



Identification des lieux d'échanges potentiels « Eau de surface / Eau souterraine » à l'échelle du bassin Artois-Picardie

Rapport final

BRGM/RP-69440-FR

Juin 2020



Etablissement public du Ministère chargé du développement durable



Identification des lieux d'échanges potentiels « Eau de surface / Eau souterraine » à l'échelle du bassin Artois-Picardie

Rapport final

BRGM/RP-69440-FR

Juin 2020

Étude réalisée dans le cadre du Marché Recherche et Développement 18-RED-02

A. Brugeron, E. Malcuit, L. Gourcy, S. Pinson, B. Bourguine

Vérificateur :

Nom : Delphine ALLIER / Chrystelle AUTERIVES

Fonction : Hydrogéologues

Date : 02-06-2020

Signature :

Approbateur :

Nom : Pierre PANNET

Fonction : Directeur DAT/LIL

Date : 29/06/2020

Signature :

Le système de management de la qualité et de l'environnement est certifié par AFNOR selon les normes ISO 9001 et ISO 14001.

Contact : qualite@brgm.fr



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Mots-clés : Eau Souterraine, Eau de surface, Interaction, géostatistique, indicateur géochimique, zone non saturée, synthèse bibliographique, DCE

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

Brugeron A., Malcuit E., Gourcy L., Pinson S., Bourgine B. (2020) – Identification des lieux d'échanges potentiels « Eau de surface / Eau souterraine » à l'échelle du bassin Artois-Picardie. Rapport final. BRGM/RP-69440-FR, 186 p., 111 ill., 24 tabl., 2 ann.

Synthèse

Dans le cadre de l'état des lieux 2019 pour la Directive Cadre sur l'Eau (DCE), l'évaluation du bon état des masses d'eau souterraine s'appuie sur un certain nombre de tests dont le test « eaux de surface ». Ce test, commun à l'évaluation de l'état quantitatif et de l'état chimique des masses d'eau souterraine, a comme objectif de vérifier la non-dégradation d'une eau de surface par l'état des eaux souterraines.

Pour permettre une bonne mise en pratique de ce test, il est nécessaire d'avoir une bonne connaissance préalable des zones favorisant potentiellement des échanges entre les eaux souterraines et les eaux de surface. En Artois-Picardie, de nombreuses études menées ces dernières années, notamment de modélisation, ont permis d'avoir des informations dans ce sens mais aucune capitalisation ni valorisation n'a jusqu'alors été réellement entreprise.

C'est pour répondre à ce besoin que le BRGM et l'Agence de l'Eau Artois-Picardie se sont associés afin d'identifier les secteurs à enjeux du point de vue des échanges « Eaux souterraines / Eaux de surface » (ESO/ESU) en vue de mettre en application ce test « eau de surface » en Artois-Picardie.

Pour atteindre cet objectif, différentes approches ont été menées en parallèle :

- réalisation d'un inventaire bibliographique et construction d'une base de données associée,
- mise en œuvre d'une approche multicritère innovante mêlant géomatique et géostatistique pour déterminer les zones où le potentiel d'interaction ESO/ESU est le plus fort,
- identification d'indicateurs hydrogéochimiques les plus pertinents pour cibler les tronçons de cours d'eau bénéficiant du plus fort soutien par les eaux souterraines.

Une analyse des résultats de ces différentes approches a été menée sur les masses d'eau de surface présentant un état « moins que bon » (« Moyen », « Médiocre » ou « Mauvais ») selon l'Etat des lieux 2019. Elle a permis de sélectionner 7 masses d'eau de surface dégradées pour lesquelles le soutien des eaux de surface par les eaux souterraines apparaît net : la Lys amont et moyenne (AR31, AR33, AR36), la Souchez (AR58), la Scarpe rivière amont (AR43), la Selle/Escaut (AR50) et le Scardon (AR47). Ces résultats constituent un premier listing des zones à enjeux pour cette problématique et il serait intéressant d'y mener des investigations complémentaires plus localisées afin de caractériser plus finement ces interactions ESO/ESU.

Sommaire

1. Introduction	15
2. Etat des connaissances actuelles sur les relations ESO/ESU du bassin.....	17
2.1. RAPPEL SUR LA TYPOLOGIE DES RELATIONS ESO/ESU.....	17
2.2. INVENTAIRE REALISE DANS LE BASSIN ARTOIS-PICARDIE.....	19
2.3. CONSTRUCTION DE LA BASE DE DONNEES SUR LES ECHANGES ESO/ESU EN ARTOIS-PICARDIE	22
2.3.1. Des concepts clés reliés entre eux et caractérisés d'après des lexiques.	22
2.3.2. Modalités de création de la géodatabase	24
2.4. SYNTHESE DES DOCUMENTS INVENTORIES DANS LA GEODATABASE .	28
2.4.1. Références bibliographiques implémentés en base et chiffres clés.....	28
2.4.2. Exemples de valorisations cartographiques	28
2.4.3. Recommandations et perspectives d'utilisation	33
3. Approche géomatique et géostatistique pour identifier les zones potentielles d'interaction ESO/ESU	35
3.1. PRINCIPES	35
3.2. PREPARATION DES DONNEES SOURCE	39
3.2.1. Données tirées des bases nationales des points d'eau	39
3.2.2. Données complémentaires	51
3.3. DETERMINATION DES UNITES FONCTIONNELLES	56
3.3.1. Les données SIG	57
3.3.2. Résultat du croisement	59
3.4. CALCUL DES SURFACES PIEZOMETRIQUES BASSES EAUX ET HAUTES EAUX 60	
3.4.1. Données disponibles.....	60
3.4.2. Carte géologique	62
3.4.3. Contrôle de cohérence du premier jeu de données et correction de ce jeu de données	63
3.4.4. Interpolation de la cote Basses Eaux à partir du jeu de données corrigé	66
3.4.5. Interpolation de la cote Hautes Eaux à partir du jeu de données corrigé.	70
3.4.6. Calcul des grilles d'épaisseur de ZNS en Hautes eaux et Basses Eaux..	75
3.5. APPROCHE MULTICRITERES ET PREMIERES CONCLUSIONS	81
3.5.1. Critère « Synthèse Hautes Eaux / Basses Eaux de l'épaisseur de la zone non saturée ».....	81

3.5.2. Critère « Cartographie des zones potentiellement humides » (Berthier <i>et al.</i> , 2014)	84
3.5.3. Critère « IDPR »	86
3.5.4. Critère « Entités hydrogéologiques BDLISA affleurantes imperméables »	88
3.5.5. Croisement des critères et résultat final de l'approche géomatique	89
4. Approche hydrogéochimique et indicateurs qualité	95
4.1. OBJECTIF	95
4.2. LIMITES EVENTUELLES DE LA METHODE	95
4.3. METHODOLOGIE PROPOSEE	96
4.3.1. Hydrogéochimie : connaissances actuelles du lien ESO vers ESU.....	96
4.3.2. Qualité des eaux souterraines en Artois Picardie	98
4.3.3. Paramètres potentiellement intéressants à cibler dans cette étude	99
4.3.4. Pistes potentielles retenues pour cette étude	102
4.3.5. Liste des paramètres retenus, à extraire des bases de données qualité des eaux souterraines (ADES) et des eaux superficielles (Naiades).....	106
4.4. DONNEES UTILISEES, MISE EN FORME ET TRAITEMENT DES DONNEES	106
4.4.1. Description des données ESO extraites de la base ADES.....	106
4.4.2. Description des données ESU extraites de la base NAIADES	109
4.4.3. Mise en forme et traitement des données	111
4.4.4. Prises en compte des valeurs seuil ESO et ESU	111
4.5. RESULTATS DES DONNEES AUX POINTS D'EAU.....	112
4.5.1. Paramètres physico-chimiques <i>in situ</i>	112
4.5.2. Eléments majeurs et traces	123
4.5.3. Métaux lourds : nickel et chrome	140
4.5.4. Composés azotés.....	144
4.5.5. Substances phytosanitaires interdites depuis 2003 (et métabolites)	150
4.5.6. Autres substances phytosanitaires	153
4.5.7. Perchlorate	154
4.6. INDICATEURS QUALITE PROPOSES ET CONCLUSIONS DES APPORTS DE L'HYDROCHIMIE	156
4.6.1. Les indicateurs	156
4.6.2. Les apports de l'hydrochimie sur la connaissance des échanges nappes-rivières	159
4.6.3. Recommandations.....	163
5. Comparaison des résultats et localisation des zones à enjeux.....	165
5.1. QUALITE DES EAUX DE SURFACE EN ARTOIS-PICARDIE.....	165
5.1.1. Etat écologique.....	165
5.1.2. Etat chimique.....	167

5.1.3. 1 ^{ère} sélection des masses d'eau de surface pouvant contenir des zones à enjeux ESO/ESU.....	167
5.2. COMPARAISON DES RESULTATS DES DIFFERENTES APPROCHES ET METHODOLOGIE DE SELECTION DES ZONES D'INTERET	171
5.3. ZONES D'INTERET	172
5.3.1. FRAR36 : La Lys Rivière, de sa source jusqu'à Aire-sur-la-Lys, et la Melde 172	
5.3.2. FRAR31 & FRAR33 : La Lys canalisée.....	174
5.3.3. FRAR58 : La Souchez	175
5.3.4. FRAR43 : La Scarpe rivière, de sa source jusqu'à Arras.....	177
5.3.5. FRAR50 : La Selle, affluent de l'Escaut	178
5.3.6. FRAR47 : Le Scardon.....	179
6. Conclusion.....	181
7. Bibliographie	183

Liste des illustrations

Illustration 1 – Principales configurations de la typologie des échanges entre une nappe et une rivière (Auterives et al., 2017, d'après le guide interaction nappe/rivière de l'OFB)	17
Illustration 2 – Sens des échanges nappe.cours d'eau : à gauche, la nappe alimente la rivière / à droite, la rivière alimente la nappe (Brugeron et al., 2014, d'après Winter et al., 1998).....	18
Illustration 3 – Sens des échanges simulés entre nappes et rivières en octobre 2009 sur l'ensemble du modèle en haut et dans la zone affinée, en bas (Bessière et al, 2015)	20
Illustration 4 – Schéma des relations entre les eaux souterraines et les zones humides dans la vallée de la Maye (Bault et al., 2017)	21
Illustration 5 – Extrait d'une carte localisant les zones favorisant des échanges ESO/ESU dans le cadre de l'État initial du SAGE de la Sensée (Partie 3: connaissance des milieux)	21
Illustration 6 – Entités hydrogéologiques du référentiel BDLISA version 2 dans le bassin Artois-Picardie, représentés selon leur nature	25
Illustration 7 – Localisation des tronçons SYRAH et des autres tronçons identifiés dans la BD Carthage au sein du bassin Artois-Picardie	26
Illustration 8 – Représentation des interfaces ESO/ESU selon le nombre d'échanges ESO/ESU caractérisés.....	29
Illustration 9 – Représentation des interfaces ESO/ESU selon la qualification de l'échange ESO/ESU associé (nombre d'interface identifié entre parenthèse).....	30
Illustration 10 – Représentation des interfaces ESO/ESU selon la caractérisation temporelle des échanges ESO/ESU associés	31

Illustration 11 – Représentation des interfaces ESO/ESU selon le sens global du flux d'échanges ESO/ESU associés	32
Illustration 12 – Représentation des interfaces ESO/ESU selon le niveau de fiabilité du diagnostic utilisé pour caractériser les échanges.....	33
Illustration 13 – Schémas (A) d'un cours d'eau s'écoulant sur un substratum imperméable et (B) d'un cours d'eau s'écoulant sur un substratum perméable mais perché par rapport à la première nappe rencontrée (Datry et al., 2008, d'après Malard et al., 2000)....	36
Illustration 14 – Schémas représentant deux cas possible de flux d'eau, soit (A) vers une zone humide, soit (B) vers la nappe sous-jacente (Winter et al., 1998).....	36
Illustration 15 – Sens des échanges nappe/cours d'eau : à gauche, la nappe alimente la rivière / à droite, la rivière alimente la nappe (Winter et al.,1998)	37
Illustration 16 – Cours d'eau perché, sans liaison hydraulique avec la nappe sous-jacente mais l'alimentant par ses pertes par infiltration (Winter et al., 1998)	37
Illustration 17 – Variation spatiale du sens des échanges (d'après Banton et Bangoy,1997)	38
Illustration 18 – Colmatage du lit et des berges d'un cours d'eau empêchant les échanges avec la nappe (d'après Castany et Margat, 1977)	38
Illustration 19 – Schéma d'interconnexion entre BSS, BSS EAU et ADES.....	40
Illustration 20 – Localisation des piézomètres ADES et des points d'eau de la BSS EAU comportant au moins une mesure piézométrique (date de l'extraction : février 2019).....	41
Illustration 21 - Représentation des piézomètres ADES et des points d'eau de la BSS EAU selon le critère « connaissance du réservoir »	43
Illustration 22 – Représentation des piézomètres ADES et des points d'eau de la BSS EAU selon le critère « précision altimétrique »	44
Illustration 23 – Représentation des piézomètres ADES et des points d'eau de la BSS EAU selon le critère « nombre de mesures par an ».....	45
Illustration 24 – Localisation des variogrammes calculés en 2016 et caractérisation selon leur cyclicité.....	46
Illustration 25 – Représentation des piézomètres ADES et des points d'eau de la BSS EAU selon le critère « adéquation entre longueur de chronique et cyclicité de la nappe captée »	47
Illustration 26 – Identification des mois pour lesquels la valeur piézométrique maximale a été atteinte	49
Illustration 27 - Identification des mois pour lesquels la valeur piézométrique minimale a été atteinte	50
Illustration 28 – Courbes piézométriques de la nappe libre de la craie (équidistance 5m) – Hautes eaux du printemps 2001 (Caous et al., 2001).....	52
Illustration 29 – Sélection des points au droit des isolignes de la carte piézométrique Basses Eaux 1997	53
Illustration 30 – Isolignes et points de mesure de la carte piézométrique Basses Eaux 1997 du Landénien (d'après Caous et al., 1997).....	54
Illustration 31 – Carte de la localisation des têtes de bassin du réseau hydrographique	55
Illustration 32 – Localisation des sources situées à moins de 25 m d'un cours d'eau dans le secteur du Boulonnais	56
Illustration 33 – Entités BDLISA niveau 3 (ordre 1 et 2) utilisées pour la création des unités fonctionnelles	57

Illustration 34 – Zones hydrographiques de la BD Carthage (2013) utilisés pour la création des unités fonctionnelles	58
Illustration 35 – Les masses d’eau souterraine à l’affleurement (référentiel version « Etat des lieux 2019 »).....	59
Illustration 36 – Les unités fonctionnelles du bassin Artois Picardie.....	60
Illustration 37 – Répartition des données de Basses Eaux (coordonnées X en abscisses, coordonnées Y en ordonnées : RGF Lambert 93)	61
Illustration 38 – Répartition des données de Hautes Eaux (coordonnées X en abscisses, coordonnées Y en ordonnées : RGF Lambert 93)	62
Illustration 39 – MNT, carte géologique au million et contour de la zone d’étude.....	63
Illustration 40 – Ajustement du variogramme des données Basses eaux (jeu de données initial) en ignorant l’effet de pépite	64
Illustration 41 – Variogramme des données Basses eaux du jeu de données initial (en noir) et variogramme après élimination de 224 données « non robustes ».....	64
Illustration 42 – Variogramme des données Hautes eaux du jeu de données initial (en noir) et variogramme après élimination de 309 données « non robustes ».....	65
Illustration 43 – Variogrammes de la cote piézo Basses Eaux selon le niveau de fiabilité des points	66
Illustration 44 - Basses Eaux. Comparaison des variogrammes du Jeu 1 et du Jeu 2.....	67
Illustration 45 - Variogramme de la cote piézométrique Basses Eaux et son ajustement	68
Illustration 46 – Cote piézométrique interpolée - Basses Eaux.....	69
Illustration 47 – Carte de l’écart-type d’interpolation sur la cote piézométrique – Basses Eaux	70
Illustration 48 - Variogramme de la cote piézométrique Hautes Eaux selon le niveau de fiabilité des points	72
Illustration 49 – Variogramme de la cote piézométrique Hautes Eaux et son ajustement.....	73
Illustration 50 – Cote piézométrique interpolée – Hautes Eaux	74
Illustration 51 – Carte de l’écart-type d’interpolation sur la cote piézométrique – Hautes Eaux.	75
Illustration 52 – Grille finale de l’épaisseur de la zone non saturée sur la bassin Artois-Picardie en période de basses eaux et au pas de 25 m.....	76
Illustration 53 – Grille finale de l’épaisseur de la zone non saturée sur la bassin Artois-Picardie en période de hautes eaux et au pas de 25 m	77
Illustration 54 – Carte représentant l’écart-type d’interpolation en mètres (à gauche) et la note de fiabilité moyenne des points (à droite) utilisés pour l’interpolation de la grille d’épaisseur de zone non saturée en situation de Hautes Eaux	78
Illustration 55 - Carte représentant l’écart-type d’interpolation en mètres (à gauche) et la note de fiabilité moyenne des points (à droite) utilisés pour l’interpolation de la grille d’épaisseur de zone non saturée en situation de Basses Eaux.....	79
Illustration 56 – Représentation de l’indice de confiance global sur l’interpolation de l’épaisseur de ZNS en situation de Hautes Eaux (à gauche) et Basses Eaux (à droite).....	80
Illustration 57 – Représentation des secteurs où la cote piézométrique interpolée en basses eaux est nettement supérieures à celle de hautes eaux et comparaison avec les secteurs identifiés comme d’indice de confiance faible à très faible.....	81
Illustration 58 – Zoom sur une unité fonctionnelle et représentation des classes d’épaisseur de ZNS comprises à l’intérieur (à gauche, situation de Hautes Eaux / à droite, situation de Basses Eaux).....	82

Illustration 59 – Représentation des classes globales par unités fonctionnelles pour le critère « Synthèse Hautes Eaux / Basses Eaux de l'épaisseur de la zone non saturée »	83
Illustration 60 – Localisation des zones présentant des amplitudes importantes entre Hautes Eaux et Basses Eaux	84
Illustration 61 – Cartographie des zones potentiellement humides dans le bassin Artois-Picardie (d'après Berthier et al., 2014)	85
Illustration 62 – Représentation des zones potentiellement humides de l'INRA zoomée sur l'UF 3927	86
Illustration 63 – Exemple des données types nécessaires (talwegs & réseau hydrologique naturel) pour calculer un IDPR	87
Illustration 64 – Carte de l'IDPR sur le bassin Artois-Picardie	87
Illustration 65 – Valeur IDPR agrégée par UF pour le bassin Artois-Picardie	88
Illustration 66 – Entités hydrogéologiques affleurantes de nature « imperméable » (BDLISA V2)	89
Illustration 67 – Détermination du nombre de classes idéal pour l'analyse du jeu de données par la méthode Elbow	90
Illustration 68 – Schéma des étapes du calcul des barycentres des classes	91
Illustration 69 – Cartographie finale du lien potentiel entre ESO et ESU à l'échelle de l'unité fonctionnelle sur le bassin Artois-Picardie	93
Illustration 70 – Etat chimiques des masses d'eau souterraine en Artois-Picardie (données 2012-2017), Etat des lieux des districts hydrographiques 2019 (source : Comité de Bassin Artois-Picardie, Etat des lieux 2019, annexes cartographique)	99
Illustration 71 – Carte des éléments identifiés comme présentant un risque de fond hydrogéochimique élevé en Région Artois Picardie (extrait de Brenot et al., 2007)	102
Illustration 72 – Zones à risque de fond hydrogéochimique élevé en éléments traces pour les eaux souterraines (extrait de Brenot et al., 2007)	104
Illustration 73 – Localisation des points d'eau souterraine sur le secteur d'étude, disposant d'analyses chimiques pour les paramètres retenus et nombre de paramètres disponibles par PE ESO	108
Illustration 74 – Localisation des points d'eau superficielle sur le secteur d'étude, disposant d'analyses chimiques pour les paramètres retenus et nombre de paramètres disponibles par point d'eau	110
Illustration 75 – Répartition des valeurs moyennes de température (°C) pour les points d'eau souterraine (ESO) et les points d'eau superficielle (ESU) du secteur d'étude	114
Illustration 76 – Analyse de l'amplitude des variations de température par stations de mesure des eaux de surface	115
Illustration 77 – Corrélation entre l'amplitude de température et la température minimale enregistrées sur les stations de suivi des eaux de surface	115
Illustration 78 – Carte des classes déterminées à partir des données de températures des points d'eaux de surface 2016-2017	118
Illustration 79 – Répartition des valeurs moyennes de pH pour les points d'eau souterraine (ESO) et les points d'eau superficielle (ESU) du secteur d'étude	119
Illustration 80 – Répartition des valeurs moyennes de pH pour les points d'eau souterraine (ESO) et les points d'eau superficielle (ESU) du secteur d'étude ; zoom sur deux secteurs d'intérêt potentiel	120

Illustration 81 – Répartition des valeurs moyennes de conductivité électrique ($\mu\text{S}/\text{cm}$) pour les points d'eau souterraine (ESO) et les points d'eau superficielle (ESU) du secteur d'étude.	121
Illustration 82 – Répartition des concentrations moyennes en hydrogénocarbonates (mg/L) pour les points d'eau souterraine (ESO) et les points d'eau superficielle (ESU) du secteur d'étude.	124
Illustration 83 – Répartition des concentrations moyennes en calcium (mg/L) pour les points d'eau souterraine (ESO) et les points d'eau superficielle (ESU) du secteur d'étude.	126
Illustration 84 – Répartition des concentrations moyennes en chlorures (mg/L) pour les points d'eau souterraine (ESO) et les points d'eau superficielle (ESU) du secteur d'étude.	128
Illustration 85 – Répartition des ratios moyens Ca/Cl (mol/mol) pour les points d'eau souterraine (ESO) et les points d'eau superficielle (ESU) du secteur d'étude.	130
Illustration 86 – Répartition des concentrations moyennes en magnésium (mg/L) pour les points d'eau souterraine (ESO) et les points d'eau superficielle (ESU) du secteur d'étude.	132
Illustration 87 – Répartition des ratios moyens Mg/HCO_3 (mol/mol) pour les points d'eau souterraine (ESO) et les points d'eau superficielle (ESU) du secteur d'étude.	134
Illustration 88 – Répartition des concentrations moyennes en sulfates (mg/L) pour les points d'eau souterraine (ESO) et les points d'eau superficielle (ESU) du secteur d'étude.	137
Illustration 89 – Répartition des concentrations moyennes en fluorures (mg/L) pour les points d'eau souterraine (ESO) et les points d'eau superficielle (ESU) du secteur d'étude.	139
Illustration 90 – Répartition des concentrations moyennes en chrome ($\mu\text{g}/\text{L}$) pour les points d'eau souterraine (ESO) et les points d'eau superficielle (ESU) du secteur d'étude.	141
Illustration 91 – Répartition des concentrations moyennes en nickel ($\mu\text{g}/\text{L}$) pour les points d'eau souterraine (ESO) et les points d'eau superficielle (ESU) du secteur d'étude.	143
Illustration 92 – Exemples d'utilisation du paramètre nitrate pour l'analyse des liens ESO-ESU – la Scarpe amont et le Deûle	144
Illustration 93 – Répartition des concentrations moyennes en nitrate (mg/L) pour les points d'eau souterraine (ESO) et les points d'eau superficielle (ESU) du secteur d'étude.	145
Illustration 94 – Répartition des concentrations moyennes en nitrite (mg/L) pour les points d'eau souterraine (ESO) et les points d'eau superficielle (ESU) du secteur d'étude.	148
Illustration 95 – Répartition des concentrations moyennes en ammonium (mg/L) pour les points d'eau souterraine (ESO) et les points d'eau superficielle (ESU) du secteur d'étude.	149
Illustration 96 – Répartition des concentrations moyennes en atrazine ($\mu\text{g}/\text{L}$) pour les points d'eau souterraine (ESO) et les points d'eau superficielle (ESU) du secteur d'étude.	151
Illustration 97 – Répartition des concentrations moyennes en simazine ($\mu\text{g}/\text{L}$) pour les points d'eau souterraine (ESO) et les points d'eau superficielle (ESU) du secteur d'étude.	152
Illustration 98 – Répartition des ratios métolachlore OXA/ESA par date ($\mu\text{g}/\mu\text{g}$) pour les points d'eau souterraine (ESO) et les points d'eau superficielle (ESU) du secteur d'étude.	153
Illustration 99 – Répartition des concentrations moyennes en perchlorate ($\mu\text{g}/\text{L}$) pour les points d'eau souterraine (ESO) et les points d'eau superficielle (ESU) du secteur d'étude.	155
Illustration 100 – Représentation des cours d'eau du bassin selon les résultats de l'approche hydrogéochimique.	162
Illustration 101 – Etat écologique des masses de surface (donnée 2015-2017), Etat des lieux des districts hydrographiques 2019 (Agence de l'Eau Artois-Picardie, 2019).	165

Illustration 102 – Etat chimique des masses de surface (donnée 2017), État des lieux des districts hydrographiques 2019 (Agence de l'Eau Artois-Picardie, 2019).....	167
Illustration 103 – Localisation des masses d'eau de surface sélectionnées ou non d'après les résultats de l'Etat des lieux 2019	171
Illustration 104 – Localisation des portions de masses d'eau de surface sélectionnées d'après les résultats de l'Etat des lieux 2019 et les approches géomatique et hydrogéochimique	172
Illustration 105 – Représentation de la masse d'eau FRAR36 de la Lys rivière selon les informations apportées par l'inventaire bibliographique et l'approche géomatique	173
Illustration 106 – Représentation de la masse d'eau FRAR33 de la Lys canalisée selon les informations apportées par l'inventaire bibliographique et l'approche géomatique	174
Illustration 107 – Représentation de la masse d'eau FRAR31 de la Lys canalisée selon les informations apportées par l'inventaire bibliographique et l'approche géomatique	175
Illustration 108 – Représentation de la masse d'eau FRAR58 de la Souchez selon les informations apportées par l'inventaire bibliographique et l'approche géomatique	176
Illustration 109 – Représentation de la masse d'eau FRAR43 de la Scarpe rivière selon les informations apportées par l'inventaire bibliographique et l'approche géomatique	177
Illustration 110 – Représentation de la masse d'eau FRAR50 de la Scarpe rivière selon les informations apportées par l'inventaire bibliographique et l'approche géomatique	178
Illustration 111 – Représentation de la masse d'eau FRAR50 de la Scarpe rivière selon les informations apportées par l'inventaire bibliographique et l'approche géomatique	179

Liste des tableaux

Tableau 1 – Nombre de données de chaque type pour les Basses Eaux (jeu de données 2) ...	66
Tableau 2 – Nombre de données de chaque type pour les Hautes Eaux (jeu de données 2) ...	71
Tableau 3 – Tableau combinant le critère d'écart-type d'interpolation avec celui sur la fiabilité	79
Tableau 4 – Pourcentage de superficie pour chaque classe d'épaisseur de ZNS pour l'UF n°3927	83
Tableau 5 – Pourcentage de superficie pour chaque classe de la carte des zones potentiellement humides de l'INRA pour l'UF n°3927	86
Tableau 6 – Tableau synthétique présentant les ordres de grandeurs statistiques de critères considérés par classe	92
Tableau 7 – Synthèse des informations sur la mobilité des molécules et liste non exhaustive des éléments dont la Valeur Seuil pourrait être adaptée dans le cas de relations avérées entre eaux souterraines et eaux de surface et NQE définies (Cary et al., 2015).	97
Tableau 8 – Molécules identifiées avec des analyses disponibles à la fois dans ADES et Naiades.	100
Tableau 9 – Codes et libellés des masses d'eau souterraine identifiées avec un risque de fond hydrogéochimique élevée pour le nickel (d'après Brenot et al., 2007).	103

Tableau 10 – Valeurs de références qualité pour les eaux souterraines et superficielles prises en compte dans cette étude.	112
Tableau 11 – Classes établies pour l’analyse des points d’eau de surface pour le paramètre température.....	116
Tableau 12 – Résultats de l’approche « indicateur qualité » par principaux bassins	161
Tableau 13 – Etat et potentiel écologique des masses d’eau cours d’eau 2017, État des lieux des districts hydrographiques 2019 (Agence de l’Eau Artois-Picardie, 2019).	166
Tableau 14 – Sélection des masses d’eau de surface selon leur état de dégradation estimé dans le cadre de l’Etat des lieux 2019.....	170
Tableau 15 – Détail de la nomenclature Sandre n°843 pour l’attribut « Echange potentiel de l’interface ESO/ESU »	191
Tableau 16 – Détail de la nomenclature Sandre n°839 pour l’attribut « Qualification de l’échange potentiel »	191
Tableau 17 – Détail de la nomenclature Sandre n°840 pour l’attribut « Caractéristique temporelle du flux de l’échange potentiel »	192
Tableau 18 – Détail de la nomenclature Sandre n°842 pour l’attribut « Sens du flux de l’échange »	192
Tableau 19 – Détail de la nomenclature Sandre n°887 pour l’attribut « Diagnostic spécifique »	192
Tableau 20 – Détail de la nomenclature Sandre n°888 pour l’attribut « Procédure du Diagnostic »	195
Tableau 21 – Détail de la nomenclature Sandre n°885 pour l’attribut « Type de Diagnostic »	196
Tableau 22 – Détail de la nomenclature Sandre n°886 pour l’attribut « Emprise spatiale représentative du diagnostic »	196
Tableau 23 – Détail de la nomenclature Sandre n°889 pour l’attribut « Fiabilité du diagnostic »	197
Tableau 24 – Liste des références bibliographiques ayant apportées des éléments de connaissances géoréférencées sur les échanges ESO/ESU en Artois-Picardie	201

Liste des annexes

Annexe 1 Détail des lexiques de caractérisation ESO/ESU utilisés dans la base de données	189
Annexe 2 Références bibliographiques des documents valorisés dans la base de données des échanges ESO/ESU	199

1. Introduction

Dans le cadre de l'état des lieux 2019 pour la Directive Cadre sur l'Eau (DCE), l'évaluation du bon état des masses d'eau souterraine s'appuie sur un certain nombre de tests dont le test « eaux de surface ». Ce test, commun à l'évaluation de l'état quantitatif et de l'état chimique des masses d'eau souterraine, a comme objectif de vérifier la non-dégradation d'une eau de surface par l'état des eaux souterraines.

Pour se faire, les guides d'évaluation du bon état quantitatif¹ et du bon état chimique², décrivent étape par étape, le déroulé du test « eaux de surface » pour chacun des 2 volets. En complément, Auterives et Pinson ont également fait des propositions d'évolutions en 2016, afin de combler les difficultés de mise en application de cette procédure telle qu'elle est décrite dans la circulaire du 23 octobre 2012³.

Pour permettre une bonne mise en pratique de ce test, il est nécessaire d'avoir une bonne connaissance préalable des zones favorisant potentiellement des échanges entre les eaux souterraines et les eaux de surface. En Artois-Picardie, de nombreuses études menées ces dernières années, notamment de modélisation, ont permis d'avoir des informations dans ce sens mais aucune capitalisation ni valorisation n'a jusqu'alors été réellement entreprise.

C'est pour répondre à ce besoin que le BRGM et l'Agence de l'Eau Artois-Picardie se sont associés afin d'identifier les secteurs à enjeux du point de vue des échanges « Eaux souterraines / Eau de surface » (ESO/ESU). Pour répondre à cet objectif global, plusieurs étapes de travail sont nécessaires :

- Faire un état des connaissances actuelles sur les échanges ESO/ESU dans le bassin Artois-Picardie ;
- Cartographier la profondeur de la zone non saturée à l'échelle du bassin Artois-Picardie et l'exploiter, au travers d'une approche géomatique innovante, pour localiser des zones potentielles d'interaction eau de surface et eau souterraine ;
- Déterminer des substances présentes dans les eaux de surface (dont celles qui n'ont théoriquement plus d'usage) potentiellement indicatrices d'une contribution des eaux souterraines aux écoulements de surface ;
- Construire et alimenter une base de données de référence (géodatabase ArcGIS ®ESRI) sur les relations eau de surface et eau souterraine, respectant le modèle de données des relations eaux souterraines et eaux de surface du SANDRE⁴ et regroupant les résultats des études antérieures (bibliographie) et de cette étude (géomatique, qualité des eaux de surface).

¹ http://www.reseau.eaufrance.fr/webfm_send/3165

² https://www.eaufrance.fr/sites/default/files/2019-04/guide-bon-etat-chimique-des-masses-d-eau-souterraine-2012-09_0.pdf

³ http://circulaire.legifrance.gouv.fr/pdf/2012/10/cir_35995.pdf

⁴ Service d'Administration National des Données et Référentiels sur l'Eau

Les informations apportées par ces différentes tâches seront enfin croisées afin d'identifier les masses d'eau de surface d'intérêt pour mener le test « eau de surface » et pour lesquelles des investigations complémentaires pour mieux caractériser les échanges (direction, variation spatiale et temporelle, estimation des volumes échangés) pourront être menées ensuite selon les préconisations apportées par les différents guides méthodologiques et documents techniques, de l'OFB et du BRGM, existants sur le sujet.

2. Etat des connaissances actuelles sur les relations ESO/ESU du bassin

2.1. RAPPEL SUR LA TYPOLOGIE DES RELATIONS ESO/ESU

Pour ce qui concerne les interactions nappe/rivière, le guide technique des interactions nappe/rivière⁵, publié en avril 2017 par Paran F., Augeard B. *et al.* pour l'Office Français de la Biodiversité (OFB, ex-AFB), propose une typologie selon 6 principales configurations (cf. Illustration 1) :

- De la nappe vers la rivière (cas a) ;
- De la rivière vers la nappe (cas b) ;
- L'absence d'échange observable (cas c) ;
- Le colmatage physique ou biologique (cas d) ;
- Les circulations complexes de type sous-écoulements et/ou mélange (cas e) ;
- Le recyclage ou échanges hyporhéiques (cas f).

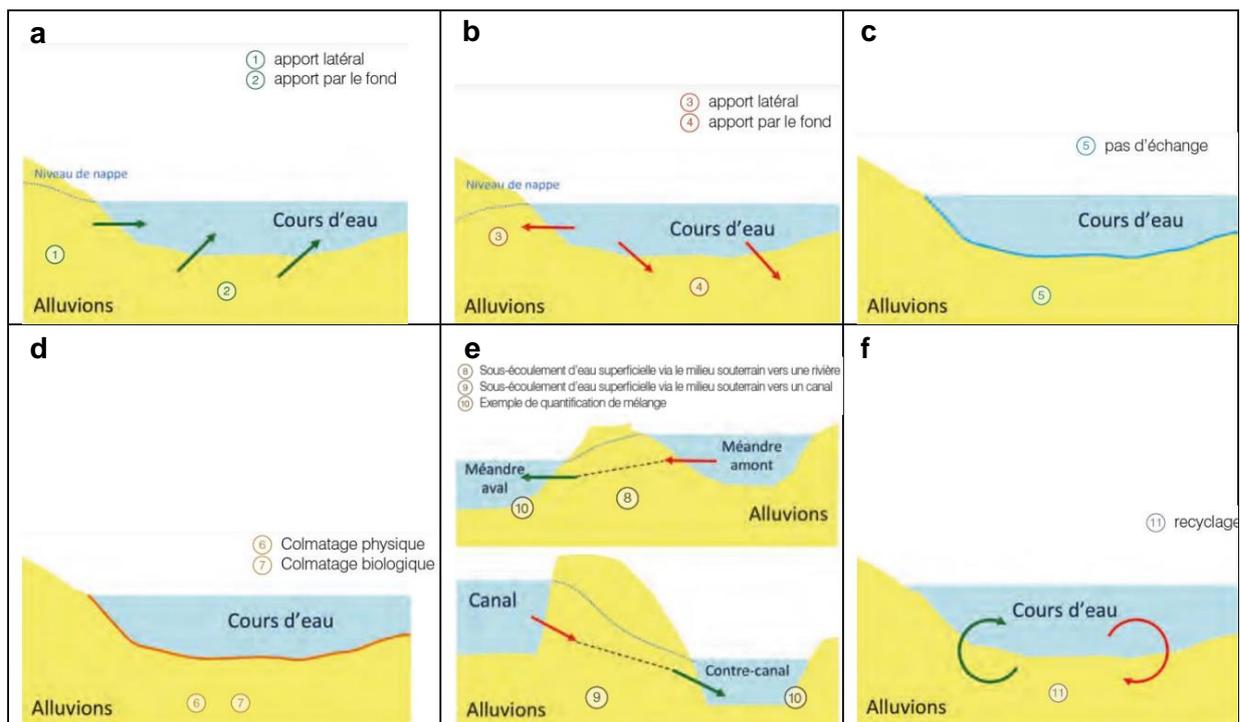


Illustration 1 – Principales configurations de la typologie des échanges entre une nappe et une rivière (Auterives et al., 2017, d'après le guide interaction nappe/rivière de l'OFB)

⁵ https://www.gesteau.fr/sites/default/files/gesteau/content_files/document/guidenaprom_completweb.pdf

A l'échelle de travail de la DCE (masse d'eau souterraine, bassin hydrographique), les relations eau souterraine / eau de surface potentiellement décrites sont celles des configurations a, b et c. Les trois autres processus décrits dans l'illustration 1 ne sont généralement pas considérés à cette échelle de travail mais plutôt à des échelles locales. A ce titre, les approches géomatique et qualité décrites dans les chapitres suivants tenteront de mettre en évidence des contextes répondant aux trois premières configurations.

Vernoux *et al.* (2010) définit une relation nappe/rivière comme un échange d'eau dans un sens ou dans l'autre entre une nappe d'eau souterraine et un cours d'eau. Dans un sens, le cours d'eau est en liaison hydraulique avec un aquifère riverain/sous-jacent qu'il draine (cf. Illustration 2, à gauche). Dans l'autre, le cours d'eau peut a contrario alimenter l'aquifère (cf. Illustration 2, à droite).

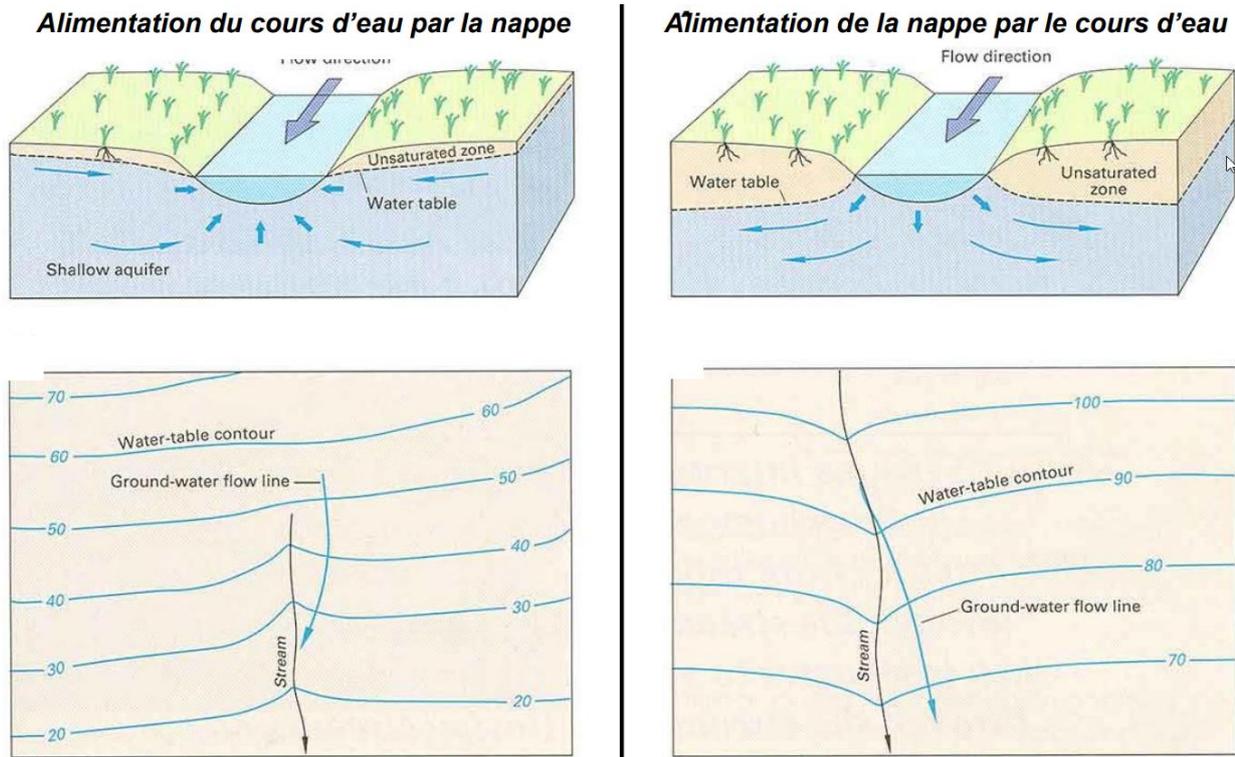


Illustration 2 – Sens des échanges nappe.cours d'eau : à gauche, la nappe alimente la rivière / à droite, la rivière alimente la nappe (Brugeron *et al.*, 2014, d'après Winter *et al.*, 1998)

Il n'est d'ailleurs pas rare d'observer une variation du sens de ces échanges selon la saison avec la nappe qui draine la rivière durant la période de basses eaux et la rivière qui draine la nappe durant la période de hautes eaux. C'est pourquoi, dans la description du phénomène, il est généralement conseillé d'adjoindre au critère purement physique de « sens de l'échange », un attribut décrivant la temporalité de cet échange (variable, saisonnier, constant, etc...).

D'autres milieux de surface, parfois eux-mêmes déjà en connexion avec un cours d'eau, peuvent interagir avec les eaux souterraines. Ainsi, trois autres types de configuration ESO/ESU peuvent être observés, à savoir celle entre une nappe et une zone humide, entre une nappe et un plan d'eau et enfin entre une nappe et le milieu marin littoral. Une analyse sur la typologie de ces trois milieux de surface a été menée par Brugeron *et al.* (2016), permettant ainsi de définir au mieux les conditions naturelles pouvant engendrer ou empêcher les interactions avec les eaux souterraines.

Cependant, le nombre d'études menées pour ces trois configurations ESO/ESU spécifiques est moindre que pour les échanges nappe/rivière (et plus particulièrement en ce qui concerne le milieu littoral et les plans d'eau).

Pour une description plus complète de la typologie des échanges ESO/ESU ainsi que des méthodes existantes pour les mettre en évidence, consulter les travaux menés en 2014 et 2016 par Brugeron et al.

2.2. INVENTAIRE REALISE DANS LE BASSIN ARTOIS-PICARDIE

Un inventaire substantiel des travaux menés dans le bassin apportant des éléments de connaissances sur les échanges ESO/ESU et permettant surtout de localiser ces échanges a été réalisé. L'objectif est de définir les différents « objets géographiques » où une relation eau de surface – eau souterraine a pu être caractérisée et de compléter le ou les diagnostics établis en fonction de la période, de la méthode, etc.

Différentes sources d'informations ont ainsi été collectées et analysées durant le temps de l'étude, tels que les rapports d'études BRGM, des rapports techniques de bureaux d'études (notamment ceux en rapport avec les différents SAGE existants dans le bassin) ou encore des articles scientifiques.

Certains résultats d'études ayant recours à de la modélisation spatialisée permettent d'avoir un aperçu assez général, et sur des étendues importantes, des relations potentielles entre les principaux cours d'eau du bassin et les nappes sous-jacentes. C'est le cas par exemple de l'étude de Bessière *et al.* (2015) visant à affiner le modèle de la nappe de la Craie du Nord-Pas-de-Calais (cf. Illustration 3). Ce type d'information apparaît comme le plus rapide à valoriser dans une base de données structurée.

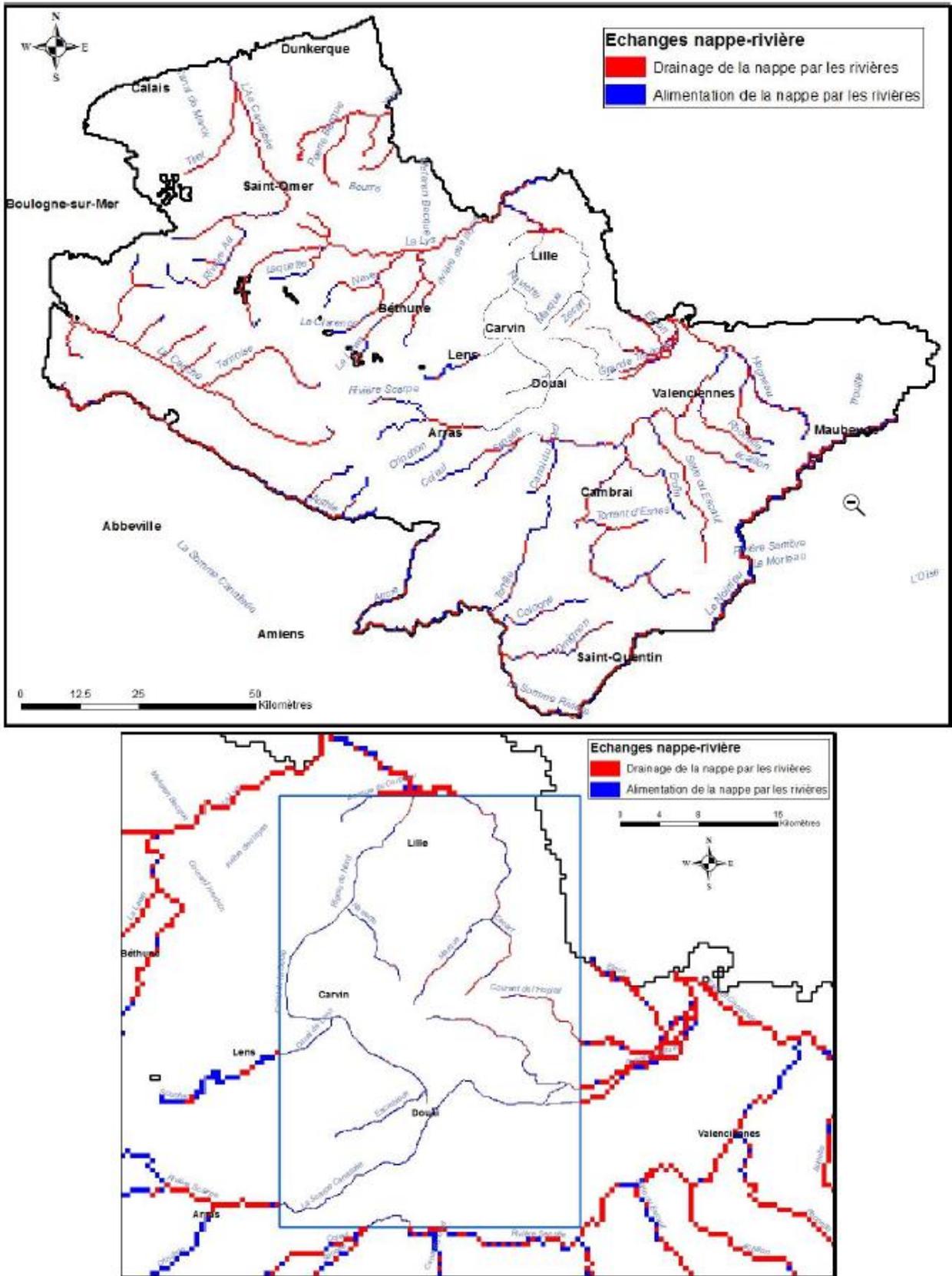


Illustration 3 – Sens des échanges simulés entre nappes et rivières en octobre 2009 sur l'ensemble du modèle en haut et dans la zone affinée, en bas (Bessière et al, 2015)

Dans la majorité des cas, les seules informations disponibles se retrouvent souvent sous forme de coupes schématiques (cf. Illustration 4). Ce type d'information rend beaucoup plus délicat le travail sur la localisation des échanges potentiels. Il est généralement nécessaire d'analyser plus finement le contenu du rapport examiné, ce qui rallonge le temps nécessaire à un géoréférencement optimal.

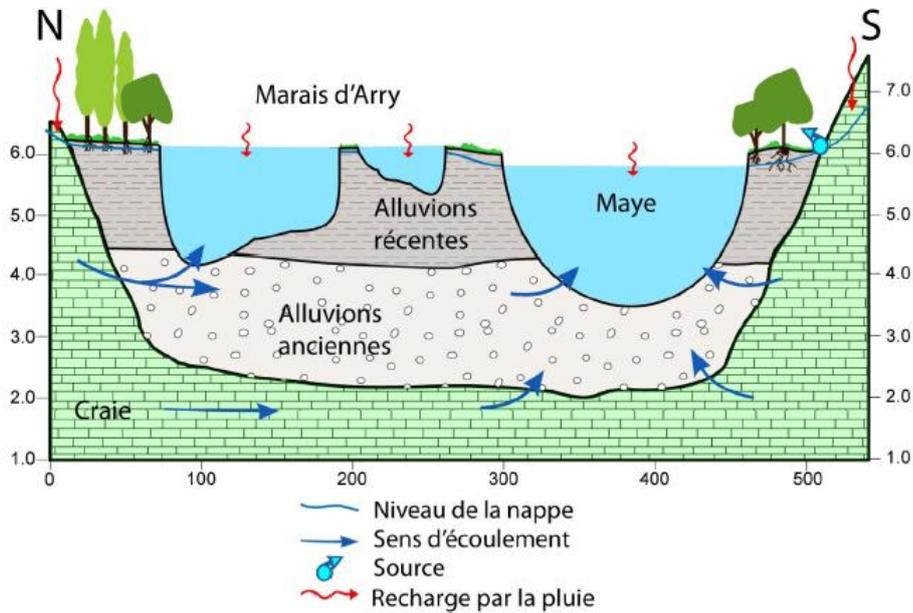


Illustration 4 – Schéma des relations entre les eaux souterraines et les zones humides dans la vallée de la Maye (Bault et al., 2017)

Quelques études aboutissent néanmoins à une mise en évidence beaucoup plus localisée de certains lieux d'échanges potentiels (ou d'absence d'échange). C'est notamment le cas de quelques rapports d'étude en lien avec des SAGE (cf. Illustration 5), ces derniers correspondant à des emprises de travail plus fines en comparaison des études régionales et/ou à l'échelle du bassin.

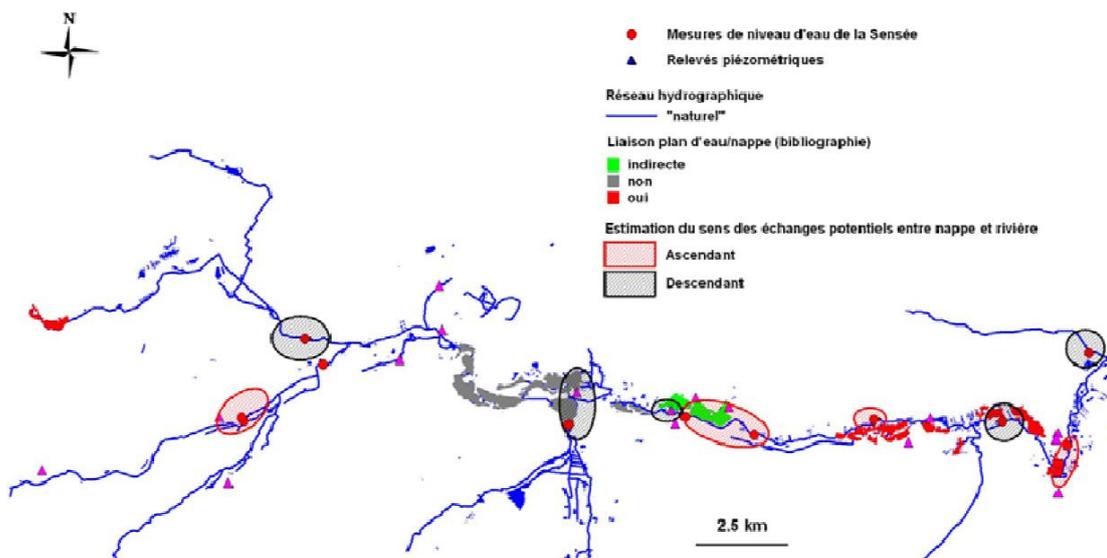


Illustration 5 – Extrait d'une carte localisant les zones favorisant des échanges ESO/ESU dans le cadre de l'État initial du SAGE de la Sensée (Partie 3: connaissance des milieux)

2.3. CONSTRUCTION DE LA BASE DE DONNEES SUR LES ECHANGES ESO/ESU EN ARTOIS-PICARDIE

La construction d'une base de données sur les relations entre eau souterraine et eau de surface constitue la suite logique de l'inventaire mené sur l'état des connaissances sur cette problématique dans le bassin Artois-Picardie. Cette base de données doit permettre de valoriser tout résultat en lien avec ce type d'information tout en apportant des précisions suffisantes sur la localisation géographique des secteurs concernés, et ce, quels que soient le type d'étude (étude locale ou régionale), le format des informations collectées (mesures de terrain ou travaux de modélisation) ou le type d'échange mis en évidence (évolution temporelle, variabilité etc...).

La géodatabase construite dans le cadre de cette étude s'appuie sur les concepts et nomenclatures décrits dans le dictionnaire de données « Acquisition des données des relations entre les eaux souterraines et les eaux de surface » version 1 diffusé par le SANDRE depuis 2016⁶. Ce document constitue le résultat d'un groupe de travail national initié en 2015 et associant le SANDRE, le BRGM, l'OFB et certaines Agences de l'Eau.

2.3.1. Des concepts clés reliés entre eux et caractérisés d'après des lexiques

Interface géographique

Dans les grandes lignes, ce modèle de données du Sandre repose sur la création d'un objet géométrique « **INTERFACE ENTRE LES EAUX SOUTERRAINES ET LES EAUX DE SURFACE** » qui correspond à la zone d'échange potentiel en eau entre le milieu superficiel (mer, réseau hydrographique de la BD Carthage®, milieu humide, etc...) et les eaux souterraines (BDLISA, Masse d'eau souterraine, etc...).

Les principaux attributs caractérisant cet objet géographique sont :

- **Code** = identifiant unique de l'interface ;
- **Libellé** ;
- **Echange potentiel de l'interface** : précise si un échange potentiel est possible ou non ;
- **Date de création / de dernière mise à jour** ;
- **Géométrie de l'interface (polygone, polygones, points)** ;
- **Coordonnée X / Coordonnée Y / Précision des coordonnées / Système de projection des coordonnées** ;
- **Milieus souterrains et de surface concernés** ;
- **Bibliographie** ;
- **Commentaire**.

⁶ <http://www.sandre.eaufrance.fr/urn.php?urn=urn:sandre:dictionnaire:AEX:FRA:::ressource:1:::pdf>

Cet objet constitue la pierre angulaire de la base de données géoréférencée, dans la mesure où elle contient les informations de localisation géographique du lieu supposé d'échange ESO/ESU. Dans la base de données physique produite pour l'étude, les autres concepts, détaillés ci-dessous, se présentent quant à eux sous forme de table.

Echange potentiel ESO/ESU

Au sein de l'interface géographique ESO/ESU, il est ensuite possible de caractériser un « **ECHANGE POTENTIEL ESO/ESU** », soit la présence ou l'absence d'un flux d'eau entre le milieu superficiel et les eaux souterraines, pour une période donnée. Il faut noter qu'une interface peut donc avoir plusieurs types d'échanges identifiés si plusieurs diagnostics ont été entrepris.

Les principaux attributs caractérisant cette table sont les suivants :

- **Code de l'échange** = identifiant unique de l'échange potentiel au sein de l'interface ESO/ESU considéré ;
- **Code de l'interface** = identifiant unique de l'interface ESO/ESU considéré, faisant le lien avec l'objet géographique ;
- **Qualification de l'échange potentiel** : précise la nature des éléments ayant permis de déterminer et décrire l'échange potentiel entre le milieu superficiel et les eaux souterraines ;
- **Caractéristique temporelle du flux de l'échange potentiel** : précise la fréquence du flux entre le milieu superficiel et les eaux souterraines ;
- **Date de création de l'échange potentiel** ;
- **Sens du flux de l'échange potentiel** : précise l'orientation du flux de l'échange potentiel entre le milieu superficiel et les eaux souterraines ;
- **Commentaire de l'échange potentiel** ;
- **Date de dernière mise à jour de l'échange potentiel.**

Diagnostics

Les « **DIAGNOSTICS** » correspondent à la mise en œuvre d'une procédure (ou de plusieurs combinées), dans le cadre d'une étude référencée sur un lieu donné, à une période donnée où un échange potentiel d'eau entre le milieu superficiel et le milieu souterrain a pu être mis en évidence (ou non).

Ses principaux attributs sont les suivants :

- **Référence bibliographique du diagnostic** = identifiant unique du diagnostic ;
- **Date de début / Date de fin** ;
- **Diagnostic spécifique** (inconnu / oui / non) : Indique si l'objectif principal du diagnostic est de caractériser un échange entre les eaux superficielles (ESU) et les eaux

souterraines (ESO) ou s'il était autre. Par exemple, la caractérisation de l'échange ESU/ESO peut découler d'un diagnostic s'intéressant principalement à un des deux compartiments ;

- **Procédure du diagnostic** : liste des grandes méthodes possibles pour caractériser les échanges ESO/ESU ;
- **Type de diagnostic** : est-ce le résultat de plusieurs diagnostics (Meta diagnostic) ou d'un seul diagnostic ?
- **Localisation du diagnostic** ;
- **Emprise spatiale représentative du diagnostic** : indique la couverture spatiale du diagnostic. Cette nomenclature donne ainsi un ordre de grandeur du périmètre spatial du diagnostic ;
- **Fiabilité du diagnostic** : niveau de précision et/ou de la qualité du résultat du diagnostic. Cette information (à dire d'expert) résulte à la fois de la méthode, du principe utilisé lors du diagnostic et des données utilisées pour faire le diagnostic (exemple : données utilisées pour faire tourner un modèle) ;
- **Commentaire du diagnostic.**

Lexiques

Tous les attributs de caractérisation de ces concepts clés doivent être remplis en respectant des lexiques (ou nomenclatures SANDRE) associés. Chacun de ces lexiques détaille ainsi la liste des valeurs possibles de remplissage. La base de données physique produite dans le cadre de cette étude respecte cette exigence.

Tous ces lexiques font l'objet d'une numérotation de nomenclature SANDRE et sont diffusés sur le site du SANDRE. A titre d'exemple, la liste des méthodes spécifiques pour la détermination des échanges potentiels entre les eaux souterraines et les eaux superficielles [procédure du diagnostic] est accessible via le lien :

<http://www.sandre.eaufrance.fr/urn.php?urn=urn:sandre:donnees:NSA:FRA:code:888::referentiel:3.1:html>.

L'ensemble des lexiques utilisés pour la base de données sont détaillés dans l'Annexe 1.

2.3.2. Modalités de création de la géodatabase

La base de données se présente sous la forme d'une géodatabase fichier @ArcGIS (.gdb), format qui permet de compiler dans un container unique des données géographiques et non géographiques, tout en étant facilement interrogé à l'aide d'un logiciel SIG. Cette base a été par ailleurs structurée de manière à respecter le plus possible les concepts et nomenclatures SANDRE présentés dans le chapitre 2.3.1.

Type de données de référence pour les milieux de surface et souterrain

Pour caractériser les zones d'interface ESO/ESU, il a été décidé en concertation avec l'Agence de l'Eau d'utiliser le référentiel BDLISA version 2 (Brugeron *et al.*, 2018) comme source de données pour le milieu souterrain (cf. Illustration 6). Ce référentiel constitue la référence nationale en terme de cartographie des réservoirs aquifères et présente l'avantage de couvrir l'ensemble du territoire national, et donc le bassin Artois-Picardie.

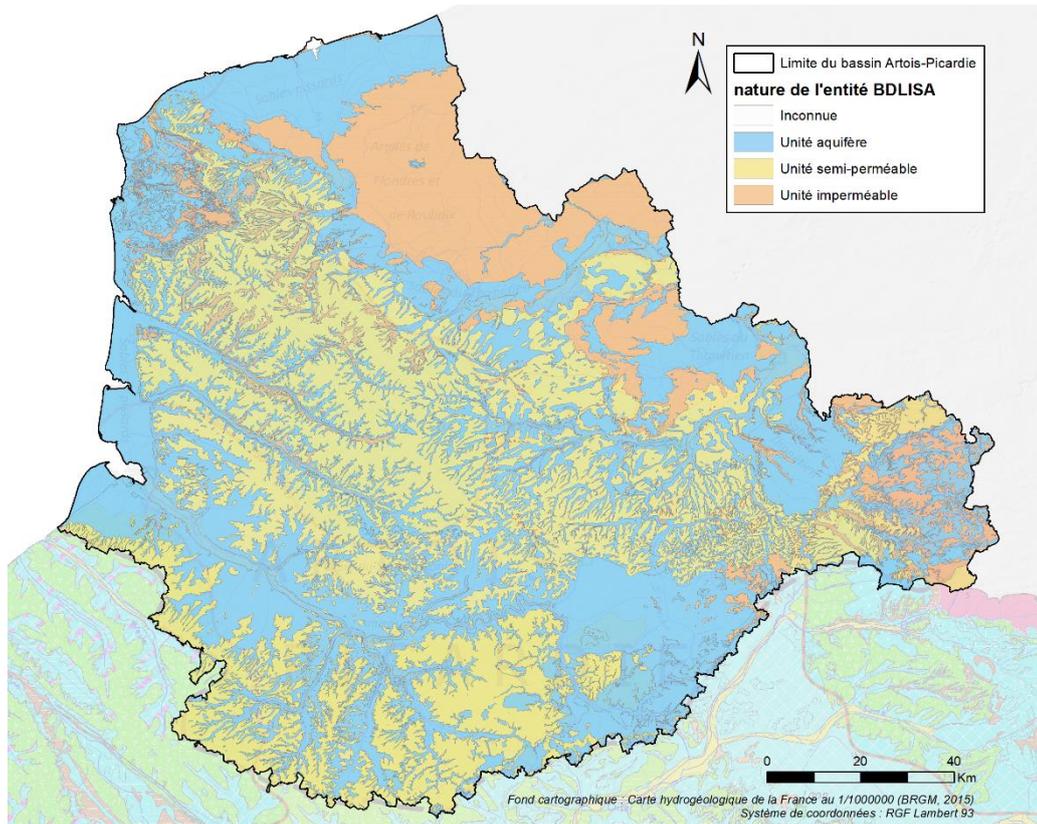


Illustration 6 – Entités hydrogéologiques du référentiel BDLISA version 2 dans le bassin Artois-Picardie, représentés selon leur nature

Les tronçons homogènes du point de vue hydromorphologique issus du projet SYRAH (Chandesris *et al.*, 2009) servent quant à eux de données de référence pour le milieu de surface de type « cours d'eau » (cf. Illustration 7). Cette donnée présente l'avantage de sectoriser le cours d'eau, à une échelle de travail intermédiaire entre les tronçons de la BD Carthage et les masses d'eau de surface. En outre, l'Agence de l'Eau s'appuie dessus pour les besoins de l'État des lieux.

Pour les interfaces nappe/rivière identifiées durant l'inventaire bibliographique dans des secteurs où aucun tronçon SYRAH n'est défini, l'objet géographique créé s'appuiera donc sur la couche « Cours d'eau » de la BD Carthage de l'IGN.

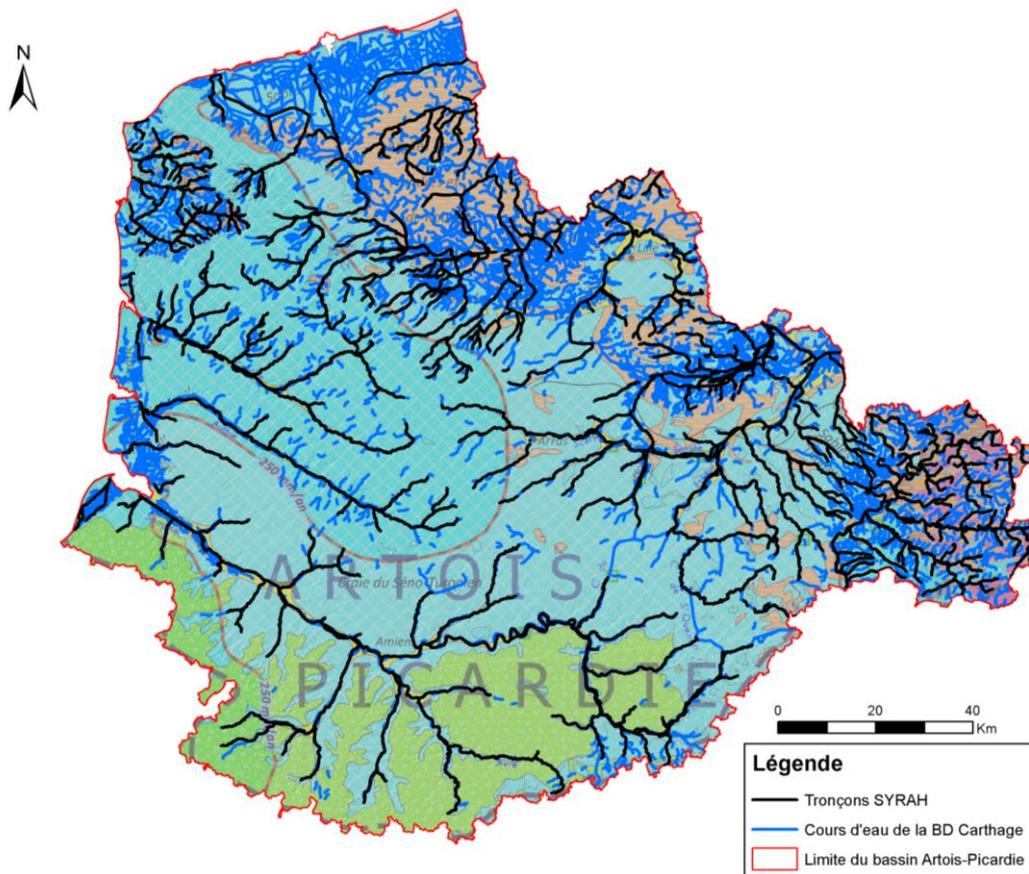


Illustration 7 – Localisation des tronçons SYRAH et des autres tronçons identifiés dans la BD Carthage au sein du bassin Artois-Picardie

De même, pour les échanges potentiels ESO/ESU touchant d'autres types de milieu de surface, les couches d'informations listées ci-dessous constituent les données de référence sur lesquelles s'appuyer :

- « Plan d'eau » : couche des « Zones à dominante humide » du bassin (Agence de l'Eau Artois Picardie, 2008) ou, à défaut, celle des « Hydrographies de surface » de la BD Carthage ;
- « Milieu littoral » : à défaut de données plus précises, couche des masses d'eau de transition et/ou côtières (version Rapportage 2016) ;
- « Zone humide » : couche des « Zones à dominante humide » du bassin (Agence de l'Eau Artois Picardie, 2008) ou, à défaut, couche RAMSAR.

Priorisation dans l'inventaire

Le travail d'inventaire a été mené prioritairement sur les échanges nappe/rivière, qui constituent généralement le type d'échange le plus souvent considéré dans les travaux menés dans le bassin et sont par conséquent ceux disposant du plus d'informations.

Néanmoins, lorsque des informations relatives à d'autres types d'échanges ESO/ESU ont été collectées (et notamment ceux qui concernent les milieux humides), un effort a été mené pour

les intégrer dans la base de données, celle-ci ayant été confectionnée de manière à pouvoir intégrer des interfaces ESO/ESU de types polygones.

La principale difficulté réside dans le fait que plusieurs données source tentent d'identifier et de localiser des milieux humides (Inventaires des zones à dominantes humides pour le SDAGE, Ramsar, Natura 2000, ...) sans qu'aucun jeu de données ne fasse véritablement référence. A ce titre, des travaux SANDRE sont actuellement en cours pour établir les bases d'un référentiel sur cette thématique.

Dans le cas d'échanges ESO/ESU avec des milieux humides, il a été décidé d'utiliser prioritairement la couche des zones à dominante humide pour la géométrie des interfaces, tout en ne s'interdisant pas de les remodeler manuellement si nécessaire.

Estimation du niveau de confiance selon le diagnostic utilisé pour qualifier l'échange ESO/ESU

Le lexique associé au concept « Diagnostic » et listant les différentes méthodes existantes pour caractériser les échanges ESO/ESU s'appuie essentiellement sur l'état de l'art mené par Brugeron *et al.* (2016) et sur les travaux du projet NAPROM (Paran *et al.*, 2017) ayant abouti à un guide méthodologique⁷.

Le niveau de confiance à attribuer à tout échange ESO/ESU potentiel apparaît très fortement dépendant de plusieurs critères et le choix du diagnostic en est un des principaux constituants.

Dans le modèle conceptuel SANDRE, deux attributs peuvent apporter des éléments de réponse sur le niveau de confiance :

- L'attribut « **Fiabilité du diagnostic** » : lexique simplifié (inconnu, faible, moyenne, forte) qui rend compte à la fois du niveau de précision et/ou de la qualité du résultat du diagnostic. Cette information résulte d'une analyse à dire d'expert.
- L'attribut « **Emprise spatiale représentative du diagnostic** » qui va permettre de donner un ordre de grandeur du périmètre spatial du diagnostic, comparable à la représentativité spatiale de la méthode utilisée ;

Par ailleurs, tout élément supplémentaire de connaissance permettant de juger du niveau de confiance de la méthode peut également être inscrit dans le champ « Commentaire ».

En tout état de cause, aucune censure n'a été appliquée sur les informations collectées, même si elles apparaissent douteuses ou contradictoires avec des données plus récentes. Un niveau de fiabilité plus faible a simplement été appliqué dans la base de données.

Plus généralement, cette réflexion autour de la fiabilité des données doit être systématiquement considérée dans cette démarche de localisation des zones à enjeux, pas seulement pour l'inventaire bibliographique mais également pour les autres approches décrites dans les chapitres suivants.

⁷ https://www.gesteau.fr/sites/default/files/gesteau/content_files/document/guidenaprom_completweb.pdf

2.4. SYNTHÈSE DES DOCUMENTS INVENTORIÉS DANS LA GEODATABASE

2.4.1. Références bibliographiques implémentés en base et chiffres clés

Dans un premier temps, l'inventaire a consisté à rassembler un grand nombre de documents abordant, même de façon très réduite, le sujet des échanges entre milieu de surface et souterrain.

Une analyse plus poussée de ces documents a ensuite été menée afin d'en extraire des éléments de localisation géographique ainsi que de caractérisation des échanges (ou absence d'échange) ESO/ESU potentiels. Cette analyse plus restrictive a logiquement réduit le nombre de références véritablement utiles, éliminant ainsi les documents abordant le sujet de manière trop générale.

Au final, **17 références**, allant de 1972 à 2018, ont été valorisées en base car permettant de localiser et de caractériser des échanges ESO/ESU dans le bassin Artois-Picardie. La liste de ces références est proposée en Annexe 2.

Ces études ont permis de caractériser **2193 interfaces ESO/ESU de type linéaire** correspondant à une couverture d'environ 4282 km de linéaires de cours d'eau du bassin. De même, **45 interfaces ESO/ESU de type polygone** ont été identifiées.

Pour ces 2238 interfaces ESO/ESU, **2382 échanges potentiels ESO/ESU** ont été définis. En effet, une petite part de ces interfaces bénéficie de plusieurs caractérisations d'échanges, tirées de différentes études (et donc de différents diagnostics, pour des plages de temps différents).

2.4.2. Exemples de valorisations cartographiques

En préambule, les cartes présentées ci-dessous constituent des exemples de valorisation des données de la base. Elles doivent être utilisées telles qu'elles avec une grande prudence. En effet, le choix a été fait de représenter la totalité des informations apportées par la base pour un attribut choisi mais ceci a comme conséquence de mélanger des données provenant d'horizons très divers.

Il est donc conseillé de réaliser ce type de carte en se limitant soit à un diagnostic ou une référence particulière, à des dates de début et fin de réalisation, soit à une fiabilité définie en amont.

Nombre d'échanges ESO/ESU caractérisés par interface ESO/ESU

Une rapide analyse statistique menée sur la table des échanges potentiels ESO/ESU permet d'afficher le nombre d'échanges identifiés pour chaque interface ESO/ESU (cf. Illustration 8).

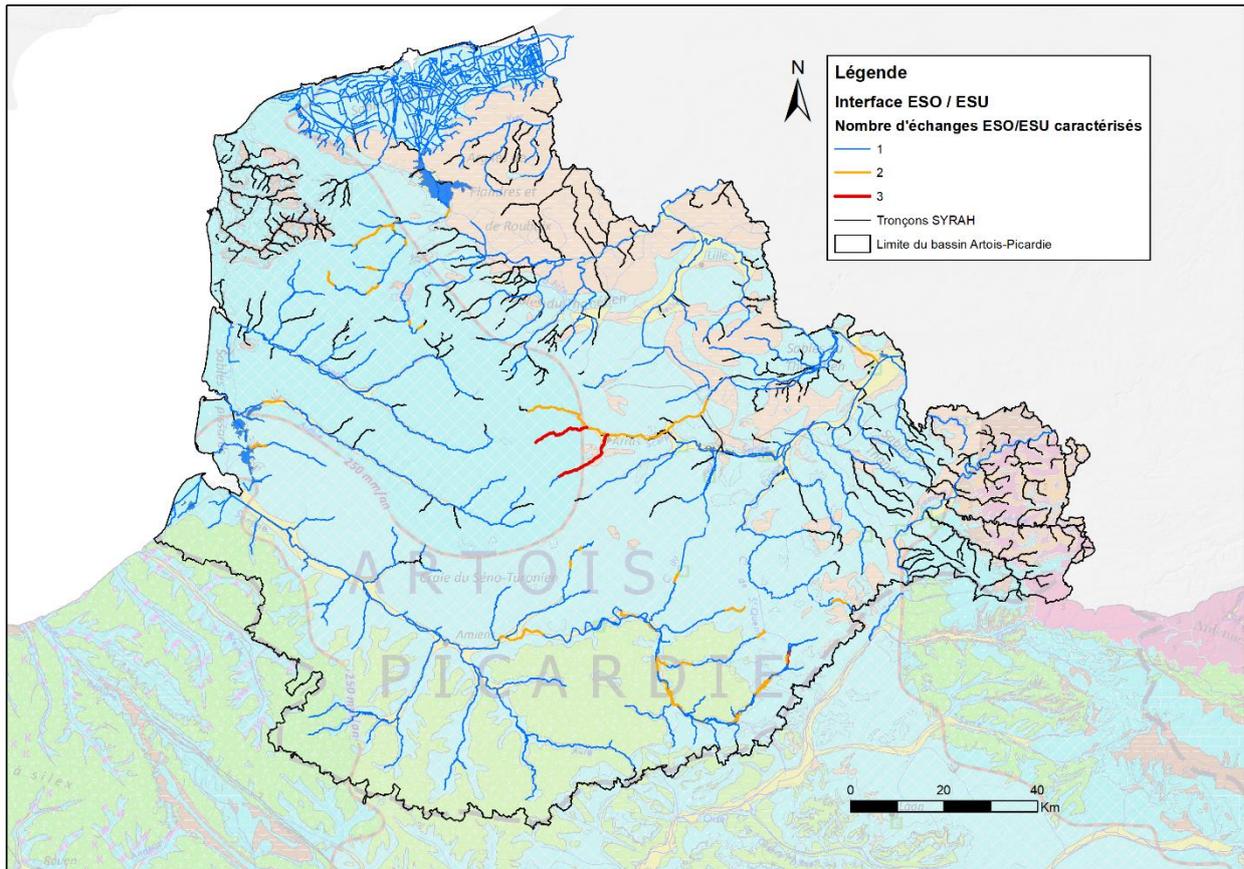


Illustration 8 – Représentation des interfaces ESO/ESU selon le nombre d'échanges ESO/ESU caractérisés

Finalement, cette carte retranscrit indirectement un état des connaissances sur les échanges ESO/ESU du bassin, en partant du principe qu'un nombre important d'échanges caractérisés au sein d'une interface ESO/ESU signifie que celle-ci a été étudiée de manière plus approfondie qu'ailleurs.

A ce titre, pour les interfaces ayant plusieurs échanges ESO/ESU, les cartes suivantes de ce chapitre ne proposent qu'un exemple d'attribut. Il s'agit ici d'une limite de la représentation par carte ; seule l'interrogation de la couche d'informations via un logiciel SIG permet de visualiser tous les cas possibles.

Qualification de l'échange potentiel ESO/ESU

L'attribut « qualification des échanges ESO/ESU » permet de hiérarchiser les interfaces selon la nature supposée, avérée par preuves directes ou avérée par preuves indirectes de la présence ou de l'absence d'un échange entre les eaux souterraines et le milieu de surface considéré. L'illustration 9 ci-dessous propose un façon de représenter cette information portée par la base de données.

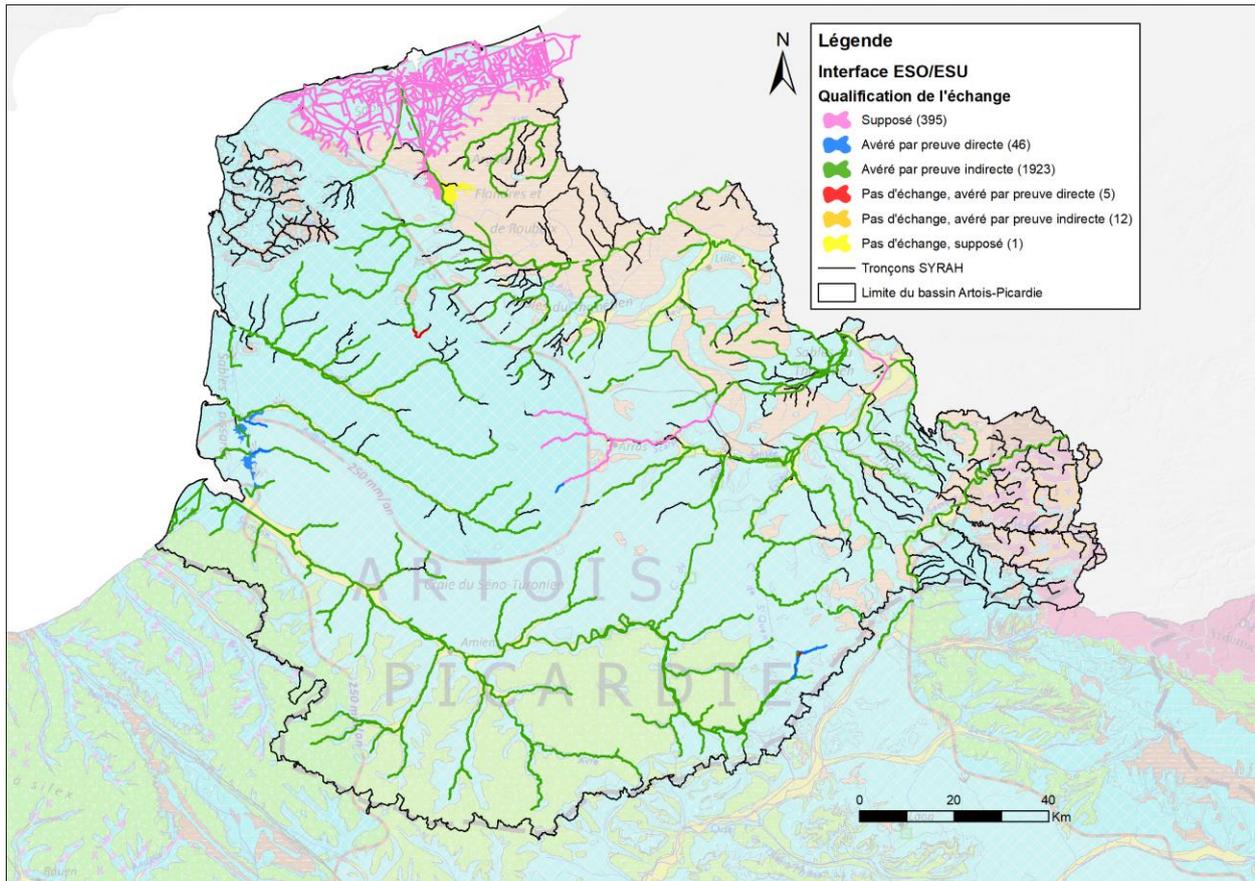


Illustration 9 – Représentation des interfaces ESO/ESU selon la qualification de l'échange ESO/ESU associé (nombre d'interface identifié entre parenthèse)

Caractérisation temporelle des échanges ESO/ESU

Cet attribut permet de préciser, lorsque l'information est connue, comment l'échange ESO/ESU se caractérise du point de vue temporel (cf. Illustration 10). Cette information n'est souvent pas facile à mettre en évidence et nécessite une lecture fine de la méthode (ou diagnostic) utilisée et de ces conditions d'application. De même, une grande majorité des méthodes (ou diagnostics) ne permettent tout simplement pas d'évaluer le caractère saisonnier, permanent ou exceptionnel du flux déterminé. Tout ceci explique le nombre important d'interfaces actuellement identifiées en « inconnu » pour cet attribut.

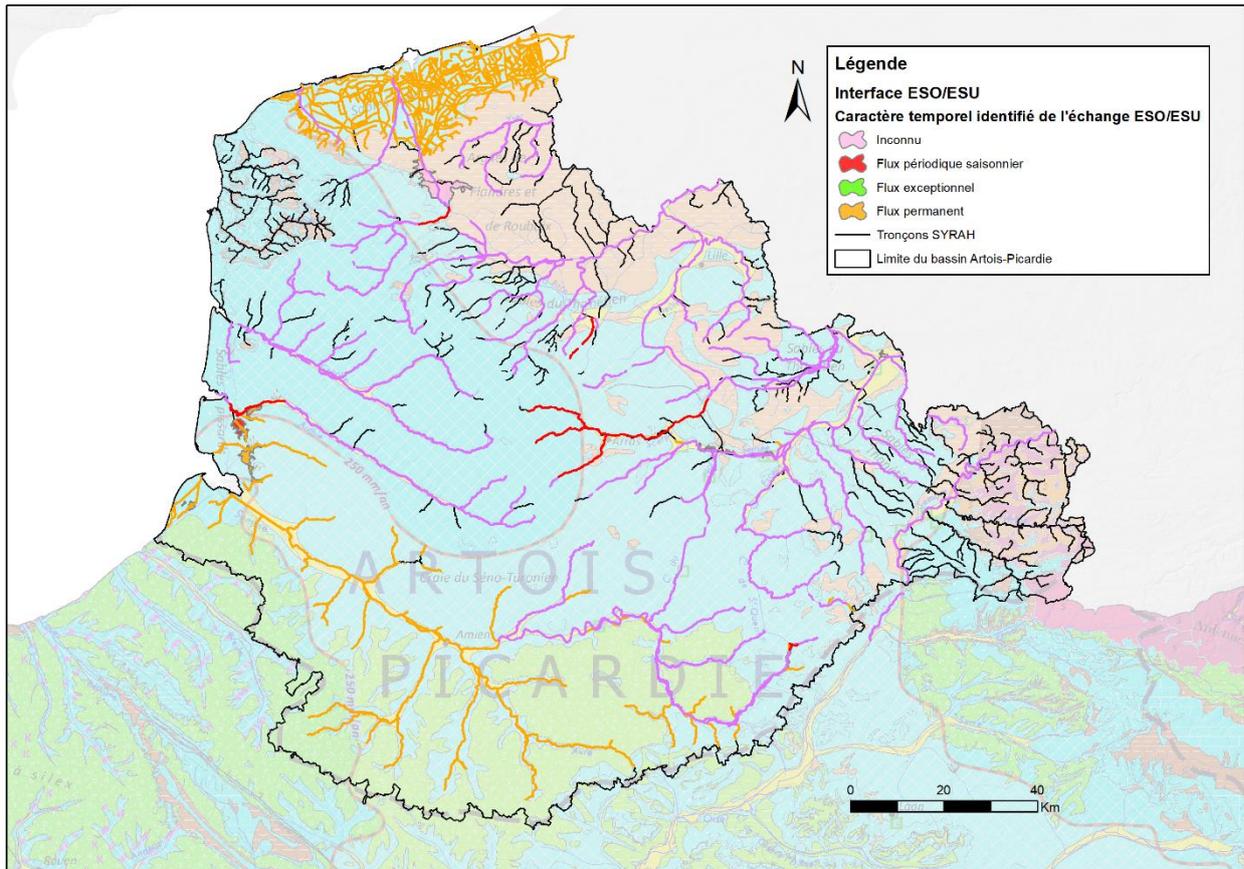


Illustration 10 – Représentation des interfaces ESO/ESU selon la caractérisation temporelle des échanges ESO/ESU associés

Sens du flux d'échanges ESO/ESU

Ce type de représentation en fonction du sens du flux échangé apparaît comme la plus classique et la plus lisible. Il s'agit simplement de hiérarchiser les interfaces selon que les échanges identifiés vont plutôt vers le milieu de surface ou vers les eaux souterraines, ou encore sont variables selon les études ou même dans le temps. Pour ces derniers cas, il est important de préciser les conditions de cette variabilité dans le champ « commentaires » associé à la table des échanges potentiels ESO/ESU.

Encore une fois, l'illustration 11 représente l'ensemble des échanges répertoriés en base, mélangeant très probablement des informations difficilement comparables (du fait des méthodologies et périodes de réalisation différentes notamment).

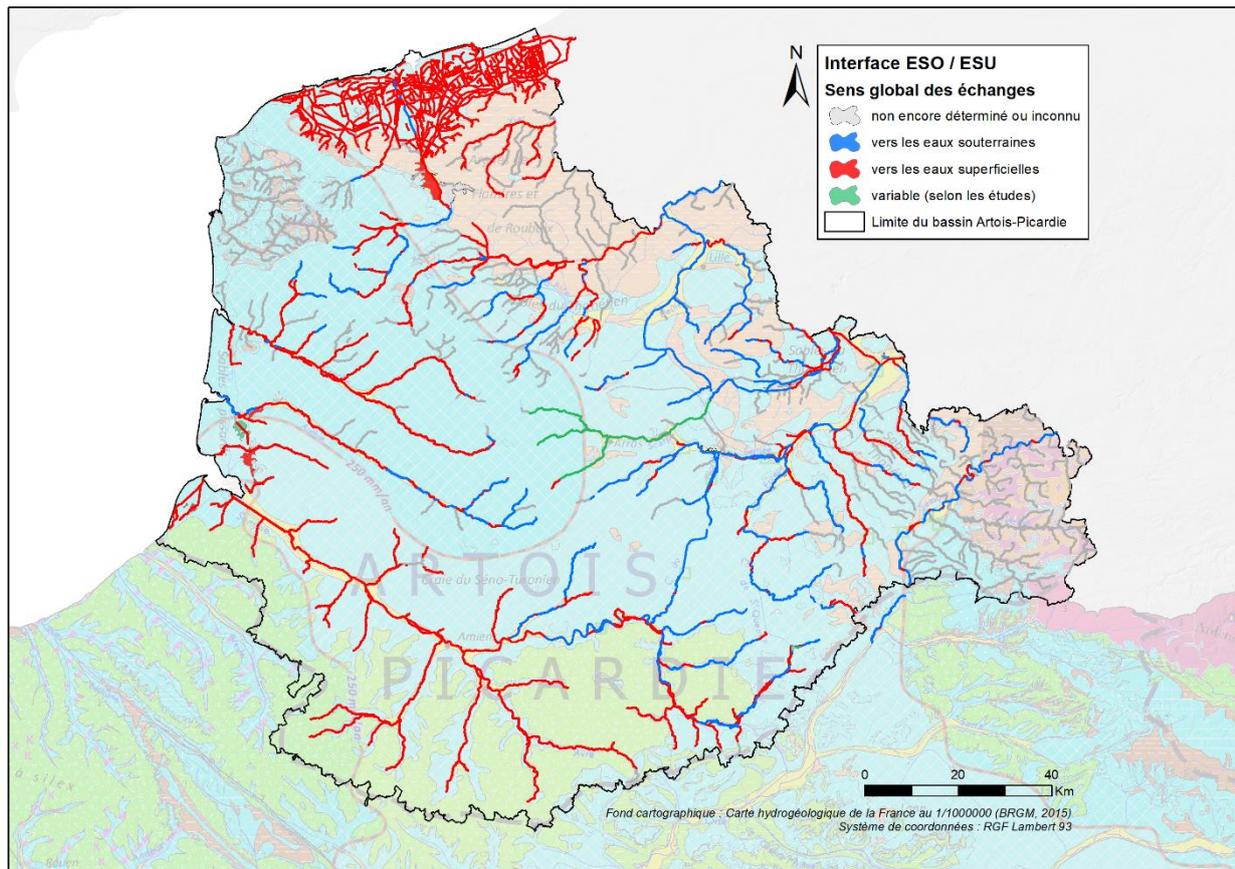


Illustration 11 – Représentation des interfaces ESO/ESU selon le sens global du flux d'échanges ESO/ESU associés

La représentation la plus appropriée pour ce type d'information serait une carte de « prédominances » de sens d'échange. Ce type de carte, nécessitant un travail de synthèse des données disponibles en base et une expertise, peut tout à fait être réalisé en s'appuyant sur cette base de données. Néanmoins, pour bénéficier d'un niveau de confiance suffisant pour ce genre de carte, la priorité semble être d'abord d'enrichir cette base de données en y ajoutant de nouvelles références (connaissances supplémentaires des acteurs locaux).

Fiabilité du diagnostic

Enfin, il est également possible d'adjoindre à ces informations des attributs détaillant le (ou les) diagnostic(s) employé(s), et notamment leur niveau de fiabilité décrit en partie dans le chapitre 2.3.2 (cf. Illustration 12).

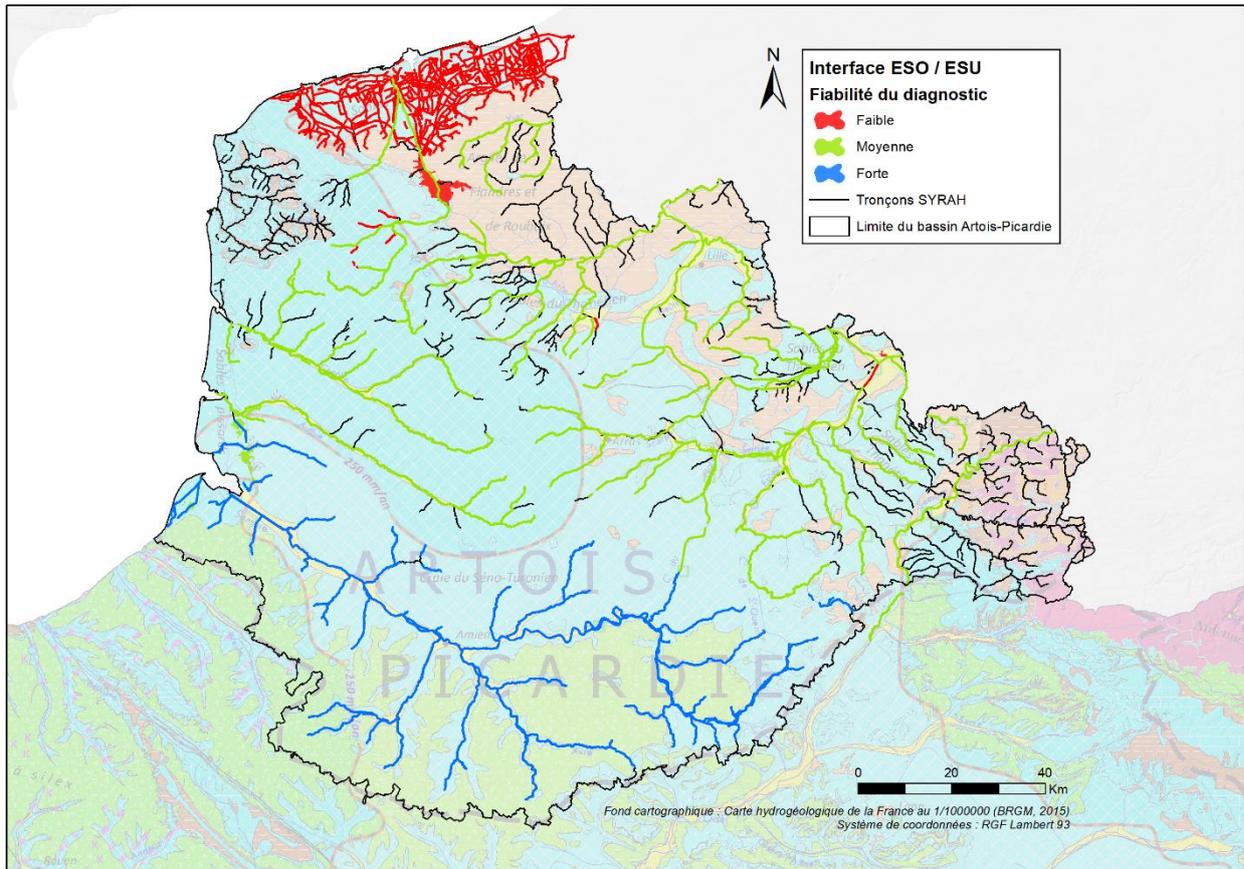


Illustration 12 – Représentation des interfaces ESO/ESU selon le niveau de fiabilité du diagnostic utilisé pour caractériser les échanges

2.4.3. Recommandations et perspectives d'utilisation

L'inventaire mené dans le cadre de cette étude doit être considéré comme une phase de démarrage. Un effort a été mené au cours de cette fouille documentaire pour garantir une certaine exhaustivité mais il est très probable que la base de données ne bénéficie pas encore de l'ensemble des connaissances locales portées par les acteurs de l'eau du bassin.

De nombreuses études menées à grande échelle par des bureaux d'études, des hydrogéologues agréés et/ou pour le compte de syndicats d'exploitation de la ressource en eau n'ont pas pu être collectées dans le cadre de cette étude. Il est fort à parier que leur analyse permettrait d'alimenter la base de données sur certains secteurs. Il est donc nécessaire de poursuivre ces efforts de compilation et de géolocalisation des connaissances sur les échanges ESO/ESU.

Pour faciliter ce partage de connaissances et permettre au plus grand nombre de s'approprier l'outil, il semble également nécessaire de le faire évoluer vers des technologies plus adaptées. En effet, le format actuel de la base de données (géodatabase ArcGIS) présente de nombreux avantages (simplicité d'utilisation et d'interrogation via un logiciel SIG, faible volume...) mais n'est pas le meilleur format pour intégrer de nouvelle donnée et faciliter les échanges. Plusieurs utilisateurs peuvent en avoir l'accès en lecture mais un seul utilisateur a un accès en écriture par jeu de données d'entité, classe ou table d'entités autonomes. L'utilisation simultanée de tout fichier spécifique peut provoquer une dégradation éventuelle des performances dans le cas de nombreux utilisateurs en lecture seule.

C'est pourquoi, il semblerait intéressant de transférer cette base dans un format plus adapté à la multi-utilisation, comme Oracle ou PostgreSQL, et de proposer une interface web de saisie/recherche/visualisation de ces données, à l'image de ce qui a pu être fait dans d'autres domaines d'application (BD Traçages⁸, BD Drainages⁹, ...)

Des sites comme ADES (au niveau national) mais aussi les SIGES – il en existe un pour la Craie du Nord-Pas de Calais (<http://sigesnpc.brgm.fr/>) –, peuvent être des supports intéressants pour valoriser ce type de contenu.

⁸ <https://bdtracages.brgm.fr/>

⁹ <http://sigessn.brgm.fr/spip.php?article447> et <http://bddrainage.brgm.fr/>

3. Approche géomatique et géostatistique pour identifier les zones potentielles d'interaction ESO/ESU

3.1. PRINCIPES

L'approche géomatique proposée repose sur la comparaison du niveau piézométrique interpolé en situations extrêmes (basses eaux et hautes eaux) avec les niveaux estimés des eaux de surface sur la base de données topographiques, pour évaluer les zones potentielles d'interaction eau de surface – eau souterraine.

L'interpolation de la surface piézométrique s'appuie sur une diversité de données source, telles que les travaux antérieurs de modélisation ou de cartes piézométriques (aquifères de la Craie, du Landénien... etc.) combinés aux données de suivi quantité des eaux souterraines. La méthodologie a été éprouvée pour différents travaux, par exemple pour la problématique d'inondations par remontée de nappe (Brugeron *et al.*, 2017 ; Allier *et al.*, 2018) ou pour l'identification de la sensibilité des cours d'eau et de la variation des emprises des zones humides liées aux prélèvements (Pinson *et al.*, 2019).

Puis, par comparaison avec la topographie, 2 grilles d'épaisseur de zone non saturée (ZNS) sont estimées, une en situation de Basses Eaux (BE) et une autre en Hautes Eaux (HE). La ZNS joue un rôle significatif dans le transfert et le comportement géochimique des polluants potentiels vis-à-vis des eaux souterraines et de l'épaisseur de cette ZNS dépend les possibilités d'échanges entre eaux souterraines et eaux de surface.

Ces deux grilles sont ensuite comparées l'une à l'autre, afin de distinguer, par exemple, les zones où la proximité de la nappe est constante des zones où l'amplitude de la nappe semble importante et où des inversions du sens des échanges potentiels entre les 2 milieux sont possibles.

Enfin ces grilles sont également confrontées à d'autres indicateurs de surface (IDPR, cartes des zones potentiellement humides de l'INRA, entités hydrogéologiques BDLISA imperméables à l'affleurement) et relativisées par une estimation de la fiabilité de la méthode et des données utilisées.

Ce que permet cette approche :

En théorie, cette approche permet d'identifier :

- Des zones où aucun échange significatif n'est présent entre le milieu de surface et le milieu souterrain :
 - Soit parce que le substratum sur le lequel se trouve le milieu en eau de surface est imperméable et donc il n'y a pas d'échange de flux (cf. Illustration 13 – schéma A) ;
 - Soit parce que le complexe Cours d'eau/Zone hyporhéique est perché, déconnecté de la nappe, l'épaisseur de zone non saturée étant telle que les échanges d'eau entre les deux milieux peuvent être considérés comme quasi-nuls (cf. Illustration 13 – schéma B).

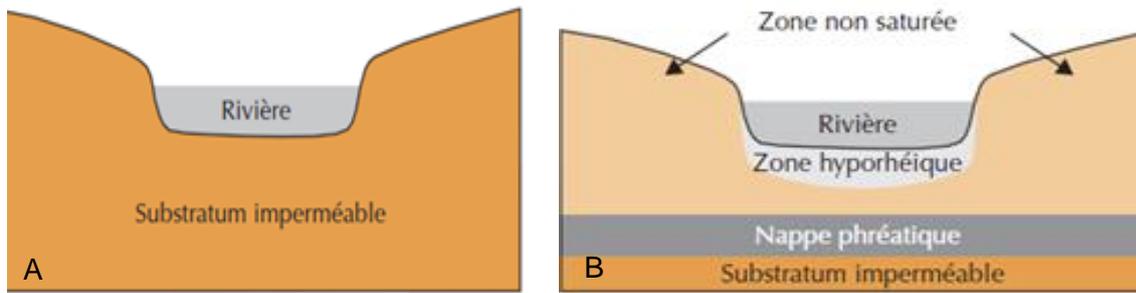


Illustration 13 – Schémas (A) d'un cours d'eau s'écoulant sur un substratum imperméable et (B) d'un cours d'eau s'écoulant sur un substratum perméable mais perché par rapport à la première nappe rencontrée (Datry et al., 2008, d'après Malard et al., 2000)

- Des zones où des échanges significatifs sont présents entre le milieu de surface et le milieu souterrain :
 - Soit parce que le milieu de surface est en liaison hydraulique avec la nappe d'un aquifère riverain/sous-jacent, permettant des échanges dans un sens ou un autre (cf. Illustration 14 et Illustration 15) ;

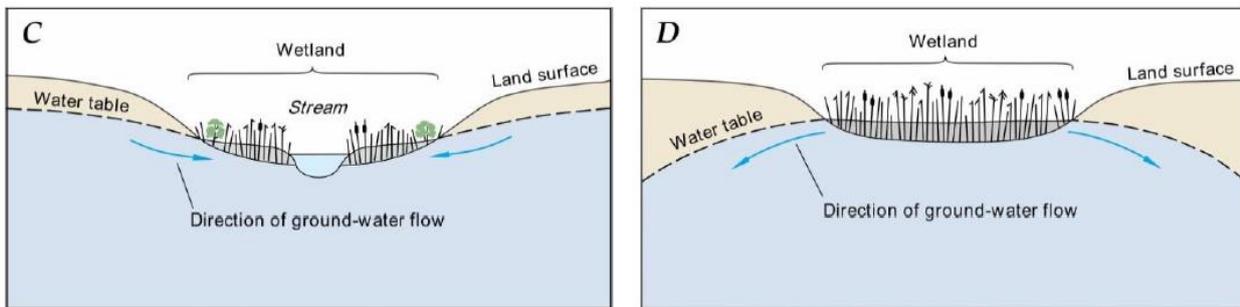


Illustration 14 – Schémas représentant deux cas possible de flux d'eau, soit (A) vers une zone humide, soit (B) vers la nappe sous-jacente (Winter et al., 1998)

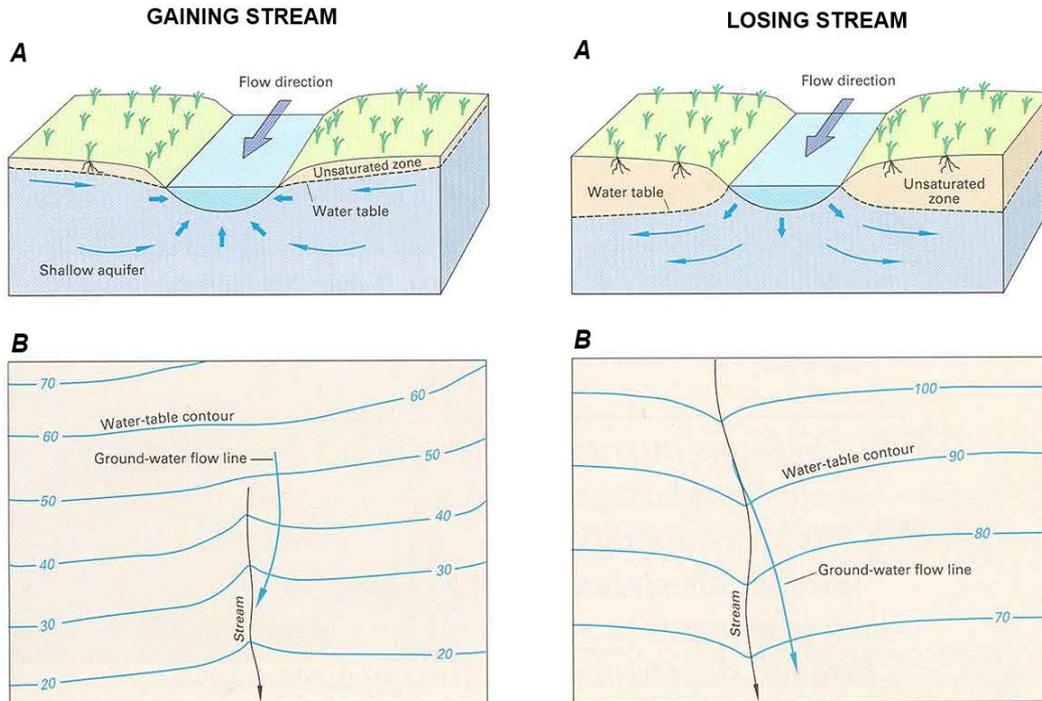


Illustration 15 – Sens des échanges nappe/cours d'eau : à gauche, la nappe alimente la rivière / à droite, la rivière alimente la nappe (Winter et al., 1998)

- Soit parce que le milieu de surface est perché mais infiltrant, Il est séparé de la nappe libre par une zone non saturée mais l'alimente néanmoins, par ses pertes par infiltration (cf. Illustration 16). Dans ce cas, une expertise est nécessaire pour estimer l'épaisseur de zone non saturée critique à partir de laquelle ces échanges ne sont plus possibles.

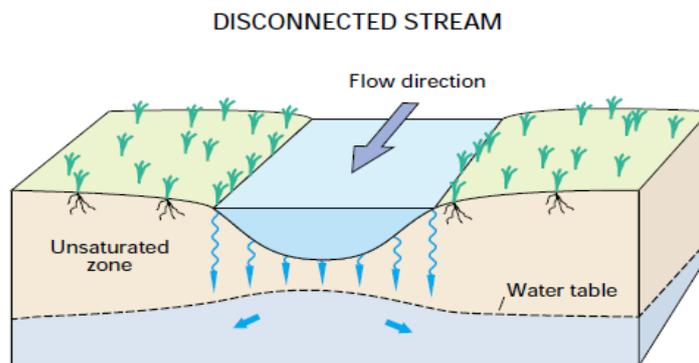


Illustration 16 – Cours d'eau perché, sans liaison hydraulique avec la nappe sous-jacente mais l'alimentant par ses pertes par infiltration (Winter et al., 1998)

- Des zones où une variabilité temporelle du sens des échanges est possible, par différence entre la grille d'épaisseur de ZNS en Hautes Eaux et en Basses Eaux (cf. Illustration 17)

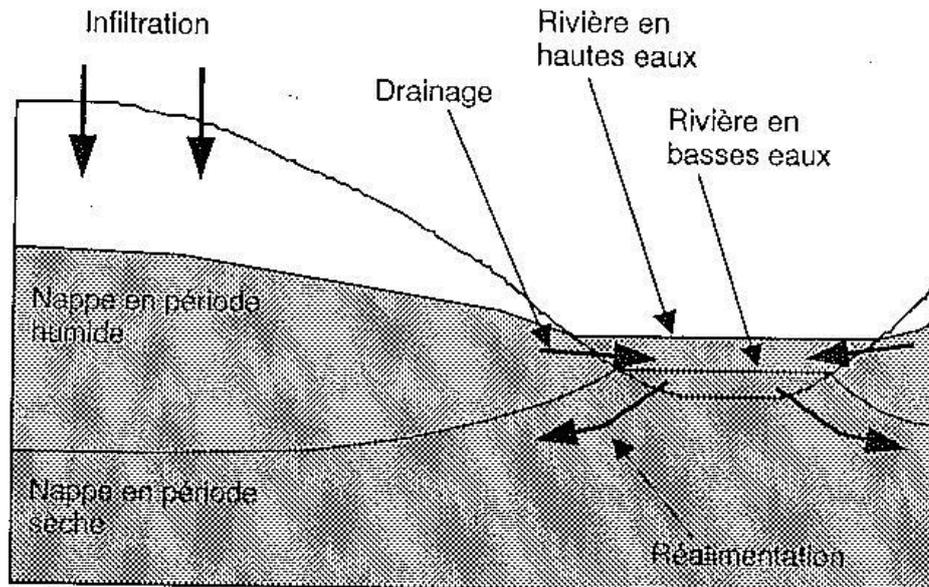


Illustration 17 – Variation spatiale du sens des échanges (d'après Banton et Bangoy, 1997)

Ce que ne permet pas cette approche :

Cette approche purement géomatique réalisée à l'échelle d'un bassin ne permet pas d'identifier des caractéristiques très localisées, comme par exemple le colmatage du lit et des berges d'un cours d'eau réduisant considérablement les échanges avec la nappe, même si celle-ci se situe proche de la surface (cf. Illustration 18).

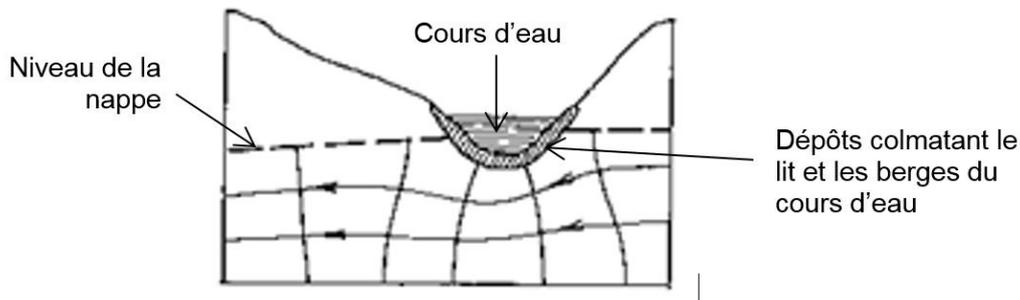


Illustration 18 – Colmatage du lit et des berges d'un cours d'eau empêchant les échanges avec la nappe (d'après Castany et Margat, 1977)

Autres limitations :

Initialement, il était prévu d'estimer les niveaux des eaux de surface d'après les données topographiques les plus fines possibles (MNT au pas de 5 m, données Lidar, mesure de terrain). Cependant, la démarche consiste à comparer ces niveaux avec une surface piézométrique interpolée. Or les données piézométriques à disposition ne permettent pas de travailler à une résolution aussi fine. Il a donc été décidé de travailler avec des grilles de résolution 25m, pour le milieu souterrain comme pour le milieu de surface (MNT de la BD Alti IGN 25m).

Il faut également souligner que cette approche s'appuie sur une sélection de données ponctuelles relatives au suivi piézométrique des premières nappes d'importance rencontrées. Il est quasi-impossible de rendre compte de phénomènes d'échanges entre le milieu de surface et de petites nappes localisées et très réactives dans des formations peu épaisses non surveillées (ex : Argiles des Flandres, localement sableuses).

Les résultats de cette phase viennent compléter l'étude bibliographique et la base de données des relations eau souterraine et eau de surface du bassin Artois-Picardie.

3.2. PREPARATION DES DONNEES SOURCE

3.2.1. Données tirées des bases nationales des points d'eau

Rappel du contexte réglementaire autour des bases nationales

Le Code Minier (Titre VIII du Code Minier Français, Articles 131 à 136) rend obligatoire la déclaration des ouvrages d'une profondeur supérieure à 10 m et les dispositions de la Loi sur l'Eau entraînent également la déclaration des ouvrages « eau » sans distinction de profondeur. Dans le cadre déclaratif prévu par la loi, l'appellation d'ouvrage s'applique à divers types de travaux : carrière, puits, tunnel, sondage, forage, source captée...

Le BRGM est chargé, par ses ministères de tutelle, de gérer ces informations sur le sous-sol et de les mettre à disposition d'un large public. De ce fait, l'ensemble des dossiers sont disponibles dans la Banque du Sous-Sol (BSS) qui est *in fine* une base déclarative. Les informations données sur les ouvrages en BSS sont renseignées uniquement à la création de l'ouvrage mais ne sont pas systématiquement actualisées au cours de la vie de l'ouvrage (type d'exploitation, activité, état...) et sont souvent très incomplètes.

Des données plus spécifiques aux ouvrages d'eau sont également disponibles dans la banque nationale d'Accès aux Données sur les Eaux Souterraines (ADES), site du Système d'Information sur l'Eau, qui rassemble des données quantitatives et qualitatives relatives aux eaux souterraines sur des points d'eau appartenant à des réseaux de mesure régulièrement suivis. Ces données proviennent notamment de piézomètres répartis sur l'ensemble du territoire sur lesquels sont mesurés à pas de temps régulier le niveau de l'eau.

La BSS EAU est une base de données interopérable qui communique quotidiennement avec les bases de données BSS et ADES. L'illustration 19 ci-dessous présente le schéma simplifié du contenu des bases et des échanges dynamiques qui sont actuellement en place.

Le schéma est à lire de la gauche vers la droite et présente trois parties distinctes dédiées respectivement à la BSS, la BSS EAU et ADES :

- 1) La création d'un nouvel ouvrage est réalisée dans la BSS (Banque de données sur le Sous-Sol). Cette création d'ouvrage est réalisée par le BRGM dans un outil interne et résulte d'un processus déclaratif (déclaration titre du code minier, code de l'environnement). Les informations essentielles d'identification de l'ouvrage y sont saisies (attribution du code BSS, coordonnées géographiques de l'ouvrage, altitude au sol de l'ouvrage, données attributaires telles une coupe technique, une coupe géologique).

- 2) Lorsqu'un ouvrage présente une relation avec les eaux souterraines, il est défini en BSS comme étant un « point d'eau » ; cet ouvrage est alors créé de manière automatique et dynamique en BSS EAU ; plusieurs informations saisies en BSS sont récupérées en BSS EAU : le code BSS, les coordonnées géographiques, la commune et l'altitude au sol.
- 3) Le renseignement des données en BSS EAU est réalisé exclusivement par le BRGM. Les données concernent le descriptif de tous les points d'eau, les données piézométriques ainsi que le matériel piézométrique (utilisé sur le réseau de surveillance national sous maîtrise d'ouvrage BRGM). Cette saisie est effectuée en interne via une application ACCESS.

Nb : les producteurs de données piézométriques autres que le BRGM ne peuvent saisir leurs données en BSS EAU. Ils sont contraints d'utiliser des outils de saisie alternatifs autres et alimentent ainsi directement la base de données ADES.

- 4) Tout producteur de données quantitative (piézométrie) ou qualitative a la possibilité d'ajouter depuis le site producteur ADES un point d'eau à son réseau de surveillance. Lorsqu'un point d'eau est rattaché à un réseau de surveillance sur ADES, plusieurs données saisies en BSS EAU sont automatiquement transférées sur ADES : les données du descriptif du point d'eau en particulier.

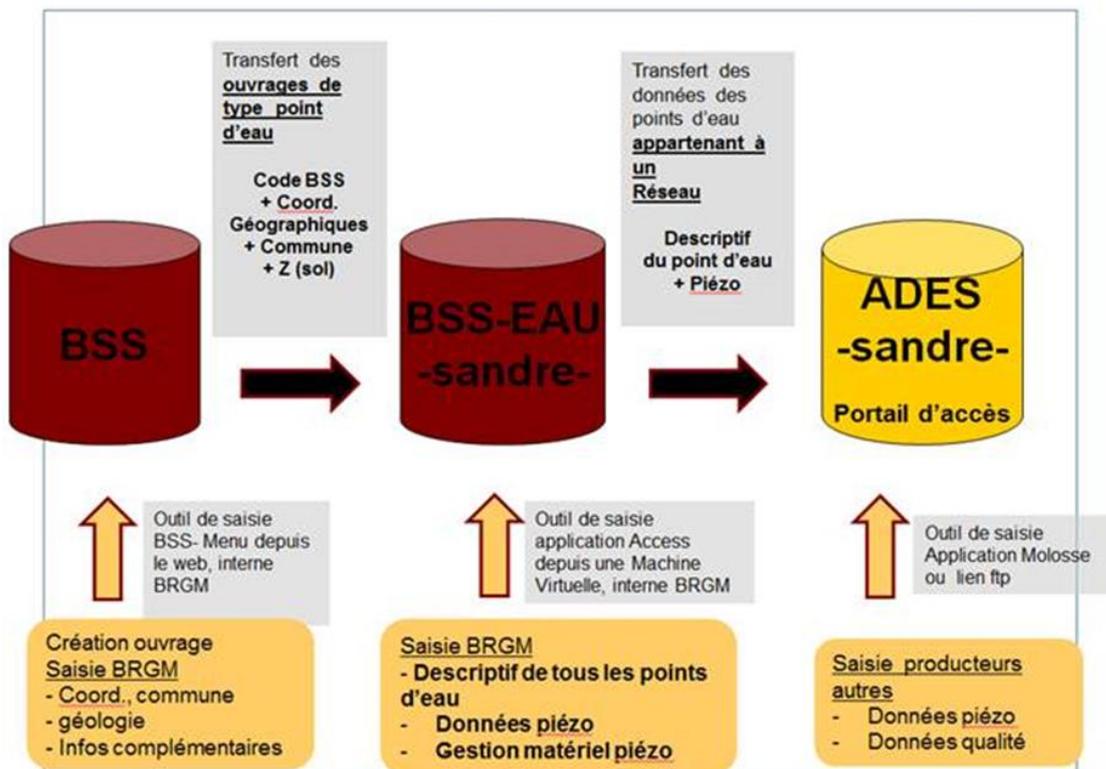


Illustration 19 – Schéma d'interconnexion entre BSS, BSS EAU et ADES

Nb : Une fusion ADES et BSS EAU est en cours de réalisation. Le futur portail qui en découlera simplifiera ainsi l'accès aux données qualité et piézométrique, en proposant un accès unique.

Extraction des bases de données nationales ADES et BSS EAU

Une extraction des données ADES et BSS EAU a ainsi été menée à l'intérieur des contours de la circonscription administrative Artois-Picardie, avec un tampon de 5 km.

256 piézomètres ADES et 1915 points d'eau BSS EAU ont été identifiés comportant au moins une valeur de niveau piézométrique.

- ➔ 252 points sont communs entre ADES et BSS EAU ;
- ➔ 4 points ont des valeurs dans ADES mais pas de valeur dans BSS EAU ;
- ➔ 1663 points ont des valeurs dans BSS EAU mais pas de valeur dans ADES.

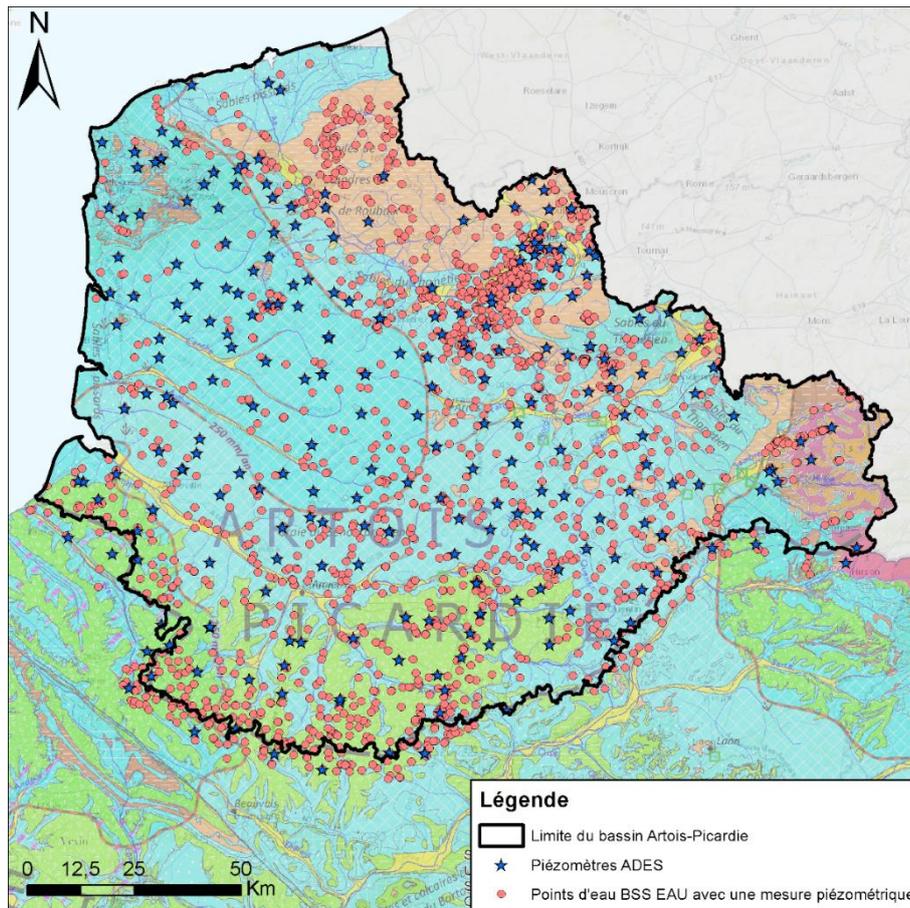


Illustration 20 – Localisation des piézomètres ADES et des points d'eau de la BSS EAU comportant au moins une mesure piézométrique (date de l'extraction : février 2019)

• Points communs

Parmi les 252 points communs :

- 55 n'ont pas la même valeur maximum
- 64 n'ont pas la même valeur minimum
- 172 n'ont pas la même valeur moyenne ni le même écart-type.

Cette différence s'explique simplement par des chroniques légèrement différentes entre les deux bases, pour un même point. La BSS EAU étant plus une base de connaissance, il se peut que certains points également dans ADES aient des données antérieures à la mise en place du réseau ADES et que ces données soient uniquement capitalisées dans la BSS EAU. Egalement,

il est possible que des données extrêmes aberrantes aient été corrigées dans une base et pas dans l'autre.

Au final, 146 des 252 points présentent une concordance parfaite entre ADES et BSS EAU pour les valeurs extrêmes.

Pour les 106 points non concordants, leurs chroniques ADES et BSS EAU ont été analysées et comparées. Cette expertise au cas par cas a abouti au choix de 19 valeurs max et/ou min provenant de la BSS EAU et de 87 valeurs min/max provenant d'ADES.

Au final, 1919 points d'eau avec au moins une mesure piézométrique sont donc sélectionnés.

- **Critères supplémentaires et corrections particulières**

L'objectif final étant d'aboutir à la détermination de zones potentielles d'interaction ESO/ESU, il est logique de ne s'intéresser qu'aux premières nappes rencontrées présentes dans le bassin. Il apparaît donc pertinent de retirer :

- Les points d'eau captant une nappe captive bien identifiée;
- Les points d'eau pour lesquels la connaissance du mode de gisement de la nappe n'est pas connue mais qui sont d'une profondeur telle qu'ils captent très probablement une nappe profonde (libre ou captive) sans réelle interaction avec le milieu superficiel.

Parmi les 1919 points d'eau initialement extraits :

- 1 point d'eau est décrit comme captant une nappe semi-captive (A) ;
- 3 captent une nappe captive artésienne (B) ;
- 4 captent une nappe libre et captive ou semi-captive (C) ;
- 155 captent une nappe captive (D) ;
- 486 captent une nappe libre (E) ;
- 1270 ne présentent pas d'information sur ce sujet (F).

Il a été décidé de retirer les points d'eau des catégories B et D de l'extraction initiale. Le nombre de points passe alors à 1761.

Puis, parmi les 1270 points d'eau sans description du type de nappe capté, une sélection des ouvrages dépassant les 100m de profondeur a été réalisée. Après une vérification au cas par cas, en particulier pour les points présentant les plus longues chroniques, il s'avère que 99 points d'eau peuvent être également retirés de l'extraction. A noter que ces points d'eau sont quasiment tous situés dans le quart nord-est du bassin, dans deux secteurs bien connus, l'un pour exploiter la partie captive de la Craie sous les Argiles de Flandres, l'autre pour exploiter la nappe captive du Carbonifère.

Enfin, 9 points d'eau ont été retirés car du fait d'un battement de nappe particulièrement douteux car dépassant les 30m.

Le nombre de points d'eau constituant le jeu de données passe ainsi à 1653 à cette étape de l'analyse.

Qualification de la fiabilité des points d'eau

- **Critère « Etat des connaissances sur les réservoirs captés par les points d'eau »**

Parmi les 1653 points d'eau :

- 558 sont associés à une (parfois deux) entités(s) du référentiel hydrogéologique BDLISA ;
- 1096 sont associés à une (parfois deux) masse(s) d'eau souterraine.

L'analyse des ordres relatifs des entités BDLISA associées ou des niveaux des masses d'eau souterraine permet d'éliminer quelques points d'eau restants captant des réservoirs trop profonds pour être véritablement pertinents pour l'objectif d'un calcul d'épaisseur de ZNS.

Considérant la présence, sur une large partie du bassin, d'une couche superficielle des Formations résiduelles à silex du nord de la France de faible épaisseur, inférieure à 2 m (code : 119AE17), le choix a été fait de considérer comme acceptables les points captant une entité d'ordre inférieur ou égal à 3.

Sur les 558 points d'eau associées à des entités BDLISA, 16 le sont avec des entités dépassant des ordres relatifs de 4. Ils correspondent tous à des ouvrages profonds de plus de 70m. Par conséquent, ils ont été retirés du jeu de données pour l'interpolation qui passe ainsi à 1637 points d'eau.

La connaissance d'un réservoir capté proche de la surface topographique est ainsi établie pour 1081 points d'eau (cf. Illustration 21) ; 544 du fait de connaissances sur la BDLISA et 537 sans connaissance sur la BDLISA mais avec une association à une masse d'eau souterraine affleurante. Les 556 points d'eau restants n'ont pas cette information, probablement du fait d'absence de coupe géologique interprétable ou de positionnement précis des crépines.

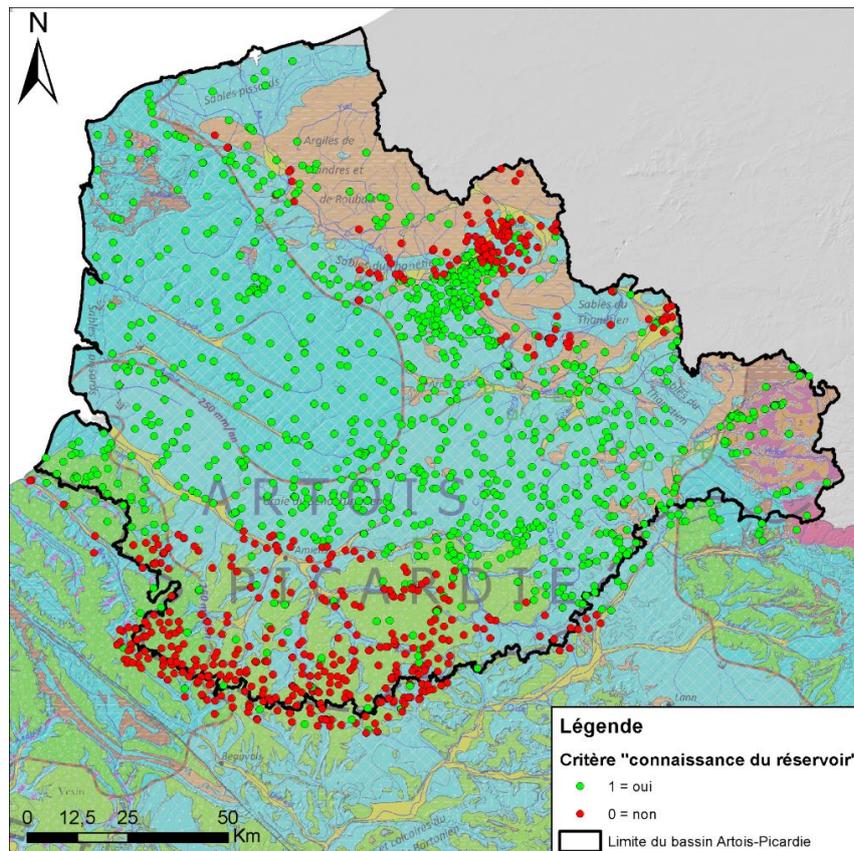


Illustration 21 - Représentation des piézomètres ADES et des points d'eau de la BSS EAU selon le critère « connaissance du réservoir »

- **Critère « Précision altimétrique des données »**

Parmi les 1637 points d'eau sélectionnés :

- 205 présentent des cotes relevées avec un niveau de précision de l'ordre du centimètre ;
- 22 présentent des cotes relevées avec un niveau de précision de l'ordre du mètre ;
- 616 présentent des cotes relevées avec un niveau de précision de l'ordre du décimètre ou plus ;
- 794 présentent des cotes relevées avec un niveau de précision inconnu.

Seuls les 205 points d'eau étant référencés du point de vue altimétrique au centimètre près (cf. Illustration 22) peuvent être qualifiés de précis, tous les autres points d'eau ne remplissant pas cette condition. Etant donnée son caractère moins discriminant, l'importance apportée à ce critère sera moindre que celle des autres.

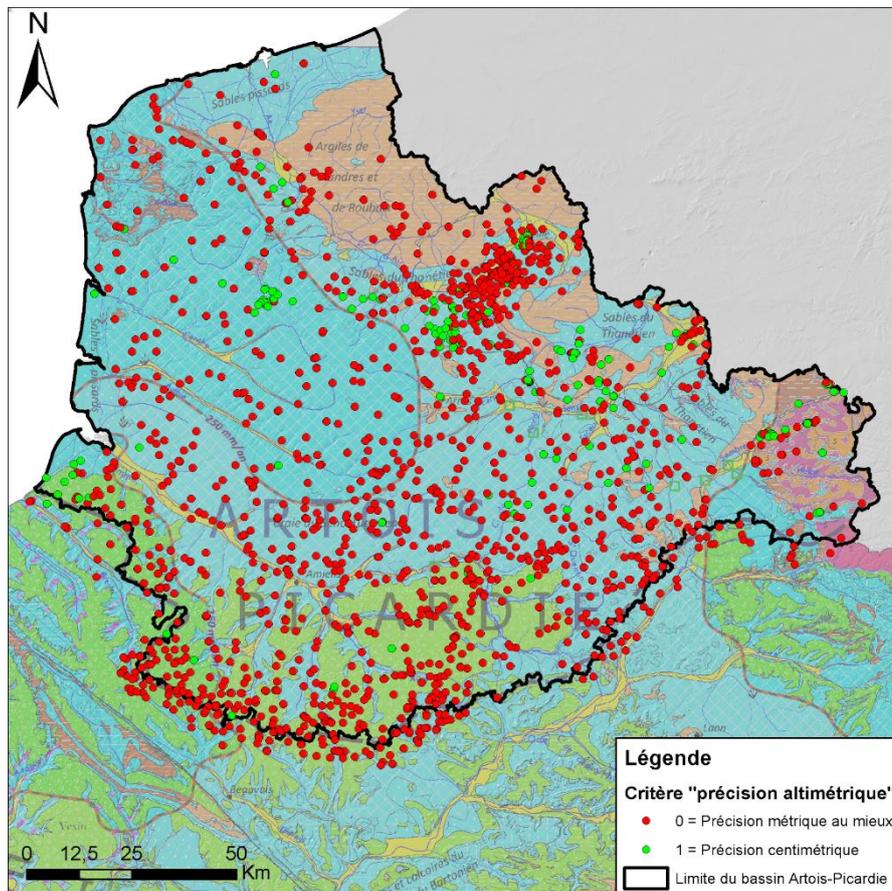


Illustration 22 – Représentation des piézomètres ADES et des points d'eau de la BSS EAU selon le critère « précision altimétrique »

- **Critère « Nombre de mesures suffisant »**

Parmi les 1637 points d'eau sélectionnés, seuls 413 présentent au moins 12 mesures par an en moyenne (cf. Illustration 23).

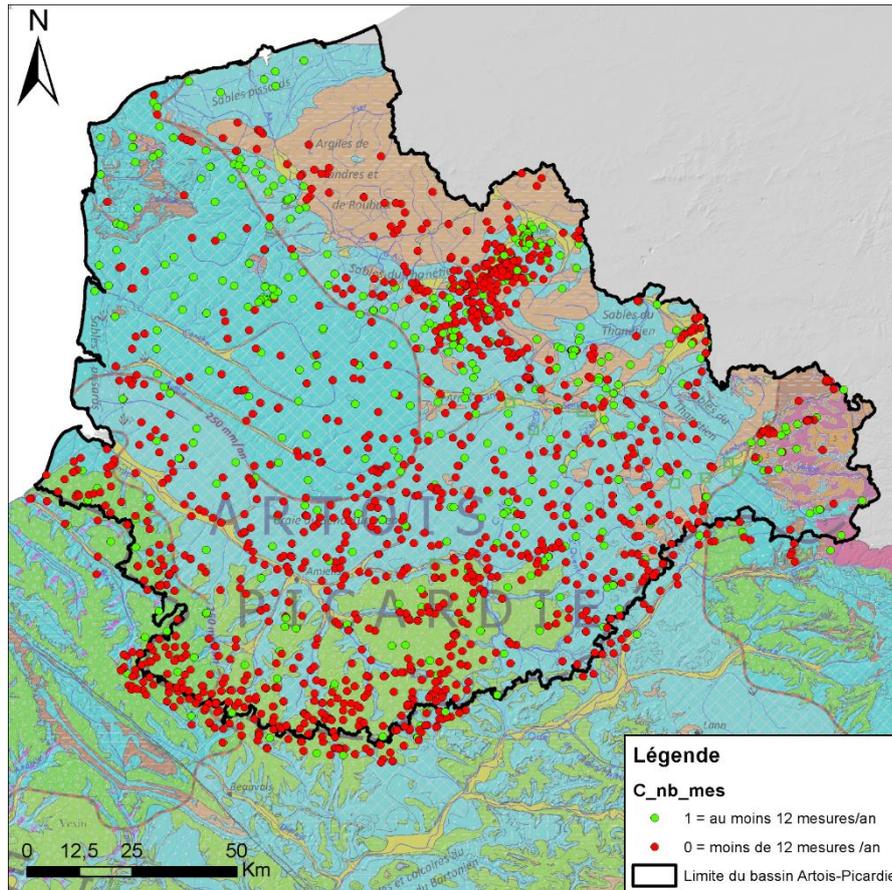


Illustration 23 – Représentation des piézomètres ADES et des points d'eau de la BSS EAU selon le critère « nombre de mesures par an »

Dans la présente étude, cette valeur seuil est considérée comme un minimum pour caractériser le point d'eau comme ayant un nombre de mesures suffisant pour en identifier des valeurs extrêmes pertinentes (min et max). C'est une approche volontairement simpliste qui permet de ne pas perdre trop de temps dans l'analyse fine des chroniques piézométriques. De toutes les manières, les points pour lesquels les chroniques, par exemple trop partielles, ne permettent pas d'obtenir des valeurs extrêmes pertinentes seront clairement identifiés et rejetés lors de la phase de validation croisée pour l'interpolation.

- **Critère « Cohérence entre la longueur de la chronique et les caractéristiques de cyclicité de la nappe captée »**

Dans le cadre de l'étude de Auterives *et al.* (2017) sur la représentativité du réseau de surveillances DCE du bassin Artois-Picardie, 486 points d'eau ont fait l'objet d'un calcul de variogrammes. Ce type de calcul permet, quand il aboutit, d'identifier le comportement de la nappe captée selon qu'elle présente une cyclicité annuelle, une cyclicité pluriannuelle, une double cyclicité avec prédominance annuelle ou, enfin, une double cyclicité avec prédominance pluriannuelle.

L'ensemble de ces points est présenté en Illustration 24. Pour plus de renseignements sur la méthode de calcul utilisée ainsi qu'une description plus détaillée des quatre classes sus-nommées, se référer aux travaux d'Auterives *et al.* (2017).

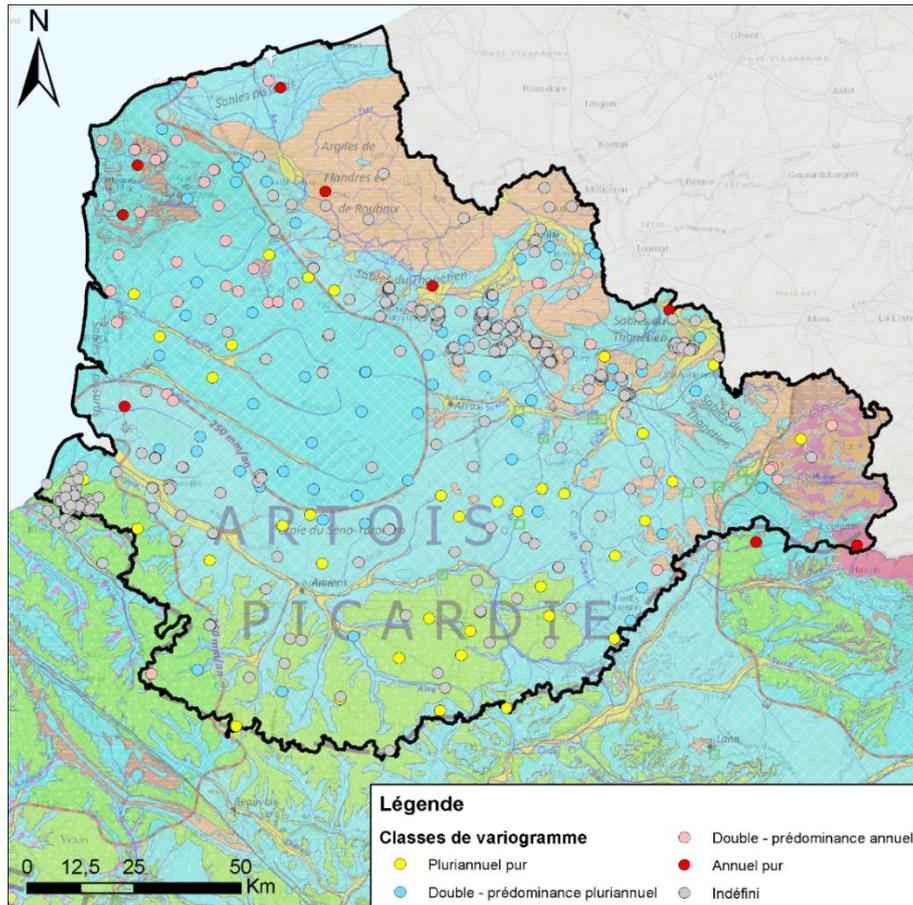


Illustration 24 – Localisation des variogrammes calculés en 2016 et caractérisation selon leur cyclicité

Seuls 145 d’entre eux ont présenté un signal de variogrammes suffisant pour permettre de véritablement les classer dans une des quatre catégories.

Pour un cycle annuel, la période minimale acceptable de chronique piézométrique est définie à 5 ans. Dans le cas d’un cycle pluriannuel ou d’un double cycle, cette période est de 10 ans minimum. Parmi ces 145 points, 135 présentent une longueur de chronique supérieure ou égale à ces valeurs seuil et donc adaptée par rapport aux caractéristiques de cyclicité de la nappe captée (cf. Illustration 25).

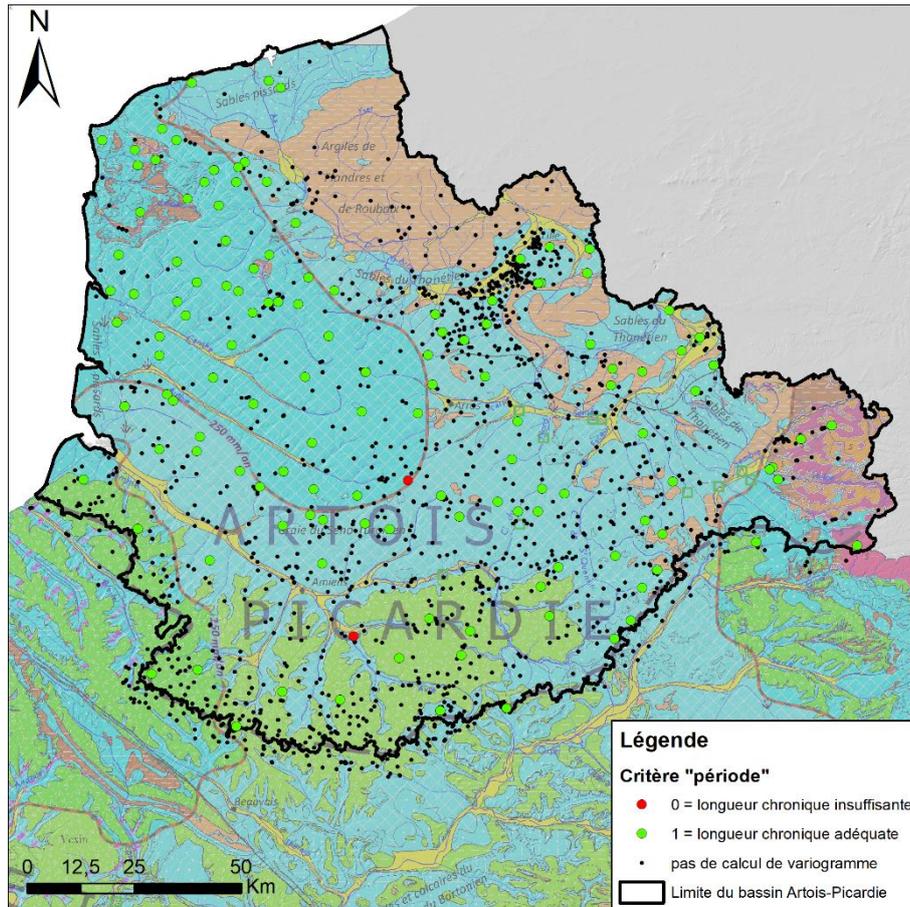


Illustration 25 – Représentation des piézomètres ADES et des points d'eau de la BSS EAU selon le critère « adéquation entre longueur de chronique et cyclicité de la nappe captée »

- **Combinaison des critères / classement final**

Au final, ces 4 critères sont combinés afin de proposer une classification approchée de la fiabilité des points utilisés pour l'interpolation de la grille d'épaisseur de zone non saturée. Cette classification est la suivante :

- Code = 1 → Seuls 23 points d'eau respectent l'ensemble des 4 critères sans exception.
- Code = 2 → 107 points d'eau respectent l'ensemble des critères sauf celui de la précision altimétrique suffisante.
- Code = 3 → 951 respectent au moins le critère « Connaissance de l'entité réservoir capté ».
- Code = 4 → Le reste (556) peuvent respecter parfois un ou deux critères mais pas celui minimum (à savoir la connaissance du réservoir).

Les 130 points appartenant à la codification 1 ou 2 répondent à quasiment tous les critères, permettant ainsi d'avoir un niveau de confiance important sur leurs valeurs minimum et maximum. Ils seront donc, dans la suite de l'approche, considérés systématiquement comme étant de fiabilité forte (modulo les corrections éventuelles lors de l'interpolation géostatistique).

Concernant les points des classes 3 et 4, le chapitre suivant détaille une analyse complémentaire menée afin de savoir dans quel contexte ont été enregistrées leurs valeurs extrêmes et ainsi d'estimer un classement entre fiabilité moyenne, faible ou très faible.

Périodes « Hautes Eaux » / « Basses Eaux »

- **Détermination des mois caractéristiques des « Hautes Eaux » et « Basses Eaux »**

Cette analyse a comme objectif d'accroître le nombre de points à intégrer dans le jeu de données pour les interpolations de grille d'épaisseur de ZNS, en affectant à ceux ayant un nombre insuffisant de mesures piézométriques, une information sur le contexte durant lequel ces mesures ont été prises. Savoir à quelle période de l'année ces mesures correspondent rendent leur utilisation possible pour l'interpolation, si jamais elles représentent une période de « Hautes Eaux » ou de « Basses Eaux ».

Les valeurs maximales et minimales collectées pour les points de classes 3 et 4 ne peuvent pas être systématiquement considérées comme les véritables valeurs « Hautes Eaux » et « Basses Eaux », étant donné leur nombre de mesures insuffisant et leur longueur de chronique trop faible.

L'analyse a donc été menée à l'échelle du bassin sur les 130 points d'eau de fiabilité forte, afin de caractériser au mieux les périodes durant lesquelles les hautes eaux et basses eaux sont susceptibles d'être rencontrées. Les mois pour lesquels ils atteignent leur valeur maximale et minimale ont été récupérés.

Dans le cas de fluctuations piézométriques suivant un cycle pluriannuel pur, il est à noter que cette démarche n'est pas satisfaisante, car ce sont surtout les années qui importent le plus avec des successions d'années sèches et d'années humides. Néanmoins, l'analyse des variogrammes sur le bassin montre une majorité de double cycle, avec une composante saisonnière souvent importante. A ce titre, on peut considérer que les valeurs min ou max « saisonnières » sont mesurées d'une année sur l'autre à peu près à la même période.

Pour les « Hautes Eaux », les valeurs maximales sont atteintes pour 72 points durant la période mars / avril / mai, sur le trois quarts sud du bassin (cf. Illustration 26). De même, l'analyse montre un décalage dans le dernier quart nord (Secteur du Boulonnais et Sables Pissards¹⁰, Sables du Thanétien dans une moindre mesure), avec 44 points qui montrent des valeurs maximales généralement atteintes durant la période décembre / janvier / février.

¹⁰ Formation sableuse du Flandrien supérieur (Quaternaire), située au nord du bassin Artois-Picardie, contenant une nappe superficielle de qualité plutôt médiocre et en contact avec le milieu marin (Manche)

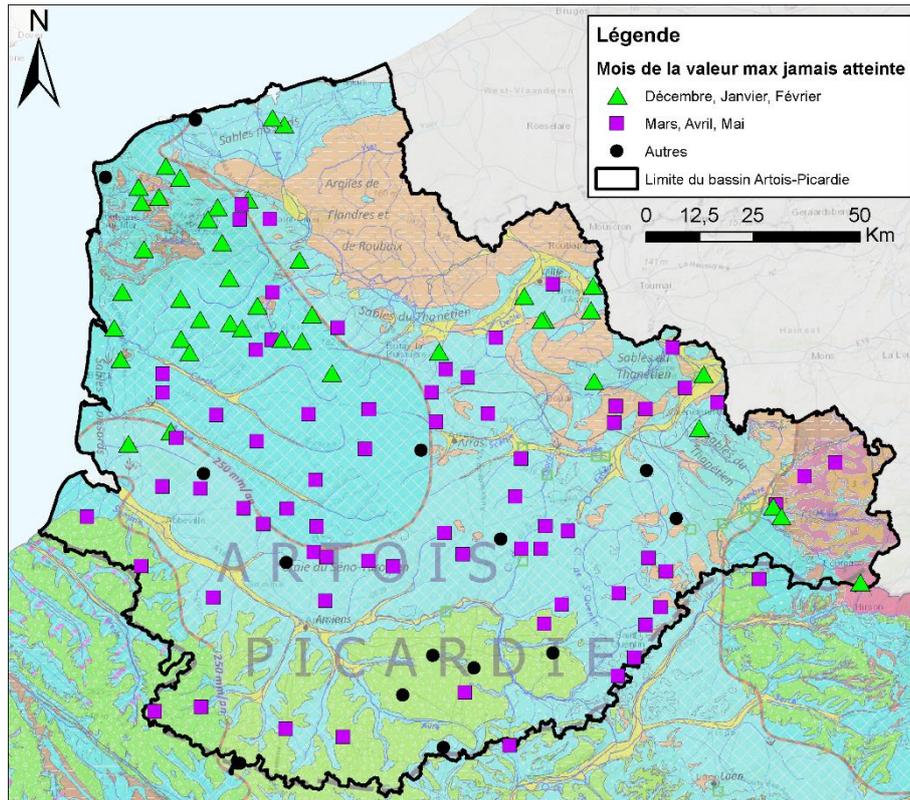


Illustration 26 – Identification des mois pour lesquels la valeur piézométrique maximale a été atteinte

Pour la caractérisation des mesures des points d'eau codées 3 ou 4, une distinction sera faite sur la période « Hautes Eaux » considérée, selon qu'ils se positionnent dans l'un ou l'autre de ces 2 secteurs.

Pour les « Basses Eaux », les résultats de l'analyse sont plus diffus. 83 points d'eau présentent des valeurs minimales durant la période entre octobre et janvier (cf. Illustration 27). La répartition des points durant ces quatre mois est homogène, ce qui ne permet pas de proposer une période plus fine.

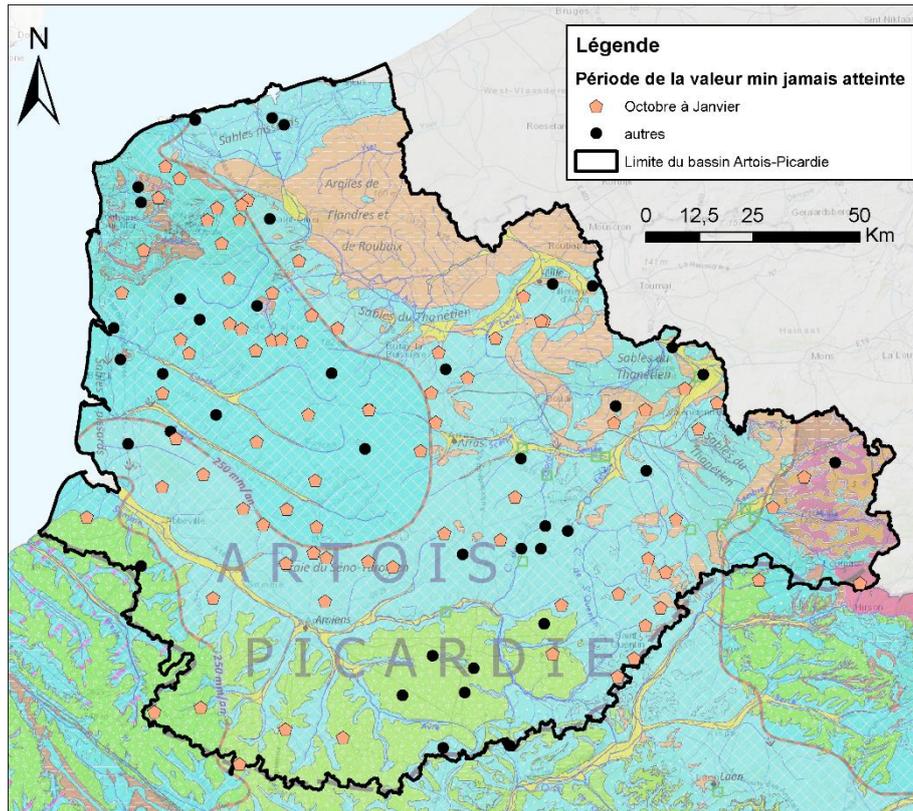


Illustration 27 - Identification des mois pour lesquels la valeur piézométrique minimale a été atteinte

A noter que pour certains points, notamment ceux dans le quart nord du bassin, les périodes Hautes Eaux et Basses Eaux sont par conséquent très proches. Néanmoins, les éventuelles incohérences sur les niveaux ponctuels pris en compte pour les interpolations de chacune de ces deux périodes ont été rapidement identifiées par l'analyse géostatistique détaillée dans le chapitre 3.4.

- **Affectation des valeurs des points peu fiables aux périodes « Hautes Eaux » ou « Basses eaux »**

Les points d'eau peu fiables ont ensuite été affectés à l'une des deux périodes « Hautes Eaux » ou « Basses Eaux », selon le mois à laquelle leur valeur de niveau piézométrique minimale a été enregistrée.

En basses eaux :

- 61 points ADES et 942 points BSS EAU ayant une valeur de niveau piézométrique minimale enregistrée entre octobre et janvier se voient ainsi attribuer un niveau de fiabilité moyenne ;
- Les points d'eau restants (valeur minimale en dehors de la période de « basses eaux ») sont automatiquement de fiabilité faible.

En Hautes eaux :

- Pour la partie « Craie », 62 points ADES et 799 points BSS EAU ayant une valeur de niveau piézométrique maximale enregistrée entre mars et mai se voient ainsi attribuer un niveau de fiabilité moyenne ;

- Pour la partie « Boulonnais », 2 points ADES et 28 points BSS EAU ayant une valeur de niveau piézométrique maximale enregistrée entre décembre et février se voient ainsi attribuer un niveau de fiabilité moyenne ;
- Les points d'eau restants (valeur maximale en dehors de ces 2 périodes de « hautes eaux ») sont automatiquement de fiabilité faible.

3.2.2. Données complémentaires

Mesures de la BSS (hors ADES et BSS EAU)

Les critères de sélection initiale de ces points sont identiques à ceux utilisés pour les points ADES et BSS EAU (nappe libre, profondeur du forage < 100m, etc...).

10683 points avec une mesure piézométrique ont été extraits de la BSS. Par défaut, étant donné leurs caractéristiques (méconnaissance quasi-systématique de la nappe captée, une seule mesure piézométrique réalisée généralement influencée par la foration), ces points sont considérés comme des points de fiabilité faible par défaut.

L'exercice d'attribution des périodes « Hautes Eaux » ou « Basses Eaux » a également été réalisé pour ces points, avec la même méthode que celle décrite dans le chapitre 3.2.1. Au total :

- 3244 mesures vont être intégrées uniquement dans le jeu de données servant à l'interpolation de la grille de ZNS « Hautes Eaux » ;
- 3229 mesures vont être intégrées uniquement dans le jeu de données servant à l'interpolation de la grille de ZNS « Basses Eaux » ;
- 4210 mesures vont être intégrées dans le jeu de données servant à l'interpolation des deux grilles (« Moyennes Eaux ») mais auront une fiabilité classée en « Très Faible ».

Une analyse comparative de certaines de ces valeurs de points BSS avec leurs voisins, plus fiables, tirés des bases ADES et/ou BSS EAU, ont fait qu'au final, **7166 points BSS** ont été retenus comme données d'entrée pour la grille d'épaisseur de ZNS en « **Basses Eaux** » et **7247 points BSS** ont été retenus comme données d'entrée pour la grille d'épaisseur de ZNS en « **Hautes Eaux** ».

Données de cartes piézométriques

- **Carte piézométrique « Hautes Eaux » 2001 de la Craie**

Cette carte piézométrique a été réalisée par Caous *et al.* (2001) suite aux importantes crues de nappes de l'automne-hiver 2000-2001 et du printemps 2001 qui ont provoqué des inondations sur l'ensemble du bassin Artois-Picardie (cf. Illustration 28).

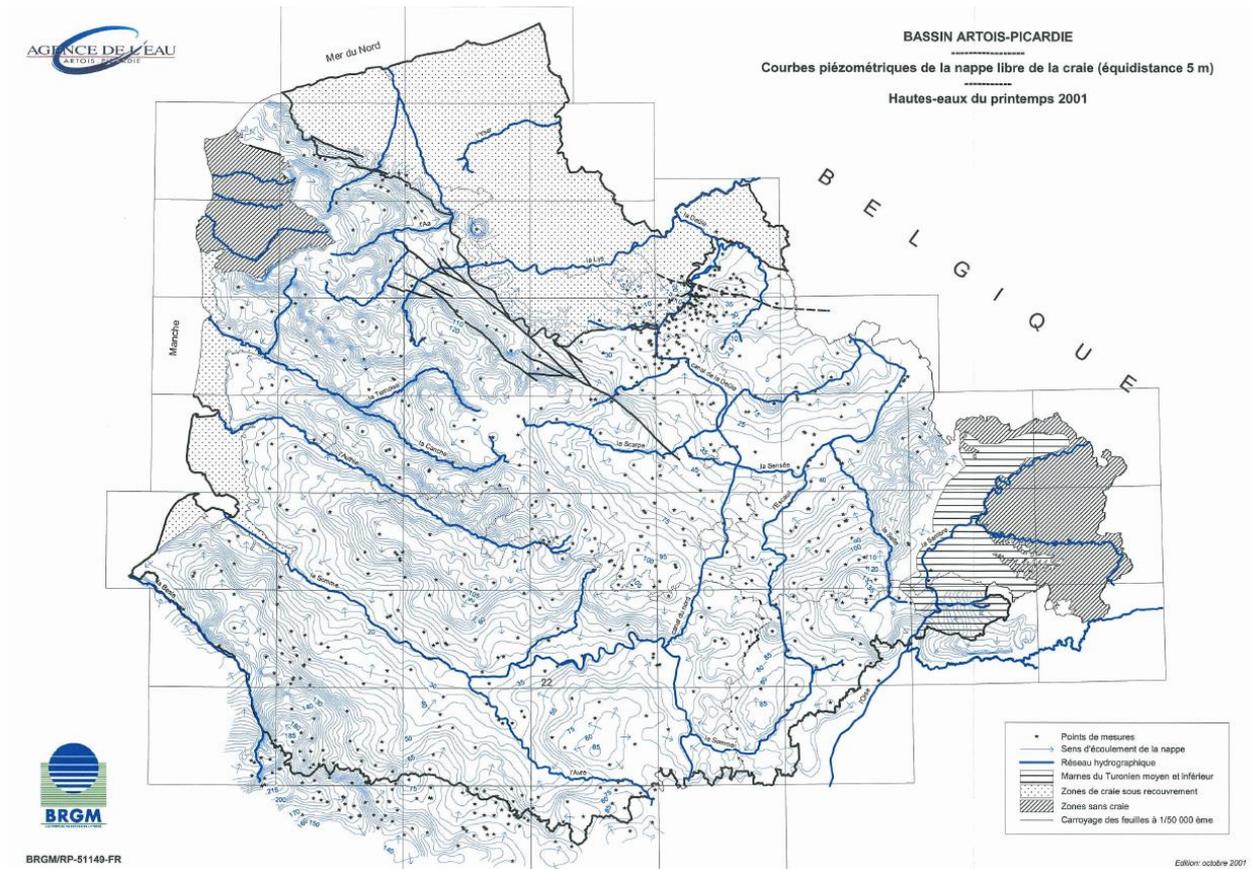


Illustration 28 – Courbes piézométriques de la nappe libre de la craie (équidistance 5m) – Hautes eaux du printemps 2001 (Caous et al., 2001)

799 mesures piézométriques de terrain faites pour la réalisation de cette carte piézométrique ont été récupérées et ont été comparées aux valeurs maximales renseignées pour ces mêmes points dans ADES et/ou BSS EAU.

Les valeurs mesurées en période de « Hautes Eaux » 2001 sont identiques aux valeurs maximales jamais atteintes pour 473 points d'eau. Pour 220 autres points, les valeurs de 2001 ne sont pas les plus hautes jamais atteintes, des valeurs encore supérieures ont été mesurées et bancarisées dans ces bases nationales, pour d'autres périodes. Par conséquent, aucune modification n'est apportée aux valeurs « Hautes Eaux » pour ces 693 points dans le jeu de données destiné à l'interpolation.

A contrario, les mesures réalisées en 2001 s'avèrent supérieures à celles bancarisées dans ces bases ADES et/ou BSS EAU pour 20 points d'eau communs. Considérant la bonne fiabilité de ces mesures et le caractère exceptionnellement haut de ces niveaux piézométriques en 2001, ces 20 valeurs considérées pour l'interpolation « Hautes Eaux » ont donc été mises à jour.

Enfin, 86 points de cette campagne piézométrique ne sont pas bancarisés dans ADES ni dans BSS EAU. Une comparaison avec les données tirées de la BSS montre que seuls 3 de ces 86 ouvrages présentent une valeur « Hautes Eaux ». Du fait du très faible niveau de confiance appliqué par défaut aux données de la BSS, les valeurs « Hautes Eaux » utilisés pour ces 3 ouvrages seront celles mesurées pour la carte piézométrique de 2001.

Pour les 83 points restants, qui n'ont pas de mesure renseignée en BSS, ils ont donc été rajoutés au jeu de données « Hautes Eaux », avec un niveau de fiabilité « Fort ».

Plus-value totale pour HE : 106 valeurs (20+86)

- **Carte piézométrique « Basses Eaux » 1997 de la Craie**

Les points de mesure utilisés pour la confection de cette carte piézométrique (travaux de l'Agence Artois-Picardie) n'ont pas été retrouvés. Par conséquent, une approche particulière a été mise en œuvre pour exploiter au mieux les informations tirées de cette carte.

1000 points ont été créés le long des isopièzes de la carte, avec une répartition aléatoire afin de ne pas risquer d'influencer l'interpolation de la grille de ZNS « Basses Eaux ». Les valeurs de l'isopièze correspondant ainsi que du MNT au pas de 25 m sont affectées à chacun de ces points.

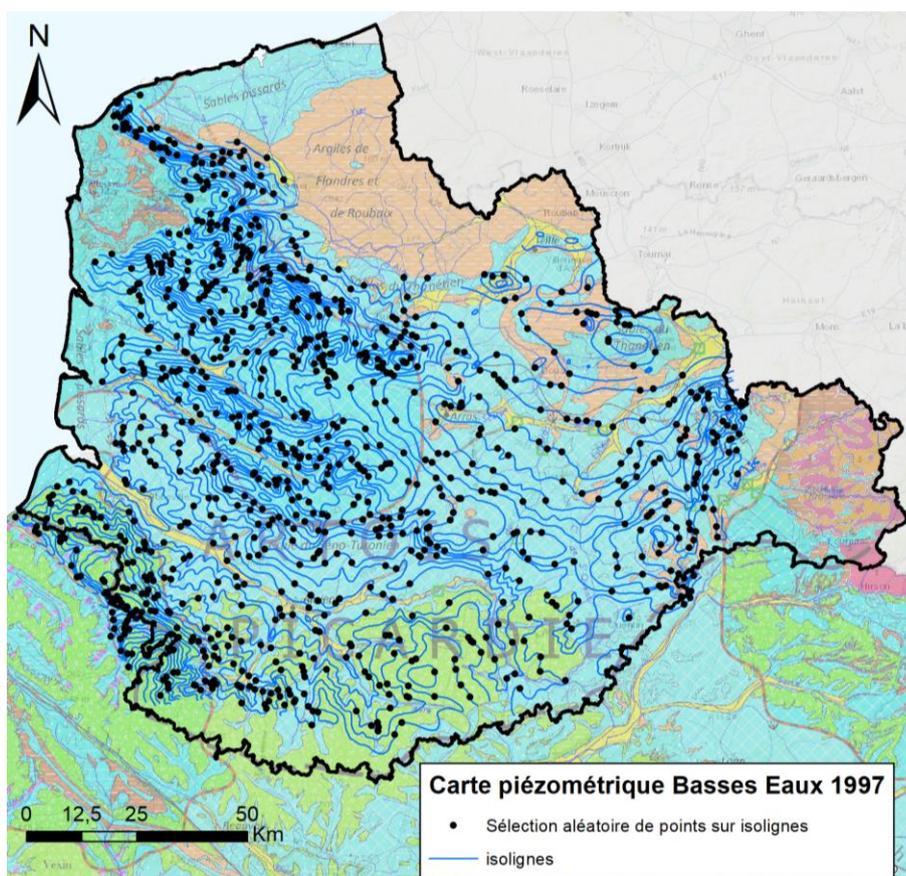


Illustration 29 – Sélection des points au droit des isolignes de la carte piézométrique Basses Eaux 1997

Après quelques comparaisons avec des données ponctuelles fiables dans certaines zones, 12 de ces points ont été supprimés.

Plus-value totale pour le jeu de données BE : 988 valeurs

- **Carte piézométrique « Basses Eaux » 1997 du Landénien**

Les 82 points de la campagne de mesures réalisée pour cette carte de Caous *et al.* (1997) ont été récupérés (cf. Illustration 30). Parmi ces points, 40 d'entre eux présentent les mêmes valeurs « Basses Eaux » que celles tirées de la BSS EAU. Seul un point, provenant de la BSS, présente une valeur « Basse Eaux » supérieure et a donc été mis à jour avec la valeur de cette carte piézométrique, la considérant plus fiable.

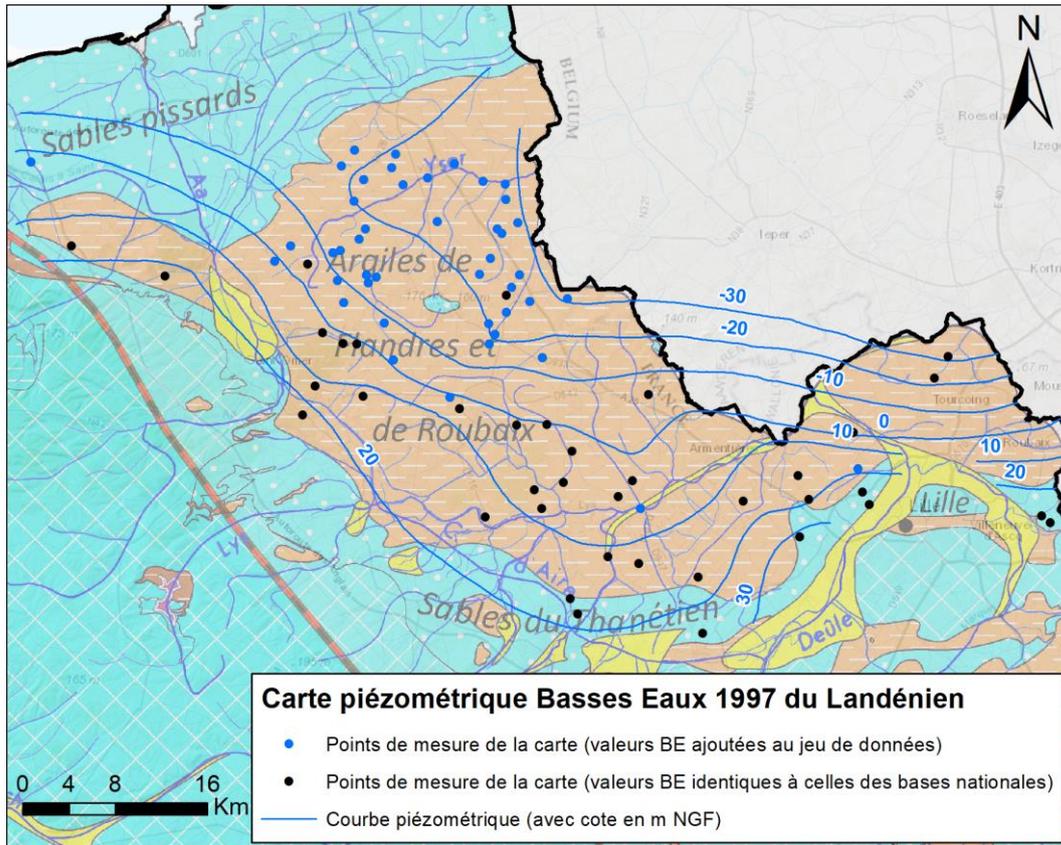


Illustration 30 – Isoignes et points de mesure de la carte piézométrique Basses Eaux 1997 du Landénien (d’après Caous et al., 1997)

Enfin, les 41 points d’eau restants, dont les valeurs ne sont pas présentes dans les bases nationales, ont tous été ajoutés au jeu de données destiné à la période « Basses Eaux ».

Plus-value totale pour le jeu de données BE : 42 valeurs (41+1)

Têtes de bassin versant

Pour extraire les têtes de bassin du réseau hydrographique, le référentiel de la BD Carthage de l’IGN a été traité avec des outils permettant de hiérarchiser le réseau. Dans un premier temps, une sélection a été établie sur des cours d’eau naturels, permanents et intermittents pour ensuite isoler les brins initiaux qui sont présents en amont des bassins versants.

Dans un second temps, seuls les points qui sont à l’origine de ces brins initiaux ont été retenus afin de leur affecter les valeurs d’altitude issus du MNT de l’IGN au pas de 25 m.

Pour affecter les points en basses et hautes eaux, une valeur médiane de l’IDPR leur est attribuée qui est un indicateur permettant de qualifier la capacité des sols à ruisseler ou à s’infiltrer.

Pour cette étude, ce sont les points dont les valeurs médianes d’IDPR sont inférieures ou égales à 1000 (infiltration prépondérante) qui nous intéressent car elles indiquent une zone où une partie des pluies efficaces peuvent migrer vers la nappe et inversement les eaux souterraines ont la possibilité de venir alimenter les cours d’eau (Pinson et al., 2019). Les points sont répartis en basses et hautes eaux de la manière suivante :

- Le point appartient à un brin intermittent et la valeur médiane de l'IDPR ≤ 1000 alors le point est qualifié en hautes eaux,
- Le point appartient à un brin permanent et la valeur médiane de l'IDPR ≤ 1000 alors le point est qualifié en basses eaux et hautes eaux.

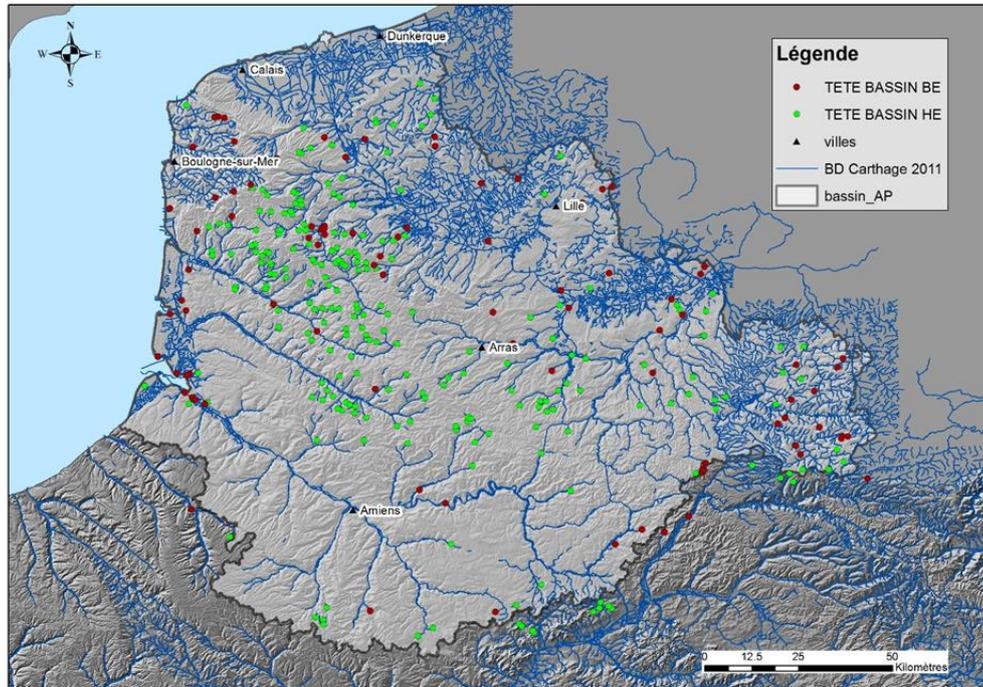


Illustration 31 – Carte de la localisation des têtes de bassin du réseau hydrographique

Plus-value totale pour le jeu de données HE : 221 valeurs

Plus-value totale pour le jeu de données BE : 87 valeurs

Sources

Pour densifier le jeu de données, dans les secteurs de l'Avesnois et du Boulonnais, des sources ont été sélectionnées en fonction de leur proximité avec les cours d'eau. La distance maximale retenue entre les sources et les cours d'eau est de 25 m.

Au final, 331 sources ont été retenues pour être intégrées dans le jeu de données pour l'interpolation des altitudes des nappes en Hautes Eaux réparties de la manière suivante : 182 sources dans le secteur de l'Avesnois et 129 dans le Boulonnais (cf. Illustration 32).

Les valeurs d'altitudes des sources ont été obtenues en utilisant les valeurs du MNT de l'IGN au pas de 25 m.

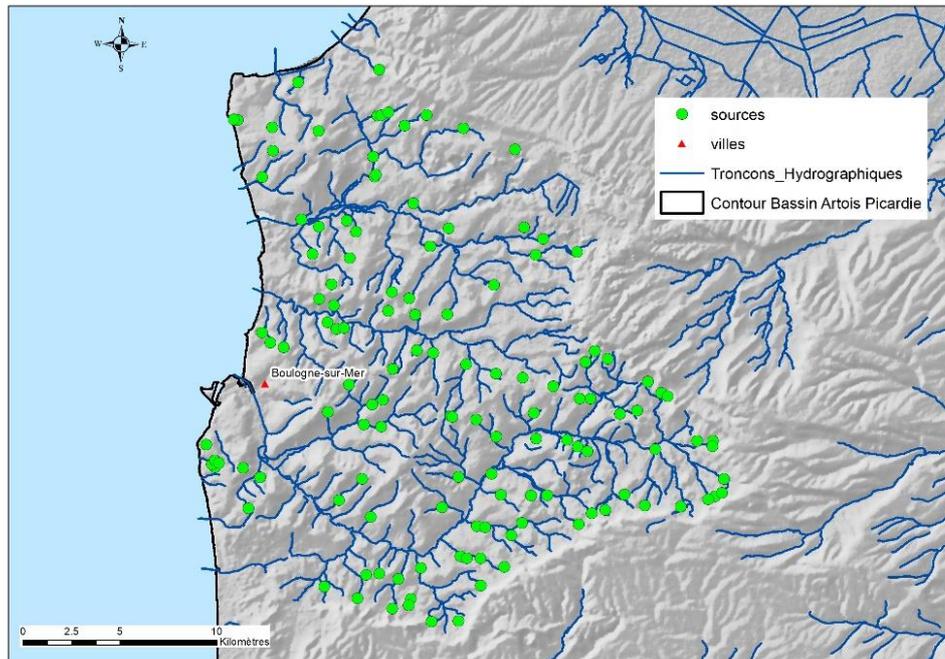


Illustration 32 – Localisation des sources situées à moins de 25 m d'un cours d'eau dans le secteur du Boulonnais

Des informations sur l'intermittence et la pérennité de ces sources ont permis de les associer de manière plus fine à l'un ou l'autre des 2 contextes considérés.

Plus-value totale pour le jeu de données HE : 311 valeurs (sources pérennes + intermittentes)

Plus-value totale pour le jeu de données BE : 75 valeurs (uniquement sources pérennes)

3.3. DETERMINATION DES UNITES FONCTIONNELLES

Lors de l'analyse des indicateurs à explorer pour la partie géomatique, il est apparu nécessaire de disposer d'une unité spatiale cohérente en terme d'hydrologie et d'hydrogéologie permettant ainsi d'établir plus facilement les liens entre les eaux de surface et les eaux souterraines.

Les unités fonctionnelles sont supposées avoir un comportement homogène parce qu'elles résultent de l'intersection de couches d'informations géographiques issues de référentiels communément exploités (masses d'eau souterraine, entités hydrogéologiques, ...). Les couches d'informations sont donc choisies en fonction de la thématique du projet (hydrogéologie, géologie, hydrologie...). Elles constituent le moyen d'associer des résultats à des objets aisément manipulables dans les systèmes d'informations couramment constitués dans le domaine de l'Eau.

La création des unités fonctionnelles permet aussi de comparer des données issues de différentes échelles, d'améliorer les temps de traitements géomatiques et d'incrémenter les données statistiques des différents indicateurs.

Dans cette étude, pour répondre à la thématique du lien entre les eaux souterraines et les eaux de surface, les unités fonctionnelles ont été construites en croisant les informations SIG suivantes : les entités de la BDLISA version 2, les bassins versants de surface et les masses d'eau souterraine.

3.3.1. Les données SIG

Les entités BDLISA

La BDLISA utilisée est celle de niveau 3 (local) ordre 1 (à l'affleurement) à l'exception des zones recouvertes par les argiles à silex. Pour ces secteurs particuliers c'est la craie du Séno-Turonien du bassin Artois-Picardie (ordre 2) qui est retenue à la place de l'ordre 1 (cf. Illustration 33).

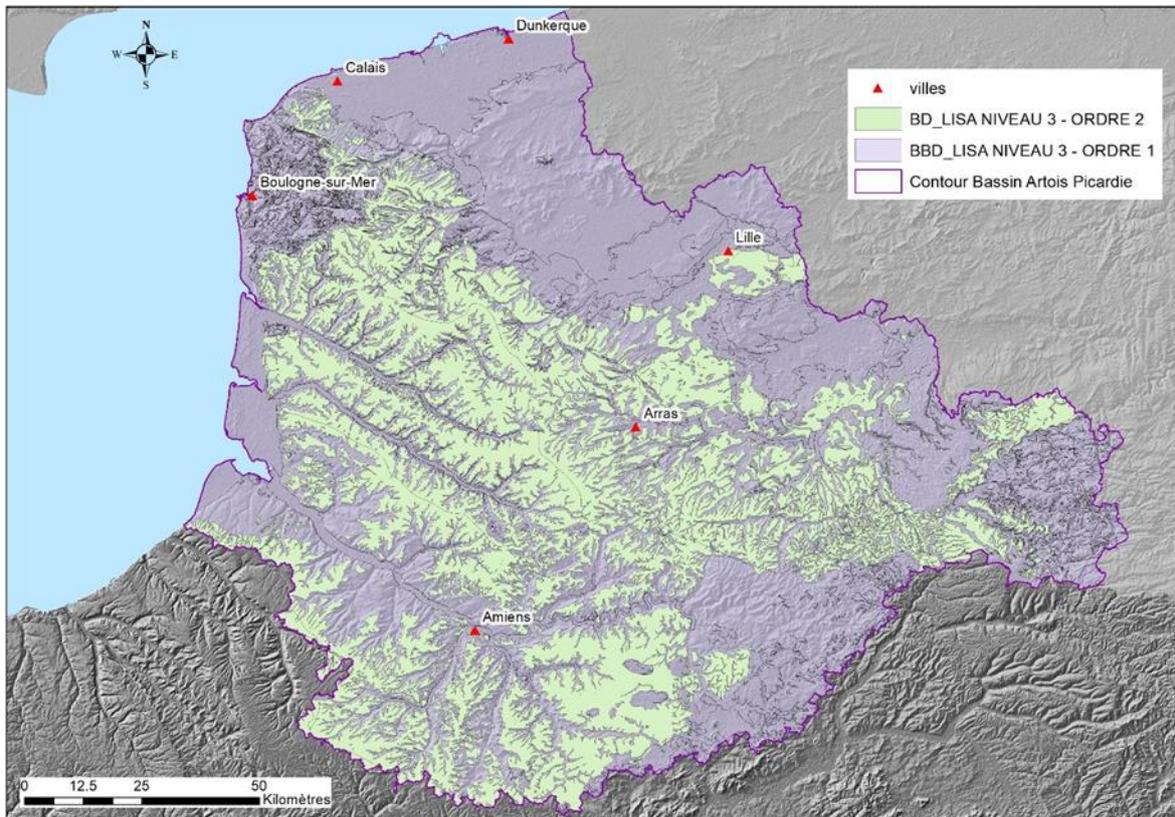


Illustration 33 – Entités BDLISA niveau 3 (ordre 1 et 2) utilisées pour la création des unités fonctionnelles

Les bassins versants de la BD Carthage ®

La BD Carthage, ou Base de Données sur la CARTographie THématique des AGences de l'Eau et du ministère chargé de l'environnement, produite par l'IGN, contient les données complètes du réseau hydrographique français. Les entités hydrologiques sont de type vectorielle et décrivent en fonction de sa nature : un cours d'eau naturel ou aménagé, un bras naturel ou aménagé, une voie d'eau artificielle (canal, ...), un plan d'eau ou une ligne littorale ainsi que par son régime : permanent ou intermittent. La nature d'une entité hydrographique n'est pas constante sur toute l'entité. Par exemple, un cours d'eau naturel peut être aménagé sur une partie. La BD Carthage a une précision décimétrique et a été conçue pour être utilisée à une échelle de base allant du 1/50 000 au 1/100 000.

Les bassins versants sont issus de la couche SIG des zones hydrographiques. Ces contours sont élaborés par découpage du territoire en bassins versants élémentaires avec un nœud hydrographique comme exutoire et un cours d'eau pour drain principal (cf. Illustration 34).

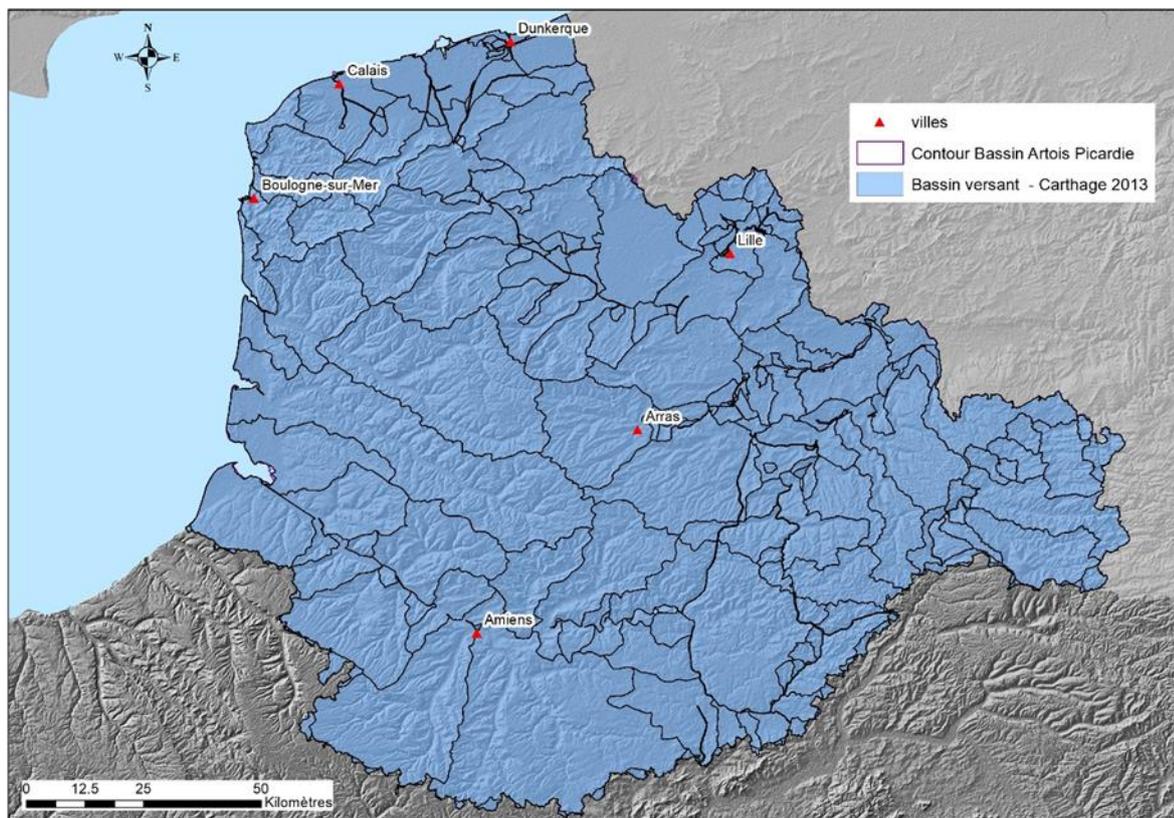


Illustration 34 – Zones hydrographiques de la BD Carthage (2013) utilisés pour la création des unités fonctionnelles

Les masses d'eau souterraines

Les masses d'eau souterraine sont issues d'une révision des contours produits dans le cadre des travaux d'Etat des Lieux 2019. Les masses d'eau retenues sont celles d'horizon 1, c'est-à-dire celles qui sont localisées à l'affleurement. Le territoire du bassin Artois Picardie est décrit à l'aide de seize masses d'eau souterraine de taille assez conséquente comme le montre l'illustration 35.

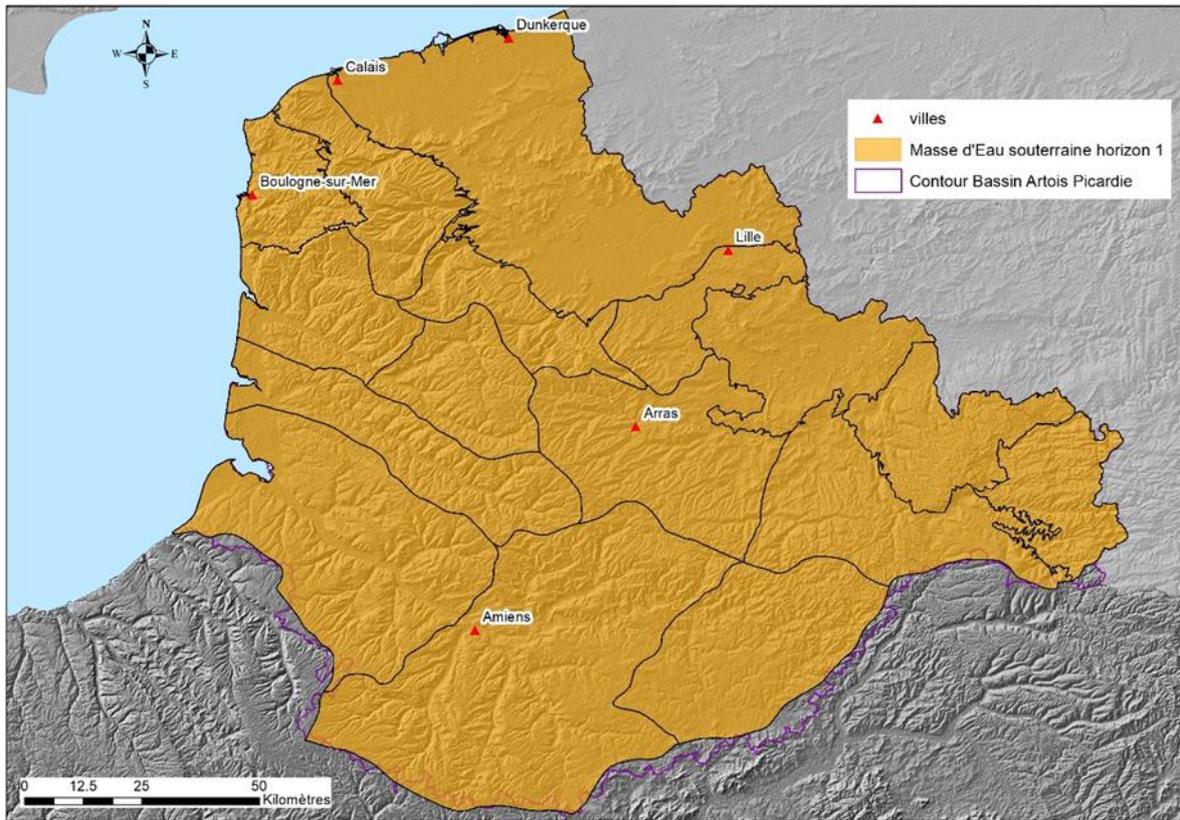


Illustration 35 – Les masses d'eau souterraine à l'affleurement (référentiel version « Etat des lieux 2019 »)

3.3.2. Résultat du croisement

Le croisement entre les contours des entités de la BDLISA, des bassins versants issus de la BD Carthage 2013 et des masses d'eau souterraine 2019 a permis de créer 3 932 unités fonctionnelles d'une superficie moyenne de 5 km². Pour des raisons d'échelle, seuls les polygones de plus de 0,05 km² ont été retenus pour cette étude, les polygones plus petits ayant été agrégés dans des unités plus grandes (cf. Illustration 36).

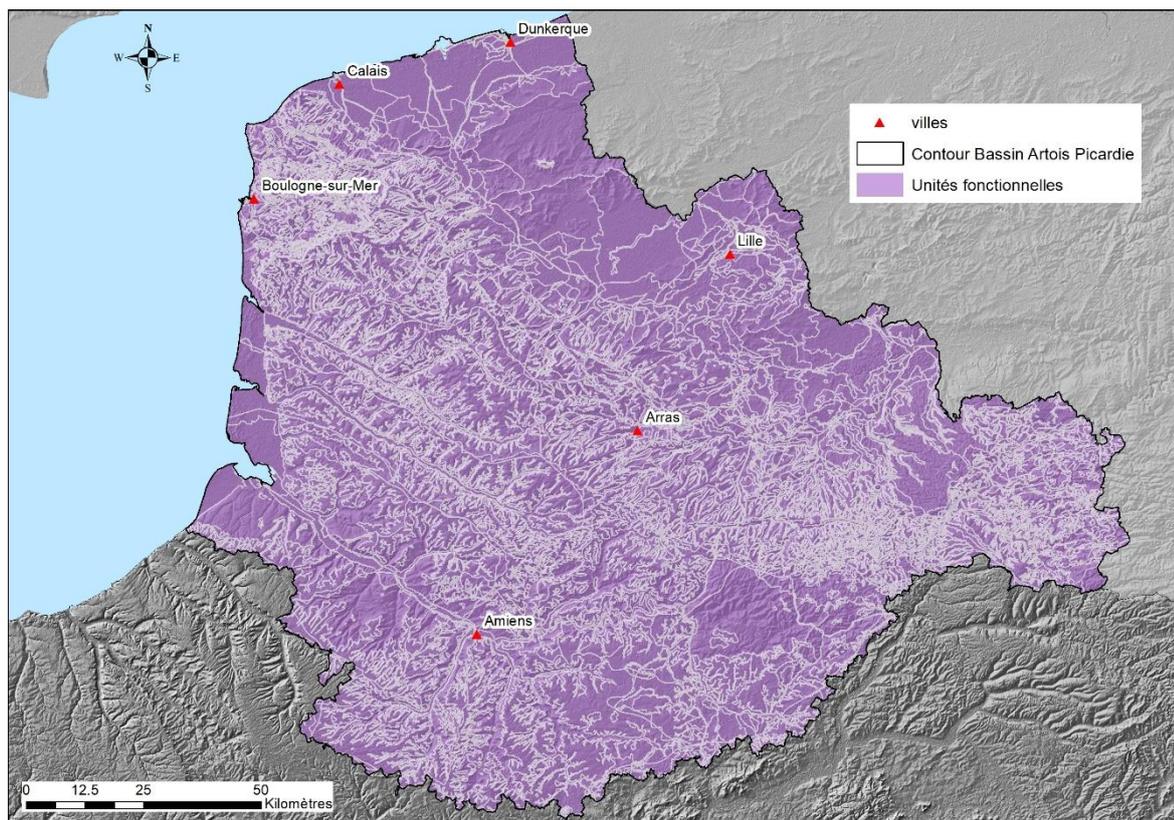


Illustration 36 – Les unités fonctionnelles du bassin Artois Picardie

Ces unités fonctionnelles permettent d'agréger des indicateurs calculés à différentes échelles comme décrit dans le chapitre 3.5.

3.4. CALCUL DES SURFACES PIEZOMETRIQUES BASSES EAUX ET HAUTES EAUX

3.4.1. Données disponibles

Les données disponibles pour le calcul des surfaces piézométriques Hautes Eaux et Basses Eaux sont les suivantes :

- données sur les niveaux piézométriques Hautes eaux et Basses eaux décrites dans le chapitre 3.2 ;
- contour de la zone d'étude.

En outre on dispose également des informations complémentaires suivantes :

- modèle numérique de terrain ;
- carte géologique.

Données Hautes eaux et Basses Eaux

Les données concernant les niveaux piézométriques Hautes Eaux et Basses Eaux sont réunies selon la procédure expliquée dans le chapitre 3.2.

La répartition des points est indiquée en Illustration 37 pour les Basses Eaux et Illustration 38 pour les Hautes Eaux.

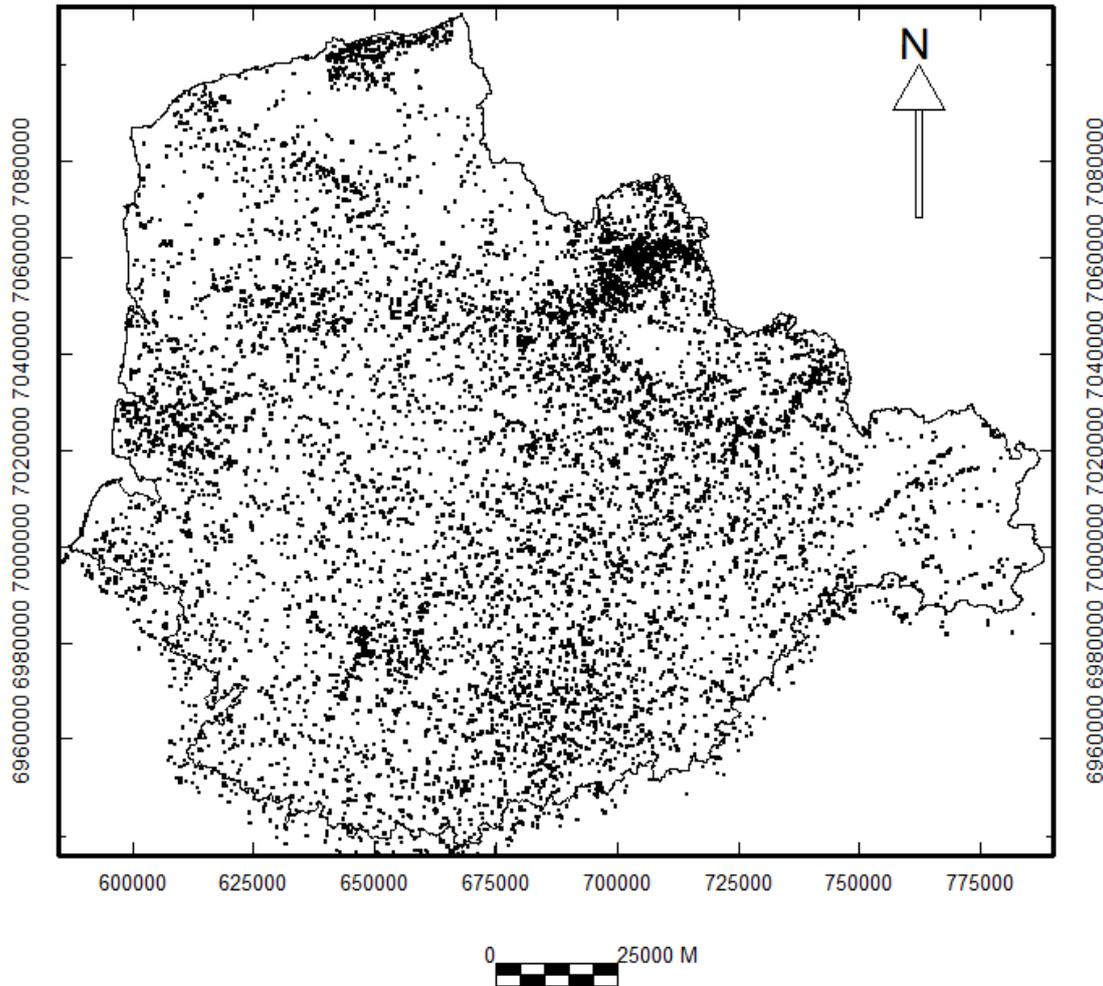


Illustration 37 – Répartition des données de Basses Eaux (coordonnées X en abscisses, coordonnées Y en ordonnées : RGF Lambert 93)

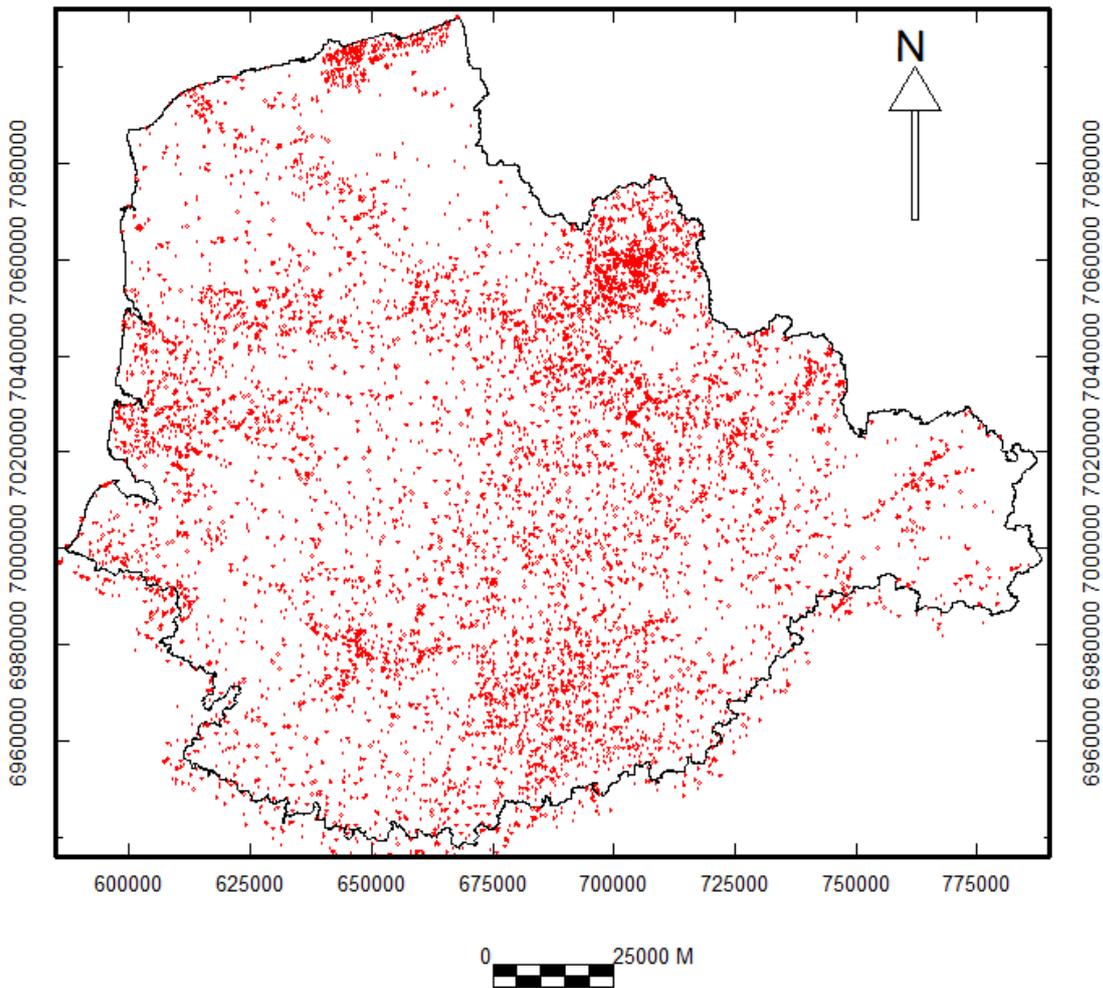


Illustration 38 – Répartition des données de Hautes Eaux (coordonnées X en abscisses, coordonnées Y en ordonnées : RGF Lambert 93)

Modèle numérique de terrain

Le modèle numérique de terrain utilisé est le MNT de l'IGN, disponible à la maille 25m. Sur l'ensemble de la zone d'étude, cela représente un total de $8052 * 6920 = 55\,719\,840$ mailles.

Le MNT est ensuite combiné avec les cartes piézométriques Hautes Eaux et Basses Eaux pour en déduire l'épaisseur de la ZNS.

3.4.2. Carte géologique

La carte géologique permet de visualiser le contexte géologique pour chaque aquifère.

Carte géologique, MNT et limite du bassin sont représentés en Illustration 39.

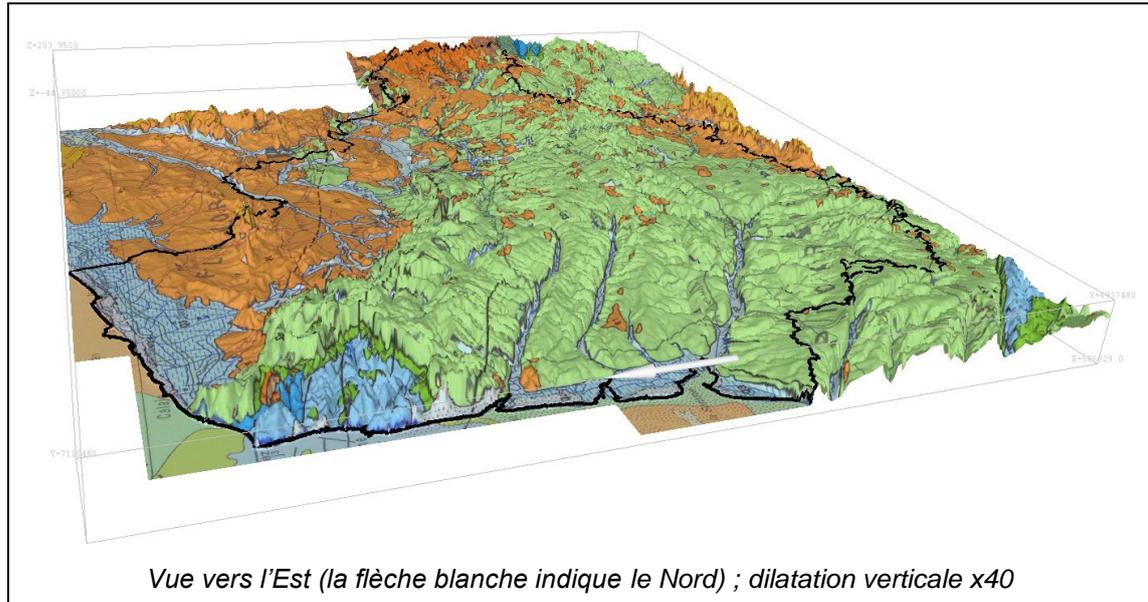


Illustration 39 – MNT, carte géologique au million et contour de la zone d'étude

3.4.3. Contrôle de cohérence du premier jeu de données et correction de ce jeu de données

Une analyse géostatistique préliminaire est effectuée sur le premier jeu de données « Hautes Eaux » / « Basses Eaux ».

Pour cela les variogrammes des cotes piézométriques sont calculés pour les deux situations (Hautes Eaux et Basses Eaux), puis une validation croisée est réalisée.

Cette première analyse permet de repérer rapidement les points semblant singuliers (notamment par rapport aux points voisins). Une vérification des données permet d'éliminer les points erronés ou de les corriger lorsque c'est possible.

L'illustration 40 montre ainsi le variogramme¹¹ de la cote piézométrique Basses Eaux (Z_BE) calculé à partir de l'ensemble des données (courbe en noir, toutes directions confondues). Ce variogramme fait apparaître un effet de pépité important qui en réalité est dû à quelques données erronées. En l'ajustant sans prendre en compte d'effet de pépité (cf. Illustration 40), on peut réaliser une validation croisée qui permet d'identifier un certain nombre de points potentiellement erronés.

¹¹ Le variogramme est un outil statistique qui synthétise la structure de la variable. Pour une direction donnée, il indique comment varie l'écart des valeurs prises en 2 points X et X+h en fonction de la distance h. Il renseigne sur les anisotropies éventuelles et sur le degré de régularité de la variable.

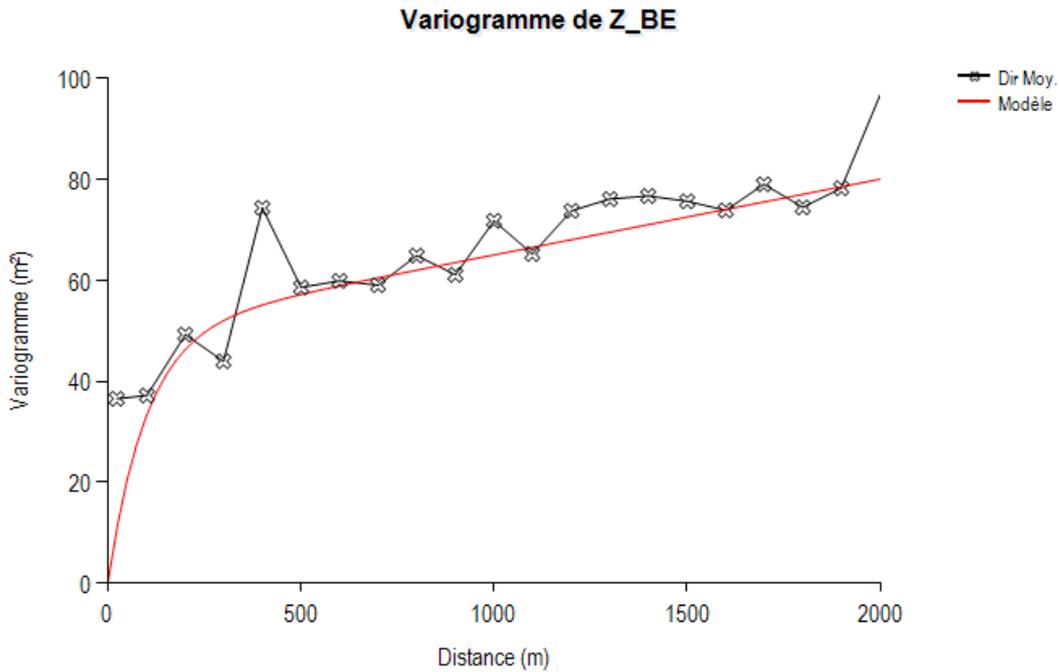


Illustration 40 – Ajustement du variogramme des données Basses eaux (jeu de données initial) en ignorant l'effet de pépité

En éliminant ces points dans un premier temps, et en comparant le variogramme du nouveau jeu de données ignorant ces points, on peut constater que le nouveau variogramme ne montre plus d'effet de pépité (Illustration 41, où ont été éliminés 224 points pour lesquels l'écart-type normalisé de la validation croisée était supérieur à 3 en valeur absolue). Ce résultat est plus conforme au résultat attendu, la cote piézométrique ne devant pas présenter d'effet de pépité (ou un très faible effet de pépité).

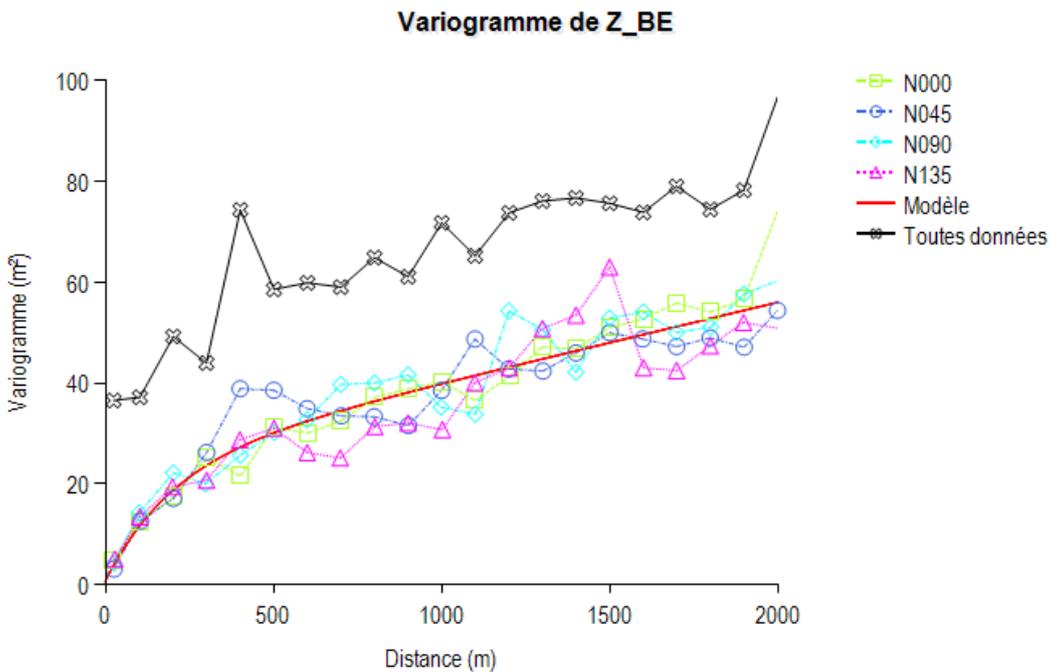


Illustration 41 – Variogramme des données Basses eaux du jeu de données initial (en noir) et variogramme après élimination de 224 données « non robustes »

Dans un second temps, les points identifiés comme potentiellement erronés sont vérifiés un par un afin de confirmer ou non leur validité. Lorsque c'est possible le point est corrigé, sinon il est éliminé.

Les sources d'erreur qui ont été les plus fréquemment relevées sont :

- une attribution erronée du niveau capté,
- des erreurs dans la coordonnée X,Y ou erreur dans la coordonnée en Z,
- une inversion de la profondeur et de la cote Z,
- la présence d'une valeur extrême aberrante dans la chronique initiale.

Une analyse de même type est réalisée pour la cote piézométrique « Hautes Eaux ». Le variogramme de l'ensemble des données initial est représenté en noir sur l'illustration 42. Une fois les données « non robustes » écartées, le variogramme obtenu devient plus conforme à ce qui est attendu. Là encore les données sont vérifiées afin de confirmer ou non les points « suspects » et au besoin les corriger ou les éliminer.

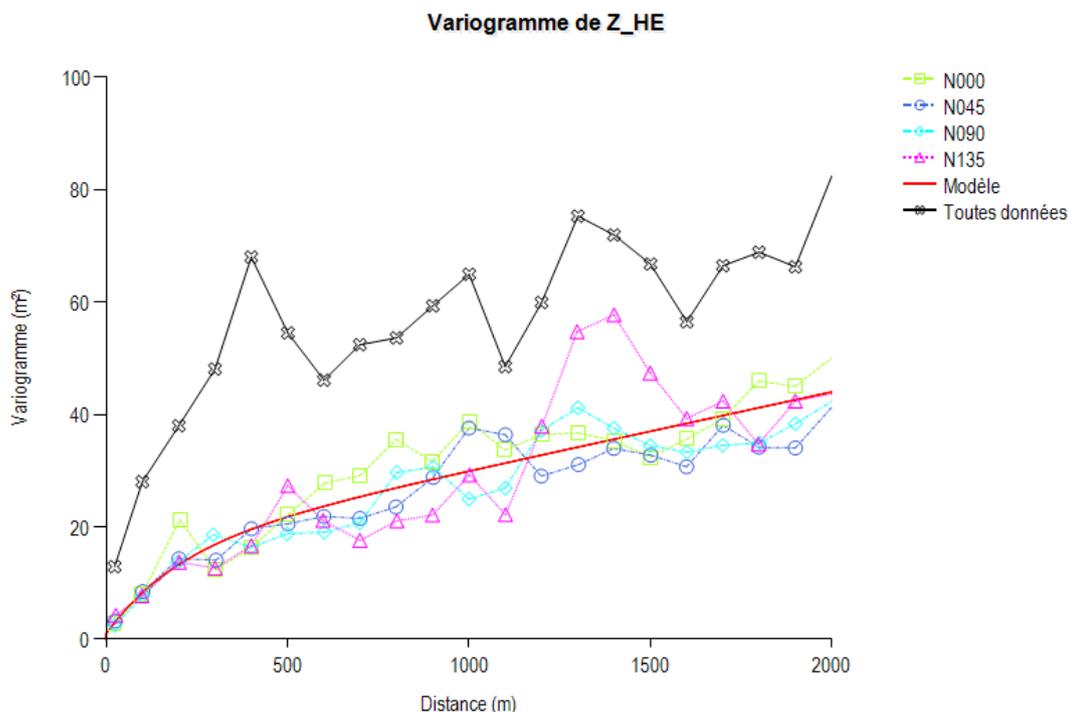


Illustration 42 – Variogramme des données Hautes eaux du jeu de données initial (en noir) et variogramme après élimination de 309 données « non robustes »

Après nettoyage des deux jeux de données Hautes Eaux et Basses Eaux, un second jeu de données est produit.

En parallèle de la phase de correction et/ou élimination des données erronées (total environ 15% du jeu de données), des données complémentaires ont été ajoutées : sources dans le Boulonnais et l'Avesnois, points le long du trait de côte pour contraindre l'interpolation. C'est à partir de ce second jeu de données que les interpolations ont été réalisées.

3.4.4. Interpolation de la cote Basses Eaux à partir du jeu de données corrigé

Le second jeu de données Basses Eaux comporte désormais 10 523 points, répartis comme indiqué dans le Tableau 1 ci-dessous.

Type de point	Fiabilité			
	Forte	Moyenne	Faible	Très Faible
Forage	41		2332	3071
Piézomètre			45	30
Points d'eau	128	825	625	
Puits			732	951
Amont rivière	87			
Source			4	1
Source permanente	75			
Trait de cote	588			
Isopièze	988			
Total	1907	825	3738	4053

Tableau 1 – Nombre de données de chaque type pour les Basses Eaux (jeu de données 2)

Le calcul du variogramme séparément pour chaque classe de fiabilité des données, montre que quel que soit le niveau de fiabilité, les variogrammes sont très proches, excepté pour le cas « fiabilité forte » pour lequel le variogramme est nettement plus faible (cf. Illustration 43).

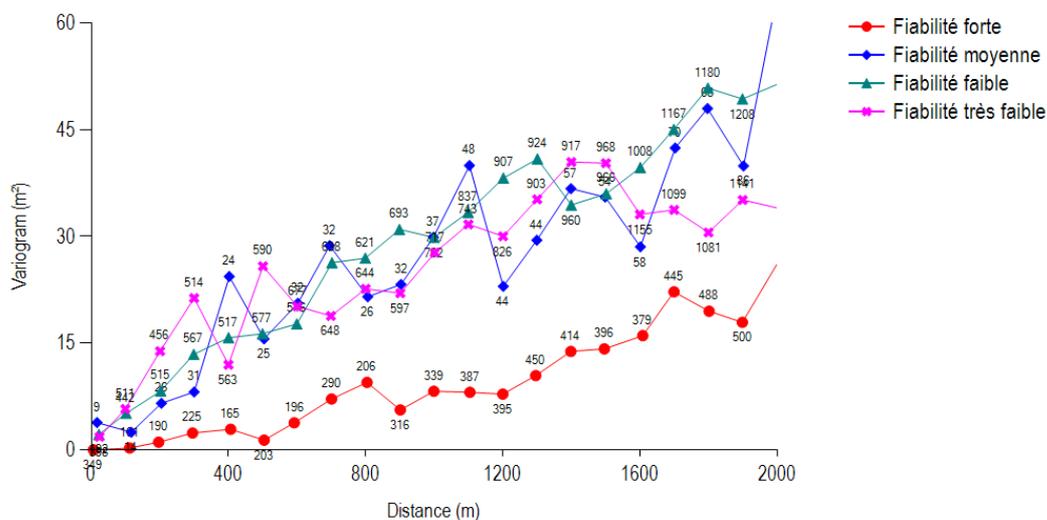


Illustration 43 – Variogrammes de la cote piézo Basses Eaux selon le niveau de fiabilité des points

Le fait que les variogrammes des données de fiabilité Moyenne, Faible ou Très faible soient similaires montrent que ces trois types de données, malgré leur niveau de fiabilité différent, décrivent le même type de variabilité.

Le fait que le variogramme des points de fiabilité « Forte » soit plus faible que les autres s'explique par l'origine des points de fiabilité « Forte » (cf. Tableau 1) : ceux-ci sont quasi exclusivement des points issus d'isopièzes ou du trait de côte. Or ces points constituent un échantillonnage préférentiel (isopièzes = valeur constante le long d'une même isopièze ; trait de côte = uniquement des points à cote très faible proche de zéro). De plus, les isopièzes sont le résultat d'un calcul sur une grille puis d'un tracé qui lissent le résultat par rapport aux données initiales. De ce fait, le variogramme calculé uniquement avec ces points sous-estime nettement la variabilité réelle globale du phénomène. Il ne serait donc pas pertinent d'ajuster ce seul variogramme. Les données type forage, puits ou point d'eau ne présentent pas cet inconvénient.

Le variogramme de la cote des Basses Eaux du nouveau jeu de données (Jeu 2) est comparé avec celui du Jeu 1 (cf. Illustration 44). Le variogramme du nouveau jeu de données (en noir sur la figure) est très proche du variogramme du jeu de données 1 après élimination automatique des données non robustes (variogramme noté « V3 » sur l'Illustration 44), ce qui montre que ces données ont bien été éliminées pour la plupart. Le nouveau variogramme est bien inférieur à celui obtenu avec le Jeu 1 complet (variogramme en bleu sur l'Illustration 44).

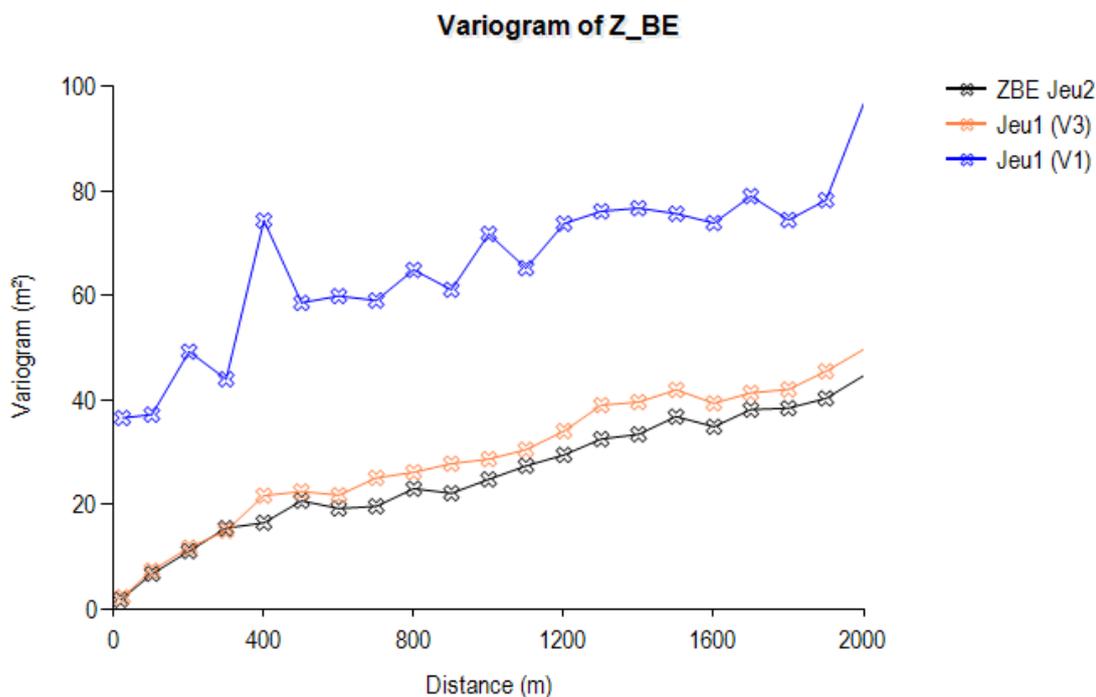


Illustration 44 - Basses Eaux. Comparaison des variogrammes du Jeu 1 et du Jeu 2

Une validation croisée du nouveau jeu de données est effectuée. **Cette validation croisée montre qu'il est préférable d'écartier les données de fiabilité très faibles**, la plupart des points suspects restant étant de ce type. 34 autres points sont par ailleurs écartés.

Le variogramme retenu pour l'interpolation finale est donc celui de l'ensemble des données de fiabilité Forte, Moyenne ou Faible, une fois enlevés les 34 points supplémentaires, soit 6 436 points. Il est représenté en Illustration 45 et peut être ajusté par la somme :

- d'un modèle exponentiel de palier 5,5 m² et de portée pratique environ 600 m (correspondant un paramètre d'échelle de 200 m), et
- d'un schéma linéaire de pente 0,016.

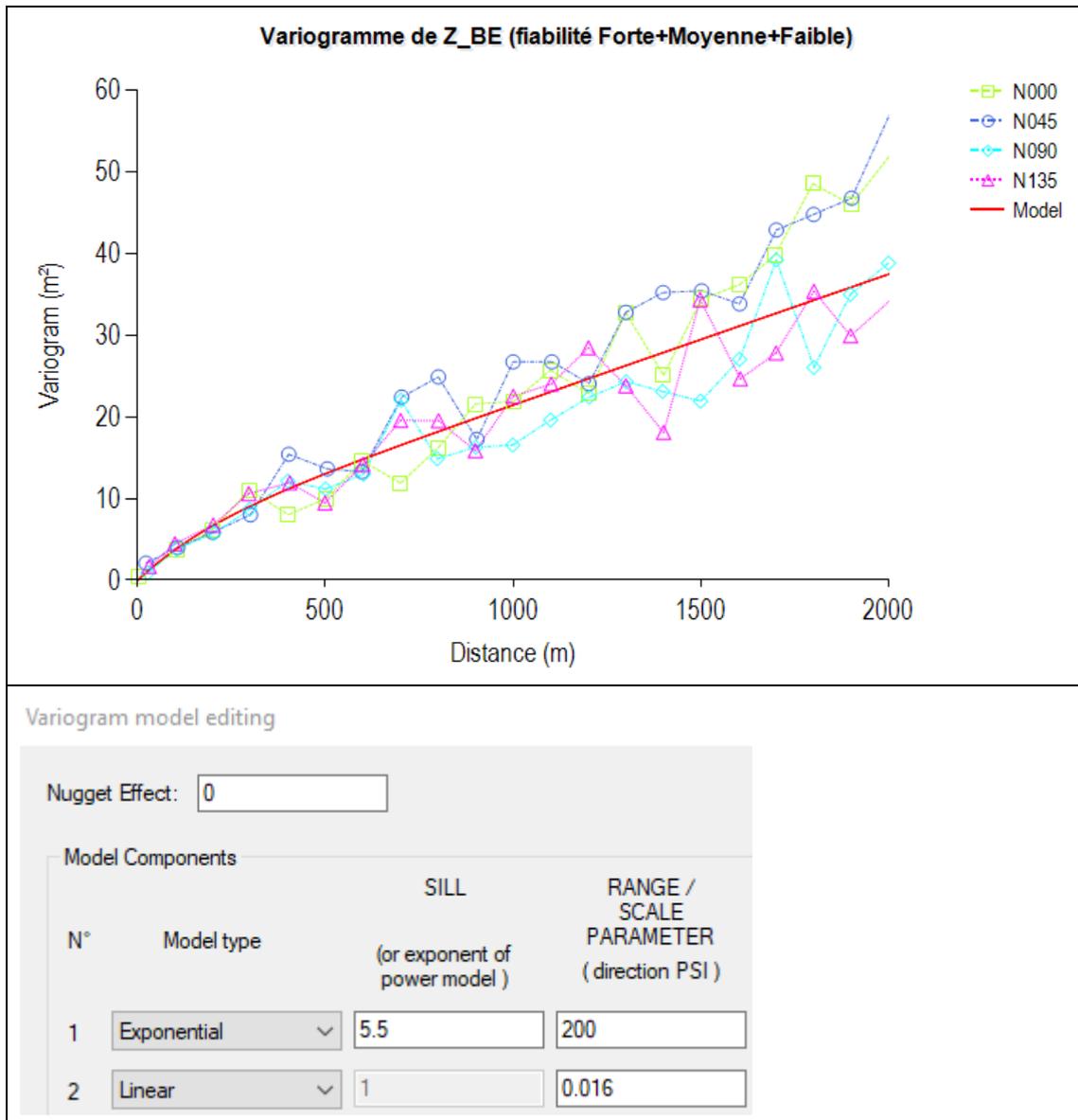


Illustration 45 - Variogramme de la cote piézométrique Basses Eaux et son ajustement

L'interpolation de la cote piézométrique Basses Eaux peut alors être effectuée sur l'ensemble du domaine d'étude. La méthode d'estimation est le krigeage, avec le modèle de variogramme précédent. Le résultat est présenté en Illustration 46.

A noter que pour l'interpolation, les valeurs de cotes piézométriques de fiabilité « Moyenne » et « Faible » sont affectées d'une variance d'incertitude de 2m², correspondant à l'effet de pépité observé sur ces deux variogrammes. Ceci permet d'attribuer un poids légèrement moins fort à ce type de données, comparé aux données de fiabilité « Forte ».

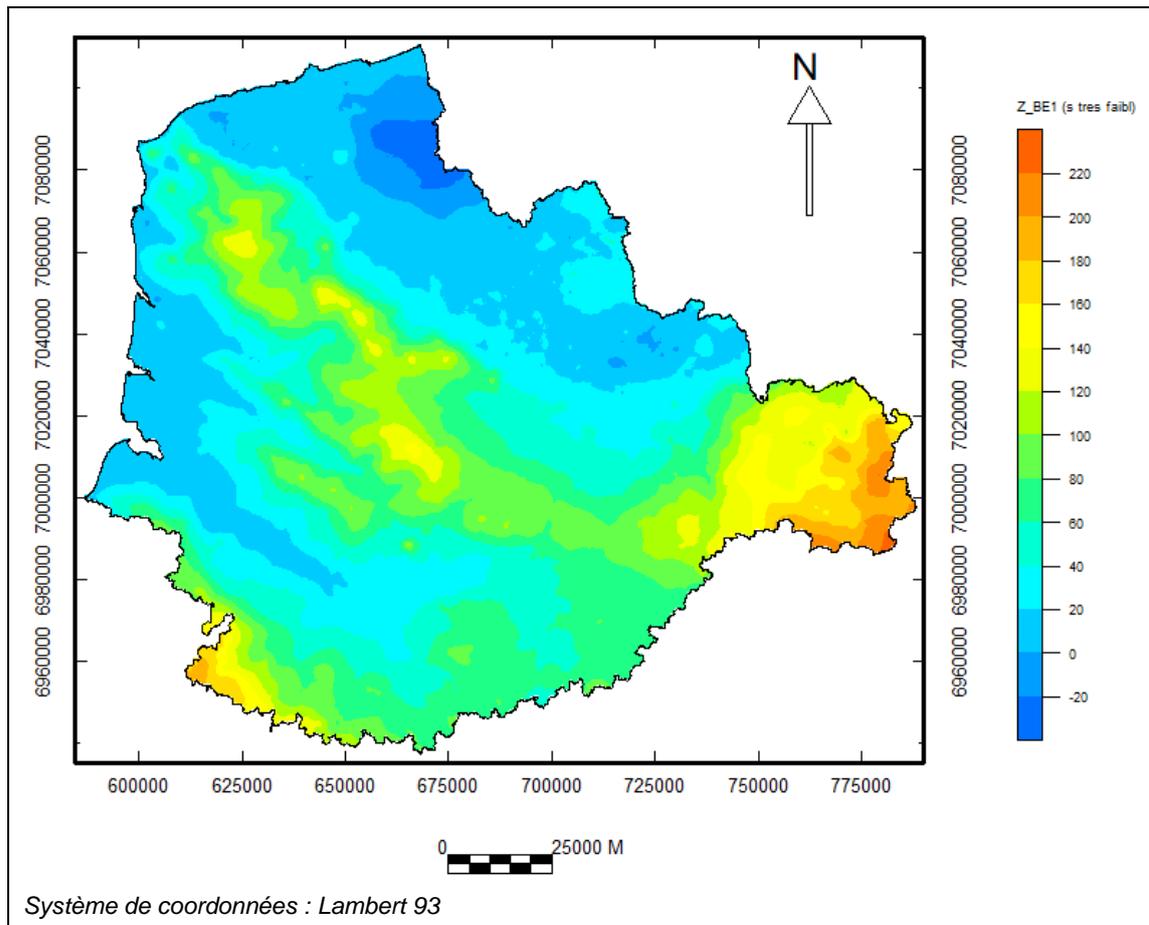


Illustration 46 – Cote piézométrique interpolée - Basses Eaux

Grâce à l'utilisation d'un modèle géostatistique pour le krigeage, il est possible de produire une carte de l'écart-type de krigeage, qui fournit un indice de qualité de l'estimation. L'écart-type de krigeage correspond à l'écart-type de l'erreur d'interpolation. Il est exprimé en mètres. En première approximation, la valeur réelle de la cote piézométrique a 66% de chances d'être dans l'intervalle « valeur interpolée plus ou moins une fois l'écart-type ».

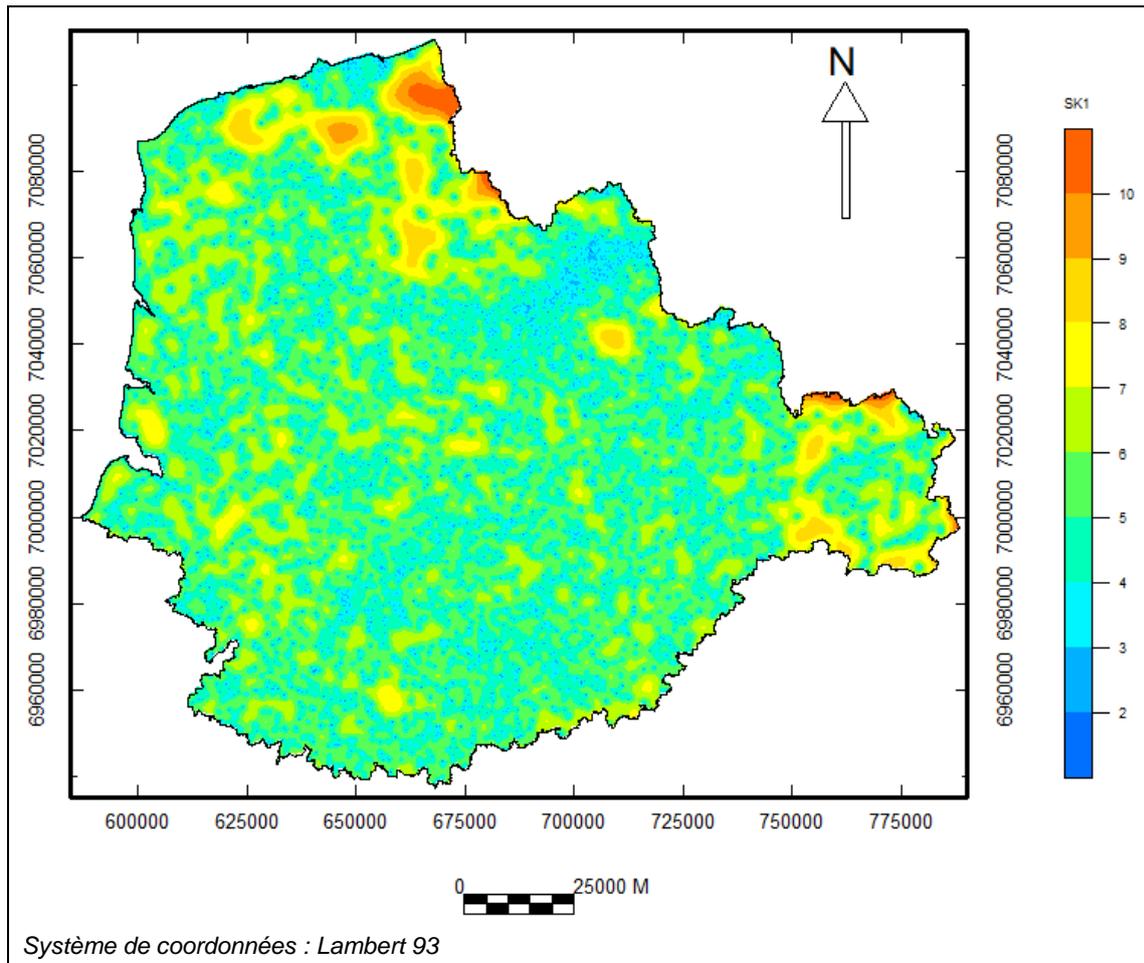


Illustration 47 – Carte de l'écart-type d'interpolation sur la cote piézométrique – Basses Eaux

Cette carte d'écart-type sera exploitée pour déterminer le niveau de confiance de la grille d'épaisseur de zone non saturée découlant de cette interpolation (cf. chapitre 3.4.6)

3.4.5. Interpolation de la cote Hautes Eaux à partir du jeu de données corrigé

Les mêmes types de traitement sont réalisés pour la cote piézométrique Hautes Eaux.

Le second jeu de données corrigé comporte 10 060 points.

Les données correspondantes se répartissent comme indiqué dans le Tableau 2.

Type de point	Fiabilité			
	Forte	Moyenne	Faible	Très Faible
Forage	53		2 216	3 108
Piézomètre			41	30
Points d'eau	145	835	631	
Puits	28		898	950
Amont rivière	221			
Source	1		3	1
Source intermittente	236			
Source permanente	75			
Trait de cote	588			
Isopièze	0			
Total	1 347	835	3 789	4 089

Tableau 2 – Nombre de données de chaque type pour les Hautes Eaux (jeu de données 2)

La différence principale avec les Basses Eaux est que les données issues d'isopièzes sont les points de mesure et non une extraction de points le long d'isopièze. Leur niveau de confiance est donc plus important.

La comparaison des variogrammes des données de chaque type de fiabilité montre que les différents variogrammes obtenus sont dans ce cas relativement similaires (cf. Illustration 48).

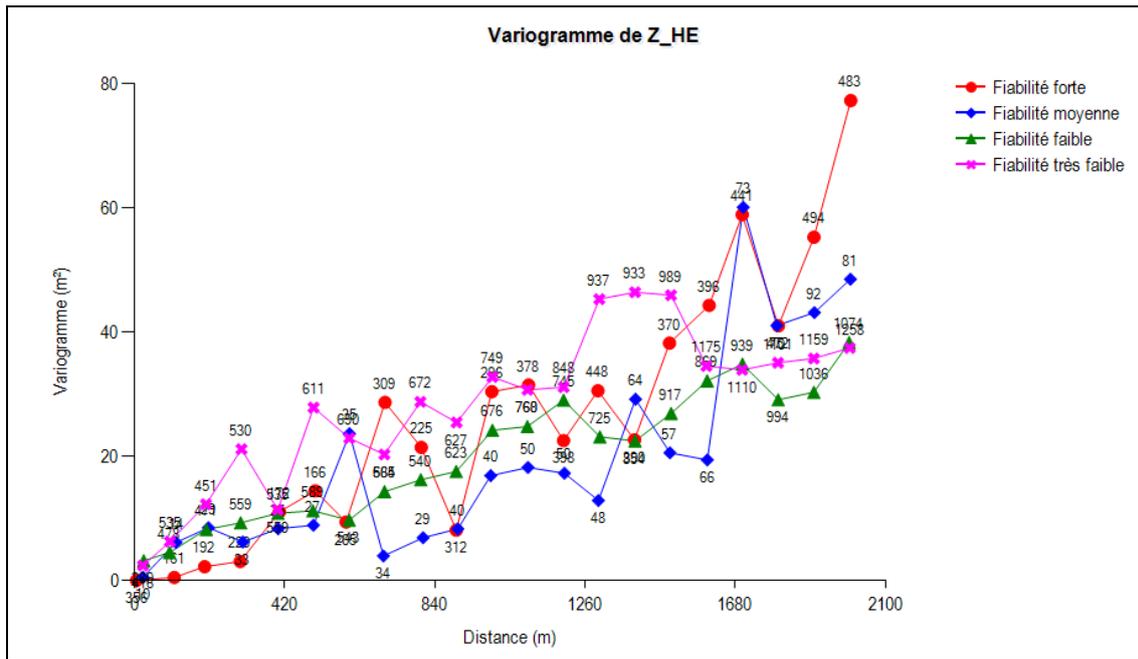


Illustration 48 - Variogramme de la cote piézométrique Hautes Eaux selon le niveau de fiabilité des points

Par souci d'homogénéité avec le cas des Basses Eaux, il est décidé de ne pas prendre en compte les données de fiabilité très faible. Le variogramme obtenu est reporté Illustration 49.

Il peut être ajusté par la somme :

- d'un effet de pépite d'amplitude 1m²,
- d'un modèle exponentiel de palier 4,5 m² et de portée pratique environ 600 m (correspondant un paramètre d'échelle de 200 m), et enfin
- d'un schéma linéaire de pente 0,019.

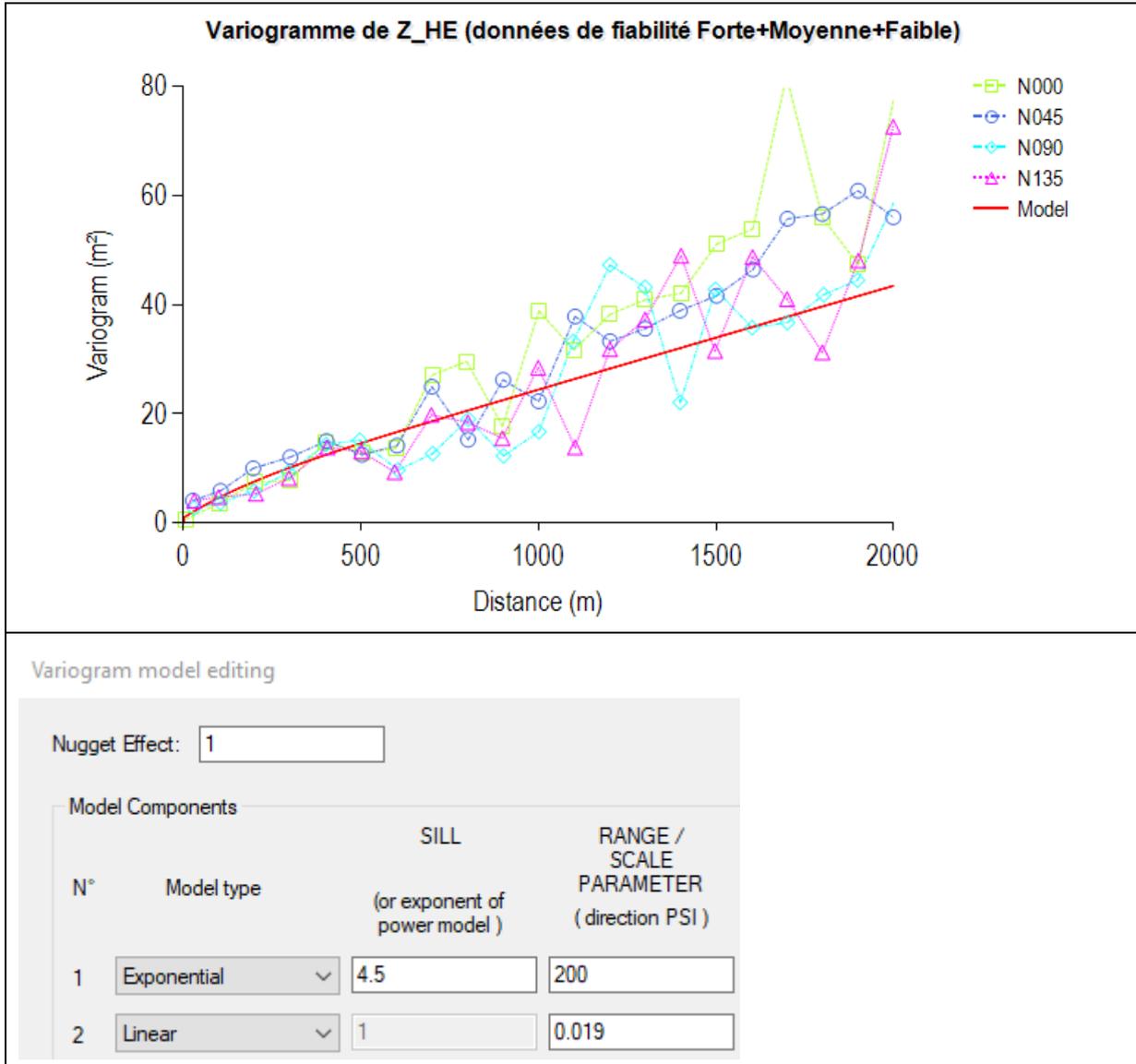


Illustration 49 – Variogramme de la cote piézométrique Hautes Eaux et son ajustement

L'interpolation de la cote Hautes eaux est ensuite réalisée dans les mêmes conditions que pour les Basses Eaux (krigeage avec modèle de variogramme ci-dessus). La surface piézométrique interpolée résultante est représentée dans l'illustration 50 et l'écart-type d'interpolation associé en illustration 51.

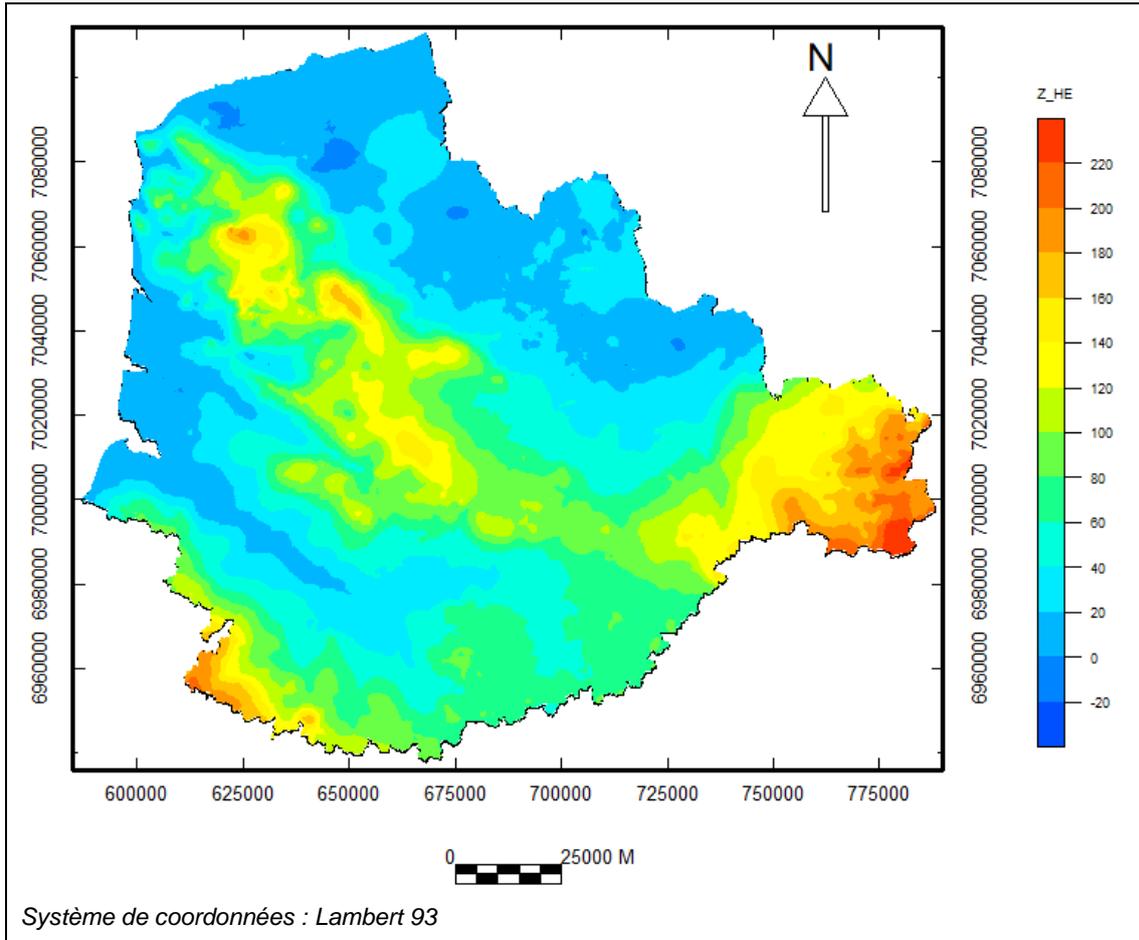


Illustration 50 – Cote piézométrique interpolée – Hautes Eaux

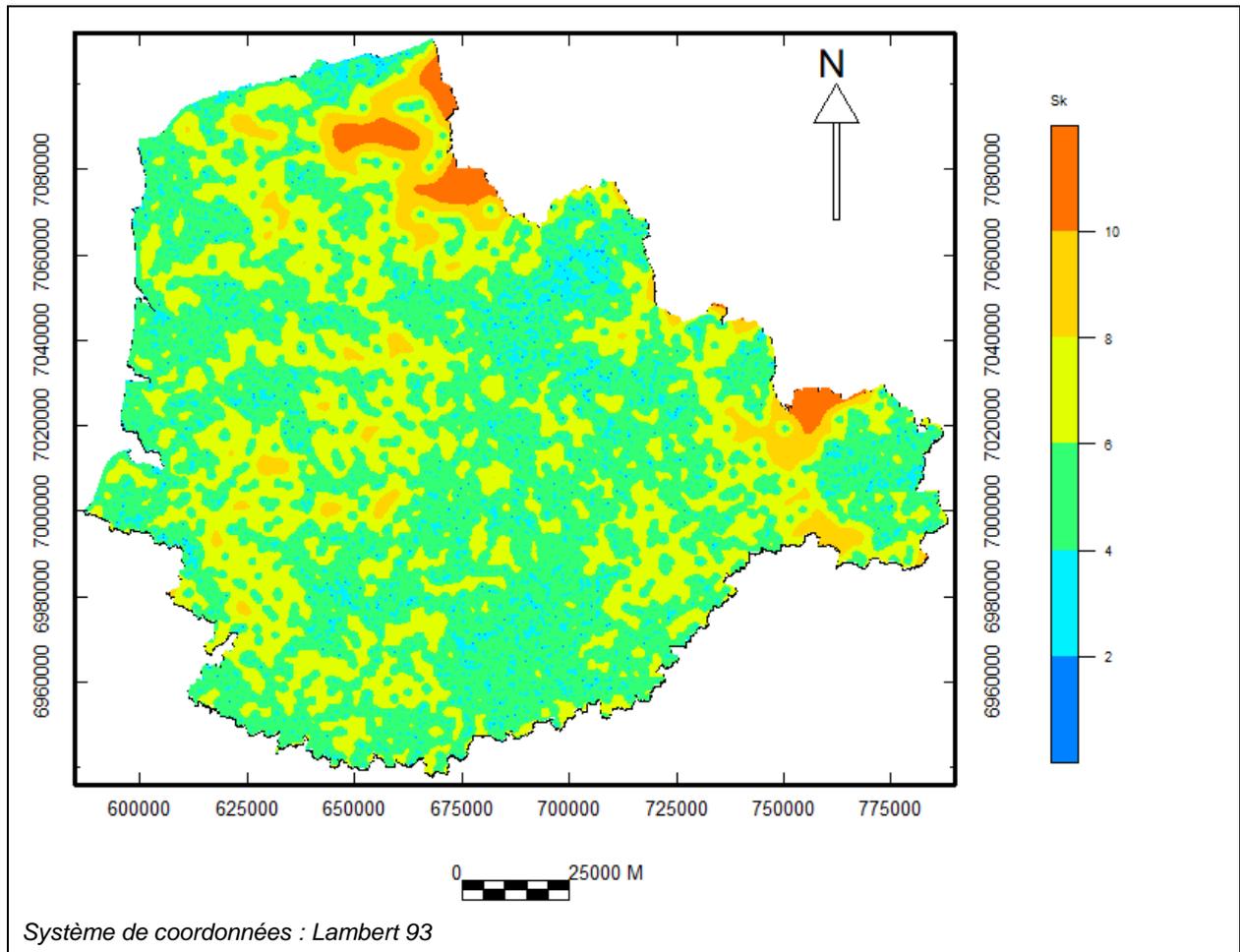


Illustration 51 – Carte de l'écart-type d'interpolation sur la cote piézométrique – Hauts Eaux

3.4.6. Calcul des grilles d'épaisseur de ZNS en Hautes eaux et Basses Eaux

Méthode de calcul des grilles

Pour calculer l'épaisseur de la zone non saturée, les altitudes du sol du MNT IGN au pas de 25 m ont été soustraites par les valeurs des altitudes en hautes eaux fournies par l'interpolation. Le résultat est une grille au pas de 25 m qui représente pour chaque pixel l'épaisseur de la zone non saturée exprimée en mètres, en situation de basses eaux (cf. Illustration 52) et en situation de hautes eaux (cf. Illustration 53).

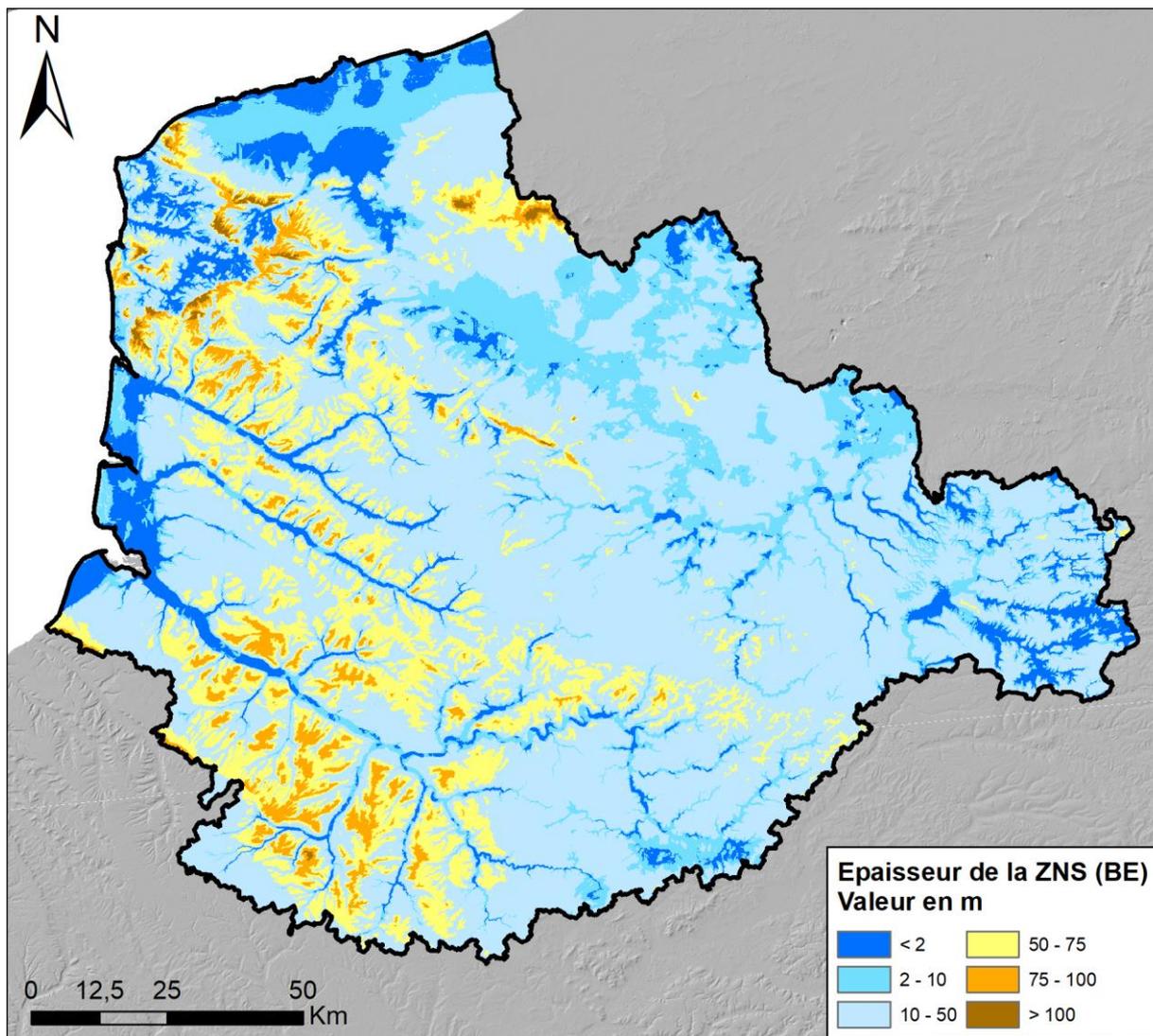


Illustration 52 – Grille finale de l'épaisseur de la zone non saturée sur la bassin Artois-Picardie en période de basses eaux et au pas de 25 m

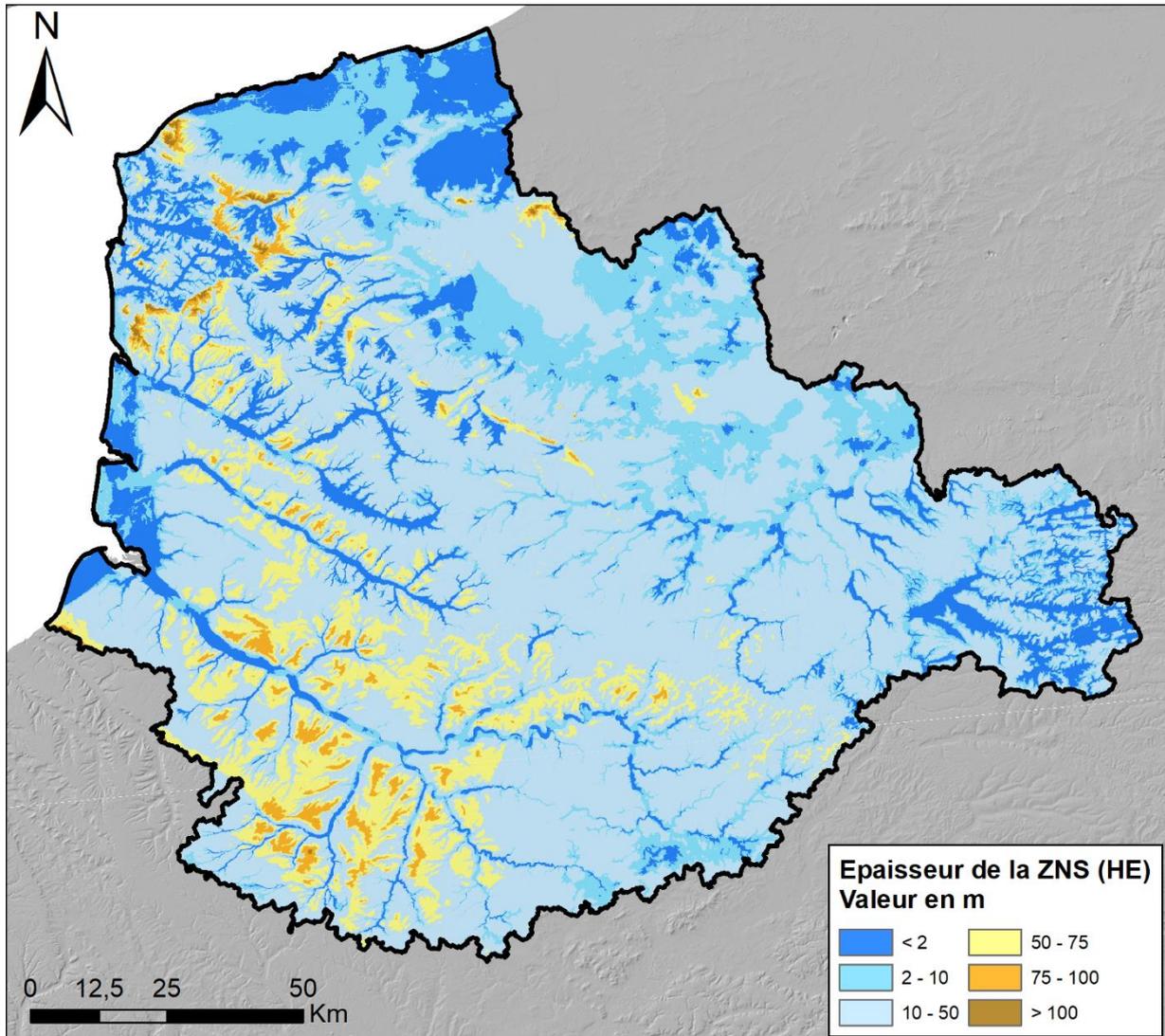


Illustration 53 – Grille finale de l'épaisseur de la zone non saturée sur la bassin Artois-Picardie en période de hautes eaux et au pas de 25 m

Evaluation d'un indice de confiance de ces grilles

Les jeux de données utilisées ainsi que les méthodes d'interpolation ont généré plusieurs niveaux d'incertitudes. Pour les caractériser, un indice de confiance a été définie en combinant un critère qualifiant l'incertitude des données interpolées (« Ecart-type d'interpolation ») et un critère basé sur les classes de fiabilité (cf. chapitres 3.4.4 et 3.4.5) auxquelles appartiennent les points utilisés (« Fiabilité moyenne des points »). L'objectif de cet indice de confiance est donc de fournir une information complémentaire permettant de relativiser ce critère d'épaisseur de la ZNS pour identifier des secteurs d'interaction ESO/ESU potentielle.

La grille de fiabilité des points est le résultat d'une interpolation géostatistique de valeurs attribuée selon les classes de fiabilité des points (1 = fiabilité forte, 2 = fiabilité moyenne, 3 = fiabilité faible). Une classification des résultats de cette grille de fiabilité des points est proposée ci-dessous :

- Si la note de fiabilité du pixel est comprise entre 1 (valeur appliquée en amont du calcul à un point de fiabilité forte) et 1,25 alors sa classe de fiabilité est « forte » ;

- Si la note de fiabilité du pixel est comprise entre 1,25 et 2 (valeur appliquée en amont du calcul à un point de fiabilité moyenne) alors sa classe de fiabilité est « forte à moyenne » ;
- Si la note de fiabilité du pixel est comprise entre 2 et 2,75 alors sa classe de fiabilité est « moyenne à faible » ;
- Si la note de fiabilité du pixel est comprise entre 2,75 et 3 (valeur appliquée en amont du calcul à un point de fiabilité faible) alors sa classe de fiabilité est « faible ».

Les cartes ci-dessous présentent une représentation par classes de valeurs pour chacun de ces deux critères, en Hautes Eaux (cf. Illustration 54) et Basses Eaux (cf. Illustration 55).

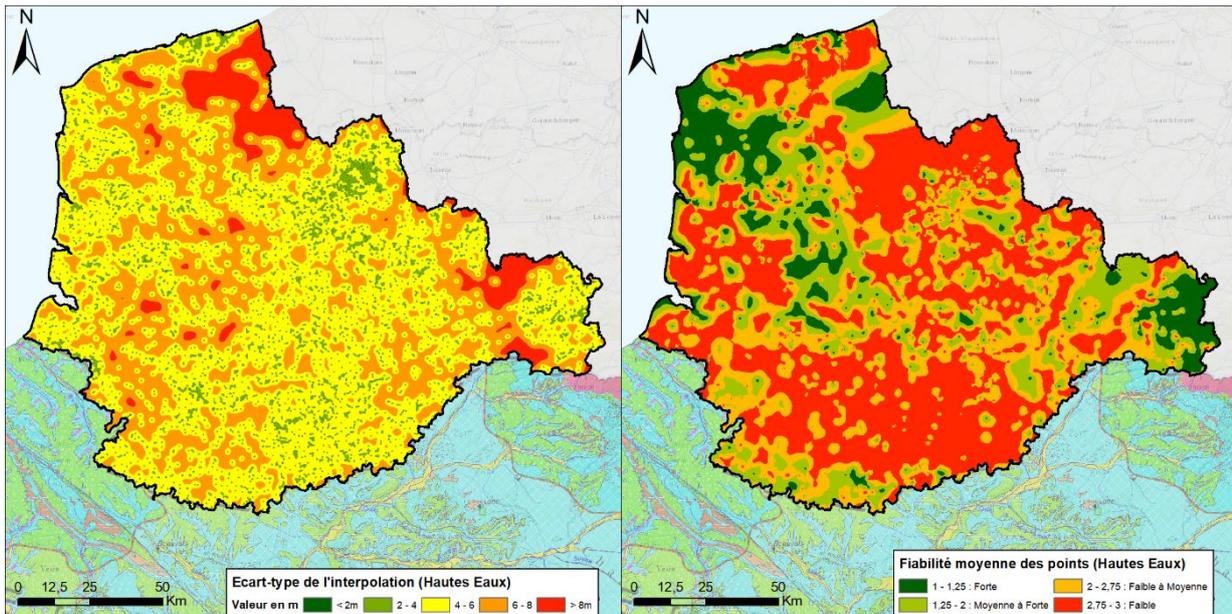


Illustration 54 – Carte représentant l'écart-type d'interpolation en mètres (à gauche) et la note de fiabilité moyenne des points (à droite) utilisés pour l'interpolation de la grille d'épaisseur de zone non saturée en situation de Hautes Eaux

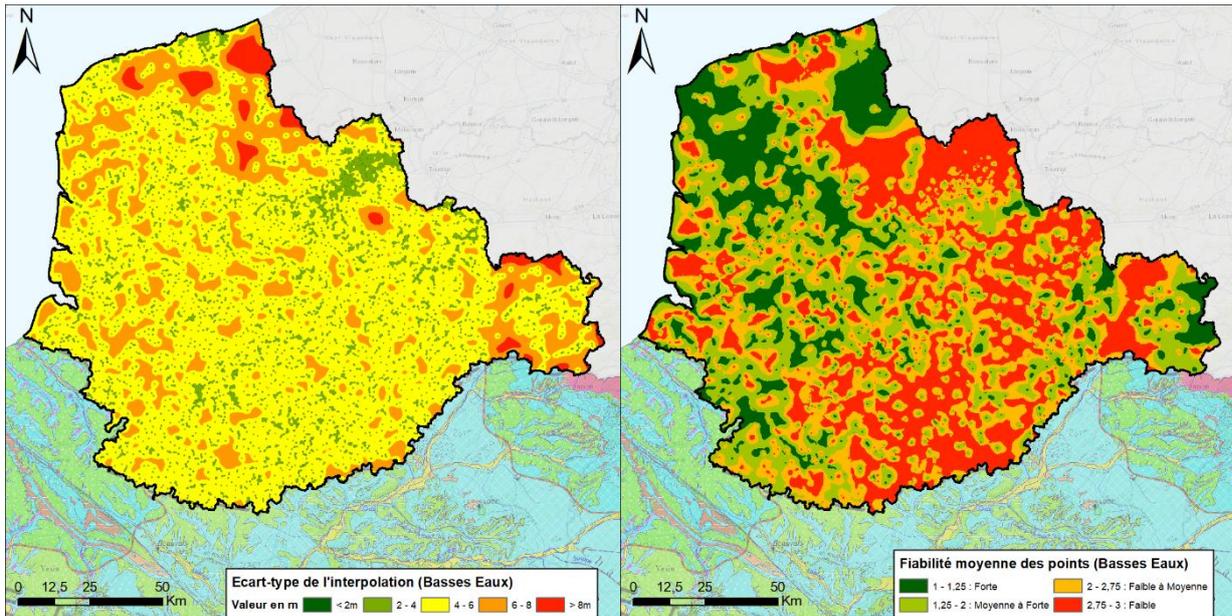


Illustration 55 - Carte représentant l'écart-type d'interpolation en mètres (à gauche) et la note de fiabilité moyenne des points (à droite) utilisés pour l'interpolation de la grille d'épaisseur de zone non saturée en situation de Basses Eaux

Globalement, l'écart-type d'interpolation (que l'on peut assimiler à une différence entre la valeur réellement mesurée et celle résultant de l'interpolation) et la fiabilité des points est bien meilleure pour l'interpolation en situation de basses eaux.

Ces deux critères sont donc ensuite combinés selon des règles présentées dans le Tableau 3 ci-dessous.

		Critère "Ecart-type" d'interpolation			
		< 2 m	2 à 4 m	4 à 6 m	> 6 m
Critère "Fiabilité du point utilisé"	1 à 1,25	1	1	2	4
	1,25 à 2	1	2	3	4
	2 à 2,75	2	3	3	5
	2,75 à 3	4	4	5	5

Tableau 3 – Tableau combinant le critère d'écart-type d'interpolation avec celui sur la fiabilité

A partir des différentes combinaisons des deux indices, cinq classes ont été déterminées pour qualifier cet indice de confiance :

- Classe 1 : Très forte confiance dans les données interpolées ;
- Classe 2 : Forte confiance dans les données interpolées ;
- Classe 3 : Confiance moyenne dans les données interpolées ;
- Classe 4 : Confiance faible dans les données interpolées ;

- Classe 5 : Confiance très faible dans les données interpolées.

Le résultat de cet indice de confiance, agrégé par unités fonctionnelles (cf. chapitre 3.3), est proposé en Illustration 56.

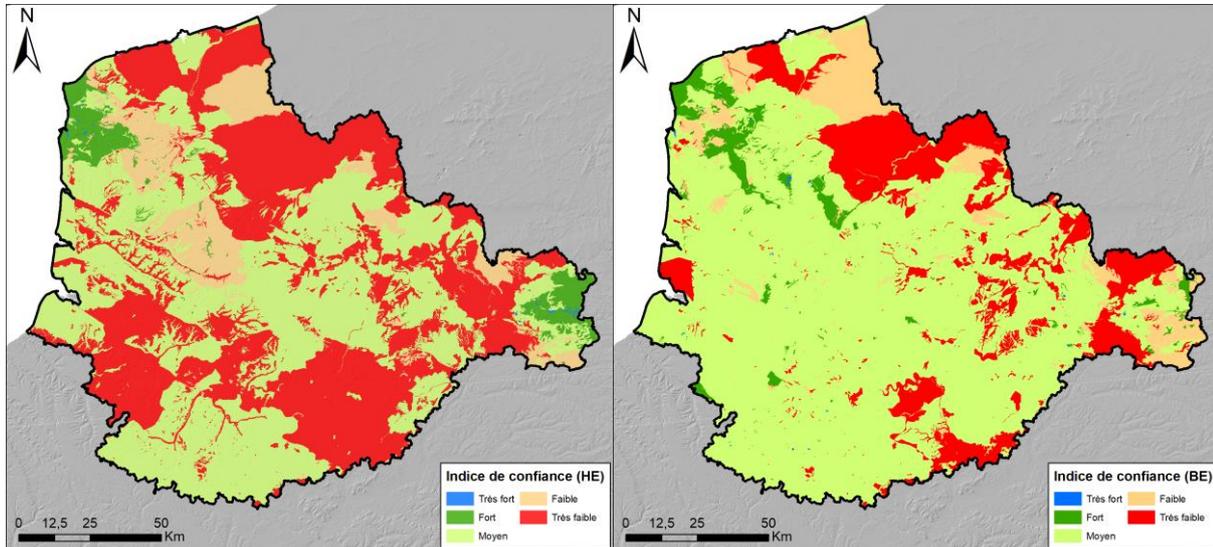


Illustration 56 – Représentation de l'indice de confiance global sur l'interpolation de l'épaisseur de ZNS en situation de Hautes Eaux (à gauche) et Basses Eaux (à droite)

Il est à noter que la comparaison des deux grilles d'épaisseurs Hautes Eaux et Basses Eaux présente sur certains secteurs des « chevauchements » anormaux avec des valeurs de Basses Eaux supérieures à celles de Hautes Eaux. Le premier facteur explicatif est généralement une densité insuffisante de points pour une des deux situations, faisant que l'interpolation est très peu fiable par endroit pour un contexte et bien meilleur pour l'autre. Egalement, la fiabilité des points utilisés joue un rôle important, avec des valeurs, pour un même secteur pouvant être à des niveaux très différents. Par exemple, la présence de points de mesure d'une carte piézométrique fiable dans un contexte mais rien dans l'autre peut être à l'origine de ce type de problème. Il est également possible que certaines valeurs attribuées à une période hautes eaux ou basses eaux l'aient été à tort.

Si on intègre un facteur d'erreur acceptable dans la comparaison « Hautes Eaux vs Basses Eaux », de l'ordre de grandeur de la 1^{ère} classe d'écart-type d'interpolation (la valeur de Basses Eaux ne doit pas dépasser de plus de 2 m celle de Hautes Eaux), ces secteurs de « chevauchements » problématiques sont finalement déjà globalement tous intégrés dans les zones d'indice de confiance faible à très faible (zones violettes quasiment systématiquement dans les secteurs hachurés dans l'illustration 57).

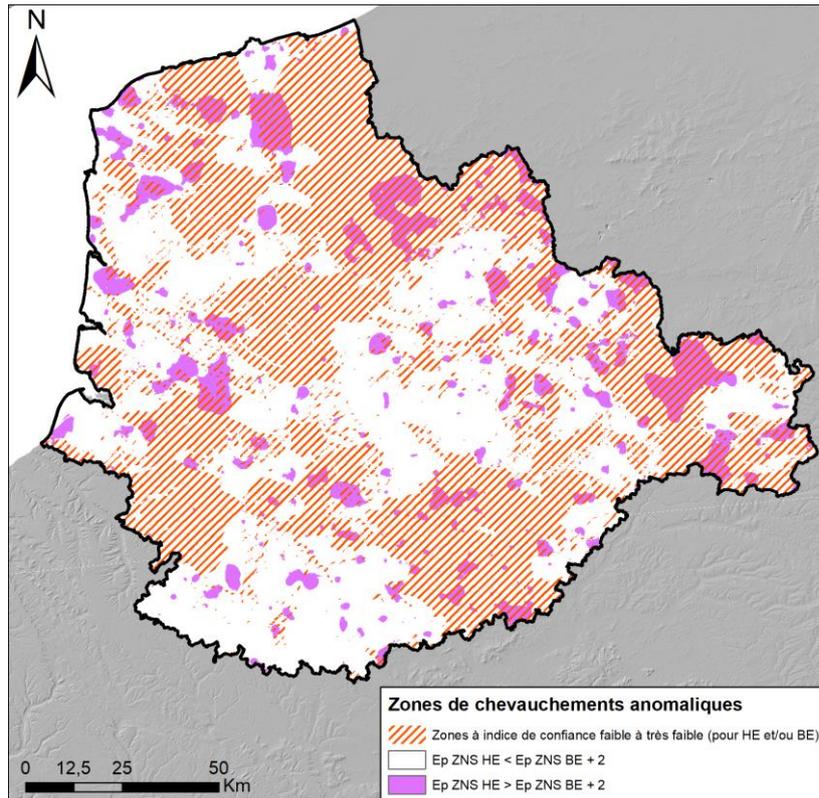


Illustration 57 – Représentation des secteurs où la cote piézométrique interpolée en basses eaux est nettement supérieures à celle de hautes eaux et comparaison avec les secteurs identifiés comme d'indice de confiance faible à très faible

Ceci montre que ce type d'approche géomatique est quasi-systématiquement soumis à une somme d'incertitudes d'origines diverses, induisant des biais parfois importants dans certaines zones du secteur investigué. Il faut donc considérer ces limitations lorsqu'une exploitation de ce type de résultats est entreprise.

Surtout, compte tenu des informations utilisées et de leurs échelles de validité, cette approche cartographique doit être considérée comme indicative. Elle ne doit pas être utilisée à une échelle inférieure à l'unité fonctionnelle et se substituer à des études plus locales.

3.5. APPROCHE MULTICRITERES ET PREMIERES CONCLUSIONS

3.5.1. Critère « Synthèse Hautes Eaux / Basses Eaux de l'épaisseur de la zone non saturée »

D'après Michelot (2003), il est nécessaire que la nappe phréatique soit remontée jusqu'à la « root zone », ou zone des racines, pour que les eaux souterraines aient une influence sur un milieu humide de surface. Il est raisonnable de considérer que les 2 premiers mètres sous la surface du sol peuvent être assimilés à cette « root zone ».

Par conséquent, la valeur retenue pour une ZNS qualifiée de peu épaisse est de 2 mètres. Toute unité fonctionnelle (UF) possédant une épaisseur médiane de ZNS inférieure ou proche de cette valeur limite est très probablement le lieu d'échanges ESO/ESU.

En outre, l'objectif ici est de considérer ce critère « épaisseur de ZNS » par une analyse combinatoire des deux situations Hautes Eaux et Basses Eaux. En effet, si l'épaisseur de ZNS reste très faible en Basses Eaux et Hautes Eaux, le potentiel d'interaction ESO/ESU apparaît fort et surtout constant dans le temps. Si des différences importantes sont mises en évidence entre ces deux situations, le potentiel est toujours important en Hautes Eaux mais semble plus difficile à établir en Basses Eaux voire il permet de suspecter une inversion du sens des échanges entre ESO et ESU.

Dans un premier temps, des classes de valeurs significatives ont donc été affectées à chaque pixel des grilles selon le principe suivant :

- 100 = épaisseur de ZNS nulle (ou négative) → biais de l'interpolation signifiant généralement une zone en eau ;
- 90 = épaisseur de ZNS comprise entre 0 et 2 m ;
- 75 = épaisseur de ZNS comprise entre 2 et 5 m ;
- 50 = épaisseur de ZNS comprise entre 5 et 10 m ;
- 25 = épaisseur de ZNS comprise entre 10 et 20 m ;
- 0 = épaisseur de ZNS supérieure à 20 m.

Puis, pour chaque UF du bassin, le pourcentage de superficie de chaque classe a été calculé. Un exemple pour une UF particulière (codée 3927) est présenté en Illustration 58.

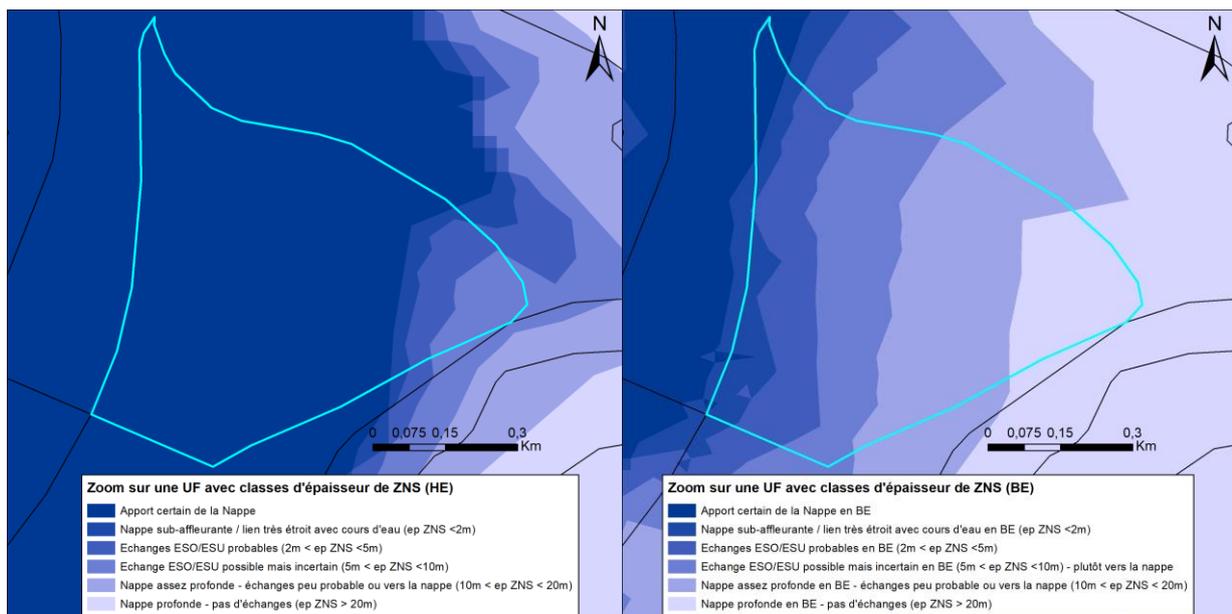


Illustration 58 – Zoom sur une unité fonctionnelle et représentation des classes d'épaisseur de ZNS comprises à l'intérieur (à gauche, situation de Hautes Eaux / à droite, situation de Basses Eaux)

Dans cet exemple, la situation de Hautes Eaux correspond à une épaisseur de ZNS très faible pour une très large part de sa surface (et donc un niveau piézométrique globalement très proche de la surface topographique). La probabilité d'une interaction ESO/ESU est ici importante. En Basses Eaux, un gradient est nettement plus visible, avec des épaisseurs de ZNS très importantes vers l'est. Le potentiel d'échanges apparaît donc plus inégal spatialement dans ce contexte. A titre d'exemple, les résultats de cette analyse spatiale pour l'UF 3927 sont présentés dans le Tableau 4 ci-dessous.

Code UF 3927	Pourcentage de surface de l'UF											
	Hautes Eaux						Basses Eaux					
	Classe 0	Classe 25	Classe 50	Classe 75	Classe 90	Classe 100	Classe 0	Classe 25	Classe 50	Classe 75	Classe 90	Classe 100
	0.00	0.00	5.13	5.69	3.08	86.10	13.79	32.99	25.21	17.85	7.60	2.56

Tableau 4 – Pourcentage de superficie pour chaque classe d'épaisseur de ZNS pour l'UF n°3927

Une note globale est ensuite appliquée à l'UF pour les deux situations selon la formule suivante :

$$\left(\frac{\sum \left(\frac{\% \text{ surface } \times \text{ valeur de la classe HE}}{100} \right) + \sum \left(\frac{\% \text{ surface } \times \text{ valeur de la classe BE}}{100} \right)}{2} \right)$$

Le résultat de cette classification est présentée dans l'illustration 59 ci-dessous allant de 0 signifiant une épaisseur de ZNS très importante de façon constante (et donc une probabilité très faible d'interaction ESO/ESU) jusqu'à 100, signifiant une épaisseur de ZNS quasi-nulle et donc un contexte favorisant des échanges ESO/ESU constants.

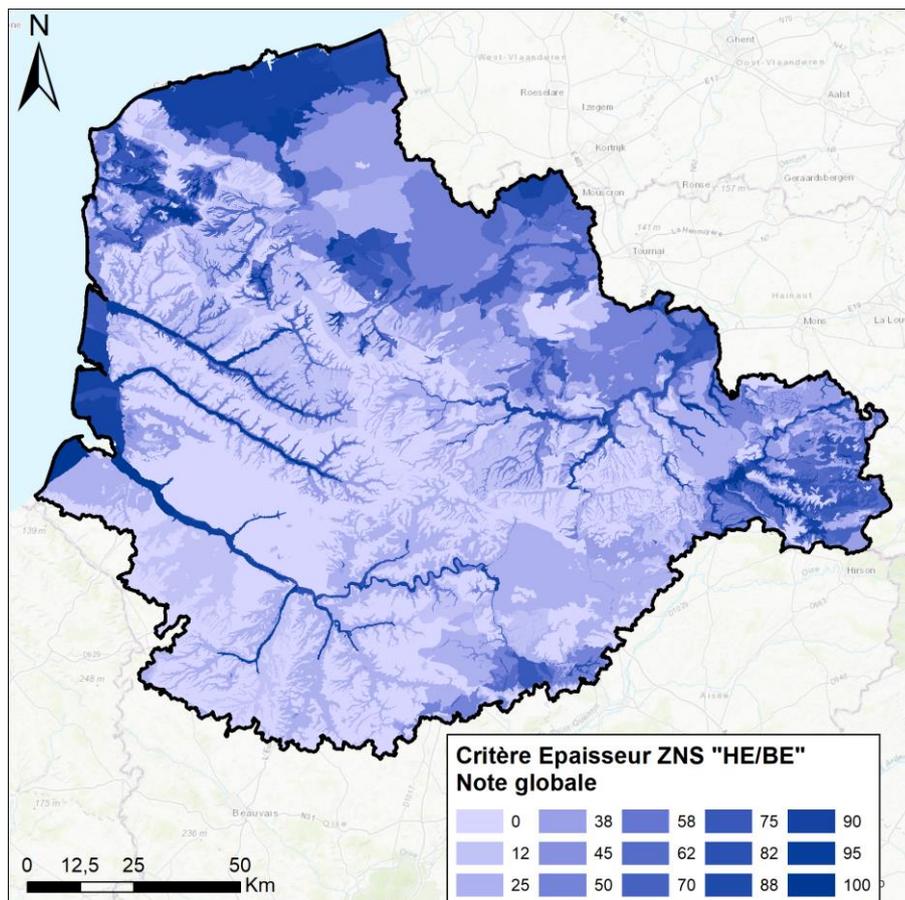


Illustration 59 – Représentation des classes globales par unités fonctionnelles pour le critère « Synthèse Hautes Eaux / Basses Eaux de l'épaisseur de la zone non saturée »

Cependant, du fait des incertitudes associées, ce seul critère ne peut être considéré tout seul. Il est nécessaire de le combiner avec d'autres indicateurs géomorphologiques pertinents (cf.

chapitres 3.5.2 et 3.5.3) et d'y adjoindre des critères s'imposant par nature sur tout le reste (cf. chapitre 3.5.4).

Il faut également souligner que cette analyse combinant les deux situations extrêmes permet de mettre en évidence des secteurs où le risque d'inversion du sens des échanges (ou du moins leur caractère non constant) semble plus grand qu'ailleurs. L'illustration 60 ci-dessous représente en rosé les UF pour lesquels la différence entre les notes globales Hautes Eaux et Basses Eaux est supérieur à 75 (variation ++) et en mauve les UF pour lesquels la différence entre les notes globales Hautes Eaux et Basses Eaux est comprise entre 50 et 75 (variation +). Ces valeurs élevées signifient un différentiel d'épaisseur de ZNS entre Hautes Eaux et Basses Eaux au moins supérieur à 10m.

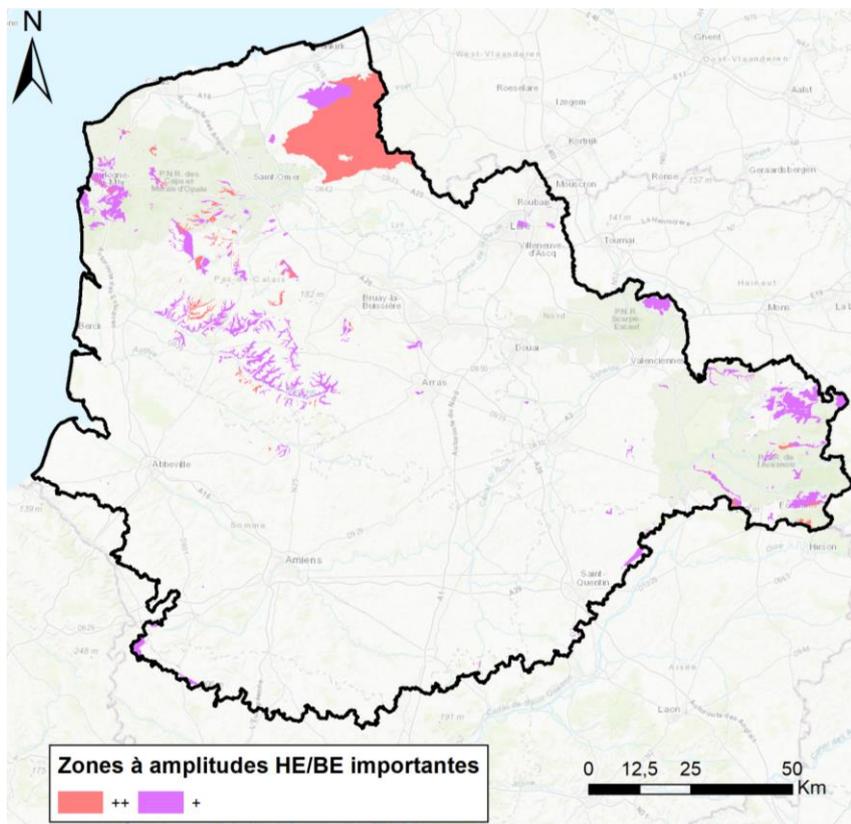


Illustration 60 – Localisation des zones présentant des amplitudes importantes entre Hautes Eaux et Basses Eaux

Il faut néanmoins relativiser cette cartographie, certaines amplitudes importantes entre Hautes Eaux et Basses Eaux pouvant parfois s'expliquer par le caractère peu fiable des données utilisées localement, ou leur nombre insuffisant, pour une des deux voire les deux situations. C'est notamment le cas dans le secteur nord du bassin, au niveau des Argiles de Flandres se caractérisant par un niveau de confiance de l'interpolation faible en Hautes Eaux et Basses Eaux (cf. Illustration 56).

3.5.2. Critère « Cartographie des zones potentiellement humides » (Berthier *et al.*, 2014)

Sollicitées par le Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie, deux équipes de l'INRA d'Orléans (US InfoSol) et d'AGROCAMPUS OUEST à Rennes (UMR SAS) ont produit une carte des milieux potentiellement humides de la France métropolitaine en 2014.

Cette carte modélise les enveloppes qui, selon des critères géomorphologiques et climatiques, sont susceptibles de contenir des zones humides au sens de l'arrêté du 24 juin 2008 modifié. Les enveloppes d'extension des milieux potentiellement humides sont représentées selon trois classes de probabilité : assez forte, forte et très forte (cf. Illustration 61).

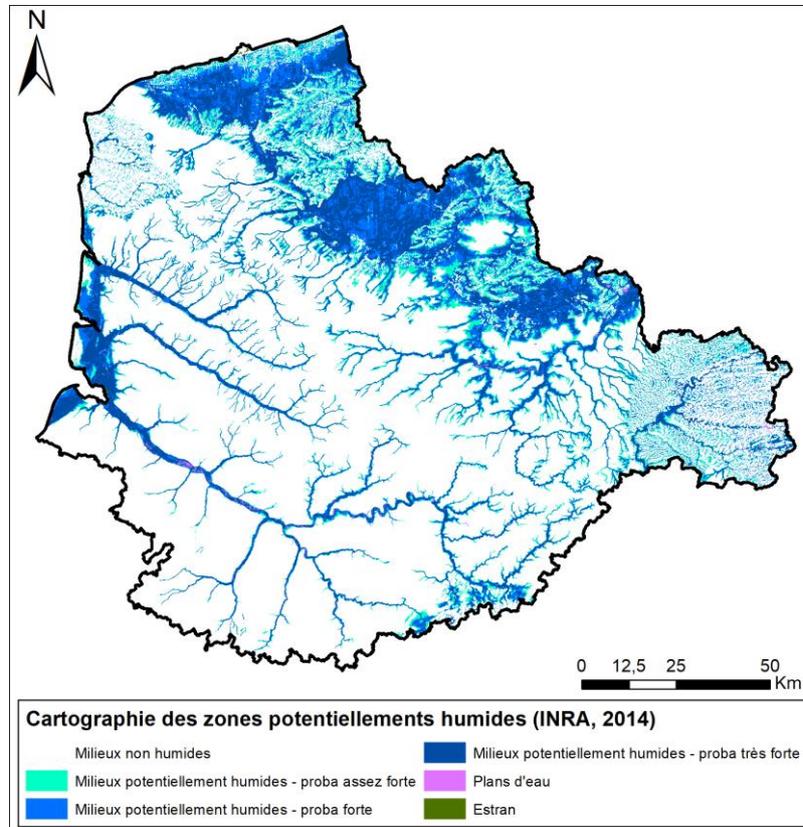


Illustration 61 – Cartographie des zones potentiellement humides dans le bassin Artois-Picardie (d'après Berthier et al., 2014)

Ce travail présente l'avantage d'être homogène au niveau national, compatible avec une représentation graphique au 1/100 000 et constitue un outil utile pour élaborer et piloter les politiques publiques qui concernent les milieux humides.

Pour la présente étude, plus que leur présence, c'est l'absence de zones potentiellement humides qui constitue un marqueur intéressant. En effet, la présence d'une zone humide n'induit pas systématiquement des échanges potentiels ESO/ESU mais leur absence est souvent le signe d'un potentiel d'interaction assez limité.

L'analyse spatiale pour ce critère a également été menée sous la forme d'un calcul du taux de couverture au sein de chaque UF des différents zonages de milieu humide proposés par cette carte (cf. Illustration 62).

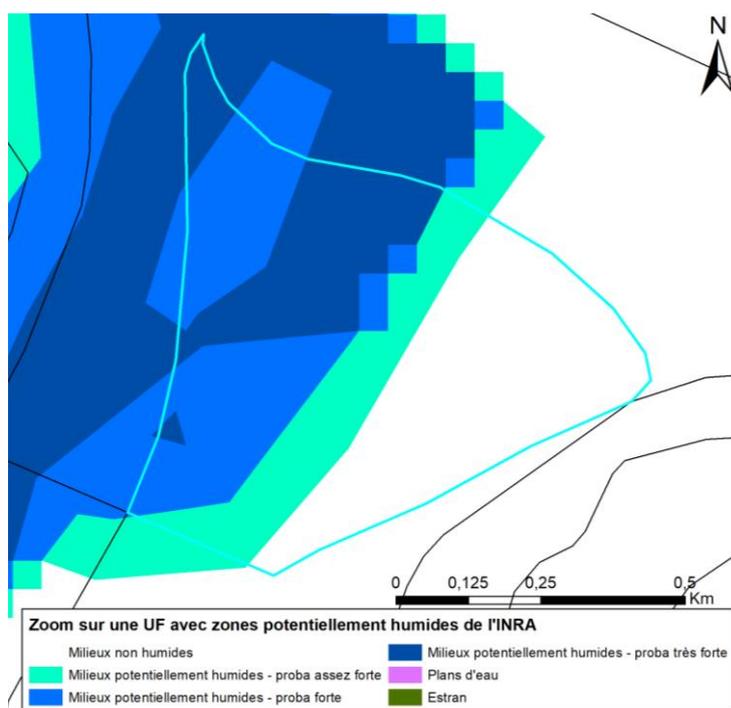


Illustration 62 – Représentation des zones potentiellement humides de l'INRA zoomée sur l'UF 3927

A titre d'exemple, le résultat de cette analyse statistique pour l'UF 3927 est proposé dans le Tableau 5 ci-dessous. 62% de sa superficie totale est couverte par une zone potentiellement humide. On constate d'ailleurs que la partie potentiellement humide correspond à la zone pour laquelle l'épaisseur de ZNS en Basses Eaux reste faible (cf. Illustration 58, carte de droite).

	Milieu non humide	Plans d'eau	Estran	Milieu potentiellement humide			
				Proba assez forte	Proba forte	Proba très forte	TOTAL
Code UF 3927	37.56%	0	0	16.13%	26.79%	19.52%	62%

Tableau 5 – Pourcentage de superficie pour chaque classe de la carte des zones potentiellement humides de l'INRA pour l'UF n°3927

Ce travail statistique a été mené sur l'ensemble du bassin, aboutissant à un taux de couverture de zones potentiellement humides pour chaque UF.

3.5.3. Critère « IDPR »

L'Indice de Persistance et de Développement des Réseaux (IDPR) a été développé par le BRGM (Mardhel *et al.*, 2004) pour qualifier un territoire en termes de « chemins empruntés » par les eaux météoritiques :

- elle ruisselle à la surface, se concentre dans les ruisseaux et les rivières et quitte le bassin à la faveur d'un exutoire de surface ;
- elle s'infiltre dans le sous-sol, se concentre dans un aquifère et quitte ce dernier par un exutoire souvent distinct de celui du réseau des rivières.

L'IDPR devient ainsi un moyen de quantifier ce rôle en comparant un réseau théorique de talwegs établi selon l'hypothèse d'un milieu parfaitement homogène (indice de développement ID), au réseau hydrologique naturel mis en place sous le contrôle d'un contexte géologique hétérogène

(de persistance des réseaux PR). L'indice de développement et de persistance des réseaux présente une métrologie de l'écart constaté entre les deux réseaux (cf. Illustration 63). Cet indice spatial, est utilisé pour qualifier l'aptitude du milieu à laisser ruisseler ou s'infiltrer la lame d'eau météoritique (cf. Illustration 64).

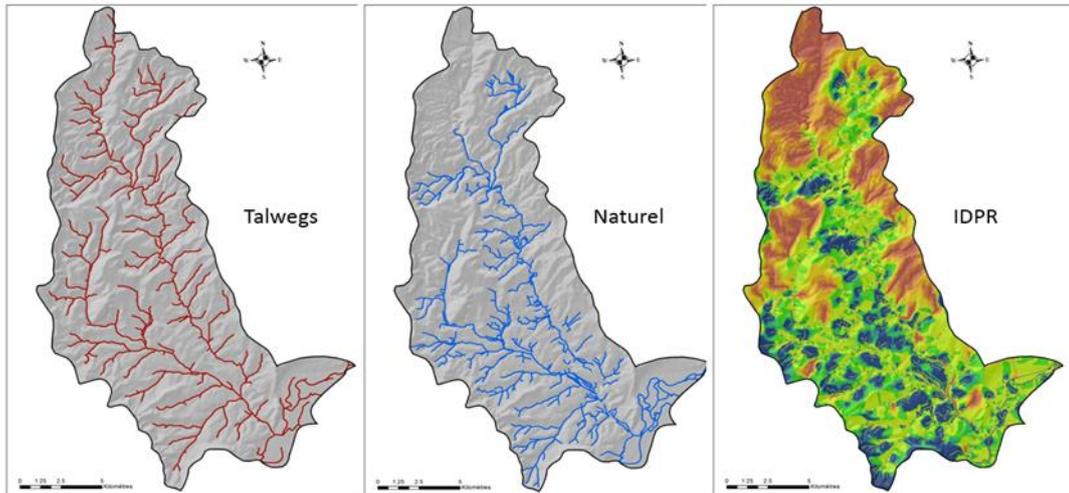


Illustration 63 – Exemple des données types nécessaires (talwegs & réseau hydrologique naturel) pour calculer un IDPR

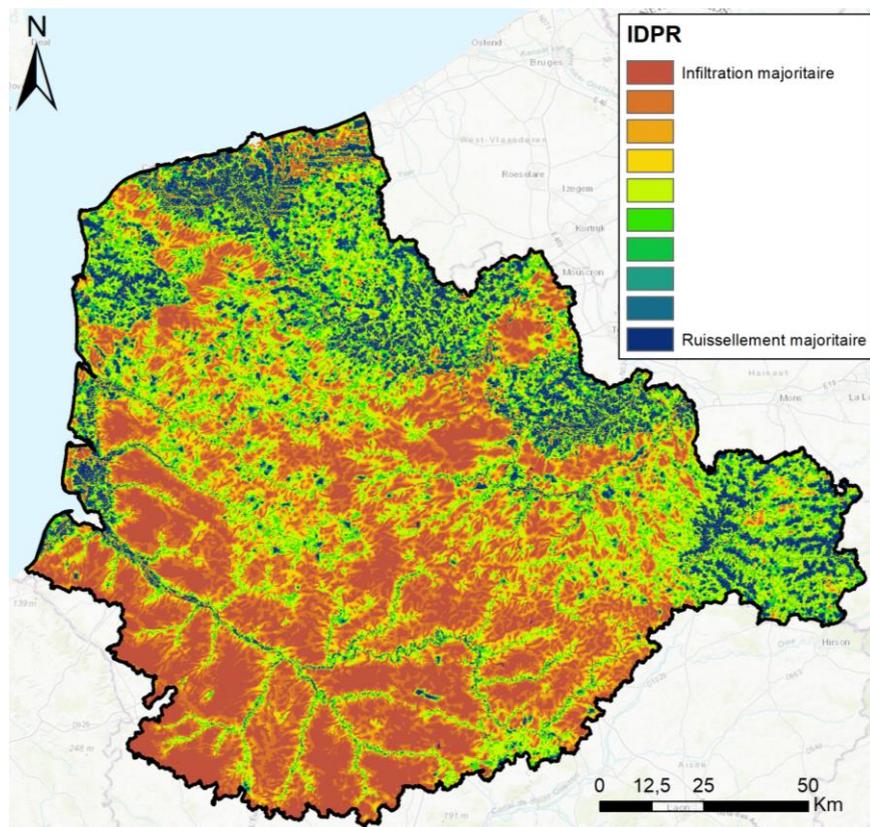


Illustration 64 – Carte de l'IDPR sur le bassin Artois-Picardie

La valeur médiane IDPR a été calculée pour chaque UF du bassin (cf. Illustration 65).

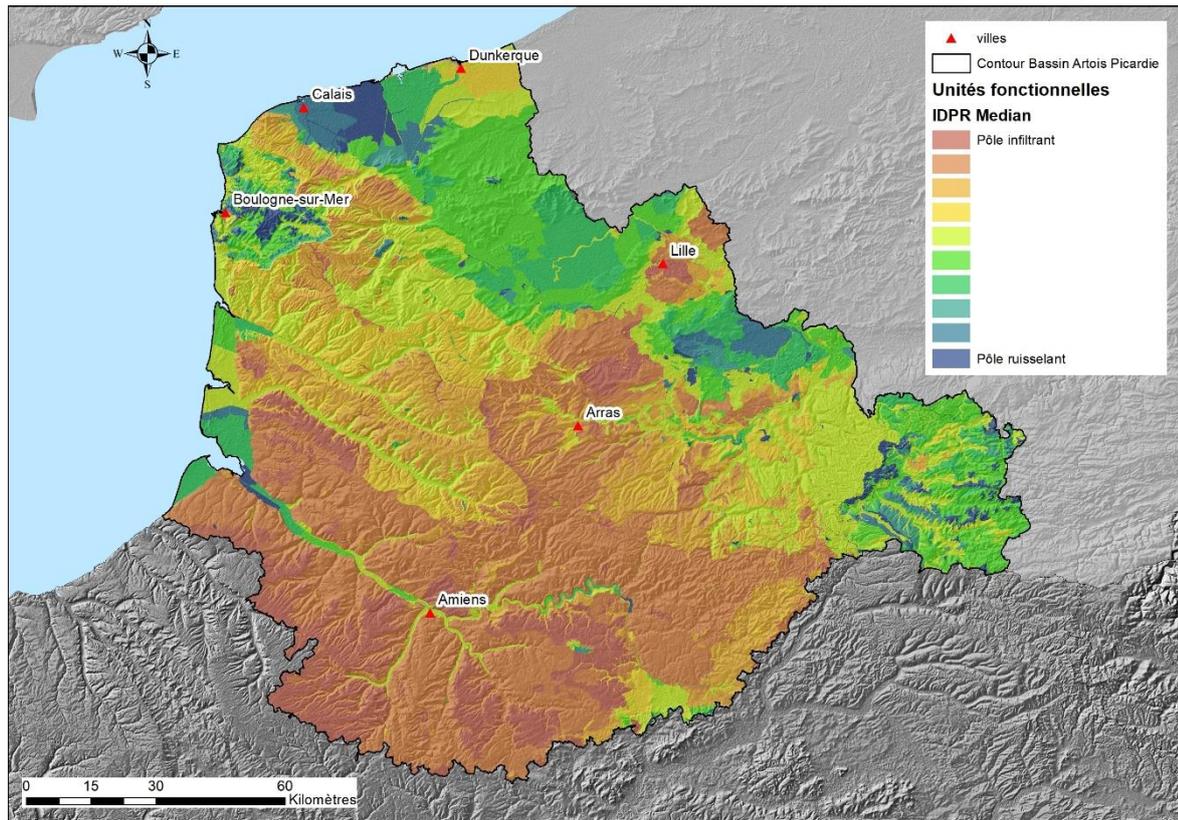


Illustration 65 – Valeur IDPR agrégée par UF pour le bassin Artois-Picardie

Un des postulats de départ concernant l'IDPR consiste à dire que les valeurs inférieures ou égales à 1000 (infiltration prépondérante) indiquent généralement une zone où une partie des pluies efficaces peut migrer vers la nappe ou, à l'inverse, les eaux souterraines ont la possibilité de venir alimenter les cours d'eau. De même, en relatif, une UF qui aura une valeur médiane d'IDPR inférieure à 500 (majoritairement infiltrant) possèdera un potentiel d'échange ESO/ESU plus fort qu'une UF avec un IDPR médian supérieur à 1500 (majoritairement ruissellement).

3.5.4. Critère « Entités hydrogéologiques BDLISA affleurantes imperméables »

Pour une analyse géomatique de ce type, il apparaît intéressant d'identifier les secteurs comportant, à l'affleurement, un fort taux de couverture en entités hydrogéologiques imperméables. De par leur caractéristique intrinsèque (perméabilité $> 10^{-9}$ m/s), ces formations ne favorisent pas les écoulements souterrains en leur sein et interagissent très peu avec la surface.

A l'échelle du bassin, ce type de configuration peut être considéré comme typique de secteurs ayant un potentiel d'échanges ESO/ESU quasi-nul, en comparaison des autres. De ce fait, il a été décidé de surimposer, tel un masque, ce critère sur l'ensemble des autres critères énoncés dans les chapitres précédents (cf. Illustration 66).

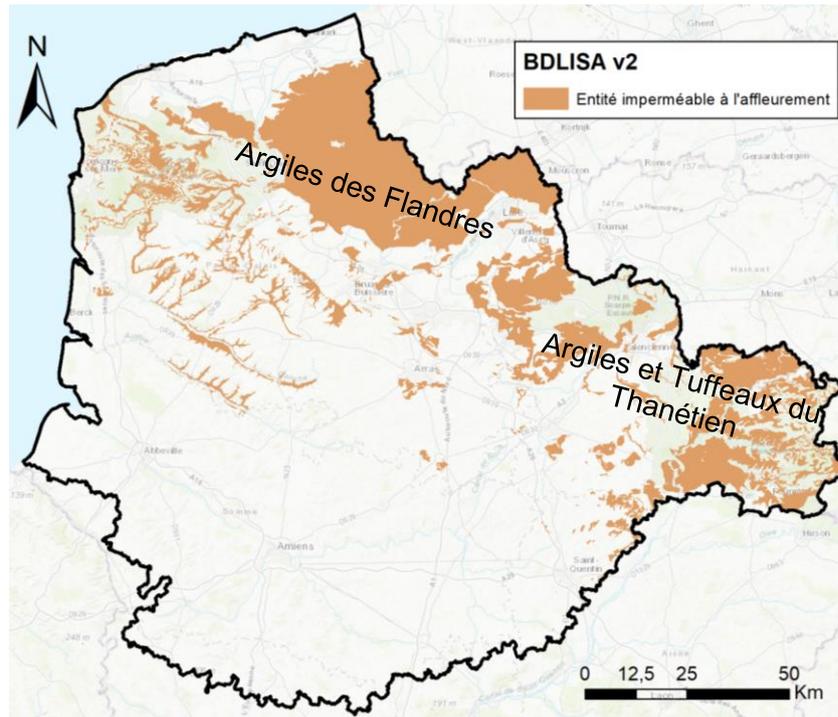


Illustration 66 – Entités hydrogéologiques affleurantes de nature « imperméable » (BDLISA V2)

Il faut toutefois noter que cette caractérisation BDLISA s’applique « en grand » par entités. Elle ne retranscrit pas forcément les configurations locales particulières au sein même de l’entité (variations latérales de perméabilité, zone d’infiltration privilégiée favorisée par des systèmes de failles, etc...) pouvant jouer sur le potentiel d’échanges ESO/ESU.

Dans le nord-est du bassin Artois-Picardie, il est admis que des nappes très localisées et peu productives peuvent être présentes dans la partie supérieure plus sableuse des Argiles des Flandres (au toit des Sables aquifères du Landénien supérieur ou « Sables d’Ostricourt ») ou, plus au sud-est, dans les Argiles et Tuffeaux du Thanétien. Ces 2 formations sont considérées comme imperméables dans la BDLISA (cf. Illustration 66), mais il est difficile d’intégrer ce particularisme dans l’approche géomatique globale menée ici.

3.5.5. Croisement des critères et résultat final de l’approche géomatique

L’hétérogénéité des données ne permet pas d’effectuer une simple classification du potentiel lien ESO/ESU par paliers définis qualitativement sur l’ensemble des données statistiques calculées par UF. Pour cette raison, une classification statistique par une méthode de regroupement (clustering) a été réalisée. Après plusieurs tests sur le choix des critères à prendre en compte, il a été décidé de s’appuyer sur les critères précédemment décrits et jugés indispensables à la caractérisation du lien potentiel ESO/ESU, à savoir :

- La note globale par UF du critère « Synthèse Hautes Eaux / Basses Eaux de l’épaisseur de la zone non saturée » ;
- Le taux de couverture de zones potentiellement humides par UF ;
- La valeur médiane de l’IDPR par UF.

Le principe du clustering est le suivant : un critère de similitude entre les individus va être défini, basé sur des variables. Ensuite, ce calcul va créer plusieurs classes au sein desquelles les individus sont le plus semblable possible, tout en maximisant la dissimilitude entre ces classes.

Deux clustering sont possibles : les regroupements hiérarchiques ou les regroupements « par partition ». Le premier est moins adapté à un grand nombre d'objets et est particulièrement coûteux en temps de calcul.

La classification statistique « par partition » dite du « K-Means » (MacQueen, 1967) a donc été utilisée sous R, avec le principe du clustering d'objets en fonction d'une ou plusieurs variables. Cette méthode propose un regroupement des objets dans des classes, sans chevauchement de celles-ci. Elle apparaît plus adaptée au nombre d'objets volumineux (3 932 polygones à traiter dans notre étude) mais a un inconvénient : la nécessité de définir un nombre de classes en amont du calcul statistique.

Pour ce faire, la méthode « Elbow » (attribuée à Thorndike, 1953) a été préalablement employée. Cette méthode heuristique d'interprétation et de validation de la cohérence dans l'analyse des classes (ou clusters) examine le pourcentage de variance expliqué en fonction du nombre de classes. Le nombre de classes idéal correspond à celui pour lequel l'ajout d'une classe supplémentaire n'améliore pas sensiblement la meilleure modélisation des données (le pourcentage de variance expliqué par les classes n'est pas véritablement amélioré). Cette méthode a abouti à la définition de 4 classes pour les UF et critères considérés (cf. Illustration 67).

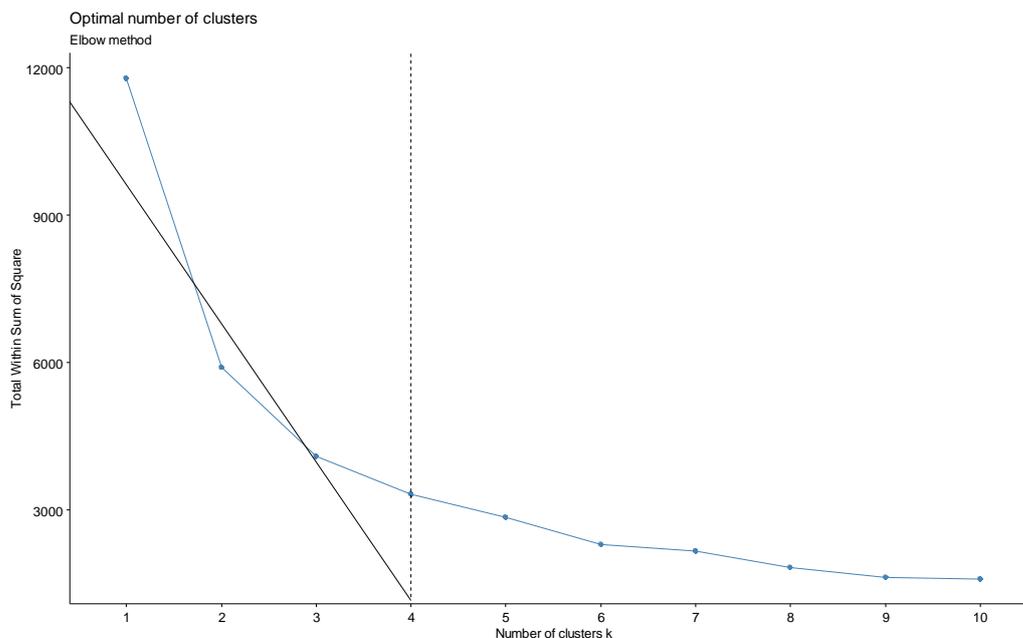


Illustration 67 – Détermination du nombre de classes idéal pour l'analyse du jeu de données par la méthode Elbow

La classification se déroule selon les étapes suivantes :

- 1/ Une caractérisation des UF avec les trois critères identifiés ;
- 2/ Une normalisation de ces trois variables pour harmoniser les poids ;
- 3/ Un calcul des « distances » entre les UF ;
- 4/ Une minimisation de la variance à l'intérieur des groupes.

Le processus est itératif. Il permet de modifier la position du barycentre de chaque classe au fur et à mesure de l'agrégation des données en fonction des variables choisies (cf. Illustration 68).

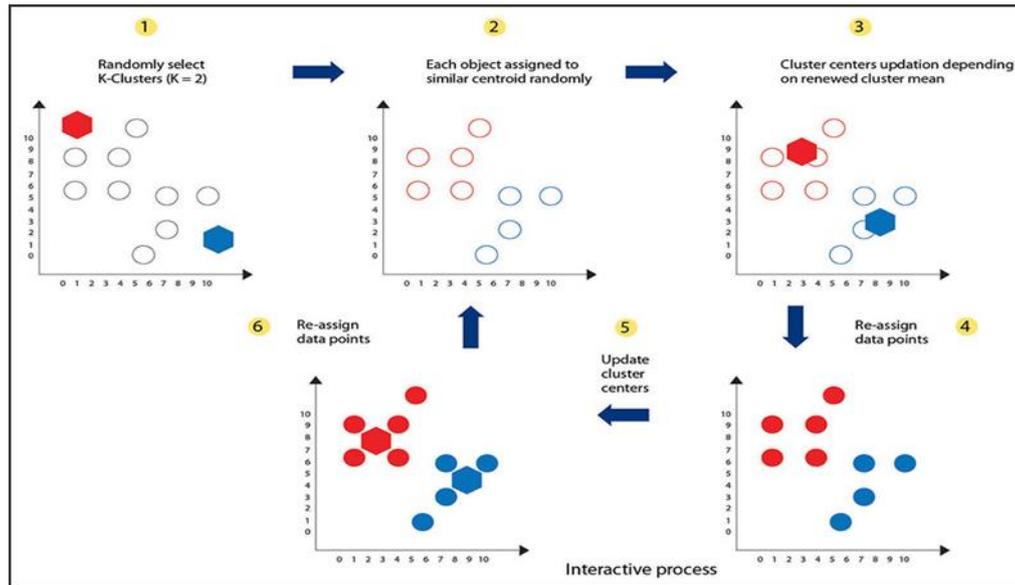


Illustration 68 – Schéma des étapes du calcul des barycentres des classes

Une analyse statistique complémentaire a été réalisée pour vérifier la pertinence de ces classes K-Means obtenues au regard des valeurs prises par les critères considérés (cf. Tableau 6). Les quatre classes apparaissent globalement adaptées, en particulier si l'on considère les critères « zones potentiellement humides » de l'INRA et la note globale « épaisseur de ZNS en HE/BE ». Plus les valeurs de ces critères sont élevées en moyenne, plus le potentiel lien ESO/ESU apparaît comme probable.

Les résultats autour du critère IDPR apparaissent plus délicat à interpréter, en particulier pour la classe censée retranscrire un potentiel ESO/ESU faible. La moyenne des valeur IDPR des UF de cette classe est la plus faible (terrain majoritairement infiltrant) des 4 classes. Lorsque l'on compare la carte IDPR (cf. Illustration 65) avec celle des deux autres critères, il est à noter que, pour le bassin Artois-Picardie, les faibles valeurs IDPR sont globalement situées dans les zones centrales et sud du bassin, là où l'épaisseur de ZNS est importante et où peu de zones potentiellement humides ont été identifiées.

In fine, les 4 classes de la carte du lien potentiel entre les eaux souterraines et les eaux souterraines présentées en Illustration 69 peuvent donc raisonnablement être identifiées comme ceci :

- **Le potentiel très fort** regroupe les UF dont les paramètres sont les plus favorables pour qu'un lien ESO/ESU existe, essentiellement une épaisseur de la ZNS la plus faible et un taux de couverture en zones potentiellement humides très important.
- **Le potentiel fort** correspond aux UF dont les paramètres précédemment cités sont moins favorables à un lien potentiel ESO/ESU, mais il reste tout de même possible.
- **Le potentiel moyen** concerne les UF dont les paramètres sont assez défavorables à des interactions ESO/ESU. La ZNS est trop profonde, l'IDPR indique une majorité de ruissellement, l'humidité des sols est plus faible.
- **Le potentiel faible** (ou pas de potentiel) regroupe les UF dont les résultats statistiques des variables sont beaucoup trop éloignés de ce qui caractérise une interaction ESO/ESU.

A cela doit s'ajouter le masque des entités hydrogéologiques affleurantes imperméables qui constitue un critère « limitant » en terme de potentiel d'échanges ESO/ESU (hachuré orange dans l'illustration 69).

Identification des échanges ESO/ESU dans le bassin Artois-Picardie

Classes	Nombre d'UF	Valeur IDPR					Taux de couverture de zones potentiellement humides					Note globale "épaisseur de ZNS"				
		Moy.	Min	Max	Ecart-type	Signification	Moy	Min	Max	Ecart-type	Signification	Moy	Min	Max	Ecart-type	Signification
Potentiel faible	1892	499,45	1	2000	442,52	Plutôt infiltrant	4,12	0	93	11,45	Très faible couverture	5,26	0	58	11,06	épaisseur de ZNS très importante en HE et BE
Potentiel moyen	409	1332,1	766	2000	425,40	Plutôt ruisselant	14,41	0	69	15,27	Faible couverture	26,05	12	75	13,8	épaisseur de ZNS importante en HE et/ou BE
Potentiel fort	776	899,29	9	2000	310,02	Intermédiaire, ruisselant et infiltrant	27,43	0	67	16,84	Couverture faible à moyenne	60,91	12	100	18,86	épaisseur de ZNS faible en HE et BE
Potentiel très fort	855	1010,28	11	2000	415,48	Intermédiaire, ruisselant et infiltrant	81,75	46	100	14,90	Couverture importante	71,94	12	100	20,45	épaisseur de ZNS très faible en HE et BE

Tableau 6 – Tableau synthétique présentant les ordres de grandeurs statistiques de critères considérés par classe

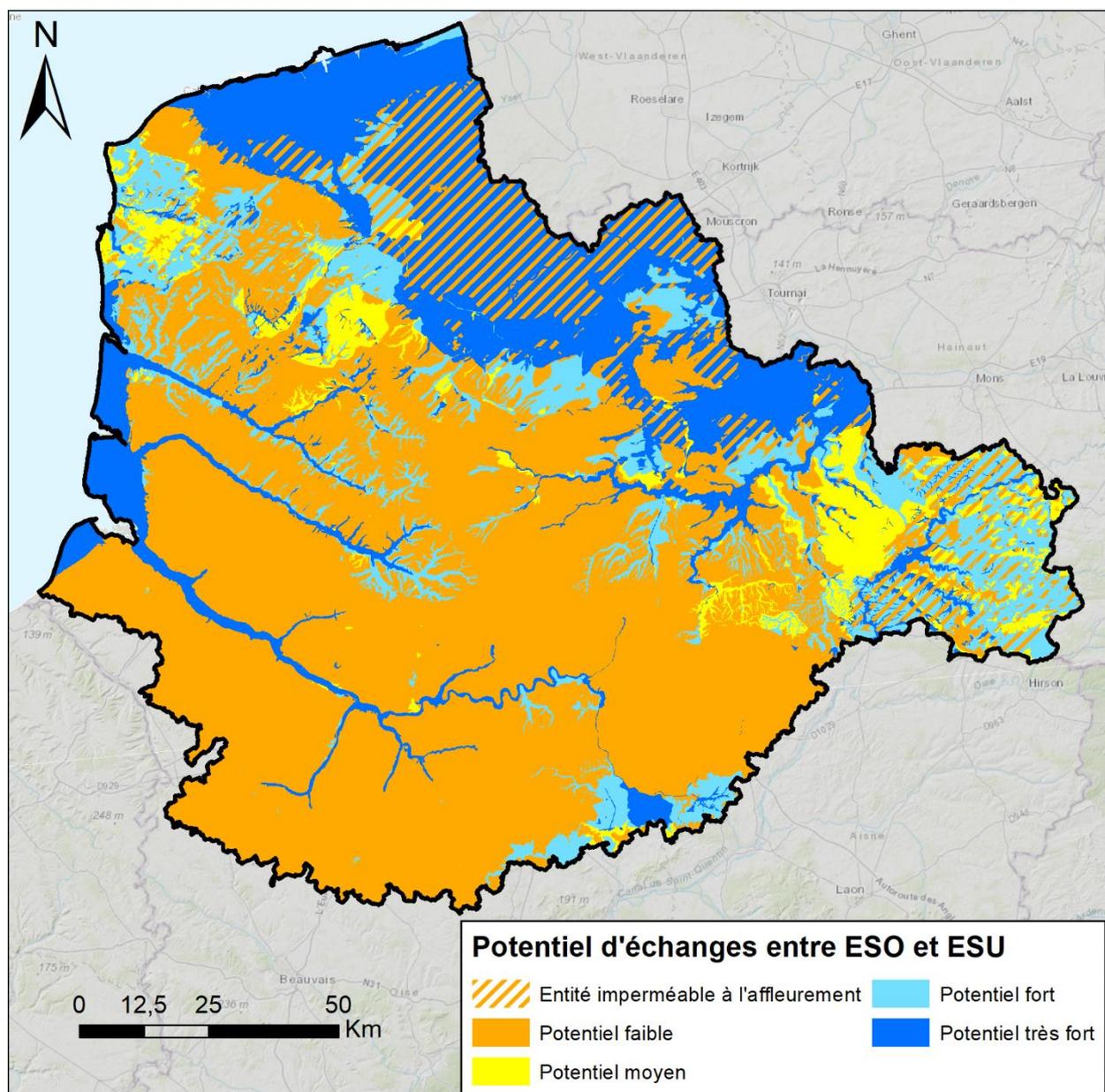


Illustration 69 – Cartographie finale du lien potentiel entre ESO et ESU à l'échelle de l'unité fonctionnelle sur le bassin Artois-Picardie.

Les zones caractérisées comme très favorables aux échanges ESO/ESU sont essentiellement les suivantes :

- Vallées crayeuses (Somme, Authie, Canche, Deûle, Scarpe, Escault) ;
- Nappes côtières du Marquenterre en bordure littorale ouest (associées aux Sables Pissards dans la BDLISA) ;
- Sables pissards sillonnés par les watergangs en bordure littorale nord ;
- Sables du Thanétien (partie affleurante hors bassin d'Orchies et hors zone sous couverture des Argiles de Flandres)
- Sables, marnes et calcaires de l'Yprésien basal et du Paléocène, au sud du bassin.

4. Approche hydrogéochimique et indicateurs qualité

4.1. OBJECTIF

L'objectif de l'approche hydrogéochimique est de rechercher des indicateurs hydrochimiques d'échanges potentiels des eaux souterraines vers les eaux superficielles et de tester sur quelques secteurs la complémentarité de cet outil à l'approche géomatique et connaissances locales.

Afin de répondre à cet objectif, une revue des travaux et données existantes et des connaissances actuelles a été réalisée ; ceci afin de déterminer quels sont les paramètres d'intérêt à prendre en compte et les types d'approches les plus intéressantes.

Cette revue a permis de mettre en évidence un premier constat : le nombre d'études « qualité de l'eau » qui abordent à l'échelle de masses d'eau le lien des eaux souterraines vers les eaux superficielles (ESO -> ESU) est très limité ; contrairement au nombre très important d'études qui traitent d'un point de vue qualitatif le lien inverse (ESU -> ESO). Néanmoins, des paramètres clefs ont pu être identifiés.

4.2. LIMITES EVENTUELLES DE LA METHODE

Dans le cadre de cette approche hydrochimique, les résultats peuvent être limités par plusieurs facteurs, comme la disponibilité des données et leur qualité ; ceci à la fois pour les eaux souterraines et les eaux superficielles.

Afin de répondre à l'objectif, il est en effet nécessaire de pouvoir disposer :

- d'un nombre suffisant de points d'eau (PE) souterraine (ESO) et d'eau superficielle (ESU) ;
Les points d'eau ESO et ESU doivent être répartis sur l'ensemble du secteur d'étude de façon homogène, avec à minima de la donnée ESO et ESU pour les mêmes entités hydrogéologiques prises en compte et ceci afin de pouvoir comparer leurs résultats ;
- d'un nombre de paramètres hydrochimiques suffisant par point d'eau, et aussi d'un nombre d'analyses suffisant par paramètre afin de réaliser une analyse statistique des données ;
- des mêmes paramètres hydrochimiques pour les points d'eau ESO et ESU situés à proximité.

Du fait de l'échelle de l'étude (bassin), ce sont les échanges d'eau des nappes vers les rivières qui peuvent être mis en avant par l'étude des paramètres chimiques. L'effet de la recharge des aquifères par les eaux de surface est le plus souvent localisé donc délicat à étudier à l'échelle du bassin et la localisation des points de surveillance des eaux souterraines permettant l'enregistrement des apports de surface doit être proche du cours d'eau. Une étude des couples PE de surface-PE souterraine n'a pas été réalisée dans le cadre de cette étude et, comme indiqué ci-dessus, il est peu probable que l'on dispose d'un nombre significatif de points d'eau souterraine permettant de suivre l'impact des flux provenant des cours d'eau. Au contraire, la décharge des nappes dans les cours d'eau se fait sur des secteurs plus importants et devrait se voir à la station de suivi de la qualité des eaux de surface. Les flux ESO->ESU sont généralement plus importants que l'inverse.

4.3. METHODOLOGIE PROPOSEE

4.3.1. Hydrogéochimie : connaissances actuelles du lien ESO vers ESU

D'une part, quelques études utilisant la géochimie de l'eau pour caractériser les apports des eaux souterraines (ESO) vers les eaux superficielles (ESU) ont déjà été réalisées en Artois-Picardie. D'autre part, une étude nationale méthodologique de grande ampleur intitulée NAPROM s'est déroulée de 2011 à 2014 sous la coordination de l'Onema. De cette étude est ressorti un guide technique et un rapport comparant les méthodes disponibles pour l'analyse des relations nappes-rivières (*Caractérisation des échanges nappes/rivières de l'échelle du tronçon à l'échelle régionale par métrique expérimentale ou modélisation 2011-2014* » (Onema/Armines, 2014) et « *guide technique interactions nappes/rivières - des outils pour comprendre et mesurer les échanges* (Paran et al. 2017)). La géochimie de l'eau y est mise en avant comme un outil complémentaire pour caractériser ces échanges et discriminer les eaux d'origines superficielles, interstitielles ou souterraines.

Les paramètres d'intérêt cités dans ce guide sont les suivants :

- les paramètres physico-chimiques classiques tels que pH, température, conductivité électrique, teneur en oxygène dissous (Gourcy et Petelet-Giraud, 2011). En France métropolitaine, la température de l'eau souterraine est, hors aquifères alluviaux, stable et comprise dans une fourchette de 12-16°C (valeur variable suivant la localisation géographique). La variation annuelle de la température des eaux de surface est de forte amplitude et peut donc contraster avec celle des eaux souterraines ;
- les concentrations en éléments majeurs, comme par exemple calcium, magnésium, nitrate et orthophosphates ;
- les concentrations en éléments traces, par exemple les molécules phytosanitaires, les métaux lourds, le chlorofluorocarbone (CFC), les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP), les polluants émergents, etc. ;
- les isotopes présents naturellement dans l'environnement (isotopes de l'eau, du carbone, du strontium,...) ;
- les traceurs artificiels (par ex. fluorescéine, éosine).

Afin de prendre en compte les différents pôles géochimiques potentiels dans l'interprétation des résultats, il est nécessaire de connaître :

- la composition géochimique de l'eau de pluie ;
- la composition de l'eau de mer notamment en bordure littorale ;
- les éléments identifiés avec un risque fort de fond hydrogéochimique élevé, ainsi que leurs concentrations de référence si elles sont connues ;
- les éléments ayant pour origine une contamination anthropique.

Il faut aussi que ces différents éléments aient des signatures chimiques ou isotopiques contrastées, afin de pouvoir les identifier.

Des suivis temporels peuvent être aussi nécessaires, aussi bien de la concentration en éléments dissous que de la piézométrie, avec des chroniques de données suffisantes, afin de prendre en compte la variabilité saisonnière.

Des études antérieures menées par le BRGM à l'échelle de masses d'eau ont déjà identifié quelques pistes intéressantes de molécules et éléments chimiques/isotopiques à cibler pour caractériser les apports d'eau souterraine vers les eaux superficielles.

L'étude de Cary et al. (2015) visant à établir une liste des paramètres chimiques pertinents pour la prise en compte des impacts des eaux souterraines sur les eaux de surface est intéressante à ce titre. En plus de cet objectif premier, cette étude visait également à proposer les éléments pour lesquels une révision des valeurs seuils serait à envisager. Cette liste devait également permettre de prioriser, dans une volonté de pragmatisme, les éléments dissous à analyser pour la réalisation du test « eau de surface » dans l'évaluation de l'état chimique des eaux souterraines dans le cadre de la mise en œuvre de la DCE. Les résultats de cette étude ont mis en avant des tests non pertinents pour les éléments suivants : Cu, Cl, Cd et Pb. Par contre, le nickel (Ni) semble un élément intéressant à cibler pour mieux caractériser les relations ESO-ESU. En effet, d'après Cary et al. (2015), « *parmi les substances déclassant les eaux de surface qui pourraient transiter à travers la zone hyporhéique, on trouve le nickel, les HAP (benzo(k)fluoranthène, benzo(b)fluoranthène, indeno(1,2,3-cd)pyrène, benzo(g,h,i)perylène) et le pentachlorophénol. Pour ces substances, les eaux souterraines pourraient être responsables de la dégradation des eaux de surface et pourtant aucune de ces substances n'apparaît comme déclassant les eaux souterraines très probablement puisqu'il n'y a pas de dépassement de la valeur seuil. Pour ces substances, une réévaluation de la valeur seuil en prenant en compte la valeur de la NQE¹² (et éventuellement des facteurs d'atténuation/dilution) serait pertinente puisqu'elle conduirait à déclencher l'enquête appropriée, mener le test « eau de surface » et vérifier la possibilité d'une contamination des eaux de surface par les eaux souterraines* ».

Le Tableau 7 synthétise ces résultats. Parmi les substances identifiées, se distinguent également l'arsenic et le métazachlore.

Famille	Paramètre	VS/(NQE ou limite de classe)	Possibilité de transfert vers les ESU
Métaux / métalloïdes et dérivés	Zinc	641	+
	Cuivre	2000	+
	Cadmium	20-62,5	-
	Chrome (total)	14,7	-
	Arsenic	12	+ / -
	Nickel	5	+
	Plomb	8,3	-
Nutriments (en mg/L)	Nitrite	1,67	+
Pesticides et métabolites de pesticides	Aminotriazole	1,25	+
	Métazachlore	5,26	+
	Diflufenicanil	10	+
	Endosulfan	20	-
	Chlordécone	20000	+
	Dieldrine	3	-
HAP	Benzo(a)pyrène	58,8	+
	Toluène	9,5	+
Alkylphénols, nonylphénols et autres phénols	Pentachlorophénol	22,5	+ / -

Tableau 7 – Synthèse des informations sur la mobilité des molécules et liste non exhaustive des éléments dont la Valeur Seuil pourrait être adaptée dans le cas de relations avérées entre eaux souterraines et eaux de surface et NQE définies (Cary et al., 2015).

¹² Normes de Qualité Environnementale

L'étude de Auterives et Pinson (2016) réalisant un test d'applicabilité sur le bassin Loire-Bretagne est également intéressante à prendre en compte, notamment pour ces résultats sur l'atrazine. En effet, l'atrazine, molécule synthétique qui n'existe pas dans le milieu naturel, fut utilisée comme produit phytosanitaire mais son usage est interdit depuis 2003. L'idée proposée dans cette étude, en partant de données bancarisées dans ADES de 2007-2014 et des données qualité des eaux superficielles connues sur la même période, était d'utiliser l'atrazine, comme traceur / marqueur du lien eau de surface – eau souterraine. L'objectif n'était pas de quantifier l'importance de la dégradation des eaux de surface par les eaux souterraines, mais seulement d'indiquer un lien eau de surface – eau souterraine et plus spécifiquement mettre en évidence les secteurs où les eaux souterraines contribueraient aux eaux de surface.

Les résultats obtenus à l'échelle du bassin Loire-Bretagne se sont révélés pertinents et encourageants. Les conclusions de l'étude mettaient en avant le besoin d'investigations complémentaires menées à l'échelle d'autres bassins et pour d'autres molécules également interdites depuis suffisamment longtemps pour ne pas remettre en cause leur origine souterraine dans les eaux de surface. Cette approche va donc être testée dans l'étude du bassin Artois-Picardie.

4.3.2. Qualité des eaux souterraines en Artois Picardie

Une revue rapide des résultats des états des lieux 2013 et 2019 permet de mettre en avant les éléments présents à des concentrations relativement importantes dans les eaux souterraines dans le bassin Artois-Picardie et entraînant une dégradation de la qualité des eaux (Illustration 70). Cela est le cas par exemple du nitrate et des pesticides, pour lesquels des secteurs en particulier se distinguent avec des concentrations plus élevées ; supérieures à 40 mg/L pour le nitrate et supérieures à 0,1 µg/L pour les pesticides (produits phytosanitaires). Les états des lieux mettent également en évidence des concentrations localement élevées en nickel, ammonium et sulfates.

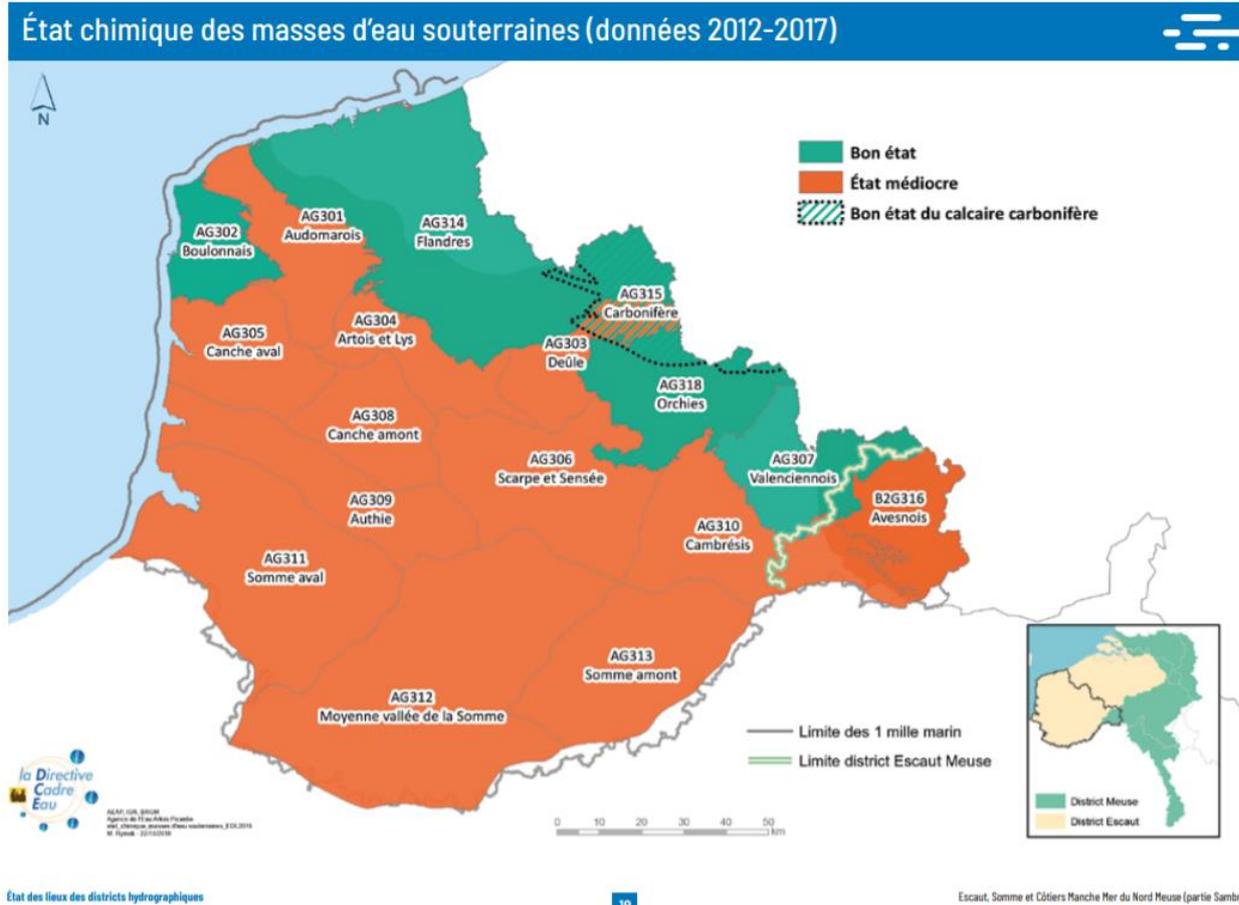


Illustration 70 – Etat chimiques des masses d'eau souterraine en Artois-Picardie (données 2012-2017), État des lieux des districts hydrographiques 2019 (source : Comité de Bassin Artois-Picardie, Etat des lieux 2019, annexes cartographique)

4.3.3. Paramètres potentiellement intéressants à cibler dans cette étude

Première liste des paramètres à cibler comme potentiellement intéressants pour caractériser les apports d'eau souterraine vers les eaux superficielles

Suite à cette revue bibliographique, une première liste de paramètres physico-chimiques et chimiques analysés à la fois dans les ESO et ESU du secteur d'étude et pouvant fournir des informations sur les apports d'eau souterraine vers les eaux de surface a été réalisée.

Les paramètres sont classés par catégories :

- Paramètres physico-chimiques *in situ* : pH, température, conductivité électrique, oxygène dissous ;
- Ions majeurs ;
- Métaux lourds, halogène et métalloïde: arsenic, fluor, nickel, cadmium, chrome, cuivre, mercure, plomb, zinc ;
- Composés azotés : nitrate, nitrite, ammonium ;
- Substances phytosanitaires et métabolites ;
- Isotopes stables de la molécule d'eau ;
- Radon 222.

Molécules potentiellement présentes, analysées et détectées dans les ESO et ESU

Une recherche préliminaire dans les bases de données Naïades (ESU) et ADES (ESO) a été réalisée pour savoir quels étaient les éléments dissous dans l'eau d'intérêt possible pour l'étude disposant d'analyses bancarisées dans ces deux bases de données sur le secteur d'étude. Cette liste est présentée dans le Tableau 8 avec leur code Sandre correspondant. Par rapport à la liste citée ci-dessus (§4.3.3) les éléments cadmium, cuivre, mercure, plomb, zinc, isotopes stables de la molécule d'eau et radon-222 ne pourront pas être utilisés car pas ou trop peu analysés dans l'un ou l'autre des milieux ou trop complexe à étudier.

Famille chimique	Code Sandre	Nom paramètre
Paramètres physico-chimiques	1301	Température de l'eau
	1302	pH
	1303	Conductivité à 25°
Ions majeurs	1374	Ca - calcium
	1372	Mg - magnésium
	1367	K - potassium
	1375	Na - sodium
	1327	HCO ₃ - hydrogénocarbonates
	1337	Cl - chlorures
	1338	SO ₄ - sulfates
Métalloïdes	1369	Arsenic
Halogénures	7073	Anion fluorure
Métaux lourds	1386	Nickel
	1389	Chrome
Autres éléments	6219	Perchlorates
Composés azotés	1339	Nitrite
	1340	Nitrate
	1335	Ammonium
Pesticides et métabolites	1107	Atrazine
	1108	Atrazine déséthyl
	1109	Atrazine déisopropyl
	1263	Simazine
	1221	Métolachlore total
	2974	S-métolachlore
	6854	ESO - métolachlore
	6853	OXA - métolachlore

Tableau 8 – Molécules identifiées avec des analyses disponibles à la fois dans ADES et Naiades.

Liste de quelques paramètres clés à prendre en compte sur le secteur d'étude

Certains des paramètres chimiques analysés à la fois pour les ESO et ESU, dont l'origine peut être naturelle ou anthropique, peuvent fournir des informations sur les échanges nappes-rivières.

Parmi les **paramètres physico-chimiques** mesurés lors des prélèvements (*in situ*), les valeurs de conductivité électrique peuvent permettre d'identifier des venues souterraines dans les cours

d'eau. Les mesures de température pourraient également être de bons indicateurs puisque la température des eaux souterraines est relativement stable alors que celle des eaux de surface varie de manière saisonnière. On a ainsi un contraste de température fort entre ces deux types d'eau en été et en hiver.

Pour les **ions majeurs**, il peut être intéressant de suivre les concentrations en sulfates, mais aussi des ratios d'éléments. En effet, les ratios d'éléments, par exemple les ratios molaires Mg/HCO_3 ou Ca/SO_4 , etc. peuvent permettre d'identifier un faciès géologique et/ou lithologique. Les valeurs de ces ratios reflètent souvent des pôles géochimiques potentiels. Le choix de ces ratios s'effectue en fonction des données, du contexte hydrogéologique, etc.... Travailler avec des ratios plutôt que des concentrations d'éléments permet de s'affranchir du processus fréquent de dilution. Par exemple la concentration en calcium d'une eau va dépendre fortement des flux d'eau (vitesse de circulation) et de la lithologie des roches parcourues. La concentration peut donc fortement varier entre la zone de recharge et la zone de décharge, lors d'arrivées d'eau de surface généralement faiblement minéralisée. Par contre le rapport (ou ratio) entre deux éléments dissous ne varient pas le long des lignes de flux sauf lors d'arrivée d'eau de composition chimique différente ou changement du faciès lithologique des roches traversées.

Pour les **ions traces**, métaux lourds, métalloïdes et halogènes, on peut citer le fluor (anion fluorure) et le nickel, d'autant plus qu'ils ont été identifiés dans des études antérieures comme présentant pour les eaux souterraines un risque de fond hydrogéochimique élevé en Artois Picardie (Illustration 71) dans le rapport BRGM de Brenot et al. (2007). Le nickel fait aussi partie des éléments connus et identifiés comme présents à des concentrations non négligeables dans les masses d'eau souterraine (MESO) en Artois-Picardie. Pour information, le fluor et le nickel n'avaient pas été identifiés comme présentant un risque de fond hydrogéochimique élevé en Artois-Picardie pour les eaux superficielles ; leur présence dans les ESU pourrait donc être un indicateur pertinent d'apports d'eau souterraine vers les cours d'eau.

L'arsenic fait aussi partie des éléments connus et identifiés comme présents à des concentrations non négligeables dans les masses d'eau souterraine (MESO) en région Artois-Picardie. Le chrome ne sera utilisé dans cette étude que pour permettre de distinguer le nickel d'origine naturelle du nickel anthropique.

Pour les composés azotés, l'ammonium, le nitrite et nitrate pourraient présenter un intérêt dans l'identification des venues d'eau souterraine vers les eaux de surface ; ceci sera à tester avec les données disponibles en Artois-Picardie. Une des difficultés attendues pour l'utilisation de ces paramètres est la possible transformation dans la nature (et plus particulièrement dans la zone hyporhéique) de ces composés selon la présence d'oxygène (l'ammonium devient nitrite, peu stable puis nitrate avec une oxydation du milieu).

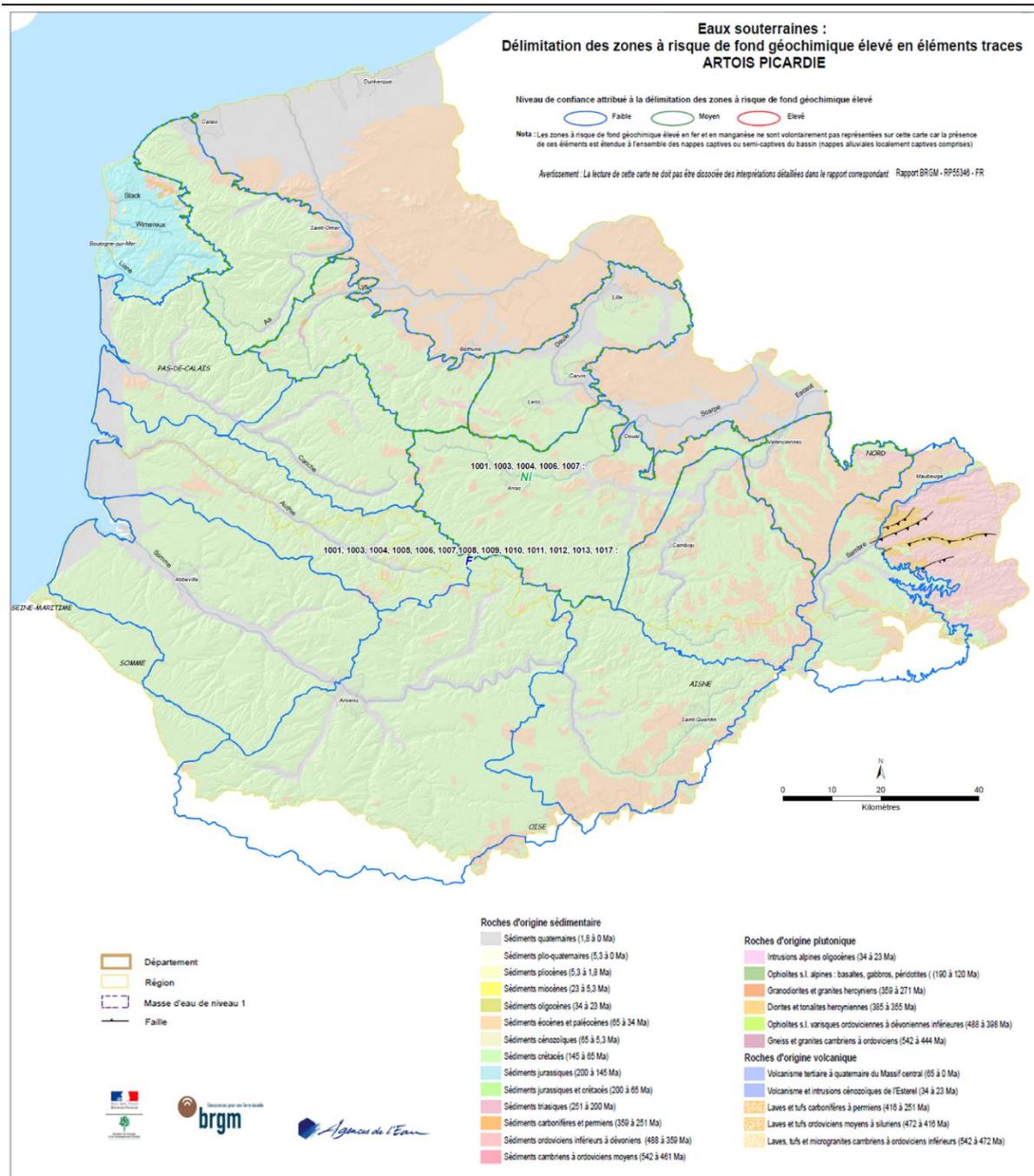


Illustration 71 – Carte des éléments identifiés comme présentant un risque de fond hydrogéochimique élevé en Région Artois Picardie (extrait de Brenot et al., 2007)

4.3.4. Pistes potentielles retenues pour cette étude

Suite à cette première analyse des données disponibles, potentiellement pertinentes pour caractériser les apports d'eau souterraine vers les eaux superficielles, 4 pistes potentielles ont été retenues pour la présente étude.

Eléments présentant un risque de fond hydrogéochimique élevé dans les eaux souterraines

Les éléments présents naturellement dans les eaux souterraines en Artois-Picardie, pour lesquels un risque de fond hydrogéochimique élevé a été identifié, sans que cela soit le cas pour les eaux superficielles. Ceci est le cas pour le nickel, avec un niveau de confiance moyen, d'après l'étude BRGM (Brenot et al., 2007) pour les masses d'eau souterraine 1001, 1003, 1004, 1006 et 1007. Le nom des masses d'eau souterraine correspondantes est rappelés dans le tableau ci-après et correspond au premier référentiel des masses d'eau disponible lors des études de fond hydrogéochimique de 2005-2007.

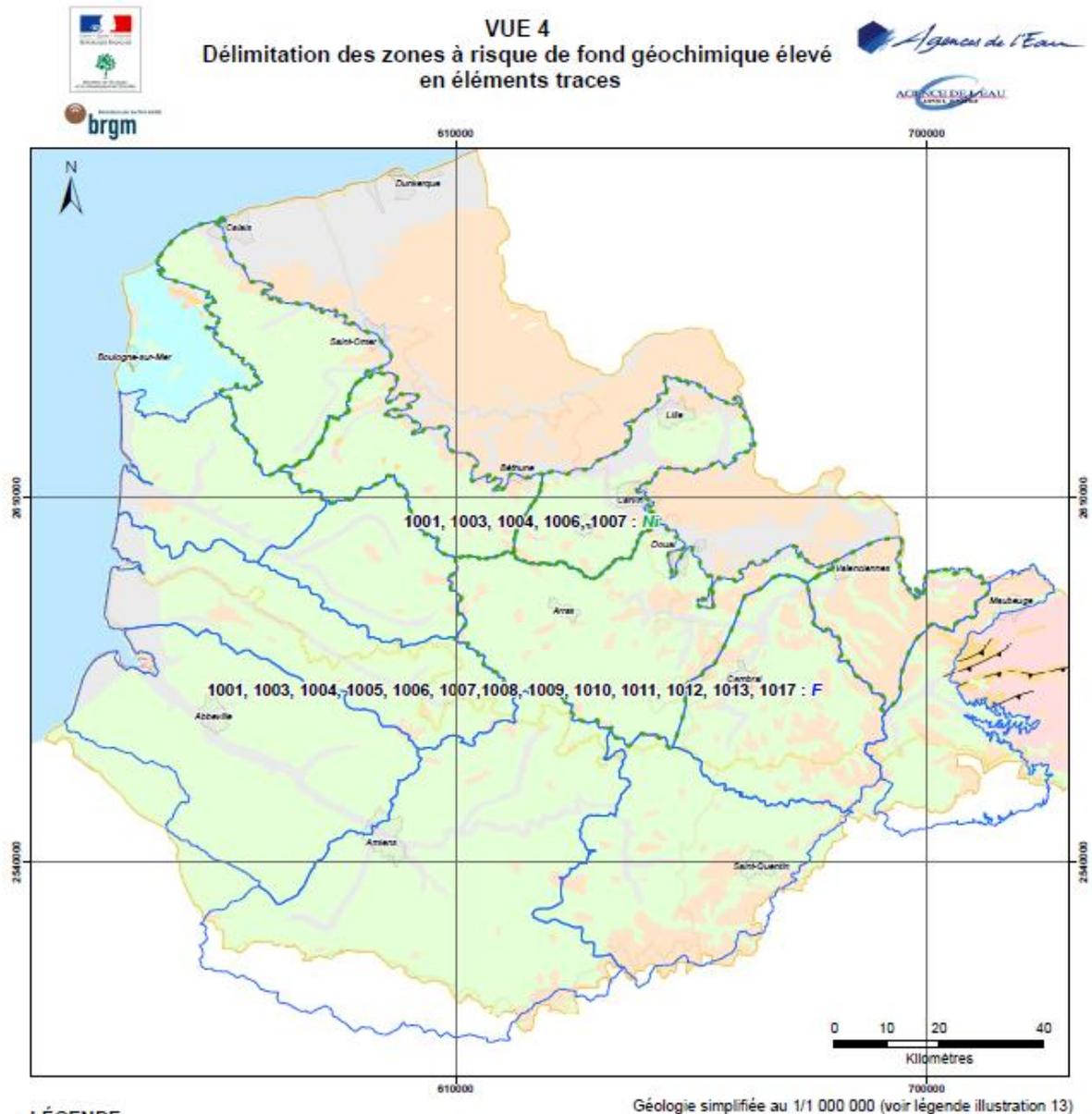
Code Masse d'eau souterraine	Libellé masse d'eau souterraine
1001	Craie de l'Audomarois
1003	Craie de la vallée de la Deûle
1004	Craie de l'Artois et de la vallée de la Lys
1006	Craie des vallées de la Scarpe et de la Sensée
1007	Craie du Valenciennois

Tableau 9 – Codes et libellés des masses d'eau souterraine identifiées avec un risque de fond hydrogéochimique élevée pour le nickel (d'après Brenot et al., 2007).

En effet, d'après Brenot et al. (2007) :

« Les masses d'eau de la Craie présentent des concentrations en nickel jusqu'à 46 µg/L pour les données ADES attribuées à la sous-unité « aquifère de la Craie ». Pour le **nickel**, les informations fournies par la synthèse bibliographique appuient que ces concentrations correspondent à un fond géochimique élevé. Les travaux de thèses (Vallée, 1999 ; Denis et al., 2000 ; Lefevre, 2006) effectués pour déterminer l'origine du nickel dans les eaux souterraines des masses d'eau de la Craie ont montrés que la présence de nickel à des concentrations naturellement élevées est variable suivant la localisation du point de prélèvement. Ainsi l'emprise spatiale de la zone à risque de fond géochimique élevé concerne probablement une étendue plus limitée que celle de la masse d'eau. Cependant en raison de la répartition des points de prélèvement disponibles, une délimitation plus précise de ce risque reste délicate. La présence de Ni est à relier à chaque fois à des conditions redox particulières (semi captivité), généralement en bordure de craie sous recouvrement tertiaire. C'est pour cette raison qu'une zone à risque de fond géochimique élevé est attribuée à aux masses d'eau 1001, 1003, 1004, 1006 et 1007 avec un **niveau de confiance moyen** afin de rendre compte de l'incertitude concernant l'emprise exacte de ce risque. »

Le fluor, élément aussi identifié comme présentant un risque de fond hydrogéochimique élevé dans l'étude de Brenot et al. (2007) avait quant à lui un niveau de confiance faible. Une comparaison des concentrations en F dans les eaux souterraines et les eaux superficielles sera tout de même réalisée dans cette étude.



LÉGENDE

Niveau de confiance attribué à la délimitation des zones à risque de fond géochimique élevé

- Faible
- Moyen
- Elevé

Nota : Les zones à risque de fond géochimique élevé en fer et en manganèse ne sont volontairement pas représentées sur cette carte car la présence de ces éléments est étendue à l'ensemble des nappes captives ou semi-captives du bassin (nappes alluviales localement captives comprises)

Fond cartographique

- Département
- Région
- Masses d'eau de niveau 1



Avertissement : La lecture de cette carte ne doit pas être dissociée des interprétations détaillées dans le rapport correspondant
Rapport BRGM - RP55346 - FR

Illustration 72 – Zones à risque de fond hydrogéochimique élevé en éléments traces pour les eaux souterraines (extrait de Brenot et al., 2007)

Variations saisonnières de la qualité de l'eau des ESU en lien avec des apports plus ou moins importants d'eau souterraine

Il s'agit ici d'identifier éventuellement des variations saisonnières de la qualité de l'eau des cours d'eau, par exemple pour les éléments majeurs, les ratio d'éléments majeurs ou le nitrate, en lien avec des apports plus ou moins importants d'eau souterraine.

Par exemple, pour la Craie, les données de terrain, ainsi que les modèles maillés ont mis en évidence un apport d'eau souterraine lors des périodes d'étiages, entre juin et septembre. L'objectif est ici d'essayer d'identifier ces apports par la chimie.

On observe différents types de cycles saisonniers de teneurs en nitrate dans les eaux de surface ; des concentrations maximales en automne/hiver et minimales en été ou l'inverse. L'amplitude de ces variations est également variable. Les plus faibles variations annuelles sont généralement du fait d'un fort soutien des rivières par les eaux souterraines de concentration plus stable.

Molécules interdites ou sans usage depuis longtemps présentes dans les ESO et qui peuvent être présentes dans les ESU

Un autre indicateur d'apports d'eau souterraine vers les cours d'eau pourrait être basé sur des molécules interdites ou sans usage depuis suffisamment longtemps, qui seraient potentiellement présentes, analysées et détectées dans les ESO et ESU.

Trois molécules ont été identifiées comme pouvant répondre à ces critères : l'atrazine, la simazine et les perchlorates.

L'atrazine est une molécule phytosanitaire dont l'usage est interdit depuis 2003. C'est une molécule synthétique qui n'existe pas à l'état naturel. Les temps de résidence sont relativement courts dans les eaux de surface que sont les rivières. Par conséquent, la source de pollution anthropique ainsi stoppée depuis plus de 15 ans, on s'attend à ne plus retrouver de manière quantifiable cette substance dans les cours d'eau à moins qu'elle ne provienne d'un réservoir aux temps de résidence beaucoup plus longs comme les eaux souterraines. L'atrazine peut être encore directement présente dans les eaux souterraines, ou indirectement via ses métabolites (atrazine déséthyl et atrazine déisopropyl). Sa présence dans les cours d'eau est donc en lien direct avec des apports d'eau souterraine (en l'absence d'usage actuel illégal).

La simazine est aussi une molécule phytosanitaire interdite depuis 2003. L'intérêt de ce 2^{ème} indicateur potentiel est toutefois à évaluer en fonction des analyses disponibles. Les travaux en Loire-Bretagne réalisés par Auterives et Pinson (2016) ont aussi traité de la simazine.

Les perchlorates ont été identifiés comme présents dans certains secteurs de la région Artois-Picardie avec des concentrations excédant la valeur recommandée pour l'AEP (15 µg/L), en lien notamment avec les lignes de front de la Première Guerre mondiale et des sites industriels de désobusage de l'entre-deux-guerres, et l'utilisation du guano chilien comme engrais en agriculture (Lopez *et al.*, 2014). Les perchlorates ne sont pas présents dans les eaux superficielles hors possible contamination industrielle actuelle. Leur présence dans les cours d'eau, à proximité de secteurs dont les eaux souterraines sont riches en perchlorates, pourrait donc indiquer des apports d'eau souterraine vers les eaux superficielles.

Capacités de transfert des éléments dans la zone hyporhéique

L'idée est ici de rechercher des substances phytosanitaires et leurs métabolites potentiellement présents, analysés et détectés dans les ESO et ESU avec des capacités de transfert différentes dans la zone hyporhéique.

Nous proposons de nous intéresser au métolachlore, et ses métabolites le métolachlore ESA (MESA) et le métolachlore OXA (MOXA), l'objectif est de comparer la valeur du ratio OXA / ESA pour les eaux souterraines et les eaux superficielles ; ceci à condition que le nombre de points d'eau disposant d'analyses synchrones soit suffisant.

Si les études expérimentales (en laboratoire) montrent que MESA et MOXA traversent potentiellement très rapidement et avec une faible rétention la zone non saturée (Sidoli et al., 2016). Les analyses réalisées dans des aquifères fluviaux et fluvio-glaciaires en France montrent de plus fortes concentrations pour le MESA (Baran et Saplairoles, 2012 ; Baran et Gourcy, 2013, Baran et Gourcy, 2017).

4.3.5. Liste des paramètres retenus, à extraire des bases de données qualité des eaux souterraines (ADES) et des eaux superficielles (Naiades).

Les 26 paramètres à extraire des bases ADES et Naiades sont listés dans le Tableau 8 avec leur code Sandre correspondant. Ils sont classés par catégories, ces catégories serviront par la suite du traitement des données.

4.4. DONNEES UTILISEES, MISE EN FORME ET TRAITEMENT DES DONNEES

Nota bene : Les extractions décrites dans les chapitre 4.4.1 et 4.4.2 ont été réalisées en début de projet, sur la base d'une 1^{ère} liste de 37 paramètres. Cette liste contient les 26 paramètres qui ont été identifiés par la suite comme potentiellement utiles pour caractériser les échanges ESO/ESU et qui sont traités dans la suite du chapitre.

4.4.1. Description des données ESO extraites de la base ADES

La première démarche a été de sélectionner les points d'eau souterraine (ESO) localisés sur le secteur d'étude qui correspondent aux formations aquifères, aux masses d'eau retenues lors de l'approche géomatique et géostatistique. Les points d'eau souterraine retenus correspondent à des puits, des forages, des piézomètres ; ils sont au nombre de 9 881. Chaque point d'eau (PE) est donc rattaché à une MESO 2019 et à une unité fonctionnelle (UF) définie dans l'approche géomatique.

Puis, dans un second temps, les données qualité correspondant à la liste des paramètres retenus précédemment ont été extraites de la base de données ADES. La période de référence choisie est de 1969 à 2018.

Le nombre de points d'eau disposant d'analyses chimiques correspondants à la liste se réduit fortement, on ne dispose plus que de 1 158 PE, avec un nombre total de 360 769 analyses. L'ensemble des paramètres ciblés ont été extraits de la base de données ADES.

Tous les points d'eau ne disposent ni du même nombre de paramètres analysés, ni du même nombre d'analyses par paramètre. L'illustration 73 permet de localiser ces PE avec pour chacun de nombre de paramètres disponibles (avec à minima une analyse par paramètre).

Le nombre de paramètres disponibles par point d'eau varie ; chaque PE dispose en moyenne de 23 paramètres ; avec un minimum d'1 paramètre et un maximum de 37 paramètres par PE.

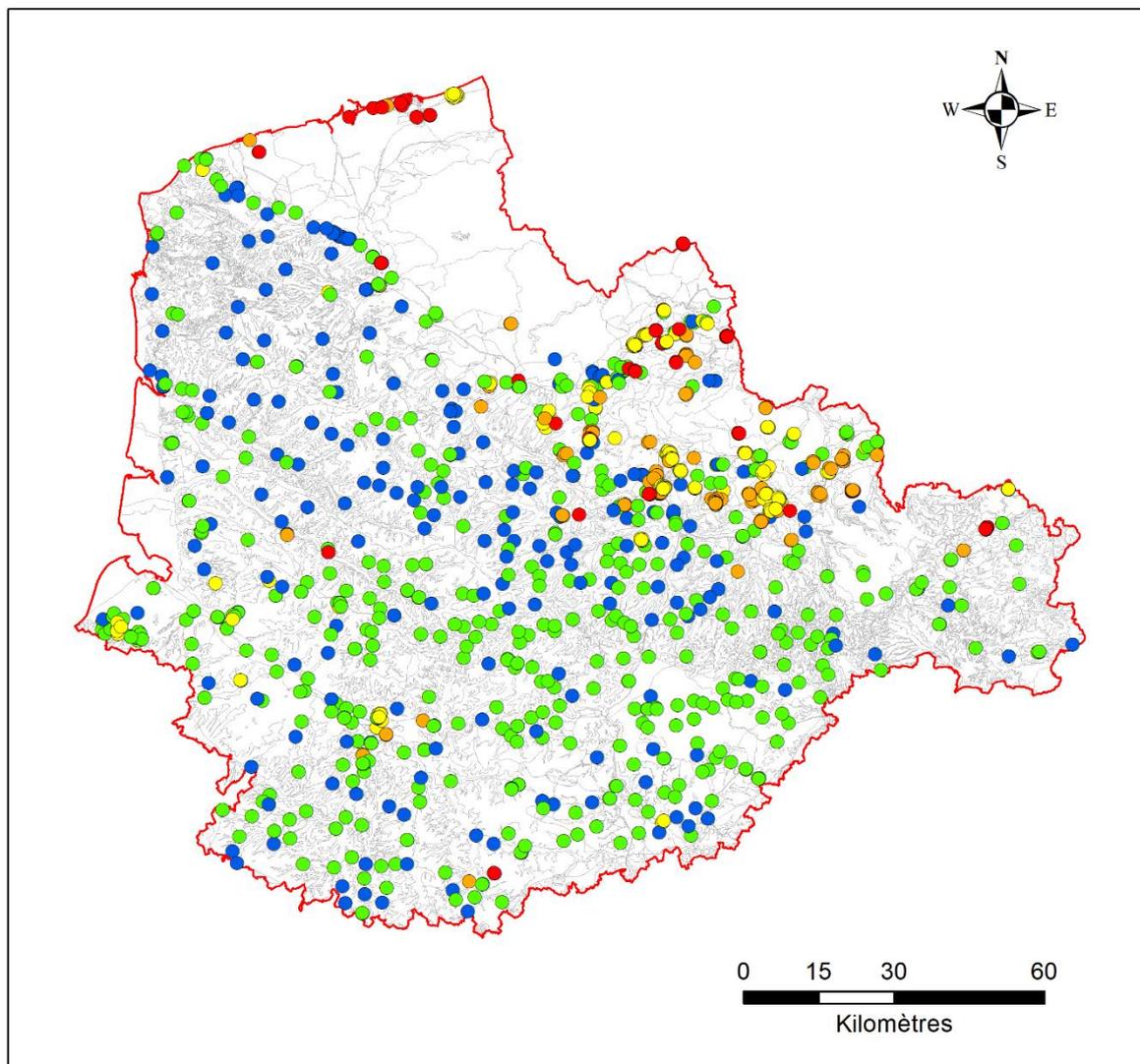
Le nombre d'analyses par paramètre et par point d'eau varie aussi fortement, avec une moyenne de 13,5 analyses par paramètre, un minimum d'une seule analyse et un maximum de 198 analyses par paramètre.

Un forage dédié à l'AEP, 00167X0003/F1 (BSS000BPVF), est très intensément suivi, avec 198 analyses pour l'atrazine (1107) et la simazine (1263), puis 195 analyses pour l'atrazine desethyl (1108) et l'atrazine deisopropyl (1109), 194 analyses pour le métolachlore total (1221). Ce point d'eau destiné à l'alimentation en eau potable est à considérer pour la suite comme un artefact, son suivi très intense étant dû à une problématique qualité particulière.

En dehors de quelques forages dont l'usage est dédié à l'alimentation en eau potable, les paramètres comme le pH, la température de l'eau, les concentrations en nitrate, ammonium, sulfates et chlorures sont bien représentés.

Par contre, 2 177 points d'eau ne disposent que d'une seule analyse pour les 37 paramètres dont les codes sandre sont les suivants : 1107, 1108, 1109, 1221, 1263, 1278, 1301, 1302, 1303, 1311, 1312, 1327, 1330, 1335, 1337, 1338, 1339, 1340, 1367, 1369, 1372, 1374, 1375, 1383, 1386, 1387, 1388, 1389, 1391, 1392, 1393, 1670, 2974, 6219, 6853, 6854, 7073).

Ces premiers éléments sur la distribution des données qualité pour les points d'eau souterraine indiquent donc une variabilité spatiale du nombre de paramètres suivis et connus, ainsi que du nombre d'analyses disponibles par paramètre par point d'eau.



ESO - Nombre de paramètres par PE

●	1 - 5 (84)
●	6 - 10 (145)
●	11 - 20 (192)
●	21 - 30 (496)
●	31 - 37 (241)
□	Zone Etude
□	Unités Fonctionnelles AP (3 932)

Illustration 73 – Localisation des points d'eau souterraine sur le secteur d'étude, disposant d'analyses chimiques pour les paramètres retenus et nombre de paramètres disponibles par PE ESO.

Nous disposons donc pour cette étude de :

- 1 158 points d'eau souterraine (ESO) avec des analyses qualité ;
- pour une période de référence : 1969 à 2018 ;
- 360 769 lignes d'analyses ;
- 26 paramètres chimiques avec des analyses ;
- un nombre moyen de 23 paramètres par PE ESO ;
- un nombre moyen de 13,5 analyses par paramètre par PE ESO.

4.4.2. Description des données ESU extraites de la base NAIADES

Nota bene : L'extraction décrite dans ce chapitre a été réalisée sur la base d'une 1^{ère} liste de 37 paramètres, incluant les 26 paramètres identifiés comme potentiellement utiles pour caractériser les échanges ESO/ESU.

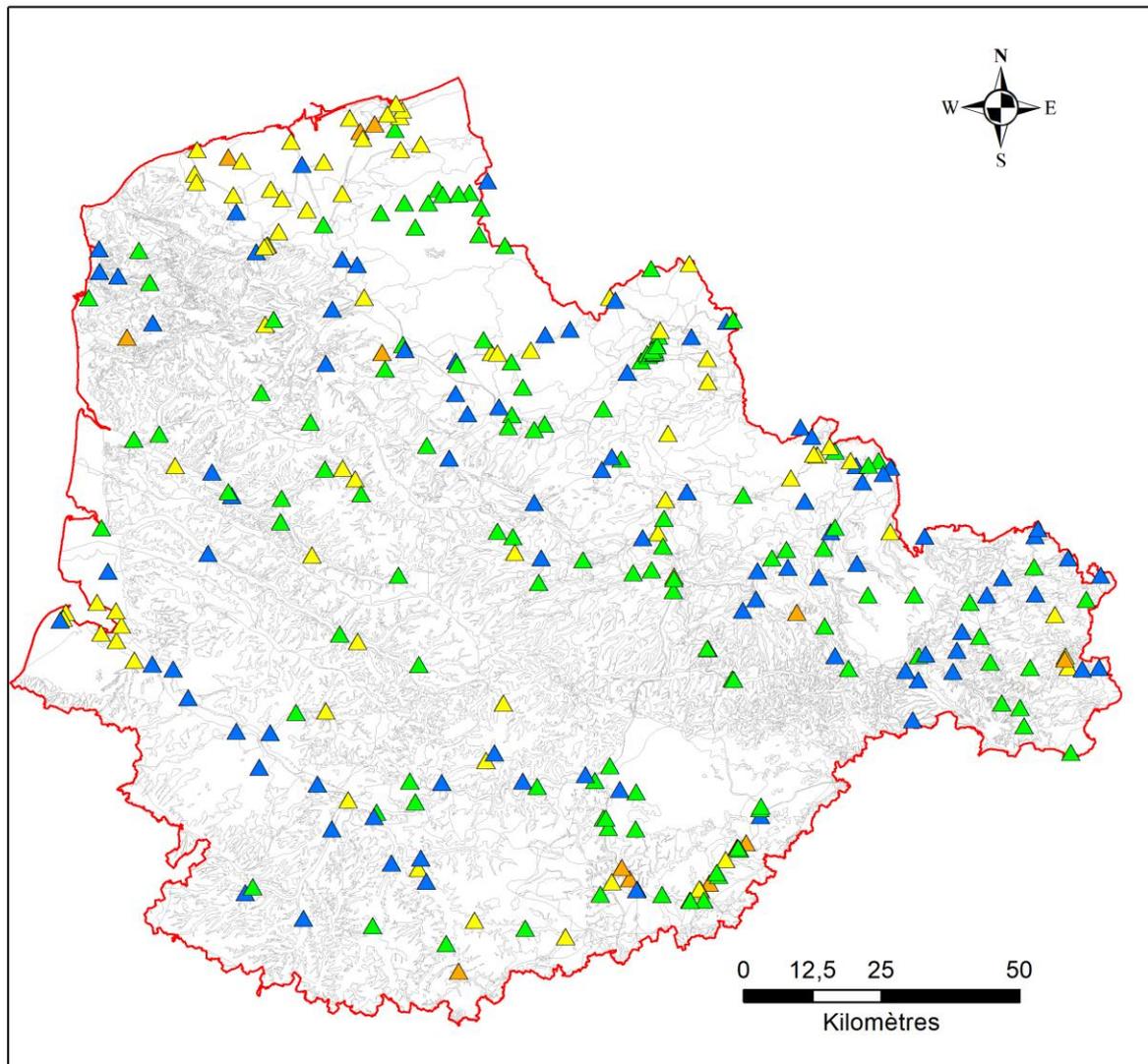
Les données ont été extraites de la base Naïades et des données complémentaires pour l'année 2018 (pas encore bancarisées dans Naïades) ont été fournies par l'Agence de l'Eau Artois Picardie. Les données ont été compilées dans une base de données propres.

Nous disposons donc pour cette étude de :

- 659 points d'eau superficielle (ESU) avec des analyses qualité ; qui se réduisent à 296 une fois les doublons supprimés et chaque PE affectés à une unité fonctionnelle du secteur d'étude ;
- pour une période de référence : 1960 à 2018 ;
- 843 214 lignes d'analyses ;
- 26 paramètres chimiques avec des analyses ;
- un nombre moyen de 23 paramètres par stations ESU (min :1 : max : 37) ;
- un nombre moyen de 23 analyses par paramètre par stations ESU (min : 1 ; max : 391).

Les points d'eau ESU couvrent l'ensemble de la zone d'étude, leur distribution spatiale est plus lâche que celle des points d'eau ESO (Illustration 74).

Notons que sur la partie nord du bassin, sables du Landénien des Flandres, il existe un grand nombre de point de suivi des cours d'eau et quelques points de suivi des eaux souterraines, tous en bordure de mer. Sur ce secteur l'analyse ne pourra être réalisée du fait d'un trop faible nombre de couple de points d'eau ESO-ESU.



ESU - Nombre de paramètres par PE

▲	1 - 5 (1)
▲	6 - 10 (14)
▲	11 - 20 (71)
▲	21 - 30 (120)
▲	31 - 37 (90)
□	Zone Etude
□	Unités Fonctionnelles AP

Illustration 74 – Localisation des points d'eau superficielle sur le secteur d'étude, disposant d'analyses chimiques pour les paramètres retenus et nombre de paramètres disponibles par point d'eau.

4.4.3. Mise en forme et traitement des données

L'ensemble des données qualité ESO et ESU, avec les caractéristiques des points d'eau, ont été compilées dans une base de données propres et le travail SIG a été réalisé sous ArcGIS.

Puis, pour chaque point d'eau ESO et ESU, l'ensemble des données d'une ligne d'analyse ont été prises en compte : code fraction, libellé de la fraction, code unité, code remarque analyses, commentaire remarque, les valeurs de limites de détection, les valeurs de limites de quantification, les méthodes d'analyses et ceci afin de sélectionner les analyses pertinentes pour chaque élément, d'éliminer également des artefacts, des valeurs aberrantes, des erreurs d'unité.

Une fois les analyses pertinentes sélectionnées pour chaque paramètre, un traitement statistique rapide est effectué, avec détermination par point d'eau de :

- code Sandre du paramètre,
- dates minimale et maximale des analyses, afin d'avoir une idée de la période couverte ;
- le nombre d'analyses par point d'eau ;
- le résultat minimal,
- le résultat moyen ;
- le résultat maximal
- l'écart-type pour les résultats ;
- la limite de détection (LD) : valeurs minimale et maximale ;
- la limite de quantification (LQ) : valeurs minimale et maximale.

Les valeurs moyennes pour chaque paramètre par point d'eau serviront de base au travail de cartographie. Les analyses thématiques qui seront réalisées prendront également en compte les valeurs maximales des LQ et LD.

En effet, certaines valeurs de LQ ou LD peuvent être parfois relativement élevées, en fonction notamment de la date d'analyse, de la méthode d'analyse, du producteur de la donnée. Les valeurs de résultats d'analyses anciens peuvent être en effet nettement supérieures aux résultats plus récents, d'un facteur 10, voire 100.

4.4.4. Prises en compte des valeurs seuil ESO et ESU

Pour les eaux souterraines, les valeurs seuils des eaux souterraines ont été principalement établies en considérant les normes pour la consommation d'eau potable et, dans quelques cas, les normes de qualité environnementale qui proviennent principalement des eaux de surface réceptrices (Scheidleder, 2012 ; arrêté du 23 juin 2016 pour les valeurs seuils et du 11 janvier 2007 pour les normes AEP).

Pour les eaux superficielles, nous prendrons comme référence les valeurs moyennes annuelles des normes de qualité environnementale (NQE) et limites du bon état pour les composés azotés.

Pour le perchlorate les valeurs utilisées correspondent aux recommandations de l'ANSES (saisine n° 2011-SA-0208 et n° 2011-SA-0336) pour les eaux destinées à la consommation humaine (adultes).

Une synthèse est proposée sous forme de tableau récapitulatif des normes appliquées pour les eaux souterraines et superficielles pour les éléments retenus dans le cadre de notre étude (Tableau 10). Ces valeurs seront utilisées notamment dans le travail de cartographie des résultats pour les ESO et les ESU, particulièrement pour déterminer les bornes des analyses thématiques par élément.

Paramètre	Norme de potabilité ou VS	Norme de Qualité Environnementale Moyenne annuelle
	Unité par défaut : µg/L	Unité par défaut : µg/L
Température de l'eau	25°C	nd
pH : potentiel en Hydrogène	6,5 ≤ pH ≤ 9	Bon état : 6 ≤ pH ≤ 9
Conductivité à 25°C	≥ 200 et ≤ 1100 µS	≥ 200 et ≤ 1100 µS/cm
Hydrogénocarbonates	nd	nd
Potassium	12 (mg/L)	nd
Magnésium	50 (mg/L)	nd
Calcium	100 (mg/L)	nd
Sodium	200 (mg/L)	nd
Chlorure	250 (mg/L)	nd
Sulfate	250 (mg/L)	nd
Nitrate	50 (mg/L)	50 (mg/L)
Nitrite	0,5 (mg/L) et 0,3 (mg/L) pour la VS	0,3 (mg/L)
Ammonium	0,1 (mg/L) ; 0,5 (mg/L) si origine naturelle	0,5 (mg/L)
Arsenic	10	4,2
Chrome	50	3,4
Nickel	20	nd
Fluorure	1,5 (mg/L)	nd
Perchlorate	15	15
Atrazine	0,1	nd
Atrazine desethyl	0,1	nd
Atrazine deisopropyl	0,1	nd
Simazine	0,1	nd
Métolachlore total	0,1	nd
S-métolachlore	0,1	nd
Métolachlore OXA	0,1	nd
Métolachlore ESO	0,1	nd

Tableau 10 – Valeurs de références qualité pour les eaux souterraines et superficielles prises en compte dans cette étude.

4.5. RESULTATS DES DONNEES AUX POINTS D'EAU

4.5.1. Paramètres physico-chimiques *in situ*

Les paramètres physico-chimiques *in situ* présentés dans cette partie sont ceux pour lesquels le jeu de données a été jugé satisfaisant, et pour lesquels un intérêt vis-à-vis de cette étude a été mis en avant, à savoir :

- La température de l'eau.
- Le pH ;
- La conductivité électrique à 25°C.

1301 - Température de l'eau

Pour les ESO, les valeurs de température moyenne pour les points d'eau disposant de plus de 2 mesures varient de 8,6 à 21,5°C, avec une valeur moyenne de 11,1°C. La grande majorité (73%) des points d'eau ESO ont une température moyenne comprise entre 10 et 12°C ; ceci est conforme à la température attendue pour une eau souterraine au nord de la France.

Les 22 points d'eau ESO présentant une température basse (< 9°C) se situent dans le quart est de la zone d'étude, leurs valeurs faibles peuvent être en partie dues à des artefacts de mesures, les dates des mesures physico-chimiques *in situ* correspondant en grande partie à la période hivernale (octobre à mars). Ces faibles valeurs peuvent aussi être liées au fait que les aquifères considérés sont de faible extension et en lien fort avec les eaux de surface.

Pour les ESU, les valeurs de température moyenne varient de 4,7 à 22,8°C, avec une valeur moyenne de 12,2°C. La gamme de variation est, comme attendu, plus large du fait des variations climatiques annuelles. Les températures moyennes élevées par point d'eau correspondent à des moyennes faites sur un nombre restreint de données acquises principalement en été ; il en est de même pour les températures les plus faibles, qui par contre elles ont été acquises en hiver.

Globalement, à l'échelle de la zone d'étude, on note cependant une bonne correspondance entre les températures moyennes des ESU et des ESO (Illustration 75).

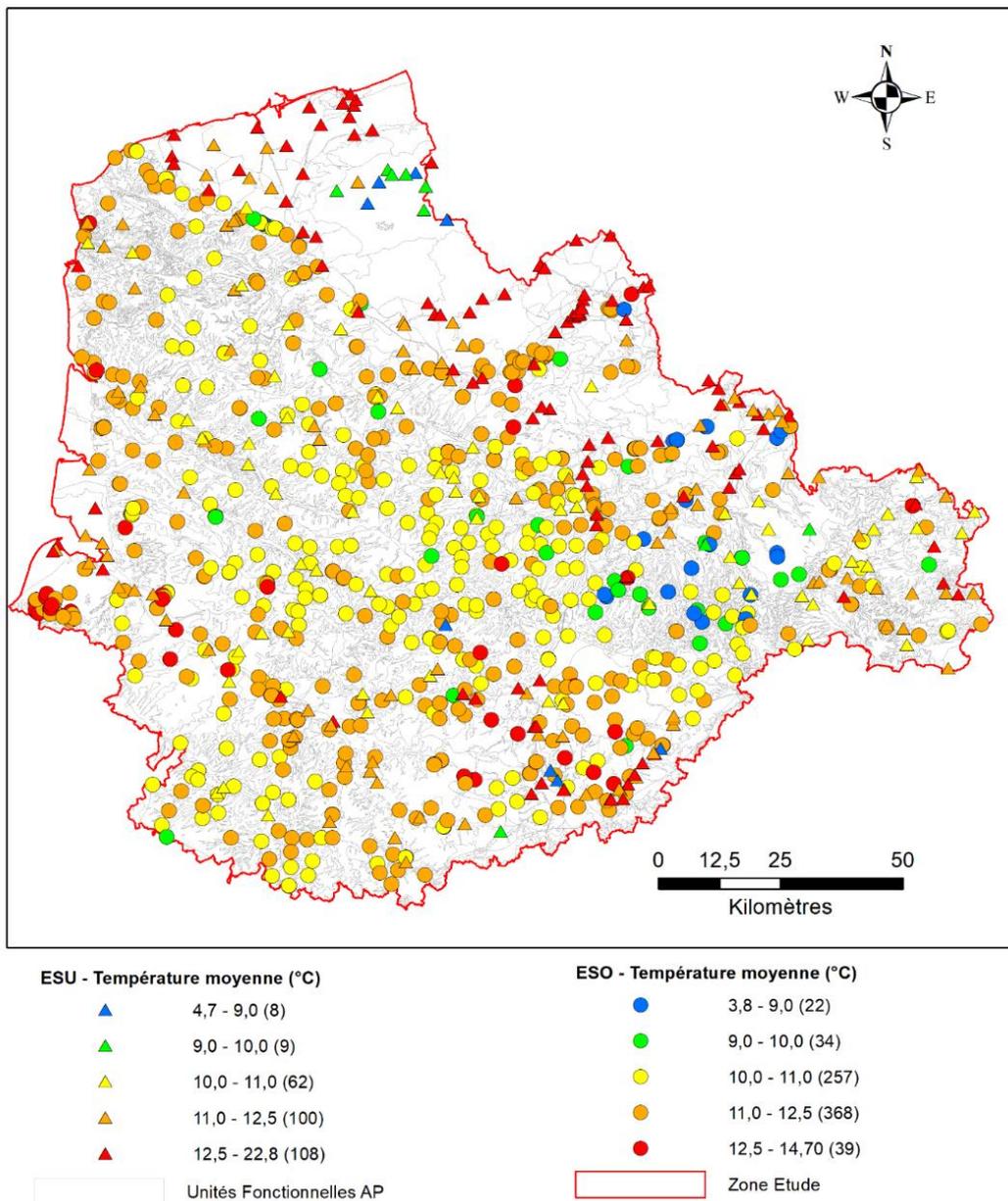


Illustration 75 – Répartition des valeurs moyennes de température (°C) pour les points d'eau souterraine (ESO) et les points d'eau superficielle (ESU) du secteur d'étude.

Pour ce paramètre et à cette échelle de travail il ne semble pas possible de pouvoir détecter des arrivées d'eau de surface dans les eaux souterraines. L'inverse semble au contraire pertinent et pour cela l'analyse de l'amplitude des variations des eaux de surface a été réalisée pour deux cycles complets, 2016 et 2017. L'année 2018 n'a pas été sélectionnée du fait qu'elle concernait un plus petit nombre de stations que les autres données issues de Naïades.

La fréquence des mesures de température varie d'une station à l'autre, de bimensuelle à trimestrielle ou moins. Les mesures mensuelles et bimensuelles permettent une bonne estimation de l'amplitude annuelle de la température. A une fréquence moindre, il est fort probable que la valeur min. ou/et max. de température ne soit pas enregistrée. Les points d'eau ayant un minimum d'une année de suivi et 10 données ont été sélectionnés.

Les biais de cette analyse sont - une comparaison de l'amplitude pour des dates/nombre de mesure non identiques pour toutes les stations et surtout la non prise en compte des débits des rivières. En effet, une rivière de faible débit enregistrera l'influence de la température de l'air de manière plus forte qu'une rivière à fort débits.

Ainsi on dispose de données sur 289 stations de mesure correspondant aux critères indiqués ci-dessus. La répartition des amplitudes de température est indiquée sur l'illustration 76.

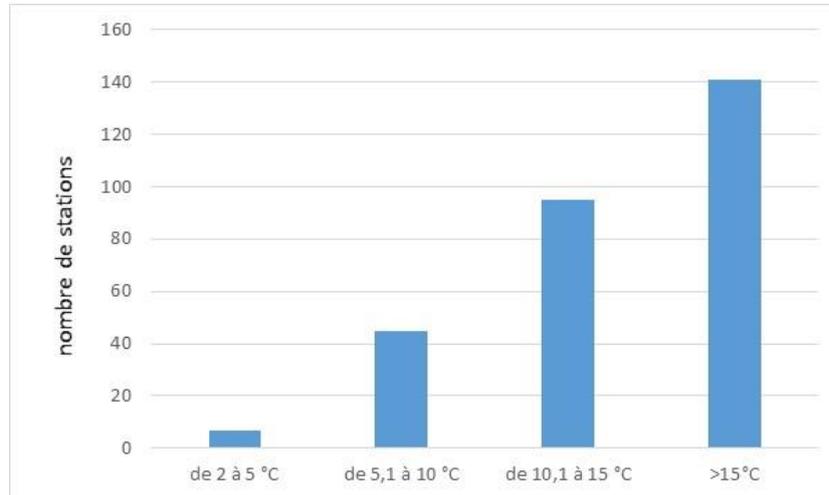


Illustration 76 – Analyse de l'amplitude des variations de température par stations de mesure des eaux de surface

Pour les 52 stations avec une amplitude de températures inférieure à 10°C la température minimale est supérieure à 5°C, indicateur également de possibles apports d'eau souterraine en hiver. L'amplitude est supérieure à 15°C pour les stations ayant des températures minimales inférieures à 2,2°C. On note en effet une bonne corrélation entre ces deux paramètres (Illustration 77). Pour les 5 points à température élevée et amplitude de température supérieure à 5° on peut supposer, soit que la date de la mesure ne correspondait pas à la période de température minimum au point soit que la part d'eau souterraine en basse eau est très importante. Pour ces points d'eau, une analyse des données brutes et des enregistrements de 2018 confirme des températures minimales relativement élevées même si inférieures à celles enregistrées en 2016-2017.

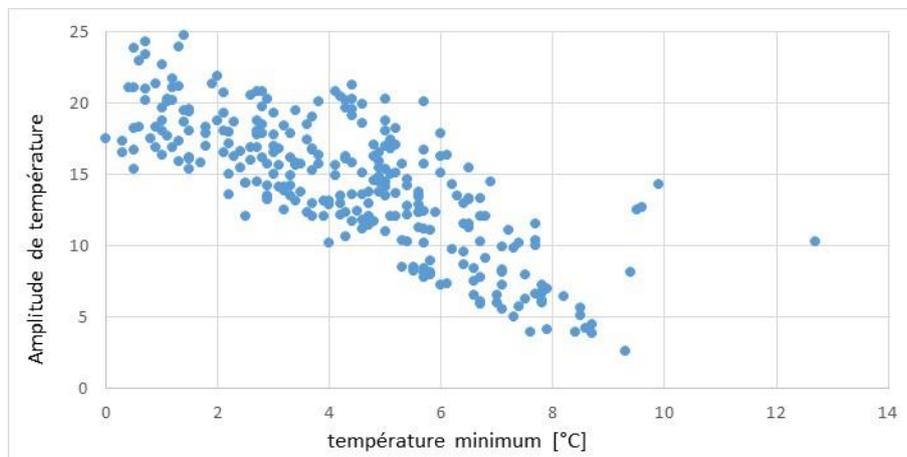


Illustration 77 – Corrélation entre l'amplitude de température et la température minimale enregistrées sur les stations de suivi des eaux de surface

Différentes classes ont été établies en prenant en compte ces deux paramètres (Tableau 11).

Temp. min	Amplitude des températures			
	<10°C	≥10 et <14°C	≥14 et <18°C	≥18°C
<2°C	so	so	F	F
≥2 et <4°C	so	D	E	F
≥4 et <6°C	B	C	D	E
≥6 et <8°C	A	B	C	so
>8°C	A	A	B	so

Tableau 11 – Classes établies pour l'analyse des points d'eau de surface pour le paramètre température

Les points d'eau de surface de la classe A ont de fortes chances d'être influencés par des apports souterrains importants. Les points d'eau de la classe B sont probablement également influencés également par des eaux souterraines une partie de l'année. Les points d'eau des classes C et D pourraient être influencés par des arrivées d'eau souterraines uniquement une partie de l'année et de manière peu importante. Les points des classes E et F seraient non ou faiblement influencés (Illustration 78).

On peut noter les grandes tendances suivantes – **faibles interactions** dans les secteurs de la plaine maritime, vallée de la Lys aval, l'Avesnois Thiérache, la Somme canalisée aval et la rivière Somme, **interactions moyennes** ou d'importance saisonnière dans le secteur de Lille (Mélantois), l'Escaut, le Boulonnais et les plus **fortes interactions** pour les secteurs de la craie du Séno-Turonien, fleuves Canche, Authie, Somme moyenne et affluents de la Somme.

Et plus en détail :

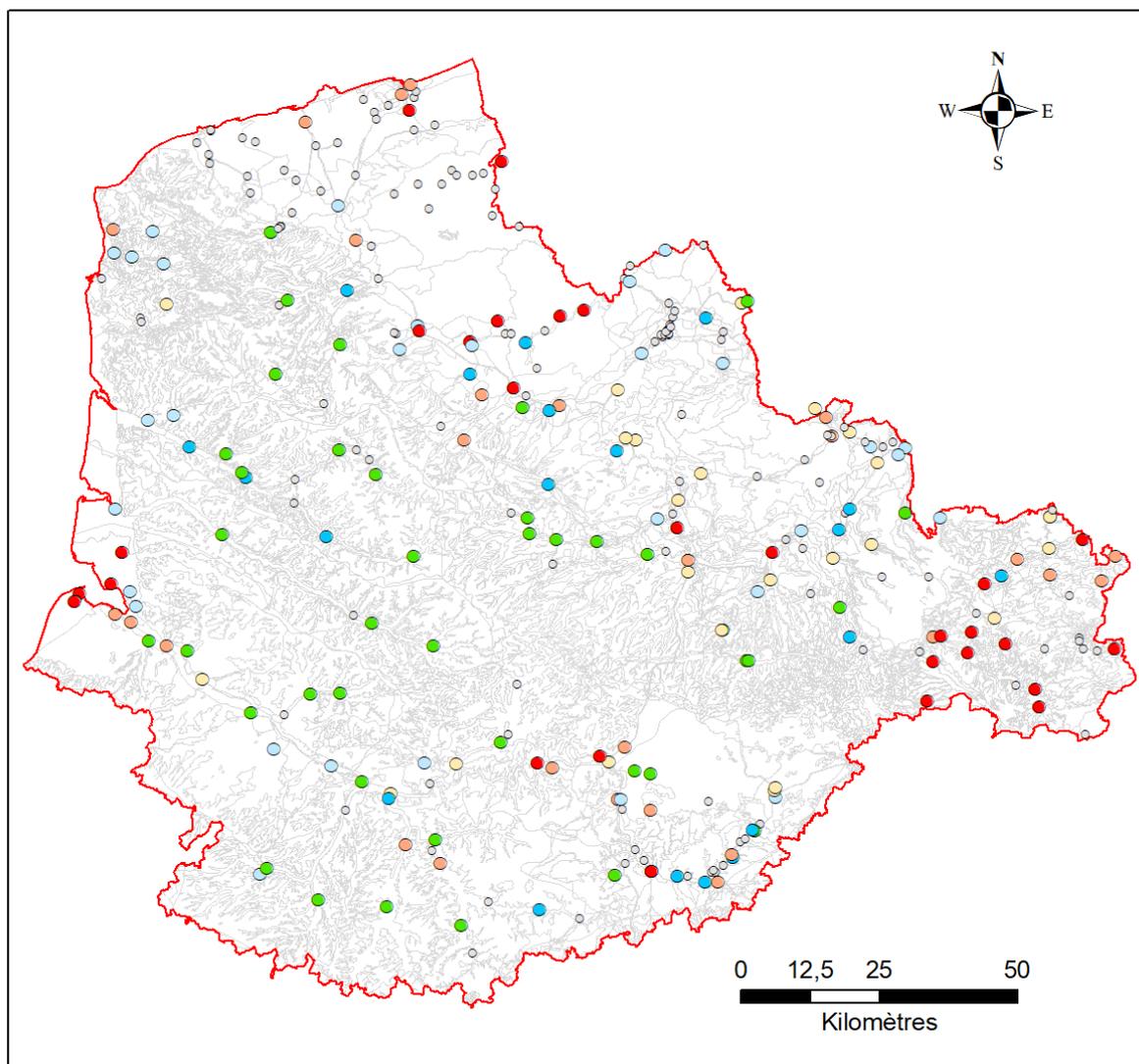
- Secteurs/cours d'eau montrant un soutien par les eaux souterraines important et régulier : la Somme canalisée moyenne en amont d'Amiens, les affluents RD (Scardon, Nièvre, Cologne) et RG (Trie, Selle, Noye amont) de la Somme, l'Authie, la Canche et ses affluents (Course, Planquette, Ternoise amont), le Hem, fleuve Escaut secteur Cambrai, l'Aunelle, torrent d'Esnes, Surgeon, rivière Scarpe ;
- Secteurs/cours d'eau pouvant montrer, peut être uniquement saisonnièrement un apport des eaux souterraines : Somme d'Abbeville à amont d'Amiens, Ternoise aval, l'Avre, l'Hallue, Liane, Wimereux, Loisme, Escaut canalisé en amont de Valenciennes, la Rhonelle, l'Ecaillon, Deûle, Marque, Selle/Escaut, Scarpe canalisée amont ;
- Secteurs où les échanges nappes-rivières sont faibles ou temporaires : Somme canalisée en aval d'Abbeville et la rivière Somme (amont), canal de la Maye, Maye rivière, Omignon (affluent rivière Somme), la Slack, secteur plaine Maritime (Aa canalisée, canal de Mardyck, canal de Bergues), Yser, Lys canalisée, le Besque, Escaut canalisé aval de Fresnes-sur-Escaut, bassin de la Sambre (Helle mineure et majeure, rivière Sambre, Rivierette), Scarpe canalisée aval, canal de la Sensée, Lawe, Clarence, canal d'Aire.

L'utilisation du paramètre amplitude de la variation de température se base sur le fait que la température des aquifères en relation possible avec les rivières varie peu sur l'année. Ceci peut s'avérer faux sur certains secteurs, et notamment lorsque l'aquifère considéré est de faible extension et en lien étroit avec le cours d'eau et donc que la variation saisonnière de la température de l'eau souterraine est également forte. Pour l'ensemble des points d'eau souterraine près de 50% ont une variation interannuelle de température de moins de 30%.

Les points à température fortement variable se retrouvent sur l'ensemble du bassin Artois-Picardie montrant qu'il serait important, pour un travail à l'échelle locale, de systématiquement

vérifier cette information avant d'interpréter la variabilité de la température des cours d'eau. Ce travail n'a pas pu être réalisé ici du fait de l'échelle de travail et le caractère exploratoire de l'analyse des données hydrochimiques.

Sur le secteur de la plaine maritime, les deux seuls points d'eau avec plus de deux données de mesure de la température (00035X0197/PZ1, 00035X0247/PZ2) sont situés dans le port de Gravelines très proche du littoral (réseau de suivi des installations classées) et pourraient être fortement influencés par l'intrusion marine.



ESU - Classes de température (Temp min vs Amplitude)

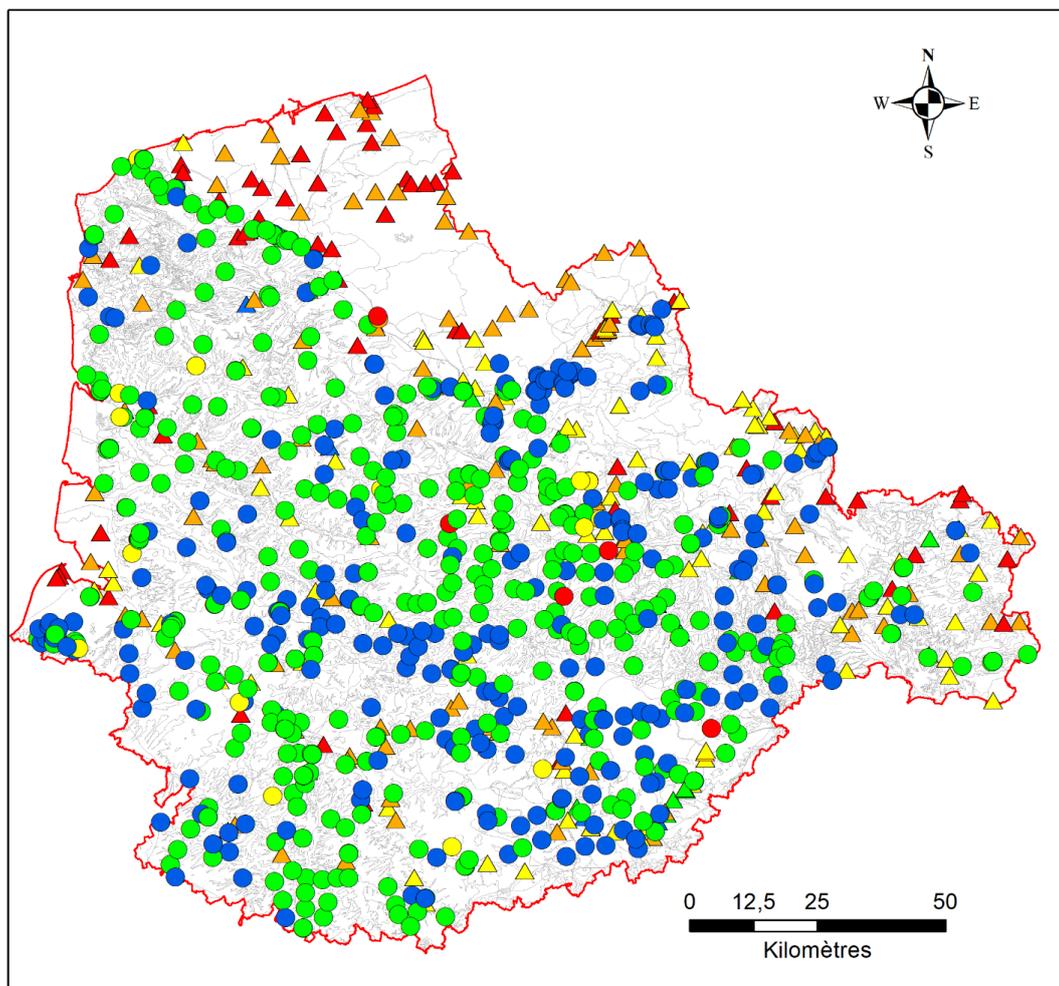
classe

- A (40)
- B (20)
- C (30)
- D (25)
- E (27)
- F (29)
- non calculé (138)
- Limite_bassin_AP (1)
- Unités Fonctionnelles AP

Illustration 78 – Carte des classes déterminées à partir des données de températures des points d’eaux de surface 2016-2017

1302 - pH : potentiel en Hydrogène

Le pH moyen des eaux souterraines est compris entre 6,6 et 9,1. Pour la majorité des eaux souterraines, le pH est inférieur à 7,5. Le pH moyen de la quasi-totalité des eaux souterraines est donc conforme aux normes de potabilité (Tableau 10). Certains points d'eau ESO ont un pH supérieur à 8 qui est un pH élevé non représentatif d'une eau souterraine ; ceci peut être un marqueur de contamination du point d'eau ou d'une erreur de mesure.



ESO_pH		ESU_pH		
●	6,6 - 7,2 (284)	▲	6,9 - 7,2 (5)	 Zone Etude
●	7,2 - 7,5 (422)	▲	7,2 - 7,5 (11)	 Unités Fonctionnelles AP
●	7,5 - 7,8 (18)	▲	7,5 - 7,8 (91)	
●	7,8 - 8,0 (2)	▲	7,8 - 8,0 (111)	
●	8,0 - 9,1 (6)	▲	8,0 - 8,7 (67)	

Illustration 79 – Répartition des valeurs moyennes de pH pour les points d'eau souterraine (ESO) et les points d'eau superficielle (ESU) du secteur d'étude.

Le pH moyen des eaux superficielles est compris entre 6,9 et 8,7 ; la majorité des valeurs sont comprises dans l'intervalle 7,5 à 8,7 ; ceci est conforme au pH attendu pour une eau superficielle. Les pH proches de 7 peuvent être un signe d'un apport d'eau souterraine ; le nombre de points d'eau ESU concernés est très faible, 5. Ils sont répartis dans deux secteurs distincts, localisés sur Illustration 80.

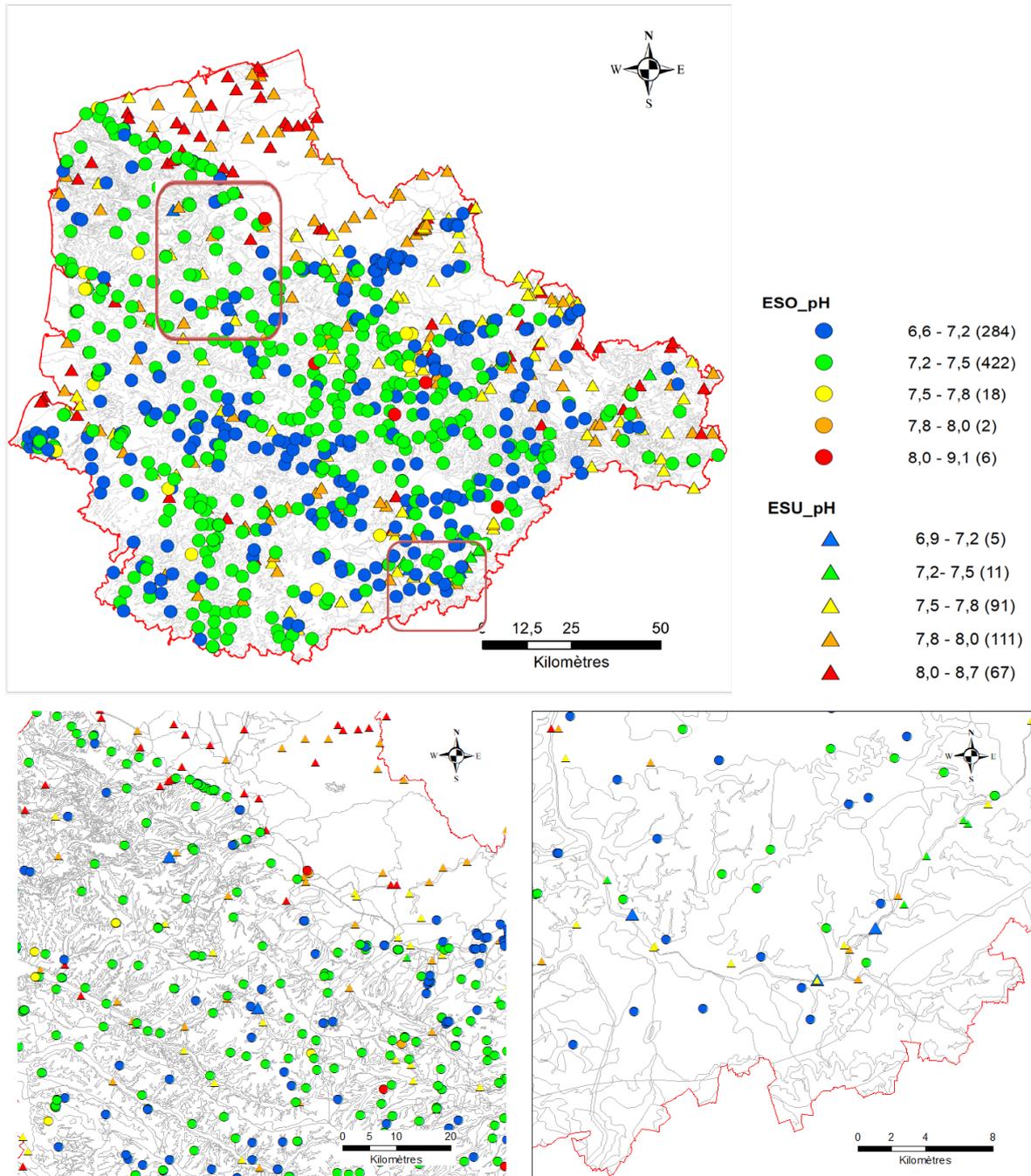
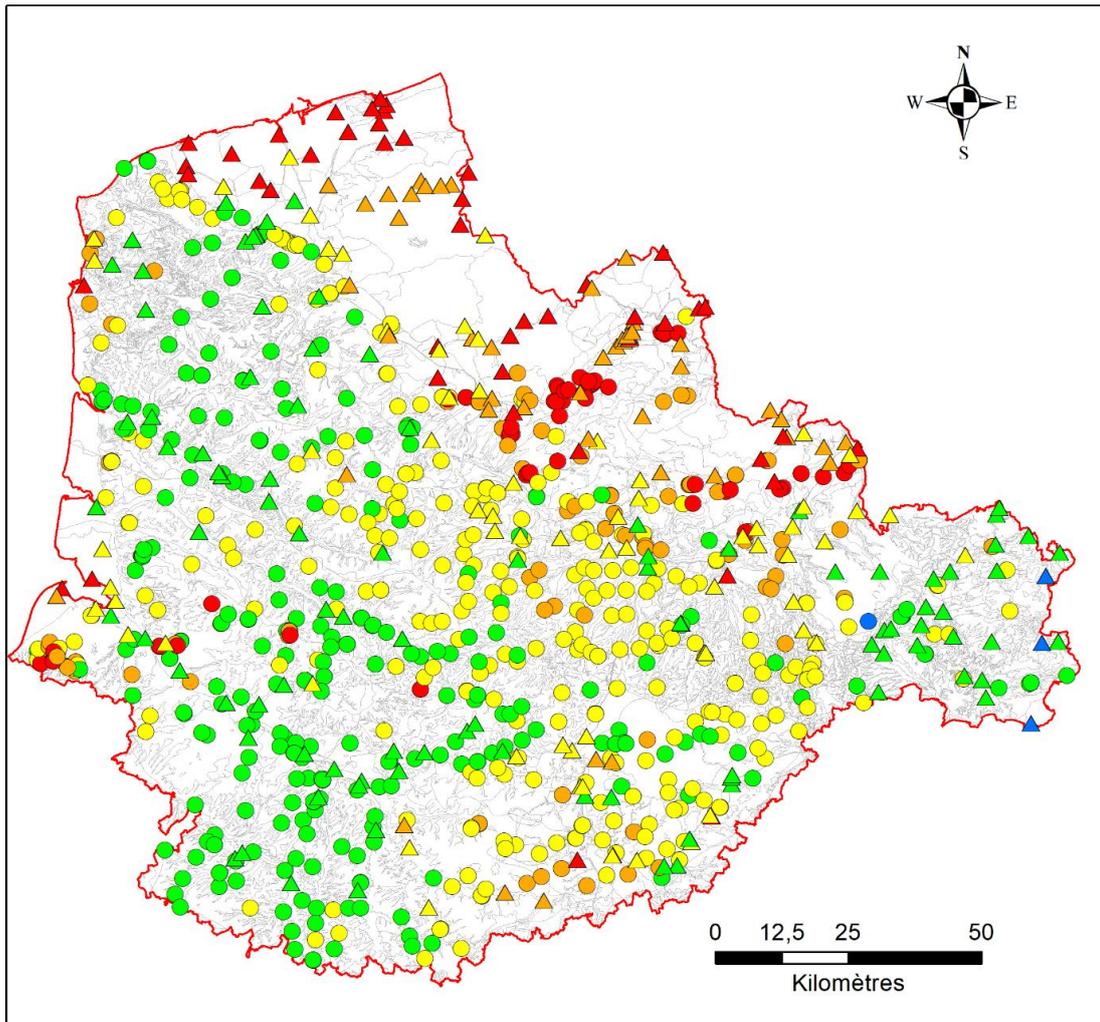


Illustration 80 – Répartition des valeurs moyennes de pH pour les points d'eau souterraine (ESO) et les points d'eau superficielle (ESU) du secteur d'étude ; zoom sur deux secteurs d'intérêt potentiel.

Toutefois, le pH d'une eau varie de manière relativement rapide du fait d'un rééquilibrage avec la pression de CO₂. Seuls les points d'eau de surface localisés très près des apports d'eau souterraine et avec une dynamique rapide pourraient être utilisés comme indicateur des échanges. De plus un pH similaire indique des lithologies de roches ou de sols drainés similaires sans que des échanges entre les différents types de masses d'eau soient impliqués. Le paramètre pH ne semble pas utilisable à cette échelle de travail.

1303 - Conductivité électrique

Les valeurs de conductivité électrique à 25°C des ESO varient entre 381 et 3035 $\mu\text{S}/\text{cm}$, avec une valeur moyenne de 731 $\mu\text{S}/\text{cm}$. La majorité des eaux souterraines ont une conductivité électrique entre 400 et 800 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Seuls 57 points d'eau ont une valeur moyenne de conductivité supérieure à 1 000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, ils sont répartis sur 3 secteurs distincts, la vallée de la Deûle et secteur des vallées de la Somme et de l'Authie ; mais aussi dans le secteur de Le Vimeu. Notons que certaines conductivités sont données pour 20°C dans la base ADES. Seules les valeurs correspondant à une référence à 25°C sont utilisées ici.



ESU - Conductivité moyenne ($\mu\text{S}/\text{cm}$)		ESO - Conductivité moyenne ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	
▲	200 - 400 (3)	●	381 - 400 (1)
▲	400 - 650 (96)	●	400 - 650 (265)
▲	650 - 800 (67)	●	650 - 800 (306)
▲	800 - 1000 (50)	●	800 - 1000 (96)
▲	1000 - 5318 (46)	●	1000 - 3035 (57)
	Zone Etude		Unités Fonctionnelles AP

Illustration 81 – Répartition des valeurs moyennes de conductivité électrique ($\mu\text{S}/\text{cm}$) pour les points d'eau souterraine (ESO) et les points d'eau superficielle (ESU) du secteur d'étude.

Ces valeurs élevées en conductivité électrique relevées dans les eaux souterraines peuvent être d'origine naturelle, mais aussi être le signe de contamination des ESO par une ou des pollutions anthropiques, comme par exemple des excès en nitrate ou autres polluants.

Pour les eaux superficielles, les valeurs moyennes de conductivité sont comprises entre 200 et 5 318 $\mu\text{S}/\text{cm}$, avec une valeur moyenne de 875 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Plusieurs secteurs se distinguent avec des valeurs supérieures à 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$; ceci est le cas par exemple :

- des points d'ESU sur les Sables pissards au nord ;
- des points d'eau à l'est, sur les argiles de Flandre et de Roubaix et les Sables du Thanétien ;
- et quelques points d'eau en bordure du littoral, en baie de Somme ; où on peut supposer une influence marine sur la conductivité mesurée.

Nous ne disposons pas de points d'eau ESO dans le secteur au nord des Sables pissards, pour comparer les valeurs ESU aux valeurs ESO.

Globalement, à l'échelle de la zone d'étude, on note une bonne correspondance entre les conductivités électriques moyennes des ESU et des ESO.

Lorsque les conductivités des eaux de surface sont supérieures à celles des eaux souterraines on déduit une contamination locale anthropique des cours d'eau. Cette information n'est pas utilisable pour la détermination des échanges nappes-rivières.

Lorsque la conductivité des eaux de surface est faible au regard des eaux souterraines alors on suppose peu ou pas de décharge des eaux souterraines vers les eaux de surface. Ceci est le cas du secteur extrême est du bassin (frontière du bassin, calcaires de l'Avesnois), le canal de St. Quentin.

Pour les vallées principales de la craie l'étude de la décharge des aquifères vers les cours d'eau doit se faire en analysant l'évolution de la conductivité des cours d'eau d'amont vers l'aval et en le comparant avec la conductivité moyenne des eaux souterraines sur les secteurs considérés. Par exemple, pour l'Authie, on dispose de données sur 4 stations. Les conductivités électriques varient faiblement sur l'année et d'amont vers l'aval, tournant autour de 550-650 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Les conductivités mesurées en eau souterraine sont proches de ces valeurs confirmant la forte contribution des eaux souterraines à l'Authie. Il en est de même pour la Canche. Il faut noter que les conductivités sont élevées pour des eaux de surface dès la station amont, indiquant ainsi sur ce secteur de forts apports d'eau souterraine.

Pour la Somme canalisée, des apports fortement minéralisés s'observent pour les stations Cléry-sur-Somme et Cappy. Si on ne considère que les stations amont à Dury (01124000) et la station aval de Boismont (01001112) on constate un écart d'une centaine de $\mu\text{S}/\text{cm}$ avec systématiquement une plus forte minéralisation pour la station amont quelle que soit la période de prélèvement. Sachant que la conductivité de l'aquifère de la craie vers Boismont est autour de 625 $\mu\text{S}/\text{cm}$ alors que celle à Dury est de 700 $\mu\text{S}/\text{cm}$, la différence de conductivité des eaux souterraines suffit à expliquer la différence de conductivité des eaux de surface. Toutefois, les fortes variations de conductivités observés sur les stations intermédiaires de mesure des eaux de surface complexifient cette analyse. Les échanges nappes-rivière sont variables d'amont vers l'aval.

Sur l'Escaut, on observe une augmentation de la conductivité de l'amont (fleuve Escaut à Crèvecoeur-sur-Escaut) vers l'aval à Mortagne du Nord. L'augmentation est plus forte durant les basses d'eau en août/septembre. La variabilité de la conductivité à Crèvecoeur-sur-Escaut est de 668 à 703 $\mu\text{S}/\text{cm}$ pour l'année 2018 alors que pour cette même année la variabilité en aval à

Mortagne-du-Nord est de 701 à 975 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Ces conductivités élevées s'expliquent par de fortes interactions eau-roche ou une contamination des sols. Les eaux souterraines de la craie du Valenciennois ont des conductivités de 750 à 850 $\mu\text{S}/\text{cm}$ alors que les niveaux supérieurs des sables du Landénien d'Orchies ont des conductivités plus élevées autour de 1200 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (peu de données disponibles dans le secteur de l'Escaut). Les valeurs de conductivités plus élevées à Mortagne-du-Nord pourraient provenir d'apports d'eau souterraine de la masse d'eau des Sables.

Sur la rivière Sensée, on note une faible variation annuelle des conductivités (env. 100 $\mu\text{S}/\text{cm}$). Les conductivités relativement élevées toute l'année dénotent un apport des eaux souterraines.

C'est sur le secteur Calais-Dunkerque que l'on trouve les plus fortes conductivités, jusqu'à 9600 $\mu\text{S}/\text{cm}$ pour le delta de l'Aa en 2018. Ces fortes valeurs indiquent l'influence de l'eau de mer et ne peuvent être interprétées en terme d'échanges nappes-rivières. Pour les autres points d'eau de surface les valeurs de conductivités semblent plus élevées ou proches des conductivités des eaux souterraines des formations des Sables du Landénien des Flandres (de 1000 à 2800 $\mu\text{S}/\text{cm}$). L'importance de l'intrusion saline ou d'embruns rend l'interprétation du paramètre conductivité difficile dans ce secteur.

Sur le bassin de la Sambre on trouve systématiquement les valeurs de conductivités des cours d'eau les plus faibles. Les aquifères des calcaires de l'Avesnois et de la bordure du Hainaut ayant des conductivités autour de 700 $\mu\text{S}/\text{cm}$ il est possible de conclure que sur ce secteur les nappes n'alimentent pas ou très peu les cours d'eau (dont la Sambre, la Solre).

La conductivité est un bon indicateur des apports des eaux souterraines vers les rivières et permet de dessiner de grandes tendances comme le fort soutien des eaux souterraines aux rivières de la partie ouest du bassin (Somme, Authie, Canche), probable soutien de l'Escaut et la Sensée et pas d'apport des nappes à la Sambre.

4.5.2. Éléments majeurs et traces

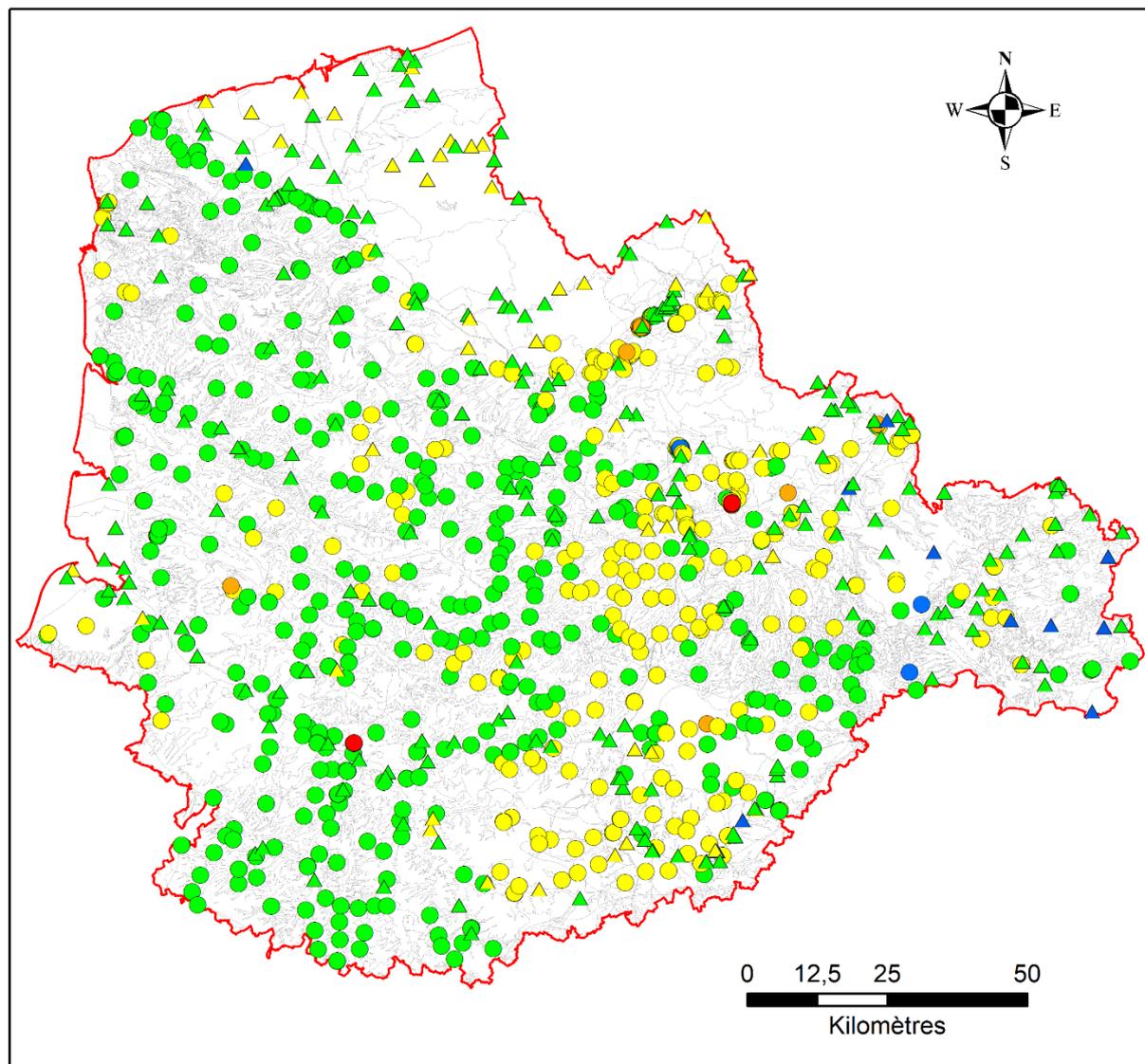
1327 – Hydrogénocarbonates

Pour les eaux souterraines, les concentrations en hydrogénocarbonates varient de 29 à 1 830 mg/L, avec une valeur moyenne de 364 mg/L. La majorité des ESO ont une concentration moyenne en HCO_3 comprise entre 200 et 500 mg/L.

Pour les eaux superficielles, les concentrations en hydrogénocarbonates varient de 81 à 456 mg/L, avec une valeur moyenne de 313 mg/L. La majorité des ESU ont une concentration moyenne en HCO_3 comprise entre 200 et 350 mg/L ; elles sont donc moins minéralisées en HCO_3 que les ESO.

Globalement, à l'échelle de la zone d'étude, on note une bonne correspondance entre les concentrations moyennes en hydrogénocarbonates des ESU et des ESO. Contrairement à l'indicateur conductivité qui englobe des éléments dissous d'origine naturelle et anthropique le HCO_3 est ici majoritairement naturel et donc plus direct d'interprétation. Par contre les équilibres calco-carbonatés évoluent selon la pression de CO_2 et donc entre les eaux souterraines et les eaux de surface, de même la précipitation, dissolution et dilution des carbonates peuvent compliquer l'interprétation.

Dans le secteur de Lille, vers la Deûle ou La Marque, l'Avesnois, le secteur de la Somme rivière en amont de Péronne et le canal de St. Quentin, on note des concentrations en HCO_3 plus faibles pour les ESU que pour les ESO ; du fait d'une influence moindre des eaux souterraines sur les eaux de surface.



ESU - HCO₃ Concentration moyenne (mg/L)

- ▲ 81,1 - 200,0 (LQ max : 1 mg/L) (11)
- ▲ 200,0 - 350,0 (221)
- ▲ 350,0 - 456,0 (43)

ESO - HCO₃ Concentration moyenne (mg/L)

- 29,0 - 200,0 (LQ max : 18 mg/L) (6)
- 200,0 - 350,0 (468)
- 350,0 - 500,0 (285)
- 500,0 - 800,0 (19)
- 800,0 - 1830 (14)

Unités Fonctionnelles AP

Zone Etude

Illustration 82 – Répartition des concentrations moyennes en hydrogénocarbonates (mg/L) pour les points d'eau souterraine (ESO) et les points d'eau superficielle (ESU) du secteur d'étude.

1374 – Calcium

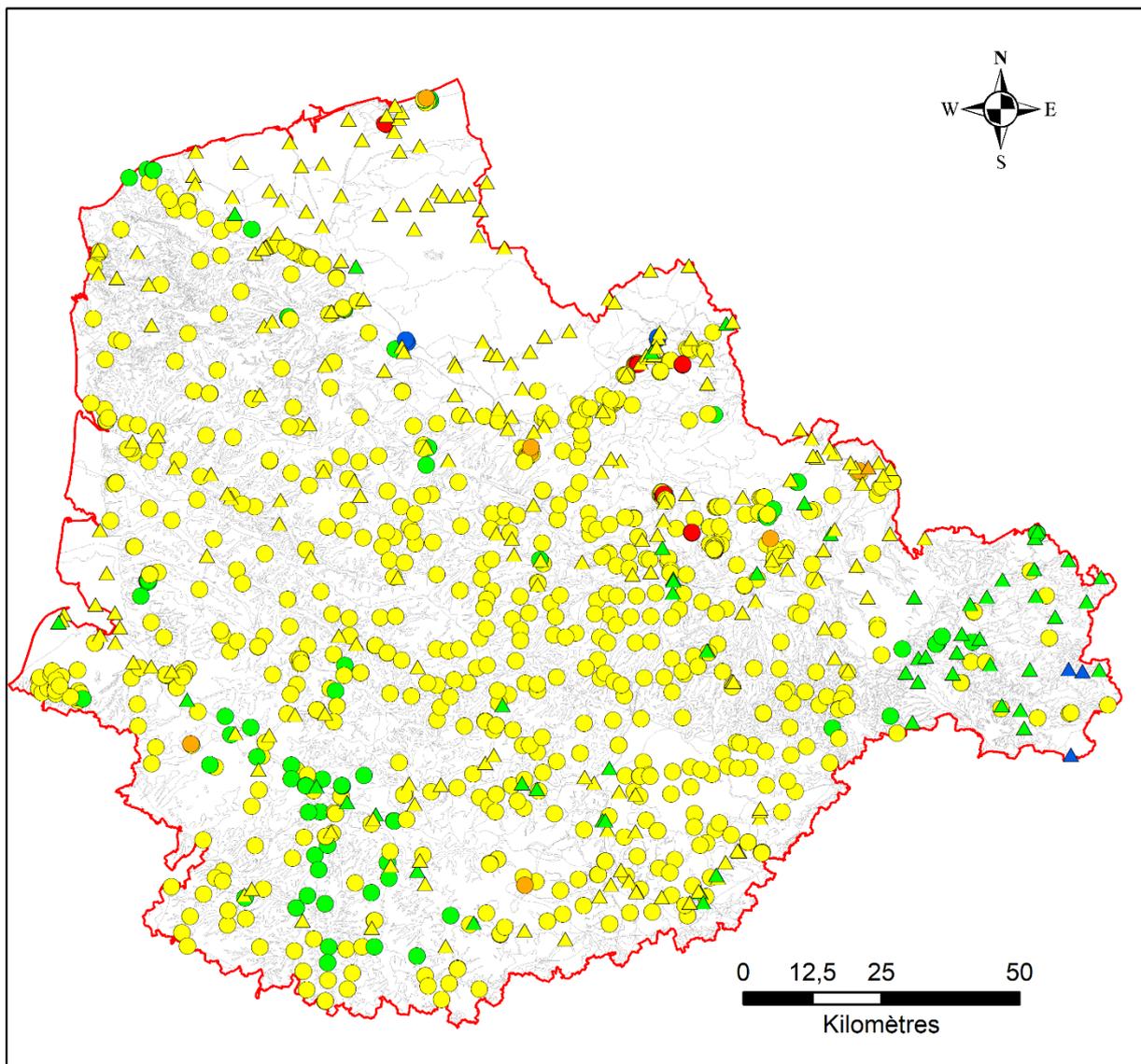
Pour les ESO, les concentrations en Ca varient de 0,16 à 1 400 mg/L, avec une valeur moyenne de 145 mg/l. Deux valeurs sont inférieures à 1 mg/L, ces valeurs sont peut-être inexactes, bien que les codes remarque et code unité aient été vérifiés. La majorité des points d'eau souterraine ont une concentration en Ca comprise entre 100 et 250 mg/L.

Pour les ESU, les concentrations en Ca varient de 24,5 à 398 mg/L, avec une valeur moyenne de 112 mg/l. La majorité des points d'eau superficielle ont une concentration en Ca comprise entre 100 et 250 mg/L.

Comme pour le HCO_3 , le Ca est majoritairement d'origine naturelle mais des processus tels que la précipitation ou dilution peuvent entraîner des variations de concentration.

A l'échelle de la zone d'étude, les concentrations en Ca des ESU sont comparables à celles de ESO. De plus, deux secteurs ressortent avec des concentrations en Ca un peu plus faibles, comprises entre 50 et 100 mg/L (en vert), il s'agit globalement du sud-ouest de la vallée de la Somme (Somme amont) et canal de St. Quentin et à l'est de la vallée de la Sambre et de l'Helpe (schistes, argiles et tuffeaux du Thanétien, alluvions) comme souligné pour le HCO_3 .

Le secteur au sud d'Amiens est plus délicat à analyser puisque les eaux de surface et quelques points d'eau souterraine présentent des concentrations en calcium plus faibles (Somme canalisée amont).



ESU - Ca Concentration moyenne (mg/L)

- ▲ 24,4 - 50,0 (LQ max : 1 mg/L) (3)
- ▲ 50,0 - 100,0 (56)
- ▲ 100,0 - 250,0 (220)
- ▲ 250,0 - 500,0 (1)

ESO - Ca Concentration moyenne (mg/L)

- 0,16 - 50,0 (LQ max : 0.5 mg/L) (5)
- 50,0 - 100,0 (Référence qualité) (83)
- 100,0 - 250,0 (731)
- 250,0 - 500,0 (23)
- 500,0 - 1400 (18)

Unités Fonctionnelles AP

Zone Etude

Illustration 83 – Répartition des concentrations moyennes en calcium (mg/L) pour les points d'eau souterraine (ESO) et les points d'eau superficielle (ESU) du secteur d'étude.

1337 – Chlorures

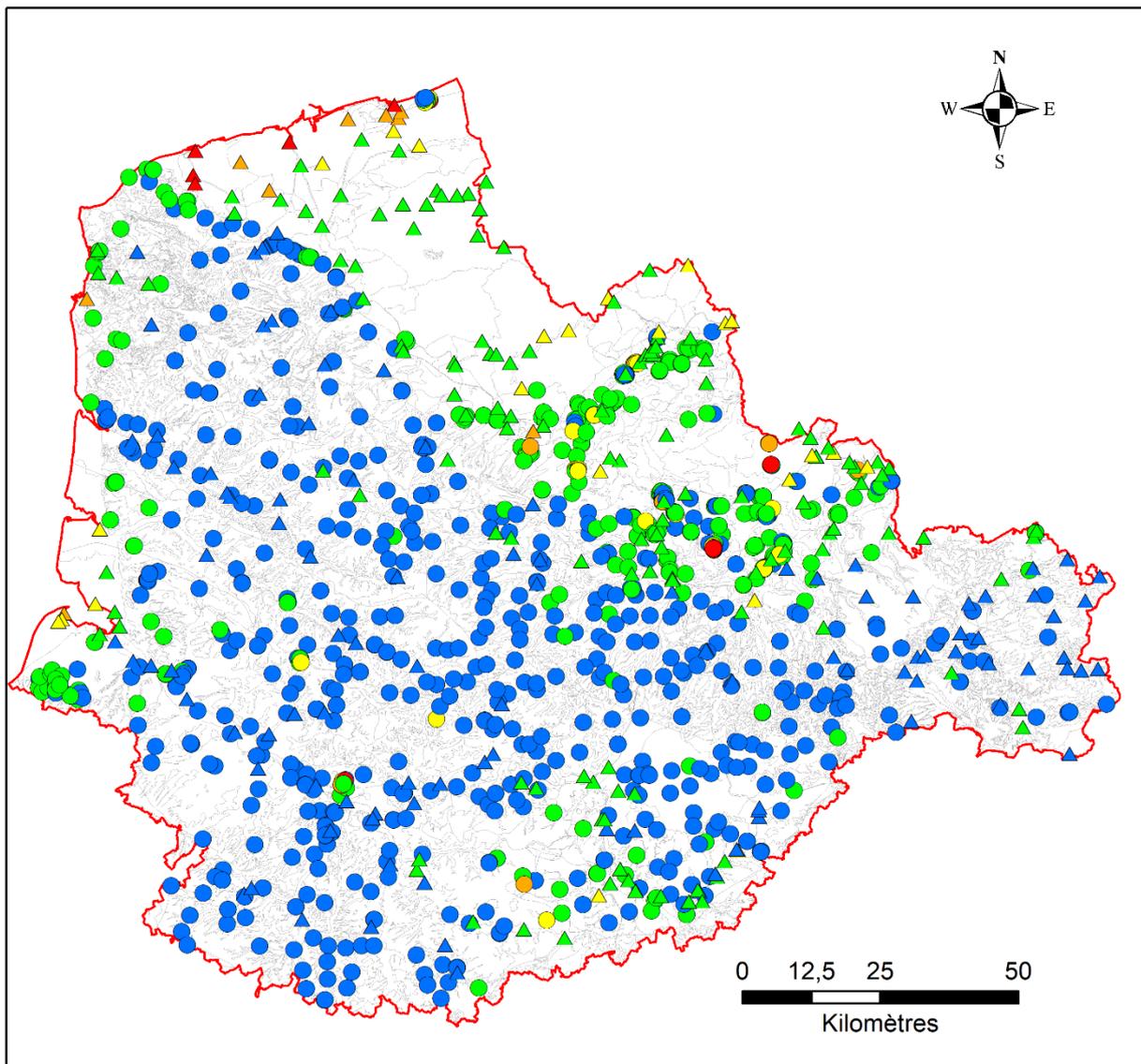
Pour les ESO, les concentrations en chlorures sont comprises entre 0,04 et 3 500 mg/L, avec une valeur moyenne de 67 mg/L. On note 3 valeurs sur 968 inférieures à 1 mg/L, ce qui correspond aussi à la LQ maximale, un doute raisonnable peut donc être émis pour ces trois valeurs.

La majorité des concentrations en Cl pour les ESO sont inférieures à 30 mg/L. Les points d'eau correspondant se situent principalement sur la Craie du Séno-Turonien. Les points d'eau situés sur la frange littorale ont par contre des concentrations en Cl un peu plus importantes, en lien certainement avec l'influence marine. Les points d'eau situés à l'est dans les vallées de la Deûle, de la Sensée, de l'Escaut, sur les Sables du Thanétien ont également des concentrations un peu plus fortes en Cl.

Pour les ESU, les concentrations en chlorures sont comprises entre 10,9 et 1 652 mg/L, avec une valeur moyenne de 85 mg/L. La majorité des points d'eau ESU ont une concentration en Cl comprises entre 10 et 100 mg/L. On retrouve globalement la même répartition spatiale que pour les ESO, avec cependant des concentrations plus importantes dans la France littorale des Sables pissards. Ceci confirme l'interprétation faite pour le paramètre conductivité.

De nouveau, le secteur rivière Somme en amont de Péronne et le canal de St Quentin montre de plus importants contrastes entre la composition chimique des eaux de surface et des eaux souterraines.

Les chlorures, de par leur forte variabilité et leur origine marine et/ou industrielle et/ou urbaine possible n'apporte pas d'informations complémentaires à l'analyse de la conductivité, HCO_3 et Ca.



ESU - Cl - Concentration moyenne (mg/L)

- ▲ 10,8 - 30,0 (LQ max : 6 mg/L) (108)
- ▲ 30,0 - 100,0 (139)
- ▲ 100,0 - 250,0 (Norme potabilité) (23)
- ▲ 250,0 - 700,0 (9)
- ▲ 700,0 - 1652 (5)

Unités Fonctionnelles AP

ESO - Cl - Concentration moyenne (mg/L)

- 0,03 - 30,0 (LQ max : 1 mg/L) (590)
- 30,0 - 100,0 (305)
- 100,0 - 250,0 (Norme potabilité) (40)
- 250,0 - 700,0 (13)
- 700,0 - 11950 (20)

Zone Etude

Illustration 84 – Répartition des concentrations moyennes en chlorures (mg/L) pour les points d'eau souterraine (ESO) et les points d'eau superficielle (ESU) du secteur d'étude.

Ratio Ca/Cl

Le rapport molaire moyen Ca/Cl a été déterminé pour l'ensemble des points d'eau ESO et ESU qui disposaient de données en Ca et Cl. Les concentrations moyennes en Ca et Cl de chaque point d'eau ESO et ESU ont donc été prises en compte en mg/L, puis en mmol/L et enfin le ratio molaire Ca/Cl a été calculé.

Pour les ESO, les valeurs de Ca/Cl varient de 0,07 à 114, avec les valeurs les plus fortes observées pour la Craie du Séno-Turonien notamment ; la majorité des points d'eau ESO ont un ratio compris entre 2 et 8.

Pour les ESU, les valeurs de ratio molaire Ca/Cl varient de 0,08 à 8,4, avec aussi les valeurs les plus fortes observées pour la Craie du Séno-Turonien ; un seul point d'eau a un ratio qui dépasse la valeur 8.

La répartition spatiale des rapports Ca/Cl est homogène entre les points d'eau ESU et ESO sur le secteur d'étude et met a priori en avant le fond hydrogéochimique (origine naturelle) des eaux.

Cet indicateur semble pertinent pour caractériser, notamment sur le secteur de la Craie du Séno-Turonien, le lien entre les ESO et les ESU (vallées de l'Authie, de la Canche et de la Somme canalisée aval).

Au contraire le secteur autour de Béthune (Clarence, Surgeon, Lawe, Loisne, Souchez, canal d'Aire) et la Deûle apparaissent avec de moindres apports souterrains.

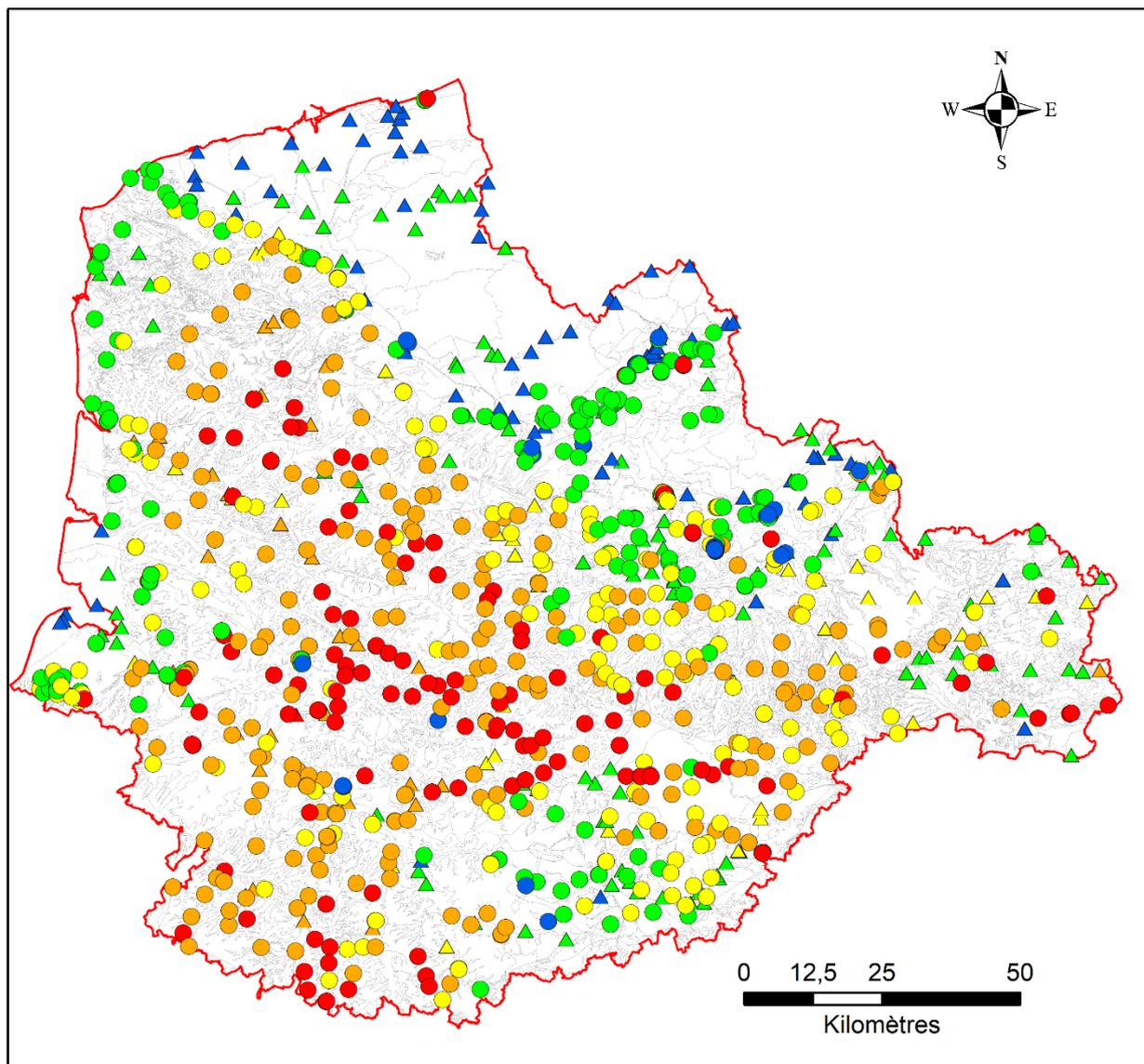


Illustration 85 – Répartition des ratios moyens Ca/Cl (mol/mol) pour les points d'eau souterraine (ESO) et les points d'eau superficielle (ESU) du secteur d'étude.

1372 – Magnésium

Pour les ESO, les concentrations en Mg varient de 0,03 à 3 420 mg/L, avec une valeur moyenne de 16 mg/L.

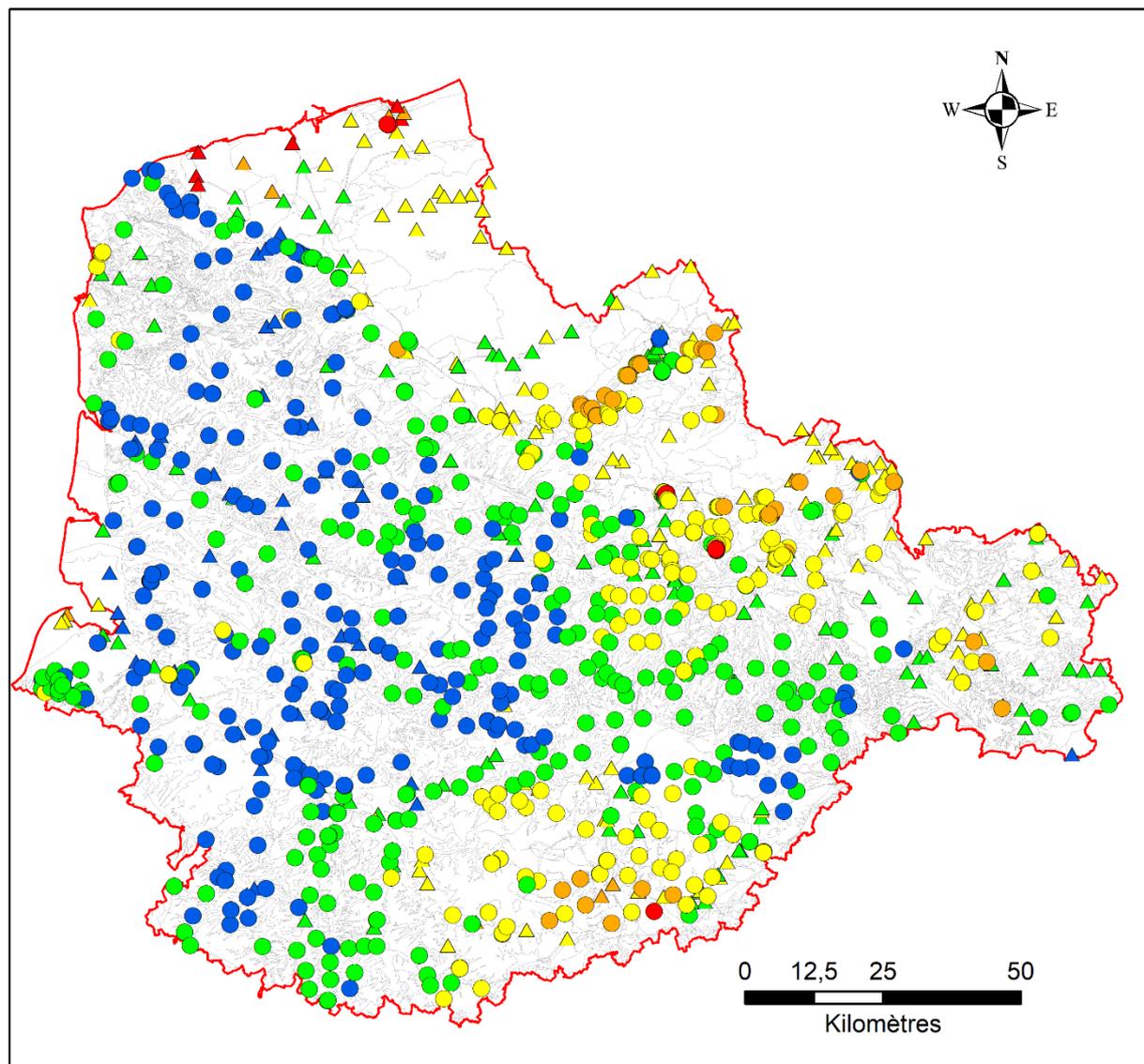
Pour les ESU, les concentrations en Mg varient de 2,5 à 116 mg/L, avec une valeur moyenne de 12 mg/L.

Les concentrations moyennes en Mg sont homogènes sur l'ensemble de la zone d'étude entre les ESO et les ESU. Les secteurs géographiques avec notamment des lithologies différentes ressortent bien ; par exemple la Craie du Séno-Turonien est relativement bien délimitée avec les concentrations en Mg les plus faibles pour les ESO et les ESU.

Au nord, sur les Sables pissards, les concentrations en Mg sont élevées aussi bien pour les ESO et les ESU, la proximité du littoral n'est certainement pas la seule explication, à cela s'ajoute probablement la lithologie de l'encaissant.

A l'est, les points d'eau ESO et ESU situés sur les sables du Thanétien ont des concentrations plus importantes en Mg, ceci est le cas dans la vallée de la Deûle notamment.

Par contre dans la vallée de la Sensée et de l'Escaut, certains points ESU ont des concentrations plus faibles que les points ESO situés à proximité, le recouvrement des Sables par des alluvions récentes à anciennes pourrait expliquer cette observation, et donc expliquer en partie pourquoi dans ce secteur les ESO et ESU ne semblent pas connectées.



ESO - Mg	Concentration moyenne (mg/L)
●	0,03 - 4,0 (LQ max : 0.05) (263)
●	4,0 - 10,0 (298)
●	10,0 - 25,0 (228)
●	25,0 - 50,0 (Norme potabilité) (54)
●	50,0 - 3420 (21)

ESU - Mg	Concentration moyenne (mg/L)
▲	2,5 - 4,0 (LQ max : 1 mg/L) (40)
▲	4,0 - 10,0 (115)
▲	10,0 - 25,00 (110)
▲	25,0 - 50,0 (Norme potabilité) (8)
▲	50,0 - 115,7 (6)

Unités Fonctionnelles AP

Zone Etude

Illustration 86 – Répartition des concentrations moyennes en magnésium (mg/L) pour les points d'eau souterraine (ESO) et les points d'eau superficielle (ESU) du secteur d'étude.

Rapport Mg/HCO₃

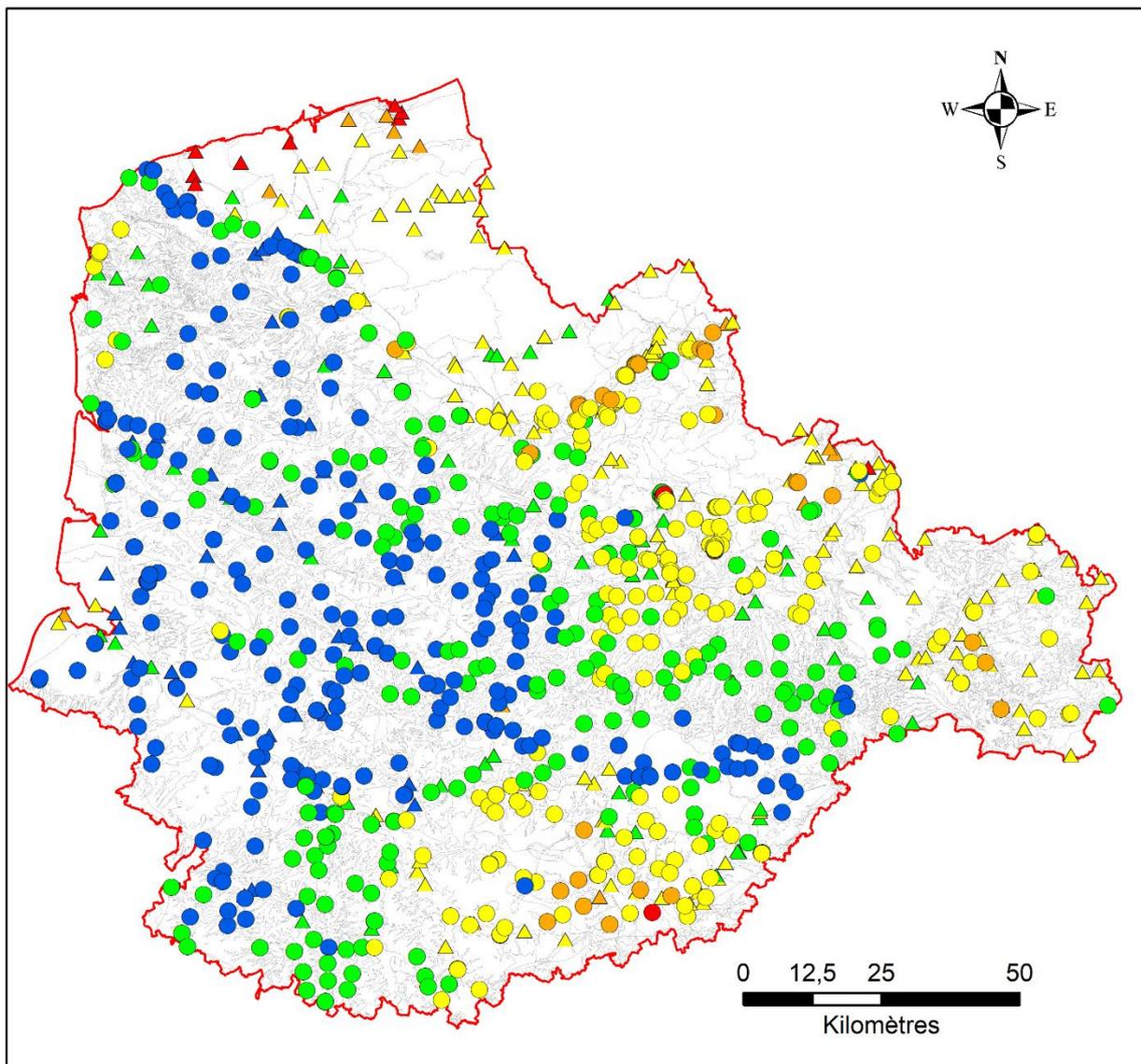
Le rapport molaire moyen Mg/HCO₃ a été déterminé pour l'ensemble des points d'eau ESO et ESU qui disposaient de données en Mg et HCO₃.

Pour les ESO, les valeurs de ratio molaire Mg/HCO₃ varient de 0,001 à 1,258.

Pour les ESU, les valeurs de ratio molaire Mg/HCO₃ varient de 0,002 à 0,169.

La répartition spatiale des ratios molaires Mg/HCO₃ correspond à celle de la concentration moyenne en Mg, on retrouve les mêmes secteurs géographiques mis en avant, peut-être plus finement délimités. La craie du Séno-Turonien ressort nettement ; ainsi que le secteur au sud-ouest de Saint Quentin (canal de St Quentin et Somme rivière) où les argiles recouvrent la Craie, où le ratio est nettement plus élevé, avec un passage progressif à la Craie avec une évolution descendante du ratio.

Ce rapport de deux paramètres pertinents pour l'analyse des relations nappes-rivières semble également intéressant pour une étude plus fine de ces relations.



ESO - Ratio Mg/HCO₃ (mol/mol)

- 0,0006 - 0,005 (268)
- 0,005 - 0,010 (219)
- 0,010 - 0,025 (247)
- 0,025 - 0,050 (39)
- 0,050 - 1,258 (10)

Unités Fonctionnelles AP

ESU - Ratio Mg/HCO₃ (mol/mol)

- ▲ 0,002 - 0,005 (38)
- ▲ 0,005 - 0,010 (67)
- ▲ 0,010 - 0,025 (143)
- ▲ 0,025 - 0,050 (14)
- ▲ 0,050 - 0,169 (9)

Zone Etude

Illustration 87 – Répartition des ratios moyens Mg/HCO₃ (mol/mol) pour les points d'eau souterraine (ESO) et les points d'eau superficielle (ESU) du secteur d'étude.

1338 – Sulfates

Pour les ESO, les concentrations en sulfates sont comprises entre 0,2 et 11 950 mg/L, avec une valeur moyenne de 115 mg/L. 87 points d'eau ESO ont une concentration moyenne en sulfates supérieure à la norme de potabilité (250 mg/L).

Pour les ESO, les concentrations en SO_4 délimitent des aires géographiques bien précises. On retrouve ainsi les concentrations en SO_4 les plus faibles, avec des valeurs inférieures à 25 mg/L, sur le secteur géographique de la Craie.

Les sables du Thanétien, à l'est, dans le secteur de l'Avesnois, ont des concentrations comprises entre 25 et 50 mg/L, il en est aussi de même dans le secteur de la Craie de la vallée de la Somme amont, au sud de Saint Quentin.

Dans le Boulonnais, les concentrations en sulfates des ESO sont un peu plus importantes, avec des valeurs comprises entre 25 et 250 mg/L.

Les concentrations les plus élevées sont rencontrées à l'est du bassin Artois-Picardie, dans les vallées de la Deûle et de la Scarpe, dans des sables et argiles du Thanétien et des alluvions.

23 points d'eau ESO ont une concentration moyenne en sulfates supérieures à 1000 mg/L ; ils sont principalement localisés dans la vallée de Scarpe. Par contre, le point d'eau ESO qui a la concentration la plus élevée se situe au nord dans les sables pissards, à proximité du littoral (≈ 4 km).

L'origine des sulfates dans les ESO est donc multiple, mais en lien avec la géologie, la lithologie des aquifères et pour les points présents directement sur le littoral, une influence de la mer a aussi été notée.

Pour les ESU, les concentrations en sulfates sont comprises entre 2,5 et 1 652 mg/L, avec une valeur moyenne de 62 mg/L. 5 points d'eau ESU ont une concentration moyenne en sulfates supérieure à 250 mg/L (norme de potabilité).

L'ensemble des points d'eau ESU situés dans le secteur géographique de la Craie ont des concentrations moyennes en sulfates faibles, inférieures à 25 mg/L, en lien direct avec les concentrations constatées pour les ESO.

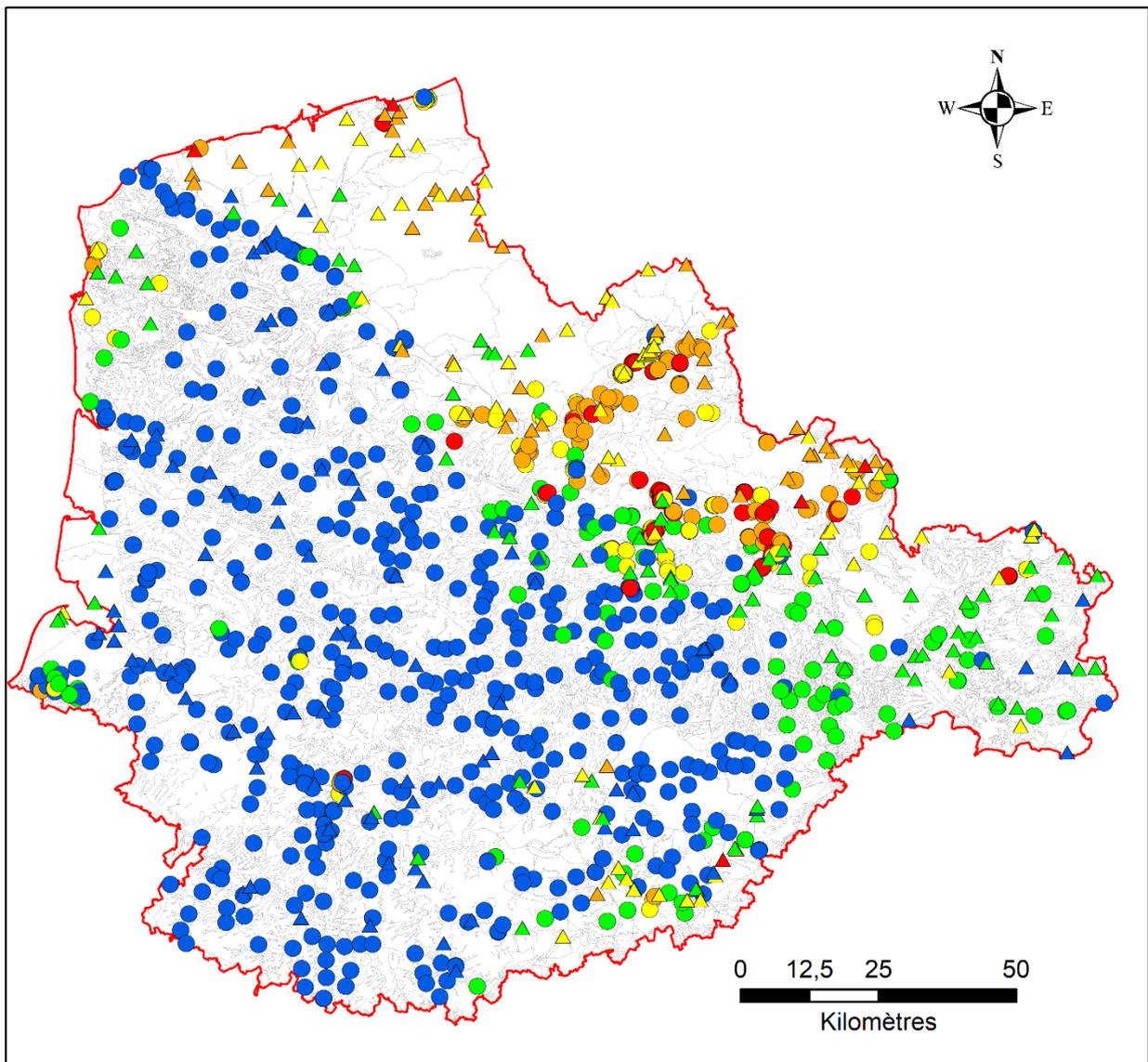
A l'est, dans le secteur de l'Avesnois, les points d'eau sur les sables du Thanétien mais aussi en amont sur schistes, grès, calcaires ont des concentrations similaires aux ESO, avec des valeurs comprises entre 25 et 50 mg/L.

Dans le Boulonnais, les concentrations en sulfates, comprises entre 25 et 100 mg/L, sont également en accord avec les concentrations observées pour les eaux souterraines.

Au nord, dans la plaine maritime, plus exactement pour les Sables pissards, les concentrations en sulfates sont plus élevées, avec des concentrations comprises entre 50 et 320 mg/L, les valeurs les élevées étant directement sur la frange littorale, en lien direct avec l'influence maritime (intrusion saline / embruns).

Pour les ESU, des concentrations très élevées en sulfates (> 250 mg/L) sont aussi rencontrées à l'est du bassin Artois-Picardie, dans les vallées de la Deûle et de la Scarpe, dans des sables et argiles du Thanétien et des alluvions ; soit dans les mêmes secteurs déjà constatés pour les ESO.

La répartition spatiale des concentration moyennes en sulfates des points d'eau ESO et ESU met donc en exergue le lien fort entre les eaux et le milieu (roches et sols), appartenant à la même unité géologique, lithologique. Toutefois ce paramètre paraît peu utilisable pour une interprétation plus fine du fait de la diversité des origines de cet élément.



ESU - SO4 Concentration moyenne (mg/L)

- ▲ 2,5 - 25,0 (LQ max : 4 mg/L) (86)
- ▲ 25,0 - 50,0 (75)
- ▲ 50,0 - 100,0 (67)
- ▲ 100,0 - 250,0 (Norme potabilité) (50)
- ▲ 250,0 - 1652 (5)

Unités Fonctionnelles AP

ESO - SO4 Concentration moyenne (mg/L)

- 0,2 - 25,0 (LQ max : 4 mg/L) (545)
- 25,0 - 50,0 (135)
- 50,0 - 100,0 (97)
- 100,0 - 250,0 (Norme potabilité) (138)
- 250,0 - 11950 (87)

Zone Etude

Illustration 88 – Répartition des concentrations moyennes en sulfates (mg/L) pour les points d'eau souterraine (ESO) et les points d'eau superficielle (ESU) du secteur d'étude.

1391 et 7073 – Fluorures

Pour les ESO, les concentrations en fluorures sont comprises entre 0,05 et 3,0 mg/L, avec une valeur moyenne de 0,18 mg/L. 2 points d'eau ESO ont une concentration moyenne en fluorures supérieure à la norme de potabilité (1,5 mg/L).

Pour les ESU, les concentrations en fluorures sont comprises entre 0,06 et 2,8 mg/L, avec une valeur moyenne de 0,25 mg/L. 2 points d'eau ESU ont une concentration moyenne en fluorures supérieure à la norme de potabilité (1,5 mg/L).

La majorité des points d'eau ESO et ESU ont une concentration moyenne en fluorures inférieure à 0,5 mg/L.

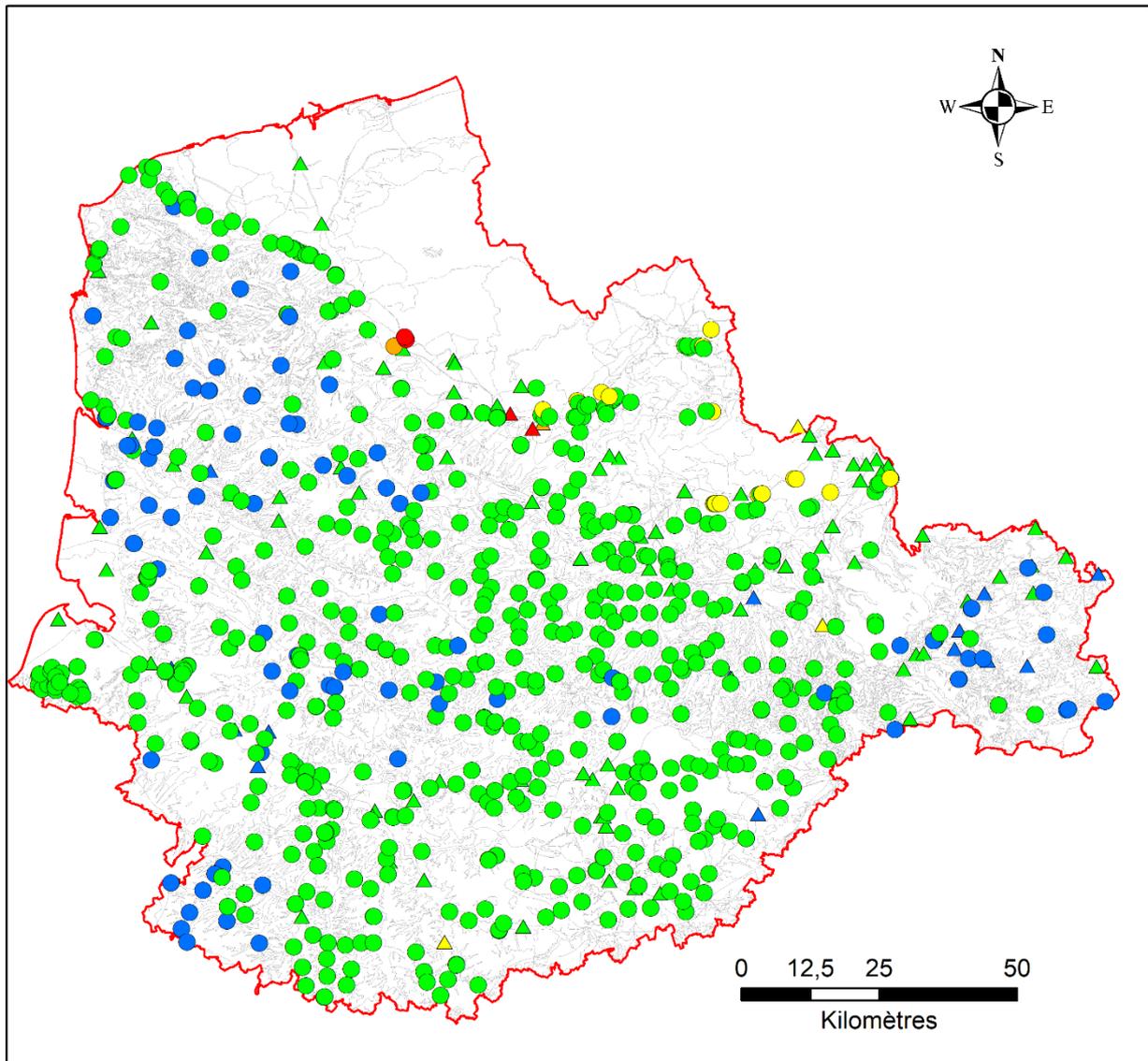
Les concentrations rencontrées dans l'Avesnois, sont dans leur majorité inférieures à 0,1 mg/L, ce qui correspond aussi à la LQ maximale pour toute la période de données. Néanmoins, le fait de retrouver ces concentrations plus faibles pour les ESO et les ESU dans ce secteur géographique valide les données et donc une concentration en fluorures plus faible dans l'Avesnois.

Des concentrations plus faibles sont aussi rencontrées à la fois pour les ESO et les ESU pour la Craie du Pays d'Artois, dans les vallées de la Canche et de l'Authie.

A l'est, dans les vallées de la Deûle et de la Scarpe, dans les alluvions ou les Sables du Thanétien, les concentrations en fluorures sont un peu plus élevées, comprises entre 0,5 et 1,0 mg/L. Ceci est notamment vrai pour les ESO, mais aussi pour quelques points ESU.

Les concentrations maximales en fluorures, supérieures à 1,5 mg/L, sont très localisées, dans les Argiles de Flandres et de Roubaix pour les 2 points ESO, distants d'à peine 600 m. Localement ces eaux souterraines ne sont pas en relation avec des eaux de surface. Toutefois ce phénomène reste très localisé vers le Lys.

Dans les Alluvions anciennes de la Loïse et du Surgeon pour les 2 points ESU, distants de 5 km les valeurs des eaux de surface sont discordantes de celles des eaux souterraines. Le fluorure ne provient donc pas des eaux souterraines dans ce secteur, indiquant donc de moindres apports d'eau souterraine ou une source locale de contamination.



ESO - F Concentration moyenne (mg/L)

- 0,05 - 0,1 (LQ max : 0,1 mg/L) (98)
- 0,1 - 0,5 (615)
- 0,5 - 1,0 (18)
- 1,0 - 1,5 (Norme potabilité) (1)
- 1,5 - 3,0 (2)

Unités Fonctionnelles AP

ESU - F Concentration moyenne (mg/L)

- ▲ 0,058 - 0,1 (LQ max : 0,1 mg/L) (15)
- ▲ 0,1 - 0,5 (97)
- ▲ 0,5 - 1,0 (3)
- ▲ 1,0 - 1,5 (Norme potabilité) (1)
- ▲ 1,5 - 3,0 (2)

Zone Etude

Illustration 89 – Répartition des concentrations moyennes en fluorures (mg/L) pour les points d'eau souterraine (ESO) et les points d'eau superficielle (ESU) du secteur d'étude.

4.5.3. Métaux lourds : nickel et chrome

L'objectif premier était de traiter le nickel, qui a été identifié comme un élément présentant un risque de fond hydrogéochimique élevé en Artois-Picardie.

Son origine dans les eaux souterraines en Artois-Picardie est principalement naturelle ; par contre dans certains secteurs des concentrations élevées peuvent être rencontrées du fait de pollution anthropique de la nappe.

Afin d'appliquer comme un filtre sur la carte du nickel, le chrome a été choisi en complément. En effet, dans les secteurs supposés ayant été contaminés par du nickel d'origine anthropique, une pollution au chrome est souvent associée, du fait de l'activité et processus industriels.

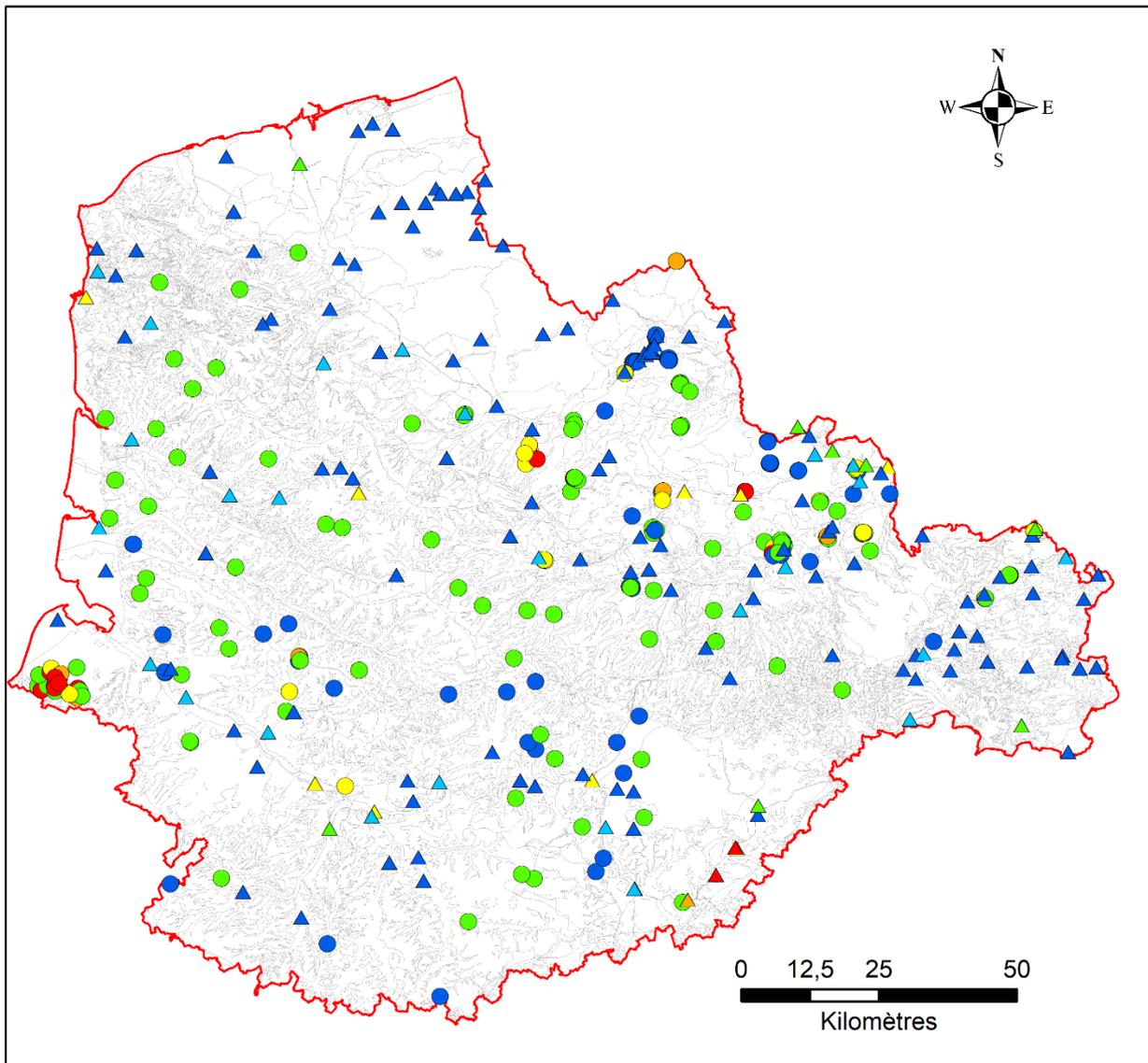
Ainsi, les sites à forte concentration en chrome et en nickel sont des sites où la nappe a été contaminée du fait d'activités anthropiques. L'intérêt de notre étude est d'identifier des indicateurs pour caractériser les relations ESO vers ESU, nous ne tiendrons donc pas compte de ces quelques sites pollués très localisés.

1389 – Chrome

Pour les ESO, les concentrations en chrome varient de 0,003 à 91 536 µg/L ; avec une valeur médiane de 4,7 µg/L et une moyenne de 563,1 µg/L. La majorité des points d'eau ESO ont une concentration en chrome inférieure à 50 µg/l qui correspond à la norme de potabilité. 26 points ont une concentration supérieure à 50 µg/L ; dont 14 entre 150 et 850 µg/l ; et seulement 6 entre 1 600 et 91 536 µg/L. Les points les plus contaminés correspondent au secteur industriel du Vimeu. Deux autres secteurs très localisés apparaissent à l'est, l'un dans la Craie su Séno-Turonien dans la vallée de la Deûle et l'autre dans les alluvions de l'Escaut.

Pour les ESU, les concentrations en chrome varient de 0,11 à 123 µg/L ; avec une valeur médiane de 0,9 µg/L et une moyenne de 4,0 µg/L. Les concentrations dans les ESU sont donc beaucoup plus faibles que celles des ESO.

Par contre, nous ne disposons pas de points ESU à proximité directe des sites ESO impactés par une pollution au chrome.



ESU - Cr Concentration moyenne (µg/L)

- ▲ 0,109 - 1,0 (LQ max : 1,0 µg/L) (124)
- ▲ 1,0 - 3,4 (NQE moyenne) (25)
- ▲ 3,4 - 10,0 (9)
- ▲ 10,0 - 50,0 (Norme potabilité) (9)
- ▲ 50,0 - 100,0 (1)
- ▲ 100,0 - 123 (2)

ESO - Cr Concentration moyenne (µg/L)

- 0,003 - 3,4 (NQE moyenne) (63)
- 3,4 - 10,0 (LQ max : 10,0 µg/L) (116)
- 10,0 - 50,0 (Norme potabilité) (36)
- 50,0 - 100,0 (6)
- 100,0 - 91 536 (20)

□ Zone Etude

□ Unités Fonctionnelles AP

Illustration 90 – Répartition des concentrations moyennes en chrome (µg/L) pour les points d'eau souterraine (ESO) et les points d'eau superficielle (ESU) du secteur d'étude.

1386 – Nickel

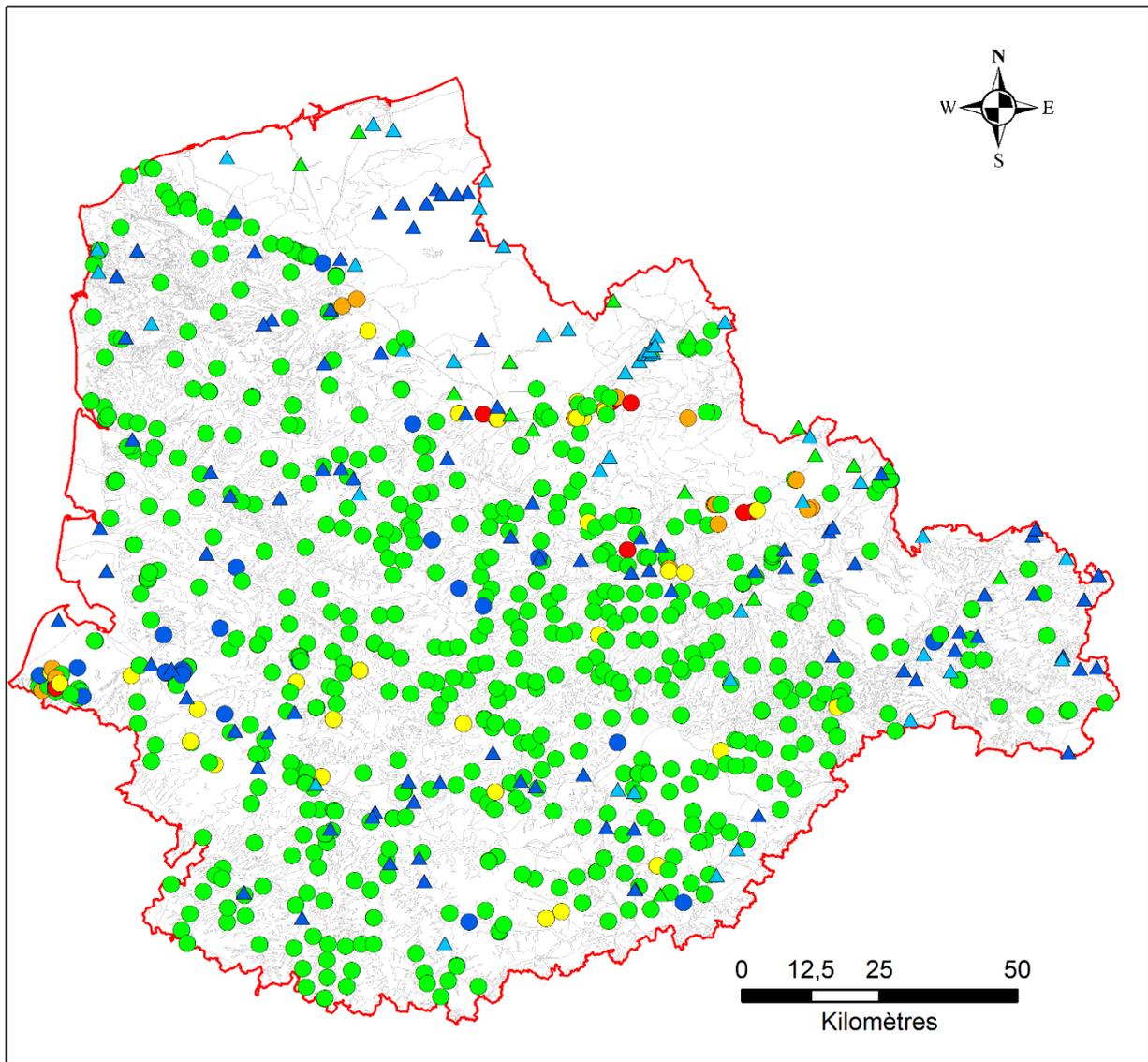
Pour les ESO, les concentrations en nickel varient de 0,5 à 260 µg/L, avec une valeur médiane de 5,4 µg/L et une moyenne de 8,5 µg/L. La majorité des points d'eau ESO ont une concentration en nickel inférieure à 20 µg/l qui correspond à la norme de potabilité.

32 points ont une concentration en nickel supérieure à 20 µg/L ; ils se situent tous dans le secteur du Vimeu et dans les vallées de la Deûle et de la Scarpe. Sur les 4 points d'eau ESO qui ont une concentration supérieure à 100 µg/L, les 3 premiers se situent sur le site du Vimeu, pollués également au chrome, et le 4^{ième} point se situe dans les alluvions de la vallée de la Deûle, à proximité d'autres points d'eau à fortes concentrations en nickel.

Pour les ESU, les concentrations en nickel varient de 0,2 à 10 µg/L, avec une valeur médiane de 1,8 µg/L et une moyenne de 2,2 µg/L. La majorité des points d'eau ESU ont une concentration en nickel inférieure à 4 µg/l qui correspond à la NQE. Les valeurs les plus élevées en nickel se situent au nord et à l'est, sur les Sables pissards, sur les argiles de Flandres et de Roubaix, sur les sables du Thanétien et les alluvions dans les vallées de la Scarpe, de l'Escaut et de la Deûle.

En dehors des pollutions identifiées pour le secteur du Vimeu, les plus fortes concentrations en nickel sont rencontrées dans les eaux souterraines des Sables du Thanétien et les alluvions notamment dans les vallées de la Deûle et de la Scarpe canalisée aval et en amont de Béthune (Lawe, Loisme, Clarence). Les points d'eau ESU situés à proximité présentent de plus faibles concentrations en nickel même si ce sont les secteurs avec les plus fortes concentrations des eaux de surface. Ceci pourrait être un indicateur de relations nappes-rivières moyennement intenses (ou temporairement faibles).

Les zones identifiées ici avec des concentrations élevées en nickel font partie des zones identifiées comme zone à risque de fond hydrogéochimique élevée en nickel par Brenot et al. (2007).



ESU - Ni Concentration moyenne (µg/L)

- ▲ 0,19 - 2,0 (max LQ) (94)
- ▲ 2,0 - 4,0 (NQE moyenne) (48)
- ▲ 4,0 - 10,0 (17)

ESO - Ni Concentration moyenne (µg/L)

- 0,5 - 4,0 (NQE moyenne) (27)
- 4,0 - 10,0 (LQ max : 10 µg/L) (625)
- 10,0 - 20,0 (Norme potabilite) (41)
- 20,0 - 34,0 (NQE max) (19)
- 34,0 - 260 (13)

Unités Fonctionnelles AP

Zone Etude

Illustration 91 – Répartition des concentrations moyennes en nickel (µg/L) pour les points d'eau souterraine (ESO) et les points d'eau superficielle (ESU) du secteur d'étude.

4.5.4. Composés azotés

3 composés azotés ont été étudiés pour le bassin Artois-Picardie, aussi bien pour les ESO que les ESU, il s'agit du nitrate, du nitrite et de l'ammonium.

1340 – Nitrate

Pour les ESO, les concentrations en nitrate sont comprises entre 0,1 et 648 mg/L, avec une valeur moyenne de 28 mg/L. La majorité des points d'eau ont une concentration comprise entre 10 et 50 mg/L. 35 points d'eau ESO ont une concentration moyenne en nitrate supérieure à la norme de potabilité (50 mg/L).

Pour les ESU, les concentrations en nitrate sont comprises entre 0,01 et 135 mg/L, avec une valeur moyenne de 20 mg/L. La majorité des points d'eau ont une concentration comprise entre 10 et 50 mg/L. 2 points d'eau ESU ont une concentration moyenne en nitrate supérieure à la NQE (50 mg/L), ils se situent dans la Craie de la plaine de la Deûle et sur les argiles de Flandres et de Roubaix.

La répartition spatiale des concentrations des ESU et des ESO paraît homogène à l'échelle du bassin Artois-Picardie. Les concentrations correspondent entre les ESO et les ESU d'un même secteur géographique. L'étude nationale pression-impact nitrate (Gourcy *et al.*, 2017) avait montré une pression en nitrate très forte sur les aquifères de la craie d'Artois-Picardie, moyennement forte pour les Sables du Thanétien. Cette pression explique en partie les fortes concentrations en nitrate dans les eaux souterraines.

Deux secteurs géographiques présentent des eaux souterraines avec des concentrations très élevées en nitrate, il s'agit de la Craie du Vimeu et de la Craie de la plaine de la Deûle. La Craie de la vallée de l'Authie présente également quelques points d'eau ESO avec de fortes concentrations en nitrate. En amont de ces secteurs contaminés, les vallées de la Scarpe et de la Deûle présentent des eaux souterraines avec des teneurs en nitrate faibles (Illustration 92).

Sur la Scarpe amont, sur la nappe de la Craie, les points d'eau ESO et ESU présentent des gammes de concentrations similaires, entre 25 et 50 mg/L. Pour la Deûle, les concentrations en nitrate sont supérieures à 50 mg/L. Les eaux de surface en aval hydraulique de ces eaux souterraines contaminées présentent des concentrations supérieures à 50 mg/L.

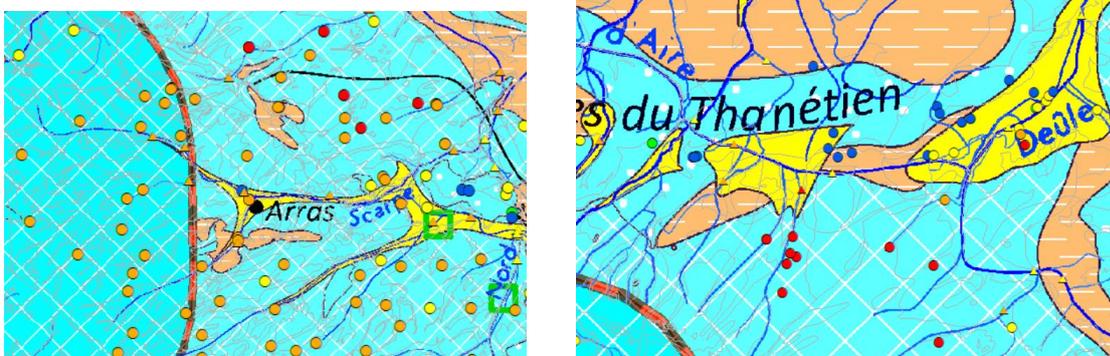
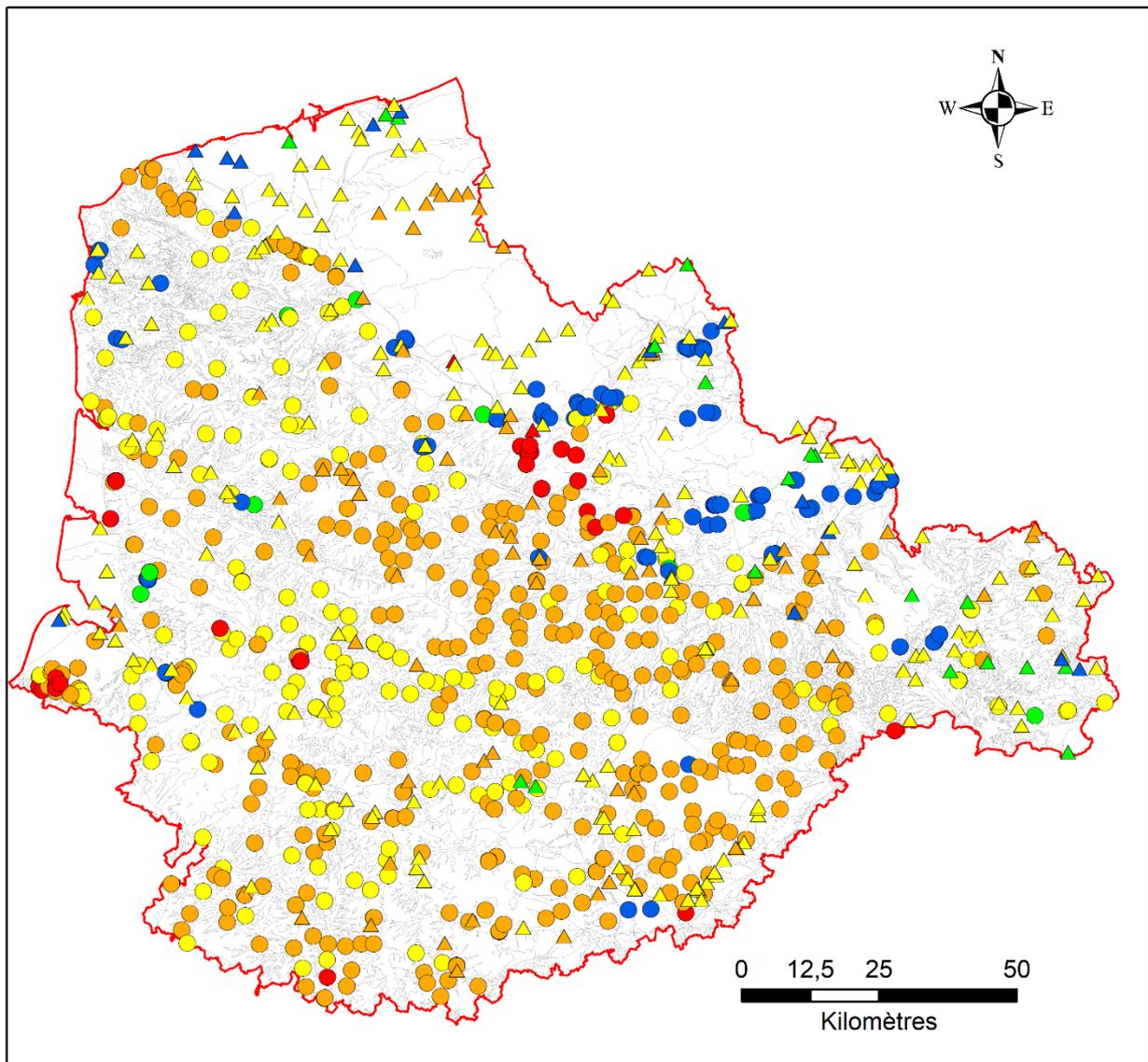


Illustration 92 – Exemples d'utilisation du paramètre nitrate pour l'analyse des liens ESO-ESU – la Scarpe amont et le Deûle



ESU - NO₃ Concentration moyenne (mg/L)

- ▲ 0,01 - 5,0 (LQ max = 0,03 mg/L) (16)
- ▲ 5,0 - 10,0 (20)
- ▲ 10,0 - 25,0 (183)
- ▲ 25,0 - 50,0 (Norme potabilité - NQE moy) (74)
- ▲ 50,0 - 135 (2)

Unités Fonctionnelles AP

ESO - NO₃ Concentration moyenne (mg/L)

- 0,10 - 5,0 (LQ max : 1 mg/L) (90)
- 5,0 - 10,0 (17)
- 10,0 - 25,0 (209)
- 25,0 - 50,0 (Norme potabilité) (396)
- 50,0 - 648 (35)

Zone Etude

Illustration 93 – Répartition des concentrations moyennes en nitrate (mg/L) pour les points d'eau souterraine (ESO) et les points d'eau superficielle (ESU) du secteur d'étude.

Cette concordance des concentrations en nitrate peut provenir d'une même pression s'exerçant à la fois sur les eaux de surface par lessivage des sols et sur les eaux souterraines par infiltration. Toutefois, sur l'ensemble de l'année on s'attendrait à trouver des eaux de surface avec des concentrations plus faibles de par la dilution des eaux et la consommation du nitrate par les

plantes aquatiques (efflorescence algale). Au contraire, ponctuellement, des pics de nitrate peuvent être détectés sur les cours d'eau et plus particulièrement sur les entités perméables à l'affleurement.

On peut considérer qu'une forte stabilité annuelle des concentrations en nitrate correspond à un cours d'eau à apports souterrains dominants.

Ainsi, si l'on considère les stations sur les cours d'eau disposant de données mensuelles pour l'année 2018 on note :

- une forte stabilité des concentrations en nitrate et des valeurs en concordance avec les concentrations des eaux souterraines pour les stations de la Canche, la Cologne, la Scarpe, la Scarpe canalisée amont, la Nièvre, la Somme canalisée aval, la Souchez, l'Hallue, la rivière Lys, la Course, la Créquoise, l'Authie, l'Aa, la Noye ;
- Des concentrations moyennement variables sur l'année de concentrations comprises entre 10 et 40 mg/L généralement pour la Slack, l'Omignon, la Hem, la Ternoise, la Solre, l'Escaut canalisée, l'Erclin, l'Ecaillon, La Rhonelle, la Lys canalisée, la Clarence, La Lawe, la Deûle, le canal de l'Aa, le Scardon, La Maye, le canal de la Maye, La Selle/Escaut, la Liane ;
- Des concentrations en nitrate très variables avec de possibles valeurs basses indiquant une dénitrification ou/et des valeurs supérieures à 40 mg/L pour l'Helpe mineure, la Flamenne, le Rivierette, le Wimereux, la Sambre canalisée, l'Helpe majeure, la Sambre rivière, la Sensée rivière, la Scarpe canalisée aval, la Sensée canalisée à Férin (canal du Nord), le canal de Roubaix, l'Espierre, le canal d'Aire, la Marque, l'Yser, le Grand Drack, le canal de Bergues, l'exutoire des Wateringues, le canal de Mardyck, la rivière d'Oye, la Somme rivière amont.

Pour le premier groupe d'eau on peut considérer que les relations avec les eaux souterraines sont fortes toute l'année. Ces cours d'eau sont relativement importants et dans des conditions le plus souvent naturelles.

Dans le deuxième groupe d'eau il y aurait un soutien probable des eaux souterraines mais une influence du ruissellement forte. Ce sont plus souvent des cours d'eau de moyenne importance pour lesquels les pluies peuvent se faire sentir plus fortement sur la chimie des eaux de surface. On retrouve ici des parties de cours d'eau canalisées, le secteur Boulogne-sur-Mer-Calais (Cap et Marais d'Opale),

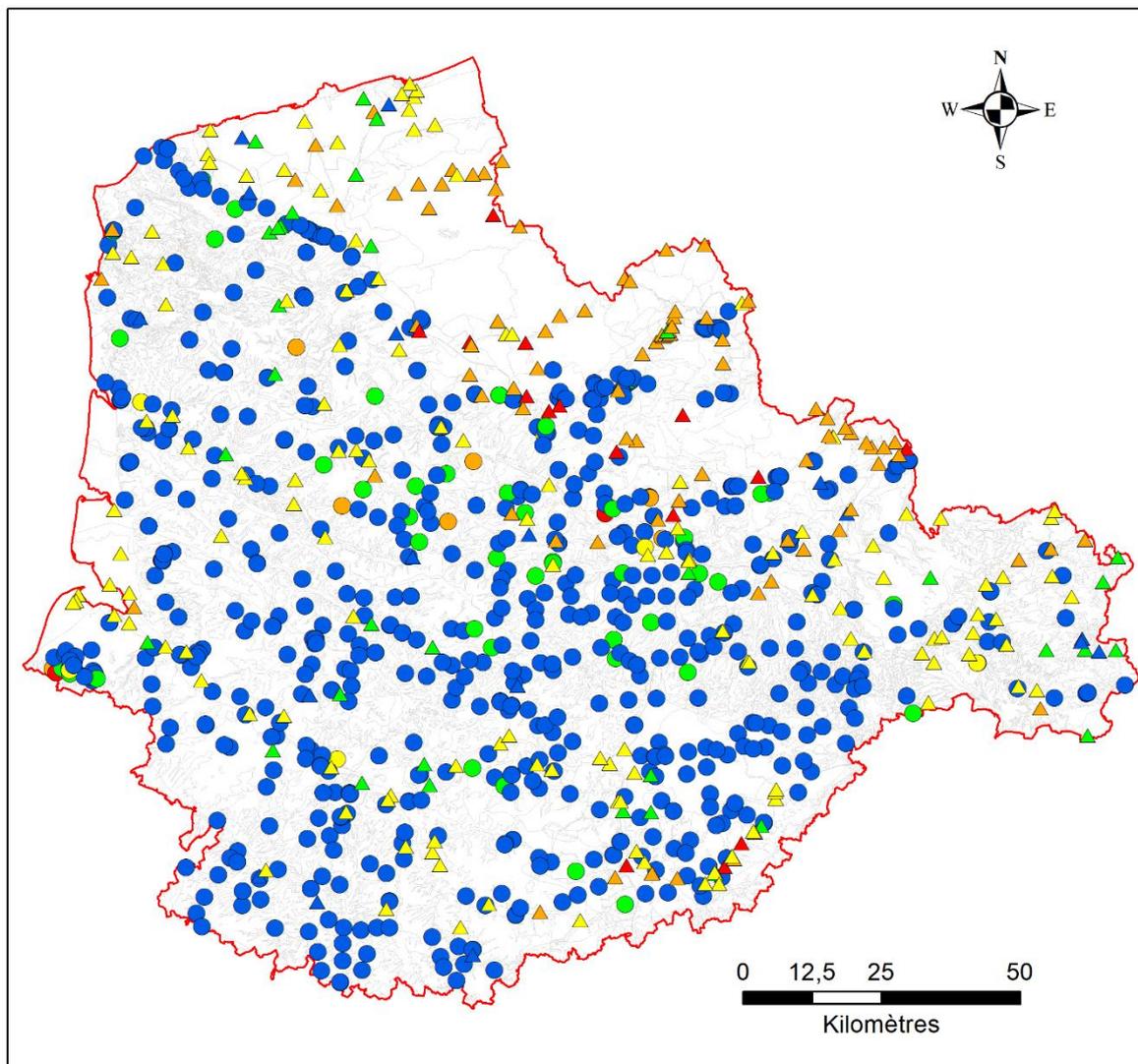
Le troisième groupe regrouperait les rivières et canaux qui au moins une partie de l'année ne reçoivent pas d'apports souterrains. Ce sont beaucoup de canaux du nord-est (delta de l'Aa), le secteur autour de Lille, la Sambre et l'Helpe. On retrouve également une partie de la Somme canalisée, entre Offoy et Cappy ainsi que la Somme rivière sur ce même secteur.

1339 – Nitrite

Pour les ESO, les concentrations en nitrite sont comprises entre 0,005 et 2,0 mg/L, avec une valeur moyenne de 0,05 mg/L. La quasi-totalité (98 %) des points d'eau ont une concentration inférieure 0,1 mg/L, qui correspond à la norme de potabilité. 18 points d'eau ESO ont une concentration moyenne en nitrite supérieure à la norme de potabilité (0,1 mg/L) ; ils se situent principalement dans la Craie, à proximité des vallées de la Scarpe et de la Deûle, à proximité de secteurs fortement contaminés en nitrate.

Pour les ESU, les concentrations en nitrite sont comprises entre 0,01 et 14,0 mg/L, avec une valeur moyenne de 0,37 mg/L. La majorité des points d'eau ont une concentration comprise entre 0,05 et 0,3 mg/L. 103 points d'eau ESU ont une concentration moyenne en nitrite supérieure à la NQE (0,3 mg/L). Ils se situent dans la Craie de la plaine de la Deûle et sur les argiles de Flandres et de Roubaix. Les ESU sont donc plus impactées par des concentrations élevées en nitrite que les ESO.

La répartition spatiale de ces concentrations élevées dans les eaux de surface concerne les Sables du Thanétien des vallées de la Deûle, de la Scarpe et de l'Escaut, les Argiles de Flandres et de Roubaix, et la Craie de la vallée de la Somme amont. Ces secteurs correspondent à des tronçons de rivières qui seraient moins alimentés par les eaux souterraines.



ESU - NO2 Concentration moyenne (mg/L)		ESO - NO2 Concentration moyenne (mg/L)	
▲	0,010 - 0,05 (LQ max : 0,02 mg/L) (17)	●	0,005 - 0,05 (LQ max : 0,05 mg/L) (672)
▲	0,05 - 0,1 (Norme potabilité) (35)	●	0,05 - 0,1 (Norme potabilité) (50)
▲	0,1 - 0,3 (NQE moy : 0,3 mg/L) (140)	●	0,1 - 0,3 (NQE moy : 0,3 mg/L) (7)
▲	0,3 - 1,0 (88)	●	0,3 - 1,0 (9)
▲	1,0 - 14 (15)	●	1,0 - 2,0 (2)
□	Unités Fonctionnelles AP	□	Zone Etude

Illustration 94 – Répartition des concentrations moyennes en nitrite (mg/L) pour les points d'eau souterraine (ESO) et les points d'eau superficielle (ESU) du secteur d'étude.

1335 – Ammonium

Pour les ESO, les concentrations en ammonium sont comprises entre 0,005 et 50,0 mg/L, avec une valeur moyenne de 0,25 mg/L. La majorité des points d'eau ont une concentration inférieure 0,5 mg/L, qui correspond à la norme de potabilité.

Pour les ESU, les concentrations en ammonium sont comprises entre 0,03 et 73,3 mg/L, avec une valeur moyenne de 1,4 mg/L.

Les secteurs problématiques, à concentrations élevées, au deçà des valeurs seuils des références qualité (norme de potabilité / NQE) sont globalement les mêmes que pour le nitrite. Les fortes valeurs en ammonium dans les eaux de surface pourraient indiquer de faibles apports souterrains comme sur la Scarpe canalisée aval, l'Escaut canalisé, secteur Béthune (canal de l'Aire, Lawe, Clarence, Loisme, Surgeon). Toutefois les processus entraînant des variations de concentration en ammonium (nitrification, dénitrification par exemple) compliquent l'interprétation.

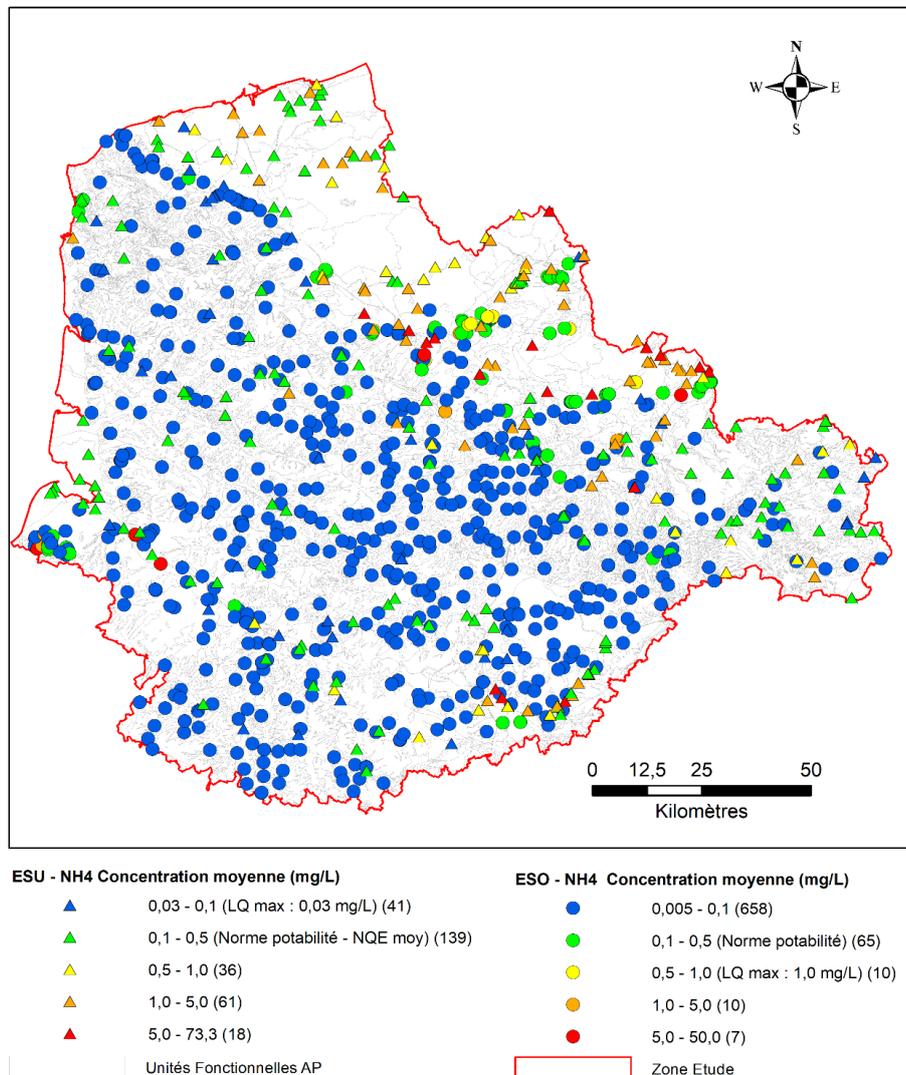


Illustration 95 – Répartition des concentrations moyennes en ammonium (mg/L) pour les points d'eau souterraine (ESO) et les points d'eau superficielle (ESU) du secteur d'étude.

4.5.5. Substances phytosanitaires interdites depuis 2003 (et métabolites)

1107 – Atrazine

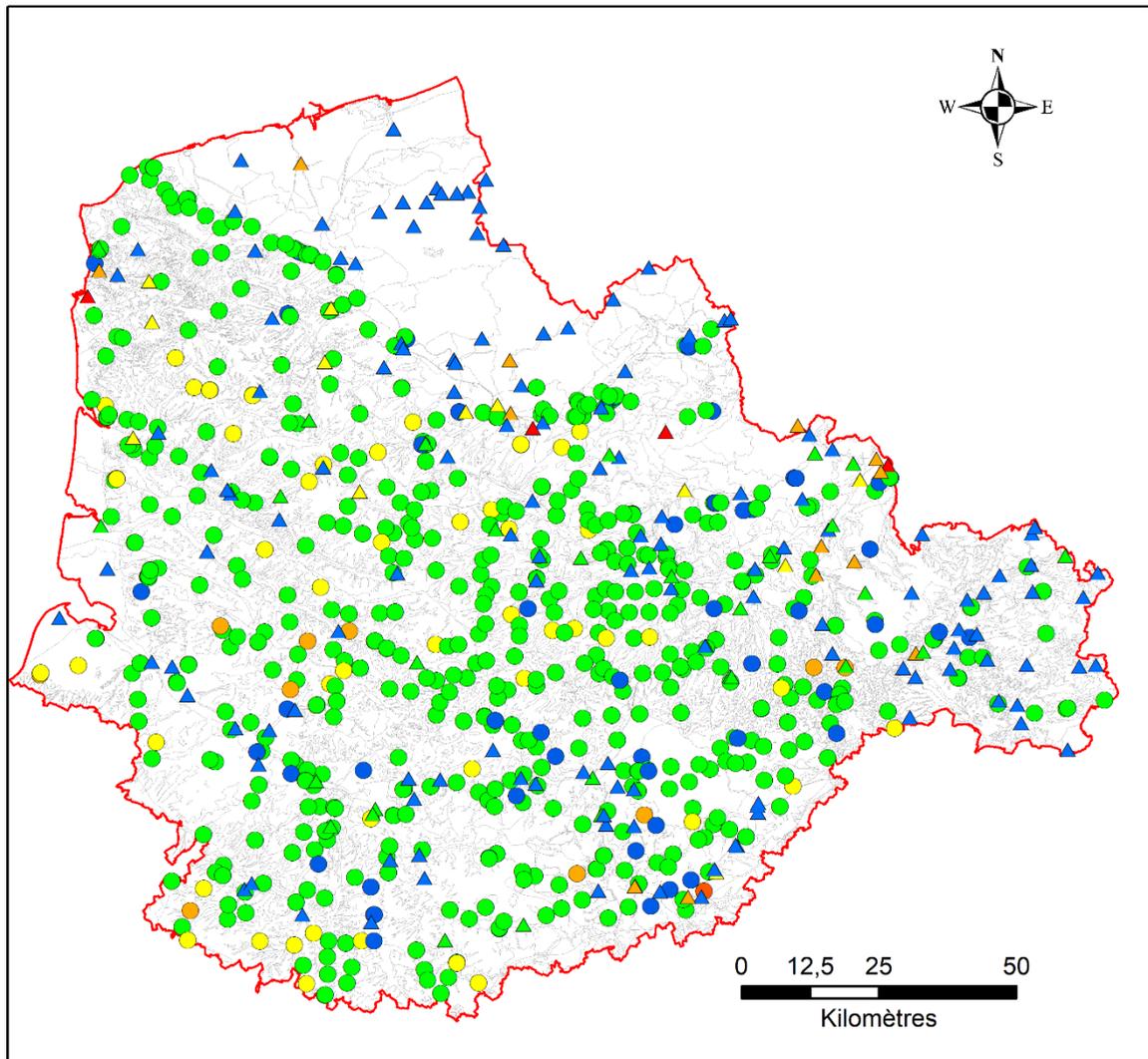
De manière surprenante on retrouve proportionnellement plus de points d'eau ESU que de points d'eau ESO avec des valeurs supérieures à 0.1mg/L en atrazine. En effet, l'atrazine n'étant plus utilisée depuis de nombreuses années on peut considérer que sa présence dans les cours d'eau provient principalement des eaux souterraines et/ou de lessivage de sols très riches en cette molécule (incluant d'éventuels sites contaminés).

L'interprétation dans les secteurs pour lesquels on ne dispose pas d'informations sur les eaux souterraines est délicate du fait que l'on n'a pas étudié, dans le cadre de ce projet, les secteurs et modalités d'utilisation de l'atrazine lorsque cette molécule était vendue. Ceci est le cas des Sables du Landénien des Flandres où l'on ne trouve pas d'atrazine dans les eaux sauf sur deux points d'eau sur l'Aa canalisé et vers Béthune (Illustration 96).

Sur le secteur Sambre, les concentrations en atrazine dans les eaux souterraines sont légèrement au-dessus de la LQ alors que l'on ne détecte pas d'atrazine dans les cours d'eau. Ceci confirme les faibles apports d'eau souterraine aux cours d'eau sur ce secteur. On observe également cela sur la Somme amont et vers le canal de St Quentin.

Le canal de Roubaix à Leers et Lespierre à Wattrelos montrent les plus fortes concentrations en 2019, toutefois proche ou légèrement inférieures de 0,1 µg/L.

Au vu des faibles concentrations aujourd'hui dans les eaux de surface le paramètre semble difficile d'utilisation à l'échelle de travail choisie.



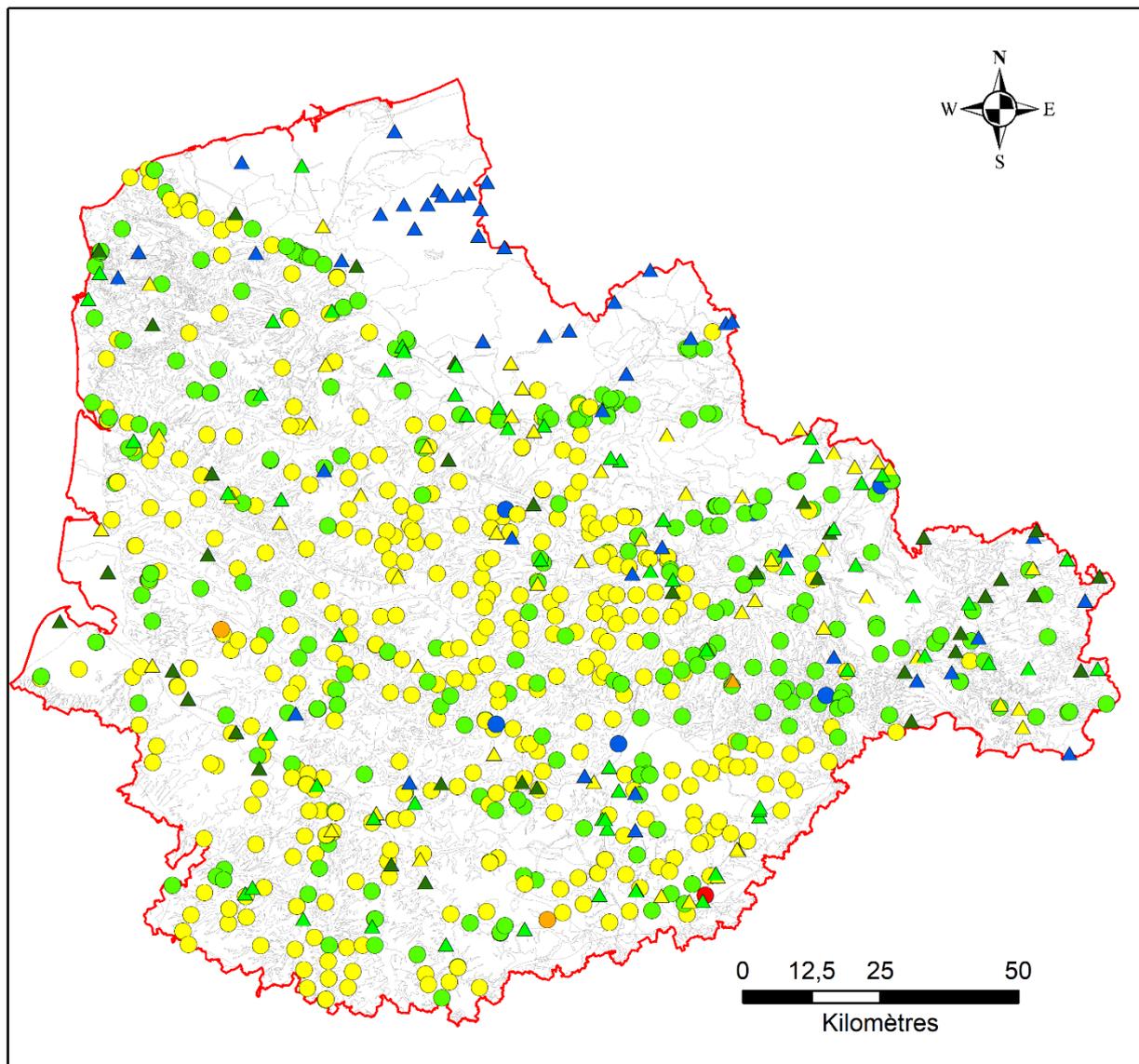
ESU - Atrazine Concentration moyenne (µg/L)		ESO - Atrazine Concentration moyenne (µg/L)	
▲	0,002 - 0,050 (LQ max : 0,05 µg/L) (140)	●	0,0125 - 0,02 (LQ max : 0,02 µg/L) (64)
▲	0,050 - 0,075 (30)	●	0,02 - 0,05 (561)
▲	0,075 - 0,1 (Norme potabilité) (12)	●	0,05 - 0,10 (Norme potabilité) (53)
▲	0,1 - 0,2 (13)	●	0,1 - 0,2 (10)
▲	0,2 - 0,3 (4)	●	0,2 - 0,3 (1)
□	Unités Fonctionnelles AP	□	Zone Etude

Illustration 96 – Répartition des concentrations moyennes en atrazine (µg/L) pour les points d'eau souterraine (ESO) et les points d'eau superficielle (ESU) du secteur d'étude.

Pour les deux produits de dégradation de l'atrazine les plus régulièrement analysées, l'atrazine déséthyl (DEA) et l'atrazine désisopropyl (DIA) les limites de détections et faibles valeurs mesurées actuellement dans les eaux de surface ne permettent pas non plus une interprétation fine des échanges.

1263 - Simazine

1 seul point ESO qui a une concentration moyenne en simazine au-dessus de 0,1 µg/L (Illustration 97). Les autres valeurs sont très faibles et la plupart du temps sous la limite de quantification (variable dans le temps). Ce paramètre n'est donc pas pertinent pour l'identification des échanges.



ESU - Simazine Concentration moyenne (µg/L)

- ▲ 0,002 - 0,010 (45)
- ▲ 0,010 - 0,015 (36)
- ▲ 0,015 - 0,020 (64)
- ▲ 0,020 - 0,05 (LQ max) (53)
- ▲ 0,05 - 0,0625 (1)

Unités Fonctionnelles AP

ESO - Simazine Concentration moyenne (µg/L)

- 0,005 - 0,010 (6)
- 0,010 - 0,020 (LQ max : 0,02 µg/L) (284)
- 0,020 - 0,050 (396)
- 0,050 - 0,100 (Norme potabilité) (2)
- 0,100 - 0,104 (1)

Zone Etude

Illustration 97 – Répartition des concentrations moyennes en simazine (µg/L) pour les points d'eau souterraine (ESO) et les points d'eau superficielle (ESU) du secteur d'étude.

4.5.6. Autres substances phytosanitaires

Rapport métolachlore OXA/ESA

Les propriétés de deux des métabolites du métolachlore étant différentes, les transferts de ces molécules au travers de la zone non saturée sont différents et donc le rapport entre les deux molécules peut varier pour les eaux de surface (ruissellement) et les eaux souterraines.

Ces métabolites sont analysés depuis peu d'années et on dispose donc seulement de 83 ratios calculés à partir des analyses disponibles pour le métolachlore OXA et ESA à la même date, couvrant la période 2016 -2018 pour les eaux souterraines et 10 pour les eaux de surface pour l'année 2017 (Illustration 98). On dispose donc de trop peu d'analyses au-dessus du seuil de détection pour pouvoir utiliser cette information.

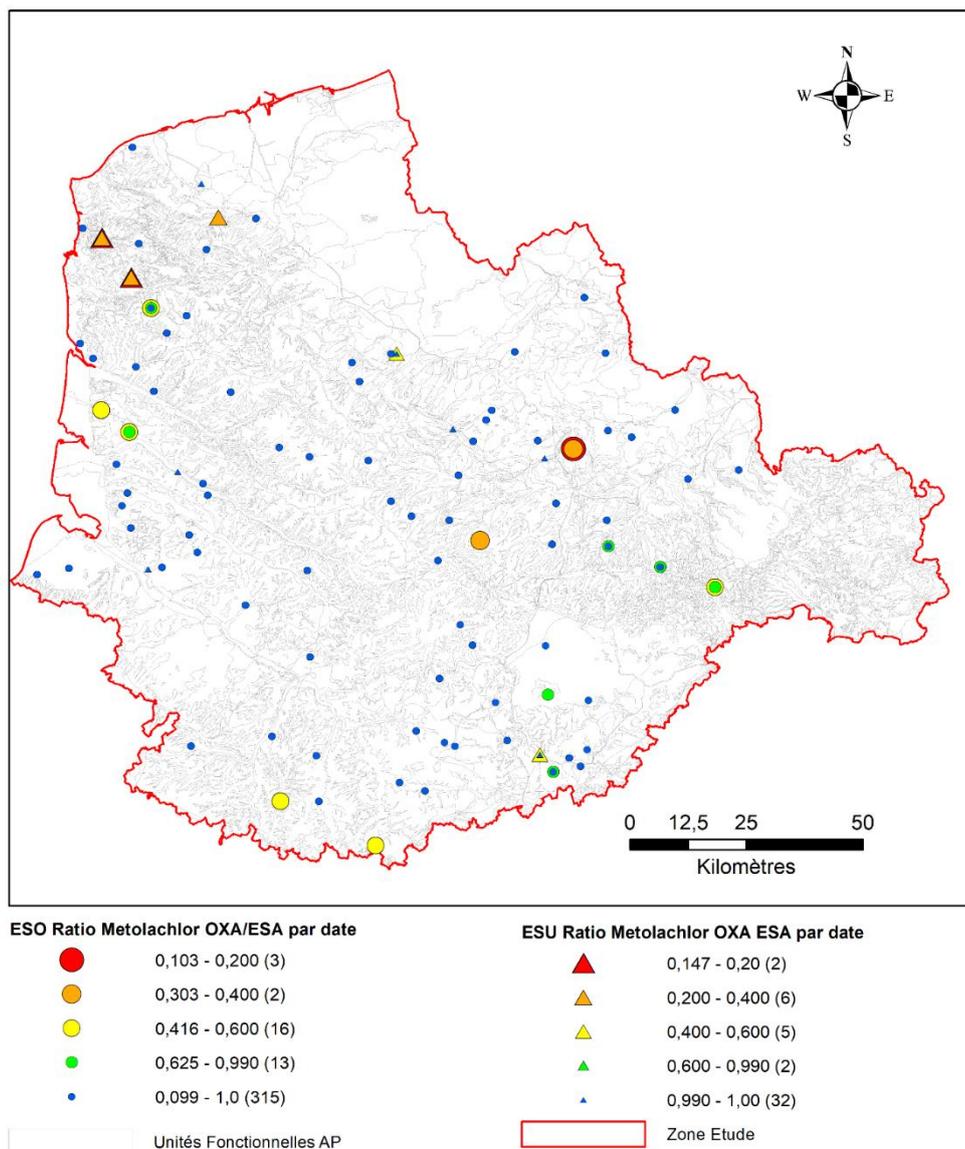


Illustration 98 – Répartition des ratios métolachlore OXA/ESA par date ($\mu\text{g}/\mu\text{g}$) pour les points d'eau souterraine (ESO) et les points d'eau superficielle (ESU) du secteur d'étude.

4.5.7. Perchlorate

Les ions perchlorates étant, hors sites industriels, d'usage ancien, leur présence dans les eaux de surface dénoterait d'apports par les eaux souterraines.

Si les analyses de ces ions perchlorates sont conséquentes depuis quelques années dans les eaux souterraines, elles restent rares pour les cours d'eaux. En effet on ne compte que 10 analyses d'eau de surface en 2017.

Pour les eaux souterraines on dispose de 698 analyses sur la période 1970 à 2017 correspondant à 68 points d'eau. La pollution par les ions perchlorates est bien localisée, avec dépassement des 15 µg/L (norme de potabilité) pour les eaux de la craie du centre du bassin.

On observe une relative bonne correspondance entre la concentration en perchlorate observée dans les ESO et les concentrations dans les ESU à proximité pour les rares points de mesure disponibles. La Scarpe canalisée à Brebières en amont de Douai et un affluent de la Somme montrent des concentrations en perchlorate qui, en l'absence de sites et/ou sols pollués (SSP) sur le secteur, indiqueraient des échanges avec les eaux souterraines.

Le perchlorate est donc plutôt un bon indicateur, mais le réseau de point de surveillance des eaux de surface n'est pas assez dense.

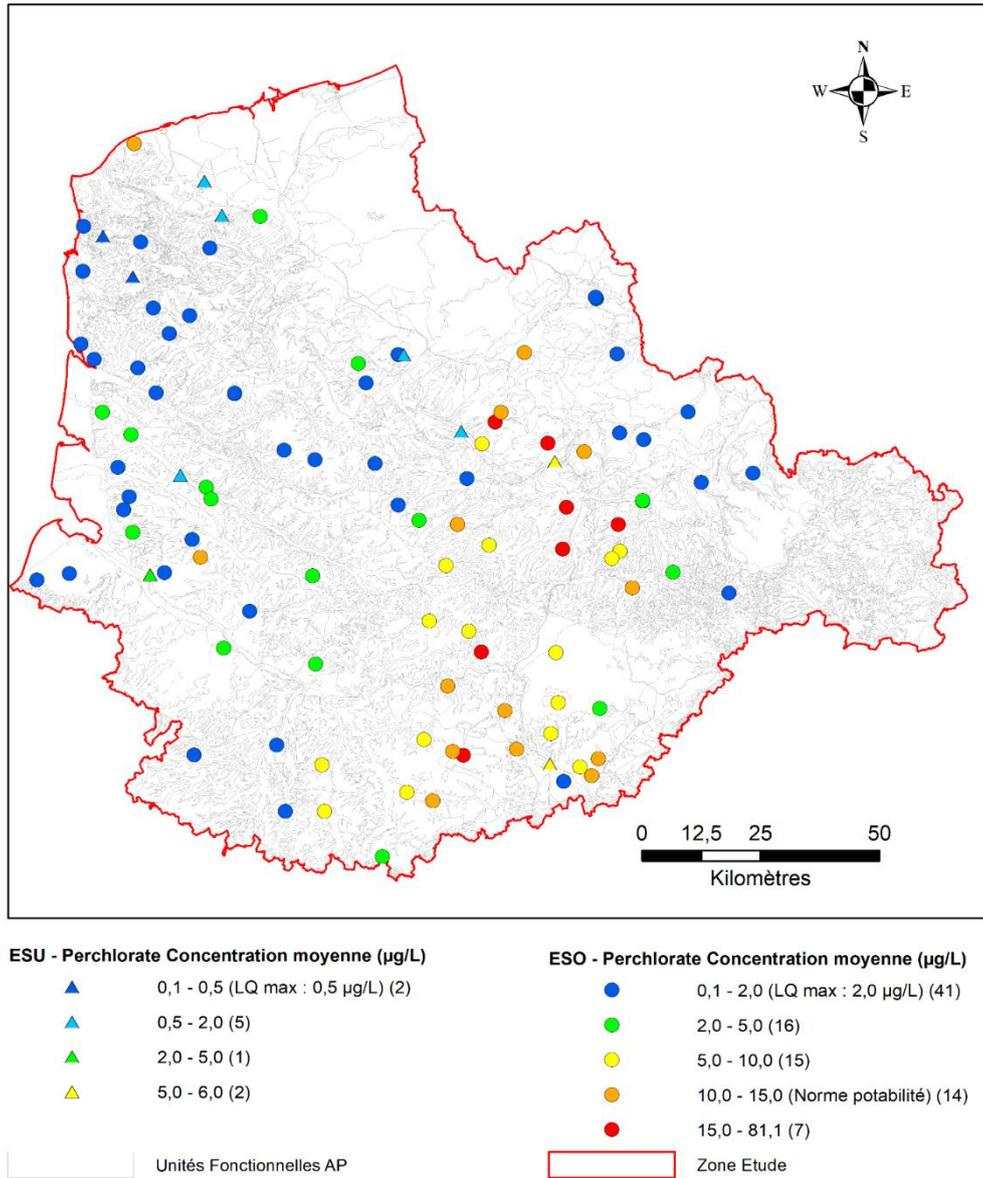


Illustration 99 – Répartition des concentrations moyennes en perchlorate (µg/L) pour les points d'eau souterraine (ESO) et les points d'eau superficielle (ESU) du secteur d'étude.

4.6. INDICATEURS QUALITE PROPOSES ET CONCLUSIONS DES APPORTS DE L'HYDROCHIMIE

Du fait de la différence de volumes d'eau entre un aquifère (même de faible ampleur) et un tronçon de cours d'eau à un moment donné il est impossible d'étudier, à cette échelle de travail et pour les données disponibles, l'influence des cours d'eau sur la chimie des eaux souterraines. Pour cela il faudrait un point de suivi des eaux souterraines proche du cours d'eau et des échanges importants avec la rivière. Ce sont donc uniquement les apports des nappes aux rivières qui ont été appréhendés dans cette étude exploratoire.

4.6.1. Les indicateurs

Température

L'indicateur de température et plus particulièrement la présence d'eau très froide en hiver et la grande amplitude des températures sur l'ensemble de l'année ont montré leur pertinence dans cette analyse des relations nappes-rivières. En effet, si les températures des cours d'eau sont largement inférieures à celles des eaux souterraines alors on peut penser que le soutien en hiver des rivières par les nappes est important. De plus, une amplitude faible des températures sur l'ensemble de l'année présage d'un apport d'eau souterraine permettant de tamponner ces variations de températures.

Les biais de cette analyse sont - une comparaison de l'amplitude pour des dates/nombres de mesures non identiques pour toutes les stations et surtout la non prise en compte des débits des rivières. En effet, une rivière de faible débit enregistrera l'influence de la température de l'air de manière plus forte qu'une rivière à fort débit. De plus l'analyse sur la base sur l'hypothèse d'une température relativement stable des eaux souterraines. Ceci peut être localement faux, notamment pour des aquifères de surface de faibles extensions ou en forte relation avec la rivière (et donc échanges rivières-> nappes possibles une partie de l'année). Les nappes d'accompagnement sont concernées ou les secteurs comme la plaine maritime ou les aquifères sont de faibles profondeurs et extensions ainsi que les aquifères de limons de plateaux sur le nord du bassin.

De plus deux années ont été prises en compte. Les amplitudes de température pourraient être plus grandes sur d'autres années mais il n'est pas possible ici d'étudier toutes les conditions hydriques possibles sur le bassin.

pH

Le pH varie selon la lithologie des formations drainés et des types de sols mais également par équilibre avec la pCO₂. Si l'on constate une concordance spatiale entre les pH des eaux de surface et des eaux souterraines, ceci ne peut pas être attribué directement à des échanges entre ces deux masses d'eau. Le pH n'est donc pas un bon indicateur des échanges nappes-rivières.

Conductivité électrique

Ce paramètre paraît fiable d'utilisation car il est très souvent mesuré et les appareils de mesure sont précis. De plus on attend un grand contraste entre des eaux de pluies, faiblement minéralisées et donc de conductivité faible et les eaux souterraines ayant circulées des dizaines

d'années au sein de formations carbonatées et donc de conductivité moyenne à élevée. Bien-sûr, une eau de rivière issue principalement d'une nappe qui se ré-infiltrerait pour réalimenter un autre tronçon de rivière plus en aval ne peut être détectée pour l'utilisation de cet outil.

On constate que les eaux de surface de l'ensemble du bassin couvert par des formations de craie ou calcaire ont des conductivités proches de celles des eaux souterraines indiquant donc globalement un fort soutien des rivières par les nappes.

Une des limites à l'interprétation est la sensibilité du paramètre conductivité à des pollutions locales anthropiques ou pollutions diffuses comme le nitrate. Sur certains secteurs l'influence anthropique peut masquer la variabilité naturelle qui est utilisée dans cette étude comme indicateur des échanges nappes-rivières.

Lorsque la conductivité des eaux de surface est faible au regard des eaux souterraines alors on suppose peu ou pas de décharge des eaux souterraines vers les eaux de surface. Ceci est le cas du secteur des calcaires de l'Avesnois (BV de la Sambre), la Somme amont et canal de St. Quentin. Une analyse de l'évolution de la conductivité des cours d'eau de l'amont vers l'aval pour quelques grands fleuves a permis de mettre en avant les forts apports souterrains pour la Canche ou l'Authie. Par contre on note une variabilité plus difficile à interpréter sur la rivière Somme. Ceci pourrait être dû au positionnement des stations de mesure et leur possible influence de la chimie des affluents.

Le paramètre conductivité électrique est donc un bon indicateur des grandes tendances générales d'échanges nappe-rivière mais est inutilisable en contexte de fortes pressions anthropiques (contamination locales des sols, rivières, nappes) ou en secteur côtier où les embruns et intrusion saline font rapidement et fortement évoluer la conductivité des eaux.

Paramètres chimiques

Les éléments hydrogénocarbonates, calcium, chlorure, magnésium et les rapports molaires Ca/Cl, Mg/HCO₃ ont été étudiés ici. D'autres rapports molaires auraient pu être pris en compte mais la masse de données à traiter rend le travail fastidieux et à amener à privilégier les paramètres les plus utilisés pour les études hydrogéochimiques.

Le Ca, HCO₃, Mg sont majoritairement d'origine naturelle ce qui permet d'éviter que le signal d'échange recherché ne soit caché par des effets de pollutions locales. Ces paramètres ont permis de confirmer les faibles échanges nappes-rivières du bassin de la Sambre et de la Somme amont.

Le chlorure présente le problème d'être à la fois influencé par les embruns et intrusions salines, les pressions agricoles et urbaines. Il est donc de fait peu utilisable sur certains secteurs anthropisés ou région côtière. Il en est de même pour le sulfate. Ces deux paramètres n'ont permis d'identifier que peu de relations nappes-rivières sur le bassin. Ces deux paramètres ne sont pas pertinents d'utilisation à l'échelle de travail du bassin.

Les rapports molaires semblent un peu plus intéressants pour l'évaluation des échanges car, contrairement aux éléments Ca, HCO₃, Mg qui n'ont apporté des informations que sur les faibles relations entre nappes et cours d'eau, ce paramètre renforce les informations apportées par l'analyse de la conductivité sur l'importance du soutien des cours d'eau par les nappes dans tout le secteur crayeux du bassin.

Deux éléments traces ont également été étudiés du fait de leur possible présence naturelle à des concentrations élevées (fond hydrogéochimique élevé), le fluorure et le nickel.

Le fluorure n'est pas un bon indicateur du fait du faible nombre de données au-dessus des limites de quantification pour les ESO et les ESU.

L'indicateur nickel ne peut être utilisé que sur le secteur identifié dans les études antérieures comme à fond hydrogéochimique élevé. Il pourrait alors indiquer de faibles relations entre ESO et ESU mais les très faibles teneurs mesurées et donc la faible influence sur les concentrations de l'effet de dilution des eaux de surface par les eaux souterraines est trop important pour que l'on puisse considérer cette information comme fiable.

Composés azotés

Parmi les trois paramètres considérés, NO_3 , NO_2 et NH_4 , seul le nitrate est considéré comme un bon indicateur. En effet les processus nombreux intervenant dans le cycle de l'azote, nitrification, dénitrification, fixation, minéralisation, la faible stabilité du NO_2 dans l'environnement et la spécificité de la zone hyporhéique rendent le NO_2 et NH_4 difficile à interpréter en terme de relations nappes-rivières. Pour le nitrate, les fortes concentrations relevées dans les eaux souterraines et le grand nombre de données disponibles ont permis d'étudier la variabilité temporelle de ce paramètre. On est parti du principe que de fortes concentrations en nitrate dans les eaux de surface toute l'année s'expliquait par un fort soutien des eaux souterraines, elles même enrichies en nitrate. L'année des variabilités des concentrations en nitrate sur l'année 2018 a permis de mettre en évidence des secteurs identiques aux secteurs soulignés par l'étude du paramètre température. Lorsque les débits sont faibles on note une dénitrification et donc des concentrations en nitrate des cours d'eau basses ou inférieures aux limite de quantification. Un échange avec les nappes reste possible mais si les échanges sont intenses on peut supposer que le processus de dénitrification (qui se déroule alors dans la zone hyporhéique) n'agit plus. Ceci peut ne pas être vrai pour tous les cours d'eau identifiés.

Autres contaminants

Le premier groupe de contaminants testé comporte des molécules d'usage ancien, interdites depuis longtemps et donc que l'on ne devrait retrouver dans les eaux de surface que du fait des apports d'eau souterraine ancienne. Cette hypothèse souffre de deux incertitudes – on ne connaît pas les secteurs qui ont réellement connu des pressions et on ne tient pas compte des temps moyens de résidence des eaux dans les aquifères. On ne peut donc analyser que les secteurs pour lesquels les concentrations en ces éléments sont élevées dans les eaux souterraines. Parmi les molécules et produits de dégradation testés, la DIE, DEA et simazine ont montré de trop faibles taux de quantification pour être utilisés à cette échelle d'étude.

L'atrazine a permis de confirmer l'analyse fait à l'aide d'autres paramètres sur le bassin de la Sambre.

Le deuxième groupe de contaminant joue sur les propriétés de lessivage vs infiltration des métabolites du métolachlore. L'ESA et l'OXA métolachlore n'ont pas les mêmes dispositions pour atteindre les nappes et on s'attend donc à un rapport ESA/OXA différent dans les eaux de surface et les eaux souterraines. Malheureusement on dispose de trop peu de données dans les eaux de surface pour ces métabolites.

Le dernier indicateur testé, les ions perchlorates, part du même principe que pour les pesticides interdits comme l'atrazine. Aujourd'hui, seules quelques industries peuvent rejeter involontairement des ions perchlorates dans l'environnement. Toutefois on note de nombreuses sources anciennes de perchlorates comme le désobusage, l'usage d'engrais chilien. On note ainsi localement des concentrations élevées en perchlorates dans les eaux souterraines. Il existe trop peu de données de concentration des ions perchlorate dans les eaux superficielles pour mettre l'analyse complète de cet indicateur qui semble pertinent et doit être retenu dans le futur lorsque l'on disposera de plus de données pour les cours d'eau. Il est toutefois nécessaire de compléter cette analyse par un inventaire des sources actuelles possibles de perchlorate (SSP, industries).

4.6.2. Les apports de l'hydrochimie sur la connaissance des échanges nappes-rivières

L'ensemble des indicateurs a permis de dégager de grandes tendances (cf Tableau 12 et Illustration 100) :

- **faibles interactions** dans les secteurs de la plaine maritime, vallée de la Lys aval, l'Avesnois Thiérache, la Somme canalisée en aval de Abbeville, la rivière Somme en amont du bassin,
- **interactions moyennes** ou d'importance saisonnière dans le secteur de Lille (Mélantois), l'Escaut canalisé, le Boulonnais et
- les plus **fortes interactions** pour les secteurs de la craie du Séno-Turonien, fleuves Canche, Authie, Somme moyenne et affluents de la Somme.

Dans le détail on constate que les indicateurs tendent, à quelques exceptions près dans de mêmes directions. Des raisons de ces quelques divergences sont la difficulté de qualifier les situations « moyennes » et leurs limites, la solidité plus ou moins grande des indicateurs, la signification différente des indicateurs. Par exemple, la présence d'eau de rivière très froide indique, sur une période, l'absence de décharge d'eau souterraine. Par contre une forte variabilité de la concentration en nitrate indique un apport d'eau de ruissellement/pluie important une partie de l'année. Ces deux informations sont différentes en termes de fonctionnement hydrologique.

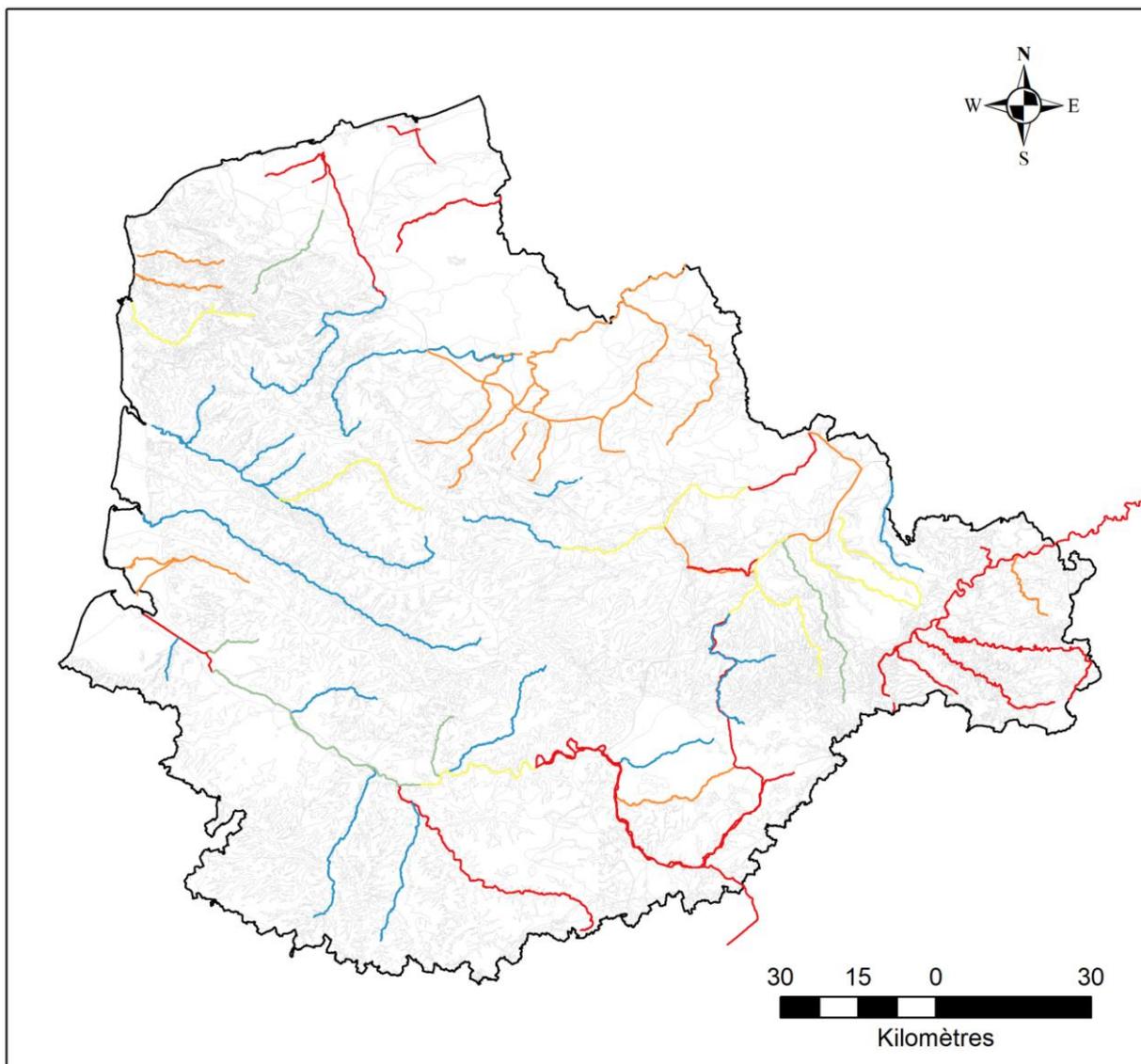
Aux informations acquises dans cette étude ont été ajoutées les résultats d'études utilisant les mêmes indicateurs et cités dans la colonne (autres apports).

Secteur	Cours d'eau	Relations ESO > ESU	Paramètres	Autres apports
Bassin de la Somme	Hallue	forte	NO ₃ , Mg/HCO ₃ , Mg, Cl T	BRGM/51827-FR
		moyenne		
	Ancre	forte	Mg, Cl	BRGM/51827-FR
	Avre	faible	Cl, T	BRGM/51827-FR
	Noye	forte	T, NO ₃	
	Selle	forte	T, Mg, Cl	BRGM/51827-FR
	Nièvre	forte	T, NO ₃	
	Trie	forte	T	
	Cologne	forte	T, NO ₃	
	Omignon	moyenne Faible	NO ₃ T	

	Scardon	forte moyenne	T NO ₃	
	Somme canalisée centrale	Forte moyenne	NO ₃ , C T	
	Somme aval canalisée (aval Abbeville)	faible	T, NO ₃	
	Somme canalisée amont et rivière centrale	faible	T	
	Somme rivière secteur canal Saint Quentin	faible	T, NO ₃ , C, HCO ₃ , Ca, Cl, NO ₂ , atrazine	
	Canal de St Quentin	faible	C, HCO ₃ , Ca, Cl	
	Maye et canal de la Maye	moyenne faible	NO ₃ T	
Vallée de l'Authie	Authie	forte	NO ₃ , C, Ca/Cl, Mg/HCO ₃	
Vallée de la Canche	Canche	forte	T, NO ₃ , C, Ca/Cl, Mg/HCO ₃	
	Course	forte	T, NO ₃	
	Planquette	forte	T	
	Créquoise	forte	NO ₃	
	Ternoise	moyenne	T, NO ₃	
Boulonnais - littoral	Slack	moyenne faible	NO ₃ T	
	Wimereux	moyenne faible	T NO ₃	
	Liane	moyenne	T, NO ₃	
	Hem	moyenne fort	NO ₃ T	
Plaine Maritime	Canal de Mardyck	faible	T, NO ₃	
	Bergues	faible	T, NO ₃	
	Grand Drack, rivière Oye	faible	NO ₃	
	Aa canalisé	faible	T, NO ₃	
Audomarois	Rivière Aa	forte	NO ₃	
	Yser	faible	T, NO ₃	
Plaine de la Lys	Lys	forte	NO ₃	
	Lys canalisé en aval	moyenne faible	NO ₃ T	
	Lawe	moyenne faible	NO ₃ , Ni/Cr, Ca/Cl, T, F, NH ₄	

	Clarence	moyenne faible	NO ₃ , Ni/Cr, Ca/Cl T, F, NH ₄	
Béthune- Lens	Souchez	forte	NO ₃ , Ca/Cl	
	Loisne	moyenne/faible	T, NO ₃ , Ni/Cr, Ca/Cl, F, NH ₄	
	Surgeon	moyenne/faible	T, NO ₃ , Ni/Cr, Ca/Cl, F, NH ₄	
	Canal de l'Aire	faible moyenne	T, NO ₃ Ca/Cl	
Mélantois	Deûle canalisée	moyenne faible	T, NO ₃ , NO ₂ HCO ₃ , Ca/Cl	
	Marque	moyenne faible	T NO ₃ , HCO ₃	
Artois- Douaisie	Scarpe rivière	fort	T, NO ₃	
	Scarpe canalisée amont	Moyenne	NO ₃ , NO ₂ , perchlo	
	Scarpe canalisée aval	Faible	T, NO ₃ , Ni	
Hainaut- Cambresis Escaut	Escaut fleuve	forte	C, T	
	Escaut canalisée	Faible moyenne	NH ₄ T, NO ₃	
	Sensée canalisée	moyenne faible	NO ₃ Mg, T	
	Sensée à Boucain	faible	NO ₃	
	Aunelle	fort	T	
	Erclin	moyenne	NO ₃	
	Ecaillon	moyenne	T, NO ₃	
	Rhonelle	moyenne	T, NO ₃	
	Selle/Escaut	moyenne fort	NO ₃ T	Bhurtun <i>et al.</i> , 2017
	Torrent d'Esnes	fort	T	
Bassin de la Sambre	Sambre	Faible	T, NO ₃ , C, HCO ₃ , Ca, atrazine	
	Helpe mineure	faible	T, NO ₃ , Ca	
	Helpe Majeure	faible	T, NO ₃ , Ca	
	Rivierette	faible	T, NO ₃ , Ca	
	Solre	moyenne faible	NO ₃ C	
	Flamenne	faible	NO ₃	

Tableau 12 – Résultats de l'approche « indicateur qualité » par principaux bassins



Soutien des eaux de surface par les eaux souterraines

- Faible à nul
- Plutôt faible
- Variable / difficile à statuer
- Plutôt fort
- Fort
- Zone Etude
- Unités Fonctionnelles AP

Illustration 100 – Représentation des cours d'eau du bassin selon les résultats de l'approche hydrogéochimique

4.6.3. Recommandations

Cette étude exploratoire a montré que les outils hydrogéochimiques pouvaient être de bon compléments à l'analyse des relations nappes-rivières.

Pour l'ensemble de l'étude il faut noter que la variabilité temporelle des échanges est un obstacle à l'analyse hydrogéochimique effectuée à l'échelle du bassin. Le plus souvent ce sont des situations moyennes qui ont été analysés en prenant en compte un grand nombre d'années. Pour aller plus loin la variabilité annuelle a été étudiée pour deux paramètres, la température de l'eau et la concentration en nitrate. Les résultats obtenus sont très intéressants.

De même, on ne dispose pas, pour un même cours d'eau, d'un nombre suffisant de stations de mesures des eaux de surface permettant d'évaluer clairement, d'amont vers l'aval, le changement possible des échanges nappes-rivières. L'analyse des données qualité n'a été menée que de manière très ponctuelle lorsque les données le permettaient. Pour les besoins de comparaison avec les autres approches, un effort de transposition à l'échelle du tronçon a été mené (cf. Illustration 100) mais il est probablement un peu grossier par endroit.

Enfin, le débit des rivières joue un rôle important sur la variabilité des paramètres chimiques et sensibilité aux apports des eaux souterraines. Une « normalisation » des paramètres étudiés selon l'importance des débits aurait dû être réalisé si les données étaient disponibles. Le jeu de données utilisé ne dispose pas du paramètre débit ou de manière très partielle.

A l'échelle de bassin, et pour aller plus loin il serait possible de :

- coupler l'information avec les débits des rivières afin de pouvoir mieux comparer les amplitudes de température entre elles et ainsi les relier avec l'importance des échanges nappes-rivière
- prendre en compte la variabilité de la température des eaux souterraines afin d'identifier également les secteurs où les échanges rivières->nappes sont possibles et nuancer les résultats issus de l'analyse de l'amplitude des variations de température des cours d'eau
- effectuer des bilans de masses en considérant l'ensemble des affluents des cours d'eau étudiés afin de pouvoir sur un cours d'eau estimer l'importance des apports d'eau souterraine.
- faire une analyse à des périodes contrastées (basses ou hautes eaux, hiver/été) et non plus à partir de la moyenne des concentrations
- analyser l'évolution des indicateurs le long des cours d'eau lorsque plusieurs stations de mesure sont disponibles afin d'affiner l'information sur les apports nappes->rivières et d'apporter quelques éléments complémentaires sur la pertinence des paramètres testés
- prendre en compte la forte anthropisation des cours d'eau sur le bassin, colmatage, échanges entre cours d'eau, apport artificiel d'eau souterraine, surélévation, barrages,... pour affiner les résultats et sans doute sélectionner les tronçons de cours d'eau d'intérêt pour une étude plus fine

5. Comparaison des résultats et localisation des zones à enjeux

5.1. QUALITE DES EAUX DE SURFACE EN ARTOIS-PICARDIE

5.1.1. Etat écologique

Selon le document central de l'Etat des lieux 2019, à partir des nouvelles règles d'évaluation (applicables pour le 3ème cycle de gestion) de l'état des masses d'eau, 14 masses d'eau sont en bon état en 2017 (cf. Illustration 101). 36% des masses d'eau sont déclassées par les trois éléments de qualité à savoir la biologie, la physico-chimie et les polluants chimiques spécifiques.

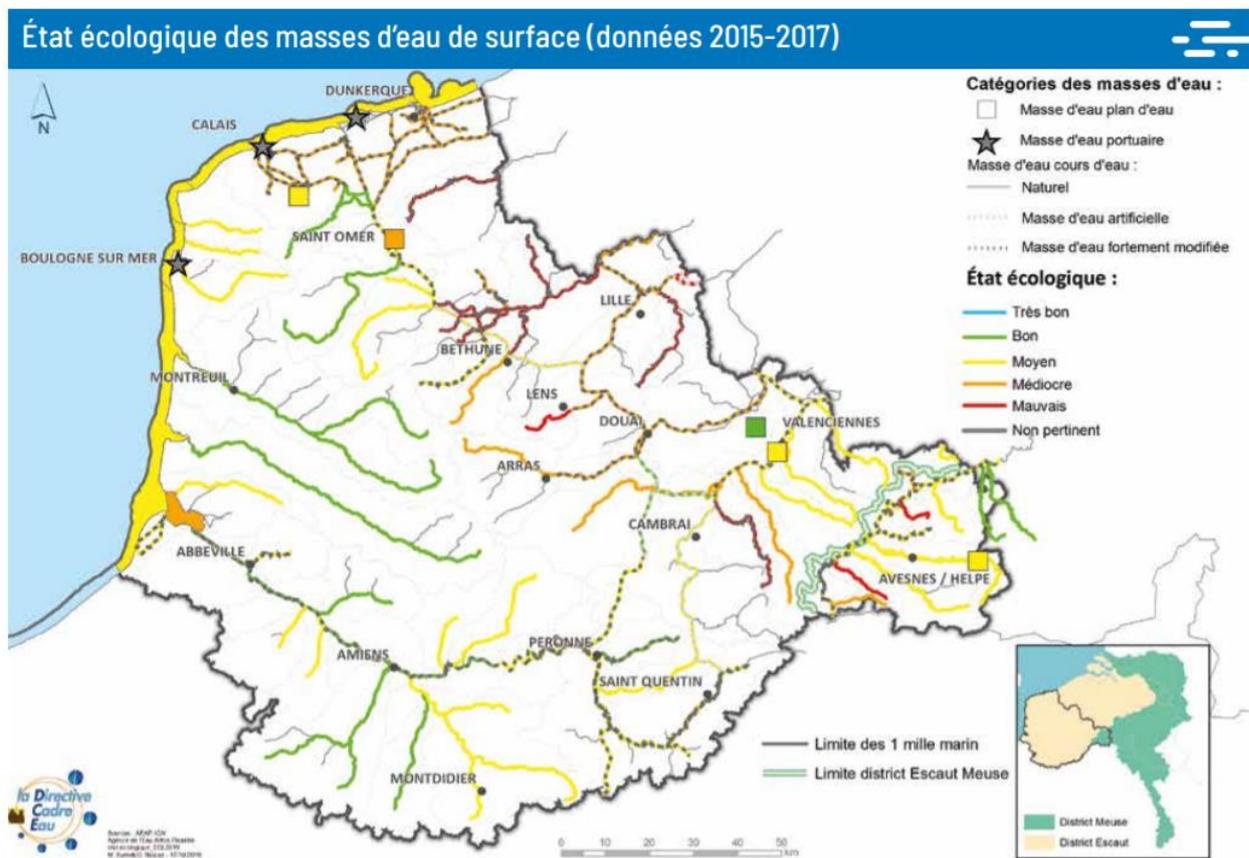


Illustration 101 – Etat écologique des masses de surface (donnée 2015-2017), État des lieux des districts hydrographiques 2019 (Agence de l'Eau Artois-Picardie, 2019).

Le tableau récapitulatif par masse d'eau est proposé ci-dessous.

Code	Masse d'eau cours d'eau	Evol. 2013 → 17	État et potentiel écologique 2017		Paramètres déclassants (règles cycle 3)
			règles cycle 2	règles cycle 3	
FRAR02, 05, 12, 13, 26, 38, 51, 55, 66 FRB2R60	Aa rivière, Authie, Canal maritime, Canche, Hem, Noye, Selle/Somme, Somme canalisée de l'écluse n°13 Sailly aval à Abbeville, Ternoise Hante	→	Bon		
FRAR01, 23, 36	Aa canalisée de confluence avec le canal de Neufossée à la confluence avec le canal de la Haute Colme, Hallue, Lys rivière	→	Bon	Moyen	Substances
FRAR11 16 37 FRB2R39	Canal du Nord, Cologne, Nièvre Thure	↗↗	Bon		
FRB2R59	Tarsy	↗↗	Bon	Moyen	Substances
FRAR40	Omignon	↘↘	Moyen		Biologie
FRAR03, 04, 06, 35, 45 FRAR47	Airaines, Ancre, Avre, Maye, Saint Landon Scardon	→	Moyen		Biologie Physico-chimie
FRB2R24	Helpe majeure	→	Moyen		Biologie Substances
FRAR30, 56 FRB2R54	Liane, Somme canalisée de l'écluse n°18 Lesdins aval à la confluence avec le canal du Nord Solre	→	Moyen		Biologie Physico-chimie
FRAR14, 57	Clarence amont, Somme canalisée de la confluence avec le canal du Nord à l'écluse n°13 Sailly aval	→	Moyen		Physico-chimie Substances
FRAR08, 10, 18, 27, 28, 41, 53, 57, 62, 65 FRB2R25, 46	Canal d'Aire à la Bassée, Canal de Saint Quentin de l'écluse n°18 Lesdins aval à l'Escaut canalisé au niveau de l'écluse n°5, Ecaillon, Hogneau, Canal de Cayeux, Rhonelle, Somme canalisée du canal du Nord à l'écluse n°13, Slack, Wimereux, Trouille Helpe mineure, Sambre	→	Moyen		Biologie Physico-chimie Substances
FRAR07, 43 FRAR58	Sensée de la source au canal Nord, Scarpe rivière Souchez	→	Moyen	Médiocre	Biologie Substances Bio Physico-chimie
FRAR20	Escaut canalisé de écluse n5 Iwuy aval à frontière	↗↗	Moyen		Biologie Physico-chimie Substances
FRAR50	Selle/Escaut	↗↗	Moyen	Médiocre	Bio Phy-ch. Subst
FRB2R15	Cligneux	↘↘	Médiocre	Mauvais	Biologie
FRB2R21	Flamenne	→	Médiocre		Physico-chimie
FRAR09, 17, 29, 49, 52 FRB2R42	Canal d'Hazebrouck, Canal de la Deûle jusqu'à la confluence avec le canal d'Aire, Lawe amont, Scarpe canalisée aval, Sensée du canal du Nord à la confluence avec l'Escaut canalisé Rivière Sambre	→	Médiocre		Biologie Physico-chimie Substances
FRAR48	Scarpe canalisée amont	↗↗	Médiocre		Physico-chimie
FRAR32, 61	Deûle canalisée de la confluence avec le canal d'Aire à la confluence avec la Lys, Delta de l'Aa	↗↗	Médiocre		Biologie Physico-chimie Substances
FRAR33	Lys canalisée nœud d'Aire à l'écluse n4 Merville	↘↘	Mauvais		Physico-chimie Substances
FRAR64 FRB2R44	Canal de Roubaix Rivièrelette	↘↘	Mauvais		Biologie Physico-chimie Substances
FRAR19, 22	Erclin, Grande becque	→	Mauvais		Physico-chimie Substances
FRAR31, 34, 63	Lys canalisée de l'écluse n°4 Merville aval à confluence avec le canal de la Deûle, Marque, Yser	→	Mauvais		Biologie Physico-chimie Substances

Tableau 13 – Etat et potentiel écologique des masses d'eau cours d'eau 2017, État des lieux des districts hydrographiques 2019 (Agence de l'Eau Artois-Picardie, 2019).

Pour les besoins de l'étude, il est proposé de considérer l'état et potentiel écologique de ces masses d'eau d'après les règles d'évaluation du cycle 3. Les masses d'eau considérées à enjeux seront celles pour lesquelles l'état est « moins que bon » du fait de la physico-chimie et/ou de substances chimiques spécifiques.

5.1.2. Etat chimique

Sur le bassin Artois-Picardie, l'Etat des lieux 2019 montre que *100% des masses d'eau cours d'eau sont en mauvais état chimique (cf. Illustration 102). Toutes les masses d'eau cours d'eau sont déclassées par les HAP et en particulier par le benzo(a)pyrène. Le fluoranthène déclassé à lui seul 85% des masses d'eau cours d'eau.*

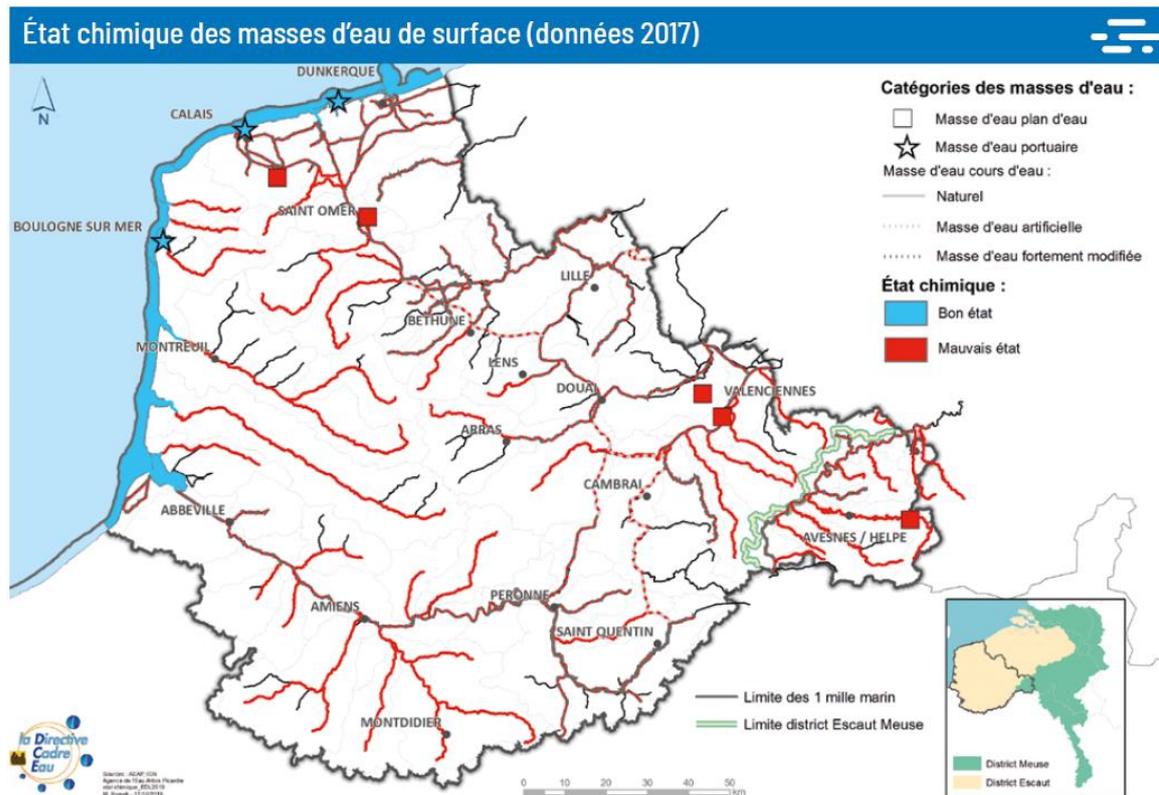


Illustration 102 – Etat chimique des masses de surface (donnée 2017), État des lieux des districts hydrographiques 2019 (Agence de l'Eau Artois-Picardie, 2019).

Etant donné le caractère systématique de ce mauvais état chimique pour les masses d'eau de surface, c'est plutôt l'état écologique qui impactera le choix des masses d'eau à « enjeux ».

5.1.3. 1^{ère} sélection des masses d'eau de surface pouvant contenir des zones à enjeux ESO/ESU

Au regard des résultats de l'Etat des lieux 2019 mené sur le bassin, le Tableau 14 ci-dessous liste l'ensemble des masses d'eau de surface et propose une sélection de celles pour lesquelles une dégradation de la qualité est avérée pour des raisons autres que biologiques. Ces masses d'eau sélectionnées seront ensuite confrontées aux résultats des approches bibliographique, géomatique et hydrogéochimique pour en déterminer des zones à enjeux ESO/ESU potentiels qui pourront faire l'objet d'investigations complémentaires pour déterminer plus précisément la teneur des échanges ESO/ESU.

Code ME Surface	Nom ME Surface	Etat écologique EDL 2019	Raisons	Tendance	Potentiel Enjeux ESO/ESU
FRAR01	AA CANALISEE DE CONFLUENCE AVEC LE CANAL DE NEUFOSSEE A LA CONFLUENCE AVEC LE CANAL DE LA HAUTE COLME	MOYEN	SUBSTANCES	STABLE	OUI
FRAR02	AA RIVIERE	BON		STABLE	NON
FRAR03	AIRAINES	MOYEN	BIOLOGIE	STABLE	NON
FRAR04	ANCRE	MOYEN	BIOLOGIE	STABLE	NON
FRAR05	AUTHIE	BON		STABLE	NON
FRAR06	AVRE	MOYEN	BIOLOGIE	STABLE	NON
FRAR07	SENSEE DE LA SOURCE AU CANAL DU NORD	MEDIOCRE	BIOLOGIE, SUBSTANCES	STABLE	OUI
FRAR08	CANAL D'AIRE A LA BASSEE	MOYEN	BIOLOGIE, PHYSICO-CHIMIE, SUBSTANCES	STABLE	OUI
FRAR09	CANAL D'HAZEBROUCK	MEDIOCRE	BIOLOGIE, PHYSICO-CHIMIE, SUBSTANCES	STABLE	OUI
FRAR10	CANAL DE SAINT QUENTIN DE L'ECLUSE N° 18 LESDINS AVAL A L'ESCAUT CANALISEE AU NIVEAU DE L'ECLUSE N° 5 IWUY AVAL	MOYEN	BIOLOGIE, PHYSICO-CHIMIE, SUBSTANCES	STABLE	OUI
FRAR11	CANAL DU NORD	BON		AMELIORATION	NON
FRAR12	CANAL MARITIME	BON		STABLE	NON
FRAR13	CANCHE	BON		STABLE	NON
FRAR14	CLARENCE AMONT	MOYEN	PHYSICO-CHIMIE, SUBSTANCES	STABLE	OUI
FRAR16	COLOGNE	BON		AMELIORATION	NON
FRAR17	CANAL DE LA DEULE JUSQU'A LA CONFLUENCE AVEC LE CANAL D'AIRE	MEDIOCRE	BIOLOGIE, PHYSICO-CHIMIE, SUBSTANCES	STABLE	OUI
FRAR18	ECAILLON	MOYEN	BIOLOGIE, PHYSICO-CHIMIE, SUBSTANCES	STABLE	OUI
FRAR19	ERCLIN	MAUVAIS	PHYSICO-CHIMIE, SUBSTANCES	STABLE	OUI
FRAR20	ESCAUT CANALISEE DE L'ECLUSE N° 5 IWUY AVAL A LA FRONTIERE	MOYEN	BIOLOGIE, PHYSICO-CHIMIE, SUBSTANCES	AMELIORATION	OUI
FRAR22	GRANDE BECQUE	MAUVAIS	PHYSICO-CHIMIE, SUBSTANCES	STABLE	OUI
FRAR23	HALLUE	MOYEN	SUBSTANCES	STABLE	OUI
FRAR26	HEM	BON		STABLE	NON
FRAR27	HOGNEAU	MOYEN	BIOLOGIE, PHYSICO-CHIMIE, SUBSTANCES	STABLE	OUI
FRAR28	CANAL DE CAYEUX	MOYEN	BIOLOGIE, PHYSICO-CHIMIE, SUBSTANCES	STABLE	OUI
FRAR29	LAWE AMONT	MEDIOCRE	BIOLOGIE, PHYSICO-CHIMIE, SUBSTANCES	STABLE	OUI

FRAR30	LIANE	MOYEN	BIOLOGIE, PHYSICO-CHIMIE	STABLE	OUI
FRAR31	LYS CANALISEE DE L'ECLUSE N° 4 MERVILLE AVAL A LA CONFLUENCE AVEC LE CANAL DE LA DEULE	MAUVAIS	BIOLOGIE, PHYSICO-CHIMIE, SUBSTANCES	STABLE	OUI
FRAR32	DEULE CANALISEE DE LA CONFLUENCE AVEC LE CANAL D'AIRE A LA CONFLUENCE AVEC LA LYS	MEDIOCRE	BIOLOGIE, PHYSICO-CHIMIE, SUBSTANCES	AMELIORATION	OUI
FRAR33	LYS CANALISEE DU NOEUD D'AIRE A L'ECLUSE N° 4 MERVILLE AVAL	MAUVAIS	PHYSICO-CHIMIE, SUBSTANCES	DEGRADATION	OUI
FRAR34	MARQUE	MAUVAIS	BIOLOGIE, PHYSICO-CHIMIE, SUBSTANCES	STABLE	OUI
<i>FRAR35</i>	<i>MAYE</i>	<i>MOYEN</i>	<i>BIOLOGIE</i>	<i>STABLE</i>	<i>NON</i>
FRAR36	LYS RIVIERE	MOYEN	SUBSTANCES	STABLE	OUI
<i>FRAR37</i>	<i>NIEVRE</i>	<i>BON</i>		<i>AMELIORATION</i>	<i>NON</i>
<i>FRAR38</i>	<i>NOYE</i>	<i>BON</i>		<i>STABLE</i>	<i>NON</i>
<i>FRAR40</i>	<i>OMIGNON</i>	<i>MOYEN</i>	<i>BIOLOGIE</i>	<i>DEGRADATION</i>	<i>NON</i>
FRAR41	RHONELLE	MOYEN	BIOLOGIE, PHYSICO-CHIMIE, SUBSTANCES	STABLE	OUI
FRAR43	SCARPE RIVIERE	MEDIOCRE	BIOLOGIE, SUBSTANCES	STABLE	OUI
<i>FRAR45</i>	<i>SAINT-LANDON</i>	<i>MOYEN</i>	<i>BIOLOGIE</i>	<i>STABLE</i>	<i>NON</i>
FRAR47	SCARDON	MOYEN	PHYSICO-CHIMIE	STABLE	OUI
FRAR48	SCARPE CANALISEE AMONT	MEDIOCRE	PHYSICO-CHIMIE	AMELIORATION	OUI
FRAR49	SCARPE CANALISEE AVAL	MEDIOCRE	BIOLOGIE, PHYSICO-CHIMIE, SUBSTANCES	STABLE	OUI
FRAR50	SELLE/ESCAUT	MEDIOCRE	BIOLOGIE, PHYSICO-CHIMIE, SUBSTANCES	AMELIORATION	OUI
<i>FRAR51</i>	<i>SELLE/SOMME</i>	<i>BON</i>		<i>STABLE</i>	<i>NON</i>
FRAR52	SENSEE DU CANAL DU NORD A LA CONFLUENCE AVEC L'ESCAUT CANALISEE	MEDIOCRE	BIOLOGIE, PHYSICO-CHIMIE, SUBSTANCES	STABLE	OUI
FRAR53	SLACK	MOYEN	BIOLOGIE, PHYSICO-CHIMIE, SUBSTANCES	STABLE	OUI
<i>FRAR55</i>	<i>SOMME CANALISEE DE L'ECLUSE N° 13 SAILLY AVAL A ABBEVILLE</i>	<i>BON</i>		<i>STABLE</i>	<i>NON</i>
FRAR56	SOMME CANALISEE DE L'ECLUSE N° 18 LESDINS AVAL A LA CONFLUENCE AVEC LE CANAL DU NORD	MOYEN	BIOLOGIE, PHYSICO-CHIMIE	STABLE	OUI
FRAR57	SOMME CANALISEE DE LA CONFLUENCE AVEC LE CANAL DU NORD A L'ECLUSE N° 13 SAILLY AVAL	MOYEN	BIOLOGIE, PHYSICO-CHIMIE, SUBSTANCES	STABLE	OUI

Identification des échanges ESO/ESU dans le bassin Artois-Picardie

FRAR58	SOUCHEZ	MAUVAIS	BIOLOGIE, PHYSICO-CHIMIE	STABLE	OUI
FRAR61	DELTA DE L'AA	MEDIOCRE	BIOLOGIE, PHYSICO-CHIMIE, SUBSTANCES	AMELIORATION	OUI
FRAR62	WIMEREUX	MOYEN	BIOLOGIE, PHYSICO-CHIMIE, SUBSTANCES	STABLE	OUI
FRAR63	YSER	MAUVAIS	BIOLOGIE, PHYSICO-CHIMIE, SUBSTANCES	STABLE	OUI
FRAR64	CANAL DE ROUBAIX - ESPIERRE	MAUVAIS	BIOLOGIE, PHYSICO-CHIMIE, SUBSTANCES	DEGRADATION	OUI
FRAR65	TROUILLE	MOYEN	BIOLOGIE, PHYSICO-CHIMIE, SUBSTANCES	STABLE	OUI
<i>FRAR66</i>	<i>TERNOISE</i>	<i>BON</i>		<i>STABLE</i>	<i>NON</i>
<i>FRB2R15</i>	<i>CLIGNEUX</i>	<i>MAUVAIS</i>	<i>BIOLOGIE</i>	<i>DEGRADATION</i>	<i>NON</i>
FRB2R21	FLAMENNE	MEDIOCRE	PHYSICO-CHIMIE	STABLE	OUI
FRB2R24	HELPE MAJEURE	MOYEN	BIOLOGIE, SUBSTANCES	STABLE	OUI
FRB2R25	HELPE MINEURE	MOYEN	BIOLOGIE, PHYSICO-CHIMIE, SUBSTANCES	STABLE	OUI
<i>FRB2R39</i>	<i>THURE</i>	<i>BON</i>		<i>AMELIORATION</i>	<i>NON</i>
FRB2R42	RIVIERE SAMBRE	MEDIOCRE	BIOLOGIE, PHYSICO-CHIMIE, SUBSTANCES	STABLE	OUI
FRB2R44	RIVIERETTE	MAUVAIS	BIOLOGIE, PHYSICO-CHIMIE, SUBSTANCES	DEGRADATION	OUI
FRB2R46	SAMBRE	MOYEN	BIOLOGIE, PHYSICO-CHIMIE, SUBSTANCES	STABLE	OUI
FRB2R54	SOLRE	MOYEN	BIOLOGIE, PHYSICO-CHIMIE	STABLE	OUI
FRB2R59	TARSY	MOYEN	SUBSTANCES	AMELIORATION	OUI
<i>FRB2R60</i>	<i>HANTE</i>	<i>BON</i>		<i>STABLE</i>	<i>NON</i>

Tableau 14 – Sélection des masses d'eau de surface selon leur état de dégradation estimé dans le cadre de l'Etat des lieux 2019

La répartition de cette première sélection de masse d'eau de surface est proposée en Illustration 103 ci-dessous.

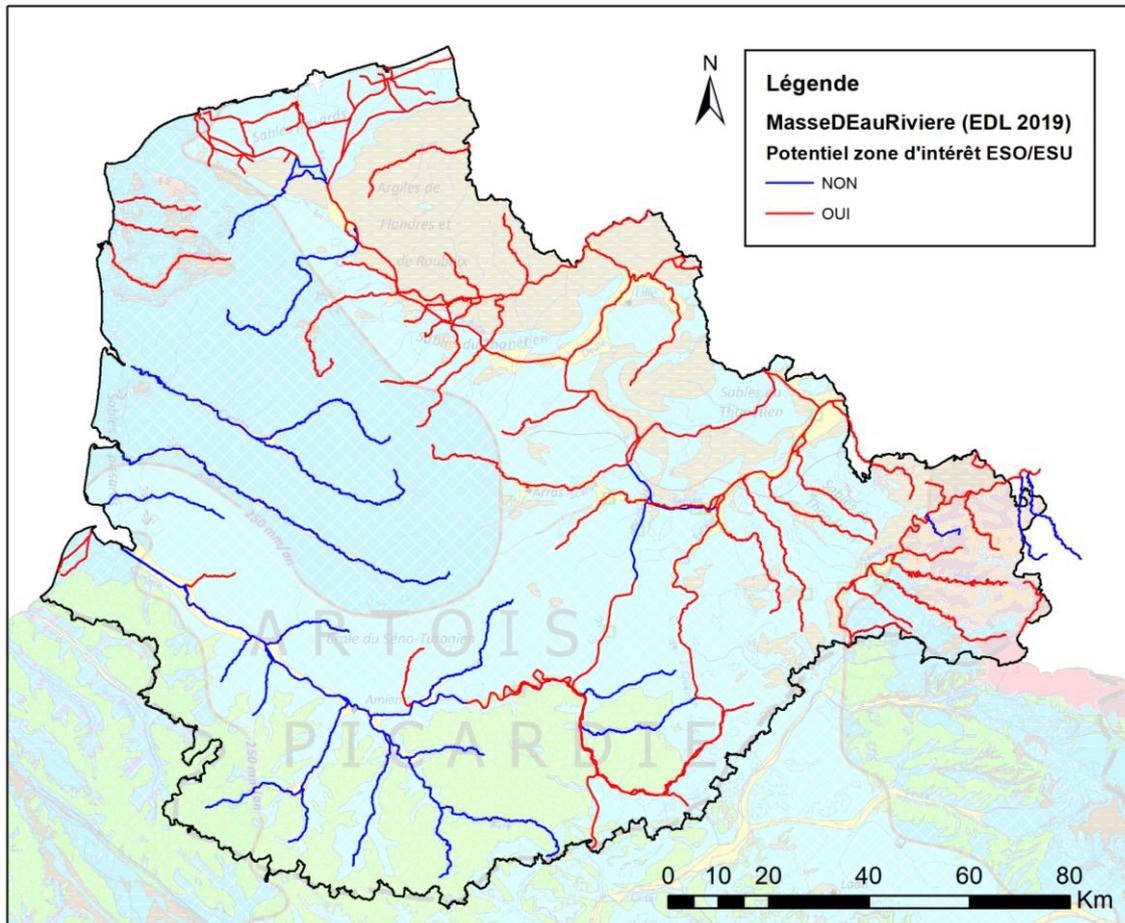


Illustration 103 – Localisation des masses d'eau de surface sélectionnées ou non d'après les résultats de l'Etat des lieux 2019

5.2. COMPARAISON DES RESULTATS DES DIFFERENTES APPROCHES ET METHODOLOGIE DE SELECTION DES ZONES D'INTERET

Pour répondre aux objectifs de l'étude, à savoir déterminer des zones d'intérêt ou à enjeux vis-à-vis des échanges ESO vers ESU, l'analyse comparative s'est concentrée sur les masses d'eau sélectionnées dans le chapitre 5.1.3 puis la méthodologie a été la suivante :

- Sélection des linéaires des masses d'eau sélectionnées ;
- Croisement de ces linéaires avec les résultats de l'approche géomatique pour distinguer les tronçons de ces masses d'eau selon le potentiel d'interaction ESO/ESU (sans véritable distinction du sens) ;
- Affectation des résultats de l'approche hydrogéochimique sur ces linéaires (possible car le « support » de cette approche est également le tronçon de cours d'eau).

Une fois ces premiers traitements effectués, une nouvelle sélection des tronçons de masse d'eau de surface dégradée selon l'EDL 2019 a été menée, afin de ne conserver que ceux se trouvant sur un secteur au potentiel d'interaction ESO/ESU mieux que « faible » (cf. chapitre 3.5.5) et pour lesquels le soutien des eaux de surface par les eaux souterraines apparaît comme différent de

- Lien potentiel entre ESO et ESU « Fort » à « Très fort » sur l'ensemble du linéaire, d'après l'approche géomatique ;
- Soutien « fort » des eaux de surface par les eaux souterraines d'après l'approche hydrogéochimique (via indicateur « NO₃ »).

Les informations apportées par la bibliographie sur le secteur (Ramon et Sangnier, 1972 ; Bessiere *et al.*, 2015) montrent effectivement qu'une large part du linéaire de la masse d'eau apparait comme favoriser le soutien des eaux de surface par les eaux souterraines (cf. Illustration 105).

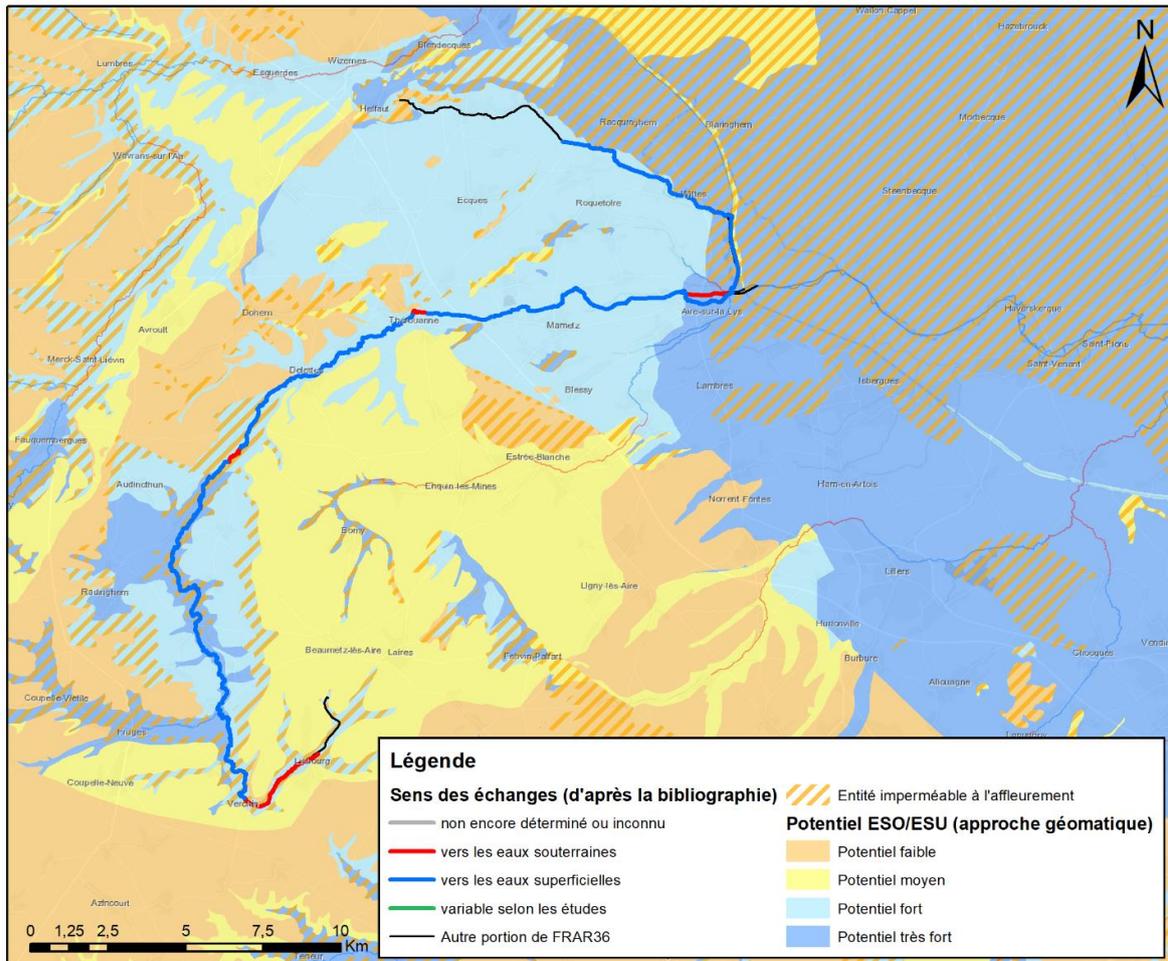


Illustration 105 – Représentation de la masse d'eau FRAR36 de la Lys rivière selon les informations apportées par l'inventaire bibliographique et l'approche géomatique

Le drainage de la nappe du Cénomanién par la Lys et les émergences principales est clairement établi au droit des cressonnières d'Herbecques, de Fruges et de Lugy. L'extrémité amont de la Lys constitue le seul secteur où aucun échange n'a véritablement pu être mis en évidence.

5.3.2. FRAR31 & FRAR33 : La Lys canalisée

Raisons :

- Etat écologique « Mauvais » d'après l'Etat des lieux 2019 (mauvaise qualité physico-chimique et polluants chimiques) ;
- Lien potentiel entre ESO et ESU « Fort » (FRAR31) à « Très fort » (FRAR33) au cœur de la vallée de la Lys d'après l'approche géomatique (à noter la présence récurrente de la formation plutôt imperméable des Argiles des Flandres à l'affleurement de part et d'autre de la vallée) ;
- Soutien « Fort » des eaux de surface par les eaux souterraines pour FRAR33 et la partie entre Saint-Venant et Merville pour FRAR31, d'après l'approche hydrogéochimique (via indicateur « NO₃ » et « température »). A contrario, la partie aval de FRAR31 semble montrer un soutien ESO vers ESU « plutôt faible ».

Le modèle de la nappe de la Craie rend compte d'un drainage des eaux souterraines par les eaux de surface, sur une large part du linéaire pour ces deux masses d'eau (cf. Illustration 106 & Illustration 107). Ceci semble cohérent avec les résultats de l'approche hydrogéochimique pour la Lys canalisée amont FRAR31. Néanmoins, pour ces deux masses d'eau de surface, il est apparu difficile d'identifier véritablement les tronçons représentatifs des stations de surface utilisées pour l'approche hydrogéochimique. Un travail plus fin serait donc nécessaire pour lever ces incertitudes.

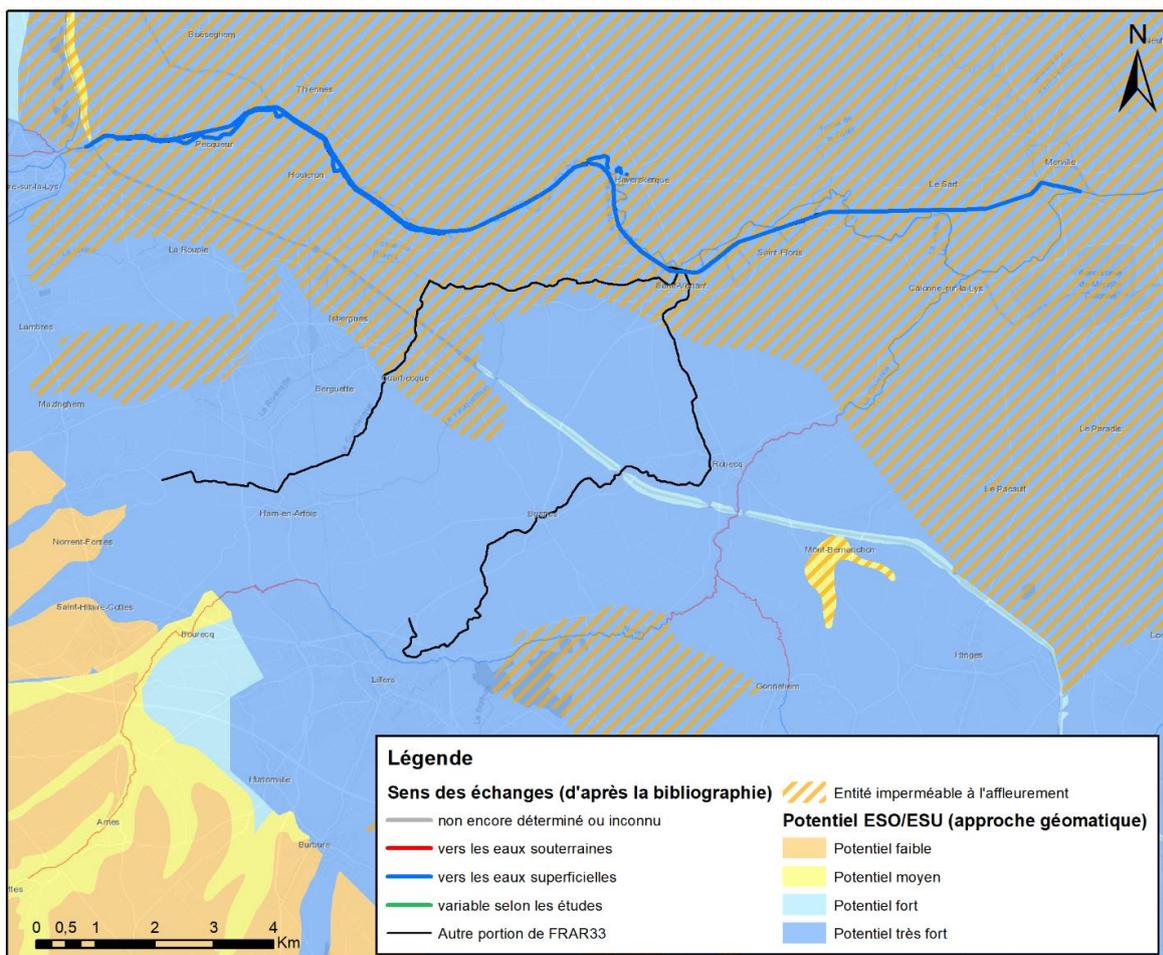


Illustration 106 – Représentation de la masse d'eau FRAR33 de la Lys canalisée selon les informations apportées par l'inventaire bibliographique et l'approche géomatique

De même, aucune information n'a pu être recueillie sur les autres tronçons de la masse d'eau FRAR33 (Rivière de Busnes et ruisseau du Guarbecques).

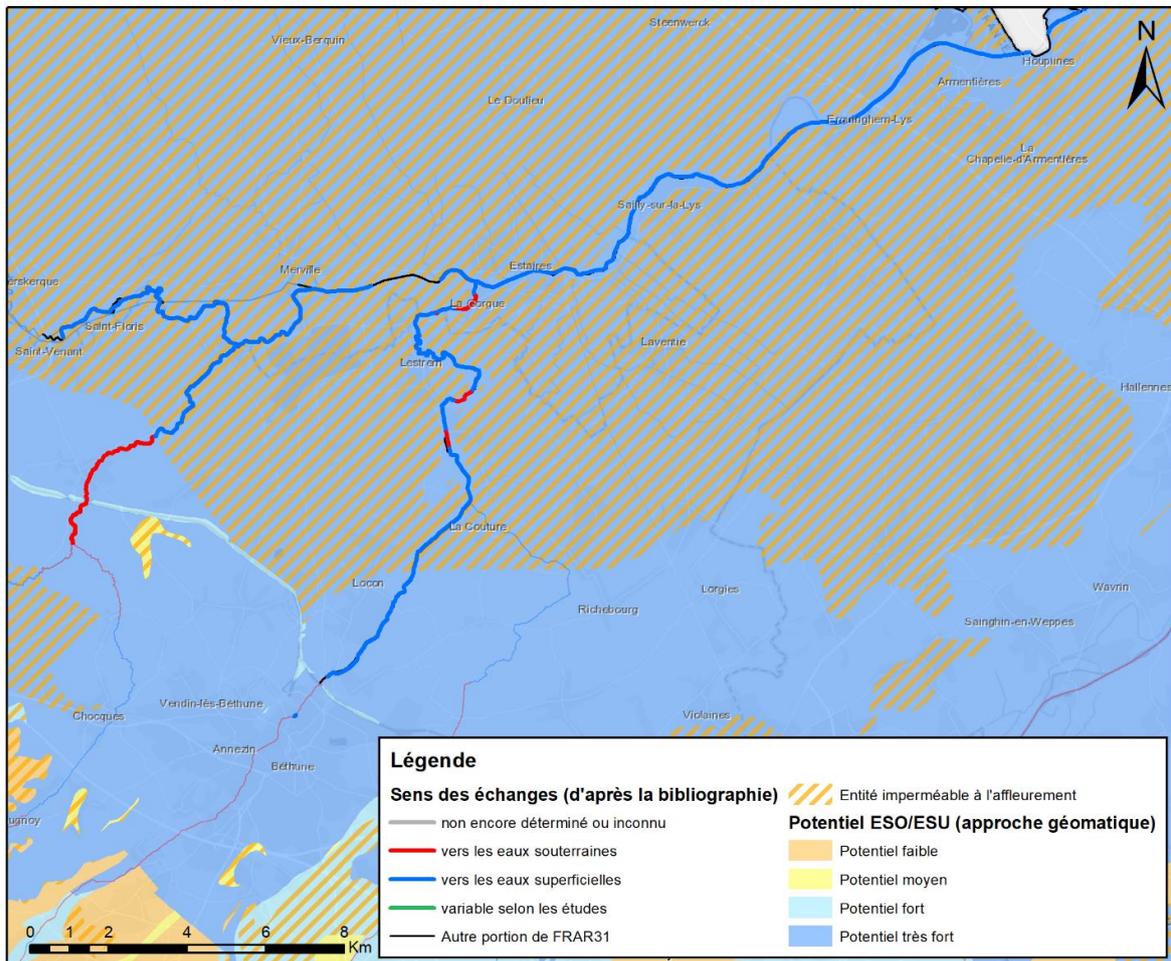


Illustration 107 – Représentation de la masse d'eau FRAR31 de la Lys canalisée selon les informations apportées par l'inventaire bibliographique et l'approche géomatique

Si un secteur devait retenir l'attention pour la masse d'eau de surface FRAR31 vis-à-vis de la potentielle influence des eaux souterraines sur les eaux de surface, ce serait le tronçon amont entre Merville et Saint-Venant (essentiellement du fait des résultats de l'approche hydrogéochimique).

5.3.3. FRAR58 : La Souchez

Raisons :

- Etat écologique « Mauvais » d'après l'Etat des lieux 2019 (mauvaise qualité physico-chimique notamment) ;
- Lien potentiel entre ESO et ESU « Fort » d'après l'approche géomatique ;
- Soutien « fort » des eaux de surface par les eaux souterraines d'après l'approche hydrogéochimique (via indicateurs « NO₃ » et ratio « Ca/Cl »).

La Souchez, en partie aujourd'hui artificialisée et canalisée, constitue le cours amont de la Deûle et connecte les collines de l'Artois et la plaine de la Lys. Cette rivière, qui irrigue et draine les villes de Lens, Liévin et Angres, a été fortement perturbée par les affaissements miniers qui ont

eu lieu dans les alentours et déborde en outre assez régulièrement. Plusieurs cas d'inondation ont été rencontrés ces dernières années, s'accompagnant également de phénomènes probables de remontées de nappe en basse vallée et dans les zones de marais environnants.

Les informations apportées par la bibliographie sur le secteur proviennent uniquement du modèle de la nappe de la craie de Bessiere *et al.* (2015). Ce dernier montre des informations contradictoires, à savoir qu'une majorité du linéaire du cours d'eau alimenterait plutôt les eaux souterraines. Néanmoins, il faut faire attention quant à l'exploitation de ces données à cette échelle. Il y a sans doute un biais de conclusion du fait de la résolution et de la finalité du modèle par rapport à la longueur de la Souchez. De plus, le contexte minier entourant ce secteur influence très probablement les interactions ESO/ESU.

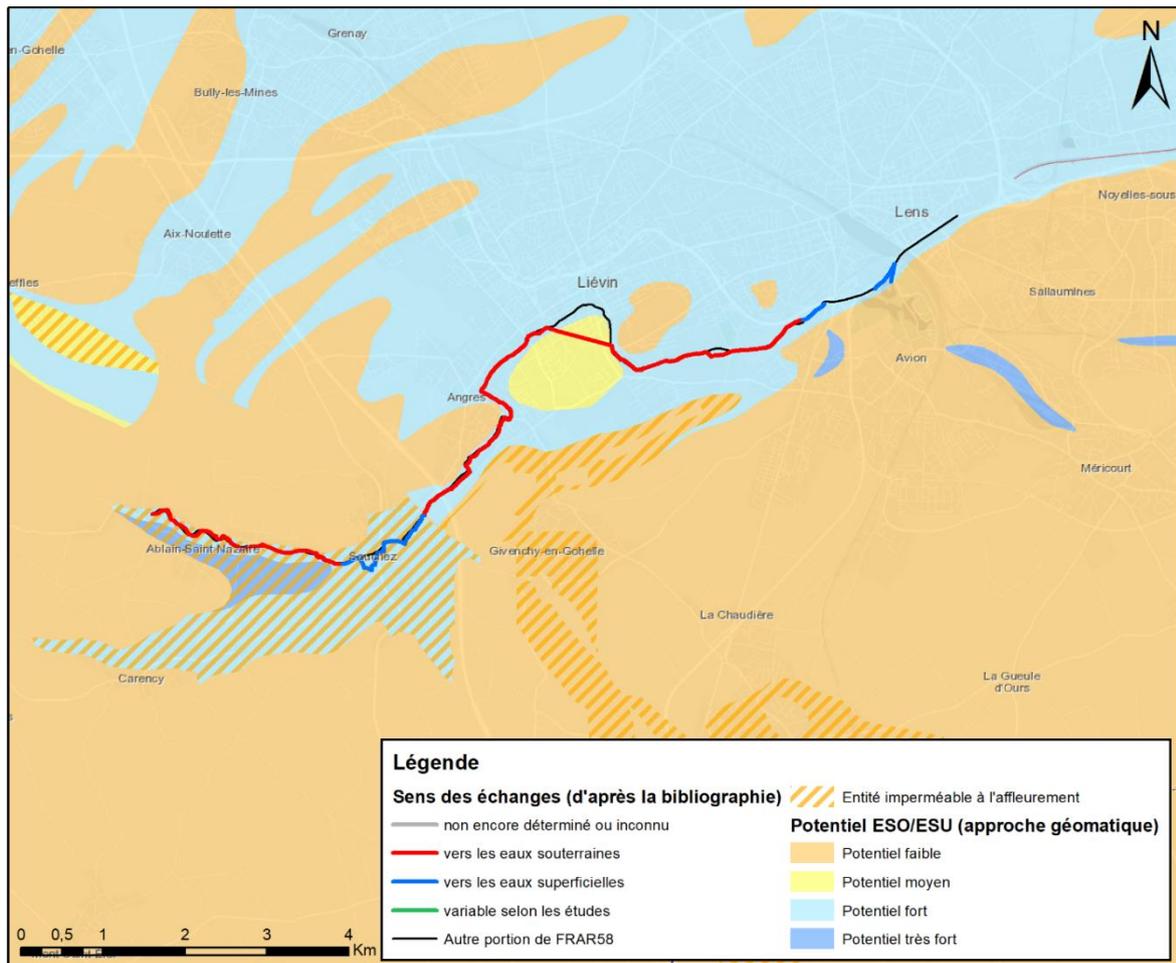


Illustration 108 – Représentation de la masse d'eau FRAR58 de la Souchez selon les informations apportées par l'inventaire bibliographique et l'approche géomatique

5.3.4. FRAR43 : La Scarpe rivière, de sa source jusqu'à Arras

Raisons :

- Etat écologique « Médiocre » d'après l'Etat des lieux 2019 (polluants chimiques) ;
- Lien potentiel entre ESO et ESU « Très fort » entre Arras et Aubigny-en-Artois puis « Faible » dans sa partie amont, d'après l'approche géomatique ;
- Soutien « fort » des eaux de surface par les eaux souterraines d'après l'approche hydrogéochimique (via indicateurs « NO₃ » et température).

Les informations apportées par la bibliographie sur le secteur (Bessiere *et al.*, 2015 ; SAGE Scarpe Amont, 2016) semblent montrer une certaine variabilité dans les interactions entre la Scarpe et la nappe de la Craie sous-jacente (cf. Illustration 109, tracé en vert).

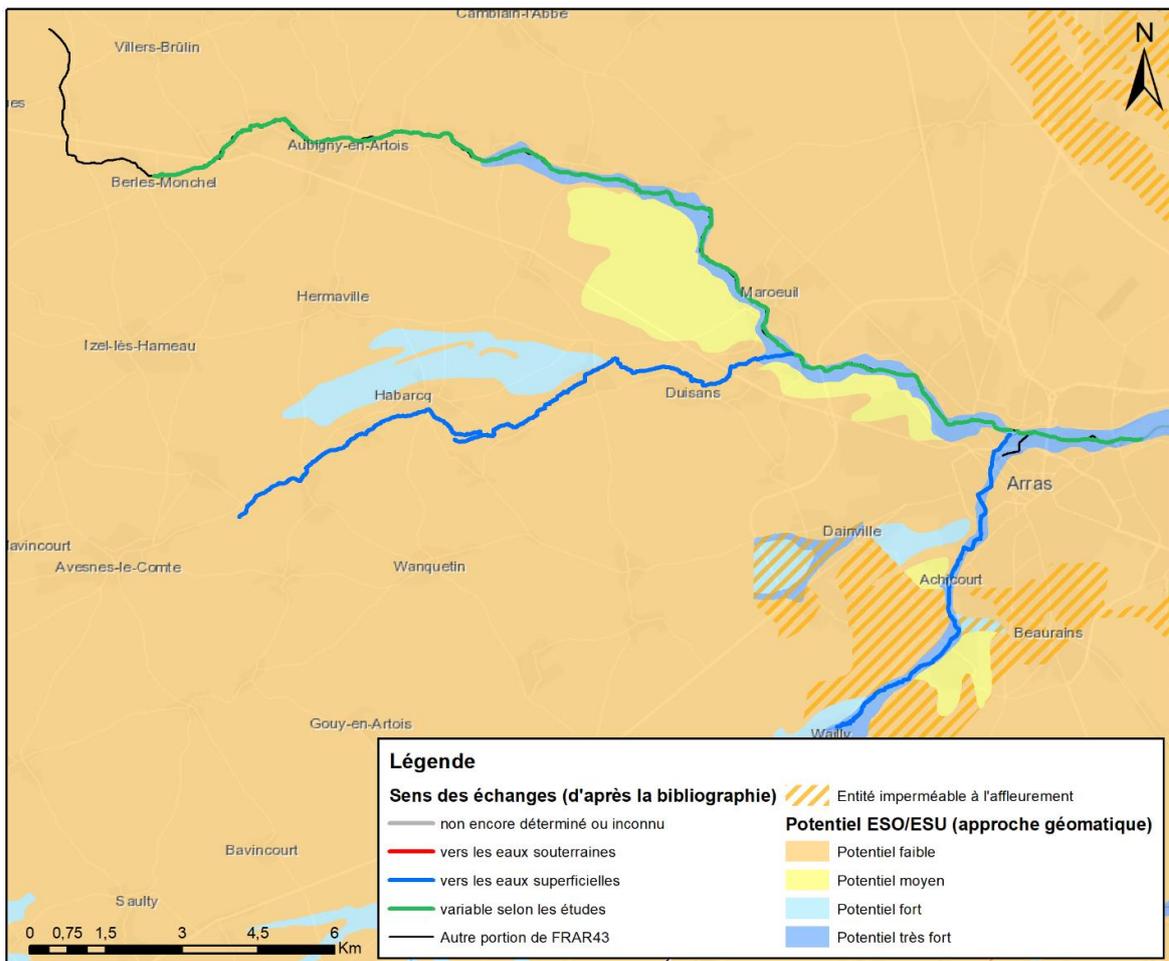


Illustration 109 – Représentation de la masse d'eau FRAR43 de la Scarpe rivière selon les informations apportées par l'inventaire bibliographique et l'approche géomatique

D'après le SAGE Scarpe amont, les cours d'eau du bassin de la Scarpe sont alimentés en situation de Hautes Eaux par la nappe de la Craie mais ils subissent aussi des étiages sévères en basses eaux, sans réel maintien de la nappe. Egalement, le drainage de la nappe est important et de nombreuses sources ont pu être recensées en amont et le long des 2 affluents de la Scarpe amont : le Crinchon, cours d'eau se jetant dans la Scarpe au niveau d'Arras, et le Gy, ruisseau passant par Habarcq et Duisans.

5.3.5. FRAR50 : La Selle, affluent de l'Escaut

Raisons :

- Etat écologique « Médiocre » d'après l'Etat des lieux 2019 (mauvaise qualité physico-chimique et polluants chimiques) ;
- Lien potentiel entre ESO et ESU « Fort » à « Très fort » sur l'ensemble du linéaire, d'après l'approche géomatique ;
- Soutien « Plutôt fort » des eaux de surface par les eaux souterraines d'après l'approche hydrogéochimique (via indicateurs « NO₃ » et « température »).

Le modèle de la nappe de la Craie (Bessiere *et al.*, 2015) semble distinguer un large secteur essentiellement alimenté par la nappe, de la source de la Selle jusqu'aux environs de Haspres. Puis le sens des échanges s'inverserait jusqu'à la confluence avec l'Escaut canalisé, avec un drainage du cours d'eau par la nappe sous-jacente.

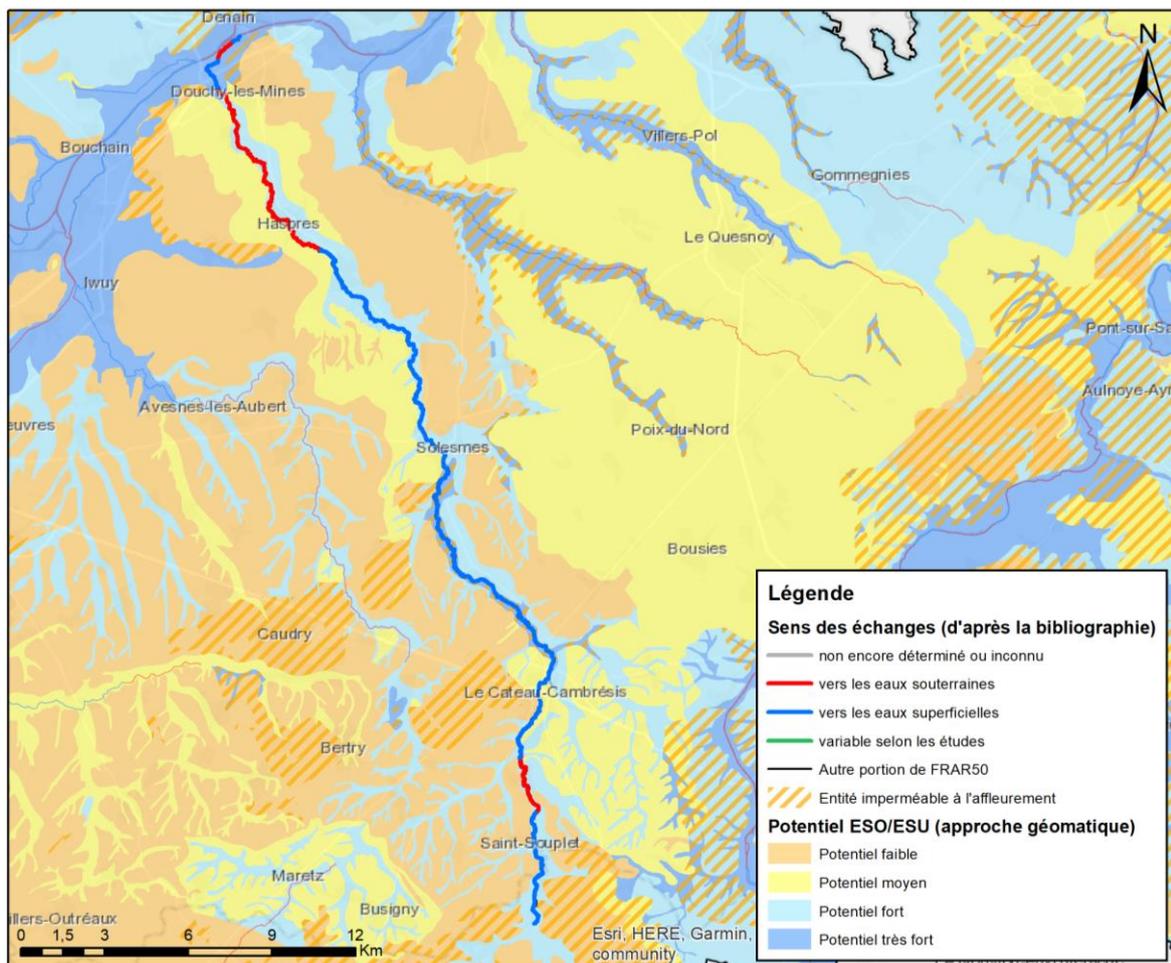


Illustration 110 – Représentation de la masse d'eau FRAR50 de la Scarpe rivière selon les informations apportées par l'inventaire bibliographique et l'approche géomatique

Deux études menées par l'Agence de l'eau Artois-Picardie (2016) et Bhurtun *et al.* (2017) sur la qualité de l'eau de la Selle Rivière confirment toutes deux l'hypothèse d'une alimentation en eau principalement gouvernée par des apports d'eau de nappe. L'hypothèse de la présence de polluants présents dans la nappe retrouvés dans le cours d'eau à des concentrations sensiblement identiques (hors considération réactivité dans la zone hyporhéique mais prise en

compte du facteur lessivage des sols) a été vérifiée notamment pour les nitrates et l'atrazine et ses sous-produits de dégradation.

5.3.6. FRAR47 : Le Scardon

Raisons :

- Etat écologique « Moyen » d'après l'Etat des lieux 2019 (mauvaise qualité physico-chimique) ;
- Lien potentiel entre ESO et ESU « Faible » dans sa moitié amont puis « Très fort » dans sa moitié aval jusqu'à la confluence avec la Somme, d'après l'approche géomatique ;
- Soutien « Plutôt fort » des eaux de surface par les eaux souterraines d'après l'approche hydrogéochimique (via indicateurs « NO₃ » et température).

Le résultat à potentiel « faible » de l'approche géomatique en aval du cours d'eau s'explique par le fait que la cartographie de l'épaisseur de ZNS Hautes Eaux s'appuie ici essentiellement sur la piézométrie de la nappe de la Craie. Celle-ci gagne rapidement en profondeur à mesure que l'on s'éloigne des linéaires de cours d'eau. Or la présence d'une petite nappe superficielle dans les alluvions du Scardon est avérée, elle-même soutenue par la nappe de la Craie.

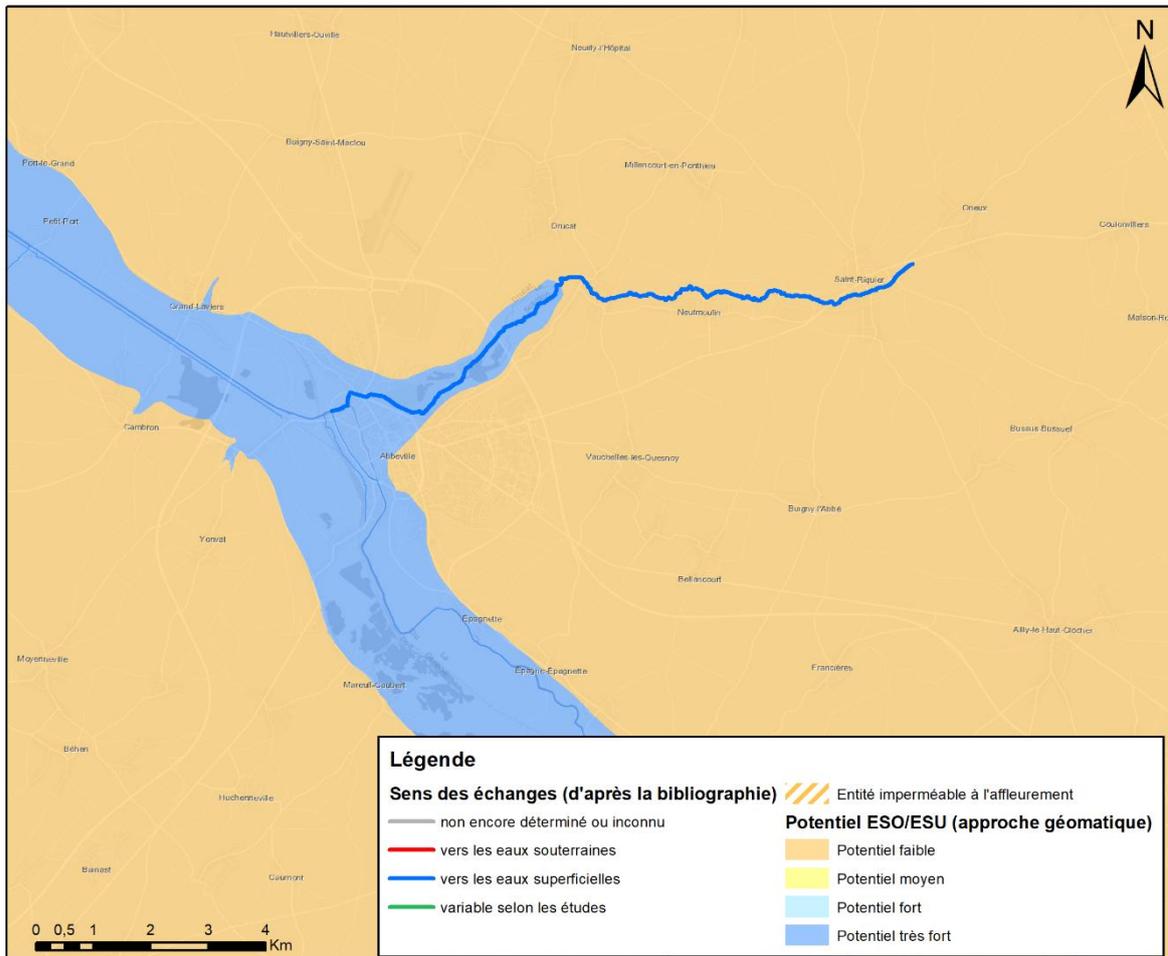


Illustration 111 – Représentation de la masse d'eau FRAR50 de la Scarpe rivière selon les informations apportées par l'inventaire bibliographique et l'approche géomatique

6. Conclusion

La présente étude a permis de sélectionner, au travers de plusieurs étapes successives, 7 masses d'eau de surface (ou portion de) présentant un intérêt pour mener à bien le test DCE « Eau de surface » et pouvant faire l'objet d'investigations complémentaires pour mieux caractériser ces échanges ESO vers ESU.

Ces masses d'eau qui concernent la Lys amont et moyenne (AR31, AR33, AR36), la Souchez (AR58), la Scarpe rivière amont (AR43), la Selle/Escaut (AR50) et le Scardon (AR47) ont pu être identifiées en croisant différentes approches.

Dans un 1^{er} temps, un **inventaire bibliographique** des études permettant d'apporter des informations sur les échanges ESO/ESU dans le bassin a été mené. Cet inventaire s'est accompagné de la **construction d'une base de données** sur les relations entre eau souterraine et eau de surface permettant de valoriser tout résultat en lien avec ce type d'information tout en apportant des précisions suffisantes sur la localisation géographique des secteurs concernés. Cette géodatabase s'est appuyée sur les concepts et nomenclatures décrits dans le dictionnaire de données « Acquisition des données des relations entre les eaux souterraines et les eaux de surface » version 1 diffusé par le SANDRE depuis 2016. Au final, **17 références**, allant de 1972 à 2018, ont été valorisées en base car permettant de localiser et de caractériser des échanges ESO/ESU dans le bassin Artois-Picardie. Ces études ont permis de caractériser **2193 interfaces ESO/ESU de type linéaire** correspondant à une couverture d'environ 4282 km de linéaires de cours d'eau du bassin. De même, **45 interfaces ESO/ESU de type polygone** ont été identifiées. Pour ces 2238 interfaces ESO/ESU, **2382 échanges potentiels ESO/ESU** ont été définis. En effet, une petite part de ces interfaces bénéficie de plusieurs caractérisations d'échanges, tirées de différentes études (et donc de différents diagnostics, pour des plages de temps différents).

L'inventaire n'est probablement pas exhaustif et il apparaît nécessaire de poursuivre l'enrichissement de cette base de connaissance en y intégrant notamment le savoir des acteurs locaux. De même, cette géodatabase « figée » mériterait d'être transposée en un format plus adapté au transfert d'informations et à sa communication. A titre d'exemple, une base au format PostgreSQL connectée à une interface cartographique en ligne permettrait (1) de faciliter les modalités d'intégration de nouvelles données et (2) de permettre le développement de services de valorisation de ces informations.

En parallèle, une **approche géomatique** a été menée, reposant sur la comparaison du niveau piézométrique interpolé en situations extrêmes (basses eaux et hautes eaux) avec les niveaux estimés des eaux de surface sur la base de données topographiques, pour évaluer les zones potentielles d'interaction eau de surface – eau souterraine. En effet, La ZNS joue un rôle significatif dans le transfert et le comportement géochimique des polluants potentiels vis-à-vis des eaux souterraines et de l'épaisseur de cette ZNS dépend les possibilités d'échanges entre eau souterraines et eaux de surface. Cette donnée ZNS a ensuite été croisée à d'autres indicateurs de surface (IDPR, cartes des zones potentiellement humides de l'INRA, entités hydrogéologiques BDLISA imperméables à l'affleurement) et une estimation de la fiabilité de la méthode et des données utilisées a également été entreprise.

Au final, cette approche a permis de considérer les zones listées ci-après comme très favorables aux échanges ESO/ESU :

- Vallées crayeuses (Somme, Authie, Canche, Deûle, Scarpe, Escaut) ;
- Nappes côtières du Marquenterre en bordure littorale ouest (associées aux Sables pissards dans la BDLISA) ;

- Sables pissards sillonnés par les watergangs en bordure littorale nord ;
- Sables du Thanétien (partie affleurante hors bassin d'Orchies et hors zone sous couverture des Argiles de Flandres)
- Sables, marnes et calcaires de l'Yprésien basal et du Paléocène, au sud du bassin.

Dans un troisième temps, une **analyse des données qualité** mesurées dans les eaux de surface et souterraines accompagnée d'une **revue bibliographique** a permis de faire un listing des paramètres physico-chimiques potentiellement bon **indicateur du soutien des eaux de surface par les eaux souterraines**. Dans le contexte du bassin et au regard des données disponibles à la fois pour les eaux de surface et les eaux souterraines, vingt paramètres potentiellement intéressants ont été analysés et ont permis d'évaluer **le degré de soutien ESO vers ESU pour près de 60 tronçons de cours d'eau**. Cette étude exploratoire des données qualité pour un objectif assez novateur qui est l'analyse des relations nappes-rivières, a permis également de déterminer les paramètres les plus pertinents vu la disponibilité des données dans le bassin Artois-Picardie. Il s'agit de la **température, de la conductivité électrique, des ratios molaires Ca/Cl et Mg/HCO₃, du nitrate** et, dans une moindre mesure, de Mg, Cl, F, du ratio Ni/Cr, de l'atrazine et des perchlorates. Cette démarche mériteraient d'être améliorée par la prise en compte (1) de la variabilité temporelle des échanges, (2) des débits des cours d'eau, (3) de l'effet de l'anthropisation. De même, une meilleure connaissance de la représentativité des stations de mesure de surface par rapport aux tronçons de cours d'eau permettraient d'en faire un retranscription spatialisée plus fine.

Enfin, une liste de masse d'eau pour lesquelles une dégradation de la qualité est avérée pour des raisons autres que biologiques a été établie d'après les résultats de l'Etat des lieux 2019 mené sur le bassin. Ces masses d'eau sélectionnées ont ensuite été confrontées aux résultats des approches bibliographique, géomatique et hydrogéochimique pour sélectionner celles présentant un intérêt pour mener à bien le test DCE « Eau de surface ». Les masses d'eau remplissant le plus de critères concernent **la Lys amont et moyenne (AR31, AR33, AR36), la Souchez (AR58), la Scarpe rivière amont (AR43), la Selle/Escaut (AR50) et le Scardon (AR47)**. Il semble intéressant de mener des investigations complémentaires pour mieux caractériser les échanges ESO vers ESU sur ces secteurs.

7. Bibliographie

Agence de l'Eau Artois Picardie (2008) – Cartographie des zones à dominantes humides du bassin Artois-Picardie par photointerprétation. <https://www.data.gouv.fr/fr/datasets/zones-a-dominante-humide/>.

Agence de l'Eau Artois Picardie (2016) – La qualité des eaux de la SELLE au Cateau-Cambrésis et à Neuville : données 2015. Rapport AEAP/DDCPP/SCEMNA-CH/FH 052016 43 pages avec les annexes. <https://www.eau-artois-picardie.fr/mediatheque/la-qualite-des-eaux-de-la-selle-au-cateau-cambresis-et-neuville-donnees-2015>

Agence de l'Eau Artois Picardie (2019) – L'Etat des lieux des districts hydrographiques. Escaut, Somme & Cours d'eau côtiers Manche, Mer du Nord, Meuse (Partie Sambre) Parties Françaises. Décembre 2019. http://www.eau-artois-picardie.fr/sites/default/files/edl_district_hydro_bd.pdf

Allier D., Brugeron A., Mardhel V. (2018) – Cartographie préliminaire de l'épaisseur moyenne de la zone non saturée, à l'échelle du 1/100 000ème sur la France Métropolitaine. Rapport BRGM/RP-68354-FR, 20 p., 11 fig. <http://infoterre.brgm.fr/rapports//RP-68354-FR.pdf>

Auterives C., Gourcy L., Joublin F., Lopez B., Bourguine B., Parmentier M., Devau N., Herivaux C., Renaud C. (2017) – Evaluation de la représentativité des réseaux de surveillance DCE de la qualité des eaux souterraines du bassin Artois-Picardie. Rapport final BRGM/RP-67029-FR. 486 p., 2 Ann. <http://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-67029-FR.pdf>

Auterives C., Pinson S. (2016) – Impact des eaux souterraines sur les eaux de surface : proposition d'évolution du test « eau de surface ». Rapport final BRGM/RP-65797-FR. 44 p., 2 tableaux, 23 figures. <http://infoterre.brgm.fr/rapports//RP-65797-FR.pdf>

Banton O., Bangoy L. M. (1997) – Hydrogéologie Multiscience environnementale des eaux souterraines, AUPELF-UREF et Presses de l'Université du Québec ISBN 2-7605-0926-5

Baran N., Saplairoles M. (2012) – Etude des transferts de solutés (nitrates et produits phytosanitaires) dans la plaine alluviale de l'Ariège et de l'Hers Vif - Synthèse des résultats. Rapport final. BRGM/RP-60405-FR, 55 p., 25 ill. <http://infoterre.brgm.fr/rapports//RP-60405-FR.pdf>

Baran N., Gourcy L. (2013) – Sorption and mineralization of S-metolachlor and its ionic metabolites in soils and vadose zone solids: Consequences on groundwater quality in an alluvial aquifer (Ain Plain, France). Journal of Contaminant Hydrology, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jconhyd.2013.07.009>

Baran N., Gourcy L. (2017) – Etude des transferts des pesticides et du nitrate dans les alluvions anciennes du couloir de Meyzieu : synthèse des résultats. Rapport final. BRGM/RP-66990-FR, 84 p., 48 ill., 1 annexe. <http://infoterre.brgm.fr/rapports//RP-66990-FR.pdf>

Bault V., Bourguine B., Cary L., Gourcy L., Korotchansky A., Winckel A. avec la collaboration de **Decouchon E. et Linglin C.** (2017) – Etude du fonctionnement global de l'hydrosystème du Marquenterre, en lien avec les marais arrière-littoraux. Rapport final. BRGM/RP-67430-FR, 298 p., 128 ill., 12 tabl., 10 ann., 1 DVD. <http://infoterre.brgm.fr/rapports//RP-67430-FR.pdf>

Berthier L., Bardy M., Chenu J.P., Guzmova L., Laroche B., Lehmann S., Lemerancier B., Martin M., Mérot P., Squividant H., Thiry E., Walter C. (2014) – Enveloppes des milieux potentiellement humides de la France métropolitaine. Notice d'accompagnement. Programme de modélisation des milieux potentiellement humides de France, Ministère d'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie. 50 pages. http://geowww.agrocampus-ouest.fr/metadata/pdf/Notice_MPH_France.pdf.

Bessiere H., Picot J., Picot G., Parmentier M. (2015) – Affinement du modèle hydrogéologique de la Craie du Nord-Pas-de-Calais autour des champs captants de la métropole Lilloise. Rapport final. BRGM/RP-63689-FR, 295 p., 194 fig., 20 tabl., 4 ann. <http://infoterre.brgm.fr/rapports//RP-63689-FR.pdf>.

Bhurtun P., Lesven L., Criquet J., Billon G. (2017) – Cartographie des pressions sur la Selle rivière à l'aide de traceurs chimiques (cartochim). Université Lille 1, Agence de l'Eau Artois-Picardie https://www.eau-artois-picardie.fr/sites/default/files/rapport_cartochim_2017_vf.pdf.

Brenot A., Gourcy L., Allier D., Mascre C., Pons A., Chery L., Blum A. (2007) – Identification des zones à risque de fond géochimique élevé en éléments traces dans les cours d'eau et les eaux souterraines. Rapport BRGM RP-55346-FR, 5 volumes. <http://infoterre.brgm.fr/rapports//RP-55346-FR.pdf>.

Brugeron A., Auterives C., Renaud C. (2016) – Approche exploratoire des liens entre référentiels hydrogéologique et hydrographique. Etat de l'art sur les méthodes de caractérisation des échanges « eau souterraine / eau de surface » et réflexions sur l'organisation de la donnée. Rapport final. BRGM/RP-65541-FR, 112 p., 47 ill., 8 tabl., 1 Ann. <http://infoterre.brgm.fr/rapports//RP-65541-FR.pdf>.

Brugeron A., Bessiere B., Bourguin B., Stollsteiner P. (2017) – Etude méthodologique pour l'amélioration de la cartographie de sensibilité aux remontées de nappes et réalisation d'une carte nationale - BRGM/RP-65452-FR. <http://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-65452-FR.pdf>

Brugeron A., Bessière H., avec la collaboration de **Stollsteiner P. et Allier D.** (2014) – Approche exploratoire des liens entre référentiels hydrogéologiques et hydrographiques (Année 2) : Réflexions sur l'organisation et la mise à disposition des données. Rapport final. BRGM/RP-63643-FR. <http://infoterre.brgm.fr/rapports//RP-63643-FR.pdf>.

Brugeron A., Paroissien J.B., Tillier L. (2018) – Référentiel hydrogéologique BDLISA version 2 : Principes de construction et évolutions. Rapport final BRGM/RP-67489-FR. <http://infoterre.brgm.fr/rapports//RP-67489-FR.pdf>.

Caous J.Y., Lamotte C., Lepretre J.P., Nicolas J. (1997) – Contrôle qualitatif et quantitatif de l'aquifère landénien des Flandres. Rap. BRGM R39678, 38p., 16fig., 6 ann.

Caous J.Y., Caudron M., Mardhel V., Nail C., Nicolas J., Batkowski D., Besançon S., Gaudefroy M.J., Kieffer Cl., Pinson S., Saint-Omer P., Brinon Ph. (2001) – Bassin Artois-Picardie. Nappe de la craie. Carte piézométrique « hautes eaux » 2001. BRGM/RP-51149-FR, 31 p., 2 ann. <http://infoterre.brgm.fr/rapports//RP-51149-FR.pdf>.

Cary L., Surdyk N., Auterives C. (2015) – Etablissement de la liste des paramètres chimiques pertinents pour la prise en compte des impacts des eaux souterraines sur les eaux de surface. Rapport final. BRGM/RP-63127-FR. 49 p. <http://infoterre.brgm.fr/rapports//RP-63127-FR.pdf>

Castany G., Margat J. (1977) – Dictionnaire français d'hydrogéologie, BRGM Service géologique national, Orléans, 249 p.

Chandesris, A., Mengin, N., Malavoi, J.R., Souchon, Y., Wasson, J.G. (2009) – SYstème Relationnel d'Audit de l'Hydromorphologie des Cours d'Eau SYRAH_CE. ATLAS A LARGE ECHELLE V2.0. 58 p. [Onema] <http://cemadoc.cemagref.fr/cemoa/PUB00026308>.

Datry T., Dole-Olivier M.J., Marmonier P., Claret C., Perrin J.F., Lafont M., Breil P. (2008) – La zone hyporhéique, une composante à ne pas négliger dans l'état des lieux et la restauration des cours d'eau. Ingénieries n°54. p. 3 à 18.

Denis M., Bernard D., Vallée K., Maillot H. (2000) – Le nickel d'origine géologique dans les eaux alimentaires belges et françaises. Techniques sciences méthodes, 2000, 6, pp 122-135.

Gourcy L., Petelet-Giraud E. (2011) – Utilisation des outils isotopiques pour la délimitation des aires d'alimentation des captages destinés à l'alimentation en eau potable. Rapport BRGM/RP-59729-FR, 62p. <http://infoterre.brgm.fr/rapports//RP-59729-FR.pdf>

Gourcy L., Pinson S., Surdyk N. (2017) – Description de la méthode appliquée à l'échelle nationale pour l'étude pression-impact du nitrate sur les eaux souterraines. Rapport final BRGM/RP-67428-FR. <http://infoterre.brgm.fr/rapports//RP-67428-FR.pdf>

Lefevre E. (2006) – Etude de la minéralisation de la nappe de la craie sous pressions naturelles et anthropiques. Application à la présence de l'azote, du soufre et du nickel dans les eaux souterraines. Université Lille I, 162 p.

Lopez B., Brugeron A., Devau N., Ollivier P. (2014) – Vulnérabilité des eaux souterraines de France métropolitaine vis-à-vis des ions perchlorates. Rapport final. BRGM/RP-63270-FR, 108p. <http://infoterre.brgm.fr/rapports//RP-63270-FR.pdf>

MacQueen J. (1967) – Some methods for classification and analysis of multivariate observations. Proceedings of the Fifth Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability, Volume 1: Statistics, 281--297, University of California Press, Berkeley, Calif. <https://projecteuclid.org/euclid.bsm/1200512992>.

Mardhel V., Frantar P., Uhan J. and Miso A. (2004) – Index of development and persistence of the river networks as a component of regional groundwater vulnerability assessment in Slovenia. International conference on groundwater vulnerability assessment and mapping. Ustron, Poland, 15–18 June 2004., Poland 15 to 18 June 2004.

Malard F., Ward J.-V., Robinson C.-T. (2000) – An expanded perspective of the hyporheic zone, Verhandlungen der Internationalen Vereinigung für Theoretische und Angewandte Limnologie , n° 27, p. 431-437.

Michelot J.-L. (2003) – Les zones humides et l'eau – Cahier thématique, 64 p.

Onema/Armines (2014) – Caractérisation des échanges nappes/rivières de l'échelle du tronçon à l'échelle régionale par métrique expérimentale ou modélisation 2011-2014. Rapport 209p.

Paran F., Augeard B., et al. (2017) – Guide technique Interactions nappe/rivière - Des outils pour comprendre et mesurer les échanges. Office Français de la Biodiversité (OFB), Armines. 2017. Avril 2017. 104 p. <https://www.gesteau.fr/document/guide-technique-interactions-napperiviere-des-outils-pour-comprendre-et-mesurer-les-echange>

Pinson S., Tillier L., Allier D., Bourguine B., Sedan–Miegemolle O. (2019) – Développement de méthodes permettant l'identification de la sensibilité des cours d'eau et la variation des emprises des zones humides liées aux prélèvements dans les eaux souterraines sur le bassin Loire-Bretagne. Rapport final. BRGM/RP-69287-FR, 219 p., 125 ill., tabl., 7 ann. <http://infoterre.brgm.fr/rapports//RP-69287-FR.pdf>

Ramon S., Sangnier P. (1972) – Renforcement du débit d'étiage de la Lys par surexploitation saisonnière de la nappe de la Craie. Travaux de 1971. Rapport BRGM 72 SGN 024 NPA.

SAGE Scarpe Amont (2016) – Etat initial validé par la CLE le 21 septembre 2016. Rapport Bureau d'études Géo-hyd.

Sidoli P., Lassabatere L., Angulo-Jaramillo R., Baran N. (2016) – Experimental and modeling of the unsaturated transports of S-metolachlor and its metabolites in glaciofluvial vadose zone solids. Journal of Contaminant Hydrology, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jconhyd.2016.04.001>

Scheidleder A. (2012) – Groundwater threshold values. In-depth assessment of the differences in groundwater threshold values established by Member States. Austria, E.A, 57 p.

Thorndike R.L. (1953) – « Who belongs in the family? ». Psychometrika 18, 267–276 (1953). <https://doi.org/10.1007/BF02289263>.

Vallée K. (1999) – Le nickel dans les eaux alimentaires. Application à des champs captant du bassin Artois-Picardie, Thèse de doctorat, EUDIL, Université Lille I, 268 p.

Vernoux J.F., Lions J., Petelet-Giraud E., Seguin J.J., Stollsteiner P., Lalot E. (2010) – Synthèse bibliographique sur les relations entre eau souterraine, eau de surface et écosystèmes en lien avec la DCE. Rapport final BRGM/RP-57044-FR. <http://infoterre.brgm.fr/rapports//RP-57044-FR.pdf>

Winter T.C., Harvey J.W., Franke O.L. and Alley W.M. (1998) – Ground Water and Surface Water A Single Resource, Circular 1139. Denver: Colorado: USGS.

Textes réglementaires

Directive Cadre Eau dit « DCE » 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.

Circulaire DCE 2003/07 relative au cahier des charges pour l'évolution des réseaux de surveillance des eaux souterraines en France, en application de la directive 2000/60/DCE du 23 octobre 2000 du Parlement et du Conseil établissant un cadre pour une politique communautaire dans le domaine de l'eau.

Circulaire DCE 2005/14 relative à la surveillance des eaux souterraines en France, en application de la directive 2000/60/DCE du 23 octobre 2000 du Parlement et du Conseil établissant un cadre pour une politique communautaire dans le domaine de l'eau.

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.

Arrêté du 7 août 2015 modifiant l'arrêté du 25 janvier 2010 établissant le programme de surveillance de l'état des eaux en application de l'article R. 212-22 du code de l'environnement.

Annexe 1

Détail des lexiques de caractérisation ESO/ESU utilisés dans la base de données

Echange potentiel de l'interface ESO/ESU

<http://www.sandre.eaufrance.fr/?urn=urn:sandre:donnees:843:.....referentiel:3.1.html>

Code de l'élément	Mnémonique de l'élément	Libellé de l'élément	Statut de l'élément	Date de création de l'élément	Date de mise à jour de l'élément
0	Inconnu	Inconnu	Validé	04/03/2015	04/03/2015
1	Oui	Oui	Validé	04/03/2015	03/03/2015
2	Non	Non	Validé	04/03/2015	03/03/2015

Tableau 15 – Détail de la nomenclature Sandre n°843 pour l'attribut « Echange potentiel de l'interface ESO/ESU »

Qualification de l'échange potentiel

<http://www.sandre.eaufrance.fr/?urn=urn:sandre:donnees:839:.....referentiel:3.1.html>

Code de l'élément	Mnémonique de l'élément	Libellé de l'élément	Statut de l'élément	Définition de l'élément	Date de création de l'élément	Date de mise à jour de l'élément
1	Supposé	Supposé	Validé	Présume de l'existence d'un échange sans caractérisation précise.	08/01/2015	08/01/2015
2	Avéré par preuve directe	Avéré par preuve directe	Validé	L'existence d'un échange est confirmée par des preuves "terrain".	08/01/2015	07/01/2015
3	Avéré par preuve indirect	Avéré par preuve indirecte	Validé	L'existence d'un échange est confirmée à l'aide d'un faisceau d'indices (exemple : à l'aide de modélisation...).	08/01/2015	07/01/2015
0	Inconnu	Inconnu	Validé	Aucune investigation ne permet de qualifier l'échange.	03/03/2015	02/03/2015
4	Pas d'échange, preuve dir	Pas d'échange, avéré par preuve directe	Validé	L'absence d'un échange est confirmée par preuve terrain.	03/03/2015	02/03/2015
5	Pas d'échange, preuve ind	Pas d'échange, avéré par preuve indirecte	Validé	L'absence d'un échange est confirmée à l'aide d'un faisceau d'indices (exemple : à l'aide de modélisation...).	20/03/2015	19/03/2015
6	Absence supposée	Absence supposée	Validé	Présume de l'absence d'un échange sans caractérisation précise.	05/08/2019	04/08/2019

Tableau 16 – Détail de la nomenclature Sandre n°839 pour l'attribut « Qualification de l'échange potentiel »

Caractéristique temporelle du flux de l'échange potentiel

<http://www.sandre.eaufrance.fr/?urn=urn:sandre:donnees:840:::referentiel:3.1.html>

Code de l'élément	Mnémonique de l'élément	Libellé de l'élément	Statut de l'élément	Date de création de l'élément	Date de mise à jour de l'élément
1	Flux périodique saison	Flux périodique saisonnier	Validé	08/01/2015	08/01/2015
2	Flux exceptionnel	Flux exceptionnel	Validé	08/01/2015	07/01/2015
3	Flux permanent	Flux permanent	Validé	08/01/2015	07/01/2015
4	Autres flux périodiques	Autres flux périodiques (exemple marée).	Validé	08/01/2015	07/01/2015
0	Inconnu	Inconnu	Validé	03/03/2015	02/03/2015

Tableau 17 – Détail de la nomenclature Sandre n°840 pour l'attribut « Caractéristique temporelle du flux de l'échange potentiel »

Sens du flux de l'échange

<http://www.sandre.eaufrance.fr/?urn=urn:sandre:donnees:842:::referentiel:3.1.html>

Code de l'élément	Mnémonique de l'élément	Libellé de l'élément	Statut de l'élément	Date de création de l'élément	Date de mise à jour de l'élément
0	Inconnu	Inconnu	Validé	08/01/2015	08/01/2015
1	Vers ESO	Vers les eaux souterraines	Validé	08/01/2015	07/01/2015
2	Vers ESU	Vers le milieu superficiel	Validé	08/01/2015	07/01/2015
3	Variable	Variable	Validé	08/01/2015	07/01/2015

Tableau 18 – Détail de la nomenclature Sandre n°842 pour l'attribut « Sens du flux de l'échange »

Diagnostic spécifique

<http://www.sandre.eaufrance.fr/?urn=urn:sandre:donnees:887:::referentiel:3.1.html>

Code de l'élément	Mnémonique de l'élément	Libellé de l'élément	Statut de l'élément	Définition de l'élément	Date de création de l'élément	Date de mise à jour de l'élément
0	Inconnu	Inconnu	Validé	L'objectif principal du diagnostic n'est pas connu	25/02/2016	27/11/2015
1	Oui	Oui	Validé	le diagnostic est spécifique à la caractérisation d'un échange entre les eaux superficielles (ESU) et les eaux souterraines (ESO).	27/11/2015	26/11/2015
2	Non	Non	Validé	le diagnostic ne recherchait pas spécifiquement à caractériser un échange entre les eaux superficielles (ESU) et les eaux souterraines (ESO)	27/11/2015	26/11/2015

Tableau 19 – Détail de la nomenclature Sandre n°887 pour l'attribut « Diagnostic spécifique »

Procédure du Diagnostic

<http://www.sandre.eaufrance.fr/?urn=urn:sandre:donnees:888:::referentiel:3.1.html>

Code de l'élément	Mnémonique de l'élément	Libellé de l'élément	Statut de l'élément	Définition de l'élément	Date de création de l'élément	Date de mise à jour de l'élément
0	Inconnue	Inconnue	Validé		27/04/2016	28/01/2016
1	Expertise	Expertise	Validé	Appréciation des interactions ESO/ESU en s'appuyant sur l'état des connaissances hydrogéologiques locales ou sur un faisceau d'indices, sans pour autant avoir mené une étude spécifiquement dédiée à la caractérisation de ces interactions (exemple : hypothèse d'un échange ESU/ESO par croisement de résultats provenant de diverses sources, telles que des études locales, des indices de terrain, des traçages...)	28/01/2016	27/01/2016
2	Compteur	Compteur	Validé	Mise en place d'un dispositif in-situ permettant de mesurer directement des flux d'eau (exemple : compteur d'exfiltration classiques type "seepage meters", parfois couplés à des mini-piézomètres, compteurs d'exfiltration électromagnétique autonome ou à ultrasons...)	28/01/2016	27/01/2016
3	Observation	Observation	Validé	Appréciation visuelle des écoulements de surface pouvant témoigner qualitativement d'interaction potentiel entre ESU et ESO (exemple : identification des pertes en cours d'eau ou des résurgences d'eau souterraine, observations liées au réseau ONDE...)	28/01/2016	27/01/2016
4	Jaugeage	Jaugeage	Validé	Mesure du débit dans des sections successives d'un cours d'eau et estimation de la relation de proportionnalité entre ce débit et la surface drainée sur chaque section et son évolution au cours du temps. Si cette méthode est appliquée en période d'étiage (débit minimum du cours d'eau), alors l'apport souterrain est considéré comme étant la différence entre les débits mesurés en deux points du cours d'eau, après avoir déduit les autres apports (affluents, réalimentation...) et pris en compte les éventuelles pertes dans la section considérée telles que des pompages... (exemple : Jaugeage différentiel...)	28/01/2016	27/01/2016
5	Darcy	Darcy	Validé	Méthode hydrologique simplifiée permettant d'estimer le débit d'échange en s'appuyant sur des mesures de terrain et la loi de Darcy (exemple 1 : débit d'échange estimé à partir de mesures des gradients hydrauliques entre l'aquifère et le cours d'eau et de mesures de la conductivité hydraulique de l'aquifère et de la zone hyporhéique) (exemple 2 : débit d'échange estimé à partir de la vitesse effective, estimée par traçage in situ, et de la porosité cinématique, estimé par des tests en laboratoire)	28/01/2016	27/01/2016
6	AnalySign	Analyse du signal	Validé	Traitement des signaux mesurés dans les cours d'eau (chroniques de débit et/ou de hauteur d'eau) et dans les eaux souterraines (chroniques piézométriques) et analyse spectrale et corrélatoire (exemple : analyse des fréquences des débits de cours d'eau représentés sur un hydrogramme et des fréquences des	28/01/2016	27/01/2016

Identification des échanges ESO/ESU dans le bassin Artois-Picardie

				<p>courbes de récession et des étiages puis détermination du débit de base, tests de corrélation croisés entre variations des débits de cours d'eau et variations des niveaux mesurés au sein d'indicateurs piézométriques, analyses ACP, discriminantes ou "en ondelette" ...)</p>		
7	ModGlob	Modèle global	Validé	<p>Simulation du fonctionnement d'un hydrosystème par un bilan hydrique global ou par une modélisation globale, un concept physique simplificateur, défini par un assemblage de réservoirs en liaison hydraulique les uns avec les autres ou par des fonctions de transferts. (exemple : modèles globaux ou semi-globaux de type réservoir, modèles globaux de type "boîte noire", réseaux neuronaux...)</p>	28/01/2016	27/01/2016
8	ModSpe	Modèle Spécialisé	Validé	<p>Simulation du fonctionnement d'un hydrosystème par une modélisation numérique spatialisée, à savoir un interpolateur spatio-temporel des données distribuées dans l'espace et le temps reposant sur des équations de la physique des écoulements souterrains et, s'il y a lieu, des échanges avec les cours d'eau. (exemple : modèle maillé multi couches 3D pour l'écoulement souterrain couplé avec un modèle de type 1D pour les écoulements en rivière, modèles MARTHE, modèles MODFLOW, Modélisation 3D de la distribution de la salinité dans l'eau de surface sous PCFLOW3D, modèles aux éléments analytiques (AEM)...))</p>	28/01/2016	27/01/2016
9	ChimieMa	Chimie majeurs	Validé	<p>Comparaison de la composition chimique des eaux de surface et souterraine, en certains éléments majeurs pouvant être considérés comme des "traceurs" des échanges ESU/ESO (exemple : certains paramètres physico-chimiques type conductivité, pH ou redox Eh, des cations type Na, Ca, Mg ou K, des anions type Cl, SO4, HCO3 ou Br...)</p>	28/01/2016	27/01/2016
10	ChimieIs	Chimie isotopes	Validé	<p>Comparaison de la composition chimique des eaux de surface et souterraine, en certains isotopes pouvant être considérés comme des "traceurs" des échanges ESU/ESO (exemple : isotopes stables type oxygène 18 et deutérium, isotopes radioactifs type Tritium, Radon, Radium, Strontium...)</p>	28/01/2016	27/01/2016
11	Traçages	Traçages	Validé	<p>Détermination des chemins d'écoulements souterrains (ou non) entre un point, souterrain ou surfacique, dans lequel un traceur artificiel a été injecté et un ou plusieurs points de suivi (souterrains et surfaciques) (exemple : fluorescéine...)</p>	28/01/2016	27/01/2016
12	Faune	Faune	Validé	<p>Analyse de la composition des peuplements faunistiques interstitiels afin de reconstituer l'origine des eaux baignants les sédiments d'un cours d'eau (ou autre ESU) et mise en relation avec le mode de circulation de ces eaux dans les sédiments et/ou dans les karsts. (exemple : échantillonnage d'invertébrés souterrains dans la zone hyporhéique puis calcul d'un indice d'échange nappe/rivière basé sur l'abondance des organismes stygobies...)</p>	28/01/2016	27/01/2016

13	Flore	Flore	Validé	Caractérisation des échanges ESO/ESU à l'aide d'un diagnostic du fonctionnement des annexes alluviales située à proximité de la rivière, dépendant des exigences écologiques des espèces végétales aquatiques vivant dans ces zones (exemple : après relevés floristiques dans les zones en eau (cours d'eau, gravières...) et analyses chimiques des eaux, calcul d'un indice de fréquence relative des espèces favorisées par les eaux phréatiques puis d'un indice sur la probabilité d'apports issus de la nappe de versant...)	28/01/2016	27/01/2016
14	Géophysique	Géophysique	Validé	Estimation de la variabilité spatiale et verticale de la conductivité électrique, de la salinité, de la texture ou de l'humidité du sous-sol, par des méthodes utilisant des principes géophysiques Méthode indirecte qui rend plus compte de la structure et des propriétés intrinsèques des formations aquifères et/ou des sédiments que des échanges ESO/ESU (exemple : méthodes par injection d'un courant électrique dans le sol, étude de la propagation des ondes électromagnétiques, étude de la propagation des ondes sismiques dans le sol...)	28/01/2016	27/01/2016
15	Thermique	Thermique	Validé	Mesures des variations de températures dans les eaux et sédiments pour suivre les pertes et recharges au sein de la zone d'échange ESU/ESO. Ces variations sont dépendantes du sens de circulations des écoulements, de l'écart de température entre les eaux souterraines et les eaux de surface et des flux échangés. (exemple : réalisation d'un profil de température au sein de la zone hyporhéique ou dans les sédiments d'un lac, à l'aide de capteurs thermiques ou de fibre optique, et déduction des variations spatiales de flux d'eau à travers cette zone à partir des variations observées de la température, modélisations hydrothermiques...)	28/01/2016	27/01/2016
16	Géomatique	Géomatique	Validé	Identification voire quantification des échanges ESU/ESO par des méthodes d'analyse spatiale et d'interpolation sous SIG (exemple : analyse géomatique hydrodynamique par tronçons de cours d'eau, analyse géomatique des relations entre piézomètres et cours d'eau les plus proches...)	28/01/2016	27/01/2016
17	Téledétection	Téledétection	Validé	Identification des échanges ESU/ESO par des méthodes de traitement des images satellitaires. (exemple 1 : détection des anomalies thermiques dans les eaux d'un lac peu profond, par traitement d'images satellitaires. Ces anomalies permettent de localiser les panaches d'eau froide considérés comme étant les zones de recharge du lac par la nappe) (exemple 2: analyse d'images thermiques infrarouges (IRT) acquises par avion, hélicoptères, ULM ou Drone)	28/01/2016	27/01/2016

Tableau 20 – Détail de la nomenclature Sandre n°888 pour l'attribut « Procédure du Diagnostic »

Type de Diagnostic

<http://www.sandre.eaufrance.fr/?urn=urn:sandre:donnees:885::::::referentiel:3.1.html>

Code de l'élément	Mnémorique de l'élément	Libellé de l'élément	Statut de l'élément	Définition de l'élément	Date de création de l'élément	Date de mise à jour de l'élément
1	Multi	Multi diagnostic	Validé	le diagnostic prend en compte (ou s'appuie sur ou est basée sur) plusieurs diagnostics (exemple : Naprom).	27/12/2015	27/11/2015
2	Elementaire	Elementaire	Validé	Le diagnostic s'appuie sur un seul diagnostic	27/11/2015	26/11/2015

Tableau 21 – Détail de la nomenclature Sandre n°885 pour l'attribut « Type de Diagnostic »

Emprise spatiale représentative du diagnostic

<http://www.sandre.eaufrance.fr/?urn=urn:sandre:donnees:886::::::referentiel:3.1.html>

Code de l'élément	Mnémorique de l'élément	Libellé de l'élément	Statut de l'élément	Définition de l'élément	Date de création de l'élément	Date de mise à jour de l'élément
1	Nationale	Nationale	Validé		25/02/2016	27/11/2015
2	Bassin hydro /district	Bassin hydrographique / District DCE	Validé		27/11/2015	26/11/2015
3	Régionale	Régionale	Validé		27/11/2015	26/11/2015
4	Départementale	Départementale	Validé		27/11/2015	26/11/2015
5	BV / MDO / EHydrogeol	Bassin versant /Masse d'eau/Entité hydrogéologique	Validé		27/11/2015	26/11/2015
6	Collectivités territorial	Collectivités territoriale (agglomération)	Validé		27/11/2015	26/11/2015
7	Communale	Communale	Validé		27/11/2015	26/11/2015
8	Parcelle	Parcelle	Validé	Diagnostic très localisé au sein d'une emprise ayant une taille similaire à une parcelle communale	27/11/2015	26/11/2015
9	Ponctuelle	Ponctuelle	Validé		27/11/2015	26/11/2015
10	Autre	Autre	Validé		27/11/2015	26/11/2015

Tableau 22 – Détail de la nomenclature Sandre n°886 pour l'attribut « Emprise spatiale représentative du diagnostic »

Fiabilité du diagnostic

<http://www.sandre.eaufrance.fr/?urn=urn:sandre:donnees:889::::::referentiel:3.1.html>

Code de l'élément	Mnémonique de l'élément	Libellé de l'élément	Statut de l'élément	Date de création de l'élément	Date de mise à jour de l'élément
0	Inconnue	Inconnue	Validé	27/04/2016	28/01/2016
1	Faible	Faible	Validé	28/01/2016	27/01/2016
2	Moyenne	Moyenne	Validé	28/01/2016	27/01/2016
3	Forte	Forte	Validé	28/01/2016	27/01/2016

Tableau 23 – Détail de la nomenclature Sandre n°889 pour l'attribut « Fiabilité du diagnostic »

Annexe 2

Références bibliographiques des documents valorisés dans la base de données des échanges ESO/ESU

Code Référence bibliographique en base	Référence bibliographique complète
70-SGN-039-NPA	RAMON S. <i>et al.</i> (1970) Escaut canalisé. Aménagement à grand gabarit à l'aval de Valenciennes (Nord). Influence du canal sur la nappe. Rapport BRGM 70-SGN-039-NPA.
72-SGN-104-PNO	CAOUS J.Y. <i>et al.</i> (1972) Exploitation de la nappe en amont de ROUVROY et en aval de ST-QUENTIN. Rapport BRGM 72-SGN-104-PNO.
72-SGN-024-NPA	RAMON S., SANGNIER P. (1972) Renforcement du débit d'étiage de la Lys par surexploitation saisonnière de la nappe de la Craie. Travaux de 1971. Rapport BRGM 72-SGN-024-NPA.
Thèse_Beun_1973	BEUN N. (1973) - Contribution à l'étude hydrogéologique des Bas-Champs de Cayeux (Somme). Thèse 3ème cycle. Université des sciences et technique de Lille.
BOURG_ET_AL_1989	BOURG <i>et al.</i> (1989) – Geochemical Filtration of Riverbank and Migration of Heavy Metals Between the Defile River and the Anserueilles Alluvion-Chalk Aquifer (Nord, France).
BURGEAP_AA_1995	BURGEAP (1995) – Etude sur les ressources en eau dans le bassin versant de l'AA.
BE_Env_Moulin_de_Lucy_2000	BE Environnement Moulin de Lucy (2000) – Conservatoire des sites naturels de Picardie. Etude hydrogéologique et qualité des eaux du marais du Pendé.
RP-51827-FR	AMRAOUI N. <i>et al.</i> (2002) - Simulation par modèle des Hautes Eaux de la Somme. Rapport BRGM/RP-51827-FR.
SYMSAGEL_2004	SYMSAGEL (2004) - Plan de gestion globale et équilibrée des écoulements et des crues des eaux de la Loisme et du Surgeon. Phase 1
SAGE_AA_2005	Syndicat Mixte de la Côte d'Opale (2005) - Etat des lieux du SAGE du Delta de l'Aa
SYMSAGEL_2006	SYMSAGEL (2006) - Plan de gestion globale et équilibrée des écoulements et des crues des eaux de la Loisme et du Surgeon. Phase 2
SAGE_SENSEE_Connaissance_2013	SAGE de la Sensée (2013) - Elaboration du SAGE de la Sensée - Etat initial. Partie 3 : Connaissance des milieux
BE_Iduna_Env_2014	Iduna environnement (2014) – SIAHM. Syndicat Intercommunal d'Aménagement Hydraulique du Marquenterre. Tronçon artificiel de la Maye au droit du château d'Arry (80). Suivi piézométrique et pluviométrique de novembre 2012 à novembre 2013. Rapport n°L19-2.
RP-63689-FR	BESSIERE <i>et al.</i> (2015) – Affinement du modèle hydrogéologique de la Craie du Nord-Pas-de-Calais autour des champs captants de la métropole Lilloise. Rapport final. BRGM/RP-63689-FR.
GOUBET_2015	GOUBET P. (2015) - Diagnostic fonctionnel du complexe tourbeux de la Réserve naturelle régionale de la Tourbière de Vred (Nord). Phase 2
SAGE_SCARPE_AMONT_2016	SAGE SCARPE AMONT (2016) - Elaboration du SAGE de la Scarpe Amont - Etat initial.
RP-67430-FR	BAULT V. <i>et al.</i> (2018) - Etude du fonctionnement global de l'hydrosystème du Marquenterre, en lien avec les marais arrière-littoraux. Rapport final. BRGM/RP-67430-FR.

Tableau 24 – Liste des références bibliographiques ayant apportées des éléments de connaissances géoréférencées sur les échanges ESO/ESU en Artois-Picardie



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Centre scientifique et technique

3, avenue Claude-Guillemin
BP 36009
45060 – Orléans Cedex 2 – France
Tél. : 02 38 64 34 34

Direction régionale Hauts-de-France

Arteparc Bâtiment A
2 Rue des Peupliers
59810 – Lesquin – France
Tél. : 03 20 19 15 40

www.brgm.fr