'une pelouse au sein d'un *continuum* boisé, fragmentation et/ou barrières anthropiques… ;

  ✓ des menaces diverses pesant sur l'habitat (influence de l'agriculture intensive à proximité, dégradation du gibier…) ;

  ✓ une fréquentation humaine entrainant un dérangement… ;

  ✓ le mode de gestion actuelle de la parcelle accueillant l'habitat, entrainant des perturbations et contraignant l'installation du cortège d'espèces ou de certaines espèces (débroussaillage répété… etc.).

  NB : Au sein du centre de stockage Cigéo, les NIH ont été définis pour chaque cortège, uniquement au sein de la zone d'intervention potentielle (ZIP), excepté pour la zone descenderie. En effet, il a été demandé aux prestataires flore/habitats de définir les états de conservation des habitats (sur lesquels sont basés les NIH) seulement sur les zones impactées, zones d'incertitudes comprises afin de pouvoir calculer la dette écologique des habitats d'espèces détruits ou altérés. Au niveau de la ligne ferroviaire 02700 les NIH pour chaque cortège ont été définis uniquement au sein de la zone potentielle de travaux (ZPT).

6.1.10 Appréciation des niveaux d'intérêt dégradés des habitats d'espèces (NID)

Dès lors que les habitats d'espèces ont été caractérisés selon cette classification, les niveaux d'intérêts ont été appliqués en fonction de l'habitat identifié sur le terrain pour chaque cortège (approche déductive). Toutefois, dans la pratique, des dégradations de 1 niveau d'intérêt ont pu avoir lieu en fonction de divers paramètres (approche inductive) :

- l'absence ou le faible nombre d'observations naturalistes au sein des habitats d'espèces ;
- la surface et structure de l'habitat qui sont soit :

  ✓ trop restreinte et qui ne peuvent être le support des fonctionnalités et exigences écologiques des espèces du cortège ; tel que l'optimum défini dans le référentiel ;

  ✓ trop importantes entrainant une dispersion ou déplacement contrainte des espèces par rapport à des éléments structurants de leur domaine vital (ex : une prairie d'un seul tenant de plusieurs dizaines d'hectares dont le cœur de parcelle sera difficilement exploitable pour des reptiles – exposés à une prédation forte ;

  ✓ un habitat linéaire qui ne pourrait pas jouer les mêmes fonctions qu'une disposition non linéaire.

- le contexte environnemental dans lequel s'insère l'habitat : isolement d'une pelouse au sein d'un *continuum* boisé, fragmentation et/ou barrières anthropiques… ;
- des menaces diverses pesant sur l'habitat (influence de l'agriculture intensive à proximité, dégradation du gibier…) ;
- une fréquentation humaine entrainant un dérangement… ;
- le mode de gestion actuelle de la parcelle accueillant l'habitat, entrainant des perturbations et contraignant l'installation du cortège d'espèces ou de certaines espèces (débroussaillage répété…etc.).

6.1.11 Synthèse de la démarche d'analyse de l'état initial du milieu naturel

La démarche globale d'analyse des enjeux est présentée sur le schéma ci-dessous (cf. Figure 6-34)

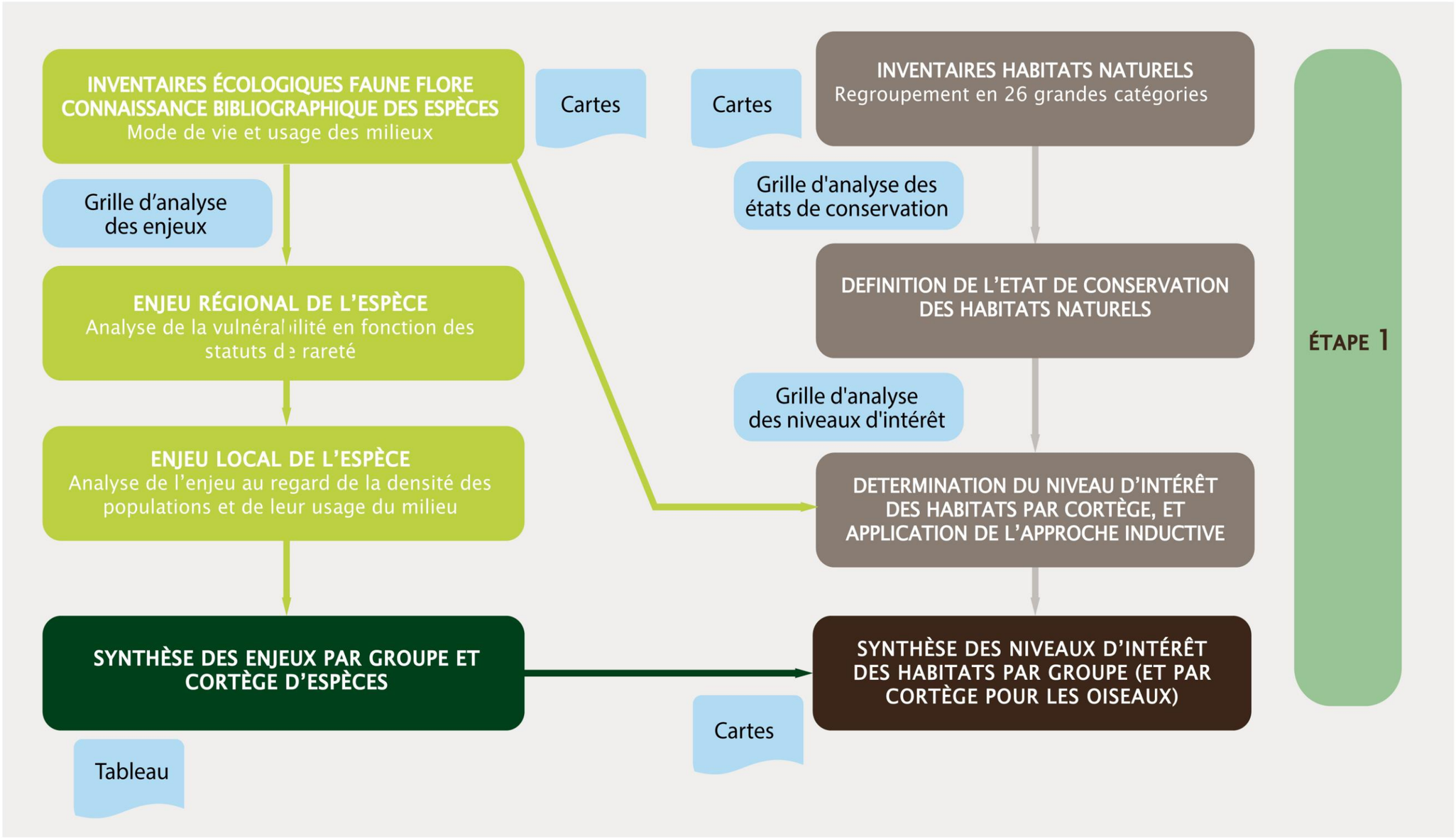
Cette démarche correspond à l'étape 1 de la méthode de calcul de la dette compensatoire écologique décrite au chapitre 6.3.3 du présent volume.

Tableau 6-14 *Exemple de référentiel de niveau d'intérêt défini pour le cortège des oiseaux*

I0	très faible
I1	faible
I2	moyen
I3	fort
I4	très fort

E. Bandes bo	F. Peuplements forestiers de feuil	G. Plantation d	H. Plantations monospéc	I. Milieux semi-ouverts a	J. Végétatio	K. Buissons, g	L. Haies méla	M. Pelouses	N. Prairies i	O. Prairies de f
Ea	Fa	Ga	Ha	Ia	Ja	Ka	La	Ma	Na	Oa
Eb	Fb	Gb	Hb	Ib	Jb	Kb	Lb	Mb	Nb	Ob
Ec	Fc	Gc	Hc	Ic	Jc	Kc	Lc	Mc	Nc	Oc
Ed	Fd		Hd	Id	Jd	Kd	Ld			
	Fe									
	Ff									
	Fg									

CG-TE-D-MGE-CEGI-ESE-0000-21-0525-A



CG-01-D-MGE-AMOA-ESE-0000-19-0213-D

Figure 6-34 Schéma de la démarche d'analyse des enjeux écologiques

Tableau 6-15 Grille d'aide à la qualification du niveau d'intérêt de chaque type d'habitat d'espèce

Groupes	I0 : Très faible	I1 : Faible	I2 : Moyen	I3 : Fort	I4 : Très fort
Insectes	Intérêt très faible lié à un état dégradé ou altéré et/ou, pas d'intérêt spécifique du milieu pour l'espèce/le groupe considéré. Habitat étant utilisé uniquement de façon anecdotique. Cet habitat n'est pas essentiel au cycle biologique pour l'espèce/le groupe considéré. Aucune espèce patrimoniale et/ou très faible diversité et densité d'espèces communes.	Intérêt faible lié à un état de conservation altéré et/ou, Habitat dont l'utilisation est limitée au déplacement/transit. Cet habitat n'est pas essentiel au cycle biologique pour l'espèce/le cortège considéré.	Intérêt moyen. Il peut s'agir d'un habitat de substitution assimilé à une zone reproduction/refuge dans un contexte dégradé alentour ; et/ou habitat pouvant être utilisé au déplacement/transit et/ou à l'alimentation privilégiée.	Intérêt fort. Habitat essentiel à l'accomplissement du cycle de vie pour l'espèce/le cortège considéré. Son domaine vital est composé d'habitat de reproduction et d'alimentation (notamment, secteurs de plantes hôtes pour les papillons, cours d'eau favorable à la ponte…). Et/ou cortège typique et complet (diversité) d'espèces sur un habitat particulier et présence d'une ou plusieurs espèces patrimoniale (secteur abritant une diversité de coléoptères saproxyliques importantes).	Habitat optimum à l'accomplissement du cycle biologique (reproduction, alimentation, transit).
Amphibiens	Intérêt très faible lié à un état dégradé ou altéré et n'étant pas utilisé ou seulement de manière anecdotique pour le cortège d'espèces. Cet habitat n'est pas essentiel au cycle biologique. Aucun habitat de reproduction.	Intérêt faible lié à un état de conservation altéré, et/ou, habitat dont l'utilisation est limitée au déplacement/transit ; non préférentiel pour le cortège d'espèces. Il peut s'agir d'habitat aquatique comme des fossés (transit) ou des habitats terrestres d'hibernation.	Intérêt moyen. Il peut s'agir d'un habitat de substitution assimilé à une zone de reproduction/refuge dans un contexte dégradé alentour, et/ou habitat pouvant être utilisé au déplacement/transit et/ou à l'alimentation privilégiée pour le cortège d'espèce. Il peut s'agir également d'un habitat utilisé préférentiellement lors de la migration ou pour de l'hivernage (non diffus).	Intérêt fort. Habitat essentiel à l'accomplissement du cycle de vie de l'espèce. Son domaine vital est composé d'habitat de reproduction typique, d'alimentation Habitat de reproduction pouvant accueillir un cortège typique d'espèces cibles avec une bonne densité.	Habitat optimum à l'accomplissement du cycle biologique (reproduction en densités élevées, alimentation, transit), et/ou avec des habitats d'hivernage alentour.
Reptiles	Intérêt très faible lié à un état dégradé ou altéré et n'étant pas utilisé ou seulement de manière anecdotique pour le cortège d'espèces. Cet habitat n'est pas essentiel au cycle biologique. Aucun habitat de reproduction.	Intérêt faible lié à un état de conservation altéré, et/ou, habitat ne permettant uniquement un déplacement/transit ; non préférentiel pour le cortège d'espèces. Il peut s'agir d'habitat de reproduction ou d'hibernation.	Intérêt moyen. Il peut s'agir habitat de substitution assimilé à une zone de reproduction/refuge dans un contexte dégradé alentour, et/ou habitat pouvant être utilisé au déplacement/transit et/ou à l'alimentation privilégiée pour le cortège d'espèce. Il peut s'agir également d'un habitat utilisé pour de l'hivernage.	Intérêt fort. Habitat essentiel à l'accomplissement du cycle de vie de l'espèce. Son domaine vital est composé d'habitat de reproduction, d'alimentation Habitat de reproduction pouvant accueillir un cortège typique d'espèces cibles en bonne densité.	Habitat optimum à l'accomplissement du cycle biologique (reproduction, alimentation, transit), et avec des habitats d'hivernage alentour ; avec des fortes densités.
Oiseaux	Intérêt très faible lié à un état dégradé ou altéré et n'étant pas utilisé ou seulement de manière anecdotique pour le cortège d'espèces. Cet habitat n'est pas essentiel au cycle biologique. Aucun habitat de reproduction.	Intérêt faible lié à un état de conservation altéré, et/ou, habitat ne permettant uniquement un déplacement/transit ; non préférentiel pour le cortège d'espèces. Il peut s'agir d'habitat de reproduction ou d'hibernation.	Intérêt moyen. Il peut s'agir habitat de substitution assimilé à une zone de reproduction/refuge dans un contexte dégradé alentour, et/ou habitat pouvant être utilisé au déplacement/transit et/ou à l'alimentation privilégiée pour le cortège d'espèce. Il peut s'agir également d'un habitat utilisé pour de l'hivernage.	Intérêt fort. Habitat essentiel à l'accomplissement du cycle de vie de l'espèce. Son domaine vital est composé d'habitat de reproduction, d'alimentation Habitat de reproduction pouvant accueillir un cortège typique d'espèces cibles en bonne densité.	Habitat optimum à l'accomplissement du cycle biologique (reproduction, alimentation, transit), et avec des habitats d'hivernage alentour ; avec des fortes densités.
Chauves-souris	Intérêt très faible lié à un état dégradé ou altéré et n'étant pas utilisé ou seulement de manière anecdotique pour le cortège d'espèces. Cet habitat n'est pas essentiel au cycle biologique. Aucun gîte présent sur le site Très peu voire aucun habitat de transit. Les habitats de chasse étant peu exploitables.	Intérêt faible. Habitat permettant uniquement un déplacement/transit non préférentiel le cortège d'espèce. La chasse est également très limitée et l'activité enregistrée est faible ou concerne uniquement des espèces plastiques. Aucun gîte n'est présent sur le site.	Intérêt moyen lié à un habitat de substitution assimilée à une zone refuge dans un contexte dégradé alentour, et/ou Habitat pouvant être utilisé au déplacement/transit et/ou à l'alimentation privilégiée pour le cortège d'espèces. Il peut s'agir également d'un habitat utilisé préférentiellement lors de la migration ou pour de l'hivernage, et/ou quelques gîtes de types arboricoles peuvent être présents. L'activité pour certaines espèce du cortège considéré peut-être bonne en chasse.	Intérêt fort. Habitat essentiel à l'accomplissement du cycle de vie de l'espèce. Son domaine vital est composé d'habitat de reproduction, d'alimentation. Bonne disponibilité en gîte. Niveau d'activité pressentie important.	Habitat optimum à l'accomplissement du cycle biologique (reproduction, alimentation, transit) ; très forte disponibilité en gîte (que ce soit en densité ou diversité), et/ou Présence de plusieurs espèces d'intérêt et cortège typique.
Mammifères	Intérêt très faible lié à un état dégradé ou altéré et n'étant pas utilisé ou seulement de manière anecdotique pour le cortège d'espèces. Cet habitat n'est pas essentiel au cycle biologique. Très peu voire aucun habitat de transit. Les habitats de chasse étant peu exploitables.	Intérêt faible. Habitat permettant uniquement un déplacement/transit non préférentiel le cortège d'espèce. La chasse est également très limitée.	Intérêt moyen lié à un habitat de substitution assimilée à une zone refuge dans un contexte dégradé alentour, et/ou habitat pouvant être utilisé au déplacement/transit et/ou à l'alimentation privilégiée pour le cortège d'espèces. L'activité pour certaines espèce du cortège considéré peut-être bonne en chasse.	Intérêt fort. Habitat essentiel à l'accomplissement du cycle de vie de l'espèce. Son domaine vital est composé d'habitat de reproduction, d'alimentation, et/ou habitat jouant un rôle majeur dans les déplacements et dispersion de l'espèce à l'échelle locale ou régionale (SRCE par exemple), et/ou cortège typique et complet (diversité) d'espèces sur un habitat particulier et présence d'une ou plusieurs espèces patrimoniales.	Habitat optimum à l'accomplissement du cycle biologique (reproduction, alimentation, transit), et avec des habitats d'hivernage alentour ; avec des fortes densités.

6.2 Incidences sur le milieu naturel

L'évaluation des incidences sur le milieu naturel est réalisée sur la base de l'état initial du milieu naturel et des caractéristiques du projet.

Les incidences en phase travaux et en phase de fonctionnement sont distinguées.

6.2.1 Effets du projet sur l'environnement

Les incidences d'un projet d'aménagement sur le milieu naturel sont potentiellement multiples : destruction d'habitats naturels ou d'habitats d'espèces, destruction d'espèces végétales ou animales, coupure de continuités écologiques, dérangement de la faune... À noter que sont également prises en compte les incidences qui peuvent être considérées comme neutres (sans conséquence sur la biodiversité) ou positives (impacts bénéfiques sur le milieu naturel).

Les incidences du projet global Cigéo sur le milieu naturel peuvent concerner :

- les **zonages environnementaux** présents au sein de l'aire d'étude éloignée, et plus particulièrement les espèces et/ou habitats déterminants de ces zonages ;
- les **zones humides** : le rejet des eaux pluviales et d'effluents sur le milieu ainsi que le prélèvement d'eaux souterraines peuvent avoir une incidence sur le fonctionnement hydraulique des cours d'eau (inondation, perturbation de la biodiversité, modification des conditions hydromorphologiques des cours d'eau, etc.), et de manière indirecte sur le fonctionnement des zones humides en lien avec ces cours d'eau.

  Les incidences sur les zones humides peuvent également être directes (destruction ou dégradation directe, par exemple du fait des fouilles archéologiques, par la réalisation des remblais des rampes des ouvrages d'art) ou indirectes, du fait d'une interruption des continuités hydrauliques ou écologiques ;
- les **continuités écologiques** : le projet global Cigéo s'inscrit dans une mosaïque d'habitats agricoles et boisés. Dans ce paysage, des continuités écologiques traversant l'aire d'étude éloignée interconnectent entre elles des réservoirs de biodiversité, liés aux milieux ouverts, boisés et humides et sont en interaction potentielle avec le projet. À un niveau plus local, la construction puis l'exploitation du projet global Cigéo a des incidences sur les déplacements des espèces observées lors des prospections de terrain. La construction puis le fonctionnement des infrastructures linéaires (routes, voies ferrées) ainsi que la mise en place de clôtures autour des installations de surface constituent des obstacles au déplacement des espèces terrestres. De même, les défrichements peuvent entraîner une fragmentation des habitats ou la modification des fonctionnalités dans l'aire d'étude immédiate ;
- les **espèces et habitats**, selon les cinq grandes catégories d'effets suivantes :

  ✓ **la destruction/dégradation des habitats d'espèces**

  La destruction ou la dégradation d'un habitat d'espèces n'aura pas la même importance si ce dernier représente une étape clef dans son cycle biologique. En effet, on distingue différents types d'habitats d'espèces qui revêtent une importance plus ou moins grande en fonction des espèces :

  - les territoires de reproduction concernent les espèces susceptibles de se reproduire dans les différents habitats considérés comme favorables. La destruction des sites de reproduction peut entraîner la destruction des individus qui y sont associés si les travaux interviennent durant les périodes sensibles de reproduction et d'élevage des jeunes ;
  - les aires de repos concernent des aires d'estivage, d'hivernage ou de haltes (migratoires ou non) mais aussi de thermorégulation, de toilettage, de repos journalier ou de toute autre activité non dynamique. Elles sont nécessaires à la survie des espèces même si leurs caractéristiques sont parfois moins spécifiques que pour les zones de reproduction ;
  - les territoires de chasse et de déplacements linéaires ou surfaciques (forêts, espaces de lisière et haies, points d'eau, cours d'eau, vergers, milieux ouverts...) sont bien évidemment nécessaires à l'alimentation, mais aussi au déplacement des espèces entre les aires citées précédemment. La réduction de leur surface peut limiter la survie et la réussite de la reproduction et donc la taille des populations ;

  ✓ **la destruction d'individus**

  La destruction d'individus concerne principalement les phases de travaux (aménagements préalables et construction initiale). De par son activité et la mise à nu des terrains, le chantier devient généralement peu favorable aux espèces animales qui perçoivent une perturbation de leur environnement. La plupart des espèces vont donc s'éloigner durant cette période, limitant ainsi le risque de destruction d'individus.

  Néanmoins, il existe des cas de figure où les risques sont accrus ou restent toujours importants :

  - la zone du chantier peut constituer une zone de passage obligatoire pour la migration de certaines espèces notamment les amphibiens ;
  - cette zone dénudée peut être attractive pour les espèces dites pionnières qui cherchent de nouveaux secteurs à coloniser (exemple des amphibiens comme l'Alyte accoucheur) ;
  - le chantier peut aussi servir de zone de thermorégulation pour les reptiles ce qui multiplie les risques d'écrasement.

  La méthode de quantification est la suivante :

  - prise en compte, dans le calcul des surfaces à risque pour la destruction d'individus, les surfaces d'habitats naturels par cortège selon les niveaux d'intérêt des habitats où les espèces protégées et/ou patrimoniales sont concernées par l'emprise totale du site ;
  - quantification précise du nombre d'individus de ponte ou de juvéniles impactés par les travaux est délicate. De ce fait, il a été retenu une fourchette minimale à maximale des individus observés.

  ✓ **la perturbation d'individus**

  Les chantiers génèrent un dérangement propre qui peut conduire à la modification, voire à un arrêt temporaire de la fréquentation du site par les espèces les plus sensibles.

  Le dérangement peut être lié à la circulation des engins de chantier, au défrichement, aux terrassements, au bruit (oiseaux notamment) ou à la lumière lors des travaux nocturnes (chiroptères notamment).

  Dans une moindre mesure, le dérangement des espèces peut également se poursuivre pendant la phase d'exploitation, en lien avec les activités du site : bruit, éclairage de nuit etc. ;

  ✓ **la dégradation des fonctionnalités écologiques**

  Les emprises des constructions et les clôtures mises en place peuvent entraîner la rupture des corridors écologiques préexistants, la fragmentation des habitats ou la modification des fonctionnalités de la zone ;

  ✓ **l'altération potentielle de la qualité chimique des milieux**

  Il s'agit notamment des risques d'effets par pollution des milieux lors des travaux et secondairement, en phase de fonctionnement des installations lors d'entretien par exemple). Il peut aussi s'agir de pollutions accidentelles par polluants chimiques (huiles, produits d'entretien...) ou par apports de matières en suspension (particules fines) :

  - les **pollutions conventionnelles potentielles des milieux naturels**, en lien avec les émissions chimiques liquides et atmosphériques du projet global Cigéo ;
  - les **effets potentiels des rayonnements** sur les organismes vivants.

  Les effets potentiels des rejets radioactifs du centre de stockage Cigéo sur les espèces présentes sont caractérisés par le calcul du risque radiologique. La méthode adoptée par l'Andra pour évaluer le risque radiologique sur la faune et la flore sauvages, associé aux émissions radioactives du projet global Cigéo, est basée sur l'utilisation de l'approche ERICA et de l'outil associé, développés et utilisés au niveau européen depuis les années 2000 (185, 186). L'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN) a participé à ce développement.

  La démarche est similaire à celle de l'évaluation du risque radiologique sur la santé humaine. À partir du contexte et des données environnementales disponibles, de l'évaluation des émissions radioactives du projet global et de leur dispersion, il s'agit d'analyser l'exposition des organismes en termes de dose absorbée et de caractériser le risque en comparant l'exposition des organismes, *via* l'indicateur du débit de dose absorbée, au débit de dose absorbé sans effet attendu de 10 µGy/h, défini au niveau européen (185).

Tableau 6-16 Effets génériques de ce type de projet sur la faune et la flore

Types d'effets	Caractéristiques de l'effet	Principaux groupes et périodes concernés
Phase travaux (aménagements préalables et construction initiale)		
Destruction ou dégradation physique des habitats naturels et habitats d'espèces Cet effet résulte des travaux de défrichement, de fouilles et de terrassements sur la zone d'intervention potentielle qui vont entraîner la destruction des habitats naturels et habitats d'espèces (zones de reproduction, territoires de chasse, zones de transit). Les travaux peuvent également induire le développement des espèces exotiques envahissantes ou des perturbations hydrauliques...	• direct ; • permanent (destruction) ; • temporaire (dégradation) ; • à court terme.	Tous les habitats naturels et habitats d'espèces situés dans la zone d'intervention potentielle du projet.
Destruction des individus Cet effet résulte du défrichement et des terrassements sur la zone d'intervention potentielle du projet qui entraînent des collisions avec les engins de chantier, un écrasement, un piétinement...	• direct ; • permanent (à l'échelle du projet) ; • à court terme.	Toutes les espèces de flore situées dans la zone d'intervention potentielle du projet. Toutes les espèces de faune peu mobiles situées dans l'emprise du projet, en particulier les oiseaux (œufs et poussins), les mammifères (au gîte, lors de leur phase de léthargie hivernale ou les jeunes), les insectes (œufs et larves), les reptiles, les amphibiens, les mollusques, les crustacés, les poissons (œufs).
Perturbation des individus Il s'agit d'un effet par dérangement de la faune lors des travaux (perturbations sonores ou visuelles). Le déplacement et l'action des engins entraînent des vibrations, du bruit ou des perturbations visuelles (mouvements, lumière artificielle) pouvant présenter de fortes nuisances pour des espèces faunistiques.	• direct ou indirect ; • temporaire (durée des travaux) ; • à court terme.	Toutes les espèces de faune et particulièrement les mammifères et les oiseaux nicheurs et hivernants.
Altération biologique et chimique des milieux Il s'agit notamment des risques d'effets par pollution des milieux lors des travaux (et secondairement, en phase d'entretien). Il peut s'agir de pollutions accidentelles par polluants chimiques (huiles, produits d'entretien...) ou par apports de matières en suspension (particules fines) lors des travaux de terrassement notamment.	• direct ; • temporaire (durée d'influence variable selon les types de pollution et l'ampleur) ; • à court terme (voire moyen terme).	Toutes les espèces végétales et particulièrement la flore aquatique. Toutes les espèces de faune et particulièrement les espèces aquatiques (poissons, mollusques, crustacés et amphibiens)
Dégradation des fonctionnalités écologiques Cet effet concerne la rupture des corridors écologiques et la fragmentation des habitats.	• direct ; • permanent ; • durant toute la vie du projet.	Toutes les espèces de faune et particulièrement les mammifères, les amphibiens et les reptiles.
Phase de fonctionnement		
Destruction ou dégradation physique des habitats naturels et habitats d'espèces Cet effet résulte de l'entretien des milieux associés au projet.	• direct ; • permanent (destruction) ; • temporaire (dégradation) • à court terme	Tous les habitats naturels et toutes les espèces situées dans la zone d'intervention potentielle du projet.
Destruction des individus Il s'agit d'un effet par collision d'individus de faune avec les véhicules ou les câbles électriques. Cet effet résulte également de l'entretien et du piétinement des milieux associés au projet.	• direct ; • permanent (à l'échelle du projet) ; • durant toute la vie du projet.	Toutes les espèces de faune et particulièrement les mammifères et les oiseaux nicheurs et hivernants.
Perturbation des espèces Il s'agit d'un effet par dérangement de la faune (perturbations sonores ou visuelles) du fait de l'utilisation du site ou de l'infrastructure.	• direct ou indirect ; • temporaire (durée des travaux) ; • durant toute la vie du projet.	Toutes les espèces de faune et particulièrement les mammifères et les oiseaux nicheurs et hivernants.
Altération biochimique des milieux Il s'agit notamment des risques d'effets par pollution des milieux. Il peut s'agir de pollutions accidentelles par polluants chimiques (huiles, produits d'entretien...) ou par apports de matières en suspension (particules fines).	• direct ou indirect ; • temporaire (durée d'influence variable selon les types de pollution et l'ampleur) ; • à court terme (voire moyen terme).	Toutes périodes. Habitats naturels. Tous groupes de faune et de flore.
Dégradation des fonctionnalités écologiques Cet effet concerne la rupture des corridors écologiques et la fragmentation des habitats.	• direct ; • permanent ; • durant toute la vie du projet.	Toutes les espèces de faune et particulièrement les mammifères, les amphibiens et les reptiles.

6.2.2 Évaluation des niveaux d'incidences

Le niveau d'incidences (potentielle et résiduelle) dépend du niveau d'enjeu (identifié dans l'état initial), ainsi que de l'intensité de l'effet sur une ou plusieurs composantes du milieu naturel.

Les niveaux d'incidences sont évalués selon les critères suivants :

- caractéristiques propres à l'effet considéré ;
  - ✓ type d'effet (effet direct ou indirect : destruction, dégradation, dérangement…) ;
  - ✓ période d'occurrence (en ou hors période de vulnérabilité) ;
  - ✓ durée de l'effet (effet temporaire/réversible, effet permanent/irréversible ;
  - ✓ intensité de l'impact (pollution diffuse, destruction totale…).
- contrainte réglementaire (indication si un groupe relève d'une contrainte réglementaire) ;
- niveau d'enjeu de préservation de l'élément concerné par l'effet ;
- autres caractéristiques propres à l'élément concerné par l'effet :
  - ✓ nature précise de l'élément (habitat d'espèces, individus…) ;
  - ✓ surface/longueur relative concernée ;
  - ✓ effectif relatif concerné ;
  - ✓ sensibilité immédiate de l'élément impacté à l'effet ;
  - ✓ capacité d'auto-régénération (résilience) de l'élément impacté après l'impact, sur l'aire d'étude.
- contexte environnemental du projet (éléments de nature à réduire ou à augmenter localement la probabilité d'occurrence de l'effet).

Sur la base de ces critères, un niveau d'impact est évalué, par type d'effet et par composante du milieu naturel.

Les **incidences potentielles** sont évaluées selon deux niveaux :

- non notable : lorsque l'incidence n'est pas de nature à remettre en cause l'état de conservation et/ou le cycle biologique des habitats ni des espèces ;
- notable : à l'inverse, lorsque l'altération des habitats et des espèces remet en cause leur état de conservation et/ou leur cycle biologique.

Les **incidences résiduelles** sont évaluées suivant six niveaux (cf. Tableau 6-17) :

Tableau 6-17 Niveau d'incidence résiduelle et éléments d'appréciation

Niveau d'incidence	Éléments d'appréciation
Positif	Amélioration directe ou indirecte du milieu générée par la réalisation du projet.
Très faible	Altération nulle ou marginale du milieu naturel.
Faible	Altération d'habitats ou d'espèces qui ne remet pas en cause son état de conservation et/ou son cycle biologique.
Modéré	Destruction ou dégradation d'habitats ou d'espèces à enjeu faible à moyen, susceptible de remettre en cause une partie du cycle biologique de l'espèce (ex : alimentation) et d'altérer l'état de conservation d'une partie de son habitat. Porte sur des espèces ou habitats d'intérêt départemental.
Fort	Destruction ou dégradation importante d'habitats ou d'espèces à enjeux moyen à fort, qui remet en cause le cycle biologique d'une espèce et/ou l'état de conservation de son habitat. Porte sur des espèces ou habitats présentant **un intérêt régional.**
Très fort	Destruction ou dégradation très importante d'habitats ou d'espèces à enjeu fort à très fort, qui remet en cause le cycle biologique d'une espèce et/ou de l'état de conservation de son habitat. Porte sur des espèces ou habitats présentant un intérêt régional ou national.

6.2.3 Incidences sur les zonages environnementaux

Les incidences du projet global Cigéo sur les zonages environnementaux sont étudiées sur la base de l'identification des zonages présents au sein de l'aire d'étude éloignée (cf. Chapitre 6 du volume III de la présente étude d'impact).

L'évaluation des incidences sur les zonages environnementaux porte plus particulièrement sur les espèces et/ou les habitats ayant justifié la désignation des sites Natura 2000, afin de déterminer si ceux-ci sont impactés directement ou indirectement par le projet.

La méthode d'évaluation des incidences sur les sites Natura 2000 est développée au chapitre 6.4 du présent volume.

6.2.4 Incidences sur les zones humides

Les incidences du centre de stockage Cigéo sur les zones humides sont étudiées sur la base de l'identification des zones humides présentée dans l'état initial de l'environnement (volume III de la présente étude d'impact) et des caractéristiques du projet.

Les incidences portent sur :

- la destruction directe de zones humides (remblayage, excavation, destruction de végétation humide) ;
- la dégradation de zones humides (pollution du sol, dégradation de végétation humide) ;
- les incidences indirectes (modification de l'alimentation en eau).

Le niveau d'incidence dépend de la surface des zones humides impactées, de ses fonctionnalités, ainsi que de l'intensité de l'impact. Les niveaux d'impact sont évalués selon les critères suivants :

- caractéristiques propres à l'impact considéré :
  - ✓ type d'impact (impact direct ou indirect : destruction, dégradation) ;
  - ✓ durée de l'impact (impact temporaire/réversible, impact permanent/irréversible) ;
  - ✓ intensité de l'impact (pollution diffuse, destruction totale…).

- autres caractéristiques propres à l'élément concerné par l'impact :
  - ✓ nature précise de l'élément (zone humide pédologique, zone humide végétation…) ;
  - ✓ surface/longueur relative concernée ;
  - ✓ capacité d'auto-régénération (résilience) de l'élément impacté après l'impact.
- contexte environnemental du projet (éléments de nature à réduire ou à augmenter localement l'intensité de l'effet) ;
- après mise en œuvre des mesures d'évitement et de réduction, si une incidence résiduelle est identifiée, une analyse des fonctions de la zone humide impactée est réalisée, selon la méthode nationale d'évaluation des fonctions des zones humides (MNHN/OFB – ex Onema, 2016 (187)), afin d'apprécier la perte de fonctionnalité liée à cette incidence résiduelle.

Conformément à la réglementation, si l'analyse des incidences mettait en évidence des perturbations même faibles des zones humides et ce, malgré les mesures d'évitement et de réduction, l'Andra s'engage à mettre en œuvre des mesures de compensation avec comme objectif l'atteinte de l'équivalence fonctionnelle en appliquant un ratio de deux et en s'appuyant sur le « Guide de la méthode nationale d'évaluation des fonctions de zones humides » de l'ex-ONEMA (mai 2016). Ainsi avec un ratio d'équivalence fonctionnelle de deux pour un, le gain fonctionnel de la mesure de compensation sera au moins deux fois supérieur à la perte fonctionnelle engendrée par le projet.

6.2.5 Incidences sur les continuités écologiques

L'incidence sur les continuités écologiques est appréhendée à plusieurs échelles : à une échelle élargie autour de l'aire d'étude immédiate du projet global Cigéo et à une échelle plus locale.

L'analyse des incidences sur les sous-trames identifiées a été réalisée en utilisant pour chacune une espèce cible représentative (cf. Chapitre 6.1.6 du présent volume).

Cette analyse se base sur les continuités modélisées, ainsi que sur les points de conflit identifiés (obstacles ou difficultés de circulation pour les espèces).

Pour les continuités écologiques, les incidences peuvent porter sur :

- la rupture d'une continuité écologique ;
- la modification de fonctionnalité d'un réservoir de biodiversité.

Les niveaux d'incidences sont plus ou moins forts en fonction de la nature de la continuité impactée (continuité locale ou régionale, possibilité ou non de corridor alternatif…) et des modifications apportées sur le réservoir de biodiversité (modification mineure ou importante avec effet sur ses fonctionnalités…).

Sur cette base, les incidences potentielles associées aux différentes opérations du projet global Cigéo ont été identifiées de manière qualitative. Lorsque des incidences potentielles notables sont observées, des mesures d'évitement et de réduction sont mises en œuvre afin de limiter les incidences résiduelles sur les continuités écologiques.

Une analyse et modélisation des trames écologiques et des continuités écologiques existantes est ensuite réalisée avec la prise en compte des mesures d'évitement et de réduction mises en place.

6.2.6 Incidences des émissions radiologiques et chimiques sur la faune et la flore sauvages

Les méthodologies présentées ci-après concernent l'évaluation des incidences des émissions radiologiques et chimiques sur la faune et la flore sauvages en phase de fonctionnement. Après fermeture, les méthodologies utilisées pour l'évaluation des incidences des émissions radiologiques et chimiques sur la faune et la flore sauvages sont présentées au chapitre 18.2.3.2 du volume IV de la présente étude d'impact.

6.2.6.1 Émissions radiologiques

La méthode adoptée par l'Andra pour évaluer le risque radiologique pour la faune et la flore sauvages, associé aux émissions radioactives du projet global Cigéo, est basée sur le guide national édité par l'IRSN en 2021 (188) sur l'utilisation de l'approche ERICA et de l'outil associé, développés et utilisés au niveau européen (Beresford *et al.*, 2007 (185), Beaugelin-Seiller *et al.*, 2016 (186)). La démarche est similaire à celle de l'évaluation du risque radiologique sur la santé humaine. À partir du contexte et des données environnementales, de l'évaluation des émissions radioactives du projet global et de leur dispersion, il s'agit d'analyser l'exposition des organismes non humains (dose absorbée) et de caractériser le risque en fonction des effets attendus. Cette caractérisation du risque est effectuée en comparant l'exposition des organismes, *via* l'indicateur du débit de dose absorbée, au débit de dose absorbé sans effet attendu de 10 µGy/h défini au niveau européen.

» DOSE ABSORBÉE ET DÉBIT DE DOSE

La dose absorbée est la quantité d'énergie déposée dans une unité de masse par un rayonnement ionisant. Elle s'exprime en Gray, noté Gy (1 Gy équivaut à 1 Joule par kilogramme).

Le débit de dose est la dose absorbée par un organisme par unité de temps. Il s'exprime en Gray par heure, noté Gy/h.

Le micro (symbole µ) est le préfixe du Système international d'unités (SI) qui représente 10^{-6}, soit un millionième d'unité. C'est l'ordre de grandeur généralement utilisé pour la faune et la flore.

Les espèces sont représentées par 13 organismes de référence définis dans l'outil ERICA (amphibien, arthropode, insecte volant, petit mammifère, grand mammifère, mollusque-gastéropode, oiseau, reptile, annélide, plante-herbe, arbuste, arbre, lichen-bryophyte). Un organisme dont le mode de vie et la taille sont très différents de ces organismes de référence a été ajouté : les chauves-souris.

Étant donnée la sensibilité écologique de certaines zones proches des sites d'implantation de Cigéo, le niveau 2 de la démarche ERICA est appliqué, à savoir la comparaison des débits de dose absorbée par les organismes calculés avec la valeur de référence de 10 µGy/h reconnue comme sans effet (189).

La démarche comporte quatre étapes similaires à celles de la démarche d'évaluation du risque radiologique à l'Homme :

- définition du contexte de l'évaluation ;
- analyse des expositions ;
- analyse des effets ;
- caractérisation du risque.

6.2.6.1.1 Inventaire des organismes

a) Rappel de la méthode et d'organismes de référence ERICA

Une liste d'espèces présentes dans une aire d'étude d'environ dix kilomètres de côté dans la fourchette du périmètre de 100 – 400 km² définis par l'AIEA (190) est établie à partir :

- des inventaires écologiques menés dans le cadre de la connaissance du site ;
- des espèces identifiées dans les espaces protégés par conventionnement (sites Natura 2000, parcs naturels régionaux) ;
- des espèces inscrites et classées dans les espaces recensés par inventaire (espèces déterminantes ZNIEFF, ZICO) et indiquées dans les fiches descriptives correspondantes ;
- des espèces à valeur économique (ressource halieutique ou élevage) et culturelle (emblématiques).

Dans un second temps, le nombre d'espèces inscrites dans cette première liste est réduit en appliquant deux niveaux de filtre :

- le premier filtre consiste à prendre en compte non seulement les aspects réglementaires mais également des considérations écologiques : sélection d'espèces présentant des enjeux écologiques (espèces protégées) et liées à des enjeux culturels et économiques (espèces emblématiques, ressources halieutiques, espèces d'élevage). Les espèces protégées ne sont pas forcément celles qui représentent au mieux les enjeux de préservation pour l'ensemble de la biodiversité d'un territoire, mais permettent de protéger un grand nombre des espèces partageant le même mode de vie et le même habitat (assimilables à des espèces « parapluies ») ;
- le second filtre permet de prendre en compte des attributs indispensables à la dosimétrie de la faune et la flore (tailles, volumes et modes de vie) : sélection d'espèces présentant des écarts significatifs de formes et de tailles, mais également de mode de vie avec les organismes de référence, présents par défaut dans l'outil ERICA.

L'application informatique ERICA utilisée propose par défaut différents organismes de référence des trois écosystèmes : eau douce, eau de mer et milieu terrestre.

6.2.6.1.2 Critère d'évaluation et niveau de protection

La revue des bases scientifiques consensuelles des connaissances disponibles en matière de radio toxicité pour la faune et la flore a conduit l'Europe à adopter dans le cadre de l'approche ERICA une valeur de référence de 10 µGy/h (*Predicted non effect dose rate*, PNEDR), applicable ajouté au bruit de fond, à un écosystème générique pour tous les organismes. Ce débit de dose ajouté de 10 µGy/h, est directement comparé au débit de dose total absorbé estimé pour chaque organisme considéré. Le ratio entre le débit de dose totale calculé (exprimé en µGy/h) pour l'organisme et cette valeur permet de calculer un quotient de risque.

Si ce quotient de risque est inférieur ou égal à un, on considère qu'il n'y a pas de risque pour l'organisme. En revanche si ce rapport est supérieur à un, un risque ne peut pas être écarté.

6.2.6.2 Émissions chimiques

La démarche des évaluations du risque chimique pour la faune et la flore se déroule selon 3 niveaux :

- niveau 1 (criblage) : approche conservative basée sur des hypothèses simplifiées visant à calculer un indice de risque total pour l'écosystème. L'utilisation de valeurs maximales d'exposition conduit à une évaluation de l'impact majoré ;
- niveau 2 (évaluation générique) : approche plus réaliste utilisant des organismes de référence plus représentatifs et des modèles de transfert plus réalistes. Des hypothèses moins conservatives sont introduites (par exemple des valeurs moyennes pour les données d'exposition lorsqu'elles sont disponibles, intégration des mesures de réduction dans le terme source) ;
- niveau 3 (évaluation détaillée) : approche qui nécessite des informations locales et des compétences spécialisées. Les valeurs repères d'effets telles que la « *Predicted No Effect Concentration* » (PNEC) ou les « Valeurs guide pour l'environnement » (VGE) utilisées dans les niveaux 1 et 2 peuvent être remplacées par des informations sur les effets qui doivent être scientifiquement justifiées et référencées.

Le niveau 2 est directement appliqué pour l'évaluation des risques pour la faune et la flore liés aux rejets chimiques du projet global de Cigéo.

Si, à l'issue de l'évaluation du niveau 2, le risque ne peut pas être écarté pour la faune et la flore sauvages, le niveau 3 de la démarche est alors appliqué. Au niveau 3, les choix des valeurs seuils, les niveaux de qualité, et l'interprétation des résultats sont sous la responsabilité de l'évaluateur.

Le niveau 2 comporte quatre étapes équivalentes à celles de l'évaluation des risques sanitaires, à savoir :

- Identification des dangers :

  L'identification des dangers est une étape importante à effectuer avant la mise en œuvre de l'évaluation du risque chimique pour l'environnement afin d'adapter la démarche décrite au contexte spécifique des sites.

  Il n'est pas nécessaire de définir les espèces cibles car le niveau d'exposition est comparé à une valeur repère déterminée pour tous les organismes vivants du milieu considéré.

  Dans cette étape, sont définies les caractéristiques de la source d'émission de la substance et le milieu récepteur considéré le plus représentatif de l'exposition chronique (eau douce, eau de mer, air, sol, sédiments…). Cela nécessite en particulier de définir la nature des données d'entrée. Les valeurs moyennes dans le temps et/ou dans l'espace sont utilisées.

  Les termes sources (concentrations dans l'air, flux de dépôts et concentrations dans les sols et sédiments, concentrations dans l'eau douce et marine) et les valeurs des différents paramètres, associés à la description générale de chacune des composantes abiotiques de l'écosystème (air, eau, sol, sédiments) retenus sont les mêmes que ceux de l'évaluation d'impact sanitaire aux populations humaines en fonction des phases de vie du site.

- Évaluation des expositions :

  L'exposition correspond à la concentration dans les milieux, appelée « *Predicted Environnemental Concentration* » (PEC). Il s'agit de la concentration de la substance mesurée, calculée ou modélisée dans l'environnement (terrestre, ou aquatique), liée aux rejets attribuables à l'installation étudiée. Les concentrations des substances émises dans l'environnement sont calculées et localisées aux points récepteurs définis en fonction du niveau de l'évaluation, *via* un modèle de dispersion ou de dilution dans le cas des milieux aquatiques.

  Différentes concentrations (PEC) sont calculées dans les compartiments du milieu récepteur considéré. Le milieu récepteur est le milieu physique susceptible de recevoir les émissions du projet. Il peut s'agir d'eaux de surface ou de l'atmosphère. Pour le milieu considéré, plusieurs compartiments peuvent être affectés en fonction des scénarios de transfert prédéfinis. Ces compartiments peuvent être :

  - ✓ l'air et le sol pour les espèces de milieu terrestre ;
  - ✓ l'eau douce et les sédiments pour le milieu eau douce.

  Dans le cadre de rejets atmosphériques, une concentration moyenne sur une aire d'étude d'un rayon d'environ 10 km centrés sur le point de rejet est retenue pour l'évaluation du risque, comme le recommande l'AIEA pour les rejets radioactifs.

  La concentration au niveau des zonages réglementaires sur l'aire d'étude est estimée, notamment dans le cas de sites Natura 2000, ZNIEFF, APPB ou autres zonages pour répondre aux besoins d'évaluation des incidences.

  Dans un objectif d'étude de sensibilité ou de conservatisme, la concentration maximale sur l'aire d'étude a aussi été étudiée.

- Évaluation des relations dose-réponse :

  L'analyse de la relation dose-réponse a pour objectif la détermination, pour chaque substance chimique, de la valeur repère assurant la protection des écosystèmes au regard de leur exposition à cette substance. Une valeur repère correspond à une substance spécifique. L'impact global sur l'écosystème correspond à l'ensemble des effets sur l'écosystème quelle que soit leur nature (effets sur la croissance, reproduction, mortalité…).

  Les valeurs repères sont déterminées pour beaucoup de substances connues par des agences environnementales telles que l'Ineris et l'Anses.

  L'utilisation des valeurs de PNEC est privilégiée. En l'absence de PNEC, les normes de qualité pour les écosystèmes ou les VGE peuvent être utilisées.

- Caractérisation du risque :

  La caractérisation du risque écologique lié aux substances chimiques est appréhendée par une approche de comparaison entre la concentration environnementale PEC *(Predicted Environmental Concentration)* due aux émissions de l'installation mesurée ou calculée et la PNEC, concentration sans effet de la substance. Le rapport de ces deux valeurs donne le quotient de danger (ou indice de risque).

  $$QD = \frac{PEC}{PNEC}$$

  Un quotient de danger inférieur ou égal à 1 permet de conclure à un risque écologique non préoccupant pour la substance considérée. Si le quotient de danger est supérieur à 1, le niveau 3 de la démarche est mis en œuvre afin de mieux caractériser le risque sur les organismes avant de conclure.

  L'interprétation de la valeur du quotient de danger tient compte des incertitudes et des hypothèses retenues en première approximation.

6.3 Compensation écologique

6.3.1 Les grands principes de la compensation écologique

La compensation doit apporter des gains permettant de compenser les incidences résiduelles notables, et donc de permettre l'atteinte de l'objectif d'absence de perte nette, entériné par la loi « biodiversité » du 8 août 2016 dans son article 2. Un gain ne peut être généré que par une action de restauration, de réparation, ou de réhabilitation. En conséquence, la simple préservation d'un milieu déjà en bon état écologique ne peut généralement être considérée comme une mesure de compensation, sauf lorsqu'il est démontré que cette mesure permet de préserver le milieu d'une pression à court ou moyen terme. Les gains de biodiversité ne s'évaluent pas par rapport à un scénario pessimiste de l'évolution de l'état de la biodiversité sur les sites accueillant la mesure de compensation mais bien par rapport à l'état initial de cette biodiversité sur ces sites incluant sa trajectoire écologique en l'absence d'intervention.

Il est ici noté que l'atteinte de l'objectif d'absence de perte nette de biodiversité ne peut être justifiée par la seule équivalence écologique. En effet, l'ensemble des principes fondamentaux de la compensation doivent également être pris en compte et justifiés afin de pouvoir conclure sur une atteinte de l'objectif d'absence de perte nette de biodiversité. Ce sont notamment :

- l'additionnalité : les mesures doivent générer une plus-value écologique qui n'aurait pas été obtenue en leur absence, l'amélioration écologique est à démontrer ;
- la localisation : priorité à la proximité fonctionnelle des compensations ;
- la temporalité : compensation à mettre en place avant l'impact ; les mesures compensatoires doivent être anticipées le plus en amont possible par le maître d'ouvrage de façon à perturber le moins possible l'état de conservation des espèces visées ;
- la durée : la pérennité peut être assurée par l'acquisition de terrain ou des démarches contractuelles de long terme avec les propriétaires ;
- la faisabilité technique, administrative et juridique : celle-ci doit être démontrée ;
- le financement assuré pour la mise en œuvre et le suivi sur toute la durée retenue ;
- la responsabilité du maître d'ouvrage, même en cas de délégation.

Les mesures compensatoires doivent être assorties d'objectifs de résultat et de modalités de suivi de leur efficacité et de leurs effets et la concertation et les échanges avec les services de l'État seront pris en compte pour la définition des mesures compensatoires.

6.3.2 Principes généraux retenus par l'Andra

Les grands principes de compensation retenus par l'Andra sont les suivants :

Les incidences résiduelles de milieux de niveaux « très fort », « fort » et « modéré » sont considérées comme « notables » au sens de l'article R. 122-5 du code de l'environnement et en tenant compte du principe de prévention tel que défini par l'article L. 110-1 du code de l'environnement. Ces incidences nécessitent la mise en œuvre de mesures compensatoires répondant au principe d'équivalence écologique défini par l'article L. 163-1 du code de l'environnement.

Les incidences résiduelles faibles du projet se retrouvent aussi compensées par conséquence de l'effet parapluie des mesures mises en place pour les incidences modérées, fortes et très fortes. En effet, la fonctionnalité recherchée sur les espèces à enjeu modéré, fort et très fort sert souvent aux autres espèces, à moindre enjeu après vérification de la bonne équivalence écologique entre ces différents niveaux d'impact (même espèces, mêmes fonctions…).

6.3.2.1 Intégrer les mesures compensatoires dans le territoire et prendre en compte les équilibres écologiques existants

Conciliant enjeux d'aménagement et d'environnement, la compensation Andra s'inscrit dans l'objectif de maîtriser l'empreinte environnementale dès leur conception tout en favorisant un développement territorial dynamique, équilibré et durable. En effet, le patrimoine naturel est un facteur fort de l'attractivité des territoires et son maintien est essentiel pour préserver la qualité de vie des habitants.

L'Andra restaure des milieux naturels équivalents aux sites impactés, permettant ainsi de maintenir l'équilibre écologique du territoire. Elle veille à constituer et renforcer des unités biogéographiques cohérentes offrant des potentialités biologiques importantes pour la faune sédentaire ou migratrice (transit, repos, alimentation et reproduction).

Les implantations du projet global Cigéo et des installations de raccordement se situent dans des territoires ruraux dont une des principales activités est l'agriculture.

Les usages habituels dans les forêts retenues pour la compensation sont conservés lorsqu'ils ne sont pas incompatibles avec les objectifs des mesures compensatoires : promenade (hors îlots de sénescence pour des raisons de sécurité), chasse (avec quelques préconisations et restrictions simples pour respecter les objectifs écologiques), ramassage de bois et exploitation sylvicole rentable.

6.3.2.2 Respecter l'exigence de proximité fonctionnelle

Les sites de compensation ont été retenus notamment du fait de leur proximité fonctionnelle **: c**ondition selon laquelle les mesures de compensation sont mises en œuvre en priorité au plus près des sites endommagés, et dans tous les cas à proximité fonctionnelle de la zone affectée par le projet, sur les sites les plus appropriés au regard des enjeux en présence et au sein de la même zone naturelle. La « zone naturelle » est une région d'étendue souvent limitée, présentant des caractères homogènes et similaires aux sites affectés d'un point de vue physique (géomorphologie, géologie, bathymétrie, courantologie, climat, sols ou substrat, ressources en eau, régime hydrologique, etc.) et du point de vue de l'occupation humaine (perception et gestion du territoire développant des paysages et une identité culturelle propre). Pour cela, la région naturelle retenue est celle du Barrois.

Puis les sites prévus ont fait l'objet d'abord d'un prédiagnostic écologique, puis d'un état initial des habitats et espèces fréquentant le site de compensation. À la suite, les espèces à enjeux déjà présentes ont été prises en compte afin d'éviter un impact supplémentaire sur les populations avec les actions de restauration du site.

Cette première analyse globale du territoire a permis de garantir qu'il existe des sites :

- pertinents au vu des éléments de biodiversité affectés, c'est-à-dire des sites susceptibles de contenir les mêmes espèces, habitats et fonctions que ceux affectés par le projet, après la mise en œuvre des mesures de compensation ;
- présentant un potentiel de gain écologique intéressant (par exemple : site dégradé ou dans une trajectoire écologique défavorable ou sous pressions, sites présentant la possibilité d'augmenter les effectifs des espèces déjà présentes, ou d'améliorer les habitats pour accueillir des espèces non présentes) ;
- à proximité fonctionnelle, c'est-à-dire intégrés dans la même zone naturelle et accessibles aux mêmes populations d'espèces, si les mesures de compensation ne peuvent être mises en œuvre sur le site d'impact ou à proximité immédiate ;
- une maîtrise et sécurisation du foncier. L'Andra privilégie l'utilisation de son foncier pour la compensation. À cette fin, elle engage une politique d'acquisition foncière en amont de ses projets dans l'objectif de mieux maîtriser la pérennité des mesures et de la gestion de la mise en œuvre de la compensation.

Cela a donc permis de retenir onze sites de compensation.

Si certains guides précisent que « quel que soit le site [de compensation] retenu, une population de [l'espèce à compenser] devra déjà y être présente ou y avoir été recensée par le passé (si le site présente les conditions nécessaires à un possible retour de l'espèce considérée) ou à défaut y être considérée comme très probable ». Le retour d'expériences de CDC Biodiversité (entretiens avec des experts) nous pousse à ne pas adopter ce paradigme, et à considérer, sous certaines conditions, qu'il est possible pour une espèce de coloniser de nouveaux sites.

Chaque site de compensation n'a pas pu accueillir l'intégralité des cortèges et espèces cibles de compensation. Cette sélection a été rendue possible grâce à l'analyse des données bibliographiques et des inventaires de terrain. Les conditions pour qu'un nouveau site (rendu favorable *via* les mesures de compensation) puisse être colonisé, sans se lancer dans une modélisation de la dynamique des populations dans et entre leurs habitats, ont été :

- existence d'une population source (ou métapopulation) à proximité, par exemple sur la commune ou commune limitrophe tout en essayant de tenir compte des distances de dispersion de l'espèce et/ou ;
- existence de continuités écologiques fonctionnelles entre le site de compensation (après mesure) et les populations sources.

Les questions de « population minimum viable » et « d'effectif efficace » ne sont pas abordées ici, il s'agit uniquement de vérifier que les habitats rendus favorables grâce aux mesures de compensation écologique pourront être colonisés par les espèces concernées par la compensation ou bénéficieront à maintenir voire augmentation les populations déjà en place.

Chaque site de compensation a donc fait l'objet d'un plan de gestion reprenant l'intégralité des composantes de biodiversité du guide de l'approche standardisée du dimensionnement de la compensation.

6.3.2.3 Acquérir les sites de compensation

L'Andra privilégie l'utilisation de son foncier pour la compensation. À cette fin, elle engage une politique d'acquisition foncière en amont de ses projets dans l'objectif de mieux maîtriser la pérennité des mesures et de la gestion de la mise en œuvre de la compensation. Afin de connaître les potentialités des sites pressentis pour la compensation. Des prédiagnostics écologiques (inventaires faune-flore) et forestiers (carte des peuplements, état de conservation) sont réalisés.

6.3.2.4 Optimiser le nombre de site de compensation

La mutualisation de plusieurs mesures de compensation sur un même site leur donne une plus grande cohérence écologique et une meilleure fonctionnalité. Par ailleurs en agissant sur des sites de grandes surfaces cohérentes format des corridors. L'Andra accroît la capacité de résilience des sites d'actions, Ce principe simplifie également la gestion et le suivi de l'efficacité des mesures. Ainsi, la mise en œuvre des mesures de compensation sur un nombre réduit de sites de taille suffisamment importante est privilégiée par l'Andra.

Par exemple, les mesures forestières mises en œuvre au sein d'un massif forestier de grande superficie, ou disposant de connexions très fonctionnelles avec d'autres grands massifs participent à améliorer les habitats d'espèces, notamment pour les espèces à grand territoire. Les grands massifs sont susceptibles d'héberger plus d'espèces forestières exigeantes. Ces espèces peuvent plus facilement coloniser les parcelles de compensation. Au cœur d'un grand massif, les parcelles de compensation sont mieux protégées du dérangement et des pollutions diffuses. Dans le cadre de la mise en œuvre des mesures compensatoires en forêt, l'Andra favorise la recherche d'opportunités et de co-bénéfices pour la biodiversité et le fonctionnement des systèmes écologiques.

6.3.2.5 Engagements de l'Andra sur la mise en œuvre des mesures compensatoires

L'Andra est responsable de la mise en œuvre et des résultats des mesures de compensation pour les opérations dont elle est Maître d'ouvrage. Des opérations supplémentaires, sous la responsabilité d'autres maîtres d'ouvrage, sont toutefois nécessaires au fonctionnement du centre de stockage Cigéo (alimentation en eau, énergie, infrastructures de transport). Les différents Maîtres d'ouvrage associés à ces opérations sont responsables de leurs éventuelles compensations, cependant, une coopération entre eux et l'Andra est mise en place, dans le but d'harmoniser la méthodologie et ainsi mettre en cohérence l'ensemble des mesures de compensation pour les différentes opérations nécessaires au bon fonctionnement du projet global Cigéo.

6.3.2.6 Mettre en œuvre et suivre les mesures compensatoires dès l'obtention des autorisations et dans la longue durée

Les modalités de compensation figurent dans l'arrêté d'autorisation.

L'Andra établit un plan de restauration et de gestion écologique dans le cadre de la demande d'autorisation de travaux et de la concertation qui l'accompagne, et le met en œuvre dès l'obtention des autorisations. L'Andra engagera donc la mise en œuvre des mesures compensatoires au plus tard lors de la survenance des impacts induits par les travaux de la phase de réalisation autorisée pour les projets et dès l'obtention des autorisations, en établissant un plan de restauration et de gestion conservatoire sur la base d'expertises scientifiques des sites de compensation et faisant apparaître les mesures compensatoires proposées.

Le délai parfois court entre l'autorisation et l'impact nécessite d'anticiper la définition et la préparation pour être en situation de démarrer la compensation dès l'autorisation et avant impact. L'autorisation étant nécessaire pour bien faire reconnaître l'éligibilité par les services instructeurs des actions engagées, il est déconseillé de démarrer la mise en œuvre des mesures par anticipation.

L'article L. 163-1 du code de l'environnement précise que les mesures compensatoires « doivent se traduire par une obligation de résultats et être effectives pendant toute la durée des atteintes. »

Les lignes directrices nationales du ministère (191) indiquent que : « *La durée de gestion des mesures doit être justifiée et déterminée en fonction de la durée prévue des impacts, du type de milieux naturels ciblé en priorité par la mesure, des modalités de gestion et du temps estimé nécessaire à l'atteinte des objectifs* ». L'objectif est de viser la pérennité des effets de la mesure, en assurant sa gestion adéquate tout au long de la durée d'engagement du maître d'ouvrage, en fonction des enjeux environnementaux et en conformité avec l'acte d'autorisation. Au-delà de la durée d'engagement du maître d'ouvrage, la vocation écologique pérenne du site de compensation peut être anticipée, lorsque cela s'avère nécessaire.

L'Andra souhaite maintenir la gestion des mesures écologiques *a minima* jusqu'à la restitution des milieux naturels sur les sites de compensation, au niveau ciblé. Ce délai d'atteinte des objectifs des mesures compensatoires est plus important en milieu forestier ou prairial qu'en milieu cultivé. En effet, la durée d'atteinte d'un stade de forêt mature peut atteindre plusieurs dizaines d'années. Un coefficient correspondant à la temporalité est appliqué afin d'intégrer le décalage temporel entre les impacts du projet sur le site d'implantation et l'efficacité des mesures sur les sites de compensation. Pour les milieux demandant un certain temps pour atteindre les objectifs écologiques recherchés, il a été décidé d'appliquer un coefficient de 0,8. Ce coefficient s'appliquera donc aux habitats forestiers et aux habitats prairiaux destinés à accueillir des insectes exigeants, sachant que, pour les milieux forestiers, les mesures en faveur des espèces les plus exigeantes seront mises en œuvre au sein de peuplements forestiers déjà adultes. Pour les habitats agricoles, aucun coefficient particulier n'est appliqué, l'augmentation de la capacité d'accueil des oiseaux des milieux ouverts et semi-ouverts étant obtenue très rapidement.

L'Andra s'engage ainsi dans une démarche enveloppe :

- à maintenir toutes ses mesures compensatoires sur une durée de 50 ans quel que soit le milieu ;
- à réétudier au bout de 50 ans le devenir des sites de compensation avec les services de l'État en charge du suivi des mesures compensatoires : maintien des mesures, transfert ou non de propriété, nature et durée des mesures de gestion conservatoire ;
- à noter que cette durée est importante au regard des conventionnements à mettre en place avec les gestionnaires et exploitants associés aux plans de gestion des sites de compensation.

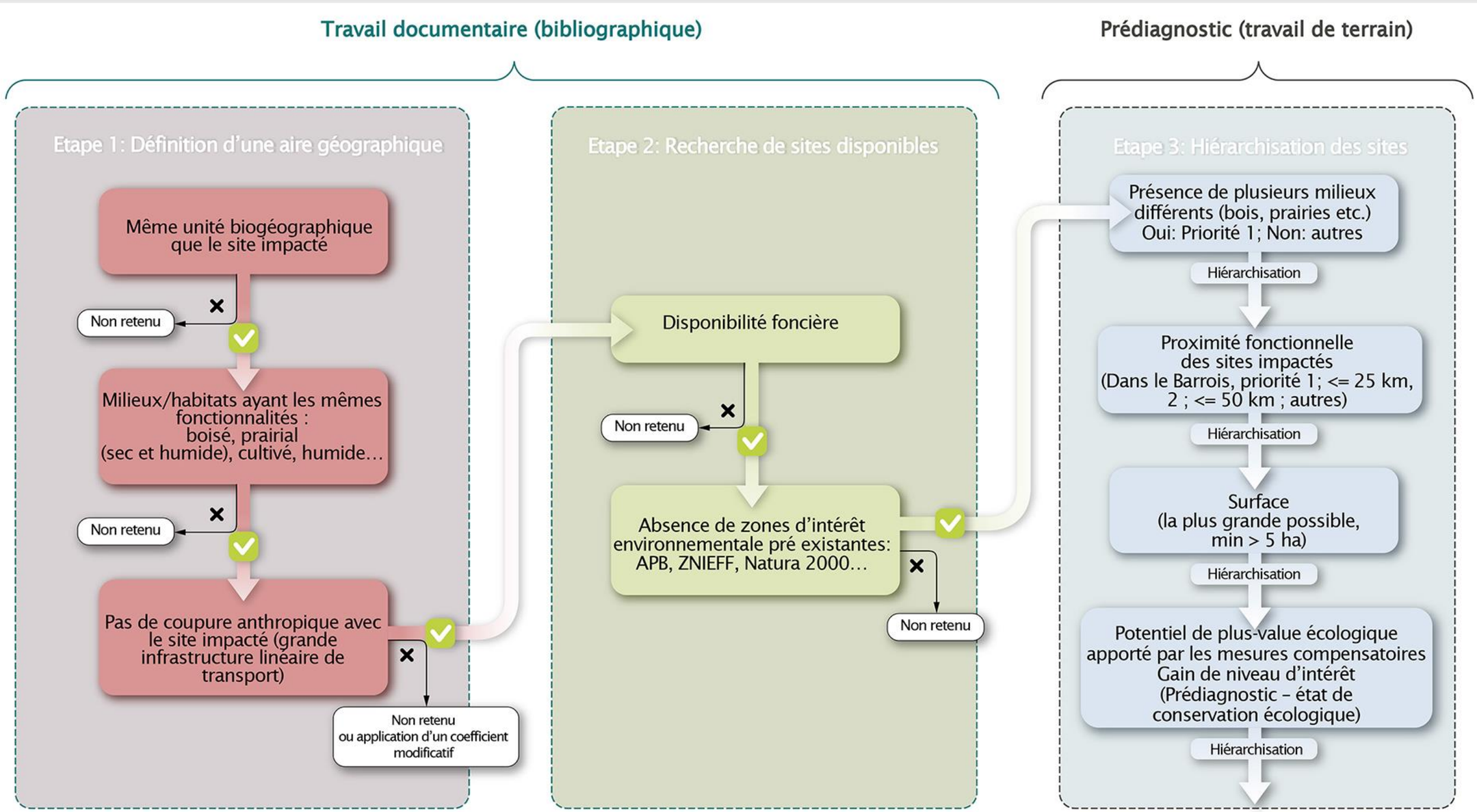


Figure 6-35 Étapes pour le choix des sites de compensation écologique

6.3.2.7 Suivre sur le long terme l'évolution des sites de compensation et l'efficacité des mesures

L'efficacité de chaque mesure est évaluée par un programme de suivi (suivant les modalités fixées par l'acte d'autorisation sur la base des engagements du maître d'ouvrage), c'est-à-dire par une série de collectes de données répétées dans le temps qui renseignent des indicateurs de résultats. Ces suivis permettent une gestion adaptative orientée vers les résultats à atteindre. Les indicateurs de résultats sont définis en tenant compte de l'état initial du site de compensation.

Pour chaque site de compensation, l'Andra détaille les modalités de suivi dans les plans de gestion écologiques en mettant l'accent sur les enjeux identifiés et les cortèges d'espèces visées : protocoles, périodicité (intervalles auxquels sont programmés les suivis) et périodes (moment dans l'année) de réalisation. Le programme de suivi sera mené sur la durée définie dans l'acte d'autorisation. Après la réalisation d'un état initial écologique détaillé au cours de la première année de mise en œuvre des mesures, les suivis pourront être réalisés à 2 ans, 5 ans, 10 ans puis tous les 10 ans.

Si les suivis écologiques venaient à démontrer un risque de non atteinte des objectifs fixés sur un ou plusieurs sites de compensation, les plans de gestion seraient alors remis à jour en lien étroit avec l'administration.

6.3.3 Méthode de dimensionnement de la dette et du gain écologiques des fonctionnalités des habitats

Dans le cadre de la présente étude d'impact, la méthode utilisée pour évaluer la dette et le gain écologiques du projet sur les fonctionnalités des habitats a été développée par CDC Biodiversité, en cohérence avec « l'Approche standardisée du dimensionnement de la compensation écologique » (mai 2021) portée par le ministère de la Transition écologique, l'OFB et le Cerema (192). Elle repose sur l'évaluation des pertes et des gains pour les espèces protégées et patrimoniales *via* :

- la définition de cortège de même affinité écologique par groupe ;
- l'évaluation du niveau d'intérêt des habitats pour une espèce donnée (ou un cortège donné) ;
- la valorisation quantitative des mesures de réduction ;
- la projection de l'habitat à atteindre en fonction de la mesure de compensation et à fortiori de l'intérêt de l'habitat.

Cette méthode dite « par écart de milieux » est pondérée par un coefficient multiplicateur en fonction de l'intérêt que le milieu représente pour une espèce (ou un cortège d'espèce). Les pertes et les gains représentent la différence entre le niveau d'intérêt d'un habitat initial (avant impact) et l'intérêt de l'habitat final (impacté ou restauré. Un coefficient est ensuite appliqué en fonction de la durée de l'impact sur le milieu (permanents ou temporaires).

Les pertes et les gains s'évaluent en Unité de Compensation (UC) par cortèges d'espèces avec la distinction de la nature des habitats impactés/habitats restaurés.

Le schéma de principe de la compensation est présenté en figure 6-36.

Huit étapes sont nécessaires pour quantifier la dette et le gain compensatoires :

Étape 1 : état initial sur l'aire d'étude du projet et au sein des sites de compensation

Des inventaires faune-flore-habitats sont menés sur l'aire d'étude immédiate du projet et sur les sites de compensation. Il s'agit de réaliser un « état des lieux » écologique des zones qui seront potentiellement impactées ou restaurées par le projet.

On rappelle que l'objectif est d'obtenir un gain écologique (sur les sites des compensations) égal ou supérieur à la dette écologique du projet global Cigéo.

Étape 2 : regroupement des habitats par grand type de milieux (cf. Chapitre 6.1.3.1 du présent volume)

Les habitats recensés sur les zones d'inventaires sont ensuite regroupés par type de milieu (26 différents). Cette classification permet de mieux orienter les mesures compensatoires à mettre en œuvre selon les grands types de milieux.

Étape 3 : regroupement des espèces par cortèges (cf. Chapitre 6.1.4.9 du présent volume)

Les espèces en fonction de leurs exigences écologiques et de leur milieu de prédilection ont été classées par cortèges (25 différents) en prenant en compte au sein de ces cortèges des espèces cibles « parapluies ».

Étape 4 : mise en place d'un référentiel habitats – définition de l'intérêt des catégories d'habitats (cf. Annexe 8.1 du présent volume).

Une fois les grands types d'habitats identifiés, ils ont été définis en différentes catégories en fonction de l'état de conservation de l'habitat naturel, en lien avec ses variables écologiques dont on suppose qu'elles peuvent avoir un effet prépondérant sur la sélection de l'habitat par l'espèce ou le cortège pour tout ou partie du cycle biologique.

Étape 5 : application d'un niveau d'intérêt par catégories d'habitats d'espèces et par cortège

Chaque catégorie d'habitat (Ac, Ma, Jb, Sc, etc.) se voit appliquer un niveau d'intérêt compris entre 0 et 4 à la fois sur les sites impactés et sites de compensation pour chaque groupe et chaque cortège. La grille de qualification des niveaux d'intérêt des habitats par groupe et par cortège est présentée en annexe 8.3 du présent volume. Elle se base sur plusieurs critères qui ont permis de qualifier :

- sa fonctionnalité (habitat de reproduction, déplacement, alimentation, hivernage, migration), c'est-à-dire le rôle que joue cet habitat dans le cycle de vie d'une espèce ;
- l'état de conservation de l'habitat (dégradé, altéré, moyen, bon, optimal) et la capacité de celui-ci à assurer les fonctions suffisantes à une espèce pour lui permettre d'accomplir son cycle de vie ;
- la diversité et la densité d'espèces observées.

Étape 6 : application sur les aires d'études du projet et sur les sites de compensation

Dès lors que ces référentiels ont été construits et que les habitats d'espèces ont été caractérisés selon cette classification, les niveaux d'intérêts ont été appliqués en fonction de l'habitat identifié sur le terrain pour chaque cortège (approche déductive). Toutefois, dans la pratique, des dégradations de 1 niveau d'intérêt ont pu avoir lieu en fonction de divers paramètres (approche inductive) :

- la surface et structure de l'habitat qui sont soit :
  - ✓ trop restreinte et qui ne peut être le support des fonctionnalités et exigences écologiques des espèces du cortège ; tel que l'optimum défini dans le référentiel ;
  - ✓ trop importante entrainant une dispersion ou déplacement contrainte des espèces par rapport à des éléments structurants de leur domaine vital (ex : une prairie d'un seul tenant de plusieurs dizaines d'hectares dont le cœur de parcelle sera difficilement exploitable pour des reptiles – exposés à une prédation forte ;
  - ✓ un habitat linéaire qui ne pourrait pas jouer les mêmes fonctions qu'une disposition non linéaire.
- le contexte environnemental dans lequel s'insère l'habitat : isolement d'une pelouse au sein d'un *continuum* boisé, fragmentation et/ou barrières anthropiques… ;
- des menaces diverses pesant sur l'habitat (influence de l'agriculture intensive à proximité, dégradation du gibier…) ;
- une fréquentation humaine entraînant un dérangement… ;
- le mode de gestion actuelle de la parcelle accueillant l'habitat, entrainant des perturbations et contraignant l'installation du cortège d'espèces ou de certaines espèces (débroussaillage répété, etc.).

Étape 7 : caractérisation des impacts du projet global Cigéo et des effets des mesures compensatoires

Une fois l'identification et la cartographie des habitats d'espèces par cortège réalisées, chaque zone projet a été superposée afin d'estimer les impacts ou les gains générés au sein de ces mêmes habitats.

Les cinq grandes catégories d'effets potentiels identifiés sont les suivantes :

- la destruction/dégradation d'habitats d'espèces ;
- la destruction d'individus ;
- la perturbation d'individus ;
- la dégradation des fonctionnalités écologiques ;
- les altérations biochimiques.

Dans le cadre de l'étude, les impacts au sein d'habitats d'intérêt très faibles ou faibles (I0 ou I1) ne sont pas considérés comme notables. Ainsi, une surface affectée ne rentrera dans le calcul des pertes que si elle abrite une biodiversité dont l'intérêt est minimum moyen (I2).

La durée de l'impact sur l'habitat initial des cortèges d'espèces a été traitée de façon distincte, avec d'un côté les impacts temporaires (altération temporaire d'un habitat d'espèces avant restauration) et de l'autre les impacts permanents. Pour les impacts temporaires, les mesures de réduction vont permettre, notamment, de restituer un milieu qui n'est pas imperméable et inexploitable (ex : recréation après travaux des buissons ou friches sur la zone impactée). De fait l'impact résiduel va être limité grâce à cette mesure ; où à l'inverse un impact permanent sera irréversible et aucun habitat ne permettra à l'espèce de subvenir à ses exigences écologiques.

Dans le cadre de ce projet, le parti pris est de considérer une dette nulle lorsque les milieux impactés de manière temporaire à l'état initial, ont un niveau d'intérêt très faible (I0) à faible (I1). En effet, il est visé *a minima* une restauration des milieux avec un niveau d'intérêt égal à faible (I1) postérieurement aux travaux. Ainsi, bien qu'il y ait un impact temporaire, ces milieux faiblement qualitatifs à l'état initial et n'accueillant que peu de biodiversité ne seront pas pris en compte dans la dette en raison de leur restauration avec un niveau d'intérêt équivalent à l'état initial.

Concernant les milieux impactés de manière temporaire à l'état initial et qui ont un niveau d'intérêt *a minima* de moyen (I2), il est projeté un habitat restauré avec un niveau d'intérêt faible (I1) postérieurement aux travaux. Cela conduit à calculer une dette pour ces milieux en considérant non pas un impact temporaire mais un impact permanent puisqu'un retour à l'état initial ne sera pas possible sur ces milieux postérieurement aux travaux.

Des zones tampons sont également définies :

- pour le cortège des oiseaux de fourrés et haies en milieu ouvert : dans la zone descenderie, une zone tampon de 100 mètres est définie autour des éléments arborés (haies, fourrés…). Le niveau d'intérêt des parcelles agricoles est augmenté d'un au sein de ces zones tampon ;
- pour le cortège des amphibiens des habitats forestiers (hivernage) avec mares/étangs (reproduction) : dans la zone puits, une zone tampon de 300 mètres est définie autour des mares et cours d'eau. Le niveau d'intérêt des habitats hors zone tampon est diminué d'un.

En ce qui concerne le calcul du gain compensatoire, le décalage temporel entre l'impact effectif et la mise en œuvre des mesures de compensation doit être nul ou minimum. En outre, le délai entre la mise en œuvre des mesures de compensation et l'atteinte de leur optimum écologique, à la source de pertes intermédiaires, doit être intégré dans le dimensionnement. Les mesures de compensation sont idéalement, pleinement effectives au moment des impacts et, au plus tôt, au moment des autorisations. Conscient que certains habitats prennent du temps avant d'acquérir leur fonctionnalité pour les espèces ou cortèges cibles, il a été décidé d'appliquer un coefficient multiplicateur <1, pour tenir compte de la fonctionnalité partielle de la mesure de compensation pendant sa période de développement jusqu'à atteindre son stade de maturité. Exemple : 0,8 pour les mesures de plantation forestière.

Étape 8 : calcul quantitatif de la dette et du gain écologique

La dette et le gain de compensation sont exprimés par cortège d'espèce et par groupe. Un *distinguo* sera fait également entre les impacts permanents résiduels et les impacts temporaires résiduels.

À chaque niveau d'intérêt est associé un coefficient afin de calculer la dette et le gain écologique. Ils sont présentés dans le tableau 6-18.

Tableau 6-18 Coefficients appliqués aux zones selon leur niveau d'intérêt des habitats d'espèces

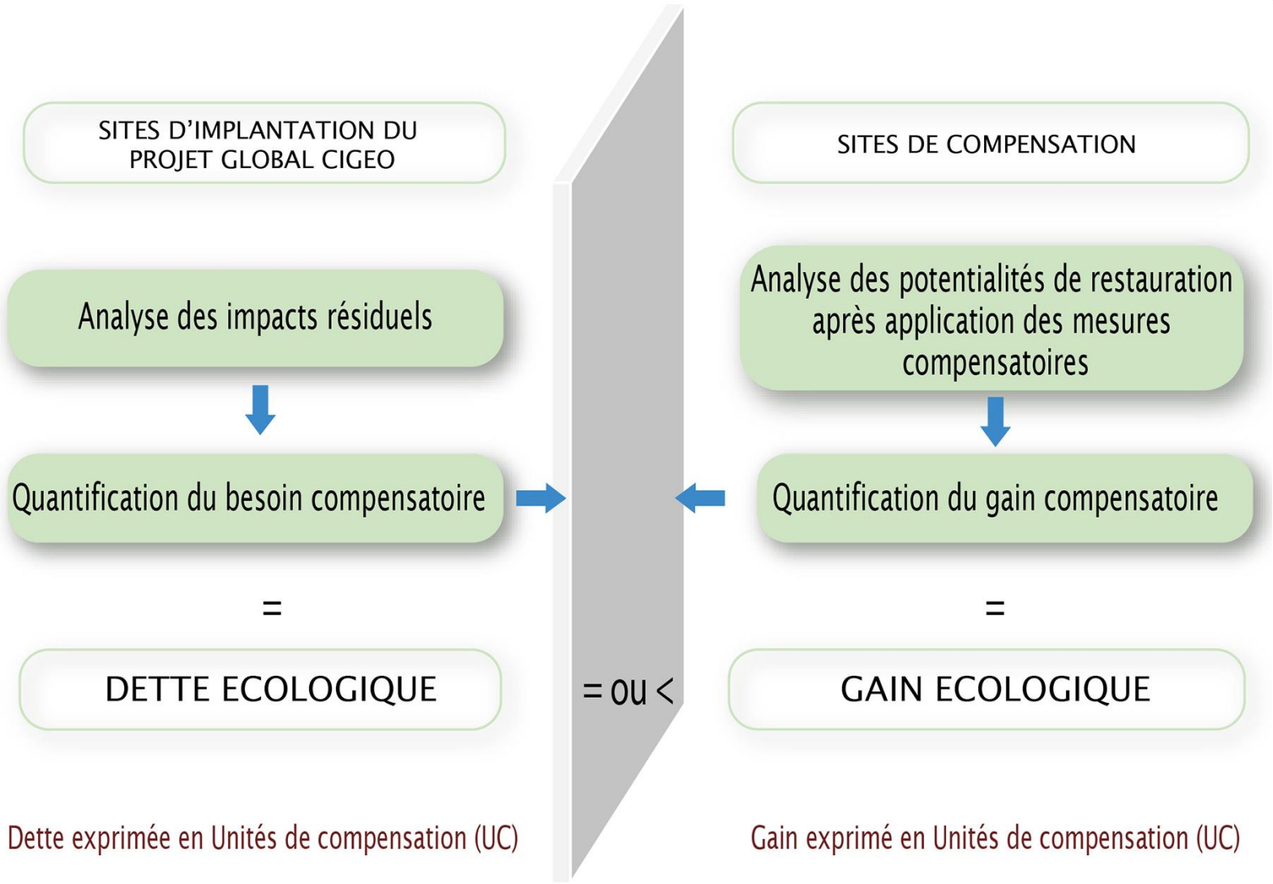
	Niveau d'intérêt	Coefficient NI
I4	Très fort	3
I3	Fort	2
I2	Moyen	1
I1	Faible	0,5
I0	Très faible	0

Formule de calcul de la dette écologique sur les emprises du projet global Cigéo

Selon la méthode d'écart de milieu couplé à un coefficient traduisant l'intérêt de l'habitat, les formules appliquées à la dette sont les suivantes :

Dette permanente résiduelle (en UC) =Σ (Surface de l'habitat x (Coefficient d'intérêt de l'habitat final – Coefficient d'intérêt de l'habitat initial))

Dette temporaire résiduelle (en UC) = Σ (Surface de l'habitat x (Coefficient d'intérêt de l'habitat final I1 – Coefficient d'intérêt de l'habitat initial))



CG-TE-D-MGE-AMOA-ESE-0000-18-0312-B

Figure 6-36 *Schéma de la méthode dite « par écart de milieux » utilisée pour le dimensionnement de la dette et du gain écologique*

La dette est calculée sur les périmètres représentés sur les figure 6-37 à figure 6-40. Les figure 6-41 et figure 6-42 localisent les zones tampons créées autour des éléments arborés dans la zone descenderie et des mares et cours d'eau dans la zone puits, respectivement pour le cortège des oiseaux de fourrés et haies en milieu ouvert et le cortège des amphibiens des habitats forestiers (hivernage) avec mares/étangs (reproduction).

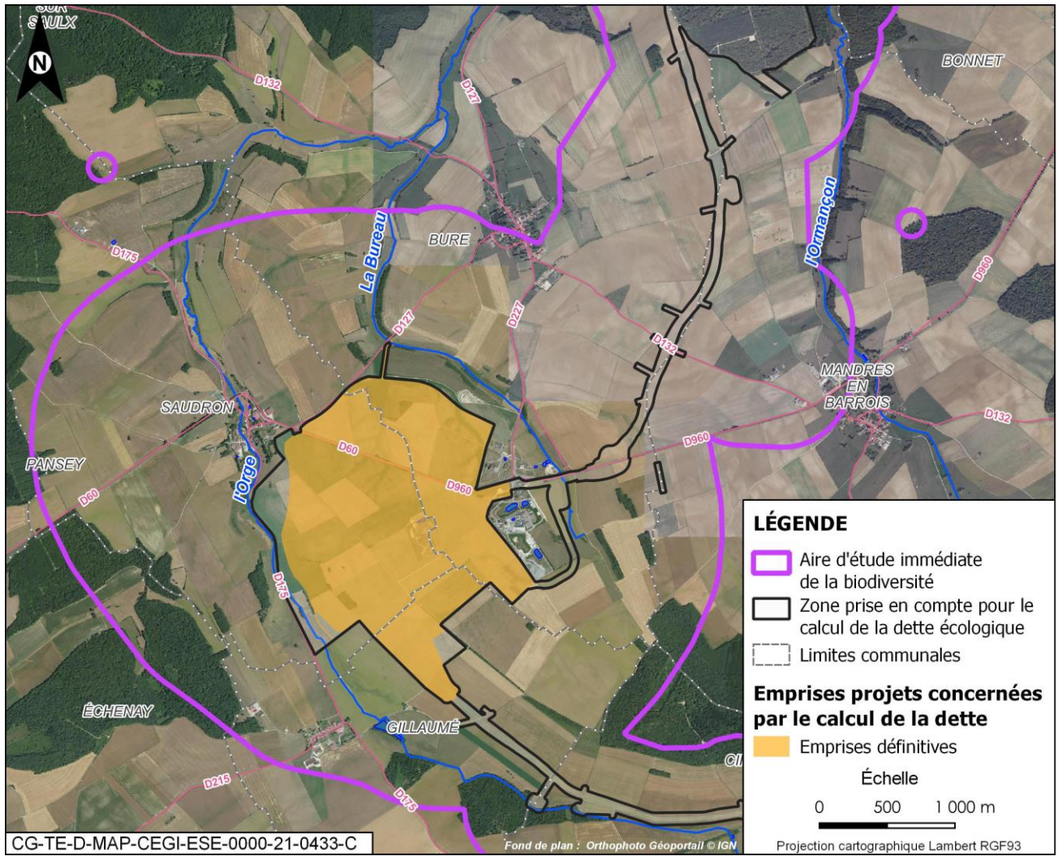


Figure 6-37 Limites des emprises pour le calcul de la dette écologique de la zone descenderie

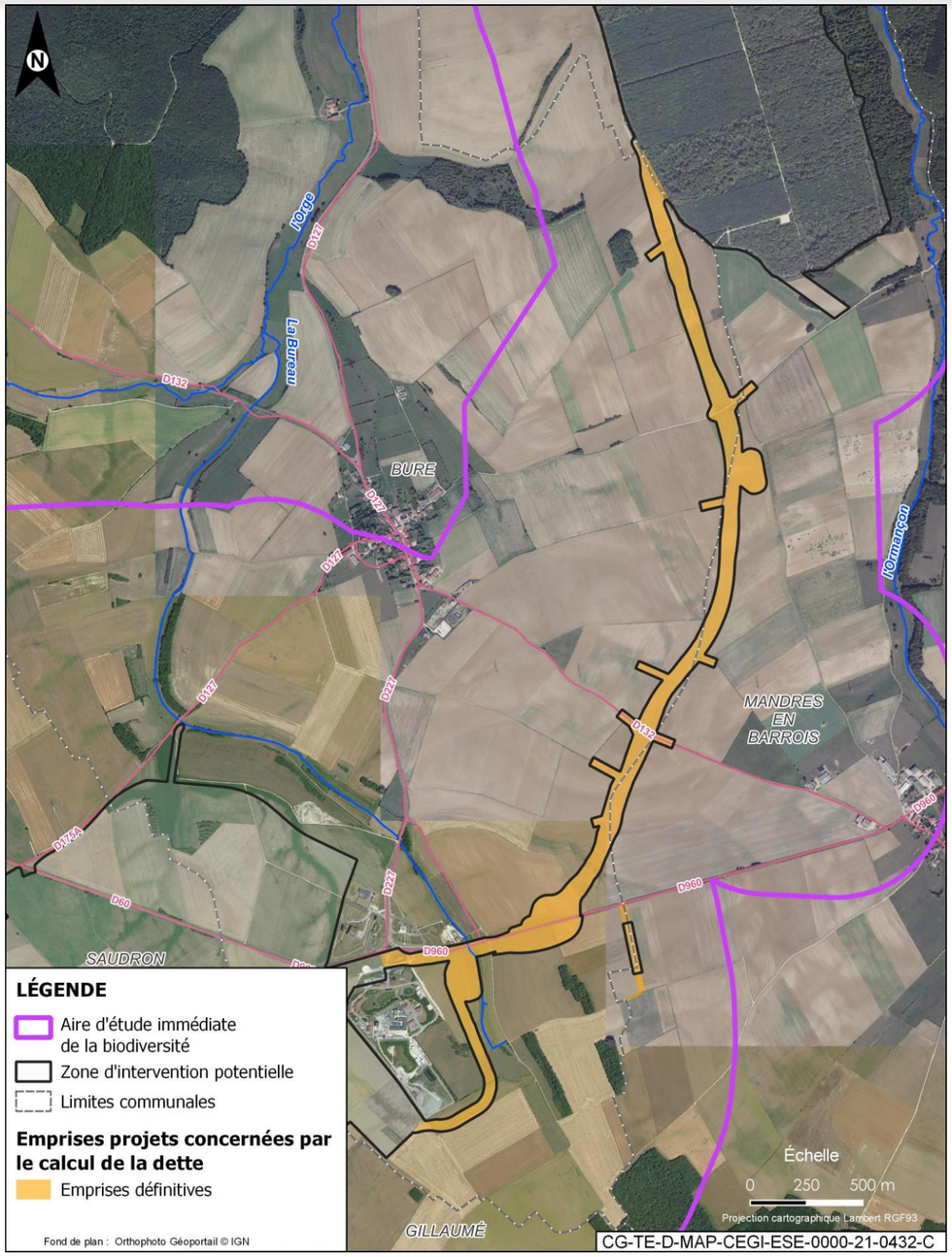


Figure 6-38 Limites des emprises pour le calcul de la dette écologique de la liaison intersites

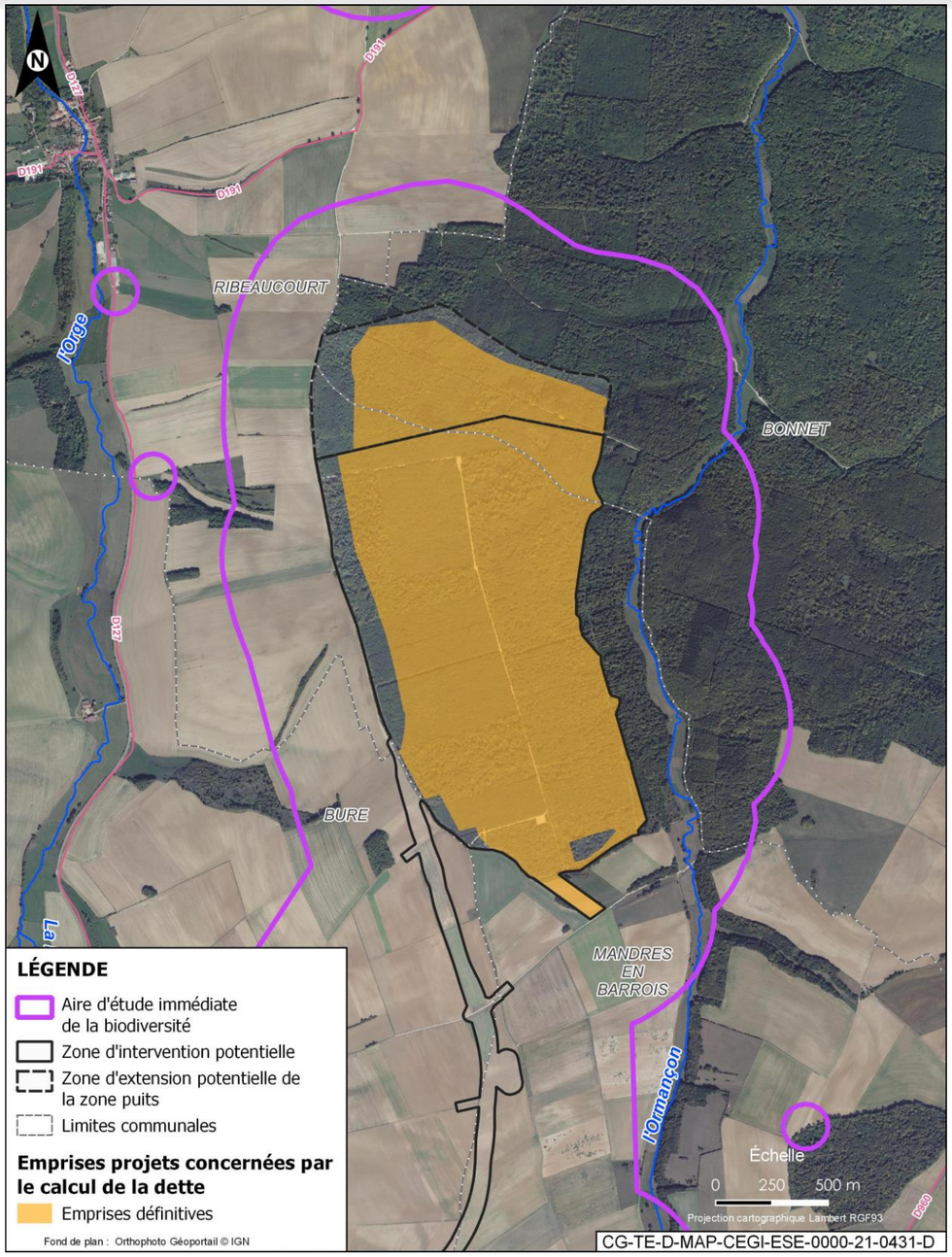


Figure 6-39 Limites des emprises pour le calcul de la dette écologique de la zone puits



Figure 6-40 Limites des emprises pour le calcul de la dette écologique de l'installation terminale embranchée

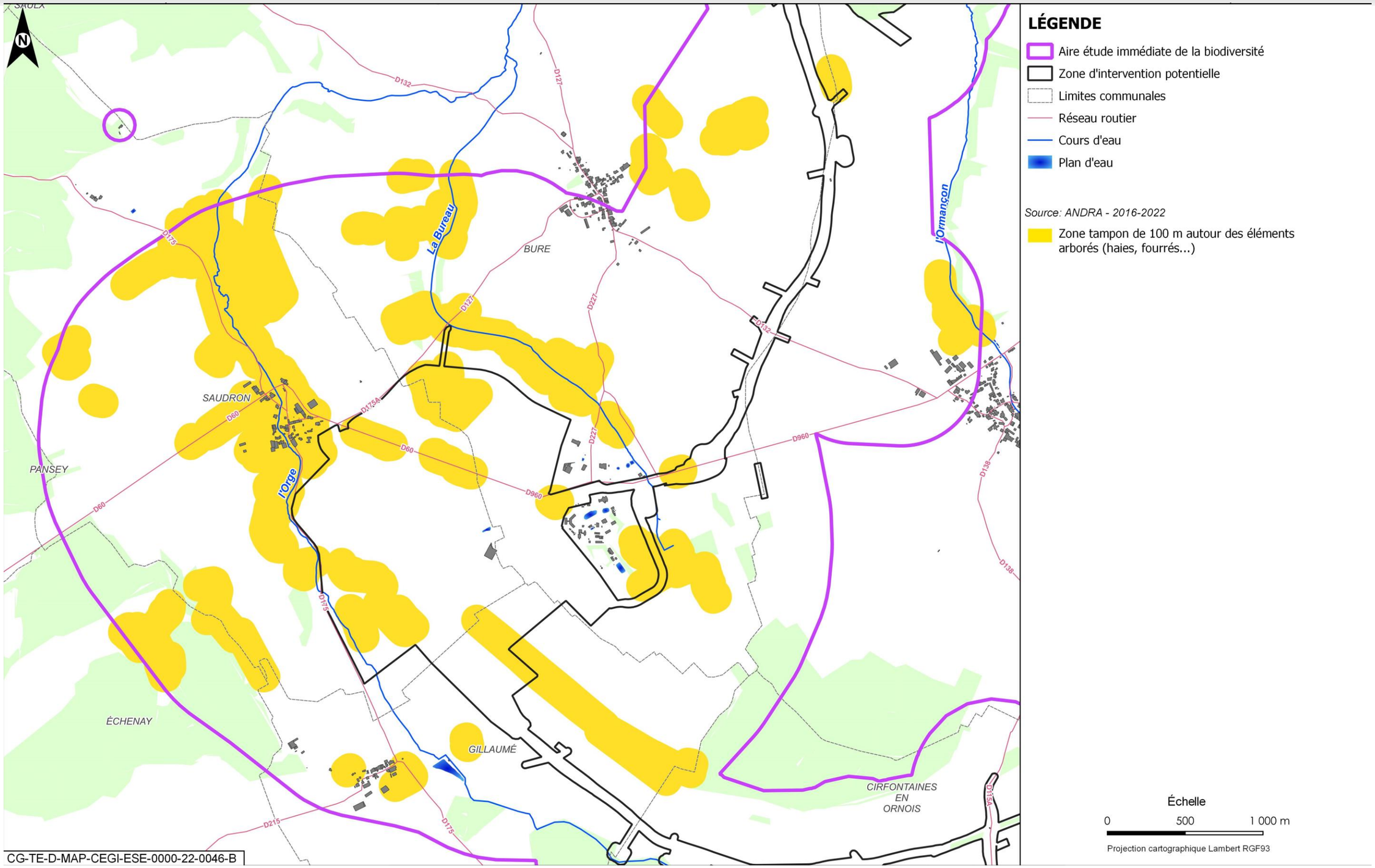


Figure 6-41 Zone tampon de 100 mètres définie autour des éléments arborés de la zone descenderie pour le cortège des oiseaux de fourrés et haies en milieu ouvert

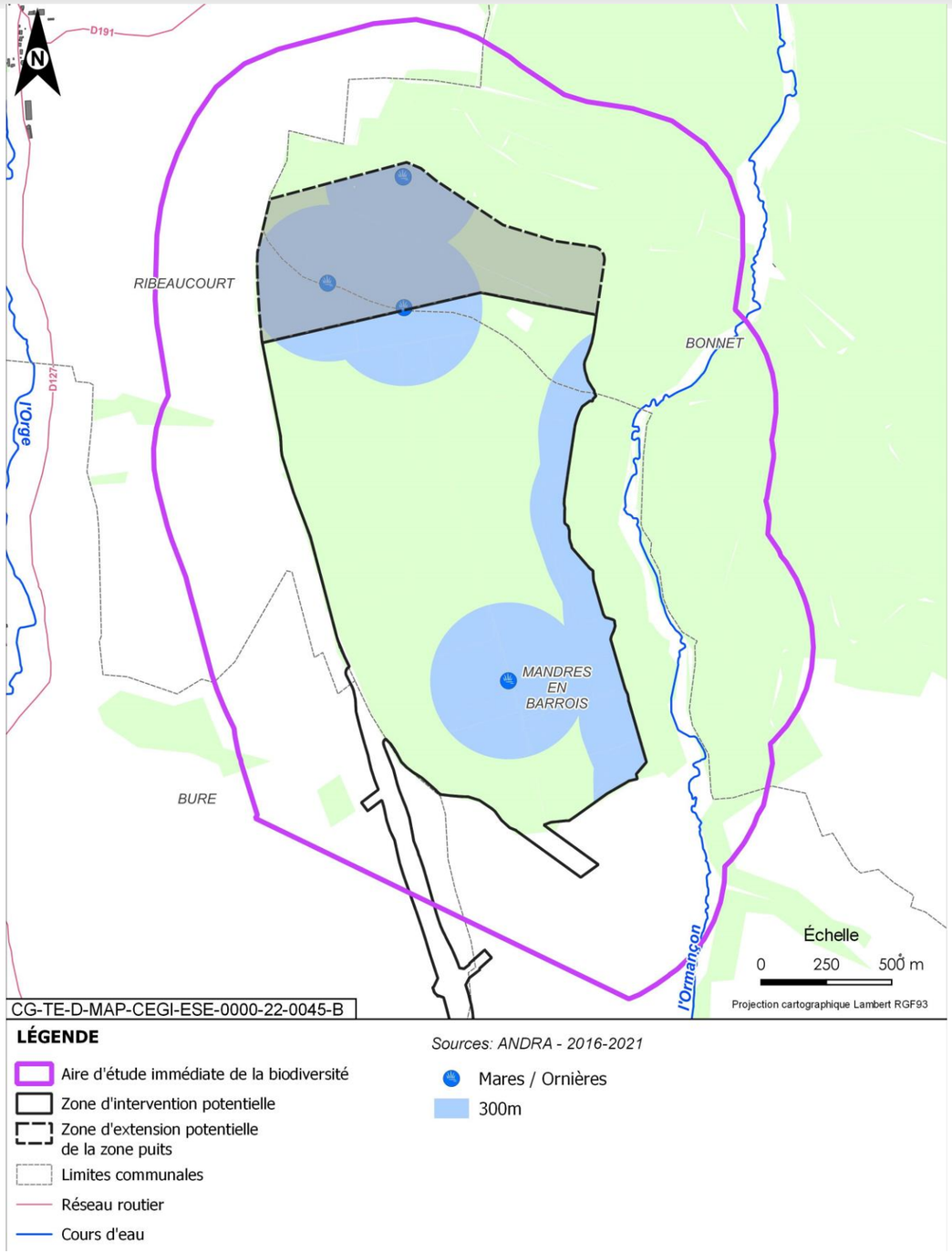


Figure 6-42 Zone tampon de 300 mètres définie autour des mares et cours d'eau dans la zone puits pour le cortège des amphibiens des habitats forestiers (hivernage) avec mares/étangs (reproduction)

6.4 Évaluation des incidences sur les sites Natura 2000

La réglementation prévoit que les projets soumis à évaluation environnementale, ce qui est le cas du projet global Cigéo, doivent faire l'objet d'une évaluation des incidences sur les sites Natura 2000.

L'article R. 414-23 du code de l'environnement précise que l'évaluation est proportionnée à l'importance du document ou de l'opération et aux enjeux de conservation des habitats et des espèces en présence.

Le recensement des sites Natura 2000 s'appuie sur les données administratives concernant les milieux naturels et le patrimoine écologique. Les sites institutionnels suivants ont été consultés :

- les sites des DREAL de Lorraine et Champagne-Ardenne, à présent regroupées en DREAL Grand Est ;
- le site de l'INPN (Inventaire national du patrimoine naturel) pour la consultation des fiches descriptives des différents sites (FDS)[39].

Les données techniques (état initial, gestion, données cartographiques) proviennent de la consultation des documents d'objectifs disponibles auprès des opérateurs de chaque site Natura 2000.

6.4.1 Méthode de traitement et d'analyse des données

L'évaluation des incidences sur les sites Natura 2000 porte spécifiquement sur le patrimoine naturel d'intérêt européen à l'origine de la désignation des sites, c'est-à-dire les espèces et habitats inscrits dans le FSD (formulaire standard de données) et/ou dans l'arrêté ministériel de désignation du site (ZSC ou ZPS) et/ou dans le diagnostic écologique validé du DOCOB.

Dans la présente analyse, il est tenu compte à la fois des espèces/habitats du FSD en ligne sur le site de l'INPN (données officielles transmises à la Commission européenne, à prendre en compte du point de vue réglementaire) et des données du DOCOB.

L'analyse est basée sur les inventaires réalisés dans le cadre de l'évaluation environnementale des incidences du projet global Cigéo pour le milieu naturel (cf. Volume IV de la présente étude d'impact). L'évaluation des incidences Natura 2000 n'a pas donné lieu à des inventaires spécifiques.

En région Grand Est et pour les départements concernés par le projet global Cigéo, les FSD ont été actualisés en février 2020, alors que la plupart des DOCOB ont été rédigés entre 2000 et 2016, contenant de ce fait des informations moins récentes sur les espèces ayant servi à la désignation des sites que les FSD (certaines espèces mentionnées dans les dernières versions des FSD ne figurent par exemple pas dans les DOCOB).

La présente étude prend en considération les incidences induites par la réalisation des différentes opérations et les différentes phases (phase chantier, phase d'exploitation, phase de démantèlement) composant le projet global Cigéo.

Enfin, pour quantifier les incidences, l'analyse s'est fondée sur une comparaison entre les surfaces d'habitats impactées par le projet au regard des surfaces disponibles à l'échelle du/des site(s) Natura 2000, ainsi que sur l'état de conservation et les dynamiques de populations d'espèces. Ainsi, le caractère significatif des incidences est évalué à l'échelle du/des site(s) Natura 2000.

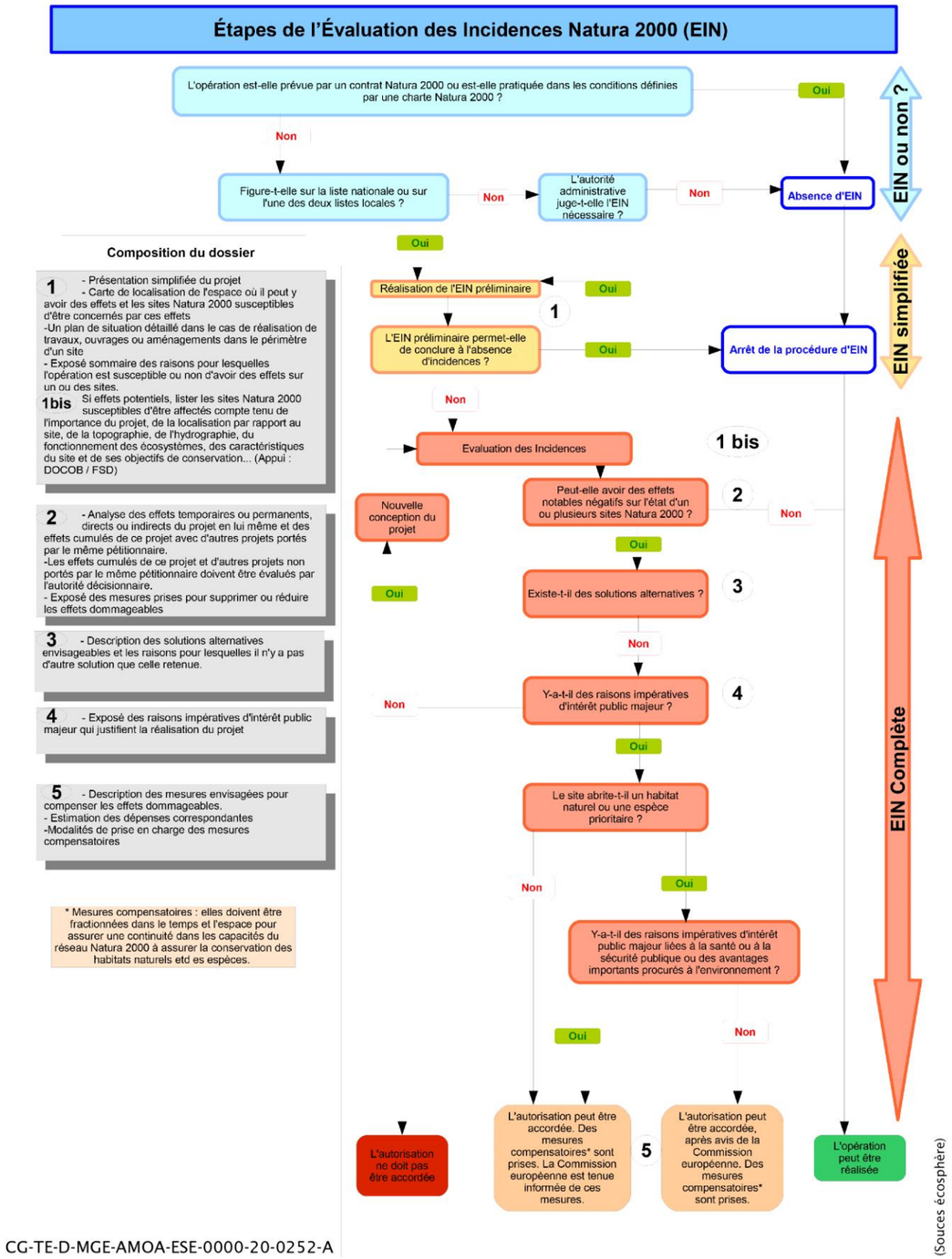


Figure 6-43 Étapes de l'évaluation des incidences Natura 2000

[39] https://inpn.mnhn.fr/accueil/index.

Conformément aux attentes de la DREAL Grand Est, la réflexion menée pour la rédaction du présent dossier d'évaluation des incidences est détaillée dans le logigramme de la figure 6-43 (source : « Étapes de l'évaluation des incidences Natura 2000 (EIN) » (193)).

6.4.2 Définition des zones d'études

Les objectifs de l'étude des incidences Natura 2000 ne sont pas les mêmes que ceux de l'étude d'impact. L'étude d'impact identifie les effets (directs ou indirects) du projet sur l'ensemble des espèces et habitats présents dans ou à proximité du projet.

L'étude des incidences sur les sites Natura 2000 analyse les effets du projet uniquement sur les espèces et habitats d'intérêt communautaire ayant justifié la désignation des sites. Elle doit vérifier si des interactions sont possibles entre les espèces et habitats ayant justifié la désignation des sites et le projet et que le projet est compatible avec les objectifs de conservation des sites Natura 2000.

6.4.2.1 Définition de l'aire d'étude immédiate

L'aire d'étude immédiate, telle que définie dans le volume III, correspond à l'aire d'étude centrée sur la zone impactée par la réalisation des travaux de construction des installations du projet global Cigéo (à l'exception des opérations sur la ligne 400 kV et de l'expédition et du transport des colis traités spécifiquement), augmentée d'une zone de 500 mètres de part et d'autre. Elle inclut donc le périmètre opérationnel en phase travaux et en phase fonctionnement.

Cette aire d'étude est utilisée pour caractériser l'état initial du milieu naturel et permet d'acquérir une connaissance détaillée du milieu (habitats naturels, faune, flore), d'en apprécier la biodiversité et d'évaluer les effets positifs ou négatifs éventuels.

6.4.2.2 Critères retenus pour la définition des zones d'influence ou aire d'étude élargie

La zone d'influence correspond à l'espace dans lequel les effets du projet sont potentiellement perceptibles, qu'il s'agisse d'effets directs (au niveau de l'emprise du projet) ou d'effets indirects.

La zone d'influence est fonction de la nature du projet et des milieux naturels environnants. Les incidences d'un projet sur son environnement peuvent être plus ou moins étendues (poussières, bruit, rejets dans le milieu aquatique...).

L'évaluation identifie s'il existe des liens fonctionnels entre les espèces ou les habitats ayant justifié la désignation des sites Natura 2000 et le projet global Cigéo, et si l'altération et/ou la suppression de tels liens peut porter atteinte au maintien ou au rétablissement du bon état de conservation des habitats et des espèces qui ont justifié leur classement.

Concernant le projet global Cigéo, et afin de s'assurer d'une prise en compte exhaustive des enjeux potentiels, cette étude s'est référée aux exigences les plus fortes actuellement en vigueur pour évaluer cette zone d'influence. Ainsi, nous avons retenu les critères utilisés pour les études des projets éoliens qui sont connus pour impacter particulièrement les oiseaux et les chauves-souris (espèces à domaine vital important).

6.4.2.2.1 Zone d'influence du centre de stockage Cigéo

Le centre de stockage Cigéo a été conçu afin d'éviter les sites Natura 2000. Ce dernier n'intercepte directement aucun site Natura 2000.

En première approche, plusieurs effets du centre de stockage Cigéo sont susceptibles d'affecter les sites Natura 2000 plus ou moins éloignés : impacts associés à des rejets liquides, à des émissions de poussières, à des rejets gazeux, au bruit et aux vibrations, à une pollution lumineuse, à la destruction ou l'altération d'habitats et de ressources utilisées par les espèces animales d'intérêt communautaire.

À ce titre, la zone d'influence du centre de stockage Cigéo sur les sites Natura 2000 voisins a été déterminée selon les critères suivants :

- les sites Natura 2000 dont la désignation est justifiée par la présence de chiroptères ou d'oiseaux d'intérêt communautaire, dans un rayon de 30 km du centre de stockage Cigéo. Cette distance est justifiée par les capacités maximales de déplacements quotidiens des individus entre leur gîte et leur zone de chasse (cf. Chapitre 2 du volume V de la présente étude d'impact) ;
- les sites Natura 2000 localisés dans le même bassin topographique que le centre de stockage Cigéo et en aval hydraulique par rapport aux installations et aux rejets liquides locaux (vers les cours d'eau de l'Orge, de la Bureau et de l'Ormançon) ;
- les sites Natura 2000 potentiellement impactés par des pollutions temporaires ou permanentes lors des phases chantier ou exploitation (rejet de gaz, émissions de poussières, bruit, vibration ou pollution lumineuse).

6.4.2.2.2 Zone d'influence des opérations des autres maîtres d'ouvrage

Pour les opérations des autres maîtres d'ouvrage nécessaires au fonctionnement du centre de stockage Cigéo :

RTE

- neuf pylônes de la ligne 400 kV sous la maîtrise d'ouvrage de RTE, sur lesquels des travaux seront réalisés, sont implantés dans des sites Natura 2000. Concernant la ligne 400 kV, le linéaire est déjà existant, ainsi le paysage actuel ne sera pas modifié par les travaux. Les milieux naturels ont été analysés sur une aire d'étude de 500 mètres de part et d'autre de la ligne soit une zone d'influence de 1 km de large ;
- pour le poste de transformation RTE et son raccordement, les effets seront de moindre ampleur que ceux du centre de stockage Cigéo. Compte tenu de la localisation de cette opération interconnectée avec le centre de stockage et de sa surface par rapport à ce dernier, la zone d'influence considérée est incluse dans celle du centre de stockage Cigéo précisée au chapitre précédent.

Conseil départemental 52

- pour la déviation de la route départementale D60/960, les effets seront de moindre ampleur que ceux du centre de stockage. Compte tenu de la localisation de cette opération interconnectée avec le centre de stockage et de la surface nécessaire par rapport à ce dernier, la zone d'influence considérée est incluse dans celle du centre de stockage Cigéo précisée au chapitre précédent.

SNCF Réseau

- la zone d'influence choisie pour la réhabilitation de la ligne ferroviaire 027000 dont le tracé n'intercepte pas directement de sites Natura 2000, est de **5** km centré sur la voie ferrée. Ce linéaire est déjà existant et il est régulièrement entretenu. Ainsi le paysage actuel ne sera pas modifié par la remise en état de ce linéaire et l'incidence pour les espèces à grands déplacements réguliers (supérieurs à 5 km) est considéré comme très faible.

Syndicats de gestion des eaux d'Échenay et du Haut-Ornain

- la zone d'influence sera à préciser pour l'opération d'adduction d'eau potable du projet global Cigéo. Ces travaux de faibles ampleurs n'auront que des effets temporaires et seront réalisés à l'écart des emprises des sites Natura 2000. Toutefois, cette zone d'influence est incluse dans l'aire d'influence de l'ensemble du projet global Cigéo. Les procédures liées aux autorisations de ces opérations d'adduction d'eau potable feront l'objet d'évaluations environnementales qui actualiseront la présente étude le cas échéant.

6.4.3 Évaluation préliminaire : sites Natura 2000 susceptibles d'être affectés

29 sites Natura 2000 localisés dans la zone d'influence (rayon de 30 km du centre de stockage) du projet global Cigéo ont été identifiés comme susceptibles d'être affectés. Pour chaque site, il est identifié si celui-ci abrite des chauves-souris ou des oiseaux d'intérêt communautaire ayant permis la désignation du site et s'il se trouve en aval hydraulique par rapport au centre de stockage Cigéo (cf. Chapitre ci-dessous).

Pour chaque site Natura 2000 retenu pour l'évaluation préliminaire, les données reprises sont extraites du FSD et du DOCOB. Pour rappel, en région Grand Est et pour les départements concernés par le projet global Cigéo, les FSD ont été actualisés en février 2020, pour transmission à la Commission européenne ; alors que la plupart des DOCOB ont été rédigés lors de la désignation des sites ou quelques temps après, entre 2000 et 2016, contenant de ce fait des informations moins récentes que les FSD.

Conformément aux exigences des réglementations nationales et européennes, les éléments pris en compte pour l'évaluation des incidences sont les éléments de connaissances les plus récents. En conséquence, concernant les espèces ayant servi à la désignation des sites, ce sont les FSD qui font foi.

Pour chaque site, sont indiqués :

- les habitats ayant justifié la désignation du site ;
- les espèces ayant justifié la désignation du site, avec leur statut (résidence, reproduction, concentration, hivernage ou hibernation) ;
- les objectifs de gestion et de conservation du site.

En première approche, le projet global Cigéo est donc susceptible d'affecter de manière significative 14 sites Natura 2000. À ce titre, une évaluation plus précise des incidences du projet global Cigéo doit être réalisée en application de l'article R. 414-23, III, du code de l'environnement.

6.4.4 Évaluation détaillée des sites Natura 2000 retenus

6.4.4.1 Méthodologie d'évaluation des incidences Natura 2000

L'évaluation des incidences Natura 2000 porte sur les habitats et les espèces d'intérêt communautaire ayant justifié la désignation des sites Natura 2000 présents dans la zone d'influence du projet global Cigéo.

Dans le cadre du projet global Cigéo, l'Andra et les autres maîtres d'ouvrage se sont engagés dans le cadre du développement du projet à l'élaboration d'un panel de mesures, afin d'éviter et de réduire l'impact du projet global Cigéo sur le milieu naturel (cf. Volume IV de la présente étude d'impact).

Ces mesures s'appliquent également aux habitats et aux espèces d'intérêt communautaire et permettent d'évaluer si le projet remet en cause ou non le bon état de conservation des habitats et espèces ayant permis la désignation des sites Natura 2000, après application de ces mesures.

6.4.4.2 Analyse des effets et incidences du projet sur la faune, la flore et les habitats

Tout projet d'aménagement peut engendrer des impacts plus ou moins importants sur les milieux naturels, et sur les espèces qui leur sont associées. Globalement, la nature des incidences peut être classée comme suit :

- **incidence directe :** incidence directement attribuable aux travaux et aménagements projetés ;
- **incidence indirecte :** incidence différée dans le temps ou dans l'espace, attribuable à la réalisation des travaux et aménagements ;
- **incidence temporaire :** incidence liée à la phase de réalisation des travaux, nuisances de chantier, notamment la circulation de navires, bruit, vibrations, turbidité, odeurs. L'incidence temporaire s'atténue progressivement jusqu'à disparaître ;
- **incidence permanente :** incidence qui ne s'atténue pas d'elle-même avec le temps. Une incidence permanente est dite réversible si la cessation de l'activité la générant suffit à la supprimer.

L'importance de l'incidence est évaluée, en cohérence avec les méthodologies développées pour l'évaluation des incidences sur les milieux naturels (cf. Chapitre 6.2.2 du présent volume) selon cinq niveaux de gradation :

- **incidence très faible :** incidence suffisamment faible pour que l'on puisse considérer que le projet n'a pas d'incidence ;
- **incidence faible** : incidence dont l'importance ne justifie pas de mesure environnementale réductrice ;
- **incidence modérée** : incidence dont l'importance peut justifier une mesure environnementale réductrice ou compensatoire ;
- **incidence forte** : incidence dont l'importance justifie une mesure environnementale réductrice ou compensatoire ;
- **incidence très forte :** incidence dont l'importance justifie une mesure environnementale compensatoire du fait d'une destruction ou dégradation très importante d'habitats ou d'espèces à enjeu fort à très fort, qui remet en cause le cycle biologique d'une espèce et/ ou de l'état de conservation de son habitat.

6.4.4.3 La description des mesures

S'il résulte des étapes précédentes que le projet est toujours susceptible d'avoir des effets significatifs dommageables, sur l'état de conservation des habitats naturels et des espèces qui ont justifié la désignation d'un ou des sites, il est présenté pour chaque site des mesures d'atténuation ou de suppression :

- si les mesures complémentaires envisagées permettent alors de conclure à l'absence d'atteinte significative aux objectifs de conservation, l'évaluation est terminée ;
- si les mesures complémentaires envisagées ne permettent pas de conclure à l'absence d'atteinte significative aux objectifs de conservation, l'évaluation doit être approfondie.

Lorsque, malgré les mesures précédentes des effets significatifs dommageables subsistent, le dossier d'évaluation devra exposer en outre :

- la description des solutions alternatives envisageables, des raisons pour lesquelles il n'existe pas d'autre solution que celle retenue et des éléments qui permettent de justifier la réalisation du projet ;
- la description des mesures envisagées pour compenser les effets dommageables, que les mesures prises ne peuvent supprimer. Si présentes, les mesures compensatoires doivent permettre une compensation efficace et proportionnée au regard de l'atteinte portée aux objectifs de conservation du ou des sites Natura 2000 concernés et du maintien de la cohérence globale du réseau Natura 2000. Ces mesures sont mises en place selon un calendrier permettant d'assurer une continuité dans les capacités du réseau Natura 2000 à assurer la conservation des habitats naturels et des espèces ;
- l'estimation des dépenses correspondantes (développées dans le volume IV de la présente étude d'impact).

6.4.5 Cumul des incidences du projet global Cigéo avec d'autres projets existants ou approuvés

Ce chapitre répond à l'objectif fixé à l'article R. 122-5, 11, 5° e) du code de l'environnement, qui prévoit que l'étude d'impact analyse le cumul des incidences du projet avec d'autres projets existants ou approuvés (projets réalisés ou ayant fait l'objet d'une décision leur permettant d'être réalisés lors du dépôt du dossier de demande). Sont compris, en outre, les projets ayant fait l'objet :

- d'une étude d'incidence environnementale au titre de l'article R. 181-14 et d'une consultation du public ;
- d'une évaluation environnementale au titre du code de l'environnement et pour lesquels un avis de l'Autorité environnementale a été rendu public.

La notion de cumul des incidences se réfère à la possibilité que les impacts temporaires ou permanents occasionnés par le projet global Cigéo s'ajoutent à ceux d'autres projets existants ou approuvés dans le même secteur ou à proximité de celui-ci, engendrant ainsi des effets de plus grande ampleur sur le site.

L'évaluation du cumul des incidences porte sur un certain nombre de composantes environnementales correspondant aux préoccupations majeures identifiées dans le cadre de l'analyse environnementale.

La méthode pour l'évaluation du cumul des incidences du projet global Cigéo avec d'autres projets existants ou approuvés est présentée en détail au chapitre 16.2 du présent volume.

TABLEAU DE TRAÇABILITÉ DES PRINCIPALES ÉVOLUTIONS DE L'ÉTUDE D'IMPACT

Le tableau suivant présente une synthèse des principales évolutions de l'étude d'impact, avec selon les colonnes :

- précisions sur les caractéristiques techniques : les précisions que les maîtres d'ouvrage apportent aux caractéristiques détaillées des opérations composant le projet global liées à des précisions ou aux évolutions de la conception notamment en lien avec les procédures de participation du public ;
- évolution de l'état initial : l'évolution de l'état initial de l'environnement en lien avec la date de dépôt de l'étude d'impact ;
- évolution réglementaire : les évolutions réglementaires ;
- précision demandée lors de l'instruction du dossier : précisions que les maîtres d'ouvrage apportent aux caractéristiques détaillées des opérations composant le projet global liées aux réponses apportées aux remarques émises par les services instructeurs lors de l'instruction de la précédente étude d'impact.

La colonne « Actualisation concernée » précise si les évolutions apportées sont liées à la première actualisation de l'étude d'impact (EI-DAC) dans le cadre de la demande de création de l'INB Cigéo et/ou sont liées à la deuxième actualisation de l'étude d'impact (EI-DR0) dans le cadre des premières opérations de caractérisation et de surveillance environnementale.

Chapitre EI DAC déposé		Précisions sur les caractéristiques techniques	Évolution de l'état initial	Évolution-réglementaire	Précision demandée lors de l'instruction du dossier	Actualisation concernée	Précisions sur les évolutions apportées au contenu du volume VII de l'EI-DAC2 déposée EI-DAC1 = étude d'impact de la demande de création de l'INB Cigéo déposée en 2023 EI-DR0 = étude d'impact des dossiers de la tranche de travaux DR0 EI-DAC2 = étude d'impact associée aux consultations réglementaires de la DAC, déposée en 2025
	Général				X	**EI-DAC1**	Actualisation réglementaire avec le décret n° 2021-837 du 29 juin 2021 (194) portant diverses réformes en matière d'évaluation environnementale et de participation du public dans le domaine de l'environnement (remplacement du terme « état actuel » par « état initial »)
	Préambule	X				**EI-DAC1/EI-DR0/EI-DAC2**	Actualisation du tableau des volumes de l'étude d'impact Précisions apportées dans la rédaction du bloc « Étude d'impact et projet global Cigéo »
1.1.1	**Des niveaux d'études adaptées à l'avancement de la conception et des concertations préalables de chaque opération du projet global Cigéo**	X				**EI-DAC1/EI-DR0**	Actualisation de l'état d'avancement des différentes opérations du projet global Cigéo (dont le tableau)
1.1.3.1.2	**Appréciation du niveau d'incidence**	X				**EI-DAC1**	Précisions apportées sur les éléments d'appréciation du niveau d'incidence Mise à jour du tableau des éléments d'appréciation du niveau d'incidence (grille indicative d'évaluation
1.1.3.2.1	**Définition des mesures selon la séquence éviter/réduire/compenser les incidences**	X				**EI-DAC1/EI-DR0**	Précisions apportées sur le traitement des incidences et mesures en introduction Précisions apportées sur la présentation des mesures ERC Explications apportées sur la codification des mesures et la notion de mesure mère/mesure fille Précisions apportées sur le traitement des mesures en lien avec un dossier d'autorisation environnemental
1.1.3.2.2	**Démarche d'analyse selon la séquence ERC**	X				**EI-DAC1**	Précisions apportées sur la démarche d'analyse des incidences potentielles et sur la présentation des synthèses des mesures mises en œuvre par thématique
1.1.3.3	**Évaluation des incidences et mesures spécifiques à une tranche de travaux**	X				**EI-DR0**	Ajout de ce paragraphe pour expliquer l'approche proposée par tranche de travaux

Chapitre EI DAC déposé		Précisions sur les caractéristiques techniques	Évolution de l'état initial	Évolution-réglementaire	Précision demandée lors de l'instruction du dossier	Actualisation concernée	Précisions sur les évolutions apportées au contenu du volume VII de l'EI-DAC2 déposée EI-DAC1 = étude d'impact de la demande de création de l'INB Cigéo déposée en 2023 EI-DR0 = étude d'impact des dossiers de la tranche de travaux DR0 EI-DAC2 = étude d'impact associée aux consultations réglementaires de la DAC, déposée en 2025
1.2.1	Typologie des aires d'étude	X	X			EI-DR0	Des précisions apportées sur l'aire d'étude immédiate et aire d'étude éloignée (sur notion d'aire d'étude étendue) Ajout d'un bloc explicatif sur l'évolution des aires d'étude
1.2.2.1	Définition des aires d'étude des facteurs relatifs au milieu physique : atmosphère, sols, sous-sols, eaux				X	EI-DAC1/EI-DR0	Actualisation de l'aire d'étude éloignée de la thématique « Eaux » pour prendre en compte la recommandation de l'Autorité environnementale sur l'Étude d'impact de la déclaration d'utilité publique (DUP) du projet global Cigéo Actualisation du tableau de définition des aires d'étude du milieu physique avec ces modifications Explication de la superposition des aires d'étude. Actualisation de la carte. Précision apportée dans le tableau concernant l'aire d'étude rapprochée non utilisée pour la thématique eau Redéfinition en deux sous-chapitres : • "La définition de l'étendue de l'aire d'étude éloignée" => reformulation compte tenu du regroupement de tout dans l'aire du milieu physique sans distinction de l'eau • "Les différentes aires du milieu physique"
1.2.2.2	Définition des aires d'étude du facteur biodiversité et milieu naturel	X	X			EI-DR0	Modification des aires d'études : ajustement texte, tableau et carte
1.2.2.3	1.2.2.4 Définition des aires d'étude des facteurs relatifs au milieu humain		X			EI-DR0	Explication de la superposition des aires d'étude. Précisions apportées sur l'aire d'étude de 20 km (tableau) Mise à jour de la carte
1.2.2.4	Définition des aires d'étude du facteur activités agricoles et sylvicoles		X			EI-DR0	Nouvelles définitions apportées aux aires d'études et clarification des noms Mise à jour de la carte
1.2.2.5	Définition des aires d'étude pour le paysage, le patrimoine culturel, le tourisme et les activités de loisirs	X				EI-DAC1/EI-DR0	Précisions apportées sur la définition et la cartographie des aires d'étude relatives du paysage Mise à jour de la carte
1.2.2.6	Définition des aires d'étude pour les interactions	X				EI-DAC1/EI-DR0	Précisions apportées sur la définition et la cartographie des aires d'étude relatives aux interactions Actualisation du tableau de définition
1.3	Traçabilité	X				EI-DR0/EI-DAC2	Ajout de ce paragraphe issu du volume I pour présenter la méthode de traçabilité
2.2.1 2.2.1.1 2.2.1.2. 2.2.1.3	État initial La station météorologique de Saint-Dizier La station météorologique et atmosphérique d'Houdelaincourt La station météorologique de Cirfontaines-en-Ornois	X				EI-DAC1	Actualisation des périodes analysées pour caractériser l'état initial relatif aux conditions météorologiques

Chapitre EI DAC déposé		Précisions sur les caractéristiques techniques	Évolution de l'état initial	Évolution-réglementaire	Précision demandée lors de l'instruction du dossier	Actualisation concernée	Précisions sur les évolutions apportées au contenu du volume VII de l'EI-DAC2 déposée EI-DAC1 = étude d'impact de la demande de création de l'INB Cigéo déposée en 2023 EI-DR0 = étude d'impact des dossiers de la tranche de travaux DR0 EI-DAC2 = étude d'impact associée aux consultations réglementaires de la DAC, déposée en 2025
2.2.1.4	Risques météorologiques majeurs		X			EI-DR0	Ajout d'un paragraphe sur les risques météorologiques
2.2.2	Incidences	X				EI-DAC1	Ajout d'un chapitre sur la méthode utilisée pour évaluer les incidences du projet global Cigéo sur les conditions météorologiques
2.3	Vulnérabilité au changement climatique	X				EI-DAC1/EI-DR0	Ajout d'un chapitre sur la méthode utilisée pour caractériser l'état initial et évaluer la vulnérabilité du projet global Cigéo changement climatique
2.4	Energie et gaz à effet de serre		X			EI-DR0	Mise à jour des données source
2.4.1	État initial	X				EI-DAC1	Actualisation des périodes analysées pour caractériser l'état initial relatif à l'énergie et les gaz à effet de serre
2.4.2	Incidences	X				EI-DR0	Détail méthodologique apporté Compléments : 2.4.2.1 Définition d'un scénario de référence et champ d'application 2.4.2.2 Hypothèses générales 2.4.2.4 Immobilisation 2.4.2.4 Incertitudes
2.5.1.1	État initial	X				EI-DAC1/EI-DR0/EI-DAC2	Actualisation des références des documents sources pour caractériser l'état initial relatif à la qualité de l'air Mise à jour des références des méthodes appliquées
2.5.1.2	Incidences	X		X	X	EI-DAC1/EI-DR0/ EI-DAC2	Cette version prend en compte les remarques de l'Autorité environnementale dans le cadre de l'instruction de l'étude d'impact du DR0 (mise à jour des VLEP, des sources d'émission et des données météorologiques).
2.5.1.2.2	Substances et hypothèses retenues pour la modélisation	X				EI-DAC1/EI-DR0/EI-DAC2	Précisions apportées sur les hypothèses retenues pour la modélisation Ajout de précisions sur la modélisation de dispersion atmosphérique des émissions conventionnelles et notamment la cartographie, avec le rapport ARIA 2020. Ajout de cartes représentant les sources d'émissions. Mise à jour des hypothèses retenues avec les études d'ARIA ; ajout de la pollution de fond et du bilan des émissions Complément apporté sur l'année 2020 sur la pollution de fond ou bruit de fond
2.5.1.2.4	Substances non retenues	X				EI-DAC1/EI-DAC2	Précisions et justifications apportées sur les substances non retenues dans la modélisation
2.5.2	Émissions radioactives	X				EI-DAC1/EI-DR0/EI-DAC2	Déplacement des chapitres 17.1.1 et 17.1.2 de l'EI-DUP au sein du chapitre 2.5.2 de l'EI-DAC afin de regrouper les éléments sur la thématique radiologie au sein d'un seul chapitre Ajout d'éléments issus des chapitres radiologie du chapitre 17 volume VII EI-DUP (17.2.3.1) afin de regrouper les éléments sur la thématique radiologie au sein d'un seul chapitre

Chapitre EI DAC déposé		Précisions sur les caractéristiques techniques	Évolution de l'état initial	Évolution-réglementaire	Précision demandée lors de l'instruction du dossier	Actualisation concernée	Précisions sur les évolutions apportées au contenu du volume VII de l'EI-DAC2 déposée EI-DAC1 = étude d'impact de la demande de création de l'INB Cigéo déposée en 2023 EI-DR0 = étude d'impact des dossiers de la tranche de travaux DR0 EI-DAC2 = étude d'impact associée aux consultations réglementaires de la DAC, déposée en 2025
2.5.2.1	État initial du bruit de fond radiologique	X				EI-DR0/EI-DAC2	Ajout d'un paragraphe Généralités explicitant le contexte de l'état radiologique présenté dans le vol. III de l'étude d'impact Précisions apportées sur les méthodes de mesure des éléments radioactifs de l'état initial de l'environnement Mise à jour de l'iconographie « Localisation des points de prélèvement des échantillons pour les mesures de la radioactivité » Actualisation avec les données de 2019 - 2021 de la station OPE/OPERA de Houdelaincourt
2.5.2.2.1	Méthode d'évaluation des émissions atmosphériques radioactives	X				EI-DAC1	Précisions apportées sur la quantification des émissions gazeuses
3.2.1	Occupation des sols	X				EI-DR0	Précisions apportées sur l'occupation du sol et le lien avec les catégories de surfaces selon l'annexe à l'article R.101-1 du code de l'urbanisme
3.2.2	Carte pédologique					EI-DR0	Précision apportée sur la classification des sols
3.2.4	Caractéristiques radiologiques des sols	X				EI-DAC1	Précisions apportées sur la méthode utilisée pour caractériser l'état initial radiologique des sols
3.3	Sites et sols pollués ou potentiellement pollués	X				EI-DAC1/EI-DR0	Chapitre créé reprenant le contenu du chapitre 11.3 « Sites et sols pollués ou potentiellement pollués » de l'Étude d'impact de la déclaration d'utilité publique (DUP) BASIAS est devenu CASIAS
3.4	Analyse des incidences sur le sol	X				EI-DAC1	Précisions apportées sur la méthode utilisée pour l'analyse des incidences sur le sol
4.1	État initial		X			EI-DAC1	Précisions apportées par l'Andra sur la méthodologie pour l'analyse des éléments radioactifs présents dans le sous-sol
4.1.2	Caractéristiques radiologiques du sous-sol	X				EI-DAC1	Ajout d'un chapitre sur la méthode utilisée pour caractériser l'état initial radiologique du sous-sol
4.1.3	Caractéristiques chimiques des argilites	X				EI-DAC2	Ajout d'un chapitre sur la définition des caractéristiques chimiques des argilites
4.1.5	Ressources naturelles potentielles du sous-sol	X				EI-DAC2	Correction apportée sur la consultation des documents
4.1.6	Risques naturels liés à la géologie	X				EI-DAC1	Précisions apportées sur les références d'études utilisées pour caractériser le risque sismique
4.2.5	Ressources du sous-sol	X				EI-DAC1	Précisions apportées sur la méthode utilisée pour l'analyse des incidences sur le sous-sol
5.1 5.2	Définition de l'état initial Évaluation des incidences		X			EI-DR0	Actualisation suite à l'adoption du SDAGE du bassin de la Seine et des cours d'eau côtiers normands 2022-2027 et du SDAGE Rhin-Meuse 2022-2027 (75, 76)
5.1	Définition de l'état initial		X			EI-DAC1	Ajout d'une introduction à la synthèse des données acquises par l'Andra
5.1.1	Réglementation et exigences		X			EI-DR0	Précisions apportées sur le SDAGE 2022-2027

Chapitre EI DAC déposé		Précisions sur les caractéristiques techniques	Évolution de l'état initial	Évolution-réglementaire	Précision demandée lors de l'instruction du dossier	Actualisation concernée	Précisions sur les évolutions apportées au contenu du volume VII de l'EI-DAC2 déposée EI-DAC1 = étude d'impact de la demande de création de l'INB Cigéo déposée en 2023 EI-DR0 = étude d'impact des dossiers de la tranche de travaux DR0 EI-DAC2 = étude d'impact associée aux consultations réglementaires de la DAC, déposée en 2025
5.1.2.1	Description du système hydrogéologique		X			EI-DAC1	Ajout de la référence au SDAGE 2022-2027
5.1.2.2	Détermination et analyse des niveaux piézométriques		X			EI-DAC1	Actualisation des tableaux avec de nouveaux forages
5.1.2.3.2	Données utilisées		X			EI-DAC1	Précisions apportées sur les données utilisées pour déterminer l'état des masses d'eau souterraines
5.1.2.3.3	Stations de suivi		X			EI-DAC1	Ajout des campagnes de prélèvement de 2019 Précisions apportées sur l'utilisation des données des agences de l'eau Précisions apportées sur l'aquifère échantillonné et les codes BSS associés et ajout d'une station pour l'Oxfordien
5.1.2.3.5	Le programme analytique pour les paramètres non-conventionnels		X			EI-DR0	Précisions apportées sur les données analysées pour les eaux souterraines des Calcaires du Barrois
5.1.2.4	Recensement des usages des eaux souterraines		X			EI-DAC1	Actualisation avec la campagne de terrain diligentée par l'Andra entre novembre 2020 et avril 2021
5.1.3.1.1	Définition des masses d'eau de surface		X			EI-DAC1	Vérification des masses d'eau de surface avec les nouveaux référentiels des SDAGE 2022-2027 (codes, noms des masses d'eau)
5.1.3.1.2	Identification des bassins versants topographiques		X			EI-DAC1	Ajout des nouveaux référentiels projetés des SDAGE 2022-2027 de la Seine et des cours d'eau côtiers normands et Rhin-Meuse
5.1.3.1.3	Établissement de la liste des cours d'eau concernés		X			EI-DR0	Précisions apportées sur : • la BDCarthage ; • le recensement des plans d'eau.
5.1.3.2.1	Règlementation et exigences		X			EI-DAC1	Actualisation suite à l'approbation des PGRI 2022-2027
5.1.3.2.2	Définition de l'état initial pour le risque inondation		X			EI-DAC1	Ajout de la simulation hydraulique
5.1.3.3 5.1.3.4	Détermination des débits des cours d'eau Détermination de l'état qualitatif des cours d'eau		X			EI-DAC1/EI-DR0	Ajout des campagnes de mesure 2019, des données de l'Office français de la biodiversité, de l'Observatoire des assecs et des caractéristiques hydromorphologiques des cours d'eau
5.1.3.4.2	Données utilisées		X			EI-DAC1/EI-DR0	Précisions apportées sur les données utilisées pour déterminer l'état qualitatif des cours d'eau Précisions apportées sur l'I2M2 Précisions apportées sur les prélèvements réalisés
5.1.3.4.3	Stations		X			EI-DAC1	Précisions apportées sur la comparaison des données acquises par l'Andra et celles par l'Agence de l'eau
5.1.3.4.4	Programme analytique pour les paramètres conventionnels		X			EI-DAC1	Actualisation avec les prélèvements 2018 et 2019

Chapitre EI DAC déposé		Précisions sur les caractéristiques techniques	Évolution de l'état initial	Évolution-réglementaire	Précision demandée lors de l'instruction du dossier	Actualisation concernée	Précisions sur les évolutions apportées au contenu du volume VII de l'EI-DAC2 déposée EI-DAC1 = étude d'impact de la demande de création de l'INB Cigéo déposée en 2023 EI-DR0 = étude d'impact des dossiers de la tranche de travaux DR0 EI-DAC2 = étude d'impact associée aux consultations réglementaires de la DAC, déposée en 2025
5.2 5.2.1	Évaluation des incidences Incidences quantitatives sur les écoulements d'eau souterraines et de surface	X				EI-DAC1/EI-DR0	Ajout d'un paragraphe d'introduire afin d'expliquer que l'Andra dispose de connaissances très précises grâce aux travaux de creusement du Laboratoire souterrain Ajout d'un paragraphe introductif
5.2.1.1	Modélisations des incidences du centre de stockage Cigéo sur les eaux souterraines	X				EI-DAC1/EI-DR0/EI-DAC2	Actualisation de la description des modèles
5.2.1.2	Risque inondation	X				EI-DAC1/EI-DR0	Ajout d'un paragraphe en début de chapitre pour introduire l'étude d'évaluation du centre de stockage Cigéo sur les risques d'inondation (Orge, Bureau, Ormançon) Restructuration du chapitre entier : sous-chapitres déplacés et actualisés Ajout et mis à jour de la description du modèle hydraulique utilisé pour caractériser le risque d'inondation
5.2.1.2.3	Détermination de la "Pluie de référence" ou pluie projet	X				EI-DAC1/EI-DR0	Définition des termes de pluie de projet et pluie de référence Précisions apportées pour les différentes composantes (stations pluviométriques, coefficient Montana…) Explications ajoutées dans le choix de la station de référence, détermination des coefficients de Montana etc.
5.2.1.3	Principe de dimensionnement des ouvrages de gestion des eaux pluviales	X				EI-DAC1/EI-DR0	Ajout des fiches hydrologiques de la Bureau, de l'Ormançon et de l'Orge Ajout d'une phrase sur le respect des objectifs de bon état des eaux souterraines en période d'assec (en raison de l'infiltration)
5.2.2.4.2	Aspect qualitatif	X				EI-DAC1	Actualisation du chapitre avec la conception des filières de traitement des effluents et la conformité avec les objectifs de qualité des milieux récepteurs Précisions apportées sur la détermination du débit de rejet maximal Mention à l'étude assainissement
5.2.2.	Incidences qualitatives	X				EI-DAC1/EI-DR0	Actualisation avec la méthode de calcul des rejets des effluents liquides conventionnels dans les cours d'eau récepteurs Précisions apportées sur la production de boues
5.2.2.	Incidences qualitatives	X				EI-DAC1/EI-DR0	Actualisation avec la méthode de calcul des rejets des effluents liquides conventionnels dans les cours d'eau récepteurs Précisions apportées sur les normes radiologiques
5.2.2.1.2	Gestion d'une pollution accidentelle ou des eaux incendies	X				EI-DR0	Quelques précisions apportées
5.2.2.6.1	Pour les eaux pluviales	X				EI-DR2	Précision en lien avec l'arrêté
5.2.3	Incidences sur les usages	X				EI-DAC1/EI-DR0	Ajout de cette nouvelle partie Précisions apportées sur les besoins en eau potable
5.2.3.2	Disponibilité de la ressource	X				EI-DAC1	Précisions apportées sur la distribution d'eau potable et les principales caractéristiques des captages

Chapitre EI DAC déposé		Précisions sur les caractéristiques techniques	Évolution de l'état initial	Évolution-réglementaire	Précision demandée lors de l'instruction du dossier	Actualisation concernée	Précisions sur les évolutions apportées au contenu du volume VII de l'EI-DAC2 déposée EI-DAC1 = étude d'impact de la demande de création de l'INB Cigéo déposée en 2023 EI-DR0 = étude d'impact des dossiers de la tranche de travaux DR0 EI-DAC2 = étude d'impact associée aux consultations réglementaires de la DAC, déposée en 2025
6.1.2.1	Analyse bibliographique		X			EI-DAC1/EI-DR0	Ajout d'un paragraphe relatif à la nouvelle étude bibliographique réalisée sur l'aire d'étude immédiate entre 2010 et 2021 Précisions apportées sur les données collectées par l'Andra dans le cadre du projet global Cigéo avant 2015 Actualisation des dates des inventaires
6.1.2.2	Pré-diagnostic – reconnaissance des sites d'intérêt		X			EI-DAC1	Ajout d'un chapitre sur la reconnaissance préliminaires des sites d'intérêt
6.1.2.3	Inventaires de terrain		X			EI-DAC1/EI-DR0	Précisions et justifications apportées sur la robustesse et l'efficacité des données d'inventaires réalisés sur la période 2015-2020 Actualisation des cartographies et tableaux présentant les périodes et zones de prospection sur la période 2015-2020 Actualisation des tableaux des périodes d'inventaire et nombre de jours et des illustrations associées
6.1.3.1	Méthodologie pour l'étude des habitats terrestres		X			EI-DAC1	Précisions apportées sur la méthode de regroupement des habitats en grandes catégories
6.1.4	Inventaires de la faune		X			EI-DAC1	Ajout de cartes de localisation des méthodes d'inventaires pour les insectes, les reptiles, les mammifères, les chiroptères, les poissons et les mollusques
6.1.4.5	Protocoles d'observation des mammifères (hors chiroptères)		X			EI-DAC1	Précisions apportées sur les méthodes d'inventaires des mammifères
6.1.4.6	Protocoles d'écoute et de suivi des chiroptères		X			EI-DAC1	Précisions apportées sur les méthodes d'inventaires des chiroptères
6.1.4.7	Protocoles d'observation de la faune piscicole et des zones frayères		X			EI-DAC1	Précisions apportées sur les méthodes d'inventaires des zones de frayères
6.1.4.8	Protocoles d'observation des mollusques		X			EI-DAC1	Précisions apportées sur les méthodes d'inventaires des mollusques
6.1.4.9	Regroupement en cortèges d'espèces faune		X			EI-DAC1	Ajout d'une partie relative au regroupement en cortèges d'espèces
6.1.5	Délimitation des zones humides		X		X	EI-DAC1/EI-DAC2	Actualisation de la méthode de délimitation des zones humides
6.1.7	État radiologique actuel		X			EI-DAC1	Actualisation de la méthode de caractérisation de l'état radiologique actuel
6.1.8.2	Évaluation des enjeux à l'échelle régionale	X				EI-DAC1	Actualisation de la grille d'analyse pour l'appréciation des enjeux de préservation des espèces
6.1.9	Appréciation des niveaux d'intérêt des habitats d'espèces (NIH)	X				EI-DAC1	Actualisation de la méthode utilisée pour la qualification des niveaux d'intérêt des habitats d'espèces
6.1.10	Appréciation des niveaux d'intérêt dégradés des habitats d'espèces (NID)	X				EI-DR0	Ajout d'un chapitre
6.1.11	Synthèse de la démarche d'analyse de l'état initial du milieu naturel		X			EI-DAC1	Actualisation du schéma de synthèse de la démarche d'analyse des enjeux écologiques

Chapitre EI DAC déposé		Précisions sur les caractéristiques techniques	Évolution de l'état initial	Évolution-réglementaire	Précision demandée lors de l'instruction du dossier	Actualisation concernée	Précisions sur les évolutions apportées au contenu du volume VII de l'EI-DAC2 déposée EI-DAC1 = étude d'impact de la demande de création de l'INB Cigéo déposée en 2023 EI-DR0 = étude d'impact des dossiers de la tranche de travaux DR0 EI-DAC2 = étude d'impact associée aux consultations réglementaires de la DAC, déposée en 2025
6.2.1	Effets du projet sur l'environnement	X				EI-DAC1	Précisions apportées sur les incidences sur les zonages environnementaux, les continuités écologiques, les zones humides, et les pollutions conventionnelles et radiologiques
6.2.2	Évaluation des niveaux d'incidences	X				EI-DAC1	Ajout de la méthode relative à la qualification des incidences potentielles : notables/non notables
6.2.3	Incidences sur les zonages environnementaux	X				EI-DAC1	Ajout de la méthode relative à la caractérisation de l'incidence sur les zonages environnementaux
6.2.5	Incidences sur les continuités écologiques	X				EI-DAC1	Précision apportée sur la modélisation des trames
6.2.6	Incidences des émissions radiologiques et conventionnelles sur la faune et la flore sauvages	X				EI-DAC1/EI-DAC2	Ajout d'un chapitre regroupant les méthodes relatives à la caractérisation des incidences des émissions radiologiques et chimiques sur la faune et la flore sauvages
6.2.6.2	Émissions chimiques	X		X	X	EI-DAC1/EI-DR0/EI-DAC2	Ajout d'un chapitre décrivant la méthodologie de l'évaluation des risques chimiques sur la faune et la flore sauvages (application de nouvelles démarches et évaluation quantitative des rejets liquides).
6.3.1	Les grands principes de la compensation écologique	X				EI-DAC1	Précisions apportées sur l'objectif d'absence de perte nette de biodiversité
6.3.2.2	Respecter l'exigence de proximité fonctionnelle	X				EI-DAC1	Précisions apportées sur le respect de la proximité fonctionnelle des sites de compensation
6.3.3	Méthode de dimensionnement de la dette et du gain écologiques des fonctionnalités des habitats	X				EI-DAC1	Actualisation de la méthode utilisée pour le calcul de la dette et du gain écologiques
6.4.5	Cumul des incidences du projet global Cigéo avec d'autres projets existants ou approuvés	X				EI-DAC1	Actualisation de la méthode en cohérence avec celle appliquée pour le chapitre 16

TABLES DES ILLUSTRATIONS

Figures

Figure 1-1 Présentation générale de la démarche d'évaluation des incidences (impacts) 8
Figure 1-2 Cartographie de la zone d'étude de l'observatoire pérenne de l'environnement 11
Figure 1-3 Des effets de différents types 12
Figure 1-4 Démarche éviter réduire compenser 13
Figure 1-5 Aire d'étude immédiate et aire d'étude spécifique à l'opération de sécurisation de la ligne aérienne 400 kV 17
Figure 1-6 Aires d'étude du milieu physique 18
Figure 1-7 Traçages hydrogéologiques et directions globales des écoulements dans les Calcaires du Barrois depuis la zone descenderie 19
Figure 1-8 Aires d'étude de la biodiversité et du milieu naturel 22
Figure 1-9 Aires d'étude du milieu humain 25
Figure 1-10 Aires d'étude des activités agricoles et sylvicoles 27
Figure 1-11 Aires d'étude du paysage 28
Figure 1-12 Aires d'étude pour les interactions 29
Figure 2-1 Photographie aérienne illustrant la station atmosphérique d'Houdelaincourt et son environnement proche 33
Figure 2-2 Station météorologique d'Houdelaincourt 34
Figure 2-3 Démarche mise en œuvre par le logiciel AirAdvanced® Map version standard 43
Figure 2-4 Localisation des sources prises en compte dans la modélisation en phase de construction initiale 45
Figure 2-5 Localisation des sources prises en compte dans la modélisation en phase de fonctionnement 45
Figure 2-6 Localisation des points de prélèvement des échantillons pour les mesures de la radioactivité 50
Figure 2-7 Principes de calcul de l'estimation des rejets gazeux 52
Figure 2-8 Représentation d'une bouffée gaussienne et classes de stabilité 56
Figure 5-1 Localisation des stations et forages de suivi des eaux souterraines et superficielles (source : Andra) 67
Figure 5-2 Processus de définition de l'état des masses d'eau souterraines 71
Figure 5-3 Localisation des stations de suivi de la qualité des eaux souterraines de l'Andra 74
Figure 5-4 Carte des stations de jaugeage de l'Andra et des services de l'État et recensées dans « Eaufrance » 79
Figure 5-5 Règle de détermination de l'état des masses d'eau superficielles selon la directive-cadre sur l'eau) 80
Figure 5-6 Règles de détermination de l'état écologique des masses d'eau superficielles 80
Figure 5-7 Carte des stations de l'Observatoire pérenne de l'environnement pour les prélèvements et les analyses qualitatives des eaux de surface 83
Figure 5-8 Extension et contenu géologique du modèle 3D 87
Figure 5-9 Cartographie des conditions aux limites définies pour le modèle hydrogéologique 88
Figure 5-10 Tronçons excédentaires et injecteurs contrôlés par la routine de réinjection de flux 88
Figure 5-11 Synthèse des informations hydrogéologiques des relations de l'Orge et de l'Ormançon avec le karst du Barrois 89
Figure 5-12 Distribution spatiale et lithostratigraphique des éléments discrets de type fracture ouverte sur joint stratigraphique (développement horizontal 2D) ou de type diaclase (développement 3D) 90
Figure 5-13 Comparaison des hauteurs d'eau simulées (courbe verte) et des mesures (courbe rouge) - au piézomètre EST5078 localisé au nord-ouest du modèle 91
Figure 5-14 Comparaison des hauteurs d'eau simulées et des mesures - piézomètres localisés au niveau de la zone puits (mesure en rouge, modèle en vert) 91
Figure 5-15 Représentation schématique de la nouvelle conceptualisation de l'épikarst des Calcaires sublithographiques au droit de la zone descenderie 92
Figure 5-16 Extension prévisionnelle du nouveau modèle hydrogéologique des Calcaires du Barrois intégrant la totalité des sous-bassins versant de la Saulx et de l'Ornain jusqu'à leur confluence 93
Figure 5-17 Structure du programme scientifique proposé par le BRGM et l'Andra 93
Figure 5-18 Vue 3D du modèle à l'échelle du Bassin parisien 95
Figure 5-19 Vue 3D du modèle à l'échelle du secteur étendu 95
Figure 5-20 Failles majeures intégrées dans le modèle régional : à gauche, vue en plan ; à droite, vue 3D 96
Figure 5-21 Failles majeures à l'échelle du secteur de Meuse Haute/Marne. En bleu foncé, les failles transmissives 2D, en orange les failles étanches 3D, et la fracturation mineure en bleu clair 96
Figure 5-22 Organisation lithostratigraphique des Calcaires du Barrois indiquant les niveaux karstifiés et semi-perméables 97
Figure 5-23 Extension et épaisseur des horizons poreux et des niveaux intercalaires de la Série grise de l'Oxfordien calcaire à l'échelle du secteur 98
Figure 5-24 Vue en plan des réseaux karstiques oxfordiens à l'échelle du secteur 98
Figure 5-25 Les réseaux karstiques oxfordiens 99
Figure 5-26 Maillage régional 2D plan, avec raffinement le long des cours d'eau, le long des failles et dans le secteur b) et c) 99
Figure 5-27 Coupes transversales montrant le raffinement du maillage vertical à l'échelle du secteur 100
Figure 5-28 Réseau hydrographique : charges hydrauliques imposées au niveau des rivières 100
Figure 5-29 Recharge [m/s] imposés sur les nœuds de surface du modèle intégré 101
Figure 5-30 Répartition des points de mesures piézométriques à l'échelle du bassin. Le fond de carte correspond à la géologie de surface simplifiée 101
Figure 5-31 Diagrammes de calibration pour le domaine intégré région/secteur avec 1250 mesures directes de charge hydraulique 102
Figure 5-32 Piézométrie simulée à la surface du domaine intégré région/secteur. Le réseau hydrographique ainsi que les failles régionales sont respectivement représentés en bleu et en rouge 103
Figure 5-33 Piézométrie calculée (contours) et champs de conductivités hydrauliques (fond de carte) de l'Albien. L'échelle de conductivité est en logarithme 103
Figure 5-34 Diagramme de validation croisée de l'Oxfordien 104
Figure 5-35 Piézométries mesurées dans les nappes inférieures (a) et supérieure (b) de l'Oxfordien et simulées dans la nappe inférieure (c). La piézométrie simulée dans la nappe supérieure (d) est présentée par une différence de charge entre les niveaux piézométriques de la nappe supérieure de la nappe 104
Figure 5-36 Vues 2D et 3D du maillage en éléments finis du modèle local 106
Figure 5-37 Progression des travaux de creusement des puits 106
Figure 5-38 Localisation des puits d'accès au Laboratoire souterrain et des forages de surveillance 107
Figure 5-39 Localisation des points de rejets des bassins de rétention du centre de stockage Cigéo 109
Figure 5-40 Carte de localisation des stations météorologiques dans lesquelles se trouvent les stations de mesure pluviographiques 112
Figure 5-41 Cumul des pluies à Cirfontaines-en- Ornois 115

Figure 5-42 Illustration de la situation hydraulique avant et après projet 115
Figure 5-43 Logigramme indiquant l'articulation de la méthodologie pour définir le partage de destination des eaux 126
Figure 5-44 Schéma illustratif de la filière de traitement qualitatif des eaux de ruissellement des verses 130
Figure 5-45 Schéma illustratif de la filière de traitement qualitatif des eaux usées industrielles 133
Figure 6-1 Calendrier des périodes les plus favorables aux inventaires faune/flore (source : DRIEE) 142
Figure 6-2 Localisation des zones d'inventaires sur le milieu naturel 150
Figure 6-3 Localisation des inventaires entomologiques – 1/3 152
Figure 6-4 Localisation des inventaires entomologiques – 2/3 153
Figure 6-5 Localisation des inventaires entomologiques - 3/3 154
Figure 6-6 Exemple de plaque refuge (source Egis) 155
Figure 6-7 Localisation des inventaires des reptiles – 1/3 156
Figure 6-8 Localisation des inventaires des reptiles – 2/3 157
Figure 6-9 Localisation des inventaires des reptiles – 3/3 158
Figure 6-10 Illustration des pièges à crottes et pièges à poils (source GREGE) 160
Figure 6-11 Localisation des inventaires des mammifères terrestres – 1/3 161
Figure 6-12 Localisation des inventaires des mammifères terrestres – 2/3 162
Figure 6-13 Localisation des inventaires des mammifères terrestres – 3/3 163
Figure 6-14 Localisation des points d'écoute des chiroptères – 1/3 165
Figure 6-15 Localisation des points d'écoute des chiroptères – 2/3 166
Figure 6-16 Localisation des points d'écoute des chiroptères – 3/3 167
Figure 6-17 Localisation des gîtes à chiroptères – 1/3 168
Figure 6-18 Localisation des gîtes à chiroptères – 2/3 169
Figure 6-19 Localisation des gîtes à chiroptères – 3/3 170
Figure 6-20 Localisation des pêches électriques - 1/3 172
Figure 6-21 Localisation des pêches électriques - 2/3 173
Figure 6-22 Localisation des pêches électriques - 3/3 174
Figure 6-23 Localisation des sources prospectées pour la recherche de mollusques - 1/3 175
Figure 6-24 Localisation des sources prospectées pour la recherche de mollusques - 2/3 176
Figure 6-25 Localisation des sources prospectées pour la recherche de mollusques - 3/3 177
Figure 6-26 Classes d'hydromorphie du GEPPA 178
Figure 6-27 Localisation des relevés floristiques zones humides – 1/2 179
Figure 6-28 Localisation des relevés floristiques zones humides – 2/2 180
Figure 6-29 Plan des sondages pédologiques 181
Figure 6-30 Localisation des sondages pédologiques réalisés dans l'aire d'étude immédiate de la biodiversité 1/3 182
Figure 6-31 Localisation des sondages pédologiques réalisés dans l'aire d'étude immédiate de la biodiversité 2/3 183
Figure 6-32 Localisation des sondages pédologiques réalisés dans l'aire d'étude immédiate de la biodiversité 3/3 184
Figure 6-33 Schéma de la démarche d'appréciation des enjeux écologiques 187
Figure 6-34 Schéma de la démarche d'analyse des enjeux écologiques 193
Figure 6-35 Étapes pour le choix des sites de compensation écologique 202
Figure 6-36 Schéma de la méthode dite « par écart de milieux » utilisée pour le dimensionnement de la dette et du gain écologique 205
Figure 6-37 Limites des emprises pour le calcul de la dette écologique de la zone descenderie 206
Figure 6-38 Limites des emprises pour le calcul de la dette écologique de la liaison intersites 206
Figure 6-39 Limites des emprises pour le calcul de la dette écologique de la zone puits 207
Figure 6-40 Limites des emprises pour le calcul de la dette écologique de l'installation terminale embranchée 208
Figure 6-41 Zone tampon de 100 mètres définie autour des éléments arborés de la zone descenderie pour le cortège des oiseaux de fourrés et haies en milieu ouvert 209
Figure 6-42 Zone tampon de 300 mètres définie autour des mares et cours d'eau dans la zone puits pour le cortège des amphibiens des habitats forestiers (hivernage) avec mares/étangs (reproduction) 210
Figure 6-43 Étapes de l'évaluation des incidences Natura 2000 211

Tableaux

Tableau 1-1 Avancement des différentes opérations du projet global Cigéo 9
Tableau 1-2 Éléments d'appréciation du niveau d'incidence (grille indicative d'évaluation) 13
Tableau 1-3 Exemple de tableau de présentation d'une mesure ERC 14
Tableau 1-4 Exemple de tableau de synthèse des incidences potentielles du projet global Cigéo 14
Tableau 1-5 Exemple de tableau de synthèse de la démarche ERC 15
Tableau 1-6 Définition des aires d'étude du milieu physique (Atmosphère, sol, sous-sol et eaux) 20
Tableau 1-7 Définition des aires de la biodiversité et du milieu naturel 21
Tableau 1-8 Définition des aires d'étude du milieu humain 22
Tableau 1-9 Définition des aires d'étude des activités agricoles et sylvicoles 26
Tableau 1-10 Définition des aires d'étude pour le paysage, le patrimoine culturel, le tourisme et les activités de loisirs 28
Tableau 1-11 Définition des aires d'étude pour les interactions 29
Tableau 2-1 Partenaires de l'Andra et réseaux impliqués par grande famille de paramètres atmosphériques 32
Tableau 2-2 Paramètres météorologiques mesurés à la station d'Houdelaincourt-Fréquences, prestataires et méthodes associées 34
Tableau 2-3 Classement de la capacité de séquestration carbone des écosystèmes de l'aire d'étude éloignée 35
Tableau 2-4 Hypothèses retenues pour le calcul des émissions GES du sous-poste gazole non routier 36
Tableau 2-5 Hypothèses retenues pour le calcul des émissions GES du sous-poste consommation d'électricité 36
Tableau 2-6 Hypothèses retenues pour le calcul des émissions GES du sous-poste récupération d'énergie au fond 37
Tableau 2-7 Hypothèses retenues pour le calcul des émissions GES du sous-poste consommation de gaz 37
Tableau 2-8 Hypothèses retenues pour le calcul des émissions GES du sous-poste ciment 37
Tableau 2-9 Facteurs d'émission retenus pour le calcul des émissions GES du sous-poste autres matériaux 38
Tableau 2-10 Facteurs d'émission retenus pour le calcul des émissions GES du sous-poste Acier 38
Tableau 2-11 Masses retenues par type d'acier pour le calcul des émissions GES du sous-poste Acier 38
Tableau 2-12 Hypothèses retenues pour le calcul des émissions GES des déplacements domicile-travail 39
Tableau 2-13 Hypothèses retenues pour le calcul des émissions GES des déplacements intersites 39
Tableau 2-14 Facteurs d'émission retenus pour le calcul des émissions GES du sous-poste Fret Routier 39
Tableau 2-15 Masses retenues pour le calcul des émissions GES du sous-poste fluide frigorigène 40
Tableau 2-16 Facteurs d'émission retenus pour le calcul des émissions GES du sous-poste changement d'affectation des sols 40
Tableau 2-17 Surfaces de changement d'affectation des sols retenus pour le calcul des émissions GES 40
Tableau 2-18 Facteurs d'émission retenus pour le calcul des émissions GES du poste déchets 40
Tableau 2-19 Masses retenues pour le calcul des émissions GES du poste Déchets 41
Tableau 2-20 Méthode analytique utilisée pour la mesure des polluants SO_2, CO, NO_x, O_3 et $PM_{10}/PM_{2,5}$ 42
Tableau 2-21 Méthode analytique utilisée pour la mesure des COV et des métaux lourds (Pb, As, Ni, Cd) 42
Tableau 2-22 Campagnes « qualité de l'air » menées à proximité de la zone descenderie 42
Tableau 2-23 Valeurs de bruit de fond retenues 44
Tableau 2-24 Bilan des émissions conventionnelles en phase de construction initiale 46
Tableau 2-25 Bilan des émissions conventionnelles en phase de fonctionnement 46
Tableau 2-26 Éléments radioactifs naturels et artificiels recherchés dans l'aire d'étude du projet global Cigéo 48
Tableau 2-27 Méthodes de mesure des éléments radioactifs de l'état initial de l'environnement et matrices dans lesquelles ils sont recherchés 49
Tableau 2-28 Colis contribuant aux émissions gazeuses du centre de stockage Cigéo et activités associées 53
Tableau 2-29 Taux de relâchement en tritium, carbone 14 et krypton 85, des colis de déchets radioactifs 53
Tableau 2-30 Rejets radioactifs annuels maximaux de l'installation nucléaire de surface 54
Tableau 2-31 Rejets radioactifs annuels maximaux de l'installation souterraine 54
Tableau 2-32 Caractéristiques des émissaires des rejets atmosphériques radioactifs 54
Tableau 2-33 Valeurs des paramètres pris en compte pour la modélisation de la dispersion atmosphérique 55
Tableau 3-1 Typologie des grands types d'occupation du sol et lien avec les catégories de surfaces selon l'annexe à l'article R. 101-1 du code de l'urbanisme 58
Tableau 5-1 Stations de suivi de la piézométrie de la nappe des Calcaires du Barrois 69
Tableau 5-2 Stations de suivi de la piézométrie de la nappe de l'Oxfordien Calcaire 71
Tableau 5-3 Liste des laboratoires indépendants accrédités étant intervenus pour les prélèvements et les analyses d'eau souterraine 71
Tableau 5-4 Fréquence des observations par station de suivi 73
Tableau 5-5 Points de suivi des débits des cours d'eau (Eaufrance) 77
Tableau 5-6 Liste des prestataires indépendants intervenus pour les jaugeages 77
Tableau 5-7 Points de suivi « Andra » des débits des cours d'eau 78
Tableau 5-8 Liste des laboratoires indépendants accrédités étant intervenus pour les prélèvements et les analyses d'eau 81
Tableau 5-9 Bassin versant de La Marne - Fréquence de prélèvement réalisé par l'Andra (OPE) sur les stations suivies 84
Tableau 5-10 Bassin versant de La Saulx - Fréquence de prélèvement réalisé par l'Andra (OPE) sur les stations suivies 84
Tableau 5-11 Bassin versant de l'Ornain - Fréquence de prélèvement réalisé par Andra (OPE) sur les stations suivies 85
Tableau 5-12 Synthèse des perméabilités des formations géologiques à l'issue du calage 89
Tableau 5-13 Propriétés hydrauliques des éléments discrets simulant l'écoulement en fracture 90
Tableau 5-14 Série lithostratigraphique prise en compte dans le modèle hydrogéologique intégré région-secteur 94
Tableau 5-15 Décomposition stratigraphique prise en compte dans le modèle local 105
Tableau 5-16 Dates d'atteinte des horizons poreux (toit) par les puits d'accès (puits principal PPA et puits auxiliaires PAX) au Laboratoire souterrain 106
Tableau 5-17 Tableau d'aide à la décision pour le choix de la station 110
Tableau 5-18 Caractéristiques des données pluviographiques disponibles pour la définition des pluies de référence 111
Tableau 5-19 Données d'entrée – Quantiles de hauteur d'eau 113
Tableau 5-20 Données d'entrée – Caractéristiques des coefficients de Montana 113
Tableau 5-21 Coefficients de Montana – Cirfontaines-en-Ornois 114
Tableau 5-22 Données d'entrée pour la réalisation de l'étude hydrologique pour le centre de stockage Cigéo 116
Tableau 5-23 Caractéristiques générales des bassins versants 116
Tableau 5-24 Méthodes hydrologiques GTAR 2006 utilisés pour le centre de stockage Cigéo 117
Tableau 5-25 Équation 1 - Formalisme de la méthode rationnelle 117
Tableau 5-26 Équation 2 - Formalisme de la méthode rationnelle – Fonction de production (ou d'infiltration) 117
Tableau 5-27 Coefficients de Montana pour les Tr = 10 ans et Tr = 100 ans 118
Tableau 5-28 Détermination du coefficient régional b 118
Tableau 5-29 Équation 1- Formalisme de la méthode de Crupédix 118
Tableau 5-30 Équation 2 - Formalisme de la méthode de Crupédix 118
Tableau 5-31 Équation 3- Formalisme de la méthode de Crupédix 118
Tableau 5-32 Équation 3 Formalisme de la méthode d'extrapolation de Myer 119
Tableau 5-33 Équation 1 : Formalisme de transition– formule mixte 119

Tableau 5-34 Fiche hydrologique de la Bureau - Paramètres hydrologiques 119
Tableau 5-35 Fiche hydrologique de la Bureau – État du bassin versant 119
Tableau 5-36 Fiche hydrologique de la Bureau - Caractéristiques de l'écoulement principal 119
Tableau 5-37 Fiche hydrologique de la Bureau - Calcul des débits de pointe 120
Tableau 5-38 Fiche hydrologique de la Bureau - Débits de crue retenus et débits spécifiques 120
Tableau 5-39 Fiche hydrologique de l'Ormançon - Paramètres hydrologiques 120
Tableau 5-40 Fiche hydrologique de l'Ormançon – État du bassin versant 120
Tableau 5-41 Fiche hydrologique de l'Ormançon – Caractéristiques de l'écoulement principal 120
Tableau 5-42 Fiche hydrologique de l'Ormançon – Calcul des débits de pointe 120
Tableau 5-43 Fiche hydrologique de l'Ormançon – Débits de crue retenus et débits spécifiques 120
Tableau 5-44 Fiche hydrologique de l'Orge - Paramètres hydrologiques 121
Tableau 5-45 Fiche hydrologique de l'Orge – État du bassin versant 121
Tableau 5-46 Fiche hydrologique de l'Orge – Caractéristiques de l'écoulement principal 121
Tableau 5-47 Fiche hydrologique de l'Orge – Calcul des débits de pointe 121
Tableau 5-48 Fiche hydrologique de l'Orge – Débits de crue retenus et débits spécifiques 121
Tableau 5-49 Caractéristiques des ajustements détermination d'un débit de pointe correspondant à une période de retour donnée 122
Tableau 5-50 Ajustements fréquentiels effectuées à la station de Montiers-sur-Saulx – Détermination de $Q_{2.\ pointe.\ spécifique}$, $Q_{5.\ pointe.\ spécifique}$, et $Q_{10.\ pointe.\ spécifique}$ 122
Tableau 5-51 Caractéristiques des ajustements réalisés pour la détermination d'un débit de pointe correspondant à une période de retour donnée 122
Tableau 5-52 Caractéristiques des bassins versants susceptibles d'influencer le régime d'écoulement 124
Tableau 5-53 Débits spécifiques de fuite à appliquer aux points de rejet des eaux pluviales Cigéo 125
Tableau 5-54 Types de pluie utilisés pour la conception et valeurs ajoutées 127
Tableau 5-55 Tableau des concentrations des eaux pluviales (hors eaux de ruissellement des verses) en entrée de filière de traitement (données issues de l'AESN, 2013) 128
Tableau 5-56 Tableau des concentrations des eaux de ruissellement des verses en entrée et en sortie de filière de traitement sur la zone puits 129
Tableau 5-57 Tableau des concentrations des eaux de fond en entrée et en sortie de filière de traitement 131
Tableau 5-58 Concentrations en pollution – Eaux usées domestiques 132
Tableau 5-59 Concentrations en pollution – eaux industrielles associées aux eaux de lavage 132
Tableau 5-60 Concentrations en pollution retenues pour les eaux industrielles à traiter 132
Tableau 5-61 Tableau des concentrations des eaux usées et industrielles de surface en entrée et en sortie de filière de traitement 132
Tableau 5-62 Volumes de boues estimés 134
Tableau 5-63 Normes de rejet applicables au site 135
Tableau 5-64 Caractéristiques principales des captages visés pour l'alimentation en eau du centre de stockage Cigéo 137
Tableau 5-65 Bilan besoins ressources depuis les captages ou sources des SIAEP d'Échenay et de Thonnance-lès-Joinville/Suzannecourt 138
Tableau 5-66 Capacité de production des captages d'eau potable de Gondrecourt-le-Château et besoins actuels et futurs en eau potable 138
Tableau 6-1 Efficacité des inventaires sur la période 2016-2022 selon le groupe faunistique ciblé pour le centre de stockage Cigéo 141
Tableau 6-2 Efficacité des inventaires réalisés sur la période 2018 - 2021 selon le groupe faunistique ciblé pour la ligne 027000 141
Tableau 6-3 Efforts de prospections sur la période 2016-2022 pour la zone descenderie et opérations attenantes 143
Tableau 6-4 Efforts de prospections sur la période 2016-2021 pour la zone puits 144
Tableau 6-5 Efforts de prospections sur la période 2016-2021 pour l'ITE 145
Tableau 6-6 Efforts de prospections sur la période 2016-2021 pour la ligne 027000 146
Tableau 6-7 Efforts de prospections sur 2022 pour campagne de forages de reconnaissance de la formation des Calcaires du Barrois (CFB), les piézomètres de caractérisation des zones humides (ZH), et les bases vie Maulan et Morley 147
Tableau 6-8 Efforts de prospections sur la période 2020-2021 pour les forages profonds de caractérisation en limite de ZIOS (Programme ZBS_FOND_UP1) 148
Tableau 6-9 Choix des espèces cibles par sous-trame 185
Tableau 6-10 Choix des prélèvements de matrices biologiques terrestres pour le fond radiologique 186
Tableau 6-11 Analyses réalisées sur les matrices biologiques 186
Tableau 6-12 Documents de référence pour la définition du statut de rareté ou menace de la flore et la faune 188
Tableau 6-13 Grille d'analyse pour l'appréciation des enjeux de préservation des espèces 189
Tableau 6-14 Exemple de référentiel de niveau d'intérêt défini pour le cortège des oiseaux 192
Tableau 6-15 Grille d'aide à la qualification du niveau d'intérêt de chaque type d'habitat d'espèce 194
Tableau 6-16 Effets génériques de ce type de projet sur la faune et la flore 196
Tableau 6-17 Niveau d'incidence résiduelle et éléments d'appréciation 197
Tableau 6-18 Coefficients appliqués aux zones selon leur niveau d'intérêt des habitats d'espèces 204

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1 Décret n° 2022-993 du 7 juillet 2022 déclarant d'utilité publique le centre de stockage en couche géologique profonde de déchets radioactifs de haute activité et de moyenne activité à vie longue Cigéo et portant mise en compatibilité du schéma de cohérence territoriale du Pays Barrois (Meuse), du plan local d'urbanisme intercommunal de la Haute-Saulx (Meuse) et du plan local d'urbanisme de Gondrecourt-le-Château (Meuse). Ministère de la Transition énergétique (2022). Journal officiel de la République française (JORF), N°ENER2200646D.

2 Cigéo : les documents de référence. Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs (Andra) (2020). Consulté le 02/06/2020. Disponible à l'adresse : https://www.andra.fr/cigeo/les-documents-de-reference#section-3144.

3 Évaluation environnementale - Guide d'aide à la définition des mesures ERC. Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement (Cerema); Ministère de la Transition écologique et solidaire (2018). 134 p. Disponible à l'adresse : https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/Th%C3%A9ma%20-%20Guide%20d%E2%80%99aide%20%C3%A0%20la%20d%C3%A9finition%20des%20mesures%20ERC.pdf.

4 Arrêté n° 2020-2664 du 18 décembre 2020 portant déclaration d'utilité publique les travaux de dérivation des eaux souterraines des sources Mourot de la Côte Géminel exploitées par la communauté d'agglomération Bar-le-Duc Sud Meuse à titre de régularisation et l'instauration des périmètres de protection de ces points d'eau. Préfecture de la Meuse (2020).

5 Schéma de cohérence territoriale (SCoT) Nord Haute-Marne. Syndicat mixte Nord Haute-Marne (2020). Consulté le 29/06/2020. Disponible à l'adresse : http://scot-nordhautemarne.fr/telechargement/.

6 Schéma de cohérence territoriale du Pays Barrois : dossier SCoT approuvé. Pays Barrois (2014). 541 p. Disponible à l'adresse : http://www.paysbarrois.com/les-missions-du-pays-barrois/schema-de-coherence-territoriale-scot/les-documents-du-scot.

7 Schéma régional d'aménagement, de développement durable et d'égalité des territoires - Annexe 7 - Plan régional de prévention et de gestion des déchets (PRPGD). Grand Est Territoires (2019). 836 p. Disponible à l'adresse : https://www.grandest.fr/wp-content/uploads/2019/11/sraddet-ge-annexe7-prpgd-vdef.pdf.

8 Schéma régional d'aménagement, de développement durable et d'égalité des territoires (SRADDET) - Rapport - Parties 1 Diagnostic territorial, 2 Stratégie, 3 Cartes et fascicule. Grand Est Territoires (2019). 265 p.

9 Dossier d'enquête publique préalable à la déclaration d'utilité publique du centre de stockage Cigéo. Pièce 6 - Étude d'impact du projet global Cigéo. Andra (2020). Document N°CG-TE-D-EDM-AMOA-ESE-0000-19-0509.

10 Dossier de demande d'autorisation environnementale et d'urbanisme - Tranche de travaux DR0. Pièce DAE6 - Étude d'impact du projet global Cigéo. Andra (2024). Document N°CG-01-D-EDM-AMOA-ESE-0100-23-0006.

11 Loi n° 96-1236 du 30 décembre 1996 sur l'air et l'utilisation rationnelle de l'énergie (1997). Journal officiel de la République française (JORF), N°ENVX9500163L.

12 Type de station et disponibilité des données. Publithèque Météo France (2016). Consulté le 03/06/2021. Disponible à l'adresse : http://publitheque.meteo.fr/aide/publitheque/reseauPostes/aideTypePoste.html.

13 Dossier départemental des risques majeurs (DDRM) Haute-Marne. Direction départementale des territoires Haute-Marne (2017). 108 p. Disponible à l'adresse : https://www.haute-marne.gouv.fr/Actions-de-l-Etat/Risques-naturels-et-technologiques/Risques-majeurs-DDRM.

14 Dossier départemental des risques majeurs (DDRM). Département de la Meuse (2019). 136 p. Disponible à l'adresse : http://webissimo-ide.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/1_ddrm_signe_cle721125.pdf.

15 Chiffres clés 2018 : consommations et productions d'énergie, émissions de GES et de polluants, vulnérabilité (Région Grand Est). Atmo Grand Est (2020). N°ACC-EN-251. 72 p. Disponible à l'adresse : http://www.atmo-grandest.eu/sites/prod/files/2020-10/Observatoire%20chiffres%20cl%C3%A9s%202018%20%C3%A9dition%202020.pdf.

16 Les Chiffres-clés en un clin d'œil (édition 2022) : SCOT du Pays Barrois. Observatoire climat air énergie Grand Est; Atmo Grand Est (2022). 4 p. Disponible à l'adresse : https://observatoire.atmo-grandest.eu/wp-content/uploads/publications/chiffres_cles_1_clin_oeil_2020_scot_SCOT%20du%20pays%20Barrois.pdf.

17 Panorama des énergies renouvelables et de récupération en région Grand Est - Édition 2022 : bilan de l'année 2021. Observatoire climat air énergie Grand Est; Direction régionale de l'environnement, de l'aménagement et du logement (DREAL) Grand Est; Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (Ademe); Préfet de la région Grand Est (2022). 56 p. Disponible à l'adresse : https://www.grand-est.developpement-durable.gouv.fr/panorama-des-energies-renouvelables-et-chiffres-a21252.html.

18 La séquestration de carbone par les écosystèmes en France. Commissariat général au développement durable; Évaluation française des écosystèmes et des services écosystémiques (EFESE) (2019). Théma Analyse. ISBN : 978-2-11-145968-7.

19 L'état des sols de France. Groupement d'intérêt scientifique pour les sols (2011). 192 p. Disponible à l'adresse : http://147.100.179.105/gissol/rapports/Rapport_HD.pdf.

20 Référentiel régional pédologique pour le Grand Est. Chambre régionale d'agriculture Grand Est (Crage) (2016). Consulté le 14/09/2022. Disponible à l'adresse : https://grandest.nosterritoires.fr/adws/app/f5dbb9ff-4e09-11e8-b0c4-312c65e710a1/.

21 Référentiel régional pédologique du département de Haute-Marne. Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement (Inrae) (2013). Consulté le 14/09/2022. Disponible à l'adresse : https://agroenvgeo.data.inra.fr/geonetwork/srv/fre/catalog.search#/metadata/9901980c-dfcf-5471-b335-20b2fcee1b30.

22 Référentiel régional pédologique du département de la Marne. Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement (Inrae) (2017). Consulté le 14/09/2022. Disponible à l'adresse : https://agroenvgeo.data.inra.fr/geonetwork/srv/fre/catalog.search#/metadata/37a3d287-ec4f-5416-9c04-4df6ae5def40.

23 Corine Land Cover. Ministère de la Transition écologique et solidaire; Ministère de la Cohésion des territoires (2018). Consulté le 25/06/2020. Disponible à l'adresse : https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/corine-land-cover-0.

24 Loi n° 2021-1104 du 22 août 2021 portant lutte contre le dérèglement climatique et renforcement de la résilience face à ses effets. Assemblée nationale; Sénat (2021). Journal officiel de la République française (JORF), N°TREX2100379L.

25 Stratégie nationale bas-carbone (SNBC). Ministère de la Transition écologique et solidaire (2022). Consulté le 03/01/2023. Disponible à l'adresse : https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/strategie-nationale-bas-carbone-snbc.

26 Bilan Carbone® V8 - Guide méthodologique : objectifs et principes de comptabilisation. ABC (2011). Consulté le 29/06/2023. Disponible à l'adresse : https://abc-transitionbascarbone.fr/ressource/bilan-carbone-v8-guide-methodologique/.

27 Ciment - Partie 1 : composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants. Association française de normalisation (Afnor) (2012), NF EN 197-1.

28 Contribution à la lutte contre l'effet de serre : stocker du carbone dans les sols agricoles de France ? Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement (Inrae) (2002). Consulté le 24/03/2023. Disponible à l'adresse : https://www.inrae.fr/actualites/contribution-lutte-contre-leffet-serre-stocker-du-carbone-sols-agricoles-france.

29 Bort, R., Berthault, D., El Beze, L., Maton, D., Millard, F., Sauvage, F. Guide méthodologique - Prise en compte des émissions de gaz à effet de serre dans les études d'impact. Ministère de la Transition écologique (2022). 92 p. Disponible à l'adresse : https://side.developpement-durable.gouv.fr/BFRC/doc/SYRACUSE/862499/prise-en-compte-des-emissions-de-gaz-a-effet-de-serre-dans-les-etudes-d-impact-guide-methodologique.

30 Bilan de la qualité de l'air Grand Est 2022. Atmo Grand Est (2022). 36 p. Disponible à l'adresse : https://www.atmo-grandest.eu/actualite/le-bilan-annuel-2022-de-la-qualite-de-lair-dans-le-grand-est.

31 Évaluation de la qualité de l'air ambiant à Houdelaincourt en 2020 - Observatoire pérenne de l'environnement (OPE). Atmo Grand Est (2021). N°SURV-EN-489_2. 52 p. Disponible à l'adresse : https://www.atmo-grandest.eu/sites/grandest/files/medias/documents/2023-02/SURV-EN-489_V2.pdf.

32 ARIA Impact - Note de principe et notice d'utilisation (version 1.8). Aria Technologies (2013). 224 p.

33 Dossier de validation du logiciel ARIA Impact. Aria Technologies (2009). N°ARIA/2007/105. 29 p.

34 Boudet, C. Évaluation des risques sanitaires dans les études d'impact des installations classées - Substances chimiques. Institut national de l'environnement industriel et des risques (Ineris) (2004). N°PU-2004-240. 111 p.

35 Directive n° 98/70/CE du 13/10/98 concernant la qualité de l'essence et les carburants diesel et modifiant la directive 93/12/CEE du Conseil (version consolidée au 20 novembre 2023). Parlement européen; Conseil de l'Union européenne (2023). Journal officiel des Communautés européennes (JOCO), N°CELEX:01998L0070.

36 Guide méthodologique sur le volet « air et santé » des études d'impact routières. Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement (Cerema) (2019). 88 p. Disponible à l'adresse : https://doc.cerema.fr/Default/doc/SYRACUSE/16384.

37 Énergie nucléaire - Mesure de la radioactivité dans l'environnement-Eau - Partie 1 : mesurage de l'activité des émetteurs Bêta par scintillation liquide - Cas particulier du tritium. Association française de normalisation (Afnor) (2000), NF M60-802-1.

38 Qualité de l'eau - Détermination de l'activité volumique du tritium - Méthode par comptage des scintillations en milieu liquide. Association française de normalisation (Afnor) (2015), NF EN ISO 9698.

39 Énergie nucléaire - Mesure de la radioactivité dans l'environnement - Partie 1 : guide du mesurage de l'activité volumique de l'air en C14 à partir d'un prélèvement atmosphérique. Association française de normalisation (Afnor) (2006), NF M60-812-1.

40 Énergie nucléaire - Mesure de la radioactivité dans l'environnement - Partie 2 : mesurage de l'activité du carbone 14 par scintillation liquide dans les matrices carbonées de l'environnement. Association française de normalisation (Afnor) (2006), NF M60-812-2.

41 Qualité de l'eau - Détermination de l'activité volumique du carbone 14 - Méthode par comptage des scintillations en milieu liquide. Association française de normalisation (Afnor) (2015), NF EN ISO 13162.

42 Énergie nucléaire - Mesure de la radioactivité dans l'environnement-Sol - Partie 6 : méthode pour la mesure de l'activité des émetteurs gamma dans les échantillons de sol. Association française de normalisation (Afnor) (1999), NF M60-790-6.

43 Mesurage de la radioactivité dans l'environnement - Sol - Partie 3 : Méthode d'essai des radionucléides émetteurs gamma par spectrométrie gamma. Association française de normalisation (Afnor) (2018), NF EN ISO 18589-3.

44 Measurement of Radionuclides in Food and the Environment. International Atomic Energy Agency (IAEA) (1989). N°295. 182 p. Disponible à l'adresse : https://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/trs295_web.pdf.

45 Qualité de l'eau - Détermination de l'activité volumique des radionucléides - Méthode par spectrométrie gamma à haute résolution. Association française de normalisation (Afnor) (2016), NF EN ISO 10703.

46 Qualité de l'eau - Application de la spectrométrie de masse avec plasma à couplage inductif (ICP-MS) - Partie 1 : lignes directrices générales. Association française de normalisation (Afnor) (2007), NF EN ISO 17294-1.

47 Qualité de l'eau - Application de la spectrométrie de masse avec plasma à couplage inductif (ICP-MS) - Partie 2 : dosage des éléments sélectionnés y compris les isotopes d'uranium. Association française de normalisation (Afnor) (2016), NF EN ISO 17294-2.

48 Énergie nucléaire - Mesure de la radioactivité dans l'environnement-Sol - Partie 8 : méthodes de mesure des isotopes du plutonium (plutonium 238 et plutonium 239 plus 240) dans les échantillons de sol. Association française de normalisation (Afnor) (1999), NF M60-790-8.

49 Énergie nucléaire - Mesure de la radioactivité dans l'environnement-Sol - Partie 7 : méthodes de mesure du strontium 90 dans les échantillons de sol. Association française de normalisation (Afnor) (1999), NF M60-790-7.

50 Mesurage de la radioactivité dans l'environnement - Sol - Partie 5 : mesurage du strontium 90. Association française de normalisation (Afnor) (2009), NF ISO 18589-5.

51 Énergie nucléaire - Mesure de la radioactivité dans l'environnement - Sol - Partie 5 : méthode de mesure de l'indice de radioactivité alpha globale en équivalent 239 Pu et de l'indice de radioactivité bêta globale en équivalent 90 Sr et 90 Y à l'équilibre dans des échantillons de sol. Association française de normalisation (Afnor) (1999), NF M60-790-5.

52 Énergie nucléaire - Mesure de l'indice de radioactivité dans l'environnement - Eau - Mesurage de l'indice de radioactivité bêta global en équivalent strontium 90 et yttrium 90 dans l'eau peu chargée en sels. Association française de normalisation (Afnor) (2004), NF M60-800.

53 Énergie nucléaire - Mesure de la radioactivité dans l'environnement - Eau - Mesurage de l'indice de radioactivité alpha en équivalent plutonium 239 dans l'eau peu chargée en sels. Association française de normalisation (Afnor) (2004), NF M60-801.

54 Qualité de l'eau - Activités alpha globale et bêta globale : méthode d'essai par dépôt d'une source fine. Association française de normalisation (Afnor) (2019), NF EN ISO 10704.

55 Monfort, M. Comparaison des codes de calcul de dispersion atmosphérique en fonctionnement normal GASCON et COTRAM. Commissariat à l'énergie atomique (CEA) (2011). N°SIM CEACI RBC DET 110000104 A. 19 p.

56 Monfort, M., Duchenne, C. Description des modèles du code GASCON de la plate-forme CERES destiné à l'évaluation de la dispersion atmosphérique et des conséquences sur l'homme et l'environnement de radionucléides émis en fonctionnement normal. Commissariat à l'énergie atomique (CEA) (2011). N°SIM SCGCI RBC NT 11000608 A. 48 p.

57 Diffusion estimation of small emissions. Preliminary report. National Oceanic and Atmospheric Administration (1973). N°TID-28289. 62 p. Disponible à l'adresse : https://www.osti.gov/servlets/purl/5118833.

58 Pasquill, F. Atmospheric Diffusion - The dispersion of windborne material from industrial and other sources. Ellis Horwood (1974). ISBN : 9780853120155.

59 Turner, D.-B. A diffusion model for an urban area. Journal of Applied Meteorology (1964). Vol. 3, N°1, pp.83–91.

60 International Atomic Energy Agency (IAEA). Generic models for use in assessing the impact of discharges of radioactive substances to the environment. International Atomic Energy Agency (IAEA) (2001). N°19. 217 p. Disponible à l'adresse : https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1103_scr.pdf.

61 Méthodes pour l'évaluation et la prévention des risques accidentels (DRA 006) - Omega 12 - Dispersion atmosphérique (mécanismes et outils de calcul). Institut national de l'environnement industriel et des risques (Ineris) (2002). N°INERIS DRA 2002 25427. 64 p. Disponible à l'adresse : https://www.ineris.fr/sites/ineris.fr/files/contribution/Documents/46web.pdf.

62 Belot, Y., Roy, M., Métivier, H. Le tritium : de l'environnement à l'homme. Les éditions de Physique (1996). ISBN : 2-86883-275-X.

63 Missions d'ingénierie géotechnique - Classification et spécifications. Association française de normalisation (Afnor) (2013), NF P 94-500.

64 Caractérisation des déchets - Lixiviation - Essai de conformité pour lixiviation des déchets fragmentés et des boues - Partie 2 : essai en bâchée unique avec un rapport liquide-solide de 10 l/kg et une granularité inférieure à 4 mm (sans ou avec réduction de la granularité). Association française de normalisation (Afnor) (2022), NF EN 12457-2.

65 Caractérisation des déchets - Essai statique pour la détermination du potentiel de génération d'acide et du potentiel de neutralisation des déchets sulfurés. Association française de normalisation (Afnor) (2011), NF EN 15875.

66 Circulaire n° DGS/EA4/2007/232 du 13 juin 2007 relative au contrôle et à la gestion du risque sanitaire liés à la présence de radionucléides dans les eaux destinées à la consommation humaine, à l'exception des eaux conditionnées et des eaux minérales naturelles. Ministère de la Santé, de la Jeunesse et des Sports (2007). Bulletin officiel du Ministère de la Santé, de la Jeunesse et des Sports. Vol. 2007-7, N°SJSP0730515C.

67 Le socle de connaissances scientifiques et techniques de Cigéo - Les référentiels de connaissances. Tome II du référentiel de site - Bilan des observations de l'OPE sur l'état de l'environnement de surface. Andra (2022). Document N°CG-TE-D-NTE-AMOA-ESE-0000-20-0018.

68 Le schéma départemental des carrières de la Meuse (SDC). Direction régionale de l'environnement, de l'aménagement et du logement (DREAL) Grand Est (2015). Consulté le 18/09/2025. Disponible à l'adresse : https://www.meuse.gouv.fr/Actions-de-l-Etat/Environnement/ICPE/Carrieres/Schema-departemental-des-carrieres/node_8071.

69 Le schéma départemental des carrières de la Haute-Marne (SDC). Direction régionale de l'environnement, de l'aménagement et du logement (DREAL) Grand Est (2003).

70 Schéma régional des carrières de la région Grand Est. Direction régionale de l'environnement, de l'aménagement et du logement (DREAL) Grand Est (2024). Consulté le 18/09/2025. Disponible à l'adresse : https://www.grand-est.developpement-durable.gouv.fr/presentation-a21768.html.

71 Loi n° 2004-338 du 21 avril 2004 portant transposition de la directive 2000/60/CE du Parlement européen et du Conseil du 23 octobre 2000 établissant un cadre pour une politique communautaire dans le domaine de l'eau. Assemblée nationale; Sénat (2004). Journal officiel de la République française (JORF), N°DEVX0200193L.

72 Directive 2000/60/CE du Parlement européen et du Conseil du 23 octobre 2000 établissant un cadre pour une politique communautaire dans le domaine de l'eau (version consolidée au 20 novembre 2014). Parlement européen; Conseil de l'Union européenne (2014). Journal officiel des Communautés européennes, N°CELEX:32000L0060.

73 Décision du conseil n° 2455/2001/CE du Parlement européen et du Conseil du 20 novembre 2001 établissant la liste des substances prioritaires dans le domaine de l'eau et modifiant la directive 2000/60/CE. Parlement européen; Conseil de l'Union européenne (2001). Journal officiel des Communautés européennes (JOCO), N°CELEX:32001D2455.

74 Directive 2008/105/CE du Parlement européen et du Conseil du 16 décembre 2008 établissant des normes de qualité environnementale dans le domaine de l'eau, modifiant et abrogeant les directives du Conseil 82/176/CEE, 83/513/CEE, 84/156/CEE, 84/491/CEE, 86/280/CEE et modifiant la directive 2000/60/CE (version consolidée au 13 septembre 2013). Conseil de l'Union européenne (2013). Journal officiel de l'Union européenne, N°CELEX:02008L0105.

75 Schéma directeur d'aménagement de gestion des eaux (SDAGE) 2022-2027 du bassin de la Seine et des cours d'eau côtiers normands. Eau Seine Normandie; Préfecture de la région d'Ile-de-France (2022). 180 p. Disponible à l'adresse : https://fr.calameo.com/agence-de-l-eau-seine-normandie/read/004001913e70f7f2c707c.

76 SDAGE 2022-2027 : schéma directeur d'aménagement de gestion des eaux du bassin de Rhin et du Meuse - Objectif de qualité et de quantité des eaux. Tome 2. Comité de bassin Rhin et Meuse; Préfecture de la région Grand Est (2022). 456 p. Disponible à l'adresse : https://cdi.eau-rhin-meuse.fr/GEIDEFile/Tome_2_Objectifs_VF.pdf?Archive=250859107803&File=Tome%5F2%5Fobjectifs%5FVF%5Fpdf.

77 Directive 2013/39/UE du Parlement européen et du Conseil du 12 août 2013 modifiant les directives 2000/60/CE et 2008/105/CE en ce qui concerne les substances prioritaires pour la politique dans le domaine de l'eau (Texte présentant de l'intérêt pour l'EEE). Parlement européen; Conseil de l'Union européenne (2013). Journal officiel de l'Union européenne, N°CELEX:32013L0039.

78 Directive n° 2006/118/CE du 12/12/06 sur la protection des eaux souterraines contre la pollution et la détérioration (version consolidée au 11 juillet 2014). Parlement européen; Conseil de l'Union européenne (2014). Journal officiel de l'Union européenne, N°CELEX:32006L0118.

79 Arrêté du 17 décembre 2008 établissant les critères d'évaluation et les modalités de détermination de l'état des eaux souterraines et des tendances significatives et durables de dégradation de l'état chimique des eaux souterraines (version consolidée au 27 juin 2016). Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement durable et de l'Aménagement du territoire (2016). Journal officiel de la République française (JORF), N°DEVO0829047A.

80 Guide d'évaluation de l'état des eaux souterraines. Ministère de la Transition écologique et solidaire (2019). 72 p. Disponible à l'adresse : https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/guide_d_evaluation_etat_des_eaux_souterraines.pdf.

81 Qualité de l'eau - Échantillonnage - Partie 3 : lignes directrices pour la conservation et la manipulation des échantillons d'eau. Association française de normalisation (Afnor), International Organization for Standardization (Iso) (2018), NF EN ISO 5667-3.

82 Qualité de l'eau - Guide de prélèvement pour le suivi de la qualité des eaux dans l'environnement - Partie 3 : prélèvement d'eau souterraine. Association française de normalisation (Afnor) (2009), FD T90-523-3.

83 Qualité du sol - Méthodes de détection et de caractérisation des pollutions - Prélèvements et échantillonnage des eaux souterraines dans un forage. Association française de normalisation (Afnor) (2000), FD X31-615.

84 Qualité de l'eau - Protocole d'évaluation initiale des performances d'une méthode dans un laboratoire. Association française de normalisation (Afnor) (2018), NF T90-210.

85 Circulaire du 23 octobre 2012 relative à l'application de l'arrêté du 17 décembre 2008 établissant les critères d'évaluation et les modalités de détermination de l'état des eaux souterraines et des tendances significatives et durables de dégradation de l'état chimique des eaux souterraines. Ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie (2012). Bulletin officiel du Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement durable et de la Mer. Vol. 2012/21, N°DEVL1227826C.

86 Qualité de l'eau - Activités alpha globale et bêta globale : méthode d'essai par dépôt d'une source fine. International Organization for Standardization (Iso) (2019), ISO 10704.

87 Instruction du Gouvernement du 3 juin 2015 relative à la cartographie et l'identification des cours d'eau et à leur entretien. Ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie (2015). Bulletin officiel du Ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie, N°DEVL1506776J.

88 Décision n° 395021 de la 6ème - 1ère chambres réunies, lecture du mercredi 22 février 2017. Conseil d'État (2017).

89 Décret n° 2011-227 du 2 mars 2011 relatif à l'évaluation et à la gestion des risques d'inondation. Ministère de l'Écologie, du Développement durable, des Transports et du Logement (2011). Journal officiel de la République française (JORF), N°DEVP1027257D.

90 Ditche, J.M., Blanchard, C. Réseau hydrobiologique et piscicole - Bassin Seine Normandie : Synthèse des données 1995-2004. Office national de l'eau et des milieux aquatiques (Onema) (2009). 34 p.

91 Arrêté du 25 janvier 2010 relatif aux méthodes et critères d'évaluation de l'état écologique, de l'état chimique et du potentiel écologique des eaux de surface pris en application des articles R. 212-10, R. 212-11 et R. 212-18 du code de l'environnement (version consolidée au 31 août 2018). Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement durable et de la Mer, en charge des Technologies vertes et des Négociations sur le climat (2018). Journal officiel de la République française (JORF), N°DEVO1001032A.

92 Arrêté du 27 juillet 2015 modifiant l'arrêté du 25 janvier 2010 relatif aux méthodes et critères d'évaluation de l'état écologique, de l'état chimique et du potentiel écologique des eaux de surface pris en application des articles R. 212-10, R. 212-11 et R. 212-18 du code de l'environnement. Ministère de l'Écologie et du Développement durable et de l'Énergie (2015). Journal officiel de la République française (JORF), N°DEVL1513989A.

93 Arrêté du 27 juillet 2018 modifiant l'arrêté du 25 janvier 2010 relatif aux méthodes et critères d'évaluation de l'état écologique, de l'état chimique et du potentiel écologique des eaux de surface pris en application des articles R. 212-10, R. 212-11 et R. 212-18 du code de l'environnement. Ministère de la Transition écologique et solidaire (2018). Journal officiel de la République française (JORF), N°TREL1819388A.

94 Guide technique relatif à l'évaluation de l'état des eaux de surface continentales (cours d'eau, canaux, plans d'eau). Ministère de l'Environnement, de l'Énergie et de la Mer (2019). 106 p. Disponible à l'adresse : https://www.eaufrance.fr/sites/default/files/2019-05/guide-reee-esc-2019-cycle3.pdf.

95 État des lieux 2019 du Bassin de la Seine et des cours d'eaux côtiers normands. Agence de l'eau Seine-Normandie (2020). 200 p.

96 Qualité de l'eau - Échantillonnage - Partie 6 : lignes directrices pour l'échantillonnage des rivières et des cours d'eau. Association française de normalisation (Afnor), International Organization for Standardization (Iso) (2016), NF EN ISO 5667-6.

97 Qualité de l'eau - Guide d'échantillonnage pour le suivi de la qualité des eaux dans l'environnement - Partie 1 : échantillonnage d'eau en rivières et canaux. Association française de normalisation (Afnor) (2019), FD T90-523-1.

98 Le prélèvement d'échantillons en rivière - Techniques d'échantillonnage en vue d'analyses physico-chimiques. Agence de l'eau Loire-Bretagne (2006). Guide technique. ISBN : 9782916869001.

99 Qualité de l'eau - Prélèvement des macro-invertébrés aquatiques en rivières peu profondes. Association française de normalisation (Afnor) (2016), NF T90-333.

100 Qualité de l'eau - Guide d'application de la norme expérimentale XP T90-388 (Traitement au laboratoire d'échantillons contenant des macro-invertébrés de cours d'eau). Association française de normalisation (Afnor) (2015), GA T90-788.

101 Circulaire DCE n° 2007/22 du 11 avril 2007 relative au protocole de prélèvement et de traitement des échantillons des invertébrés pour la mise en œuvre du programme de surveillance sur cours d'eau. Ministère de l'Écologie et du Développement durable (2007). Bulletin officiel du Ministère de l'Écologie, du Développement et de l'Aménagement durables. Vol. 12, N°DEVO0700215C.

102 Qualité de l'eau - Guide d'application de la norme NF T 90-333:2016 (Prélèvement des macro-invertébrés aquatiques en rivières peu profondes). Association française de normalisation (Afnor) (2017), FD T90-733.

103 Qualité de l'eau - Guide d'application de la norme expérimentale XP T90-333:2009 (prélèvement des macro-invertébrés aquatiques en rivières peu profondes). Association française de normalisation (Afnor) (2012), GA T90-733.

104 Guide technique d'accréditation - Analyses biologiques des milieux aquatiques - Révision 00. Comité français d'accréditation (Cofrac) (2018). N°LAB GTA 41. 15 p. Disponible à l'adresse : https://tools.cofrac.fr/documentation/LAB-GTA-41.

105 Qualité de l'eau - Échantillonnage, traitement et analyse de diatomées benthiques en cours d'eau et canaux. Association française de normalisation (Afnor) (2016), NF T 90 354.

106 Qualité de l'eau - Guide pour l'identification et le dénombrement des échantillons de diatomées benthiques de rivières et de lacs. Association française de normalisation (Afnor) (2014), NF EN 14407.

107 Qualité de l'eau - Guide pour l'échantillonnage en routine et le prétraitement des diatomées benthiques de rivières et de plans d'eau. Association française de normalisation (Afnor) (2014), NF EN 13946.

108 Décret n° 58-873 du 16 septembre 1958 déterminant le classement des cours d'eau en deux catégories (version consolidée au 26 décembre 1985). Ministère de l'Agriculture; Ministère des Travaux publics, des Transports et du Tourisme; Ministère de la Justice; Ministère de l'Intérieur (1985). Journal officiel de la République française (JORF).

109 Arrêté du 4 décembre 2012 établissant la liste des cours d'eau mentionnée au 1° du I de l'article L. 214-17 du code de l'environnement sur le bassin Seine-Normandie. Ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie (2012). Journal officiel de la République française (JORF), N°DEVL1242031A.

110 Protection des installations nucléaires de base contre les inondations externes (guide de l'ASN). Autorité de sûreté nucléaire (ASN) (2013). N°13. 44 p. Disponible à l'adresse : https://www.asn.fr/content/download/100753/733560/version/1/file/Guide-de-l-ASN-13.pdf.

111 Cartes géologiques. Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM) (2023). Consulté le 24/10/2023. Disponible à l'adresse : https://infoterre.brgm.fr/page/cartes-geologiques.

112 BD Alti® - Le modèle numérique de terrain (MNT) maillé qui décrit le relief du territoire français à moyenne échelle. Géoservices (2023). Consulté le 24/10/2023. Disponible à l'adresse : https://geoservices.ign.fr/bdalti.

113 Assainissement routier : guide technique. Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement (Cerema) (ex-SETRA) (2006). Les outils. ISBN : 2110946296.

114 Guide technique - Pollution d'origine routière : conception des ouvrages de traitement des eaux. Sétra (2007). 35 p. Disponible à l'adresse : https://www.cerema.fr/fr/centre-ressources/boutique/pollution-origine-routiere.

115 Guide technique - Chantiers routiers et préservation du milieu aquatique : management environnemental et solutions techniques. Sétra (2007). 122 p. Disponible à l'adresse : https://www.cerema.fr/fr/centre-ressources/boutique/chantiers-routiers-preservation-du-milieu-aquatique.

116 McDonald, D., Billy, V. de, Georges, N. Bonnes pratiques environnementales - Protection des milieux aquatiques en phase chantier. Agence française de la biodiversité (AFB) (2018). 152 p. Disponible à l'adresse : https://professionnels.ofb.fr/fr/doc-guides-protocoles/bonnes-pratiques-environnementales-protection-milieux-aquatiques-en-phase.

117 Mémento technique 2017 - Conception et dimensionnement des systèmes de gestion des eaux pluviales et de collecte des eaux usées : guide technique. Association scientifique et technique pour l'eau et l'environnement (Astee) (2017). 273 p. Disponible à l'adresse : https://www.astee.org/publications/memento-technique-2017/.

118 La gestion des eaux pluviales en région Grand Est - Note de doctrine. Préfet de la région Grand Est; Agence de l'eau Rhin-Meuse; Eau Seine Normandie; Agence de l'eau Rhône Méditerranée Corse; Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement (Cerema) (2020). 74 p. Disponible à l'adresse : https://www.grand-est.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/doctrine_pluviale_grand_est-compresse.pdf.

119 Scholtus, N., Leclerc, E., Donato, P. de, Morel, J.L., Simonnot, M.O. Eluto-frontal chromatography to simulate chemical weathering of COx by low-molecular-weight organic compounds and early pedogenesis processes. European Journal of Soil Science (2009). Vol. 60, N°1, pp.71–83.

120 Marty, N., Lach, A., Lerouge, C., Grangeon, S., Claret, F., Fauchet, C., Madé, B., Lundy, M., Lagroix, F., Tournassat, C., Tremosa, J. Weathering of an argillaceous rock in the presence of atmospheric conditions: a flow-through experiment and modelling study. Applied geochemistry (2018). Vol. 96, pp.252–263.

121 Tremosa, J., Debure, M., Narayanasamy, S., Redon, P.O., Jacques, D., Claret, F., Robinet, J.-C. Shale weathering: A lysimeter and modelling study for flow, transport, gas diffusion and reactivity assessment in the critical zone. Journal of Hydrology (2020). Vol. 587, pp.124925.

122 Dimensionnement de stations d'épuration : préconisations du Satese. Département de Seine-et-Marne; Satese (2019). 4 p. Disponible à l'adresse : https://www.ensemble77.fr/images/outils/DD/eau/Fiche_satese_dimentionnement_stations_epuration_2019.pdf.

123 Arrêté du 2 février 1998 relatif aux prélèvements et à la consommation d'eau ainsi qu'aux émissions de toute nature des installations classées pour la protection de l'environnement soumises à autorisation. Ministère de l'Aménagement du territoire et de l'Environnement (2018). Journal officiel de la République française (JORF), N°ATEP9870017A.

124 Système d'évaluation de la qualité de l'eau des cours d'eau : rapport de présentation SEQ-Eau (version 2). Agence de l'eau; Ministère de l'Écologie et du Développement durable (2003). 106 p. Disponible à l'adresse : http://oaidoc.eau-loire-bretagne.fr/exl-doc/IIB1346.pdf.

125 Arrêté du 11 janvier 2007 relatif aux limites et références de qualité des eaux brutes et des eaux destinées à la consommation humaine mentionnées aux articles R. 1321-2, R. 1321-3, R. 1321-7 et R. 1321-38 du code de la santé publique (version consolidée au 1er janvier 2023). Ministère de la Santé et des Solidarités (2023). Journal officiel de la République française (JORF), N°SANP0720201A.

126 Directives de qualité pour l'eau de boisson : 4e édition intégrant le premier additif. Organisation mondiale de la santé (OMS) (2017). ISBN : 78-92-4-254995-9.

127 Qualité de l'eau - Dosage de 15 hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) dans l'eau par HPLC avec détection par fluorescence après extraction liquide-liquide. Association française de normalisation (Afnor) (2004), NF EN ISO 17993.

128 Arrêté du 30 décembre 2022 modifiant l'arrêté du 11 janvier 2007 relatif aux limites et références de qualité des eaux brutes et des eaux destinées à la consommation humaine mentionnées aux articles R. 1321-2, R. 1321-3, R. 1321-7 et R. 1321-38 du code de la santé publique. Ministère de la Santé et de la Prévention (2022). Journal officiel de la République française (JORF), N°SPRP2221010A.

129 Étude de restructuration du SIAEP de la région d'Échenay pour une alimentation depuis les sources de Thonnance (rapport d'étude, version définitive). Andra (2018). Document N°CMHM/IT-CA-20-0036.

130 Forage d'alimentation en eau potable de Gondrecourt-le-Château : assistance à maîtrise d'ouvrage pour le suivi hydrogéologique des essais de pompage - Rapport d'interprétation des essais. Andra (2018). Document N°CMHM/IT-CA-18-0089.

131 Fradet, P. Procédure de définition des périmètres de protection des captages AEP d'Échenay - Révision - Source "Massonfosse" / BSS n° 0265-7X-0007/AEP Forage "1977" / BSS n° 0265-7X-0030/F2. Département de la Haute-Marne; Commune d'Échenay (2016). N°16-52-HPP-510. 71 p.

132 Arrêté préfectoral portant déclaration d'utilité publique de la dérivation et de la protection des eaux captées sur le territoire de la commune de Gondrecourt-le-Château et portant cessibilité des terrains à acquérir au bénéfice du SIVOM de la région de Gondrecourt-le-Château. Préfet de la Meuse (1983).

133 Consultation des données flore Grand Est. Conservatoire botanique d'Alsace (2021). Consulté le 01/08/2021. Disponible à l'adresse : http://www.conservatoire-botanique-alsace.fr/connaissance-de-la-flore-et-des-habitats/consultation-donnees-flore/.

134 Délégation Champagne-Ardenne. Conservatoire botanique national du Bassin parisien (CBNBP) (2021). Consulté le 02/08/2021. Disponible à l'adresse : https://cbnbp.mnhn.fr/cbnbp/delegation/champagne.jsp.

135 Schwaab, F., Knochel, A. Connaître et protéger les chauves-souris de Lorraine. Commission de protection des eaux, du patrimoine, de l'environnement, du sous-sol et des Chiroptères (CPEPESC) Lorraine (2009). ISBN : 978-2953300604.

136 Carnino, N. État de conservation des habitats d'intérêt communautaire à l'échelle du site – Méthode d'évaluation des habitats forestiers. Museum national d'histoire naturelle (MNHN); Office national des forêts (ONF) (2009). 76 p. Disponible à l'adresse : https://www.tela-botanica.org/wp-content/uploads/2017/03/etatdeconservationhabitatsinteretcommunautaire_Carnino_2009_methode_EC_hab_foret.pdf.

137 Catalogue de la flore vasculaire de Champagne-Ardenne. Conservatoire botanique national du Bassin parisien (CBNBP) (2016). 19 p. Disponible à l'adresse : http://cbnbp.mnhn.fr/cbnbp/ressources/catalogues/Notice%20du%20catalogue%20de%20la%20flore%20vasculaire%20de%20Champagne-Ardenne%202016%20_Taxref%207.pdf.

138 Directive 92/43/CEE du Conseil du 21 mai 1992 concernant la conservation des habitats naturels ainsi que de la faune et de la flore sauvages (version consolidée au 1er juillet 2013). Conseil des communautés européennes (2013). Journal officiel des Communautés européennes (JOCO), N°CELEX:31992L0043.

139 Directive 2006/105/CE du Conseil du 20 novembre 2006 portant adaptation des directives 73/239/CEE, 74/557/CEE et 2002/83/CE dans le domaine de l'environnement, en raison de l'adhésion de la Bulgarie et de la Roumanie (version consolidée au 1er janvier 2007). Conseil de l'Union européenne (2007). Journal officiel de l'Union européenne, N°CELEX:02006L0105.

140 Arrêté du 20 janvier 1982 fixant la liste des espèces végétales protégées sur l'ensemble du territoire (version consolidée au 8 juin 2013). Ministère de l'Environnement (2013). Journal officiel de la République française (JORF).

141 Arrêté du 3 janvier 1994 relatif à la liste des espèces végétales protégées en région Lorraine complétant la liste nationale. Ministère de l'Agriculture et de la Pêche; Ministère de l'Environnement (1994). Journal officiel de la République française (JORF), N°ENVN9430004A.

142 Arrêté du 8 février 1988 relatif à la liste des espèces végétales protégées en région Champagne-Ardenne complétant la liste nationale. Ministère des Affaires sociales et de l'Emploi; Ministère de l'Agriculture; Ministère de l'Équipement, du Logement, de l'Aménagement du territoire, chargé de l'Environnement (1988). Journal officiel de la République française (JORF), N°ENVN8800025A, pp.3241-3242.

143 Listes rouges régionales. Direction régionale de l'environnement, de l'aménagement et du logement (DREAL) Grand Est; Préfecture de la région Grand Est (2019). Consulté le 16/06/2020. Disponible à l'adresse : http://www.grand-est.developpement-durable.gouv.fr/listes-rouges-regionales-a18396.html.

144 Liste rouge régionale de la flore vasculaire de Lorraine - Évaluation du risque de disparition selon la méthodologie et la démarche de l'UICN. Conservatoire botanique national du Nord-Est (2015). 16 p. Disponible à l'adresse : http://www.polelorrain-cbnne.fr/download.php?f=cHVibGljYXRpb25z-bGlzdGVyb3VnZV9mbG9yZXZhc2N1bGFpcmVfbG9ycmFpbmUucGRm.

145 Liste des espèces déterminantes de Lorraine. Conseil scientifique régional du patrimoine naturel (CSRPN) Lorraine; Direction régionale de l'environnement, de l'aménagement et du logement (DREAL) Grand Est (2015). Disponible à l'adresse : https://www.grand-est.developpement-durable.gouv.fr/IMG/xlsx/especes_habitats_determinants_znieff_20151113.xlsx.

146 Wegnez, J. Liste hiérarchisée des plantes exotiques envahissantes (PEE) d'Île-de-France - Version 2.0. Conservatoire botanique national du Bassin parisien (CBNBP) délégation Ile-de-France (2018). 45 p. Disponible à l'adresse : https://www.ecophyto-pro.fr/data/cbnbp_pee_idf_2018_1_compressed.pdf.

147 Directive 2009/147/CE du Parlement européen et du Conseil du 30 novembre 2009 concernant la conservation des oiseaux sauvages (version consolidée au 26 juin 2019). Parlement européen; Conseil de l'Union européenne (2019). Journal officiel de l'Union européenne, N°CELEX:02009L0147.

148 Circulaire du 21 janvier 2009 relative aux frayères et aux zones de croissance ou d'alimentation de la faune piscicole. Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement durable et de l'Aménagement du territoire; Ministère du Logement (2009). Bulletin officiel du Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement durable et de l'Aménagement du territoire, N°DEVO0902166C.

149 Loi n° 92-3 du 3 janvier 1992 sur l'eau. Assemblée nationale; version en vigueur au 1er juillet 1996 (Sénat) (1992). Journal officiel de la République française (JORF), N°ENVX9100061L.

150 Loi n° 2019-773 du 24 juillet 2019 portant création de l'Office français de la biodiversité et de la chasse, modifiant les missions des fédérations des chasseurs et renforçant la police de l'environnement. Assemblée nationale; Sénat (2019). Journal officiel de la République française (JORF), N°TREL1827740L.

151 Arrêté du 24 juin 2008 précisant les critères de définition et de délimitation des zones humides en application des articles L. 214-7-1 et R. 211-108 du code de l'environnement (version consolidée au 25 novembre 2009). Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement durable et de l'Aménagement du territoire; Ministère de l'Agriculture et de la Pêche (2009). Journal officiel de la République française (JORF), N°DEVO0813942A.

152 Circulaire du 18 janvier 2010 relative à la délimitation des zones humides en application des articles L.214-7-1 et R.211-108 du code de l'environnement. Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement durable et de la Mer en charge des Technologies vertes et des Négociations sur le climat; Ministère de l'Alimentation, de l'Agriculture et de la Pêche (2010). Bulletin officiel du Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement durable et de la Mer. Vol. 2010/2, N°DEVO1000559C.

153 Arrêté du 1er octobre 2009 modifiant l'arrêté du 24 juin 2008 précisant les critères de définition et de délimitation des zones humides en application des articles L. 214-7-1 et R. 211-108 du code de l'environnement. Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement durable et de la Mer (2009). Journal officiel de la République française (JORF), N°DEVO0922936A.

154 Bensettiti, F., Rameau, J.-C., Chevallier, H. Connaissance et gestion des habitats et des espèces d'intérêt communautaire - Tome 1 : habitats forestiers. La Documentation Française (2001). Cahiers d'habitats Natura 2000. Vol. 1. ISBN : 2-11-004700-3.

155 Bensettiti, F., Gaudillat, V., Haury, J.K. Connaissance et gestion des habitats et des espèces d'intérêt communautaire - Tome 3 : habitats humides. La Documentation Française (2002). Cahiers d'habitats Natura 2000. ISBN : 2-11-005009-8.

156 Bensettiti, F., Gaudillat, V., Malengreau, D., Quéré, E. "Cahiers d'habitats" Natura 2000 - Connaissance et gestion des habitats et des espèces d'intérêt communautaire - Tome 6 - Espèces végétales. La Documentation Française (2002). ISBN : 2-11-004863-8.

157 Bensettiti, F., Gaudillat, V. Connaissance et gestion des habitats et des espèces d'intérêt communautaire - Tome 7 : espèces animales. La Documentation Française (2002). Cahiers d'habitats Natura 2000. ISBN : 2-11-004975-8.

158 Bensettiti, F., Herard-Logereau, K., Van Es, J., Balmain, C. Connaissance et gestion des habitats et des espèces d'intérêt communautaire - Tome 5 : habitats rocheux. La Documentation Française (2004). Cahiers d'habitats Natura 2000. ISBN : 2-11-005245-7.

159 Bensettiti, F., Bioret, F., Roland, J., Lacoste, J.-P. Connaissance et gestion des habitats et des espèces d'intérêt communautaire - Tome 2 : habitats côtiers. La Documentation Française (2004). Cahiers d'habitats Natura 2000. ISBN : 2-11-005192-2.

160 Bensettiti, F., Boullet, V., Chavaudret-Laborie, C., Deniaud, J. Connaissance et gestion des habitats et des espèces d'intérêt communautaire - Tome 4 : habitats agropastoraux. La Documentation Française (2005). Cahiers d'habitats Natura 2000. Vol. 1 & 2. ISBN : 2-11-005216-3.

161 La liste rouge des espèces menacées en France - Flore vasculaire de France métropolitaine. Union internationale pour la conservation de la nature (UICN); Museum national d'histoire naturelle (MNHN); Agence française de la biodiversité (AFB); Fédération conservatoires botaniques nationaux (FCBN) (2018).

162 Bilz, M., Kell, S., Maxted, N., Lansdown, R. European Red List of Vascular Plants. Office for official publications of the European Communities; Union internationale pour la conservation de la nature (UICN) (2011). Union internationale pour la conservation de la nature (IUCN) Red List of Threatened Species - Regional Assessment. ISBN : 978-92-79-20199-8.

163 La liste rouge des espèces menacées en France - Orchidées de France métropolitaine. Union internationale pour la conservation de la nature (UICN); Museum national d'histoire naturelle (MNHN); Fédération conservatoires botaniques nationaux (FCBN); Société française d'ophtalmologie (SFO) (2010).

164 Liste rouge de la flore vasculaire Champagne-Ardenne. Union internationale pour la conservation de la nature (UICN) (2018).

165 Atlas de la flore Lorraine. Vent d'Est (2013). ISBN : 979-1090826151.

166 Kalkman, V., Boudot, J.-P., Bernard, R., Conze, K.-J., Knijf, G. de, Dyatlova, E., Ferreira, S., Jovic, M., Ott, J., Riservato, E., Sahlen, G. European Red List of dragonflies. Office for official publications of the European Communities (2010). ISBN : 978-92-79-14153-9.

167 La liste rouge des espèces menacées en France - Papillons de jour de France métropolitaine. Union internationale pour la conservation de la nature (UICN); Museum national d'histoire naturelle (MNHN); Office pour les insectes et leur environnement (OPIE); Société entomologique de France (SEF) (2014).

168 Liste rouge de Champagne-Ardenne - Insectes. Direction de l'environnement (Diren) Champagne-Ardenne (2007).

169 Nieto, A., Alexander, K. European Red List of saproxylic beetles. Office for official publications of the European Communities; Union internationale pour la conservation de la nature (UICN) (2010). ISBN : 978-92-79-14152-2.

170 La liste rouge des espèces menacées en France - Libellules de France métropolitaine. Union internationale pour la conservation de la nature (UICN); Museum national d'histoire naturelle (MNHN) (2016).

171 Méthodologie régionale de constitution des ZNIEFF en Lorraine dans le cadre de la deuxième génération du programme national. Secrétariat scientifique de la zone naturelle d'intérêt écologique, faunistique et floristique (ZNIEFF); Conseil scientifique régional du patrimoine naturel (CSRPN) Lorraine (2012). 28 p. Disponible à l'adresse : http://www.grand-est.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/methodo_znieff_lorraine.pdf.

172 Liste rouge de Champagne-Ardenne - Amphibiens. Direction de l'environnement (Diren) Champagne-Ardenne (2007).

173 Hochkirch, A., Nieto, A., Garcia Criado, M., Calix, M., Braud, Y., Buzzetti, F. European Red List of Grasshoppers, Crickets and Bush-crickets. Office for official publications of the European Communities; Union internationale pour la conservation de la nature (UICN) (2016). ISBN : 978-92-79-61751-5.

174 Sardet, E., Defaut, B. Les orthoptères menacés en France - Liste rouge nationale et listes rouges par domaines biogéographiques. Matériaux orthoptériques et entomocénotiques (2004). Vol. 9, pp.125-137.

175 Temple, H., Cox, J., Neil, A. European Red List of reptiles. Office for official publications of the European Communities; Union internationale pour la conservation de la nature (UICN) (2009). ISBN : 978-92-79-11357-4.

176 La liste rouge des espèces menacées en France. Union internationale pour la conservation de la nature (UICN); Museum national d'histoire naturelle (MNHN) (2015).

177 Temple, H., Cox, J., Neil, A. European Red List of amphibians. Office for official publications of the European Communities; Union internationale pour la conservation de la nature (UICN) (2009). ISBN : 978-92-79-11356-7.

178 Liste rouge de Champagne-Ardenne - Reptiles. Direction de l'environnement (Diren) Champagne-Ardenne (2007).

179 Liste rouge des amphibiens et reptiles de Lorraine. Union internationale pour la conservation de la nature (UICN); Conservatoire d'espaces naturels de Lorraine; Lorraine information naturaliste (Lorinat); Commission reptiles et amphibiens de Lorraine (2016).

180 European Red List of Birds. Office for official publications of the European Communities; Union internationale pour la conservation de la nature (UICN) (2015). ISBN : 978-92-79-47450-7.

181 La liste rouge des espèces menacées en France - Oiseaux de France métropolitaine. Union internationale pour la conservation de la nature (UICN); Museum national d'histoire naturelle (MNHN) (2016).

182 Liste rouge de Champagne-Ardenne - Oiseaux nicheurs. Direction de l'environnement (Diren) Champagne-Ardenne (2007).

183 La liste rouge des espèces menacées en France - Mammifères de France métropolitaine. Union internationale pour la conservation de la nature (UICN); Museum national d'histoire naturelle (MNHN) (2017).

184 Liste rouge de Champagne-Ardenne - Mammifères. Direction de l'environnement (Diren) Champagne-Ardenne (2007).

185 Beresford, N., Brown, J., Copplestone, D., Garnier-Laplace, J., Howard, B., Larsson, C.M., Oughton, D., Pröhl, G., Zinger, I. D-ERICA: an integrated approach to the assessment and management of environmental risks from ionising radiation - Description of purpose, methodology and application - ERICA (Contract Number : FI6R-CT-2004-508847). Commission européenne (2007). N°FI6R-CT-2004-508847. 82 p. Disponible à l'adresse : https://wiki.ceh.ac.uk/download/attachments/115017395/D-Erica.pdf.

186 Beaugelin-Seiller, K., Garnier-Laplace, J. Actualités internationales sur la radioprotection de l'environnement : état de l'art des connaissances, des méthodes et des pratiques. Radioprotection (2016). Vol. 51, N°4, pp.231-235.

187 Guide de la méthode nationale d'évaluation des fonctions des zones humides. Office national de l'eau et des milieux aquatiques (Onema) (2016). 191 p. Disponible à l'adresse : http://www.zones-humides.org/sites/default/files/images/methode%20ZH/guidezh-complet.pdf.

188 Guide méthodologique pour l'évaluation du risque radiologique pour la faune et la flore sauvages - Concepts, éléments de base et mise en œuvre au sein de l'étude d'impact. Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN); Autorité de sûreté nucléaire (ASN) (2021). N°IRSN/2021-00838. 165 p. Disponible à l'adresse : https://www.irsn.fr/FR/expertise/rapports_expertise/Documents/environnement/IRSN_2021-00838-Guide-methodologique-evaluation-risque-radiologique-pour-faune-et-flore-sauvages.pdf.

189 Andersson, P., Garnier-Laplace, J., Beresford, N., Copplestone, D., Howard, B., Howe, P., Oughton, D., Whitehouse, P. Protection of the environment from ionising radiation in a regulatory context (protect): proposed numerical benchmark values. Journal of Environmental Radioactivity (2009). Vol. 100, N°12, pp.1100-1108.

190 Prospective radiological environmental impact assessment for facilities and activities. International Atomic Energy Agency (IAEA) (2018). N°GSG-10. 104 p.

191 Lignes directrices nationales sur la séquence éviter, réduire et compenser les impacts sur les milieux naturels. Ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie (2013). 230 p. Disponible à l'adresse : http://www.trameverteetbleue.fr/sites/default/files/ref_-_lignes_directrices-2-1.pdf.

192 Andreadakis, A., Bigard, C., Delille, N., Sarrazin, F., Schwab, T. Approche standardisée du dimensionnement de la compensation écologique - Guide de mise en œuvre. Office français de la biodiversité (OFB); Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement (Cerema); Conseil général de l'environnement et du développement durable; Ministère de la Transition écologique (2021). 149 p. Disponible à l'adresse : https://www.documentation.eauetbiodiversite.fr/notice/approche-standardisee-du-dimensionnement-de-la-compensation-ecologique-guide-de-mise-en-oeuvre0.

193 Étapes de l'évaluation des incidences Natura 2000 (EIN). Direction régionale de l'environnement, de l'aménagement et du logement (DREAL) Grand Est (2018). 1 p. Disponible à l'adresse : https://www.grand-est.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/logigramme_et_compo_dossier.pdf.

194 Décret n° 2021-837 du 29 juin 2021 portant diverses réformes en matière d'évaluation environnementale et de participation du public dans le domaine de l'environnement. Premier ministre (2021). Journal officiel de la République française (JORF), N°TRED2031037D.

AGENCE NATIONALE POUR LA GESTION DES DÉCHETS RADIOACTIFS
1-7, rue Jean-Monnet
92298 Châtenay-Malabry cedex
www.andra.fr

© Andra • 2025 • Conception-réalisation : www.kazoar.fr • Crédit illustration : Andra