

Cartographie de la VULNERABILITE intrinsèque des eaux souterraines en région Nord-Pas-de- Calais

BRGM/RP-54238-FR

Décembre 2005

Étude réalisée dans le cadre des opérations
de Service public du BRGM 2004
PSP04NPC35

Vincent Mardhel, Stéphanie Pinson, Annabel Gravier

Document public

Cartographie de la **VULNERABILITE** intrinsèque des eaux souterraines en région Nord-Pas-de-Calais

BRGM/RP-54238-FR

Octobre 2005

Étude réalisée dans le cadre des opérations
de Service public du BRGM 2004 - PSP04NPC35

Vincent Mardhel, Stéphanie Pinson, Annabel Gravier

Vérificateur :

Original signé par

Thierry Pointet

Approbateur :

Original signé par

Jean - Rémy Mossmann

Le système de management de la qualité du BRGM est certifié AFAQ ISO 9001 :2000



Mots clés : Vulnérabilité, Région Nord-Pas-de-Calais, Eaux souterraines, Masses d'eau souterraine, Analyse multicritère, SIG

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante : Cartographie de la vulnérabilité intrinsèque des eaux souterraines en région Nord-Pas-de-Calais (BRGM/RP – 54238 - FR Décembre 2005)

© BRGM, 2005, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Synthèse

L'analyse de la vulnérabilité intrinsèque des eaux souterraines conduite dans cette étude a été menée sur la combinaison de deux critères :

L'indice de développement et persistance des réseaux (IDPR)

L'épaisseur de la zone non saturée (ZNS).

Elle porte sur la totalité du territoire décrit par les limites de la région Nord-Pas-de-Calais et les masses d'eau souterraines qu'il contient en partie ou totalité. La vulnérabilité est attribuée aux premiers aquifères rencontrés, celle des nappes plus profondes (>100m) ou bien captives n'est pas abordée.

Il s'agit d'une étude novatrice car elle exploite à l'échelle d'une région, l'indice IDPR. Celui-ci a vocation à simplifier, à de telles échelles, l'analyse de la vulnérabilité des eaux souterraines¹. Calculé de manière uniforme pour l'ensemble du territoire d'étude, il est indépendant de la densité des informations ponctuelles habituellement nécessaires à ce type d'analyse.

La pertinence des résultats, approuvée après avoir été soumise aux experts régionaux mobilisés par le comité de pilotage de ce projet, a permis de valider une combinaison des critères exploités parmi les différents scénarii de l'analyse proposée.

L'analyse combinatoire des données géographiques a été menée au moyen du logiciel de traitement cartographique ArcGis© et s'apparente à une méthodologie de cartographie à index.

Pour valider cette méthode de la vulnérabilité simplifiée, nous avons aussi mené en parallèle une étude de vulnérabilité avec la méthode classique de DRASTIC sur deux zones tests. Il en résulte que la méthodologie IDPR/ZNS, donne des résultats beaucoup moins globalisant que DRASTIC, tout en améliorant la précision.

Cette carte de vulnérabilité intrinsèque simplifiée (scénario 50/50) constitue le document final qui sera exploité par la suite pour l'édition des fiches de vulnérabilité par masse d'eau (annexe 3 - Cdrom) et elle pourra être exploitée dans le cadre d'un traitement BASOLHYD tel qu'il a pu être mené en Seine - Normandie.

¹ Une étude d'extension plus importante a été menée et présentée lors de la conférence internationale sur l'évaluation et la cartographie de la vulnérabilité des eaux souterraines : **INTERNATIONAL CONFERENCE ON GROUNDWATER VULNERABILITY ASSESSMENT AND MAPPING** Ustroń, Poland 15 to 18 June 2004. V. Mardhel, Peter Frantar, Joze Uhan, A. Mišo from Slovenia: *Index of development and persistence of the river networks as a component of regional groundwater vulnerability assessment in Slovenia.*

Sommaire

1	Introduction	12
1.1	Contexte	12
1.2	Objectif.....	12
2	Contexte géologique, géomorphologique et hydrogéologique	14
2.1	Le cadre Géographique	14
2.2	Le cadre géologique	15
2.2.1	Quelques rappels.....	15
2.2.2	La lithologie	17
2.3	L'hydrogéologie régionale.....	19
2.3.1	La nappe des calcaires carbonifère	19
2.3.2	Les nappes du Boulonnais.....	21
2.3.3	La nappe de la Craie.....	21
2.3.4	La nappe des Sables Landéniens.....	24
2.3.5	Les nappes du quaternaire	25
3	La vulnérabilité des aquifères : rappels et méthodologie de cartographie .	26
3.1	Notions générales de vulnérabilité.....	26
3.2	Critères utilisés	27
3.3	Méthode d'analyse simplifiée de la vulnérabilité des eaux	28
3.4	Données de base utilisées dans le cadre de l'étude.....	28
4	Détermination de l'épaisseur de la zone non saturée.....	29
4.1	Cartographie des niveaux d'eau moyens	29
4.1.1	Données initiales.....	29
4.1.2	Densification du semis de points.....	30
4.1.3	Interpolation et cartographie des niveaux d'eau moyens.....	31
4.2	Calcul et cartographie de l'épaisseur de la zone non-saturée	33

5	Cartographie de l'indice de développement et persistance des réseaux (IDPR).....	35
5.1	Géologie et rivières.....	35
5.2	Définition de l'IDPR (Indice de Développement et Persistance des Réseaux).....	37
5.3	Couches d'informations utilisées	38
5.4	Calcul du réseau des talwegs.....	39
5.4.1	Pré traitement du MNT - zones de dépression	40
5.4.2	Pré traitement du MNT - zones planes	40
5.4.3	Réseau de Talweg calculé	41
5.5	Calcul de l'IDPR.....	42
5.6	Analyse des resultats fournis par l'IDPR.....	43
5.7	Agrégation des données par unités spatiales.....	44
6	Cartographie de l'indice simplifié de vulnérabilité.....	45
6.1	Calcul de la Vulnérabilité des eaux souterraines.....	46
6.2	Critère IDPR	47
6.3	Critère ZNS.....	47
6.4	Analyse critique des résultats	57
6.4.1	Indice IDPR sur craie	57
6.4.2	Indice IDPR hors craie	58
6.4.3	Poids relatifs IDPR/ZNS dans le cas des vallées alluviales.....	58
6.5	Validation de la méthode IDPR/ZNS par des Zones de contrôle des résultats	63
6.5.1	La masse d'eau 1001 « Craie de l'Audomarois	67
6.5.2	La masse d'eau 1014 « Sables du Landénien des Flandres »	67
6.5.3	La masse d'eau 1008 « craie de la vallée de la Canche amont ».....	69
7	Application de la méthode Drastic et comparaison avec la vulnérabilité simplifiée	71
7.1	Definitions et rappels	71
7.2	DoNNEES utilisees.....	74

7.2.1	L'épaisseur de la zone non saturée	74
7.2.2	La recharge	75
7.2.3	La perméabilité des sols	76
7.2.4	La perméabilité des aquifères	78
7.2.5	Les pentes.....	80
7.2.6	La présence d'une couverture imperméable.....	80
7.3	Notation et Résultats	81
7.3.1	Cartographie thématique de l'épaisseur de la zone non saturée (ZNS) .	81
7.3.2	Cartographie thématique de la recharge.....	83
7.3.3	Cartographie thématique de la perméabilité du sol.....	85
7.3.4	Cartographie thématique de la perméabilité des aquifères.....	87
7.3.5	Cartographie thématique des pentes	89
7.3.6	Cartographie thématique de la présence de la couverture imperméable	91
7.4	cartographie de la vulnérabilité et discussions	92
7.4.1	Les critères de pondération de la méthode « DRASTIC »	92
7.4.2	Les résultats par zone test.....	93
7.4.3	Discussion.....	94
8	Constitution du réservoir de données.....	97
8.1	Sources de données	97
8.2	OUTIL SIG mis en place	97
8.2.1	Le réservoir de données, la géodatabase.....	98
8.2.2	Structuration des données au sein d'une géodatabase	98
8.3	Maintenance et évolution du SIG.....	99
9	Le système d'information lié à la vulnérabilité des eaux souterraines du Nord-Pas-de-Calais.....	100
9.1	Fichiers numériques associés au CDROM.....	100
9.1.1	Les cartes.....	100
9.1.2	Les données.....	100
9.1.3	Les documents et programmes.....	101
9.2	Calculatrice - Poids et critères IDPR et ZNS	101
10	Conclusion.....	104

Liste des figures

Illustration 1 - Extrait de la carte géologique au 1/1 000 000 – source BRGM	15
Illustration 2- coupe Ouest - Est de la frange captive – source BRGM.....	16
Illustration 3 - Carte lithologique de la région Nord-Pas-de-Calais- source BRGM	17
Illustration 4 - Les principales nappes dans la région Nord-Pas-de-Calais –source BRGM.....	19
Illustration 5 – Principales caractéristiques de l'aquifère du carbonifère – source BRGM	20
Illustration 6 - Exemple de fluctuations piézométriques dans la nappe libre du Carbonifère – source BRGM.....	20
Illustration 7 - exemple de fluctuations piézométriques dans la nappe des Oolithes d'Hesdin-l'Abbé – source BRGM	21
Illustration 8 – Principales caractéristiques de la nappe de la craie – source BRGM.....	22
Illustration 9 Exemple de fluctuations piézométriques de la nappe libre de la craie – source BRGM	23
Illustration 10 – Principales caractéristiques de la nappe des Sables Landéniens – source BRGM	24
Illustration 11 - Principales caractéristiques de la nappe des waterings – source BRGM.....	25
Illustration 12: Définition de la zone non saturée. (Hydrogéologie, G. Castany, 2000)	27
Illustration 13 - Critères de vulnérabilité – source BRGM	27
Illustration 14 - Intersection des couches d'informations constituant les unités fonctionnelles ..	30
Illustration 15: Unités fonctionnelles de la Région Nord-Pas-de-Calais.....	31
Illustration 16 -: Densification des points d'eau – source BRGM	31
Illustration 17 - Carte des niveaux d'eau moyens interpolés pour la région Nord-Pas-de-Calais (pas 250m)	32
Illustration 18 - Carte de l'épaisseur moyenne de la zone non saturée pour la région Nord-Pas-de-Calais (pas de 250m données fournies en annexe).....	33
Illustration 19 - Carte de l'épaisseur moyenne de la zone non saturée par unités fonctionnelles, par masses d'eau et par entités BDRHF V1	34
Illustration 20 - Carte du réseau des talwegs : Données fournies en annexe (couche Talwegs)41	
Illustration 21 - Valeurs de l'IDPR	42
Illustration 22 - Données brutes du calcul de l'IDPR - en annexe (Grille IDPR)	43
Illustration 23 - IDPR affecté aux unités fonctionnelles - Données fournies en annexe (couverture unités fonctionnelles – Attribut IDPR).....	44
Illustration 24 - Valeurs normées du critère IDPR selon la nature des masses d'eau.....	47
Illustration 25 - Valeurs normées du critère ZNS selon la nature et le type d'écoulement des masses d'eau	47
Illustration 26 - Carte de la région Nord- Pas-de-Calais, représentation du critère IDPR	49
Illustration 27 - Carte de la région Nord-Pas-de-Calais, représentation du critère ZNS.....	50
Illustration 28 - Scénario 10% IDPR et 90% ZNS	51
Illustration 29 - Scénario 20% IDPR et 80% ZNS	51
Illustration 30 - Scénario 30% IDPR et 70% ZNS	52

Illustration 31 - Scénario 40% IDPR et 60% ZNS	52
Illustration 32 - Scénario 50% IDPR et 50% ZNS	53
Illustration 33 Scénario 60% IDPR et 40% ZNS	53
Illustration 34 - Scénario 70% IDPR et 30% ZNS	54
Illustration 35 - Scénario 80% IDPR et 20% ZNS	54
Illustration 36 Scénario 90% IDPR et 10% ZNS	55
Illustration 37: Légende des scénarios présentés.....	55
Illustration 38 - Carte de la région Nord-Pas-de-Calais, représentation de la vulnérabilité des eaux souterraines (ratio 50/50 IDPR et ZNS).....	56
Illustration 39 - Vulnérabilité des eaux souterraines de la Région Nord-Pas-de-Calais par unité fonctionnelle (combinaison 50/50 plus Seuil ZNS à 3m)	59
Illustration 40 – Epaisseur moyenne de la ZNS par commune.....	61
Illustration 41- IDPR moyen par commune	61
Illustration 42 - Vulnérabilité des eaux souterraines de la Région Nord-Pas-de-Calais par commune (combinaison 50/50).....	62
Illustration 43 - Légende de la carte de comparaison de Beckelynck / vulnérabilité	63
Illustration 44 – comparaison de la carte de Beckelynck / vulnérabilité simplifiée.....	64
Illustration 45 - Comparaison des cartes Beckelynck et de vulnérabilité simplifiée pour la masse d'eau 1001	66
Illustration 46 – Log géologique de la région de Gravelines (59).....	67
Illustration 47 - Comparaison des cartes Beckelynck et de vulnérabilité simplifiée pour la masse d'eau 1014	68
Illustration 48 - Comparaison des cartes Beckelynck et de vulnérabilité simplifiée pour la masse d'eau 1008	70
Illustration 49 - Notations accordées aux paramètres de la méthode DRASTIC (d'après Lallemand-Barrès, 1994)	72
Illustration 50 - Facteurs de pondération des différents critères de la méthode DRASTIC d'après Lallemand-Barrès, 1994)	73
Illustration 51 Epaisseur de la ZNS dans la région Nord-Pas-de-Calais - source BRGM	74
Illustration 52 - Recharge moyenne mensuelle (en mm) pour la période 1990-2001 sur la région Nord-Pas-de-Calais - source Météo – France	75
Illustration 53 - Carte synthétique des pédopaysages reprise par le BRGM - (source DRAF NPC)	76
Illustration 54 - Extrait de la base descriptive sur les sols (source DRAF NPC).....	76
Illustration 55 - Extrait de la carte géologique au 1/1 000 000 – (source BRGM).....	78
Illustration 56 - Définition des domaines de perméabilité	79
Illustration 57 -Modèle numérique de terrain – source IGN	80
Illustration 58 - Présence d'une couverture imperméable – source BRGM.....	80
Illustration 59 - Cartographie thématique de l'épaisseur de la ZNS sur la zone test 1001	81
Illustration 60 - Cartographie thématique de l'épaisseur de la ZNS sur la zone test 1006.....	82
Illustration 61 - Cartographie thématique de l'épaisseur de la ZNS sur la région Nord-Pas-de- Calais	82
Illustration 62 - Carte thématique de la recharge sur la masse d'eau 1001	83

Illustration 63 - Carte thématique de la recharge sur la masse d'eau 1006	84
Illustration 64- Cartographie thématique de la recharge sur la région Nord-Pas-de-Calais	84
Illustration 65 - Carte thématique de la perméabilité du sol sur la masse d'eau 1001	85
Illustration 66 - Carte thématique de la perméabilité du sol sur la masse d'eau 1006	86
Illustration 67 - Carte thématique de la perméabilité du sol sur la région Nord-Pas-de-Calais ..	86
Illustration 68 - Carte thématique de la perméabilité des aquifères sur la masse d'eau 1001 ...	87
Illustration 69 - Carte thématique de la perméabilité des aquifères sur la masse d'eau 1006 ...	88
Illustration 70 - Carte thématique de la perméabilité des aquifères sur la région Nord-Pas-de-Calais	88
Illustration 71 - Carte thématique des pentes sur la masse d'eau 1001	89
Illustration 72 - Carte thématique des pentes sur la masse d'eau 1006	90
Illustration 73 - Carte thématique des pentes de la région Nord-Pas-de-Calais	90
Illustration 74 - Carte thématique de la couverture imperméable sur région Nord-Pas-de-Calais	91
Illustration 75 – Classes d'indices de vulnérabilité	92
Illustration 76 - Vulnérabilité intrinsèque par la méthode DRASTIC – masse d'eau 1001	93
Illustration 77 - Vulnérabilité intrinsèque par la méthode DRASTIC – masse d'eau 1006	93
Illustration 78 - Comparaison des différentes cartes de vulnérabilité pour la masse d'eau 1001	95
Illustration 79 - Comparaison des différentes cartes de vulnérabilité pour la masse d'eau 1006	96
Illustration 80 : Formulaire Access de calcul de l'indice de vulnérabilité	101
Illustration 81 : Exemple de combinaison d'une masse d'aeu souterraine	102
Illustration 82 : Onglet IDPR de la calculatrice de vulnérabilité	102
Illustration 83 : Onglet ZNS de la calculatrice de vulnérabilité	102
Illustration 84 : Définition des poids relatifs des critères IDPR et ZNS	103
Illustration 85 : Surface cumulée en pourcentage selon la valeur IDPR pour la région Nord-Pas-de-Calais	104
Illustration 86 : Proposition d'étude de la vulnérabilité des eaux de surface par masse d'eau.	105

Liste des annexes

Annexe 1 : Méthodes existantes de cartographie de la vulnérabilité des aquifères

Annexe 2 : Les méthodes d'interpolation

Annexe 3 : CDROM

1 Introduction

1.1 CONTEXTE

Les eaux souterraines du Nord-Pas-de-Calais, plus spécifiquement celles de la craie, sont une ressource majeure pour l'eau potable. Le Schéma directeur d'aménagement et de gestion des eaux (SDAGE) et sa déclinaison en schémas locaux d'aménagement et de gestion (SAGE) soulignent l'importance et, le cas échéant, le caractère irremplaçable de cette ressource. Cependant les eaux souterraines du Nord – Pas-de-Calais sont soumises à des pressions polluantes, tant industrielles qu'agricoles ou encore urbaines. Un certain nombre de constats de pollution ponctuelle ou diffuse ont été faits.

La connaissance territoriale de l'enjeu plus ou moins fort que constituent les nappes souterraines est un élément important en termes d'aménagement du territoire et de gestion des eaux. Au-delà des constats de bonne ou mauvaise qualité des eaux souterraines, il est nécessaire d'appréhender leur vulnérabilité en termes de sensibilité à la pollution, pour comprendre et remédier à des situations passées, mais aussi prévenir des situations futures.

L'application de plusieurs directives européennes nécessite d'apprécier la vulnérabilité des nappes, en lui donnant, en l'occurrence, des significations différentes.

- La Directive Cadre sur l'Eau (DCE) fixe, aux pays membres, l'objectif d'atteindre « le bon état qualitatif et quantitatif des masses d'eau » en 2015. La notion de vulnérabilité intrinsèque des nappes est l'un des outils de cette démarche.
- La Directive « Nitrates », a, quant à elle, permis de définir des zones « vulnérables » dans lesquelles des actions ont déjà été mises en œuvre pour diminuer les intrants d'azote et de phosphore. Là également, il est utile de connaître le degré de vulnérabilité intrinsèque des nappes concernées.

Par ailleurs, au niveau national, un plan « phytosanitaires » est en cours de mise en place, à la demande du Ministère chargé de l'Ecologie et du Développement Durable, nécessitant de faire l'état des lieux de ce type de pollution et de définir la vulnérabilité des eaux superficielles et souterraines vis-à-vis de ces polluants.

1.2 OBJECTIF

La DIREN Nord Pas de Calais, l'ADEME, la Région Nord-Pas-de-Calais et le BRGM, dans le cadre de la convention d'objectif Etat-Région-BRGM et du FRAMEE se sont associés pour définir et cartographier, de façon homogène, la notion de vulnérabilité intrinsèque des eaux souterraines de la Région. Il est donc question ici d'élaborer un outil permettant d'évaluer ce type de vulnérabilité.

Pour réaliser l'objectif cité précédemment, une méthodologie permettant d'évaluer la vulnérabilité, à partir d'un ensemble d'informations (topographie, réseau des cours d'eau,...) et de leur traitement numérique, a été employée. Cette méthodologie et les hypothèses simplificatrices qui la sous-tendent sont présentées au chapitre 3, après quelques rappels de définitions.

Ainsi, dans une première étape, on approchera cette notion, en utilisant le critère d'IDPR (indice de développement et de persistance des réseaux) et en réalisant une carte de vulnérabilité simplifiée. Cela devrait permettre d'obtenir rapidement une image à l'échelle régionale, permettant de cibler les zones sensibles.

Parallèlement, on rassemblera les différentes données intrinsèques pertinentes relatives au sol et au sous-sol qui, après harmonisation des formats et des échelles, constitueront un véritable « réservoir de données » à partir duquel pourra être évaluée la vulnérabilité intrinsèque des systèmes aquifères sur des zones tests, selon des calculs de pondération issus de la méthode classique DRASTIC.

Cette double approche sur la vulnérabilité intrinsèque des eaux souterraines (croisement IDPR/ZNS et DRASTIC) permettra aussi de valider la méthode novatrice de la « vulnérabilité simplifiée » développée par le BRGM.

A partir de plusieurs paramètres, il sera défini un nombre limité de classes de vulnérabilité (5) pour les eaux souterraines.

Après le choix d'un scénario par le comité de pilotage, une cartographie des zones de vulnérabilité sera réalisée sur l'ensemble de la région Nord-Pas-de-Calais et se rapportera in fine aux contours des masses d'eau au sein desquelles seront détaillées les limites des zones hydrologiques et des grandes limites géologiques et hydrogéologiques.

2 Contexte géologique, géomorphologique et hydrogéologique

2.1 LE CADRE GEOGRAPHIQUE

La superficie de la région Nord-Pas-de-Calais (départements du Nord et du Pas-de-Calais) est de l'ordre de 12 500 km². Sa population dépasse les 4 millions d'habitants, soit une densité de 322 habitants au km² (trois fois celle de la France).

Le relief est peu accusé. On distingue :

- des plaines de faible altitude (<0 à 20 m) :
 - o *Intérieures* (Flandres et la Basse - Scarpe)
 - o *Côtières* (Flandre Maritime et les Bas - Champs)
- des plateaux crayeux plus ou moins élevés (60 à 120 m) ;
- un axe topographique majeur entre le boulonnais et la région d'Arras (de 70 à 200 m) qui correspond aux collines de l'Artois ;
- et un plateau primaire (Avesnois) se relevant vers l'est (300 m), à l'approche du massif ardennais.

Il n'y a aucun grand fleuve ou rivière importante. Parmi les cours d'eau entièrement contenus dans la région, on note l'Aa, la Canche, l'Authie et la Scarpe. L'Escaut, la Lys et la Sambre y prennent seulement leur source. La plupart de ces rivières sont canalisées.

On peut noter la présence d'un maillage de canaux de drainage dans les plaines côtières (plaine maritime des Flandres). Ces canaux sont appelés des « watergangs ».

Les hauteurs de précipitations sont en moyenne de 775 mm/an. Elles varient à la fois dans l'espace (1000 mm dans le Haut – Artois, à faible distance du Littoral ; plus de 800 mm sur les reliefs de l'Avesnois ; 600 à 650 mm sur les plateaux et les plaines intermédiaires) et dans le temps (jusqu'à 50 % en plus et en moins).

Les hauteurs de précipitations efficaces sont évaluées en moyenne à 265 mm/an, mais elles varient de la même manière que les pluies totales.

2.2 LE CADRE GEOLOGIQUE

La région Nord-Pas-de-Calais correspond à la bordure Nord du Bassin Parisien. Le Bassin parisien est l'archétype du bassin sédimentaire. Il s'est constitué par l'empilement de couches alternativement meubles ou cohérentes qui se relèvent à sa périphérie formant des formes structurales élémentaires de type cuesta ou boutonnière. Il comprend l'ensemble des terrains post paléozoïques qui s'appuient sur le Massif armoricain à l'Ouest, le Massif central au Sud, les Vosges à l'Est et le massif ardennais au Nord-Est. Il est largement ouvert vers le Nord, où le bassin belge en est la continuation naturelle, et vers la Manche, au-delà de laquelle on retrouve des assises semblables au Sud de l'Angleterre.

2.2.1 Quelques rappels

Les terrains de l'ère secondaire prédominent avec les craies du Séno – Turonien et du Cénomanien sur une grande partie de la région et les calcaires jurassiques dans le Boulonnais. Des grès, des argiles et des sables ont recouvert la craie à l'ère tertiaire des Flandres au sud-est du bassin.

Il subsiste des terrains primaires (calcaires du Carbonifère – Dévonien) dans l'Avesnois et à l'état de reliques dans le Boulonnais suite à des épisodes d'érosion qui ont éliminé les formations les plus récentes.

Les dépôts argileux du tertiaire tout le long de la frontière (en orange sur la carte ci-dessous) sont les témoins de la présence de la mer à cette époque.

D'ailleurs, l'extension de la craie du Sénonien et du Turonien (en vert sur la carte) montre l'importance des dépôts marins carbonatés.

La présence de faille et de la boutonnière du Boulonnais sont les conséquences directes des déformations tectoniques ultérieures.

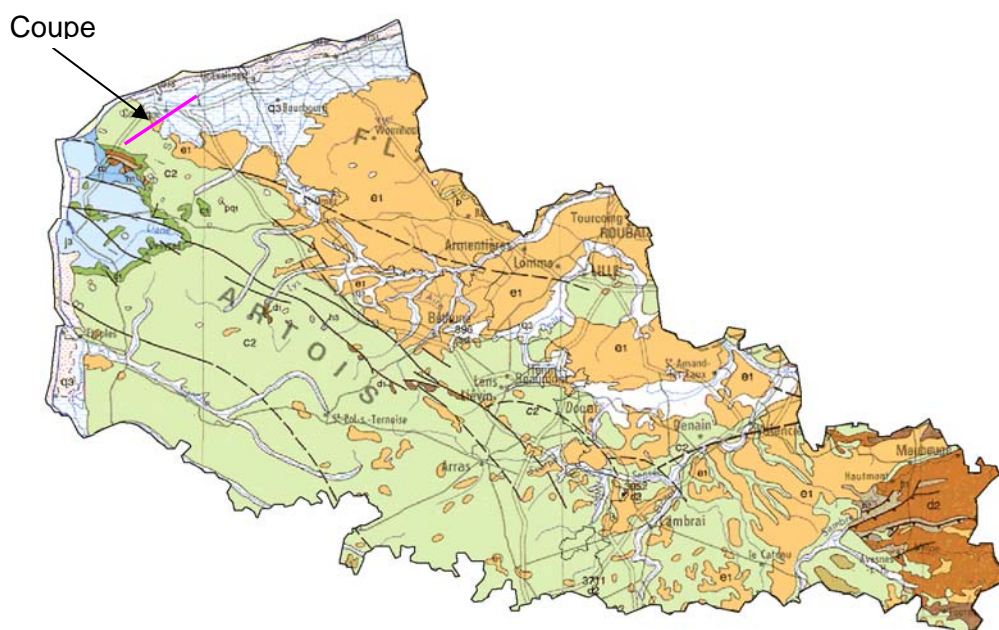


Illustration 1 - Extrait de la carte géologique au 1/1 000 000 – source BRGM

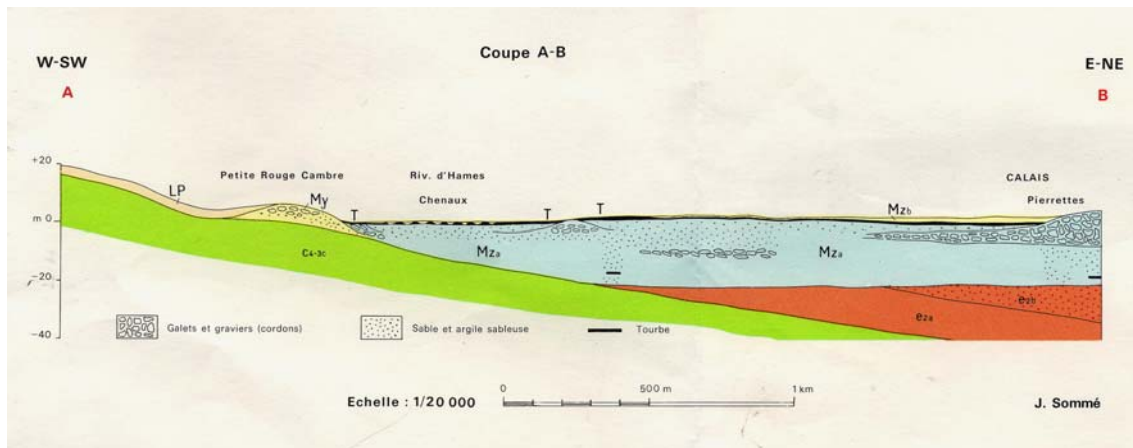


Illustration 2- coupe Ouest - Est de la frange captive – source BRGM

✓ Les transgressions marines

Dans la constitution de la géologie du Nord-Pas-de-Calais, les transgressions ont joué un rôle majeur.

A l'ère *secondaire*, débute les premières transgressions marines. C'est au jurassique moyen que le phénomène est ample avec un recouvrement des terrains paléozoïques par des dépôts bajociens sableux. La sédimentation produit essentiellement des terrains calcaires (calcaires gréseux, oolithiques, marneux,...).

Au cénomanien, suite à l'ouverture de l'Atlantique Nord, la transgression atteint son paroxysme et recouvre toute la région sauf la partie lilloise. A la fin du crétacé, la mer régresse et les sédiments déposés se transforment par diagenèse en craie (roche compacte).

A l'ère *tertiaire*, la position de la mer bouge sans arrêt, on assiste plutôt à des dépôts continentaux sur la bordure Nord - Est de la région constitués d'argiles, de sables,...

A l'ère *quaternaire*, les alternances de périodes de glaciation entraîne un refroidissement et une baisse du niveau marin. Ces phases périglaciaires contribuent à la fissuration de la craie par diaclase. Les limons pléistocènes (éoliens) se déposent sur l'ensemble de la région. L'ensemble de ces dépôts vont être repris par l'érosion et modelés ces formations superficielles

✓ La tectonique

Le trait structural majeur du Nord-Pas-de-Calais est le bombement anticlinal de l'Artois dont l'axe est globalement nord-ouest/sud-est, Il s'abaisse vers le Sud - Est et s'estompe à l'approche d'Arras tandis qu'il s'ouvre à l'ouest sur les formations jurassiques et paléozoïques du Bas Boulonnais.

Dissymétrique, à flanc sud doux et flanc nord plus incliné, cet anticlinal est affecté par des failles longitudinales (N100° à 120°). Il en résulte un découpage du flanc nord en compartiments de plus en plus abaissés dans cette direction.

Autres traits structuraux :

Séparant les bassins tertiaires des Flandres et d'Orchies, l'anticlinal du Mélantois (faille SSW/NNE dans sa partie Sud) fait réapparaître des terrains crétacés transgressifs et peu épais. Dans cette zone, l'érosion peut aussi faire quasiment disparaître la craie du Turonien supérieur et du Sénonien.

Plus à l'Est, Valenciennes et l'Escaut sont situés sur un axe structural composé par un horst* avec un relèvement brutal des couches séparant le bassin d'Orchies, à l'Ouest du début du bassin de Mons.

L'ensemble de ces structures est du à l'activité tectonique tardi-hercynienne qui a rejoué à la fin du Crétacé jusqu'à l'Yprésien (Eocène).

Depuis les premières recherches de corrélation entre les orientations de la fracturation et celles des vallées, de nombreuses études ont précisé les relations entre les écoulements souterrains et la fracturation.

2.2.2 La lithologie

Le substratum de la région du Nord - Pas-de-calais se caractérise par des couches sédimentaires allant du Primaire au Quaternaire :et affleurant en différents secteurs répartis de la manière suivante :

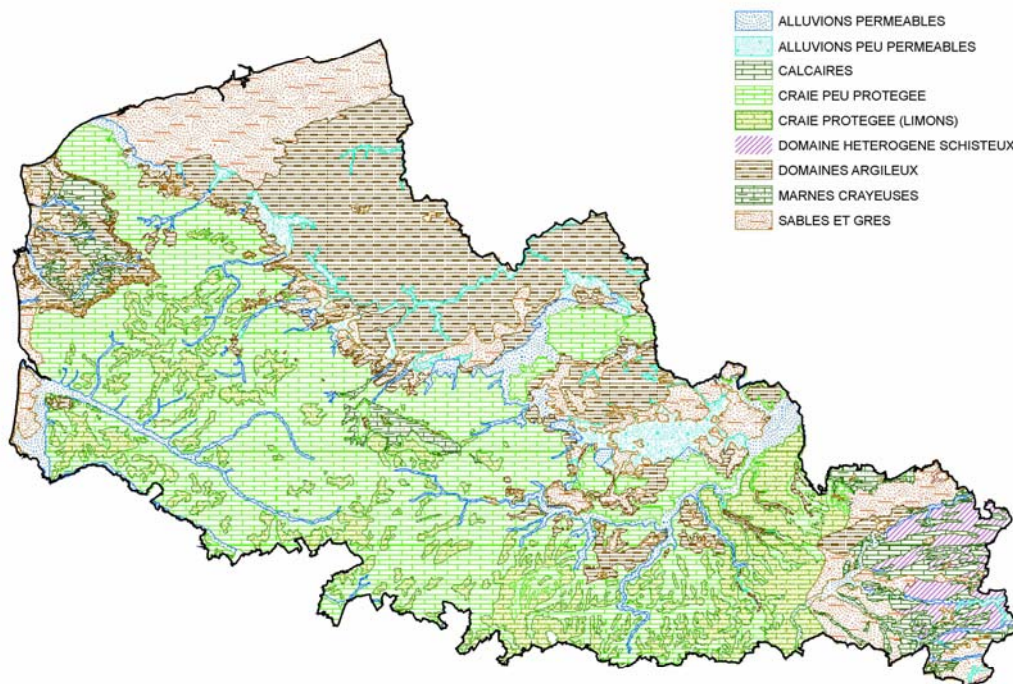


Illustration 3 - Carte lithologique de la région Nord-Pas-de-Calais- source BRGM

✓ **Le primaire** est composé de schistes, grès et calcaires d'âge dévono-carbonifère, dans l'Avesnois (synclinerium orienté ENE-WSW, situé entre Maubeuge et Avesne-sur-Helpe) et le Boulonnais (horst* de Marquise). Ces formations sont également connues en profondeur dans les secteurs de Lille et de Saint-Amand-les-Eaux où elles sont aquifères.

✓ **Le Jurassique supérieur** est composé de calcaires, de marnes et de grès, dans la boutonnière du Boulonnais (zone située sur l'axe de l'anticlinal faillé de l'Artois).

✓ **Le Crétacé inférieur**, avec l'argile de Gault et les sables verts albiens, sur le pourtour du Boulonnais.

✓ **Le Crétacé supérieur** (Cénomaniens et SENO-turonien), exclusivement constitué de marnes, de craies marneuses et de craies, dans l'Artois, les Vals de Canche et d'Authie, le Lillois, le Pays minier, le Valenciennois et le Cambrésis. Signalons que les assises crayeuses sont également présentes en profondeur sous les terrains plus récents des bassins des Flandres et d'Orchies.

✓ **Le Landénien** argilo-sableux (Argile de Louvil et sables d'Ostricourt) est présent sur le pourtour des bassins des Flandres et d'Orchies. Comme pour la craie, ces terrains s'engouffrent également dans ces bassins, sous des terrains plus récents (Argiles des Flandres).

✓ **L'Yprésien**, représenté par les argiles des Flandres est localisé dans la plaine flamande le nord de Lille et la pèvrèle.

✓ **Le Quaternaire**, correspond aux Sables pissards de la plaine maritime et aux sables dunaires côtier, ainsi qu'aux alluvions des fonds de vallées humides et aux limons éoliens de couverture.

** Horst : « structure tectonique constituée par des failles normales de même direction, limitant des compartiments de plus en plus abaissés en s'éloignant du milieu de la structure »- A.Foucault, JF Raoult- dictionnaire de Géologie*

2.3 L'HYDROGEOLOGIE REGIONALE

En allant des couches les plus anciennes du Dévonien - Carbonifère aux plus récentes du quaternaire, on distingue dans la région Nord-Pas-de-Calais, les différents aquifères suivants (voir l'illustration n° 4 ci - dessous) :

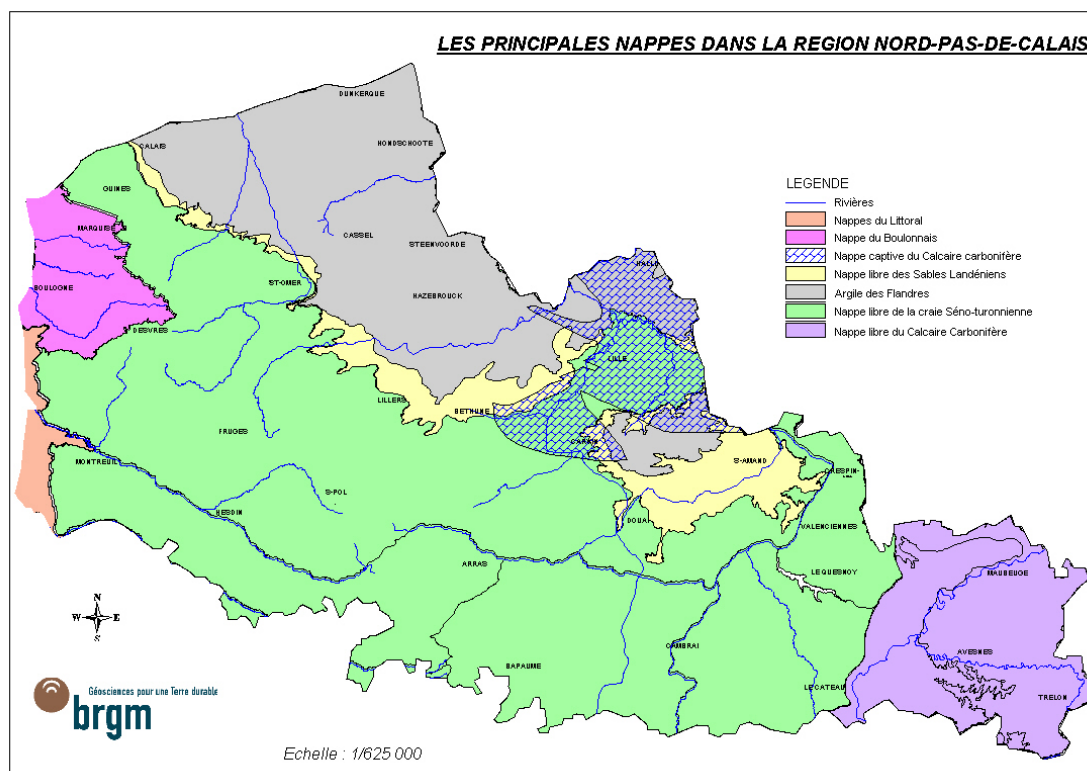


Illustration 4 - Les principales nappes dans la région Nord-Pas-de-Calais –source BRGM

2.3.1 La nappe des calcaires carbonifère

Le Calcaire Carbonifère dans les zones d'affleurements de L'Avesnois et du Boulonnais ainsi qu'en profondeur, dans les secteurs de Lille et de Saint-Amand-les-Eaux.

Formés de bancs épais de plusieurs centaines de mètres de calcaires et de dolomies d'âge Viséen, le réservoir est souvent affecté par une karstification ancienne. Il possède essentiellement une perméabilité et une porosité dites « en grand » ou de « fissure ». Le coefficient de perméabilité est de l'ordre de 10^{-3} et 10^{-2} m/s (voir tableau ci-dessous).

CARBONIFERE	Libre (Avesnois)	Captif (Nord de Lille)
Géologie	Calcaires, dolomies et schistes du Tournaisien et Viséen	
Géométrie	Synclinatorium	Structure plissée et faillée
Epaisseur théorique	350 m	53 m (Halluin)
Transmissivité	2x10 ⁻² m ² /s (Solesmes) 7x10 ⁻⁴ m ² /s (Landrecies)	2x10 ⁻² m ² /s (Solesmes) 7x10 ⁻⁴ m ² /s (Landrecies)
Porosité efficace	1 à 15 %	1x10 ⁻⁴ à 1x10 ⁻⁷ %
Profondeur	4 m /sol (Grand-Fayt)	93 m/sol (Bondues)
Ecoulement	Drainage par la Sambre et ses affluents	Est en Ouest vers les captages de Lille-Roubaix-Tourcoing
Ressource	Zones d'affleurement et drainage des nappes supérieures (terrains de couverture)	Infiltration directe dans la zone belge et apports par drainance (nappe de la craie)
Vulnérabilité	importante	La nappe est bien protégée
Qualité	PH=7-9, Conductivité = 1200µS/cm Faciès hydrogénocarbonaté calcique et magnésien	

Illustration 5 – Principales caractéristiques de l'aquifère du carbonifère – source BRGM

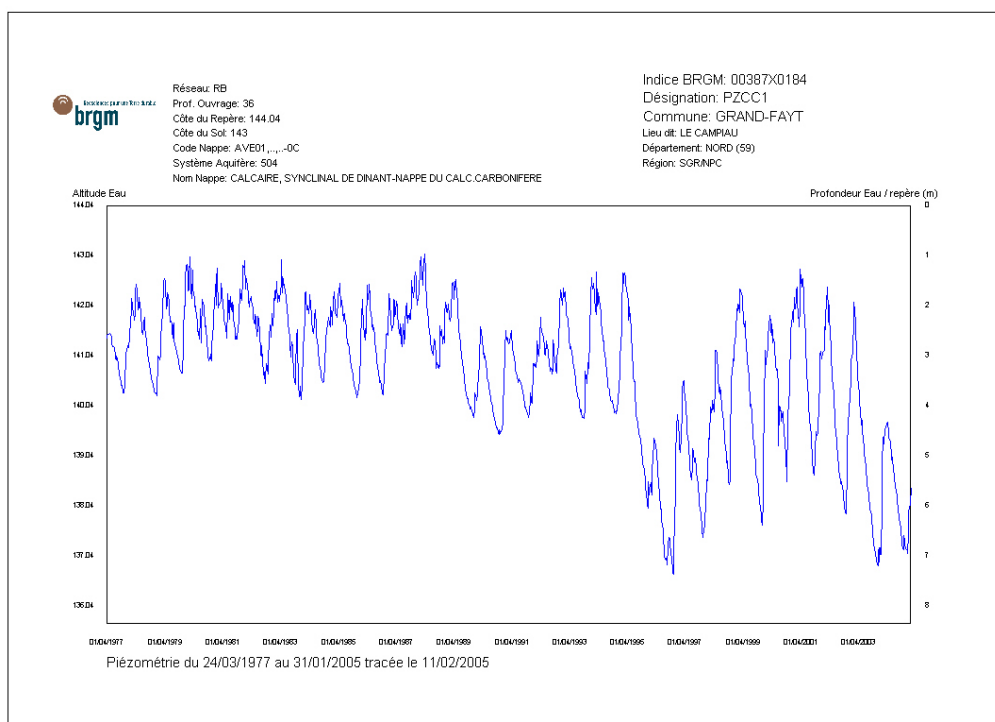


Illustration 6 - Exemple de fluctuations piézométriques dans la nappe libre du Carbonifère – source BRGM

2.3.2 Les nappes du Boulonnais

Le Jurassique du Boulonnais avec les différents réservoirs suivants (de bas en haut), tous pratiquement perméables « en grand » :

- les calcaires oolithiques bajo-bathoniens (secteur de Marquise) ;
- les calcaires et grès de l'Oxfordien supérieur (dont les Oolites d'Hesdin-l'Abbé dans le sud de la boutonnière) ;
- et le Kimméridgien supérieur et le Portlandien qui donnent naissance à de nombreuses sources.

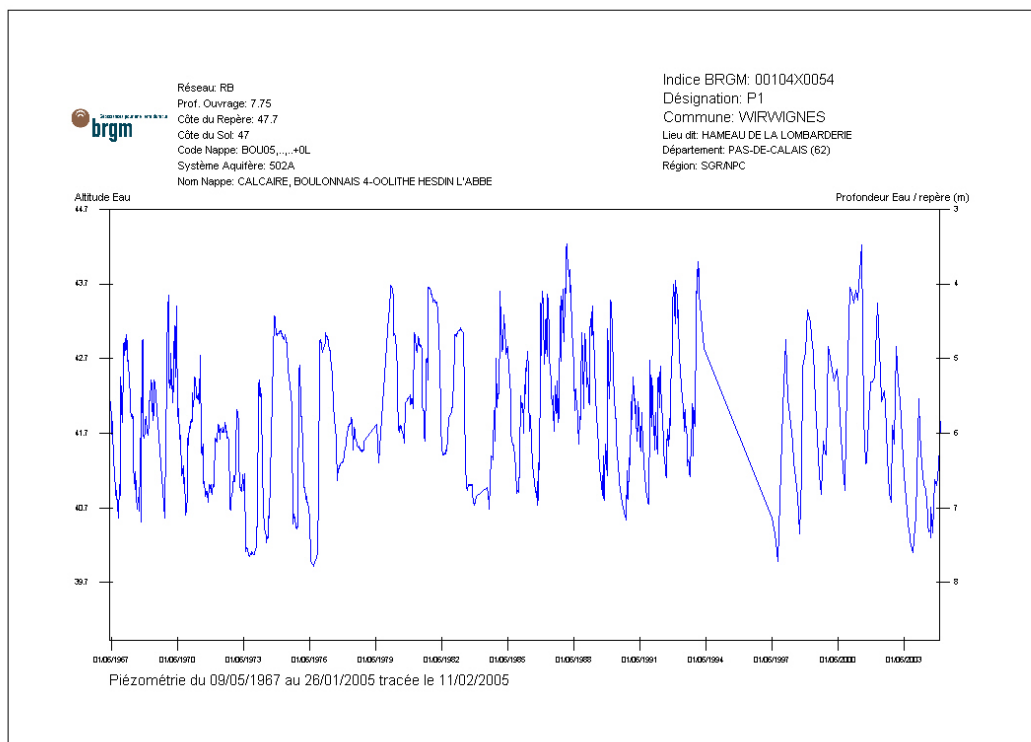


Illustration 7 - exemple de fluctuations piézométriques dans la nappe des Oolites d'Hesdin-l'Abbé – source BRGM

2.3.3 La nappe de la Craie

- Les assises crayeuses du Crétacé supérieur, on distingue de bas en haut :
 - La craie marneuse du Cénomaniens reconnue comme aquifère uniquement dans le Haut-Artois (sa perméabilité est de l'ordre de 10^{-5} et 10^{-3} m/s).
 - Les craies à silex du Turonien Supérieur et la craie blanche du Sénonien, contiennent la plus importante nappe de la région. Elle est exploitée par de nombreux captages pour tous les usages (AEP, industrie et agriculture). Libre sur la plus grande partie du territoire régional (le coefficient de perméabilité est de l'ordre de 10^{-4} et 10^{-2} m/s) – voir tableau ci-dessous.
Elle se met progressivement en captivité sous les bassins tertiaires des Flandres et d'Orchies où elle perd rapidement sa bonne productivité (diminution de la perméabilité de fissures).

CRAIE	Libre / Captive
Géologie	Craies du Sénonien – Turonien supérieur et Cénomanién
Régime	<ul style="list-style-type: none"> - Libre sur près de la moitié du territoire - Captive sous bassins tertiaires d'Orchies et des Flandres
Epaisseur théorique	<ul style="list-style-type: none"> - Quelques mètres à l'Est - + de 100 mètres à l'Ouest
Transmissivité	$1 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ (faibles sous les plateaux) $1 \times 10^{-1} \text{ m}^2/\text{s}$ (moyenne à forte sous vallées)
Porosité efficace	2 à 3 %
Profondeur	Variable selon la topographie
Ecoulement	Sources et rivières
Ressource	Nappe libre = pluies efficaces
Vulnérabilité	<ul style="list-style-type: none"> - Libre : non négligeable car absence de couverture - Zones encore plus vulnérables en flancs de coteaux
Qualité	<p>pH= 7 à 8 – Conductivité $\approx 515 \mu\text{S}/\text{cm}$</p> <p>Faciès hydrogénocarbonaté calcaïque et magnésien</p>

Illustration 8 – Principales caractéristiques de la nappe de la craie – source BRGM

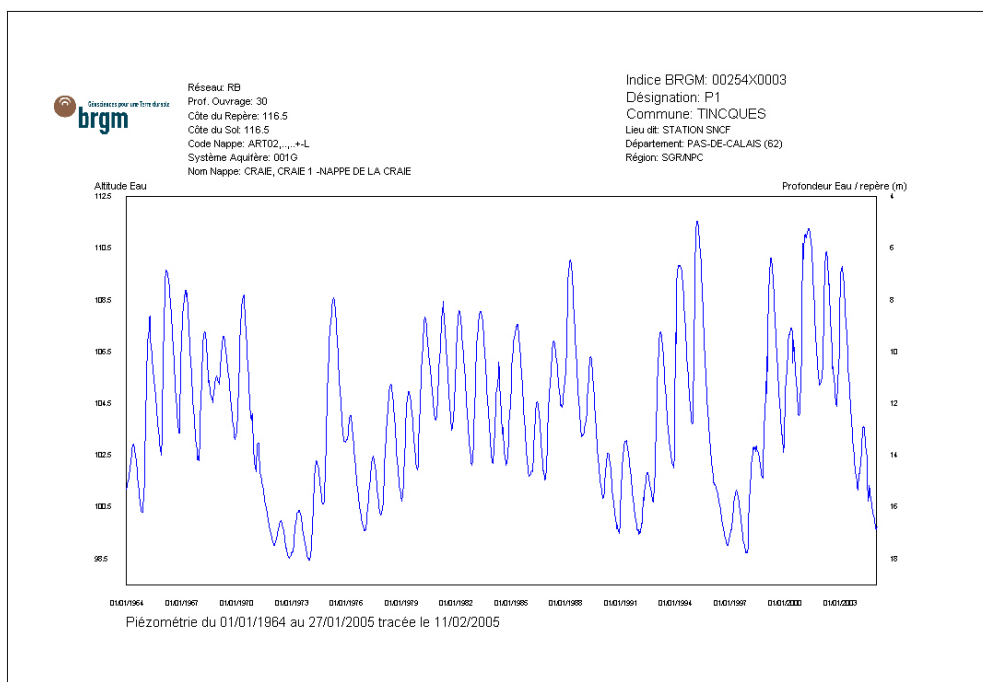


Illustration 9 Exemple de fluctuations piézométriques de la nappe libre de la craie – source BRGM

Le régime libre de cette nappe implique des variations de niveau à la fois saisonnières et interannuelles, liées à la pluviométrie. Faibles en vallées, ces fluctuations atteignent plusieurs mètres sous les plateaux comme le montre le graphe de la figure n° ci-dessus du piézomètre de Tincques (00254X0003) situés dans le bassin versant de la Canche (masse d'eau 1008).

2.3.4 - La nappe des Sables Landéniens

Le Landénien sableux (dont les « Sables d'Ostricourt ») est aquifère dans les bassins des Flandres et d'Orchies. Les nappes correspondantes passent d'un régime libre à la périphérie des cuvettes, à un régime captif sous les argiles yprésiennes (Argiles des Flandres). Le coefficient de perméabilité est de l'ordre de $1 \text{ à } 2 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$.

LANDENIEN	Libre / Captive
Géologie	Sables Landéniens des bassins tertiaires d'Orchies et des Flandres
Régime	- Libre dans zone d'affleurement - Captive principalement dans le bassin des Flandres
Epaisseur moyenne	15 à 20 mètres
Perméabilité d'interstices	$K = 1 \times 10^{-5} \text{ m/s}$
Profondeur	- faible en zone d'affleurement - de plus en plus importante vers le centre des bassins (> 100 m en Flandre septentrionale)
Ecoulement	Sources
Ressource	Nappe libre = pluies efficaces
Vulnérabilité	- Libre : très vulnérable et elle présente de nombreuses contaminations locales - captive : bien protégée par les Argiles des Flandres
Qualité	3 Faciès : carbonaté - calcique, bicarbonaté - sodique, chloruré - sodique

Illustration 10 – Principales caractéristiques de la nappe des Sables Landéniens

— source BRGM

2.3.5 – Les nappes du quaternaire

Les formations quaternaires ont une épaisseur faible et une perméabilité variable. La plus importante nappe est représentée par les « sables pissards » de la plaine maritime flamande.

Les sables dunaires côtiers sont nettement moins étendus et ils sont également aquifères mais peu exploités.

Les alluvions et les limons en vallées humides constituent de petits aquifères, habituellement en relation hydraulique avec les réservoirs sous-jacents, soit directement, soit par drainance.

Enfin, la nappe des Watteringues est constituée par un assemblage de parcelles où la surface est libre. Les watergangs sont des drains qui régulent et influencent en permanence le niveau de la nappe.

Elle est extrêmement sensible à la pluviosité car elle est proche du sol et le ruissellement joue un rôle non négligeable dans l'hydraulique du système.

Watteringues	Libre
Géologie	Sables du Flandrien supérieur (quaternaire)
Régime	- Libre - Elle est légèrement captive quand elle est recouverte de limons
Epaisseur théorique	- biseau de sables dont l'épaisseur croît vers la mer - Elle peut atteindre 30 m d'épaisseur sur la côte
Perméabilité	2×10^{-4} m/s (horizontale) 1×10^{-5} m/s (verticale)
Coefficient d'emmagasinement	$2 \text{ à } 5 \times 10^{-3}$
Profondeur	Proche de la surface
Ecoulement	watergangs
Ressource	Nappe libre = pluies efficaces Eau de mer
Vulnérabilité	Très vulnérable à la pollution
salinité	Profil de salinité important (100 à 300 mg/l de Cl ⁻)

Illustration 11 - Principales caractéristiques de la nappe des watteringues – source BRGM

3 La vulnérabilité des aquifères : rappels et méthodologie de cartographie

3.1 NOTIONS GENERALES DE VULNERABILITE

Avant de décrire la méthodologie de l'étude, il apparaît important de rappeler quelques définitions :

- **Le risque de pollution** résulte du croisement d'un ou plusieurs aléas et d'un ou de plusieurs enjeux : $R(isque) = A(léa) \times E(njeux)$.
- **Un aléa** suppose une approche probabiliste, il s'agit de l'application d'un stress, (une action polluante par exemple) sur un point, un axe ou un espace plus ou moins vulnérable du milieu naturel au regard des eaux souterraines dans le cadre de cette étude.
- **La vulnérabilité** est représentée par la capacité donnée à l'eau située en surface de rejoindre le milieu souterrain saturé en eau. La notion de vulnérabilité repose sur l'idée que le milieu physique en relation avec la nappe d'eau souterraine procure un degré plus ou moins élevé de protection vis-à-vis des pollutions suivant les caractéristiques de ce milieu.

Dans la littérature, on distingue deux types de vulnérabilité ; la vulnérabilité intrinsèque et la vulnérabilité spécifique (Schnebelen et al, 2002) :

- la **vulnérabilité intrinsèque** est le terme utilisé pour représenter les caractéristiques du milieu naturel qui déterminent la sensibilité des eaux souterraines à la pollution par les activités humaines ;
- la **vulnérabilité spécifique** est le terme utilisé pour définir la vulnérabilité d'une eau souterraine à un polluant particulier ou à un groupe de polluants. Elle prend en compte les propriétés des polluants et leurs relations avec les divers composants de la vulnérabilité intrinsèque.

La distinction des deux types de vulnérabilité est nécessaire car, d'une façon générale, elles ne se placent pas sur la même échelle d'investigation : la vulnérabilité intrinsèque peut être considérée comme invariante dans le temps (à notre échelle de travail) alors que la vulnérabilité spécifique (directement liée aux polluants éventuels) est évolutive et ne caractérise qu'un instant précis.

- **Les enjeux** représentent la cible qui ne doit pas être atteinte par les effets du stress sur le milieu naturel.

La notion de risque est donc étroitement liée à la définition des enjeux. Par défaut, dans le cadre de cette étude, l'enjeu est représenté par l'eau souterraine mobilisable dans les nappes phréatiques quel qu'en soit l'usage.

- Le transfert des polluants dans le sol s'effectue d'abord à travers **la zone non saturée** (ZNS) avant d'atteindre la zone saturée.

La ZNS est la zone du sous-sol comprise entre la surface du sol et la surface d'une nappe libre. A cet endroit, la quantité d'eau gravitaire est temporaire, en transit.

Trois parties différenciées en fonction de leur teneur en eau la composent :

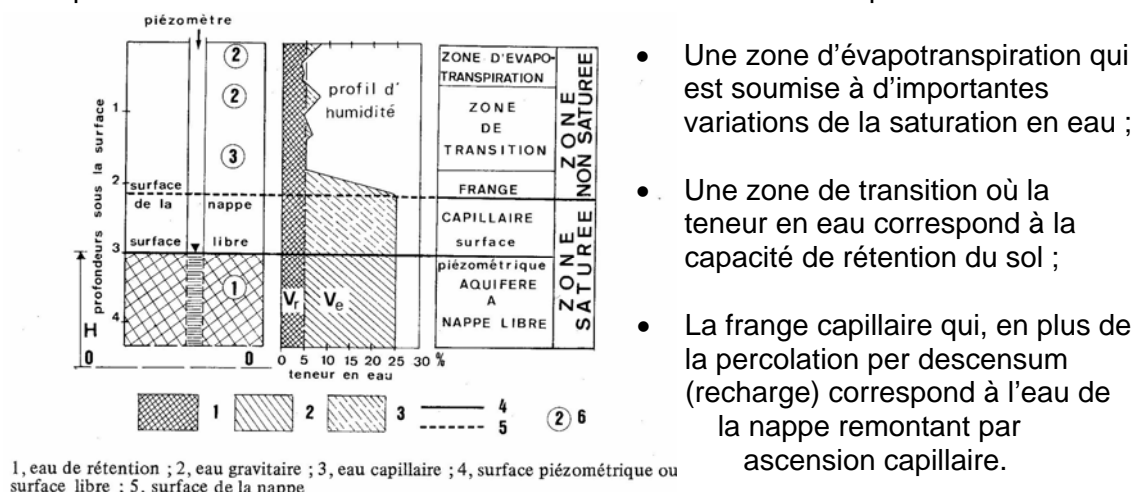


Illustration 12: Définition de la zone non saturée. (Hydrogéologie, G. Castany, 2000)

3.2 CRITERES UTILISES

Dans le cadre de l'étude, c'est la **vulnérabilité intrinsèque, telle que décrite ci-dessus**, qui **va être l'objet de la cartographie**. Pour qualifier cette vulnérabilité un certain nombre de critères sont disponibles, ils sont associés aux ensembles souterrains dans lesquels ils interviennent et sont récapitulés dans le **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**

VULNERABILITE INTRINSEQUE		
Sol	Zone non saturée (ZNS)	Zone saturée
Topographie (pente)	Profondeur de la nappe libre ou épaisseur de la ZNS	Type de nappe (libre ou captive)
Pédologie (perméabilité verticale des sols, nature et texture des sols)	Temps de transfert (perméabilité verticale)	Temps de résidence (dépend de l'hydrodynamisme des formations aquifères)
Bilan hydrique (ruissellement et infiltration efficace)		Relation eaux souterraines/eaux superficielles
	Structure de la ZNS (variation de faciès, épaisseur des discontinuités de faciès, position dans le profil vertical, texture, teneur en matière organique et argile)	Piézométrie (sens et direction d'écoulement et évolutions selon la période du cycle hydrologique)
	Présence ou non d'un horizon moins perméable et position de celui-ci	Epaisseur de l'aquifère (quantité de réserve)
		La recharge (recharge annuelle nette).
		Type de système hydrogéologique (caractères plus ou moins capacitif et transmissif)
	Battement de nappe	
	Fracturation (directions et densité)	

Illustration 13 - Critères de vulnérabilité – source BRGM

L'exploitation de ces critères est souvent normalisée au travers de différentes méthodologies d'analyse de la vulnérabilité des eaux.

3.3 METHODE D'ANALYSE SIMPLIFIEE DE LA VULNERABILITE DES EAUX

De nombreuses méthodes de détermination de la vulnérabilité des eaux souterraines ont été développées dans le monde, allant des plus complexes avec des modèles prenant en compte les processus physiques, chimiques et biologiques dans la zone noyée, à des méthodes de pondération entre différents critères affectant la vulnérabilité (Gogu et Dassargues, 1998 b).

Ces différentes méthodes sont décrites en annexe 1. Parmi celles ci les **méthodes dites « de cartographie à index avec pondération des critères »** (Point Count Systems Models, PCSM) **apparaissent les plus pertinentes** vis à vis des réalités de terrain. Ce sont aussi les plus reconnues et utilisées à l'heure actuelle (Gogu et Dassargues 2000 ; Zaporozec et Vrba 1994). La majorité de ces méthodes exploite un critère relatif à la morphologie du territoire étudié :

- soit la pente prise en compte directement au travers de sa valeur absolue
- soit la pente par un facteur indirect, reprenant la densité de drainage des réseaux hydrologiques de surface.

Au-delà du facteur pente, la nature des couvertures en place au-dessus des aquifères (leur capacité à laisser transiter les polluants) et l'épaisseur des terrains non saturés sont les critères prépondérants utilisés par différentes méthodes d'analyse de vulnérabilité.

Compte tenu de ces méthodologies et des retours d'expérience qui leurs sont associés, il a été décidé que **la carte de vulnérabilité simplifiée des eaux souterraines de la Région Nord-Pas-de-Calais présentée dans cette étude utilisera deux critères** :

- **L'épaisseur de la zone non saturée** : déduite de l'approche régionale des niveaux d'eau souterraine comparée au modèle numérique de terrain au pas de 50 m.
- **L'indice de développement et de persistance des réseaux** qui tend à unifier et simplifier l'approche géomorphologique relative à la nature des formations de couverture des premières nappes rencontrées. Il permet une analyse régionale simplifiée de la vulnérabilité des eaux qui en l'absence de données précises du milieu saturé, s'applique aux nappes dites phréatiques. Cet indice est détaillé au chapitre 5.

3.4 DONNEES DE BASE UTILISEES DANS LE CADRE DE L'ETUDE

Les principales données utilisées pour cette étude sont les suivantes :

- Cartes géologiques à l'échelle du 1/1 000 000 et 1/50 000 (Région Nord Pas de Calais) ,
- Données de la BSS – Banque du Sous-Sol (données piézométriques),
- Les données piézométriques issues des études précédentes : je ne connais pas les références
- MNT (altitude du sol au pas de 50 m de l'IGN),
- Tracé des cours d'eau et zones hydrologiques de la BD Carthage,
- Limites des entités hydrogéologiques du référentiel national BDRHF V1
- Les contours des masses d'eau souterraine
- Différents documents d'expertise des partenaires du comité de pilotage sources : Aquif'Brie, IAURIF, BRGM
- Pour Drastic les données de météo France
- les données pédologie de la DRAF Nord Pas de Calais

4 Détermination de l'épaisseur de la zone non saturée

Pour l'étude de la vulnérabilité, il est nécessaire de déterminer l'épaisseur de la zone non saturée, qui joue un rôle primordial dans la qualification de la capacité d'un aquifère à être affecté par l'infiltration d'un polluant.

Ce calcul de l'épaisseur de la zone non saturée va s'effectuer en plusieurs étapes :

1. Réaliser, sur l'ensemble du territoire d'étude, une carte des niveaux moyens des eaux souterraines (remarque : le terme de « piézométrie » ne peut être retenu car l'interpolation des niveaux d'eau est effectuée sur la totalité du territoire d'étude et sans distinction des nappes existantes).
2. Déduction de l'épaisseur de la zone non saturée à partir de la différence entre les niveaux d'eau moyens et la topographie (déduite du modèle numérique de terrain).

4.1 CARTOGRAPHIE DES NIVEAUX D'EAU MOYENS

Pour obtenir une carte des niveaux d'eau moyens, une base de données spécifique a été créée. Elle contient l'ensemble des points d'eau décrits dans la Banque de données du Sous-Sol (BSS) et pour lesquels ont été définis des niveaux d'eau statiques lors de la réalisation des ouvrages.

Des cartes piézométriques ont été réalisées, dans la région Nord-Pas-de-Calais, sur la nappe de la craie en 1995, 1997 et 2001. L'ensemble de ces données ont été intégrées dans le calcul des niveaux moyens.

A ces données seront ajoutés des points fictifs obtenus par densification du semis de points, obtenue par traitement des informations de la BSS (Banque du Sous-Sol).

4.1.1 Données initiales

34271 « points d'eau statiques » sont extraits de la banque de données du sous-sol. Ils possèdent en général une seule valeur de profondeur d'eau établie à la date d'exécution de l'ouvrage. Il s'agit de forages, puits et sondages. La distribution spatiale de ces points présente une forte hétérogénéité liée à la nature des formations géologiques.

A partir de cet ensemble d'information et afin de restreindre le champ d'investigation aux premiers aquifères rencontrés, un filtrage des données est effectué :

- Exclusion des points décrivant un niveau d'eau statique à une profondeur excédant 90 mètres ;
- Exclusion des points décrivant des phénomènes d'artésianisme qui correspondent à des nappes captives ;

4.1.2 Densification du semis de points

La densification du semis de point a pour objectif de limiter les effets d'une interpolation automatique des valeurs piézométriques dans des zones de faible densité d'information.

Elle est fondée sur l'hypothèse d'un comportement hydrogéologique homogène au sein d'unités fonctionnelles. Celles-ci résultent de l'intersection de couches d'informations géographiques relatives aux masses d'eau souterraines, aux entités hydrogéologiques, aux formations sédimentaires issues de la carte géologique et aux bassins versants hydrologiques issus de la BD Carthage.

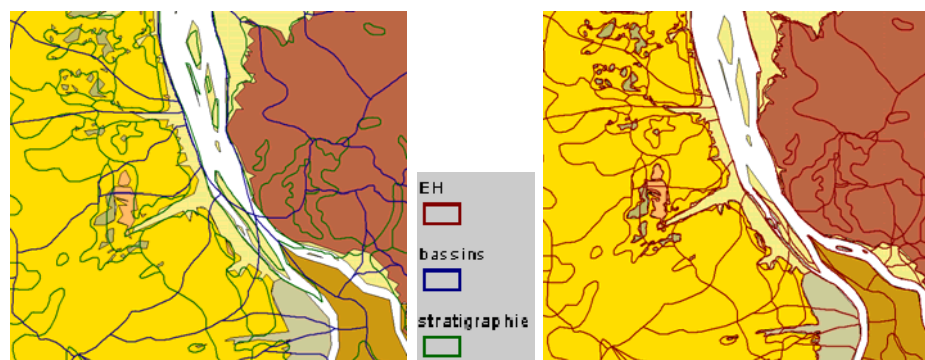


Illustration 14 - Intersection des couches d'informations constituant les unités fonctionnelles

Les unités fonctionnelles représentent approximativement 46880 polygones sur le territoire d'étude pour une surface moyenne de 26,6 ha. A des fins de densification, les unités fonctionnelles sont subdivisées par sections altimétriques au pas de 2.5 mètres. Chaque surface élémentaire est décrite par les points d'eau statiques qu'elle contient. Au sein de chacune de ces surfaces d'altitude homogène, la profondeur moyenne est calculée lorsque sont contenus au moins 5 points de niveau statique.

Par la suite, seuls les points dont la mesure de niveau est de l'ordre de la moyenne obtenue (plus ou moins la demi valeur du pas d'analyse altimétrique = 1.25 m) seront conservés pour recalculer une valeur de profondeur moyenne (toujours sous condition de la présence d'au moins 5 points de niveau statique).

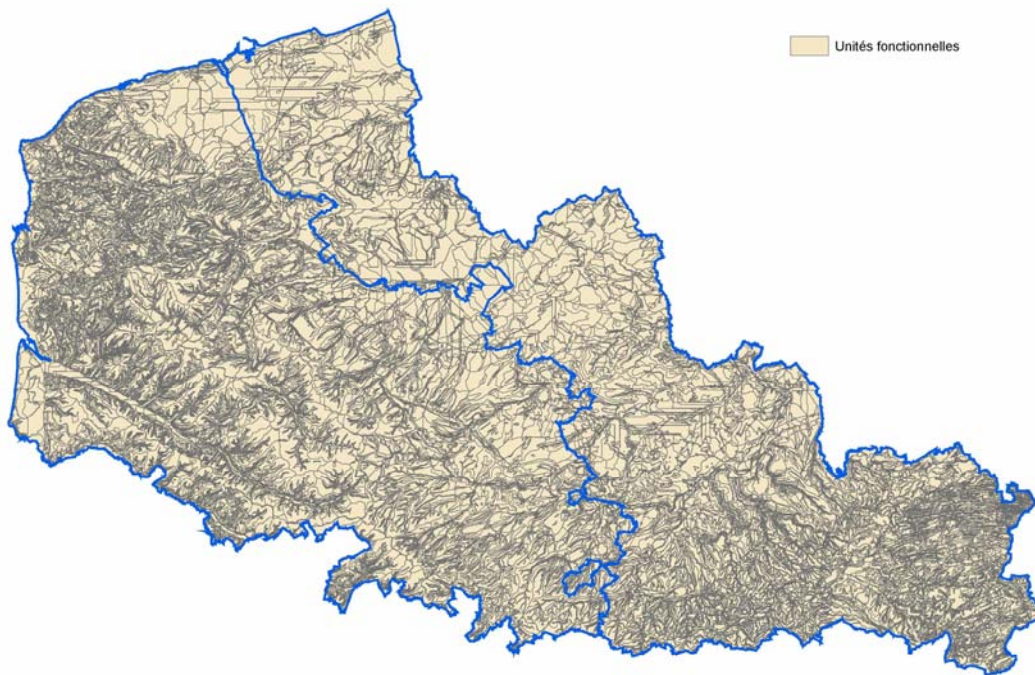


Illustration 15: Unités fonctionnelles de la Région Nord-Pas-de-Calais

Au sein de chaque unité spatiale, une matrice de points est ensuite générée au pas de 100 mètres, elle hérite de la valeur altimétrique du modèle numérique de terrain à laquelle est soustraite la profondeur moyenne décrite ci-dessus. Cette matrice est ajoutée aux points existants.

Cette opération est ensuite recomposée pour des sections altimétriques au pas de 5 mètres. La densification a permis d'accroître de 12 % le nombre de points du semis initial, en portant le nombre total de points d'estimation de la piézométrie à 14264 dont

- 12 968 points issus de la BSS avec un niveau statique
- 1 296 points de densification (issus de l'étude sur les remontées de nappe)

Illustration 16 -: Densification des points d'eau – source BRGM

4.1.3 Interpolation et cartographie des niveaux d'eau moyens

Le semis de points obtenu précédemment a été interpolé afin d'obtenir une discrétisation à l'échelle du territoire national des valeurs moyennes des premiers niveaux d'eau rencontrés. Le but de l'interpolation est d'obtenir un maillage régulier de valeurs à partir de données échantillonnées selon un plan aléatoire. Il existe deux approches, l'une déterministe, l'autre probabiliste, dont les principes de bases sont rappelés en annexe 2.

Ces deux méthodes d'interpolation mathématique ont été utilisées afin de calculer, à partir du semis de points, l'altitude de la surface moyenne des eaux souterraines sur le territoire régional.

Compte tenu du nombre de points obtenus après densification du semis initial, de la densité d'information présente au km² à l'échelle de cette étude, l'approche probabiliste fournit un résultat similaire à l'approche déterministe. Par souci d'optimisation des vitesses de calcul, la méthode retenue pour déterminer la carte des niveaux d'eau moyens est celle de type déterministe (méthode dite « *inverse des moindres carrés* »).

Cette méthode ne peut s'appliquer que pour des formations aquifères non captives, homogènes et isotropes en grand.

La matrice régulière de cellule (250m*250m) obtenue a ensuite fait l'objet d'une correction systématique pour chaque maille dont la cote piézométrique excède la cote altimétrique définie par le MNT.

La figure suivante présente le résultat final que constitue la carte des niveaux d'eau moyens. Les données qui la composent figurent sur le support numérique joint en annexe 3 du rapport.

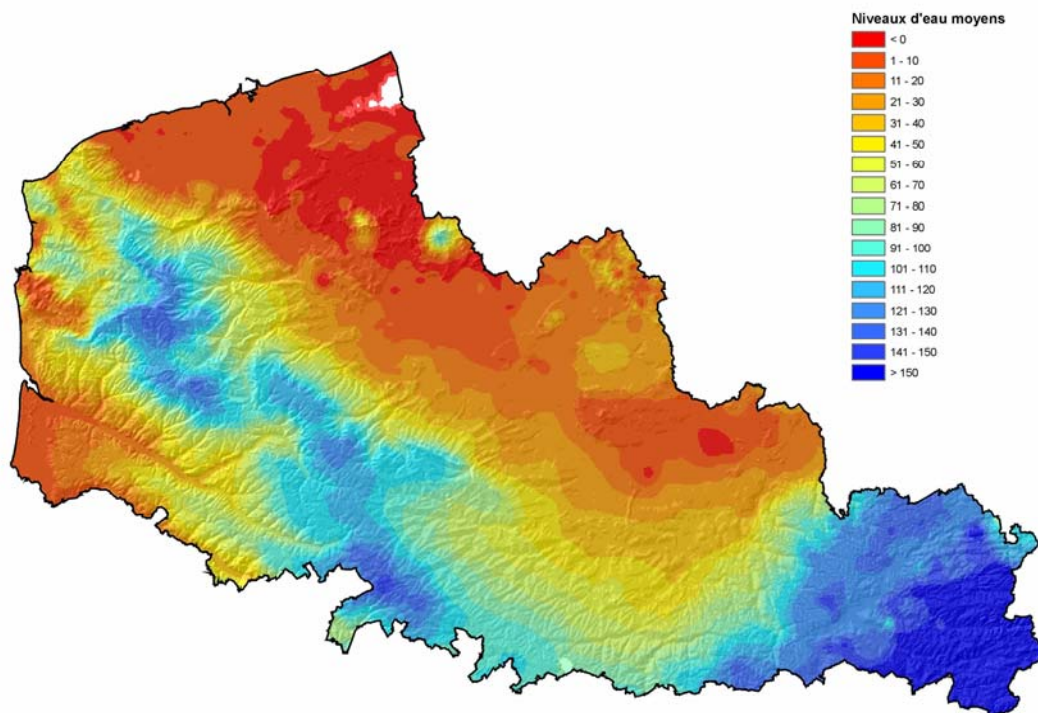


Illustration 17 - Carte des niveaux d'eau moyens interpolés pour la région Nord-Pas-de-Calais (pas 250m)

4.2 CALCUL ET CARTOGRAPHIE DE L'ÉPAISSEUR DE LA ZONE NON-SATURÉE

L'épaisseur de la ZNS est calculée à partir du niveau d'eau moyen obtenu précédemment et du modèle numérique de terrain (différence entre la cote altimétrique et le niveau d'eau).

La figure ci-après présente la cartographie ainsi obtenue de l'épaisseur de la ZNS.

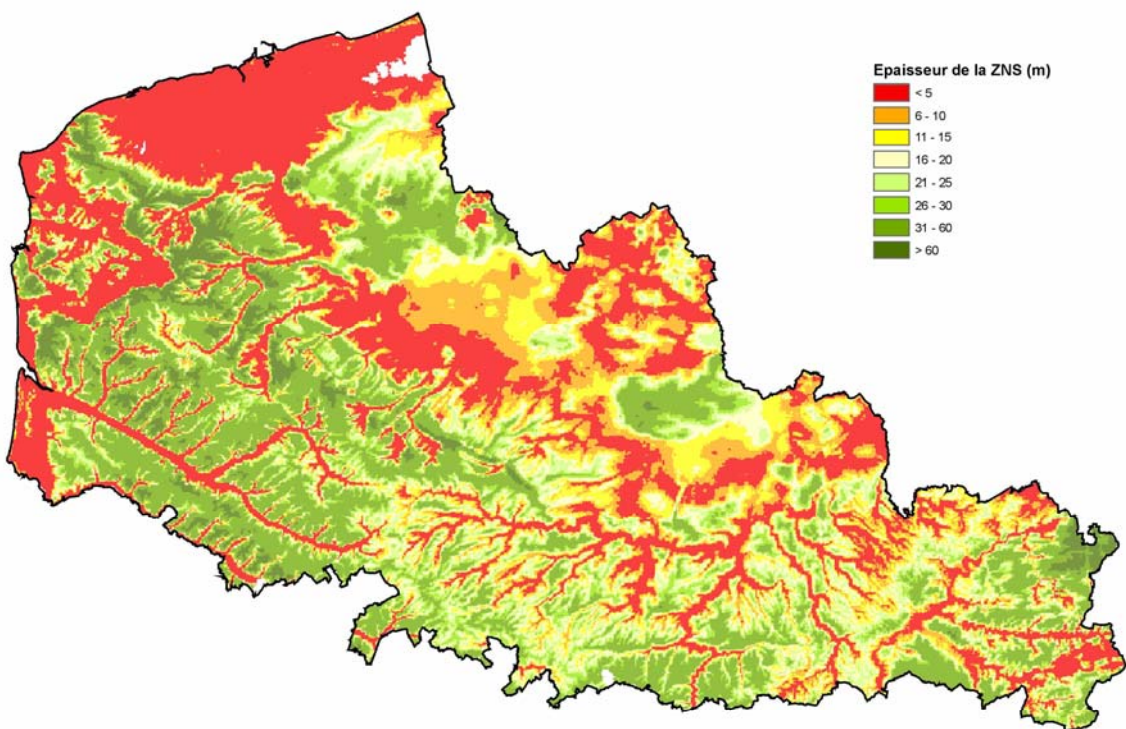


Illustration 18 - Carte de l'épaisseur moyenne de la zone non saturée pour la région Nord-Pas-de-Calais (pas de 250m données fournies en annexe)

L'épaisseur de la ZNS calculée précédemment et présentée sous la forme d'une grille au pas de 250m est rapportée aux unités fonctionnelles dans la carte suivante.

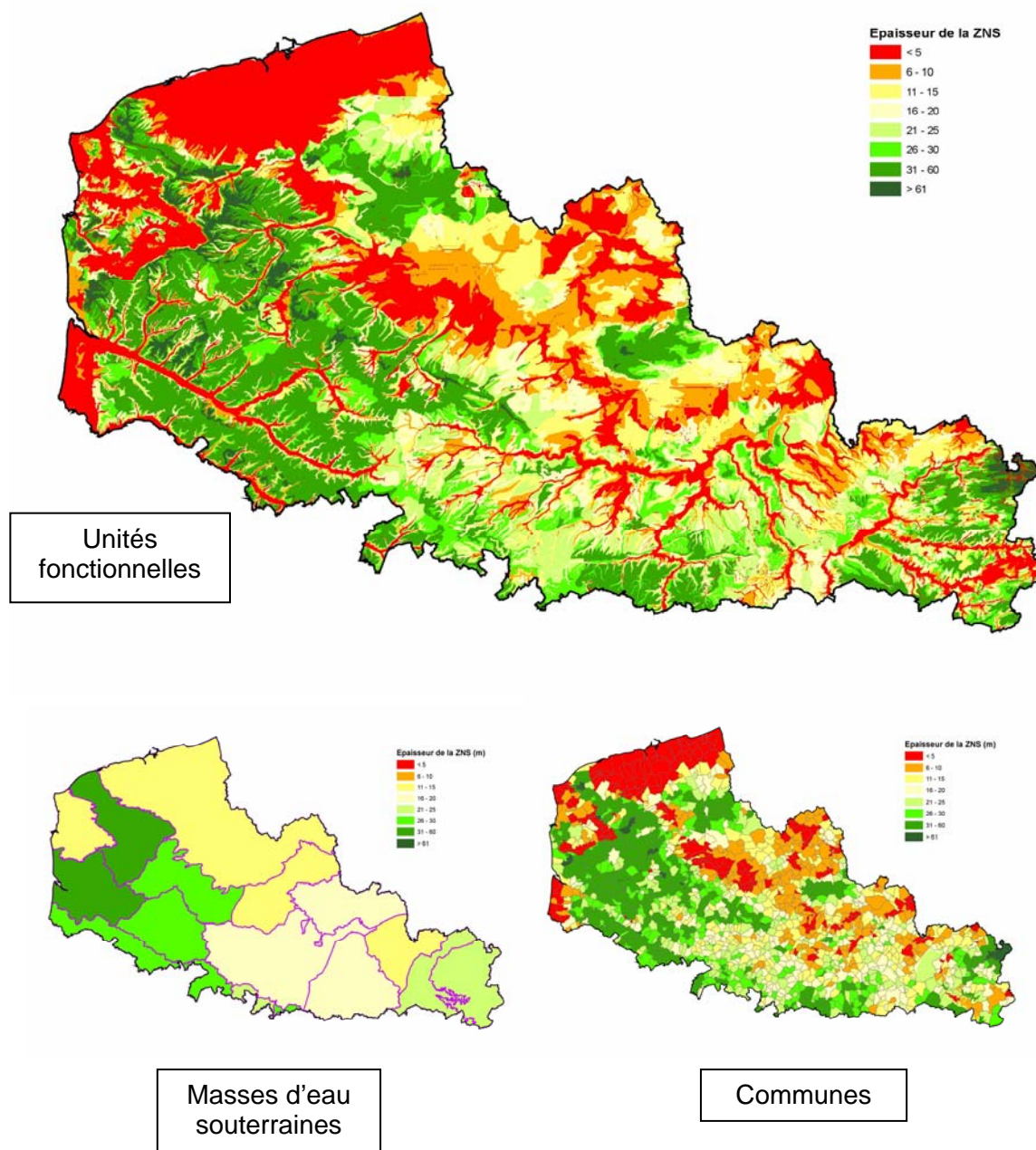


Illustration 19 - Carte de l'épaisseur moyenne de la zone non saturée par unités fonctionnelles, par masses d'eau et par entités BDRHF V1

5 Cartographie de l'indice de développement et persistance des réseaux (IDPR)

5.1 GEOLOGIE ET RIVIERES

La recherche d'éventuelles corrélations entre la forme du réseau hydrographique et les formations géologiques a suscité un grand nombre de travaux. L'hypothèse principale qui les sous tend suppose que les réseaux hydrographiques conservent, dans leurs formes, la signature des phénomènes endogènes (Deffontaines (B.)) ou exogènes.

Prud'homme Robert² est l'un des précurseurs français en matière d'analyse des réseaux hydrographiques. Dans sa thèse, il montre l'intérêt de ces types d'analyse pour les études géologiques, car : "les caractères du réseau hydrographique sont extrêmement dépendants au cours de leur évolution de l'état du bassin versant", et ajoute : "les trois paramètres dont les variations nous semblent les plus importantes dans l'étude des réseaux hydrographiques sont la topographie, les structures géologiques et la composition lithologique du sous-sol". Prud'homme Robert expérimente donc l'analyse cartographique des réseaux hydrographiques et donne un certain nombre de corrélations très pertinentes. Kim Woo-Gwan³, poursuit les travaux de Prud'homme et consacre à l'analyse des réseaux hydrographiques une grande partie de son travail.

Deffontaines⁴ établit des corrélations et insiste sur l'intérêt du réseau hydrographique pour une approche morphostructurale : "Le réseau hydrographique est principalement modifié par la lithologie et la fracturation".

Riazanoff⁵ propose des méthodes automatiques d'extraction et d'analyse de réseaux hydrographiques, en faisant apparaître quelques corrélations qui ouvrent les portes à une analyse automatisée et informatique du réseau hydrographique.

Enfin, très récemment, Delcaillau⁶ étudie la morphométrie des principaux bassins versants de Taiwan à l'aide des réseaux hydrographiques, pour approcher géomorphologiquement la genèse de cette île en cours de formation.

Les travaux de ces différents auteurs montrent que le tracé du réseau hydrographique résulte d'interactions complexes. Si l'eau par nature est incompressible et s'écoule par le chemin le plus court du point haut (sommet, crête,...) au point bas (mer, lac, fleuve...), durant son parcours, les conditions de son cheminement influent sur son tracé.

² Prud'homme (R.) (1972), *Analyse morphostructurale appliquée en Aquitaine occidentale et au golfe de Gascogne - Définition d'une méthodologie cartographique interprétative*, Thèse, Université Bordeaux I, 364 pages, 1972.

³ Kim (W.G.) (1978), *Analyse cartographique du bassin de Nak-Dong (Corée)*, Thèse, Université Bordeaux I, 95 pages, 1978.

⁴ Deffontaines (B.) (1990), *Développement d'une méthodologie morphonéotectonique - Analyse des surfaces enveloppes du réseau hydrographique et des MNT*, Thèse, Université Paris VI, 225 pages, 1990.

⁵ Razianoff (S.) (1989), *Extraction et analyse automatique des réseaux à partir de MNT*, Thèse, Université Paris VII, 89 pages, 1989.

⁶ Delcaillau (B.) (1997), *Les fronts de chaîne active - Genèse des reliefs et relations tectonique - érosion-sédimentation*, Thèse, Université de Caen, 300 pages, 1997.

Parmi ces facteurs, les causes d'origines uniquement géologiques sont nombreuses et peuvent se décomposer de la manière suivante :

▪ **La lithologie**

La lithologie est l'étude de la nature des roches issues d'une formation géologique. La nature des roches intervient dans les modifications du relief.

- la nature physique : épaisseur, dureté, compétence, perméabilité, porosité.
- la nature chimique : sensibilité à la dissolution, qualité des eaux interstitielles, phénomènes de cristallisation ou de diagenèse.

En fonction de la lithologie, le comportement du réseau et son organisation vont être différents.

▪ **La structure**

La géologie structurale (ou tectonique régionale) s'attache à l'étude des déformations des roches. Elle s'intéresse à l'agencement originel des roches, incluant les pendages. Les alternances géologiques, les discordances, les déformations en cours ou phénomènes néotectoniques affectent la lithosphère et modifient la topographie et façonnent considérablement le réseau hydrographique.

D'autres facteurs interviennent et sont la résultante d'une combinaison de contraintes de nature diverse. Leur importance diffère selon l'échelle à laquelle on observe le réseau hydrographique.

▪ **La pente régionale**

La pente régionale est définie par un sens, une direction puis une inclinaison. La pente est un élément déterminant dans l'orientation et l'organisation des cours d'eau.

▪ **Le rajeunissement**

Le rajeunissement est le début d'un nouveau cycle d'érosion. Il y a alors une reprise de l'érosion sur un relief pénéplané ou aplani, par abaissement du niveau aval des cours d'eau ou par surrection du niveau amont. Le déclenchement d'un tel phénomène a lieu lors d'une augmentation de la pente longitudinale du cours d'eau qui accroît sa dynamique et rompt son profil d'équilibre.

L'eustatisme est le phénomène responsable des variations générales du niveau moyen des mers. De telles variations agissent sur le potentiel érosif d'un cours d'eau et donc sur sa morphologie. Ainsi, l'eustatisme est l'une des causes du rajeunissement.

5.2 DEFINITION DE L'IDPR (INDICE DE DEVELOPPEMENT ET PERSISTANCE DES RESEAUX)

L'idée qui sous tend l'IDPR découle des observations suivantes, ***l'organisation du réseau hydrographique est dépendante des formations géologiques qui le supportent.***

Dans l'hypothèse d'un milieu parfaitement homogène, seule la pente et la morphologie des reliefs guident la mise en place des cours d'eau. Or dans le milieu naturel, comme nous venons de le voir ci-dessus, les structures géologiques et la composition lithologique du sous-sol ont une influence significative sur l'établissement des réseaux hydrographiques.

En effet, la nature des surfaces des bassins a un rôle primordial sur le comportement hydrologique de ceux-ci. Les paramètres qui interviennent sont la lithologie, la pédologie et la couverture végétale. Ces paramètres influencent grandement la perméabilité et la rugosité de la surface, qui conditionnent à leur tour la vitesse du ruissellement et le rapport de l'écoulement sur l'infiltration, appelé aussi coefficient d'écoulement.

La densité de drainage est donc un indicateur révélateur des propriétés des formations géologiques. Un bassin formé de matériaux très perméables aura en général une densité de drainage faible. A l'inverse, un bassin formé de roches imperméables mais meubles et érodables, comme des marnes ou des argiles, va souvent présenter une densité de drainage élevée.

L'IDPR devient ainsi le moyen de quantifier ce rôle en comparant **un réseau théorique** établi selon l'hypothèse d'un milieu parfaitement homogène (*indice de développement ID*), **au réseau 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.

5.3 COUCHES D'INFORMATIONS UTILISEES

Le réseau hydrologique naturel, utilisé dans la démarche de calcul de l'IDPR provient des données de la BD CARTHAGE IGN©. Les arcs décrits dans la couche d'information HYA99 et les plans d'eau ou zones larges des cours d'eau de cette base de données cartographiques décrivent la géométrie des axes hydrographiques.

Les attributs exploités pour l'analyse de l'IDPR sont : l'**état** des axes

- 0 Inconnu;
- 1 Ecoulement permanent;
- 2 Ecoulement intermittent;
- 3 Axe fictif (créé pour assurer la continuité des cours d'eau);
- 4 Canal abandonné, à sec;

et leur **nature**

- 0 Inconnue;
- 1 Cours d'eau à berges non maçonnées
- 2 Cours d'eau à berges maçonnées
- 3 Canal (larg.>15m)
- 4 Aqueduc
- 5 Fossé
- 6 Autre
- 7 Estuaire principal

La nature des axes et l'état des axes hydrographiques conditionnent plusieurs approches distinctes du milieu qui dépendent étroitement de la qualité des informations intégrées à BD CARTHAGE©.

Le réseau théorique des écoulements est fondé sur l'analyse des talwegs. Il suppose une lame d'eau météoritique et un récepteur imperméable homogène. Il s'établit à partir de l'analyse du modèle numérique de terrain (MNT).

5.4 CALCUL DU RESEAU DES TALWEGS

Seule l'altitude est fournie de manière "brute" par le MNT. On ne peut en extraire que des réseaux de talwegs.

La plupart des logiciels de systèmes d'information géographique permettent de générer automatiquement des limites de bassins versants à partir d'un MNT. Les traitements exploités dans le cadre de cette étude ont été développés pour l'application ArcView©. Les procédures utilisées proviennent de l'Université du Texas à Austin. Elles ont été développées pour Arcview par le CRWR (Center for Research in Water Resources).

L'extraction automatique de réseaux (de talwegs ou de crêtes) exploité dans cette étude peut être assimilée à une démarche structuraliste inspirée du modèle physique du ruissellement de l'eau sur un relief.

Elle se fonde sur trois étapes :

- La première utilise un algorithme basé sur la recherche de "points de talwegs". Dans une fenêtre centrée sur le pixel à traiter, on examine le voisinage afin de détecter un changement de pente concave ou un extremum positif de la dérivée seconde.
- La seconde étape calcule le "graphe dérivé" du MNT qui attribue à chaque point la direction de la maille voisine suivant la plus grande pente. Cet ensemble de "cellules de drainage" décrit un bassin versant lorsque l'exutoire est situé sur le bord du MNT ou un "bassin de dépression" lorsque tous les chemins décrits en suivant les cellules aboutissent en un minimum local.
- Enfin l'application trace dynamiquement des lignes, en partant de certains points choisis et en suivant la ligne de plus grande pente jusqu'à arriver soit en bord d'image, soit en un minimum local, soit enfin jusqu'à rencontrer une ligne déjà tracée.

La majeure partie des données issues des MNT est précise, cependant il peut exister dans les modèles des surfaces causant des dépressions pour lesquelles aucun exutoire n'est possible ou des zones planes pour lesquelles la détermination d'un talweg s'avère impossible.

Il est nécessaire de traiter artificiellement ces zones afin de rétablir un écoulement potentiel et permettre la détermination des talwegs.

5.4.1 Pré traitement du MNT - zones de dépression

Les solutions sont généralement basées sur l'hypothèse suivante : si l'eau s'écoule en surface et s'il y a une dépression naturelle, l'eau remplit préalablement celle-ci avant de continuer sa route vers l'aval. La première des techniques de traitement des dépressions considère les dépressions comme des artefacts altimétriques ne représentant aucune forme réelle (Jenson et Domingue 1998). De ce fait, certains auteurs procèdent au comblement des dépressions après avoir déterminé l'exutoire de la dépression : c'est la technique dite du « bouche-trous ». Dans ce cas, on détermine la cellule exutoire et on affecte à toutes les cellules de la dépression l'altitude de cet exutoire. La seconde, décrite par Fairfield et Leymarie (1991), vise à déterminer l'exutoire de la dépression puis à inverser le chemin d'écoulement entre le fond de la dépression et cet exutoire. Ceci aura pour effet de rendre la continuité du réseau hydrographique. Pour déterminer quelle cellule représente l'exutoire, il faut trouver, parmi toutes les cellules ne recevant pas d'eau d'une autre cellule et s'écoulant vers le fond de la dépression, laquelle possède l'altitude la plus basse.

Enfin, une dernière méthode répandue consiste à identifier une zone d'altitude forte entre deux dépressions et à creuser cette zone de façon à ce que l'eau de la dépression puisse s'écouler en aval.

A l'usage, ces techniques offrent toutes des résultats comparables. L'algorithme de traitement des dépressions n'influence donc pas de manière significative le réseau obtenu par extraction automatique. Cependant, c'est au niveau de la modification du MNT que se situent les différences essentielles de ces méthodes. En effet, si la seconde technique indiquée ci-dessus est sans effet sur les altitudes, les deux autres vont les modifier et fournir une information importante quant à la qualité des données initiales. Par souci de simplification des outils mis en œuvre, la première méthode est celle retenue pour le processus de calcul de l'IDPR.

5.4.2 Pré traitement du MNT - zones planes

Le problème des zones plates peut se régler d'une manière quasiment similaire au traitement des dépressions. Il suffit de rechercher, parmi tous les pixels adjacents de la zone plate, le pixel le plus proche du pixel traité, possédant une altitude inférieure à celui-ci. Ce pixel peut être considéré comme le **pixel exutoire**. Après avoir déterminé l'exutoire, il faut créer un chemin hydrographique allant du pixel traité au pixel exutoire de façon à rétablir la continuité du réseau. Cette opération doit se répéter pour tous les pixels de la zone plate. L'inconvénient de cette méthode est de créer des chemins hydrographiques parallèles et d'empêcher la convergence des eaux avant l'exutoire de la zone plate.

Il existe un moyen de remédier à cet artefact supposant que les chemins hydrographiques situés sur une zone plate, en plus de s'écouler en direction de l'exutoire, doivent s'éloigner le plus possible des pixels d'altitudes plus élevées (Garbrecht et Martz⁷). Cela permet de concentrer les écoulements à l'amont de la cellule exutoire et au centre de la zone plate. Cet algorithme⁸ n'a pas été intégré dans le cadre de la méthode IDPR. Sur les reliefs peu marqués, un tel algorithme de traitement des zones plates s'avérerait décisif.

⁷ Automated Extraction of Drainage Network and Watershed Data From Digital Elevation Models Lawrence W. Martz and Jurgen Garbrecht Volume 29, No. 6, pp. 901-908, December 1993

⁸ Lacroix, M., Martz, L.W., Kite, G.W. and Garbrecht, J. 2002. Using digital terrain analysis modelling techniques for the parameterization of a hydrologic model. *Environmental Modelling and Software*

5.4.3 Réseau de Talweg calculé

Le réseau de drainage obtenu représente la hiérarchisation de la réponse d'un milieu imperméable soumis au ruissellement d'une lame d'eau. La figure suivante présente la restitution cartographique du calcul du réseau des talwegs.

Les données numériques sont fournies sur CDROM en annexe de ce rapport sous format ARCVIEW 8x et 9x. Le système de projection utilisé est celui du "Lambert II Etendu".

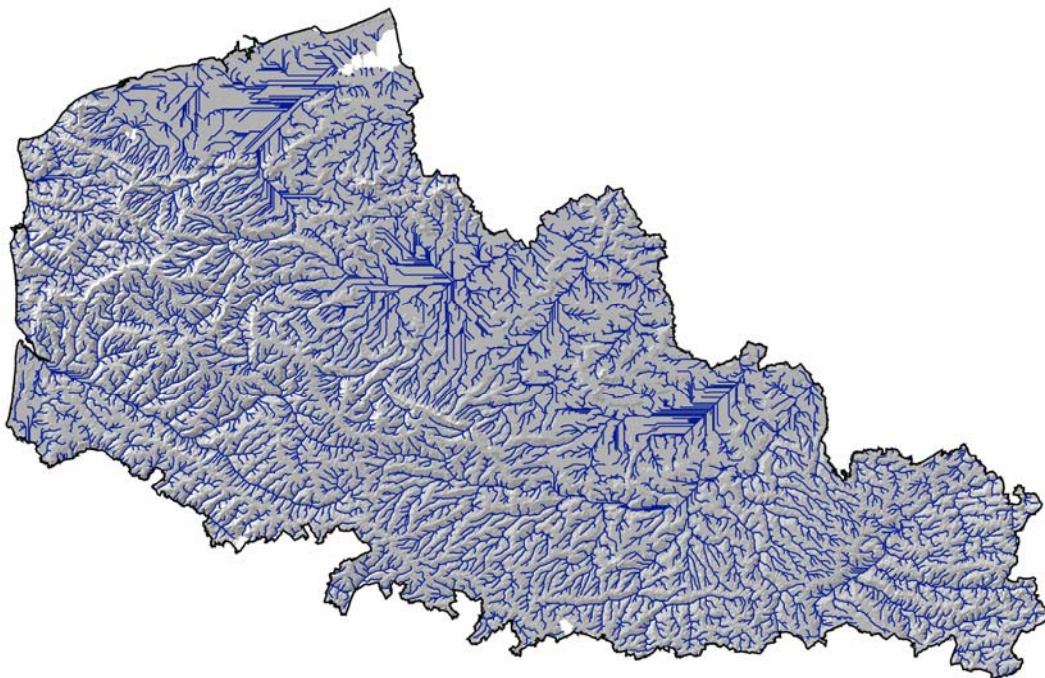


Illustration 20 - Carte du réseau des talwegs : Données fournies en annexe (couche Talwegs)

5.5 CALCUL DE L'IDPR

L'IDPR permet de rendre compte indirectement de la capacité intrinsèque du sol à laisser infiltrer ou ruisseler les eaux de surface. Cette fonction d'infiltration dépend de la perméabilité verticale qui traduit la capacité d'un sol à laisser passer un fluide. Très variable, ce paramètre dépend essentiellement de la lithologie de la formation considérée.

L'IDPR compare un réseau théorique établi selon l'hypothèse d'un milieu parfaitement homogène au réseau mis en place sous le contrôle d'un contexte géologique hétérogène, il résulte du rapport, pour tout point de l'espace étudié, entre :

- La distance au plus proche cours d'eau réel,
- La distance au plus proche cours d'eau calculé.

Il varie selon une échelle comprise entre 0 et n. Par souci de simplification du critère, l'IDPR est arbitrairement multiplié par 1000 et limité à 2000.

IDPR est inférieur à 1000 quand le réseau théorique n'est pas repris par une rivière réelle. Ce rapport indique alors une infiltration majoritaire des eaux. Inversement, quand le réseau réel est plus dense que le réseau calculé, on est en zone de ruissellement majoritaire, l'IDPR tend vers 2000 (voir tableau ci-dessous).


	IDPR	Interprétation	
	<1000	Infiltration majoritaire Par rapport au Ruissellement superficiel	Il y a non-conformité entre la disponibilité des axes de drainage liés aux talwegs et les axes hydrologiques observés. L'eau ruisselant sur les terrains naturels rejoint un axe de drainage défini par l'analyse des talwegs sans que celui-ci ne se concrétise par l'apparition d'un axe hydrologique naturel. Développement d'un réseau de talweg de densité supérieure à l'expression du réseau de drainage naturel.
	=1000	Infiltration et Ruissellement superficiel de même importance	Il y a conformité entre la disponibilité des axes de drainage liés au talweg et les axes hydrologiques en place
	>1000	Ruissellement superficiel majoritaire Par rapport à l'infiltration vers le milieu souterrain	L'eau ruisselant sur les terrains naturels rejoint très rapidement un axe hydrologique naturel sans que la présence de celui-ci soit directement justifiée par un talweg. Le réseau de drainage naturel est de densité supérieure à celui du réseau des talwegs.
	> 2000	Majoritairement assimilable à des milieux humides	Un IDPR supérieur ou égal à 2000 traduit une stagnation permanente ou transitoire des eaux, menant à deux interprétations différentes. Quand la ZNS est faible, par exemple au niveau des cours d'eau et des zones humides, l'eau ne s'infiltré pas car le terrain est saturé. Dans le cas d'une ZNS plus importante, le refus d'infiltration semble montrer une imperméabilité des terrains naturels. On pose l'hypothèse que des valeurs d'IDPR supérieures à 2000 sont majoritairement assimilables à des milieux humides ⁹ induisant la possibilité d'inondation par effet de barrière hydraulique.

Illustration 21 - Valeurs de l'IDPR

⁹ Les milieux humides en tant qu'hydrosystèmes font partie intégrante des systèmes aquatiques auxquels il sont reliés : soit une nappe phréatique, soit un cours d'eau dont ils sont les prolongements latéraux, soit une zone lacustre dont ils constituent les bordures. A ce titre ces milieux humides ne peuvent être, d'un point de vue hydrologique, isolés des autres hydrosystèmes avec lesquels ils sont connectés et aux variations de stocks auxquels ils réagissent.

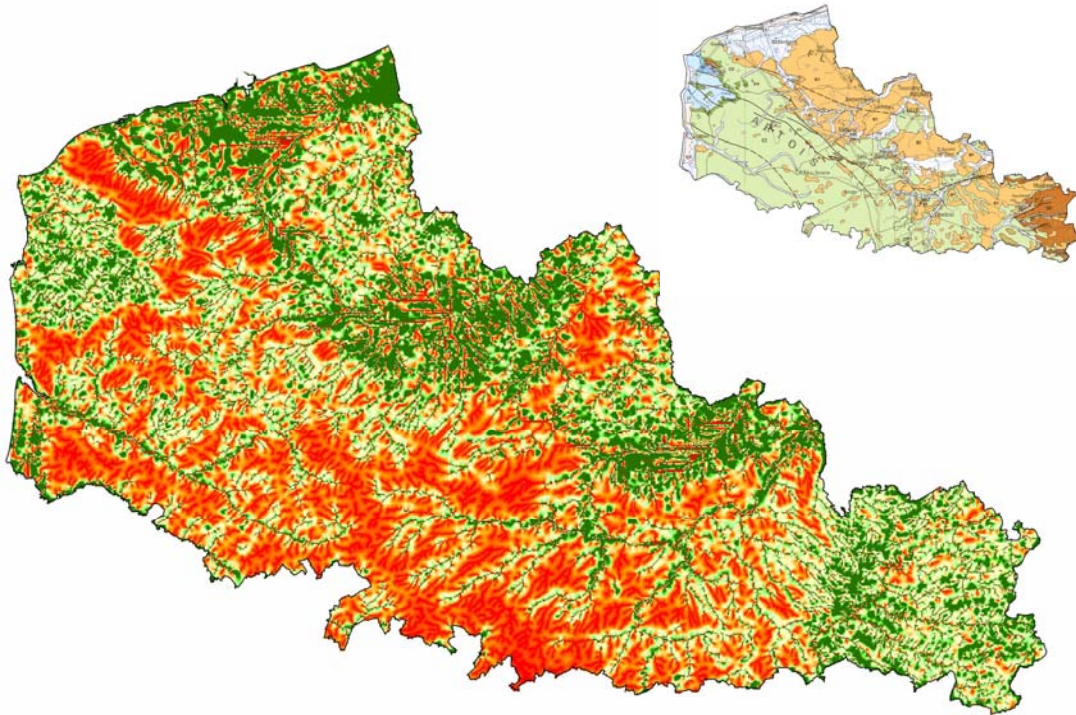


Illustration 22 - Données brutes du calcul de l'IDPR - Données fournies en annexe (Grille IDPR)

5.6 ANALYSE DES RESULTATS FOURNIS PAR L'IDPR

La figure précédente représente la grille des données brutes du calcul de l'indice IDPR. Le maillage est composé de cellules de 100 m de coté. Il est établi sur la seule analyse des données géomorphologiques et hydrologiques. Cependant, la comparaison avec la carte géologique présentée en médaillon montre des correspondances remarquables.

Les illustrations suivantes ont vocation à illustrer ces correspondances entre les résultats de l'IDPR et le comportement des eaux de surface sur les formations géologiques telles que les décrivent les cartes disponibles. Pour présenter ces correspondances les résultats de l'analyse IDPR ont été traités de manière brute ou agrégés par formations géologiques ou par unités fonctionnelles.

5.7 AGREGATION DES DONNEES PAR UNITES SPATIALES

L'indice IDPR calculé précédemment sous la forme d'une grille au pas de 100 m est pour les analyses suivantes rapporté aux unités fonctionnelles (cf paragraphe 4.1.2). Le résultat de cette analyse est porté dans la carte suivante et constituera pour la suite de l'étude de vulnérabilité, la voie d'utilisation de l'IDPR.

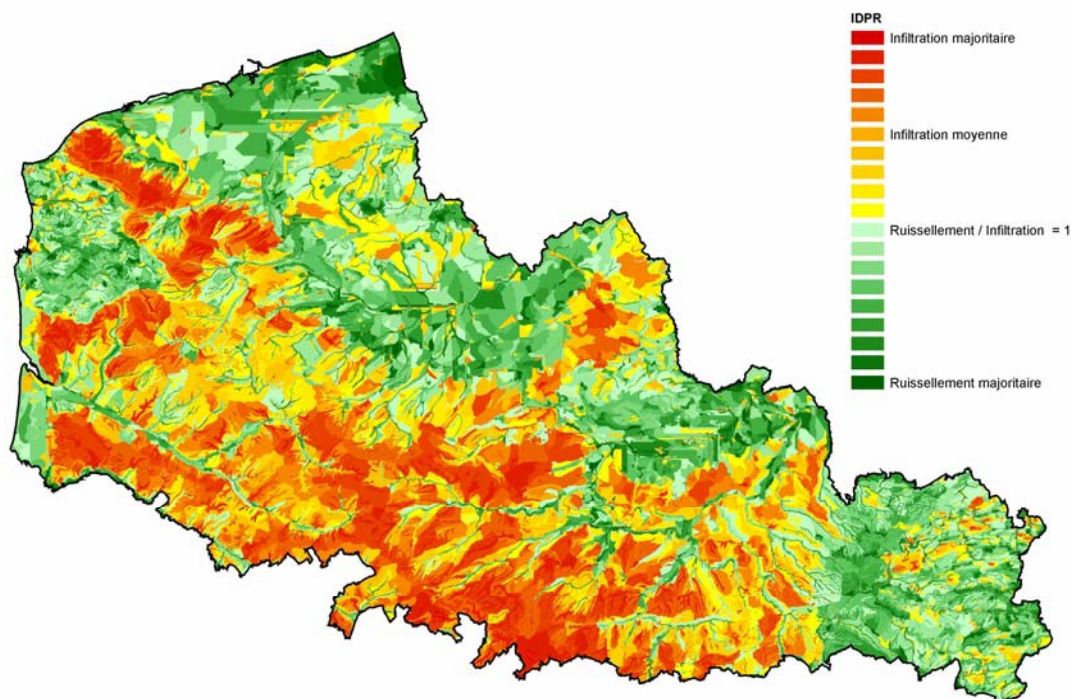


Illustration 23 - IDPR affecté aux unités fonctionnelles - Données fournies en annexe (couverture unités fonctionnelles – Attribut IDPR)

Les unités fonctionnelles sont supposées d'un comportement hydrogéologique homogène. Parce qu'elles résultent de l'intersection de couches d'informations géographiques issues de référentiels communément exploités (masses d'eau souterraine, entités hydrogéologiques, ...) elles constituent le moyen d'associer les résultats de l'IDPR à des objets aisément manipulables dans les systèmes d'informations couramment constitués dans le domaine de l'Eau.

6 Cartographie de l'indice simplifié de vulnérabilité

Afin de réaliser la carte de vulnérabilité simplifiée, l'approche menée pour le milieu souterrain est la suivante :

Pour les eaux souterraines, la vulnérabilité intrinsèque d'un aquifère dépendant de ses caractéristiques hydrodynamiques et géologiques, on différencie pour la vulnérabilité les critères suivants :

- la zone non saturée (ZNS) qui intervient avant l'arrivée du polluant dans l'aquifère (nature, perméabilité, épaisseur) ;
- les caractéristiques propres des aquifères (type de perméabilité, degré de karstification/fissuration, hétérogénéité) susceptibles d'influencer le comportement du polluant dans la nappe (dispersion, rapidité de propagation,...).

Le point de départ de cette approche se fonde sur l'IDPR. Celui-ci se substitue aux données liées à la perméabilité des sols (eaux superficielles) ou du sous-sol (les eaux souterraines). Il s'agit d'une approche simplifiée des caractéristiques de ces milieux pour lesquels, on l'a vu précédemment, l'IDPR décrit, de manière qualitative, la perméabilité à travers les pôles infiltration et ruissellement.

L'IDPR est croisé avec l'épaisseur de la ZNS pour hiérarchiser la vulnérabilité simplifiée des eaux souterraines. Il peut également être croisé avec la pente pour hiérarchiser la vulnérabilité des eaux de surface. L'épaisseur de la zone non saturée et la pente des terrains naturels étant dans ce cas considérées comme les facteurs susceptibles de retarder ou d'accentuer la migration des polluants dans les deux milieux considérés.

6.1 CALCUL DE LA VULNERABILITE DES EAUX SOUTERRAINES

L'analyse de la vulnérabilité des eaux souterraines découle d'une approche dite d'analyse multicritère. Cela désigne généralement un ensemble de méthodes permettant d'agréger plusieurs critères avec l'objectif de sélectionner ou mettre en évidence une ou plusieurs solutions.

L'analyse multicritère mise en place vise à fournir des outils qui permettent de progresser dans la résolution d'un problème de hiérarchisation qualitative où plusieurs indicateurs doivent être pris en compte. La divergence de ces indicateurs nécessite alors la recherche d'une adéquation ou le meilleur compromis possible permettant de hiérarchiser le milieu naturel.

Pour appliquer cette approche, les étapes suivantes ont été suivies,

- identification de l'objectif global de la démarche (défini par le cahier des charges initial de cette étude),
- listes des solutions ou méthodologies existantes pour réaliser cette carte,
- identification des critères ou standards qui orientent la prise de décision.
- Règles d'association de ces critères pour définir la solution la plus satisfaisante

La différence entre les différentes méthodes d'analyse multicritère employées pour la définition de la vulnérabilité des eaux souterraines se trouve dans la façon de réaliser cette dernière étape, soit dans la façon d'évaluer chacune des combinaisons en fonction des critères retenus.

Dans la plupart des méthodes multicritères, l'importance relative des critères accordée par les décideurs est représentée par des poids.

Dans la suite de cette analyse on définira ainsi les termes suivants

Critères (ou attributs) : aspects suivant lesquels les alternatives sont examinées ; qualitatifs ou quantitatifs

Poids (des critères) : importance attribuée aux critères ; subjectifs ; normalisation

Le résultat de cette approche multicritère résulte d'un calcul selon une méthode dite WSM (Weight Sum Method) ou modèle des sommes pondérées. Celle-ci est en règle générale reconnue idéale pour les problèmes à une seule dimension (c'est à dire que la solution au problème posé varie dans un seul sens, en l'occurrence d'une vulnérabilité faible vers une vulnérabilité forte).

6.2 CRITERE IDPR

La valeur affectée à l'indice IDPR (pondérée de 0 à 100) varie en fonction de la typologie des masses d'eau et du caractère karstique ou non de celles-ci.

En région Nord Pas de Calais, 15 des 16 masses d'eau souterraine étudiées sont de type "dominante sédimentaire", dont 2 ont également la caractéristique "karstique" et 1 masse d'eau est de type "imperméable localement aquifère".

Deux occurrences sont ainsi distinguées : les masses d'eau à caractère karstique et les autres cas.

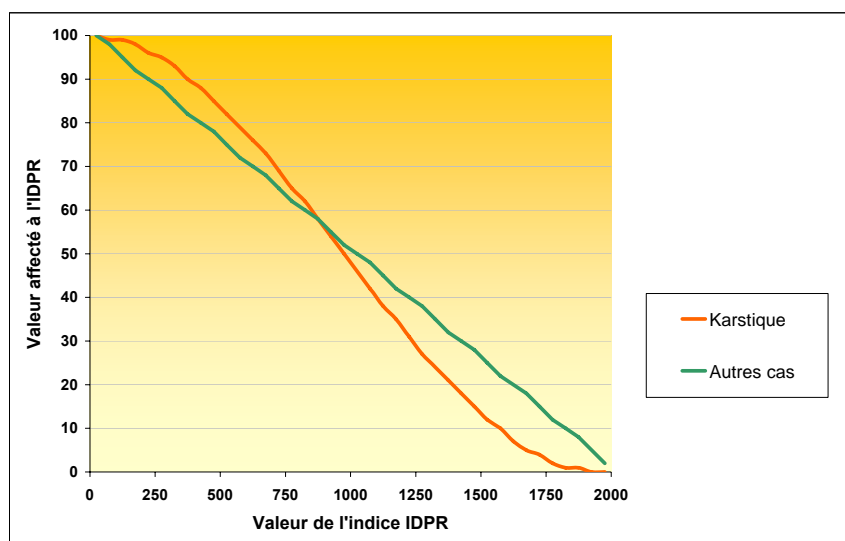


Illustration 24 - Valeurs normées du critère IDPR selon la nature des masses d'eau

6.3 CRITERE ZNS

La valeur affectée à l'épaisseur de la ZNS (pondérée de 0 à 100 également) varie en fonction de la typologie des masses d'eau, de la nature de l'écoulement (libre, captif ou karstique). Trois occurrences sont distinguées :

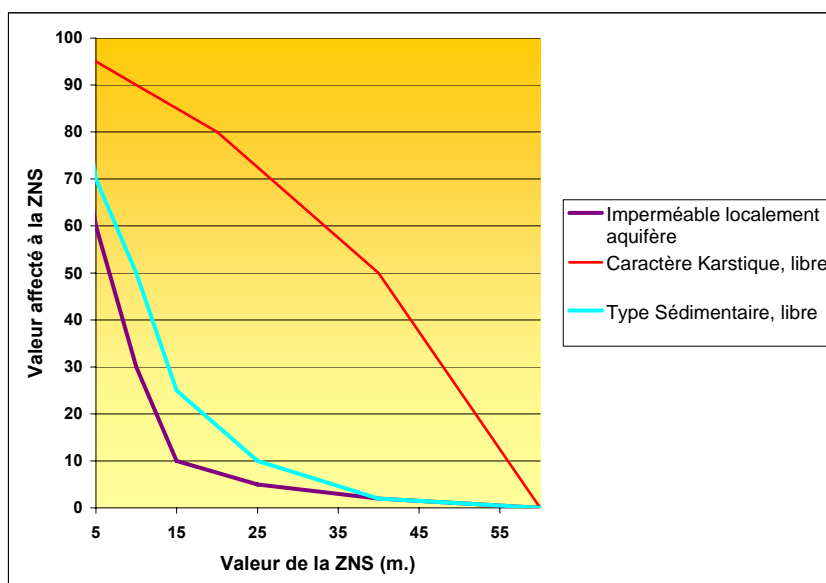


Illustration 25 - Valeurs normées du critère ZNS selon la nature et le type d'écoulement des masses d'eau

La formule de calcul de la vulnérabilité intrinsèque des eaux souterraines est la suivante :

$$V_i = (\text{Poids IDPR} * [\text{Critère IDPR}]) + (\text{Poids ZNS} * [\text{Critère ZNS}])$$

Avec : Poids IDPR + Poids ZNS = 1,
V_i compris entre 0 et 100

Sont présentées à la suite, à titre d'illustration, les cartes des critères respectifs IDPR et ZNS ainsi que les différents scénarios de vulnérabilité que compose la combinaison successive des poids relatifs des deux critères.

La carte de vulnérabilité finalement retenue par les différents experts régionaux comme la plus représentative des connaissances acquises est celle qui présente un poids égal des critères IDPR, ZNS (50% / 50%). Ce choix s'est fait avec la remise, en cours d'élaboration de cette étude, de trois atlas cartographiques reprenant par masse d'eau, les combinaisons des critères suivantes :

- IDPR70% - ZNS30%
- IDPR50% - ZNS50%
- IDPR30% - ZNS70%

Ces documents intermédiaires sont fournis sous forme numérique en annexe de cette étude (annexe n°3).

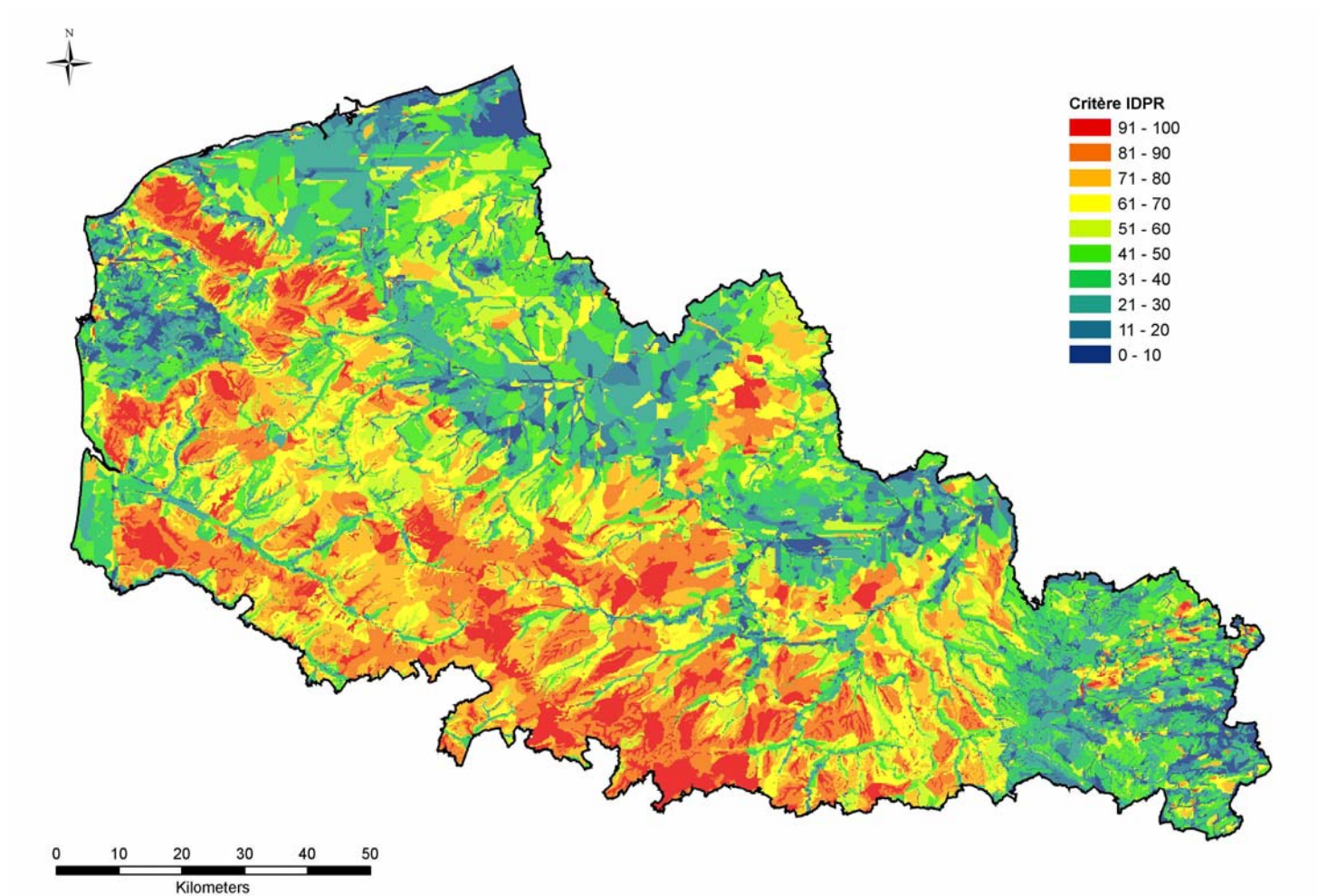


Illustration 26 - Carte de la région Nord- Pas-de-Calais, représentation du critère IDPR

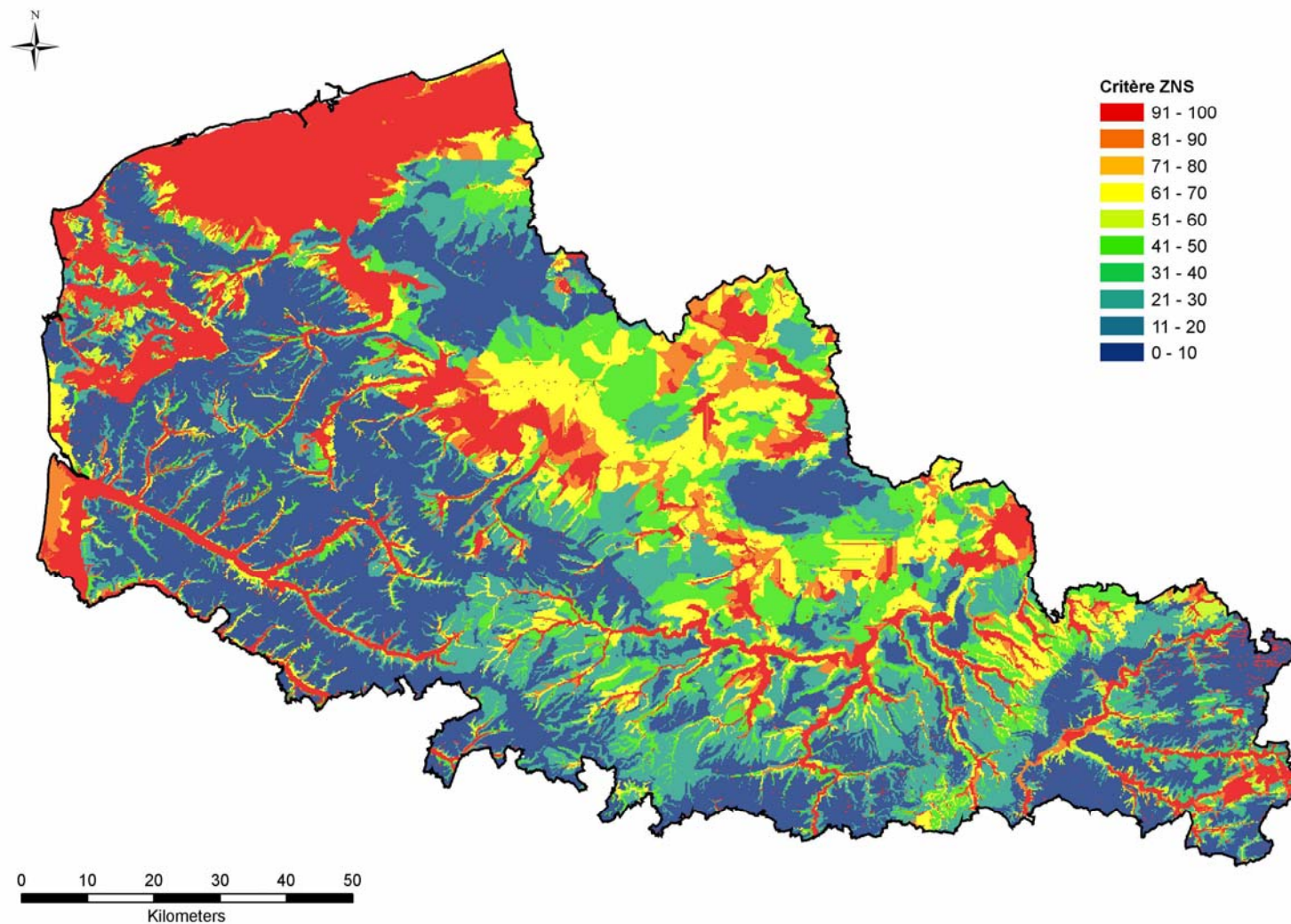


Illustration 27 - Carte de la région Nord-Pas-de-Calais, représentation du critère ZNS

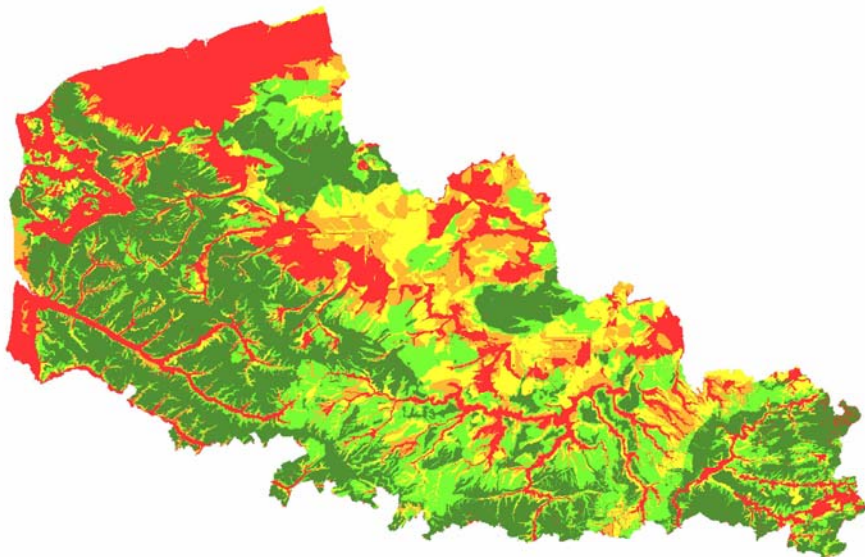


Illustration 28 - Scénario 10% IDPR et 90% ZNS

Ce scénario privilégie la proximité des nappes, il ne tient pas compte de la capacité des terrains qui les recouvrent à ralentir voir s'opposer à la migration de polluants venus de la surface. Il porte ainsi à égalité de vulnérabilité des territoires tels que le socle du Cotentin et les formations marneuses du crétacé inférieur de Champagne. Les nappes alluviales apparaissent vulnérables. La légende de cette carte et des suivantes est présentée à l'illustration n°

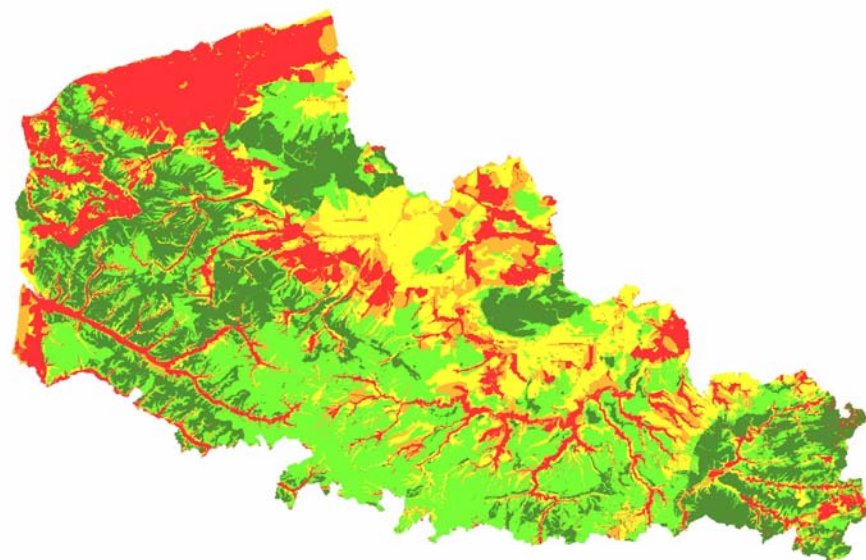


Illustration 29 - Scénario 20% IDPR et 80% ZNS

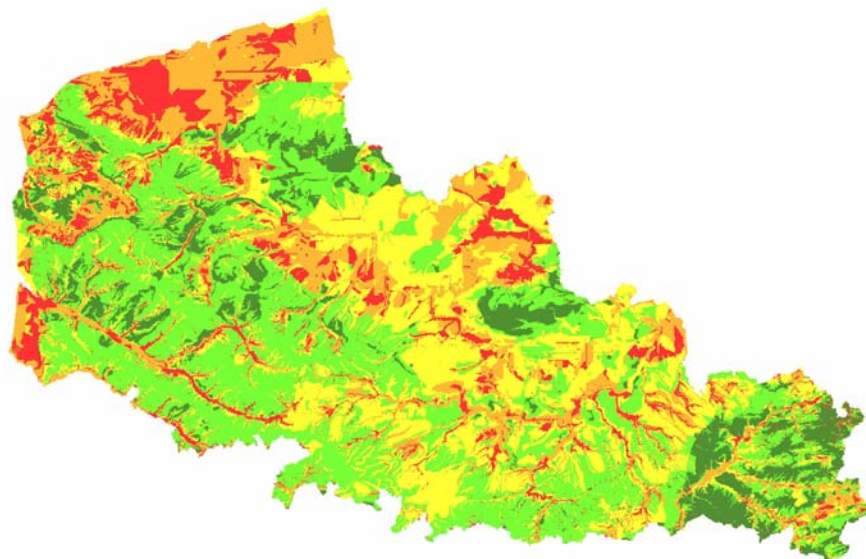


Illustration 30 - Scénario 30% IDPR et 70% ZNS

Ce scénario atténue l'influence de la proximité des nappes. Le socle du Cotentin devient alors de vulnérabilité moindre que celle des formations carbonatées du jurassique où les écoulements peuvent prendre un caractère karstique.

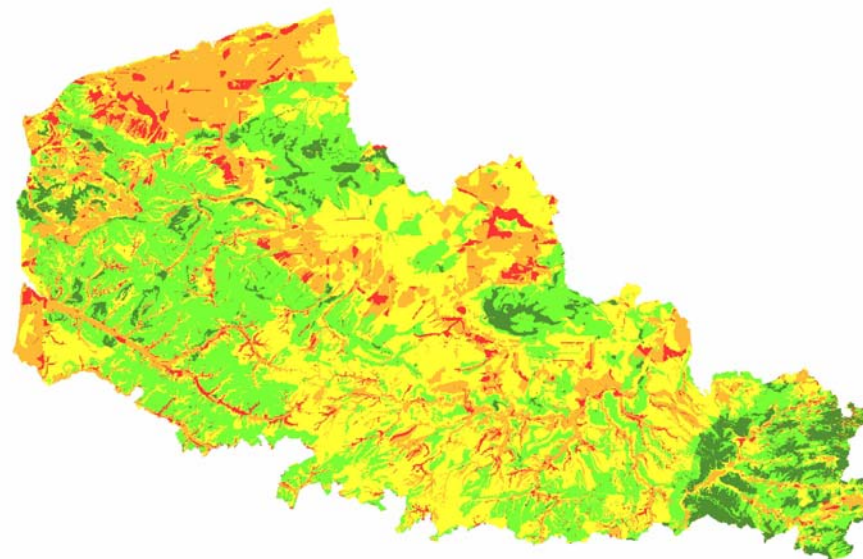


Illustration 31 - Scénario 40% IDPR et 60% ZNS

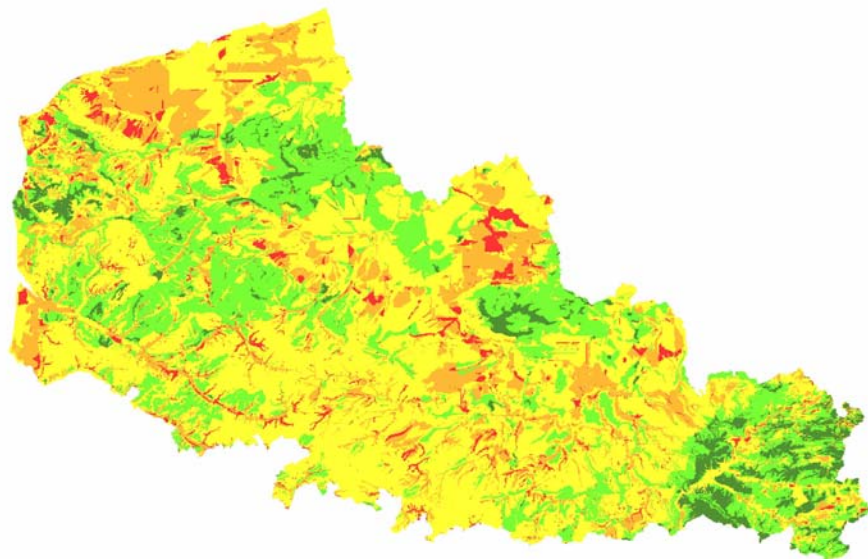


Illustration 32 - Scénario 50% IDPR et 50% ZNS

Ce scénario équilibre l'influence de la proximité des nappes avec l'aptitude à l'infiltration des terrains naturels que décrit indirectement l'IDPR. Certaines formations aquifères reconnues sous couverture tertiaire sont alors décrites vulnérables. (en Ile-de-France par ex.). La vulnérabilité des nappes alluviales est moindre que celles des formations très perméables en grands que forment les massifs carbonatés à écoulement de nature karstique.

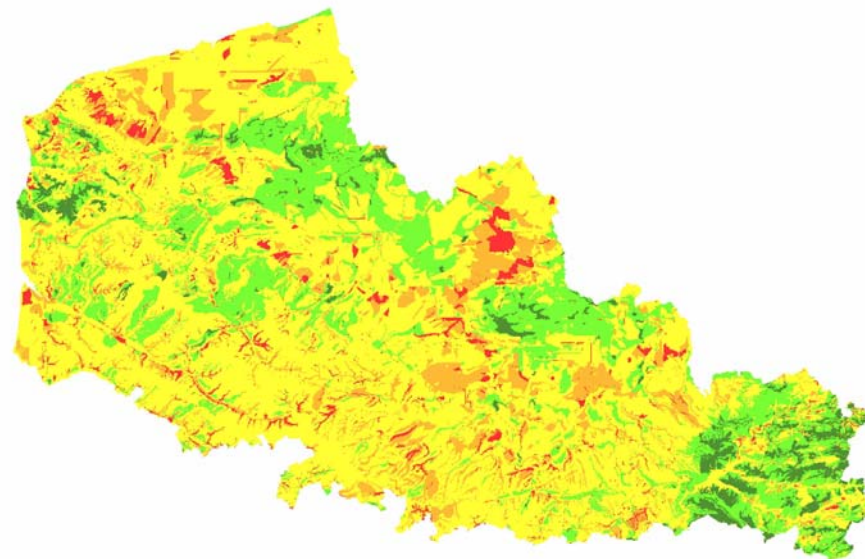


Illustration 33 Scénario 60% IDPR et 40% ZNS

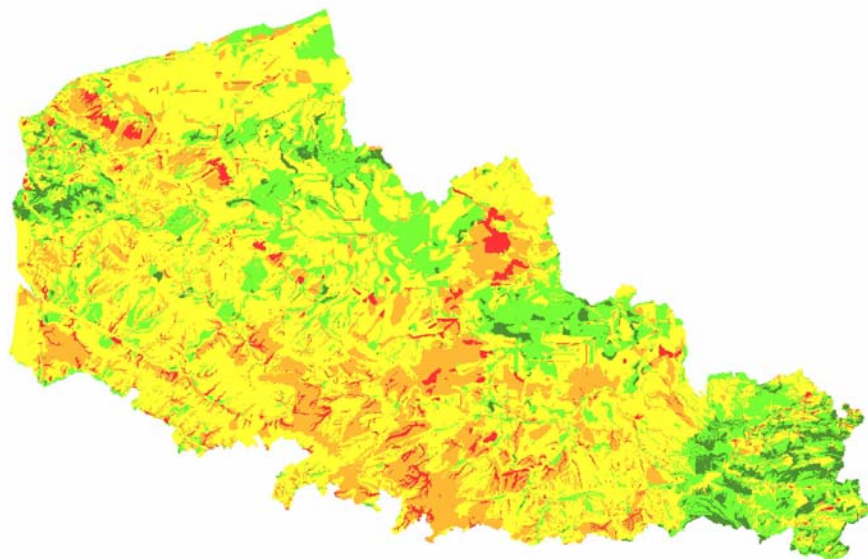


Illustration 34 - Scénario 70% IDPR et 30% ZNS

Ce scénario met en exergue l'aptitude plus ou moins grande à l'infiltration des terrains naturels décrite par l'IDPR. La proximité de la nappe devient peu déterminante et les nappes alluviales qui décrivent un milieu ou l'écoulement en surface ou subsurface des eaux souterraines, deviennent par l'analyse combinatoire, de faible vulnérabilité

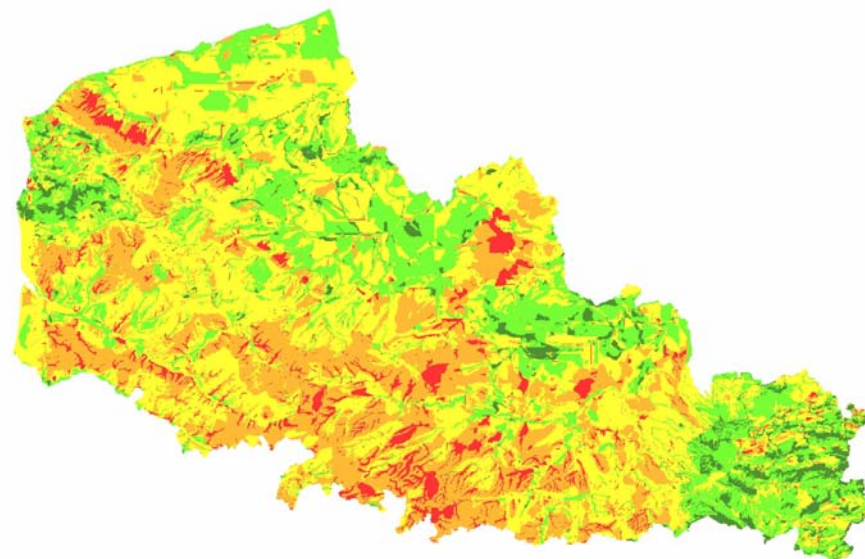


Illustration 35 - Scénario 80% IDPR et 20% ZNS

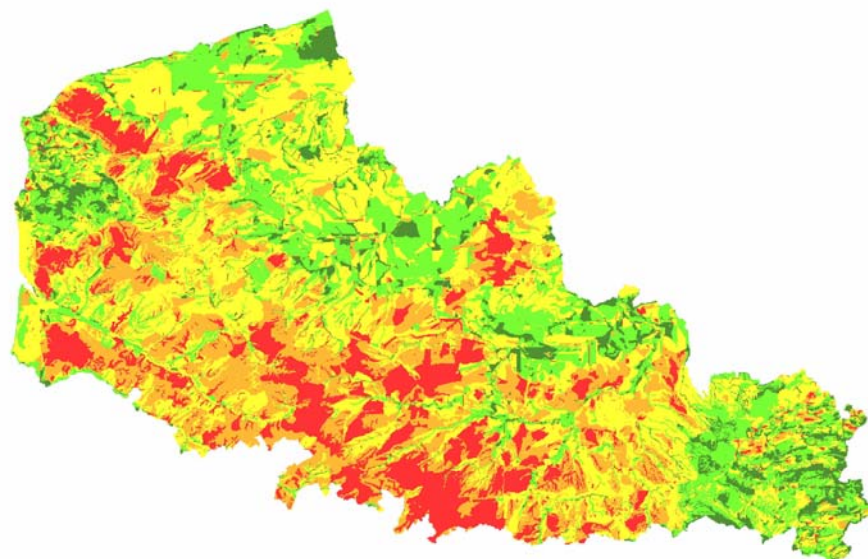


Illustration 36 Scénario 90% IDPR et 10% ZNS

La vulnérabilité des nappes alluviales est faible (écoulement de surface). Les réservoirs sédimentaires se hiérarchisent selon leur perméabilité en grand communément admise. Ce critère est séduisant si l'on fait abstraction de la notion de cible pour centrer l'analyse sur la vulnérabilité du réservoir ou son aptitude à laisser migrer l'eau souterraine. Indirectement on décrit également la capacité de ceux-ci à recevoir de l'eau.

$$\text{Scénarios} = (\text{Poids IDPR} * [\text{Critère IDPR}]) + (\text{Poids ZNS} * [\text{Critère ZNS}])$$

Avec : Poids IDPR + Poids ZNS = 1, V_i compris entre 0 et 100

Vulnérabilité



Illustration 37: Légende des scénarios présentés

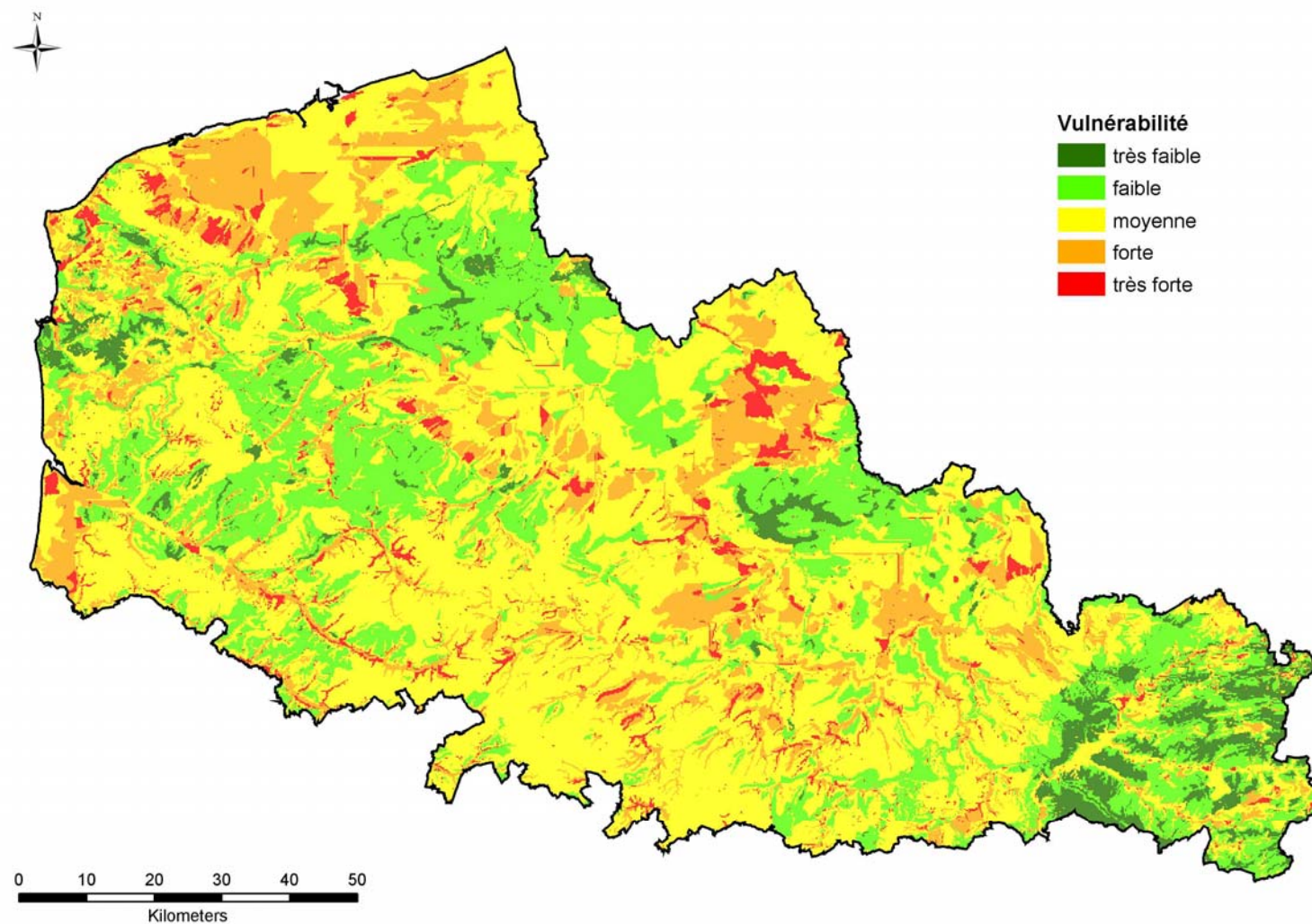


Illustration 38 - Carte de la région Nord-Pas-de-Calais, représentation de la vulnérabilité des eaux souterraines (ratio 50/50 IDPR et ZNS)

6.4 ANALYSE CRITIQUE DES RESULTATS

6.4.1 Indice IDPR sur craie

Manifestement, l'IDPR est un bon indicateur de la potentialité d'infiltration (ou de ruissellement) des eaux de pluies sur un territoire donné mais seulement à partir d'une surface minimale donnée, c'est-à-dire plutôt à l'échelle d'une zone hydrologique (bassin versant BDCarthage), d'un système aquifère ou d'un domaine géologique. A ces échelles, en effet, il semble donner une bonne vue d'ensemble de ce potentiel sur des territoires relativement vastes mais cependant, il fait apparaître une homogénéité qui semble artificielle au sein de certaines formations sédimentaires et notamment la craie.

Ainsi la différenciation de l'IDPR sur la craie sénonienne est relativement faible, traduisant, a priori, une bonne homogénéité spatiale de l'infiltration. Il s'avère cependant qu'à plus grande échelle (sous-bassin versant, sous-système, observation de terrain), les eaux de pluie ne s'infiltrant pas de façon uniforme, avec les mêmes intensités d'un point à un autre du territoire considéré. Hormis, en effet, les pluies de faible intensité et de courte ou moyenne durée qui, certes, s'infiltrant à peu près régulièrement sur toute la surface du sol concernée, les pluies de plus forte intensité ou de très longue durée ont, elles, tendance à s'accumuler progressivement dans les points bas que constituent les dépressions topographiques de plateaux ainsi que les thalwegs et vallons secs adjacents, soit par des phénomènes d'écoulement "hypodermique" (par saturation des toutes premières couches du recouvrement superficiel = niveaux agro-pédologiques), soit par du ruissellement pur et simple sur des sols "battants", dénudés et/ou pentus, soit, le plus souvent, par les deux.

Bien entendu, outre les composantes topographiques et pédologiques des sols, ces transferts d'eau superficiels subhorizontaux sont aussi guidés par la perméabilité (nature lithologique) des terrains de recouvrement où l'eau de pluie a tendance à ruisseler jusqu'à leur périphérie. A contrario, la nature très sableuse des limons de couverture dans certaines régions va induire l'effet inverse et en facilitant l'infiltration, la rendre dans le même temps, plus homogène.

Dans le même ordre d'idée, la répartition de l'infiltration peut également être fortement influencée par la présence de fissures de type karstique dans la craie de certains secteurs, affectant à la fois la ZNS et la ZS. Plusieurs captages AEP sont ainsi contaminés par des bactéries pathogènes ainsi que par une certaine turbidité de l'eau en période de fortes pluies ou d'averses orageuses¹⁰. En fait, ce type de conduits verticaux et horizontaux, d'origine essentiellement karstique, est connu, à l'exemple des formations du Gâtinais. Ils sont toutefois la plupart du temps, colmatés par des remplissages de limons ou d'argile à silex. Episodiquement, certains d'entre eux, en voie de décolmatisation progressif (suite à des fortes pluies répétées) ou brutal (pompages voisins à forts débits), donnent lieu à des "fontis" ou des effondrements circulaires pouvant atteindre plusieurs mètres de diamètre et plus ou moins profonds (déjà observés un peu partout en territoire crayeux).

En résumé, à grande échelle (>1/50 000), l'infiltration de la pluie peut donc, dans la réalité, se répartir de façon très hétérogène sur un territoire donné, même si son

¹⁰ Des tests de traçage colorimétrique et/ou salin dans ce milieu ont démontré que l'eau de pluie s'infiltrant dans certaines dépressions dolinaires pouvait, par exemple, traverser à la fois plusieurs dizaines de mètres de ZNS puis parcourir 2 à 3 km dans la ZS en moins de deux jours, soit à des vitesses dépassant 50 m/h.

substratum apparaît comme globalement "très infiltrant" au vu de l'IDPR, à l'exemple de la craie.

L'utilisation de l'IDPR a tendance à exagérer le caractère infiltrant des formations crayeuses. La méthode produit ainsi, à petite échelle, un excès de précaution, quand la vulnérabilité effective des grandes unités crayeuses.

6.4.2 Indice IDPR hors craie

En dehors des territoires où la craie affleure, la carte régionale de l'IDPR indique une prédominance du potentiel de ruissellement sur celui de l'infiltration (teintes vertes prédominantes), ceci étant apparemment lié à l'existence, dans les secteurs concernés, de réseaux d'eau superficiels permanents relativement denses coïncidant avec la plupart des thalwegs. En réalité, ce constat **de prépondérance du ruissellement doit être commenté** dans certains secteurs à pentes topographiques faibles ou très faibles, même si le réseau superficiel permanent y est très dense, comme c'est notamment le cas des zones humides des marais côtiers. Dans ces zones, en effet, le substrat est constitué de sables formant un véritable aquifère à nappe libre peu profonde, bien alimentée par infiltration directe de la pluie et c'est le réseau superficiel existant, dont l'origine est principalement artificielle (fossés drainants), qui assure l'essentiel de leur drainage. Ainsi pour ces secteurs, le ruissellement qui y est prédominant est la traduction d'un drainage actif d'une zone fortement perméable. Les nappes sont vulnérables par leur recouvrement très perméable mais elles sont également fortement drainées et leur lien étroit avec le réseau de surface suppose que les polluants qui peuvent les atteindre seront rapidement portés dans le réseau hydrologique de surface.

6.4.3 Poids relatifs IDPR/ZNS dans le cas des vallées alluviales

Certes, pour les territoires les plus infiltrants (craie, sables....), le poids donné à l'IDPR par rapport à la ZNS doit, globalement, être prépondérant car c'est bien le potentiel d'infiltration qui prévaut dans ce cas-là. Cependant, il est très probable que le poids relatif de la ZNS prendra plus d'importance au fur et à mesure que son épaisseur diminue et atteint des valeurs très faibles (quelques m seulement) dans le cas des formations alluviales. Aussi, pour cette raison, peut-on envisager de prendre un ratio IDPR/ZNS proche de 50 pour les plus faibles ZNS (inf. à 20 m, par exemple) ? En tout cas, il paraît évident que le poids à donner à la ZNS par rapport à l'IDPR doit être **nettement plus fort** dans les plaines alluviales à nappe très peu profonde, décrites précédemment. D'où la détermination d'une règle spécifique aux conditions de ZNS de faible épaisseur où le critère IDPR devient quasi inopérant.

La prise en compte de cette vulnérabilité spécifique liée à la seule présence à proximité immédiate du sol (ZNS < 3m) de la nappe phréatique est présentée sur la carte suivante.

Le comité de pilotage de l'étude après présentation des scénarios, des dires d'experts, de la connaissance régionale des hydrogéologues du BRGM et de manière à être cohérent avec le travail réalisé en Seine - Normandie sur les zones crayeuses, a décidé de retenir le scénario 50 /50.

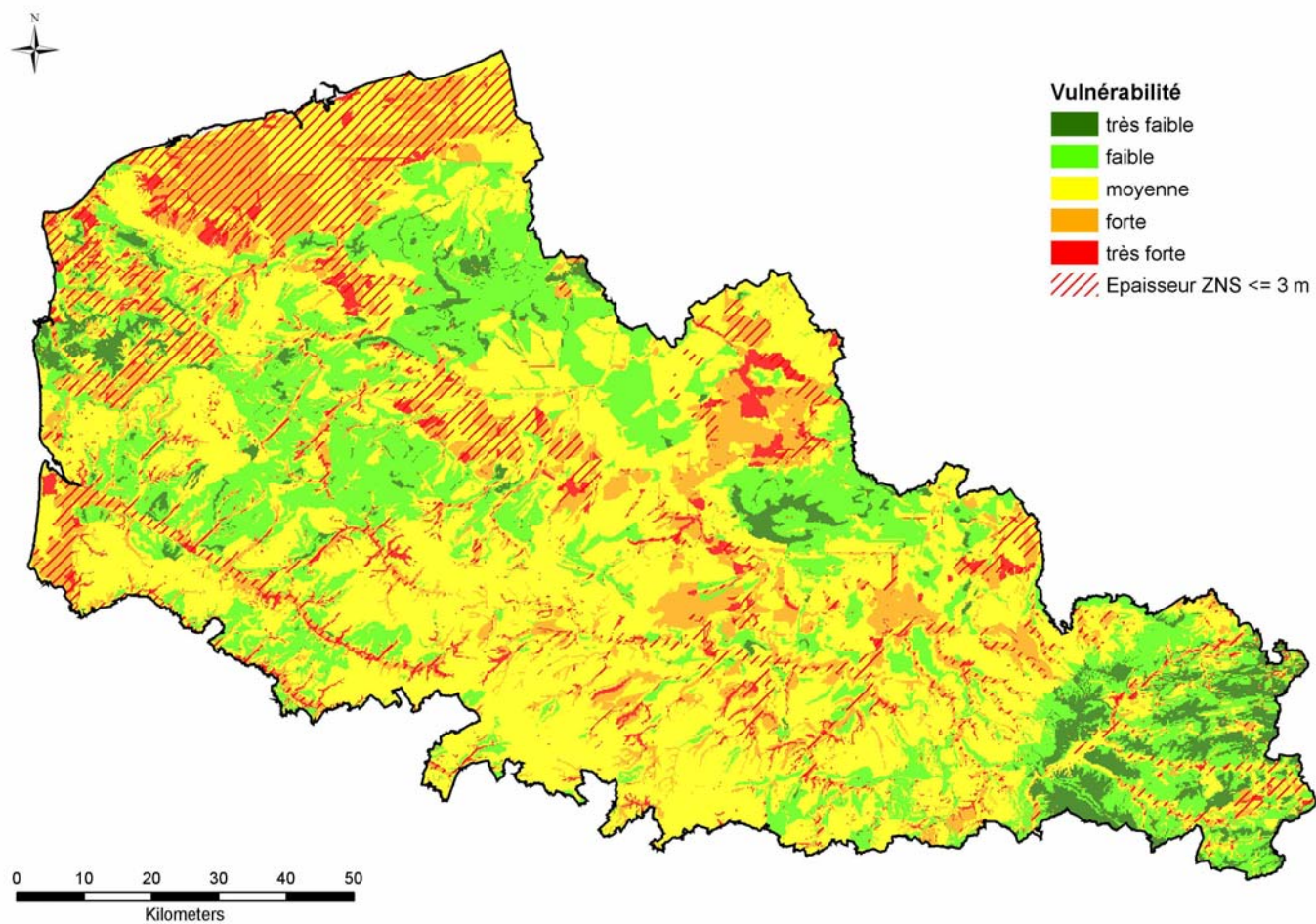


Illustration 39 - Vulnérabilité des eaux souterraines de la Région Nord-Pas-de-Calais par unité fonctionnelle (combinaison 50/50 plus Seuil ZNS à 3m)

La prise en compte des constats de l'analyse critique des données conduit à présenter une nouvelle carte de vulnérabilité à laquelle seront portés les ajustements suivants :

- Vulnérabilité forte de facto pour les zones de faible épaisseur des terrains non saturés

Cette carte de vulnérabilité constitue le document final qui sera exploité par la suite pour l'édition des fiches de vulnérabilité par masse d'eau (annexe 3 - Cdrom) et elle pourra être exploitée dans le cadre d'un traitement BASOLHYD tel qu'il a pu être mené en Seine - Normandie.

A la demande du comité de pilotage de l'étude, nous avons réalisé aussi une carte de la vulnérabilité intrinsèque des eaux souterraines par commune avec le même scénario (50/50) voir illustration n°42. Pour ce calcul par commune de la vulnérabilité moyenne, nous avons utilisé :

- l'IDPR moyen par commune (illustration n°41) ;
- et l'épaisseur de la ZNS moyenne par commune (illustration n°40).

Suite à l'élaboration de ces deux cartes régionales, nous avons produit deux atlas présentant par masse d'eau :

- la vulnérabilité intrinsèque des eaux souterraines par unité fonctionnelle à l'échelle de chaque masse d'eau de la région.
- la vulnérabilité intrinsèque des eaux souterraines par unité commune à l'échelle de chaque masse d'eau de la région.

L'ensemble de ces documents sont fournis sur le CD-ROM en annexe.

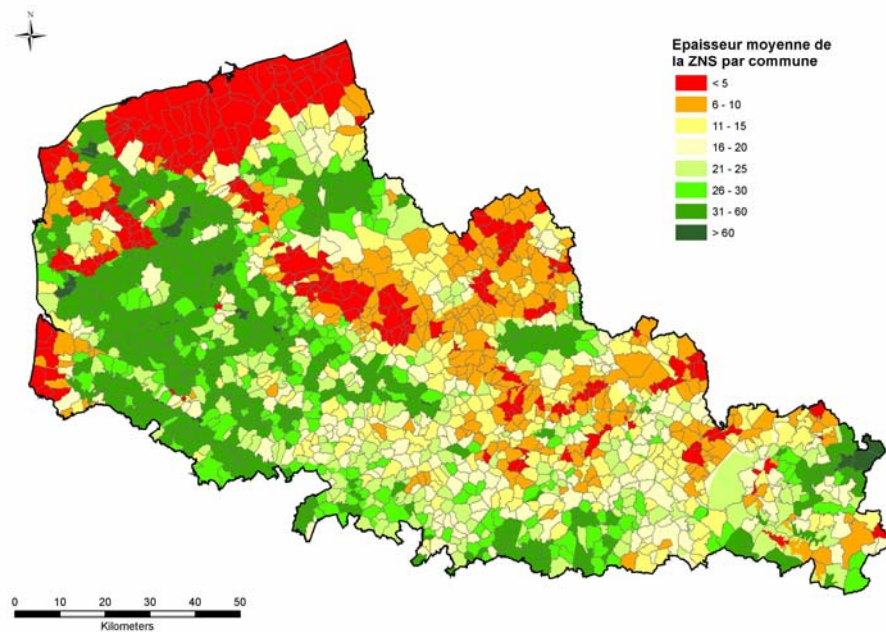


Illustration 40 – Epaisseur moyenne de la ZNS par commune

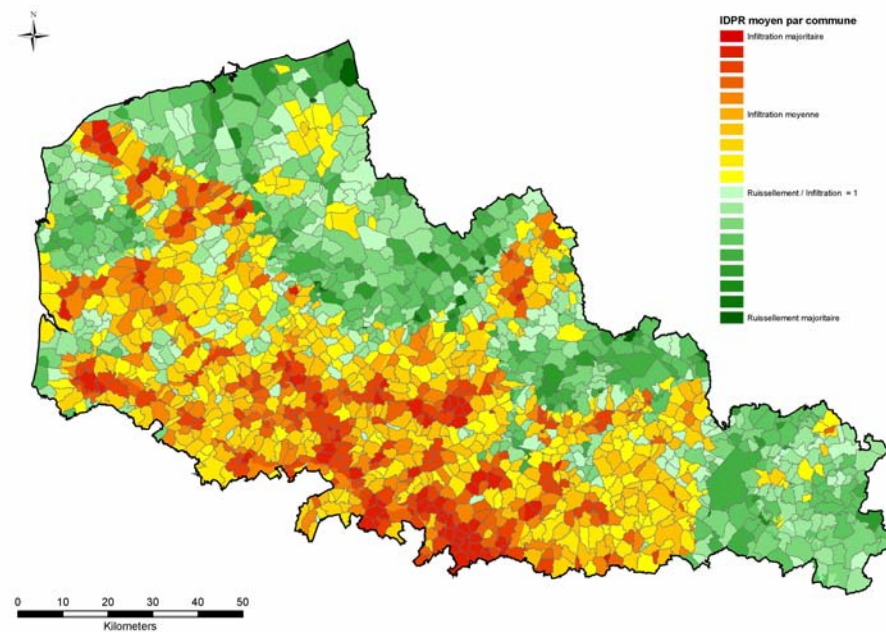


Illustration 41- IDPR moyen par commune

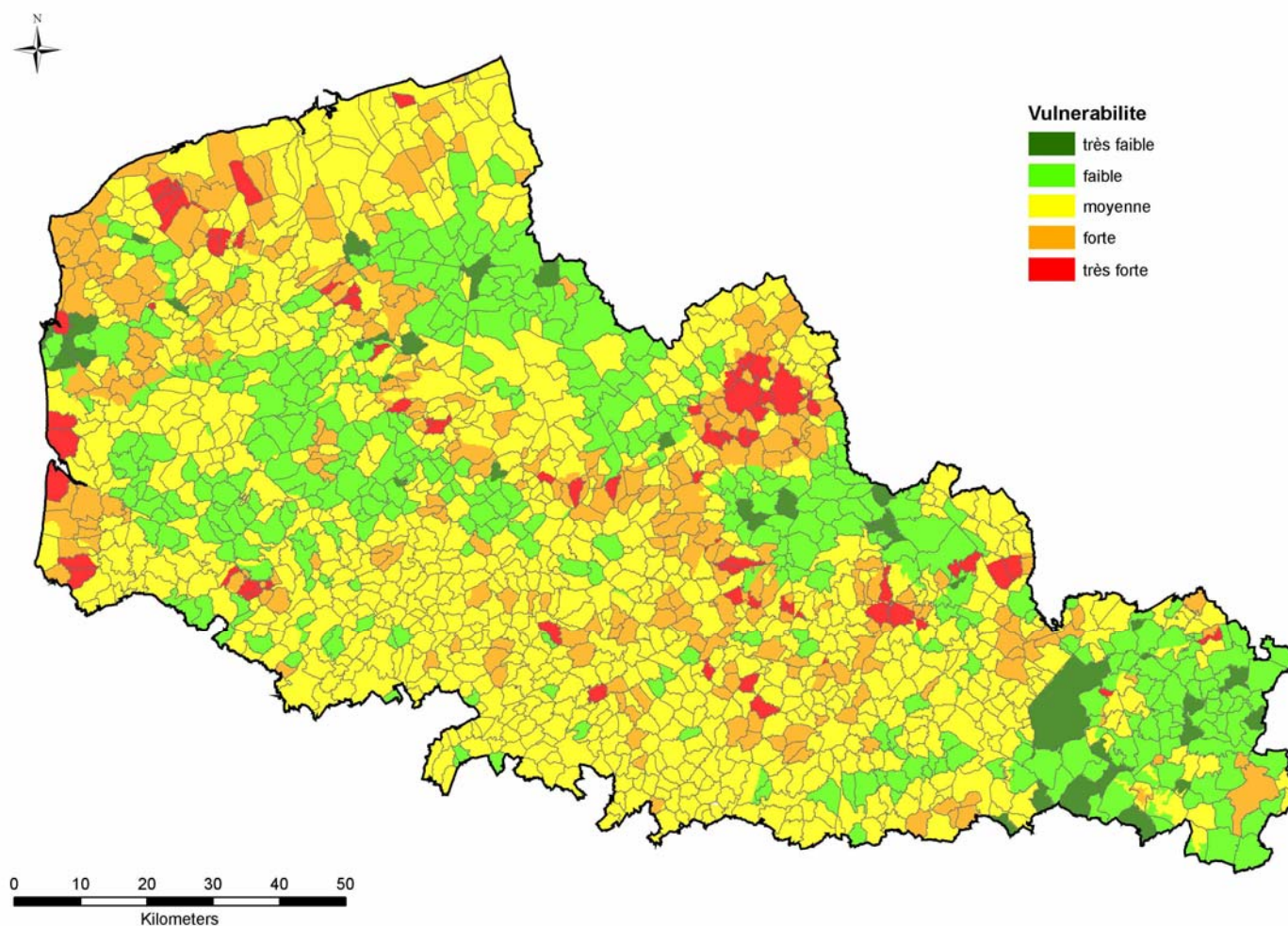


Illustration 42 - Vulnérabilité des eaux souterraines de la Région Nord-Pas-de-Calais par commune (combinaison 50/50)

6.5 VALIDATION DE LA METHODE IDPR/ZNS PAR DES ZONES DE CONTROLE DES RESULTATS

Pour valider la méthode IDPR/ZNS, nous avons comparé les différents résultats avec la carte de vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution sur la région Nord-Pas-de-Calais, réalisée en 1985 par J.Beckelynck.

Cette carte a été dressée, selon l'auteur, dans le but de montrer quelles sont, suivant la nature des terrains rencontrés en surface et les conditions hydrogéologiques, les possibilités de pénétration et de propagation des polluants dans les aquifères, c'est-à-dire la vulnérabilité des nappes à la pollution.

Cette cartographie à l'échelle du 1/250 000 présente une vue régionale des paramètres qui conditionnent cette vulnérabilité.

Pour comparer les résultats, nous avons regardé la cohérence et la répartition des surfaces entre les classes de vulnérabilité calculées par la méthode IDPR/ZNS avec les classes de protection définies par Beckelynck. Les résultats sont présentés dans le tableau et la carte ci-dessous.

protection beyclinck	classes de vulnérabilité cohérentes	classes de vulnérabilité non cohérentes
FAIBLE	très forte, forte	moyenne, faible, très faible
FAIBLE A MOYENNE	très forte, forte, moyenne	faible, très faible
MOYENNE	forte, moyenne, faible	très forte, très faible
MOYENNE A IMPORTANTE	forte, moyenne, faible très faible	très forte
IMPORTANTE	moyenne, faible, très faible	très forte, forte
TRES IMPORTANTE	faible, très faible	très forte, forte, moyenne
TRES TRES IMPORTANTE	faible, très faible	très forte, forte, moyenne

Illustration 43 - Légende de la carte de comparaison de Beckelynck / vulnérabilité

Lorsqu'on superpose les deux cartes et qu'on réalise une intersection entre les surfaces définies avec les types de protection de Beckelynck et les classes de vulnérabilité de la méthode IDPR/ZNS, on obtient par exemple avec une protection faible, une cohérence avec les classes de vulnérabilité très forte et forte de la méthode IDPR/ZNS, mais elle ne prend pas en compte les autres classes de vulnérabilité : moyenne, faible et très faible comme l'indique le tableau ci-dessus.

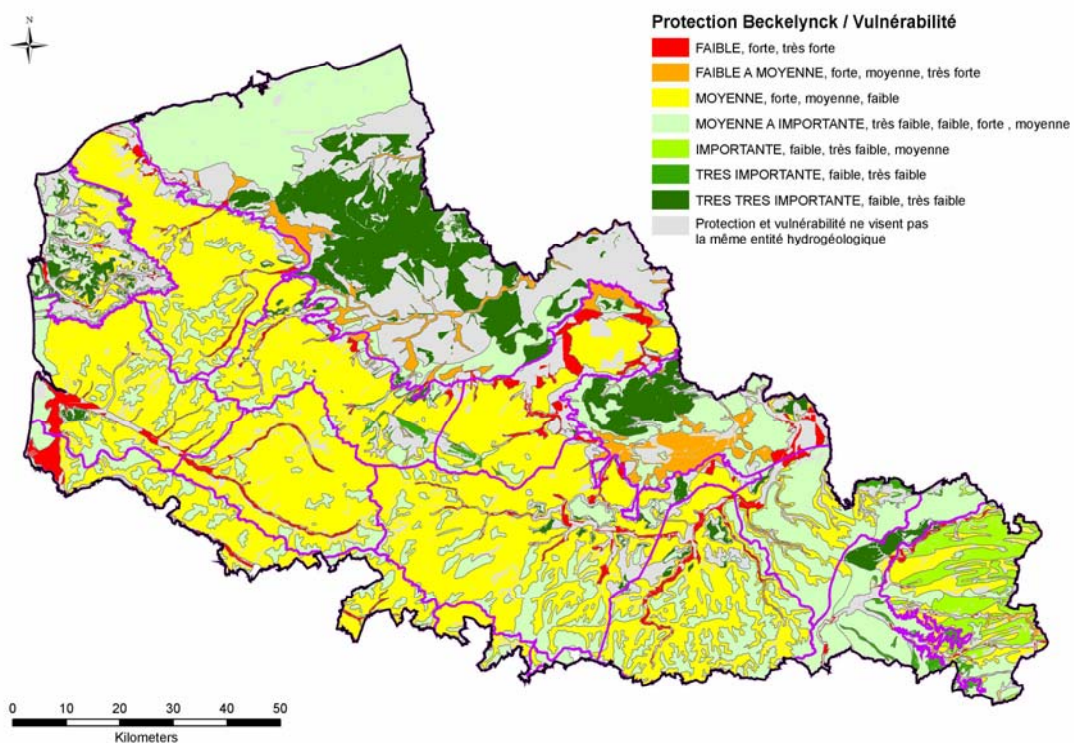


Illustration 44 – comparaison de la carte de Beckelynck / vulnérabilité simplifiée

Ainsi, la superposition des deux cartes (illustration N°44), montre des zones où la protection (Beckelynck) et la vulnérabilité (méthode IDPR/ZNS) ne visent pas la même entité hydrogéologique (zone grisée).

On constate aussi entre les deux que sur certaines masses d'eau :

- la cohérence est bonne sur une grande partie de la région Nord-Pas-de-Calais ; il s'agit de toute la partie craie, comme par exemple la masse d'eau 1008 ;
- des différences dues principalement au traitement différent des vallées alluviales (cela se retrouve sur l'ensemble de la région) ;
- des différences très localisées dues à l'intégration de certaines particularités par la méthode IDPR/ZNS comme la frange captive (masse d'eau 1001).

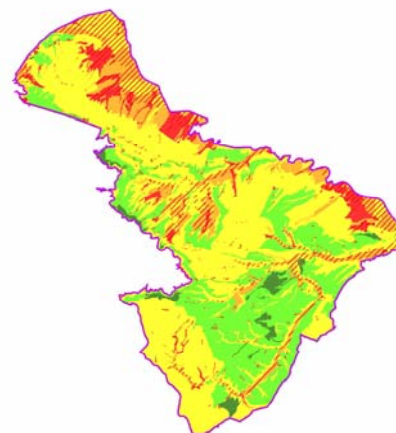
En ce qui concerne les vallées alluviales, la carte de Beckelynck considère que certaines fonds de vallées sont constitués d'alluvions moins perméables et donc que la vulnérabilité est plus faible. Hors ces zones sont en relation avec l'aquifère sous-jacent, ont des épaisseurs de ZNS très faibles et sont caractérisées dans la région par des fortes perméabilités.

Comparativement, la méthode IDPR/ZNS rend mieux compte de ce phénomène et d'ailleurs fait apparaître un critère contraignant supplémentaire : la couche ZNS<ou = à 3 m.

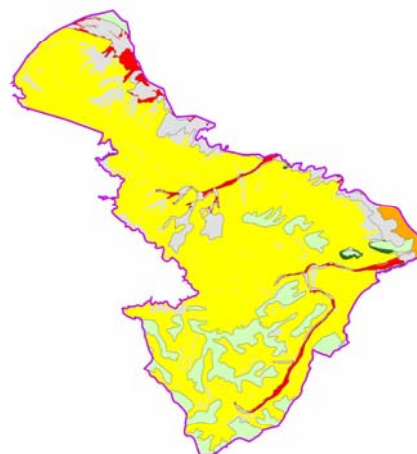
Cependant, aux dires des experts consultés lors des comités de pilotage qui ont guidé cette étude, les convergences sont significatives et la carte à l'échelle de la région n'est pas remise en cause par le résultat de la carte de Beckelynck.



Carte de Beckelynck



Vulnérabilité intrinsèque simplifiée – scénario 50 / 50



Carte de comparaison protection Beckelynck et vulnérabilité

Illustration 45 - Comparaison des cartes Beckelynck et de vulnérabilité simplifiée pour la masse d'eau 1001

6.5.1 La masse d'eau 1001 « Craie de l'Audomarois »

La masse d'eau 1001 est constituée en grande majorité par de la craie libre, plus ou moins recouverte de limons, ce qui explique pour Beckelynck que dans cette zone la protection est moyenne.

Sur cette masse d'eau, la cohérence entre les deux cartes est assez bonne comme le montre l'illustration n°45 ci-dessus. On remarque néanmoins la présence de zones grisées tout le long de la frange captive.

Cela est dû au fait que les deux cartes ne traitent pas de la même entité hydrogéologique :

- Pour Beckelynck, la nappe de la craie dans ce secteur est recouverte d'une épaisseur d'argiles plus ou moins importante, la protection est assez élevée et donc la vulnérabilité est faible à très faible.
- Pour la vulnérabilité simplifiée, la frange captive où la nappe de craie est proche de la surface due à une surrection et mise en captivité des couches séno-turonienne, (fissuration importante de la craie et donc une forte perméabilité). L'épaisseur de la ZNS dans ce cas est faible, ce qui explique que la méthode IDPR/ZNS, qualifie ces zones en forte vulnérabilité.

6.5.2 La masse d'eau 1014 « Sables du Landénien des Flandres »

La masse d'eau 1014, est la zone où il existe le plus d'incohérence entre les deux cartes. En effet, cette masse d'eau est caractérisée par une succession de couches perméables et imperméables comme le montre le log ci-dessous :

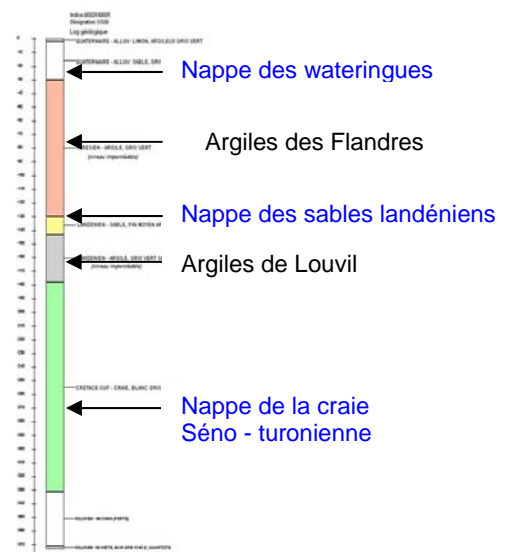
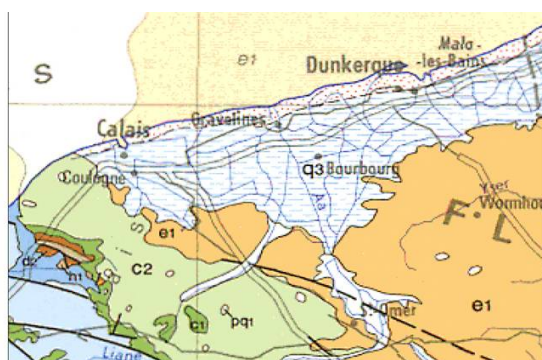
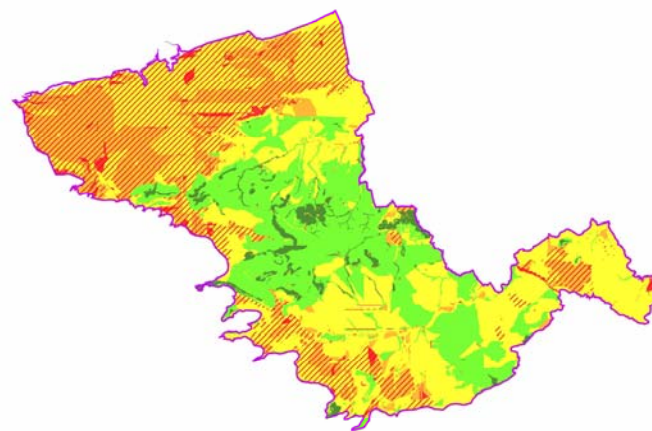


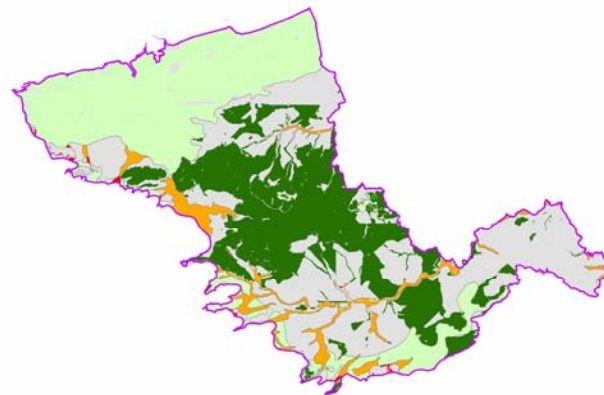
Illustration 46 – Log géologique de la région de Gravelines (59)



Carte de Beckelynck



Vulnérabilité intrinsèque simplifiée – scénario 50 / 50



Carte de comparaison protection Beckelynck et vulnérabilité

Illustration 47 - Comparaison des cartes Beckelynck et de vulnérabilité simplifiée pour la masse d'eau 1014

Pour une grande partie de la masse d'eau 1014, on constate la présence de zones où la protection (Beckelynck) et la vulnérabilité (méthode IDPR/ZNS) ne visent pas la même entité hydrogéologique (zone grisée)

En effet, pour Beckelynck, comme le montre l'illustration n°47 – ci-dessus, les nappes captives dans les aquifères profonds, recouverts par des terrains de faible perméabilité, sont protégées naturellement contre des pollutions d'origine superficielle, elles sont donc peu vulnérables.

Par contre, la méthode IDPR/ZNS permet de donner un indice de vulnérabilité pour la première nappe rencontrée.

Dans le cas de cette masse d'eau, il s'agit de la nappe quaternaire des waterings qui a la particularité d'être drainée et contrôlée par un système de canaux qui maintient une surface de la nappe très proche de la surface.

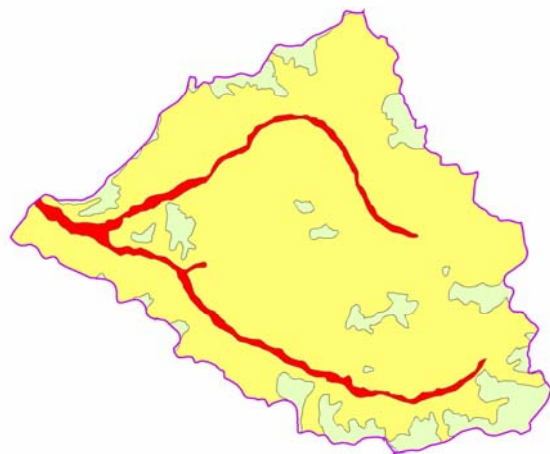
Ce qui explique pourquoi la carte de vulnérabilité simplifiée montre une vulnérabilité très forte dans ce secteur et notamment une épaisseur de ZNS $<$ ou $=$ à 3 m.

6.5.3 La masse d'eau 1008 « craie de la vallée de la Canche amont »

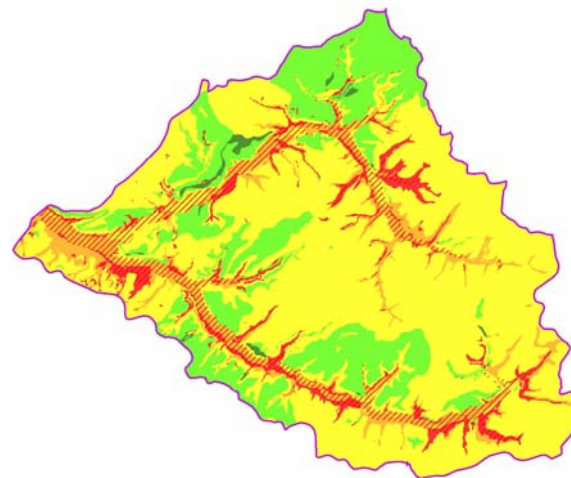
La masse d'eau 1008 se situe entièrement en domaine crayeux avec une couverture de limons éoliens du Quaternaire, d'épaisseur très variable.

Sur l'ensemble de la région, on constate que les deux cartes sont les plus cohérentes dans les zones de craie libre comme la masse d'eau 1008.

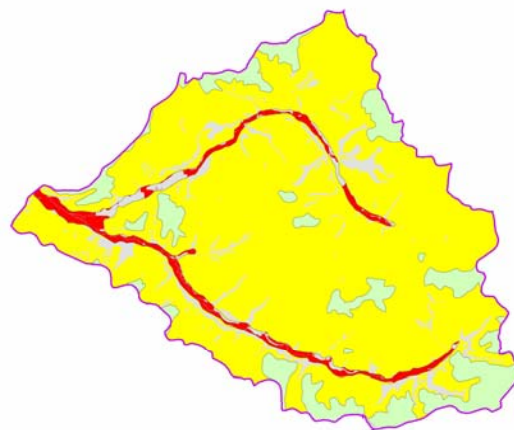
L'illustration n°48, ci-dessous, montre aussi une bonne corrélation dans les vallées alluviales avec quelques secteurs où la correspondance n'est pas totale.



Carte de Beckelynck



Vulnérabilité intrinsèque simplifiée – scénario 50 / 50



Carte de comparaison protection Beckelynck et vulnérabilité

Illustration 48 - Comparaison des cartes Beckelynck et de vulnérabilité simplifiée pour la masse d'eau 1008

7 Application de la méthode Drastic et comparaison avec la vulnérabilité simplifiée

Le comité de pilotage de l'étude a décidé d'appliquer cette méthode sur les deux secteurs tests définis préalablement, notamment en raison de leur bonne densité et qualité de données ainsi que leur fort potentiel d'infiltration (voir paragraphe 6), puis de comparer avec l'approche IDPR/ZNS pour valider cette dernière, et en permettre l'extrapolation à l'ensemble de la région.

Selon les résultats, cette approche devra être déclinée par masses d'eau et adaptée à celles-ci.

7.1 DEFINITIONS ET RAPPELS

La méthode « DRASTIC » est l'une des méthodes du sous-groupe PCSM (Point Count System Model) qui a été mise au point par Aller *et al.* (1985) dans l'objectif d'évaluer les risques de pollution des eaux souterraines (Suais et Durbar, 1993 ; Vrba et Zaporozec, 1995).

Elle est basée sur des notations et des coefficients de pondération accordés aux critères choisis pour étudier, classer et représenter dans le plan horizontal ; le rôle protecteur de l'interface séparant la ressource en eau de la source de pollution.

Généralement les critères choisis sont la nature lithologique de la zone non saturée, la recharge, la nature lithologique de la zone saturée, la perméabilité, la texture du sol et la topographie (Aller *et al.*, 1985).

Chaque critère est cartographié avec un index, appelé aussi note (n), allant typiquement de 1 à 10. Un facteur de pondération(p) est ensuite appliqué aux différents critères afin de relativiser leur importance respective en termes de vulnérabilité.

L'index de vulnérabilité final (Di) est la somme pondérée des sept paramètres selon la formule suivante :

$$Di = DnDp + RnRp + AnAp + SnSp + TnTp + InIp + CnCp$$

Où D, R, A, S, T, I, correspondent à :

- D : Depth to groundwater (distance à la nappe, épaisseur de la ZNS) ;
- R : Recharge ;
- A : Aquifer media (nature de la zone saturée) ;
- S : Soilmedia (nature du sol) ;
- T : Topographie (topographie, pente en %) ;
- I : Impact of the vadose zone (nature de la zone non saturée) ;
- C : Conductivity (perméabilité de l'aquifère)

n : notation accordée à chaque paramètre ;

p : facteur de pondération accordée à chaque paramètre.

Les cartes ainsi obtenues permettent de visualiser le degré relatif de vulnérabilité d'un secteur de la zone étudiée. Le potentiel de pollution augmente dans le même sens que l'index.

Les notations généralement accordées aux sept paramètres de la méthode DRASTIC sont présentées dans le tableau suivant. La notation 10 correspond au degré de vulnérabilité le plus élevé.

D : distance à la nappe Epaisseur de la ZNS		R : recharge Pluie efficace	
Valeurs en mètres	Notation	Valeurs en mm	Notation
0 – 1,5	10	>25,5	9
1,5 – 4,5	9	17,5 – 25,5	8
4,5 – 9	7	10 – 17,5	6
9 – 15	5	5 – 10	3
15 – 22	3	0 – 5	1
22,5 – 30	2		
>30	1		
A : nature de la zone saturée		S : nature du sol	
Calcaire karstique	10	Peu épais ou absent	10
Basalte	9	Gravier	10
Sable et gravier	8	Sable,	9
Calcaire massif	6	Argile, agrégats ou pentes	7
Grès massif	6	Limon sableux	6
Shales en séquence	6	Limon	5
Métamorphique altéré, grès	4	Limon silteux	4
lités, calcaires		Limon argileux	3
Métamorphique	3	Argile non agrégée et non	1
Shale massif	2	fissurée	
T : topographies, pentes		I : nature de la ZNS	
Valeurs en % de la pente	Notation	Calcaire karstique	10
0 - 2	10	Basalte	9
2 – 6	9	Sable et gravier	8
6 – 12	5	Sable et gravier avec silt et argile	6
12 – 18	3	Calcaire lité, grès, shale	6
>18	1	Grès	6
		Calcaire	6
		Shale	3
		Silt/argile	1
I : nature de la ZNS			
		> 9,4 10 ⁻⁴ m/s	10
		4,7 10 ⁻⁴ - 9,4 10 ⁻⁴ m/s	8
		32,9 10 ⁻⁵ - 4,7 10 ⁻⁴ m/s	6
		14,7 10 ⁻⁵ - 32,9 10 ⁻⁵ m/s	4
		4,7 10 ⁻⁵ - 14,7 10 ⁻⁵ m/s	2
		4,7 10 ⁻⁷ - 4,7 10 ⁻⁵ m/s	1

Illustration 49 - Notations accordées aux paramètres de la méthode DRASTIC (d'après Lallemand-Barrès, 1994)

La recharge est fréquemment prise en considération dans l'élaboration des cartes de vulnérabilité ; elle est généralement considérée comme élément négatif dans l'évaluation de la vulnérabilité des eaux souterraines. Elle favorise le transfert de polluant par la lame d'eau s'infiltrant de la surface du sol vers l'aquifère sous-jacent.

Cette méthode développée à l'échelle d'un bassin versant, est largement basée sur l'interprétation en donnant du poids à certains paramètres plus qu'à d'autres.

Elle propose deux systèmes de pondération suivant les conditions d'occupation du sol comme le montre le tableau suivant : occupation « normale » ou avec une occupation par une activité agricole intensive utilisant par exemple des produits phytosanitaires.

Critères	Facteurs de pondération	
	« Normal »	« Produits phyto »
D : Profondeur	5	5
R : recharge	4	4
A : milieu aquifère (zone saturée)	3	3
S : milieu sol au dessus de la ZNS	2	5
T : Topographie	1	3
I : nature de la ZNS	5	4
C : perméabilité aquifère	3	2

Illustration 50 - Facteurs de pondération des différents critères de la méthode DRASTIC d'après Lallemant-Barrès, 1994)

7.2 DONNEES UTILISEES

Suite à la constitution du réservoir de données (paragraphe 7), une liste de critères a été retenue, pour appliquer, dans un premier temps cette méthode DRASTIC, sur les deux secteurs tests préalablement sélectionnés.

Les critères qui ont donc été sélectionnés selon la qualité et la densité des données, ainsi que les caractéristiques hydrogéologiques de la région Nord-Pas-de-Calais sont les suivants :

- L'épaisseur de la zone non saturée ;
- La recharge ;
- La perméabilité du sol ;
- Les pentes
- La perméabilité de l'aquifère
- La présence d'une couverture imperméable

L'ensemble de ces données ont été préparées pour appliquer les différents calculs pour l'ensemble de la région Nord-Pas-de-Calais suivant un maillage de 500m x 500m.

7.2.1 L'épaisseur de la zone non saturée

L'épaisseur de la ZNS est calculée à partir du niveau d'eau moyen (obtenu grâce à la combinaison des cartes piézométriques existantes et des niveaux d'eau enregistrés dans la Banque du Sous-sol – cf. paragraphe 4.1.3) et du modèle numérique de terrain (MNT IGN). En résumé il s'agit de la différence entre la cote altimétrique et ce niveau d'eau. Les données sont présentes sur l'ensemble de la région Nord-Pas-de-Calais comme le montre la carte suivante.

Pour chaque maille, on a calculé la valeur moyenne de l'épaisseur de la ZNS.

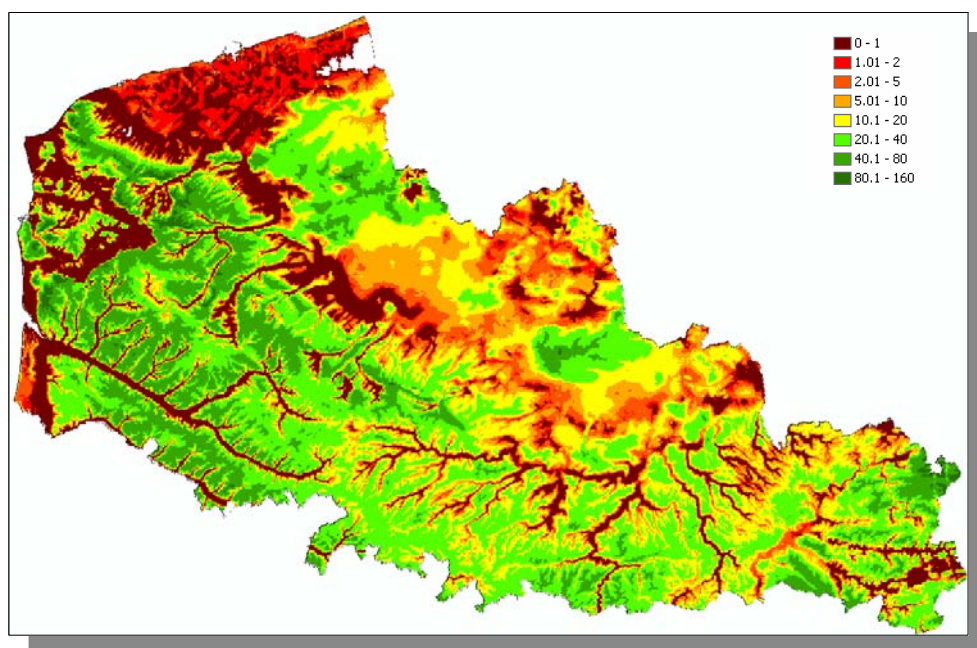


Illustration 51 Epaisseur de la ZNS dans la région Nord-Pas-de-Calais - source BRGM

7.2.2 La recharge

Il s'agit de la quantité d'eau atteignant la zone saturée sur une période donnée (ex : recharge annuelle nette). Elle dépend de l'infiltration efficace et de sa répartition dans l'espace et dans le temps, donc du climat (ETP, précipitations), mais également de la topographie et de la nature des formations.

Elle constitue un facteur de transfert des polluants vers les eaux souterraines.

Pour appliquer la méthode DRASTIC, nous avons utilisé la recharge moyenne mensuelle entre 1990 et 2001. Ces données ont été fournies sous forme de grille sur l'ensemble de la région par Météo – France.

Sur la carte suivante, représentant la recharge, nous avons aussi localisé les deux zones tests.

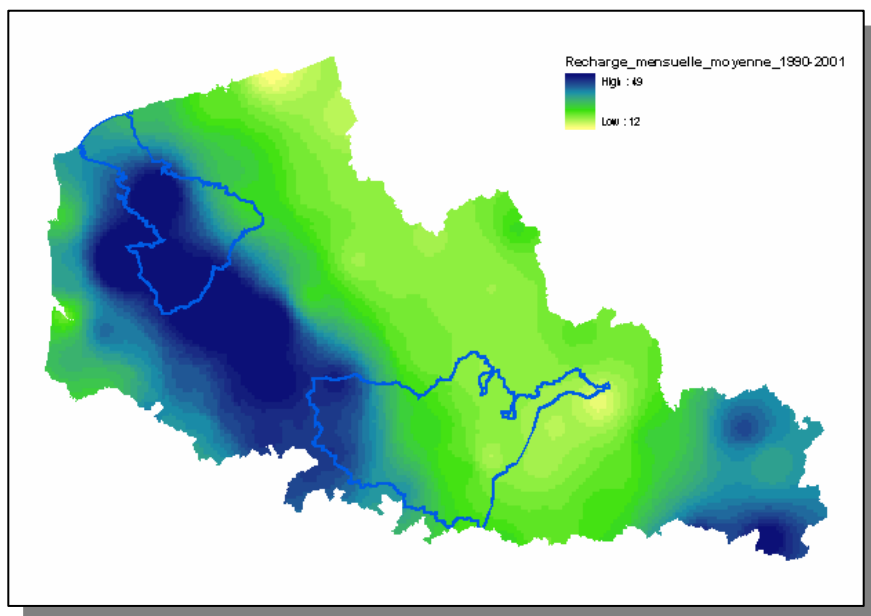


Illustration 52 - Recharge moyenne mensuelle (en mm) pour la période 1990-2001 sur la région Nord-Pas-de-Calais - source Météo – France

Pour chaque maille, on a calculé la valeur moyenne de la recharge.

7.2.3 La perméabilité des sols

La nature, la texture, la teneur en argiles et en matière organique, ainsi que la puissance et la perméabilité verticale régulent la nature et la quantité d'échanges entre la surface et la ZNS.

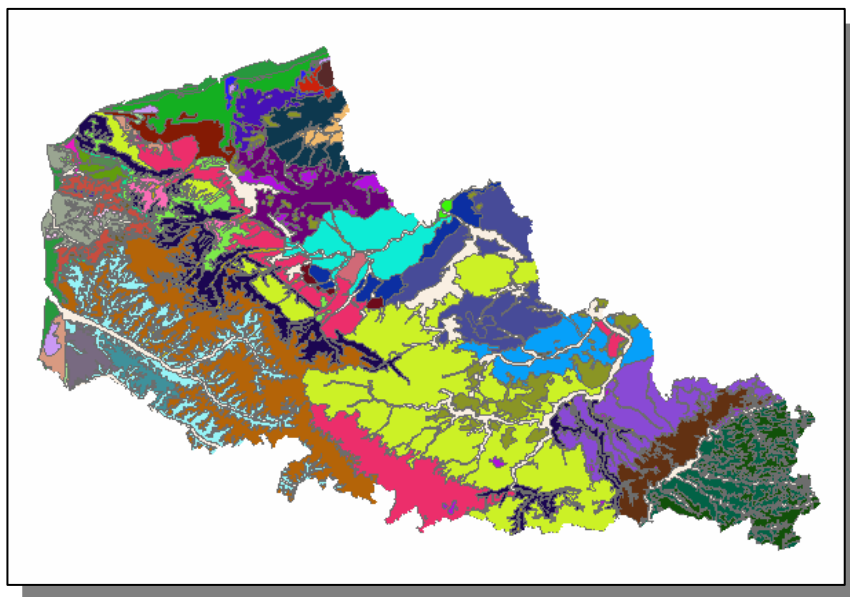


Illustration 53 - Carte synthétique des pédopaysages reprise par le BRGM - (source DRAF NPC)

A partir de la carte synthétique des pédopaysages au 1/250 000 réalisée par la DRAF Nord-Pas-de-Calais et les données fournies sur la valeur des perméabilités du sol, nous avons affecté un facteur multiplicatif de la manière suivante :

Exemple :

L'unité cartographique sol (UCS) L22 présenté dans le tableau ci-dessous contient des sous- unités (UTS) de perméabilités différentes et définies selon leurs pourcentages de surface (% UTS 460).

UCS640	UTS	% UTS640	texture	NOM MAT	perméabilité
L22	37	3	Limoneuse	ARGILE	Modérément perméable (0.36 à 3.6 cm/h)
L22	36	3	Limoneuse	LIMONS	Modérément perméable (0.36 à 3.6 cm/h)
L22	29	25	Sableuse	ALLUVIONS	Très perméable (>36 cm/h)
L22	34	2	Limoneuse	FORMATION A SILEX	Modérément perméable (0.36 à 3.6 cm/h)
L22	33	2	Limoneuse	ARGILE	Modérément perméable (0.36 à 3.6 cm/h)
L22	32	2	Limoneuse	LIMONS	Modérément perméable (0.36 à 3.6 cm/h)
L22	30	10	Limoneuse	ALLUVIONS	Perméable (3.6 à 36 cm/h)
L22	31	28	Limoneuse	LIMONS	Perméable (3.6 à 36 cm/h)
L22	35	25	Limoneuse	LIMONS	Perméable (3.6 à 36 cm/h)

Illustration 54 - Extrait de la base descriptive sur les sols (source DRAF NPC)

Pour utiliser cette information sur la perméabilité du sol, nous avons appliqué un facteur multiplicatif.

Ainsi pour une unité UCS, on obtient les facteurs suivants :

- Peu perméable (0.036 à 0.36 cm/h) \Rightarrow * 1
- Modérément perméable (0.36 à 3.6 cm/h) \Rightarrow * 10
- Perméable (3.6 à 36 cm/h) \Rightarrow * 100
- Très perméable (>36 cm/h) \Rightarrow * 1000

Enfin selon le pourcentage de chaque UTS et le facteur multiplicatif, on a pu ainsi caractériser par une valeur, la perméabilité du sol selon chaque unité cartographique sol (UCS).

Pour chaque maille, on a calculé la valeur moyenne de la perméabilité du sol.

7.2.4 La perméabilité des aquifères

Pour ce paramètre nous avons utilisé différentes sources de données :

- des données ponctuelles avec les perméabilités issues des forages enregistrés dans la Banque du Sous - Sol (BSS), qui ont été le plus souvent calculées à partir de pompages d'essai.
- Les études réalisées pour la caractérisation des masses d'eau dans la région Nord-Pas-de-Calais ;
- Les différentes études réalisées sur la nappe de la craie séno-turonienne ;
- Et les dires d'experts des hydrogéologues régionaux du BRGM.

A partir de tous ces éléments, nous avons défini pour chaque grande lithologie issue de la carte géologique au 1/ 1 000 000 (figure n°) des classes de perméabilité, présentés dans le tableau n° ci-dessous.

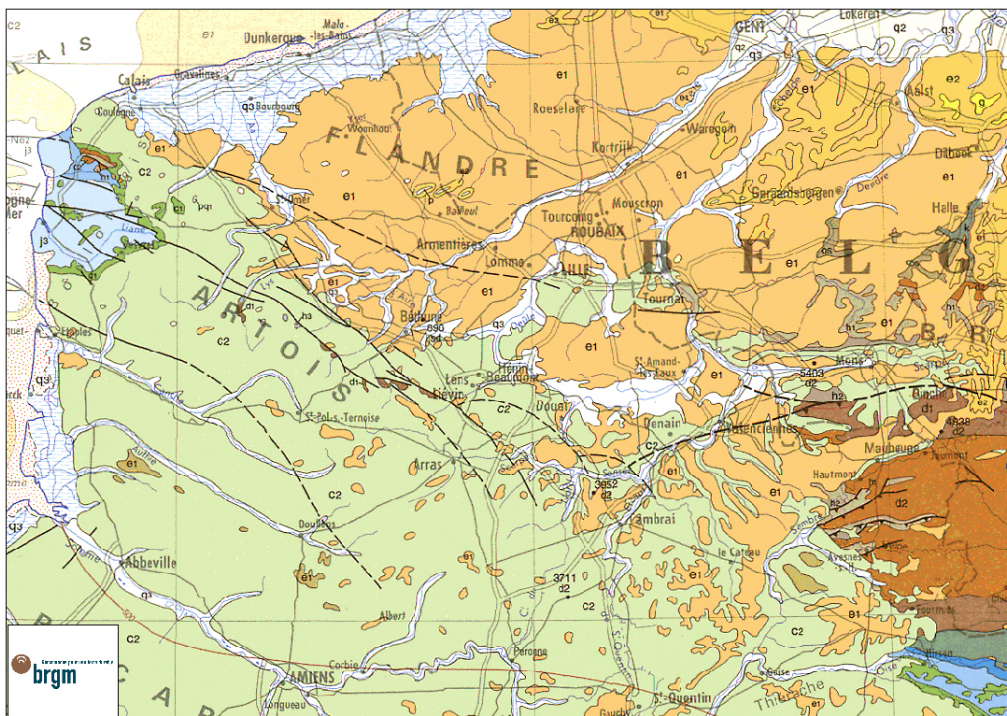


Illustration 55 - Extrait de la carte géologique au 1/1 000 000 – (source BRGM)

Pour affiner les données sur la craie, nous avons délimité de part et d'autres des cours d'eau des zones de 500 m où la perméabilité est plus forte que dans les interfluves.

Stratigraphie		Classe de perméabilité en m/s
c2	Crétacé supérieur	10^{-2} à 10^{-3}
d1, d2	Dévonien	10^{-2} à 10^{-3}
h1, h2	Carbonifère	10^{-2} à 10^{-3}
j2, j3	Jurassique moyen et supérieur	10^{-2} à 10^{-3}
pq1	Cénozoïque	10^{-2} à 10^{-3}
q3	Holocène	10^{-2} à 10^{-3}
e1	Eocène inférieur Paléocène	10^{-3} à 10^{-4}
quaternaire	Quaternaire	10^{-2} à 10^{-3}
craie + alluvions	Crétacé supérieur + Quaternaire	10^{-2} à 10^{-3}
craie interfluve	Crétacé supérieur	10^{-4} à 10^{-5}

Illustration 56 - Définition des domaines de perméabilité

Suite à l'absence de données sur la perméabilité au niveau de certaines zones, nous avons exclu quatre masses d'eau :

- la masse d'eau 1002 : Les calcaires du Boulonnais ;
- la masse d'eau 1014 : Les Sables du Landénien des Flandres
- la masse d'eau 1016 : Les calcaires de l'Avesnois ;
- la masse d'eau 1018 : Les Sables du Landénien d'Orchies.

7.2.5 Les pentes

Pour calculer les pentes nous avons utilisé le Modèle Numérique de Terrain de l'IGN voir la figure ci-dessous.

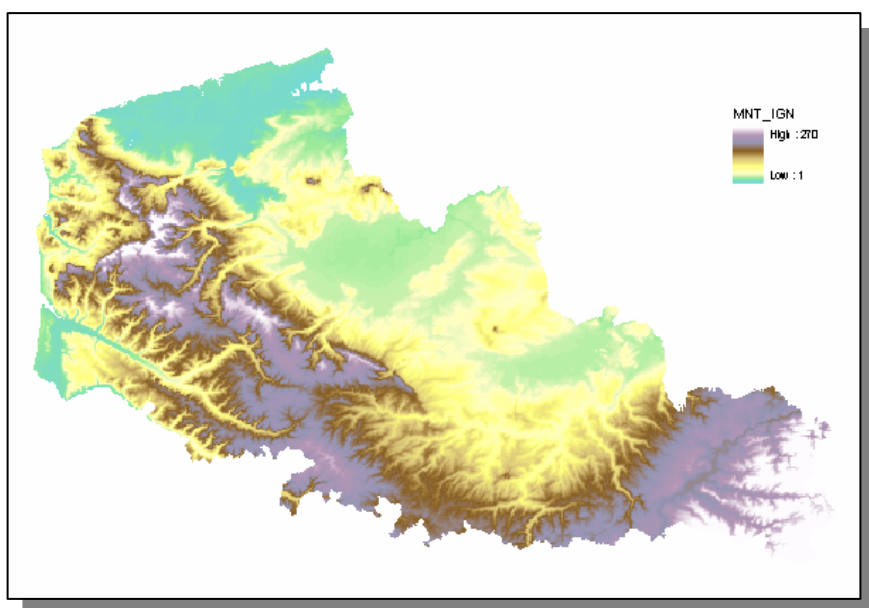


Illustration 57 -Modèle numérique de terrain – source IGN

7.2.6 La présence d'une couverture imperméable

Les contours sur la couverture imperméable appartiennent au Système d'information Géographique du SGR Nord-Pas-de-Calais.

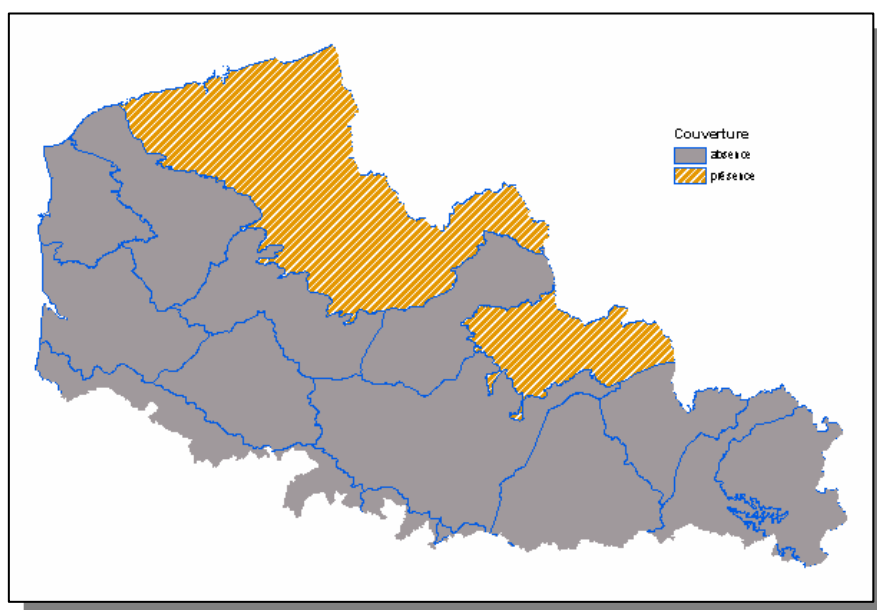


Illustration 58 - Présence d'une couverture imperméable – source BRGM

7.3 NOTATION ET RESULTATS

Conformément à la méthode « DRASTIC » nous avons défini et appliqué pour chaque paramètre un système de notations. Les résultats sont présentés sous forme de carte thématique pour les deux secteurs tests. Les cartographies ainsi obtenues permettent de visualiser le degré relatif de vulnérabilité.

Nous avons en parallèle réalisé les cartes thématiques à l'échelle de la région Nord-Pas-de-Calais, pour certains paramètres, en fonction de la densité et de la qualité des données.

Pour l'ensemble des paramètres, la notation la plus forte correspond au degré de vulnérabilité le plus élevé.

7.3.1 Cartographie thématique de l'épaisseur de la zone non saturée (ZNS)

A partir des données décrites au paragraphe précédent sur l'épaisseur de la zone non saturée, nous avons défini les notes suivantes :

Epaisseur de ZNS (m)		Note attribuée
0	2	10
2	5	9
5	10	7
10	15	5
15	20	3
20	30	2
>	30	1

Ainsi plus l'épaisseur de la zone non saturée est faible plus la vulnérabilité est forte et la note est élevée.

Pour chaque maille une note a été affectée comme le montre l'ensemble des résultats ci-dessous.

Résultats de la zone test : masse d'eau 1001

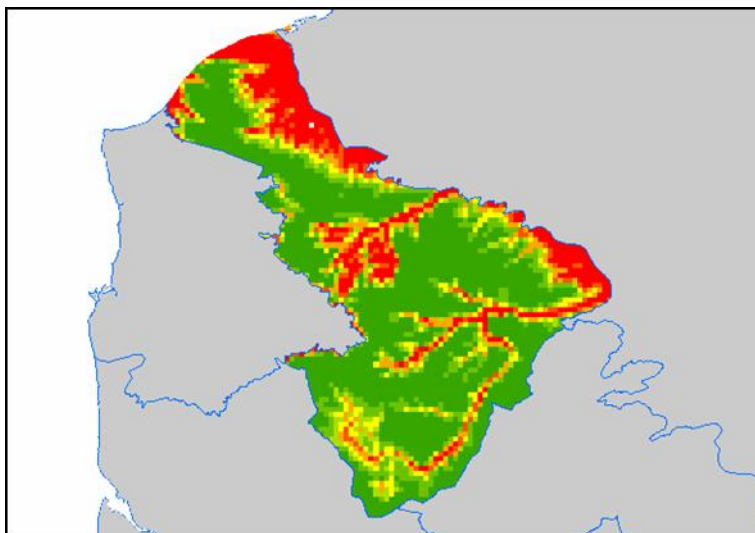


Illustration 59 - Cartographie thématique de l'épaisseur de la ZNS sur la zone test 1001

Résultats de la zone test : masse d'eau 1006

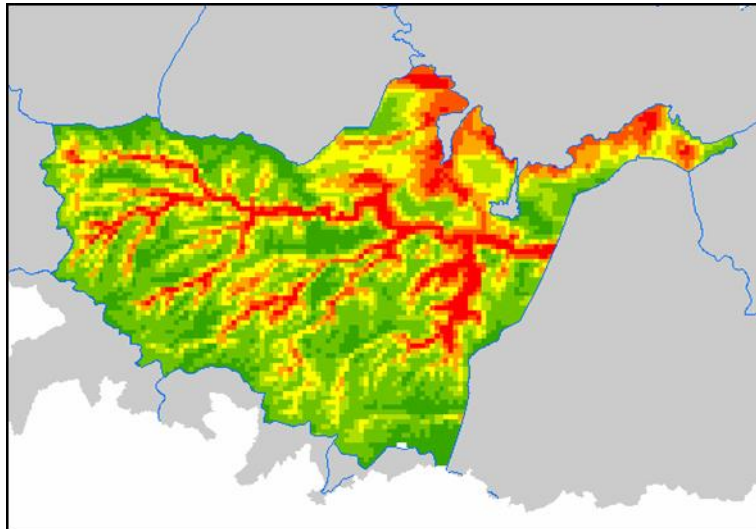


Illustration 60 - Cartographie thématique de l'épaisseur de la ZNS sur la zone test 1006

Résultats pour la Région Nord-Pas-de-Calais

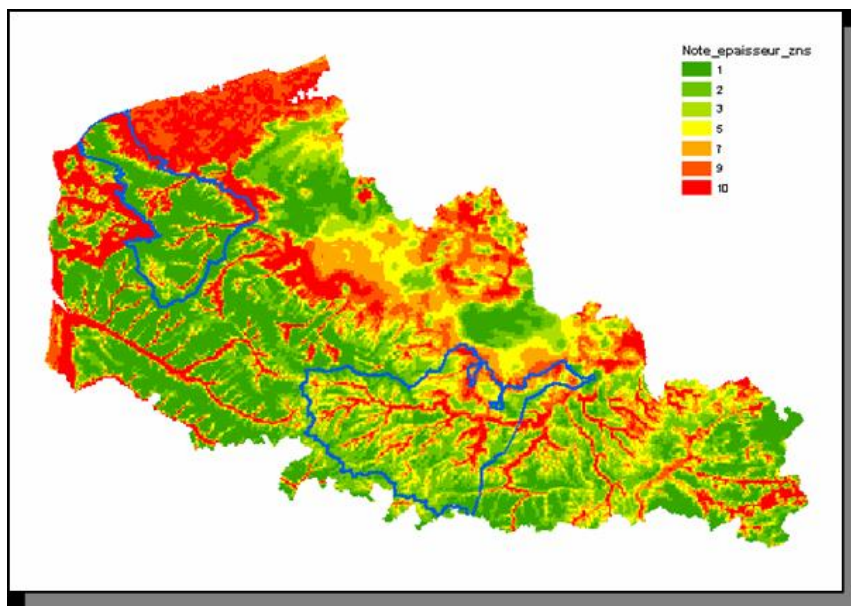


Illustration 61 - Cartographie thématique de l'épaisseur de la ZNS sur la région Nord-Pas-de-Calais

A partir de ces cartes, on constate :

- la forte vulnérabilité (zones rouges) des collines de l'Artois et de la frange captive qui correspond en fait à une flexion des couches du Crétacé Supérieur avant leur mise en captivité sous les argiles des Flandres.
- la forte proximité de la nappe près de la surface du sol dans les zones alluvionnaires et les cours d'eau.
- la forte vulnérabilité de la nappe des Watteringues et celle des cordons dunaires.

7.3.2 Cartographie thématique de la recharge

A partir des données fournies par Météo – France, nous avons utilisé le système de notation suivant :

Recharge moyenne mensuelle (mm)		Note attribuée
0	15	1
15	20	3
20	25	4
25	30	5
30	35	7
>=	35	9

Cette recharge moyenne mensuelle a été classée selon des hauteurs de lame d'eau. La recharge provient principalement des précipitations efficaces qui s'infiltrent. Ainsi plus la hauteur de la lame d'eau est grande, plus la vulnérabilité est forte.

Pour chaque maille une note a été affectée comme le montre l'ensemble des résultats ci-dessous.

Résultats de la zone test : masse d'eau 1001

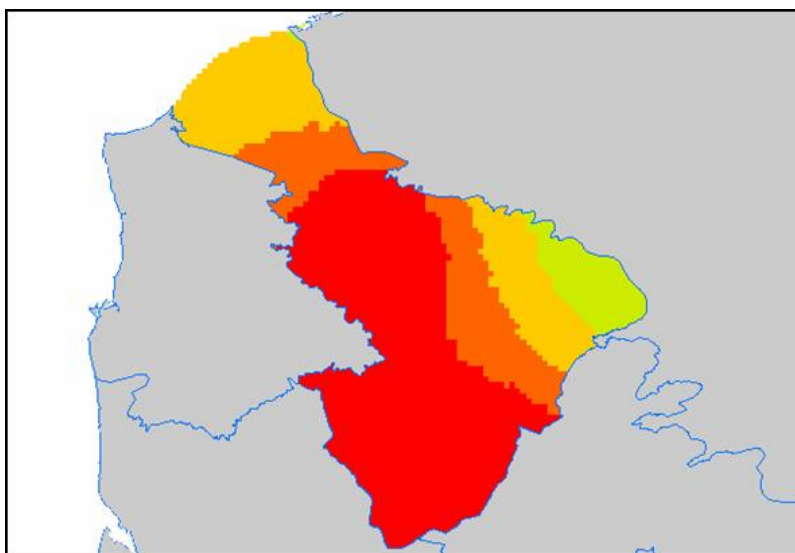


Illustration 62 - Carte thématique de la recharge sur la masse d'eau 1001

Résultats de la zone test : masse d'eau 1006

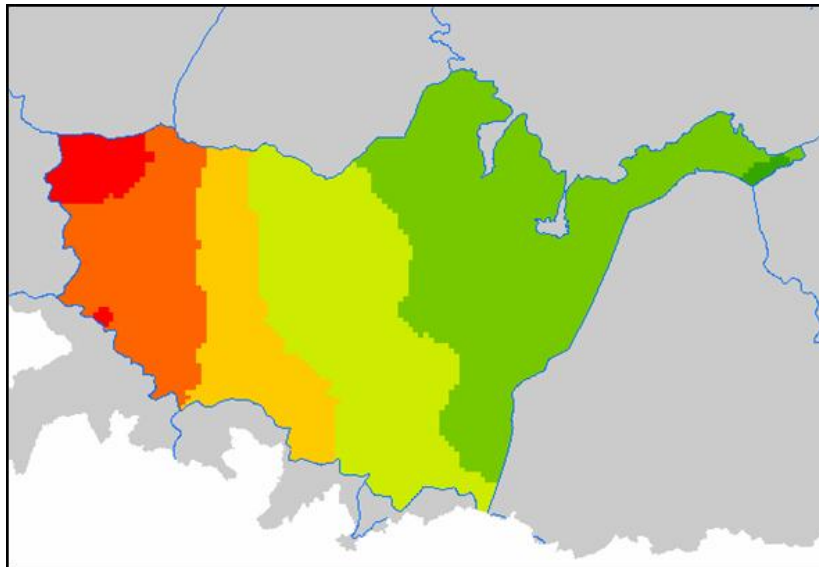


Illustration 63 - Carte thématique de la recharge sur la masse d'eau 1006

Résultats pour la Région Nord-Pas-de-Calais

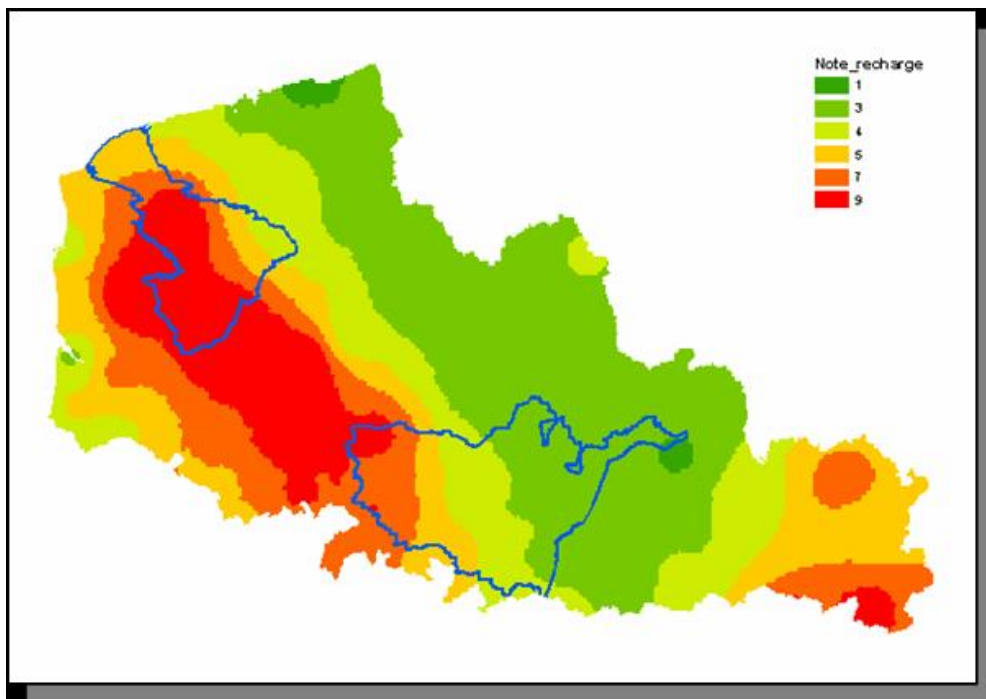


Illustration 64- Cartographie thématique de la recharge sur la région Nord-Pas-de-Calais

L'analyse de ces cartes montre la présence de zones privilégiées localisées sur toute la bordure Ouest de la Région Nord-Pas-de-Calais. En fait ces aires de recharge bénéficient directement de l'influence océanique apportant des pluies efficaces en plus grande quantité. La recharge moyenne mensuelle dans ces zones, qui s'étendent du Boulonnais à l'Ouest d'Arras, est largement supérieure à 30 mm.

7.3.3 Cartographie thématique de la perméabilité du sol

L'étude pédologique réalisée par la DRAF a montré la complexité et la variété importante des types de sols, que ce soit dans leur répartition ou encore leurs textures.

Après avoir calculé, pour chaque maille (voir paragraphe 8-2-3), la valeur moyenne de la perméabilité du sol, nous leur avons affecté une série de notes définies de la manière suivante :

Pédologie		Note attribuée
0	10	1
10	50	3
50	300	5
300	500	7
>=	500	9

Plus la note attribuée est grande (9), plus la perméabilité des sols est élevée et plus les sols sont vulnérables.

Résultats de la zone test : masse d'eau 1001

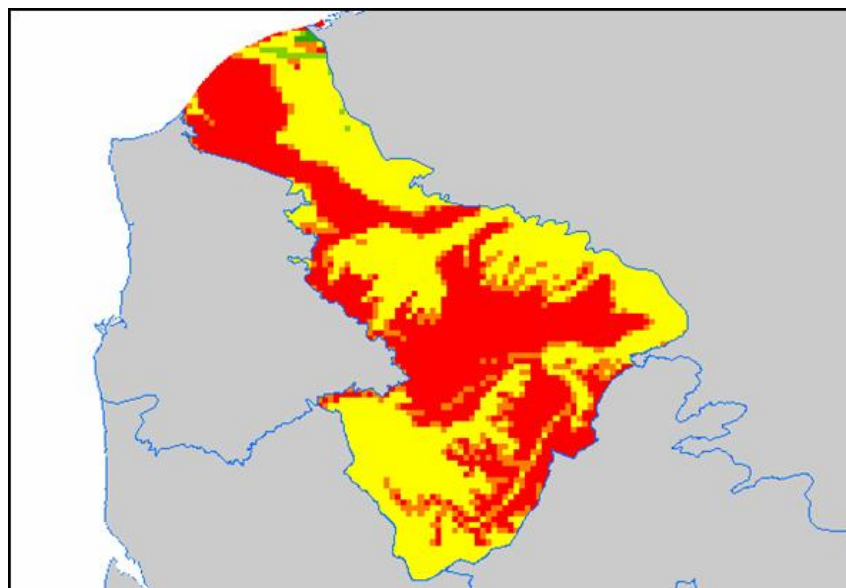


Illustration 65 -.Carte thématique de la perméabilité du sol sur la masse d'eau 1001

Résultats de la zone test : masse d'eau 1006

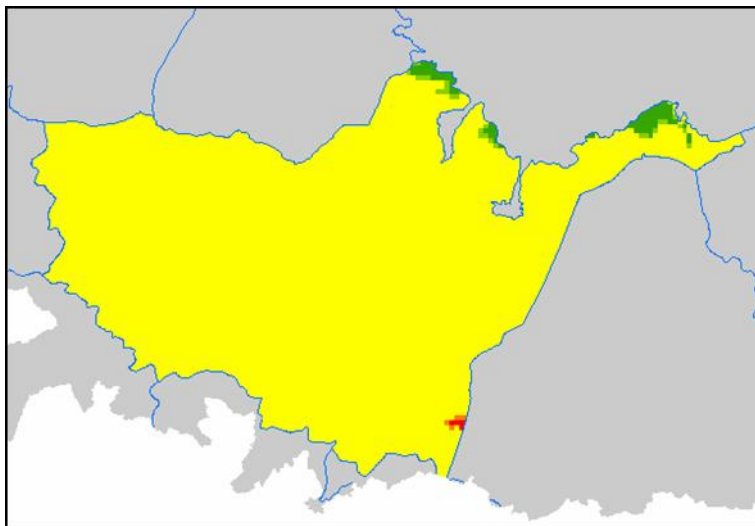


Illustration 66 - Carte thématique de la perméabilité du sol sur la masse d'eau 1006

Résultats pour la Région Nord-Pas-de-Calais

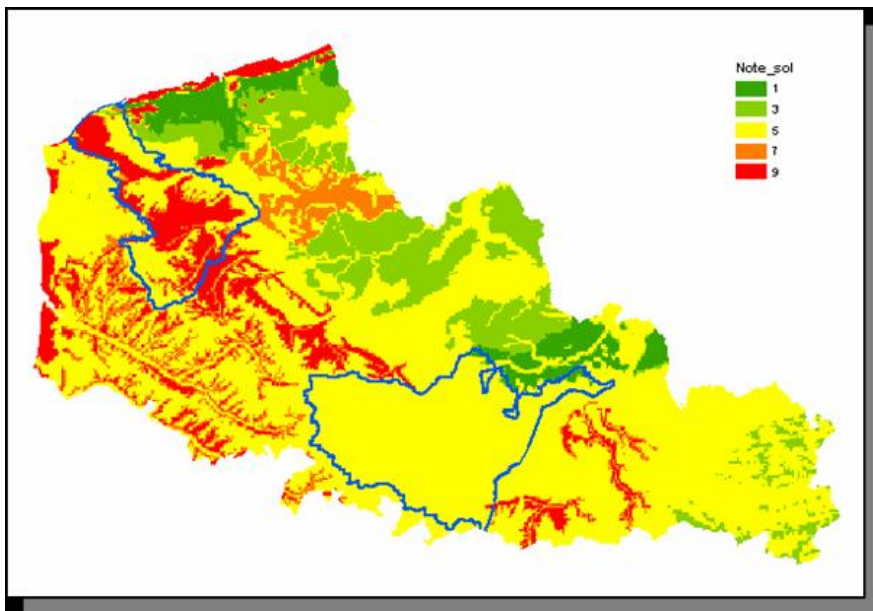


Illustration 67 - Carte thématique de la perméabilité du sol sur la région Nord-Pas-de-Calais

Sur ces cartes thématiques, on remarque une homogénéisation de la perméabilité du sol sur l'ensemble du territoire Nord-Pas-de-Calais. Ce phénomène est important au niveau de la zone test 1006 (craies des vallées de la Scarpe et de la Sensée), qui est du principalement à une forte densité de plateaux recouverts de limons éoliens du Quaternaire.

7.3.4 Cartographie thématique de la perméabilité des aquifères

L'appréciation de la vulnérabilité relative à ce critère a permis de distinguer trois classes à degrés de vulnérabilité différents.

Comme la perméabilité des sols, la note la plus élevée correspond à une forte perméabilité et donc une vulnérabilité plus importante.

Perméabilité (m/s)		Note attribuée
c2	$10^{-2} 10^{-3}$	8
craie alluvions	$10^{-2} 10^{-3}$	8
d1, d2	$10^{-2} 10^{-3}$	8
h1, h2	$10^{-2} 10^{-3}$	8
j2, j3	$10^{-2} 10^{-3}$	8
k	$10^{-2} 10^{-3}$	8
pq1	$10^{-2} 10^{-3}$	8
q3	$10^{-2} 10^{-3}$	8
quaternaire	$10^{-2} 10^{-3}$	8
e1	$10^{-3} 10^{-4}$	4
craie interfluve	$10^{-4} 10^{-5}$	1

k : terrain du paléozoïque localisé dans la partie belge des Argiles des Flandres.

Conformément au paragraphe 8-2-4, le système de notation défini précédemment ne s'applique pas aux quatre masses d'eau exclues (elles apparaissent en grisé sur la carte régionale).

Pour chaque maille une note a été affectée comme le montre l'ensemble des résultats ci-dessous.

Résultats de la zone test : masse d'eau 1001

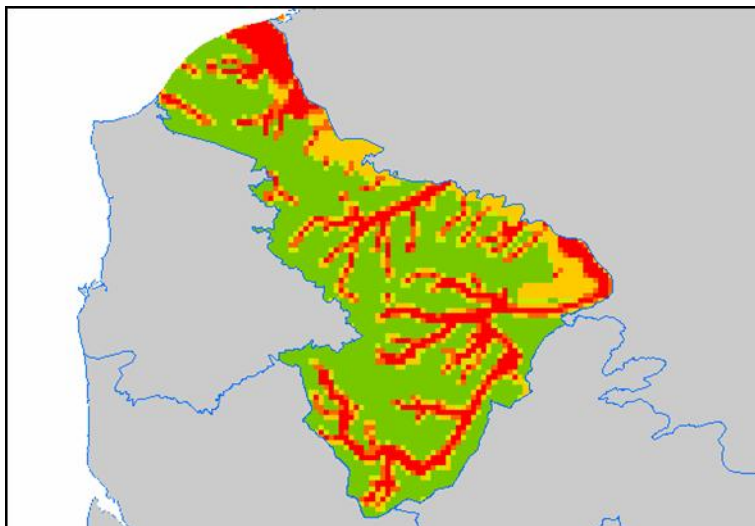


Illustration 68 - Carte thématique de la perméabilité des aquifères sur la masse d'eau 1001

Résultats de la zone test : masse d'eau 1006

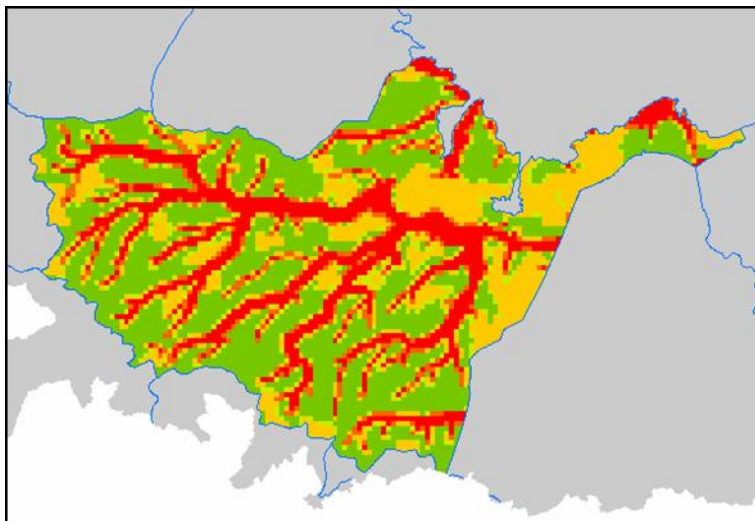


Illustration 69 - Carte thématique de la perméabilité des aquifères sur la masse d'eau 1006

Résultats pour la Région Nord-Pas-de-Calais

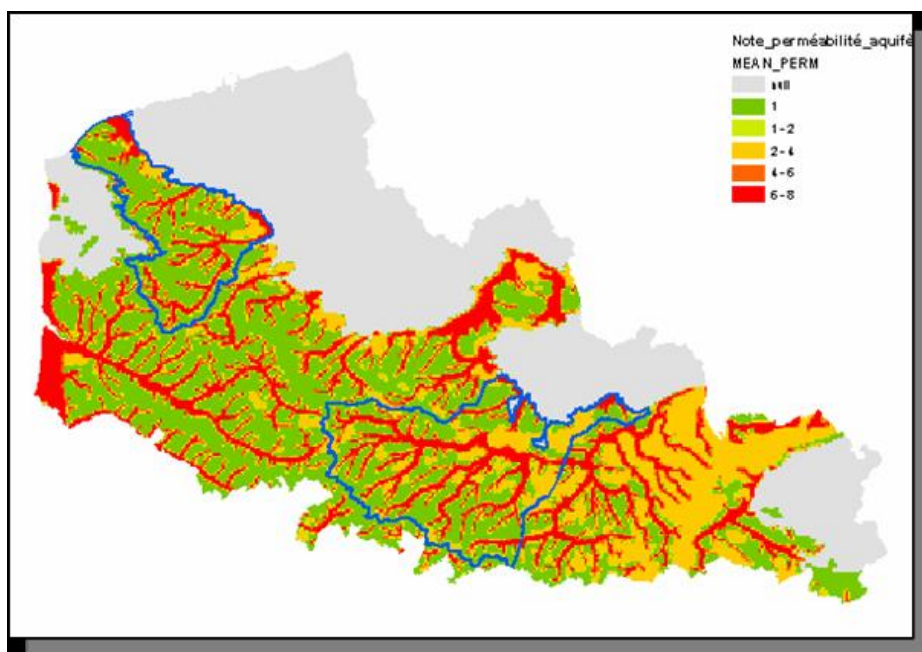


Illustration 70 - Carte thématique de la perméabilité des aquifères sur la région Nord-Pas-de-Calais

Ces cartes thématiques font ressortir des zones de forte vulnérabilité représentées essentiellement par les fonds de vallées avec les domaines alluviaux associés, les cordons dunaires du Littoral et la frange captive de la nappe de craie avec plus de nuances.

7.3.5 Cartographie thématique des pentes

Une des particularités morphologiques de la Région Nord-Pas-de-calais réside dans un relief peu marqué avec de faibles pentes.

Le système de notation adopté pour caractériser la vulnérabilité relative de ce critère est le suivant.

Pentes %		Note attribuée
0	1	7
1	2	6
2	5	3
5	10	2
>=	10	1

Plus la pente est faible, plus l'infiltration est privilégiée et plus la vulnérabilité est forte.

Pour chaque maille une note a été affectée comme le montre l'ensemble des résultats ci-dessous.

Résultats de la zone test : masse d'eau 1001

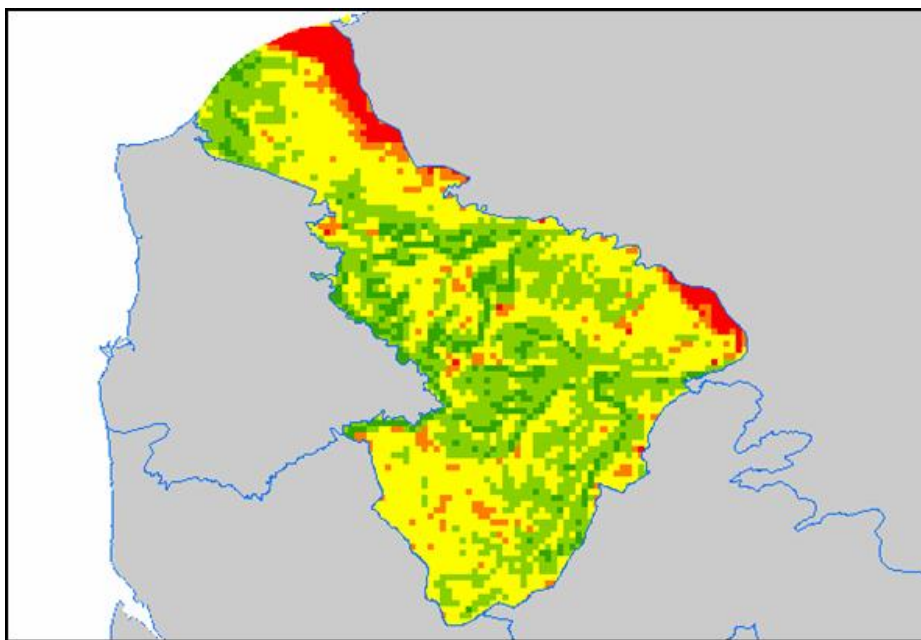


Illustration 71 - Carte thématique des pentes sur la masse d'eau 1001

Résultats de la zone test : masse d'eau 1006

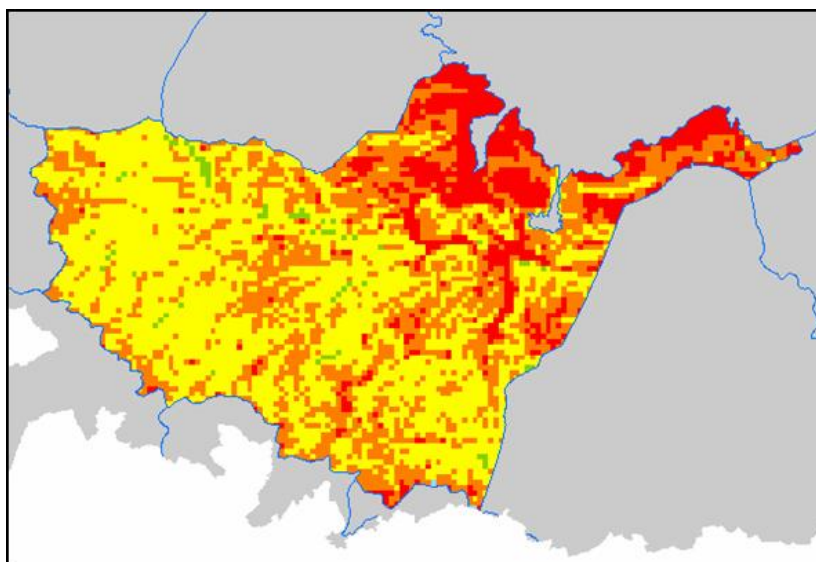


Illustration 72 -.Carte thématique des pentes sur la masse d'eau 1006

Résultats pour la Région Nord-Pas-de-Calais

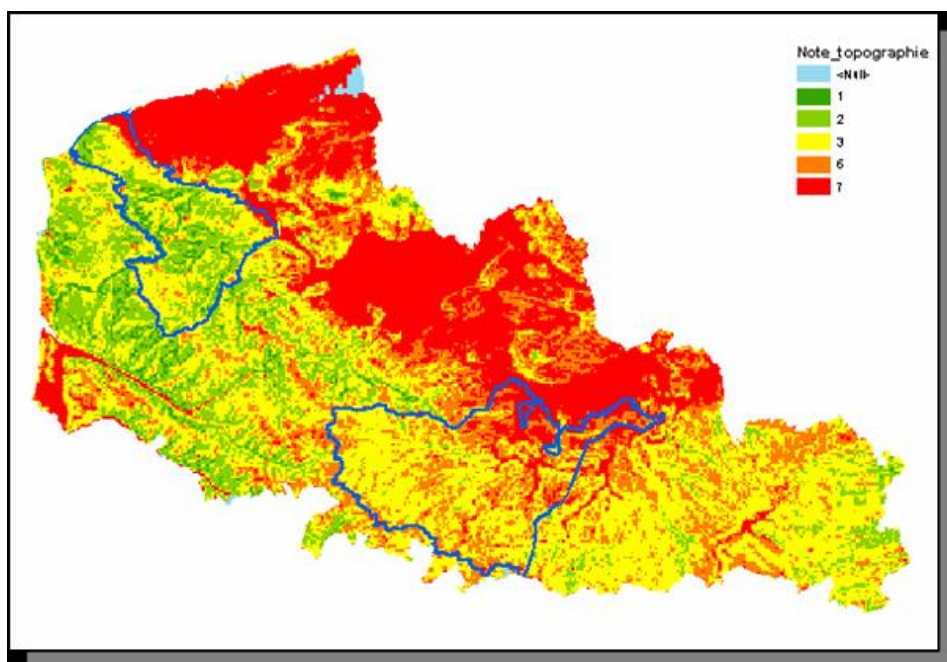


Illustration 73 - Carte thématique des pentes de la région Nord-Pas-de-Calais

Si on analyse ces résultats, on constate la présence de trois grands secteurs :

- La zone des Flandres avec de très faibles pentes et donc un degré de vulnérabilité relatif à ce critère élevé.
- La zone Sud à Sud-Est de la région Nord-Pas-de-calais dont la masse d'eau 1006, qui correspond à une zone intermédiaire plutôt de plateaux et à une vulnérabilité moyenne.
- La zone Ouest où la topographie est plus accidentée (en vert sur les différentes cartes) avec des pentes plus fortes dues à la nature géologique des terrains (Le Boulonnais) et une particularité régionale que sont les collines de l'Artois (résultat de la courbure des couches crétacées lors des différents épisodes tectoniques). Cette zone est de faible vulnérabilité.

7.3.6 Cartographie thématique de la présence de la couverture imperméable

Le système de notation retenu pour caractériser la vulnérabilité relative au critère de présence d'une couverture imperméable est le suivant :

Couverture imperméable			Note attribuée
0	0.25	pas protégé	10
0.25	0.5	peu protégé	5
0.5	0.75	protégé	3
0.75	1	très protégé	1

Pour chaque maille une note a été affectée comme le montre le résultat ci-dessous.

Résultats pour la région Nord-Pas-de-Calais

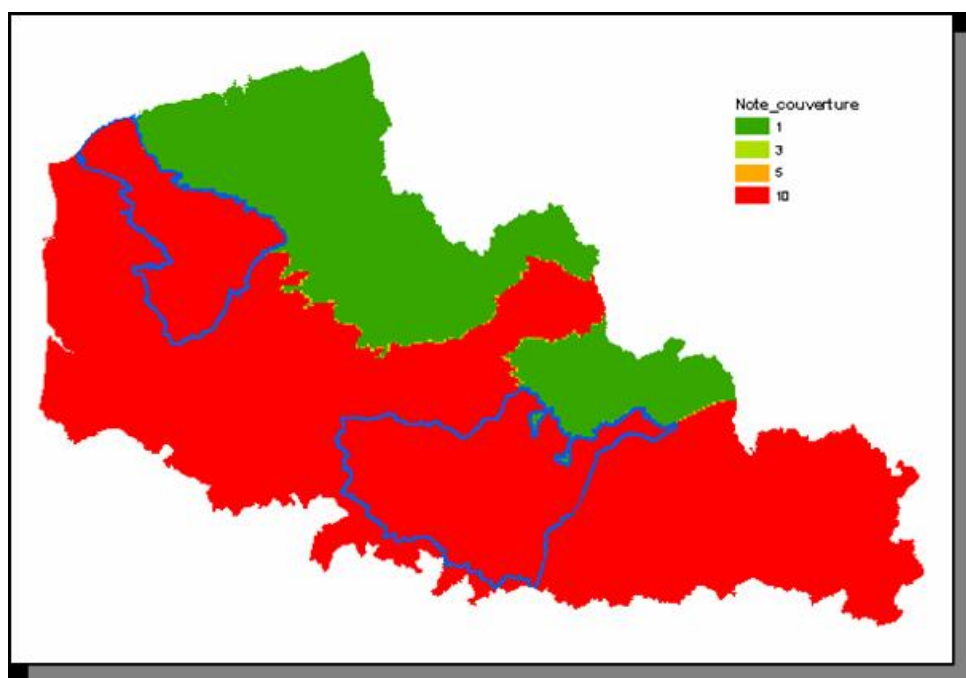


Illustration 74 - Carte thématique de la couverture imperméable sur région Nord-Pas-de-Calais

7.4 CARTOGRAPHIE DE LA VULNERABILITE ET DISCUSSIONS

7.4.1 Les critères de pondération de la méthode « DRASTIC »

Pour élaborer la carte de vulnérabilité intrinsèque par la méthode « DRASTIC », nous avons combiné les six cartes thématiques pour chaque zone test (masses d'eau 1001 et 1006) avec les critères de pondération présentés dans le tableau ci-dessous. Ils correspondent au scénario « Normal » défini au paragraphe 8-1.

Critères	Facteurs de Pondération
Epaisseur de la ZNS	5
Recharge	4
Perméabilité du sol	2
Pentes	1
Perméabilité de l'aquifère	3
Présence d'une couverture imperméable	2

En résumé l'indice de vulnérabilité finale pour chaque maille de 500 m x 500 m peut être calculé en utilisant la formule suivante :

$$\text{Indice_vulnérabilité} = 3*[\text{NOTE_PERM}] + 2*[\text{NOTE_COUV}] + 4*[\text{NOTE_RECH}] + 1*[\text{NOTE_SLOPE}] + 2*[\text{NOTE_SOIL}] + 5*[\text{NOTE_ZNS}]$$

Après le calcul de cet indice, l'analyse des cartes de vulnérabilité des deux zones tests a permis de distinguer cinq classes d'indices à degrés de vulnérabilité différents (il est compris entre 35 et 150) :

couleur	Indice vulnérabilité compris entre	Vulnérabilité
	35 - 60	Très faible
	60 - 75	Faible
	75 - 100	Moyenne
	100 - 125	Forte
	125 - 150	Très Forte

Illustration 75 – Classes d'indices de vulnérabilité

L'ensemble des résultats pour les deux masses d'eau est présenté dans les figures suivantes.

7.4.2 Les résultats par zone test

Résultats zone test 1001 :

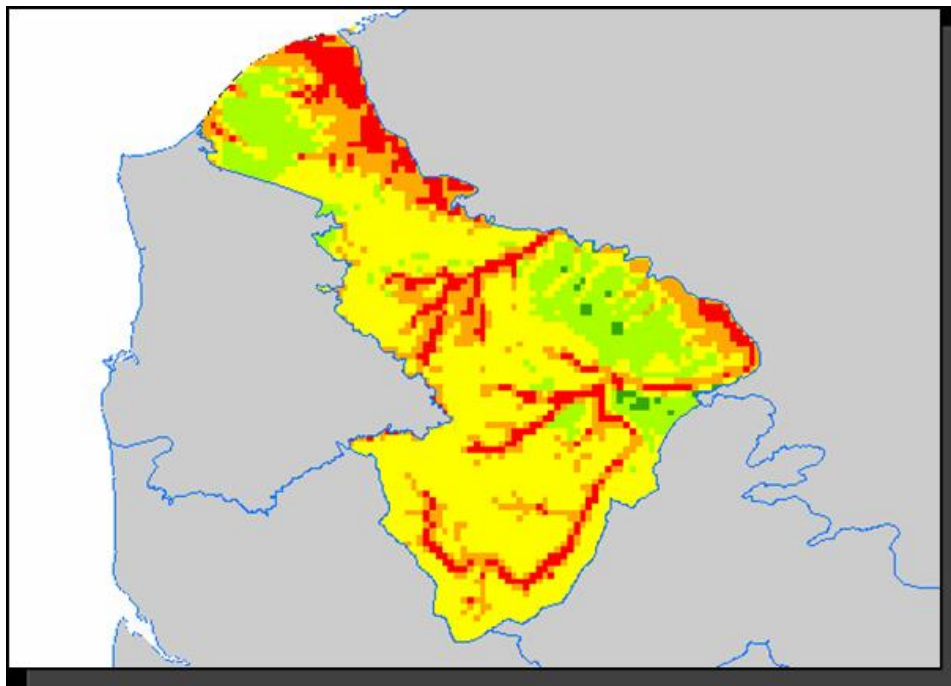


Illustration 76 - Vulnérabilité intrinsèque par la méthode DRASTIC – masse d'eau 1001

Résultats zone test 1006 :

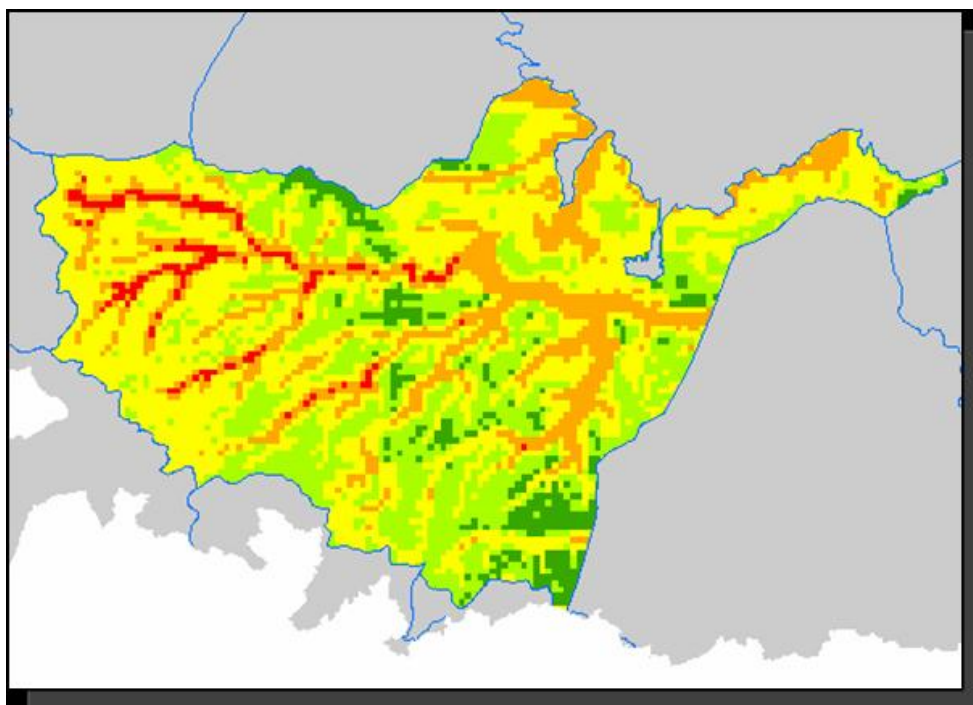


Illustration 77 - Vulnérabilité intrinsèque par la méthode DRASTIC – masse d'eau 1006

7.4.3 Discussion

L'analyse des deux cartes de vulnérabilité des masses d'eau 1001 et 1006, établies à l'aide de la méthode DRASTIC, a permis de distinguer cinq classes de degrés de vulnérabilité différents. Cet indice de vulnérabilité est compris entre 35 et 150.

Ces classes sur l'ensemble des deux cartes, se répartissent principalement en trois zones :

- La première zone est de très faible à faible vulnérabilité qui correspond aux zones de plateaux. Cela correspond à une épaisseur de la zone non saturée (ZNS) assez élevée, une perméabilité assez faible, une recharge contrastée et une perméabilité du sol moyenne et homogène.
- La deuxième zone à vulnérabilité moyenne couvre une surface assez importante de la carte de la masse d'eau 1001 (secteurs jaunes). Elle est caractérisée essentiellement par des zones d'interfluve.
- La troisième zone à forte et très forte vulnérabilité s'étend principalement dans les fonds de vallées, les zones alluviales et la frange captive de la nappe de la craie. Ces secteurs sont des zones où la ZNS est faible et la perméabilité des aquifères est élevée.

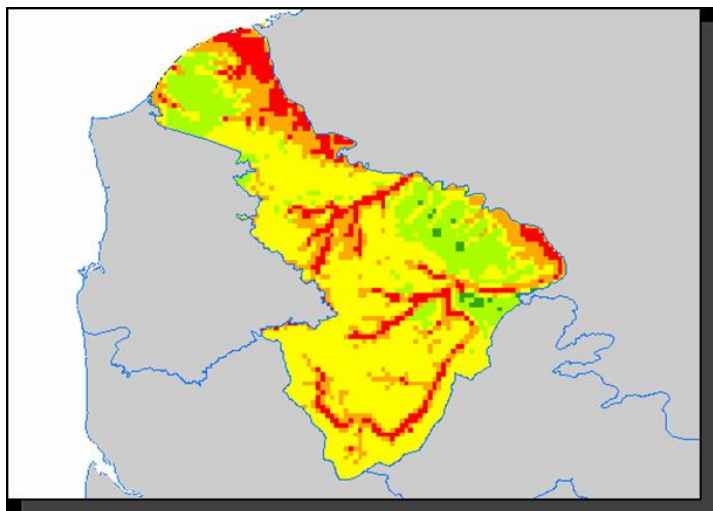
Ainsi la méthode « DRASTIC », du fait du choix des valeurs des facteurs de pondération (le facteur pour l'épaisseur de la ZNS est égal à 5 et est aussi le plus élevé de tous les autres critères), a dans ce cas tendance à beaucoup plus marqué les vallées alluviales que d'autres méthodes.

Pour appliquer cette méthode, cela suppose un réservoir de données avec une répartition et une qualité de données homogènes. Ce qui n'est pas le cas notamment pour le critère de la perméabilité de l'aquifère où nous avons été obligé par manque de données, d'écarter quatre masses d'eau. **Sur ces secteurs nous ne pourrions par réaliser la cartographie de la vulnérabilité intrinsèque par la méthode « DRASTIC ».**

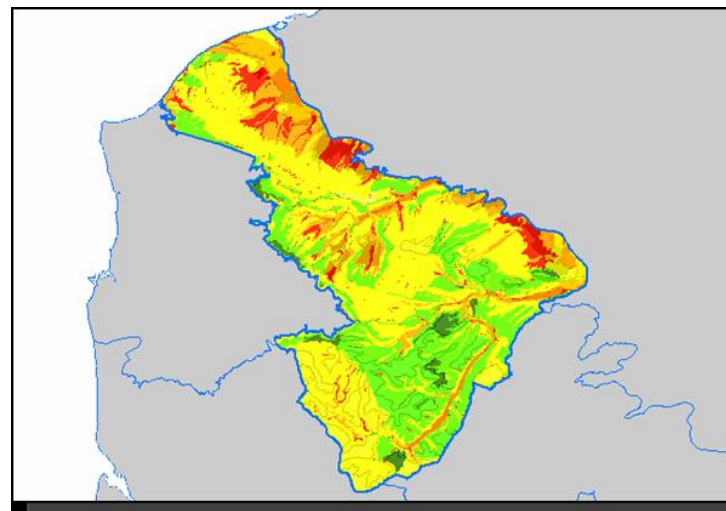
Si on compare ces cartes avec celles de la vulnérabilité intrinsèque simplifiée (scénario 50/50) et de Beckelynck, (cf figures n° et n°) on constate :

- **La méthodologie de la vulnérabilité intrinsèque simplifiée (scénario 50/50) est cohérente sur l'ensemble de la région par rapport à l'application d'une méthode classique comme DRASTIC.** On retrouve de manière équivalente les grandes zonations.
- Par contre, **la carte de la vulnérabilité simplifiée est plus précise que les deux autres.** Cela est du au fait que le maillage utilisé pour calculer l>IDPR et la ZNS est de 250X250 m alors que celui de la méthode « DRASTIC » est de 500 X 500 m.
- la méthode de la vulnérabilité simplifiée donne plus de détails sur les vallées alluviales et la frange captive, améliorant les répartitions des différents degrés de vulnérabilité. Cela permet aussi d'éviter de globaliser comme le fait DRASTIC pour les cours d'eau notamment. Cela se retrouve aussi pour les faibles vulnérabilités dans les zones d'interfluve.

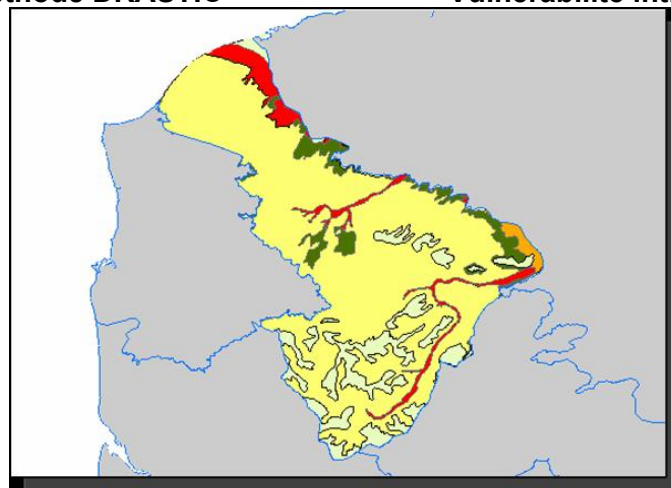
Suite à ces constations, le comité de pilotage de l'étude a retenu la méthodologie de la vulnérabilité simplifiée (scénario 50 /50) pour élaborer la cartographie de la vulnérabilité des eaux souterraines sur l'ensemble de la Région Nord Pas Calais.



Vulnérabilité intrinsèque par la méthode DRASTIC

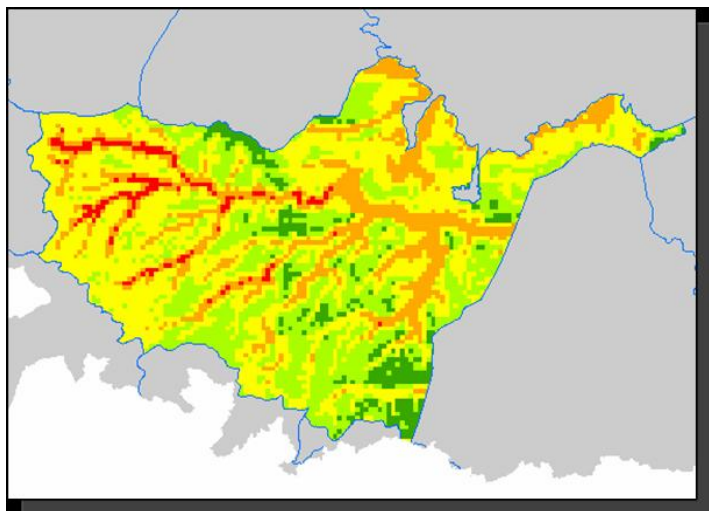


Vulnérabilité intrinsèque simplifiée – scénario 50 / 50

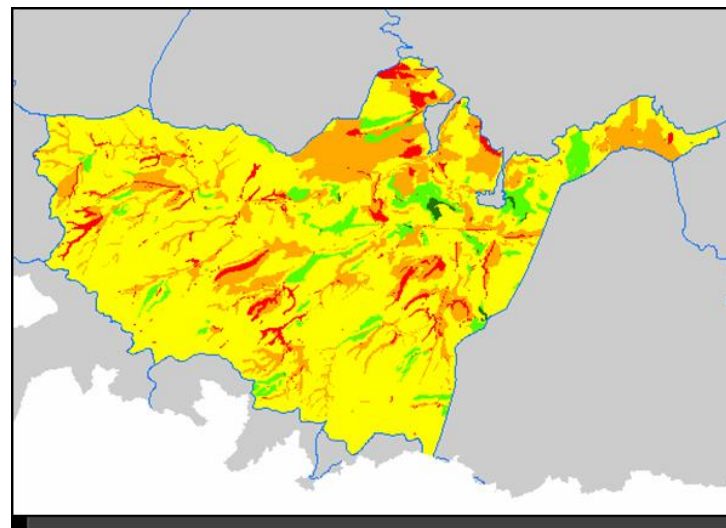


Vulnérabilité par Beckelynck

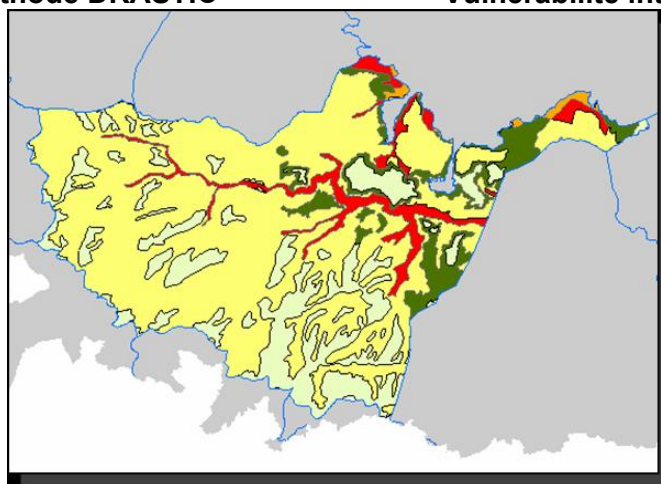
Illustration 78 - Comparaison des différentes cartes de vulnérabilité pour la masse d'eau 1001



Vulnérabilité intrinsèque par la méthode DRASTIC



Vulnérabilité intrinsèque simplifiée – scénario 50 / 50



Vulnérabilité par Beckelynck

Illustration 79 - Comparaison des différentes cartes de vulnérabilité pour la masse d'eau 1006

8 Constitution du réservoir de données

La zone d'étude initiale correspond à la surface occupée par la région Nord-Pas-de-Calais. Le système géodésique du SIG est le système NTF (Nouvelle Triangulation de la France). Ce système a été défini de manière locale pour le territoire français et a été réalisé entre 1889 et 1992. L'ellipsoïde associé est le Clarke 1880 IGN et le méridien origine est le méridien de Paris. La projection définie pour cette étude est le Lambert II étendu. Elle compose l'une des contraintes d'organisation des données présentes dans le SIG

8.1 SOURCES DE DONNEES

Le SIG a été conçu par assemblage de données majoritairement issue du SGR NPC. La part venant des partenaires sollicités pour cette étude est plus disparate ce qui implique qu'elles ont été obtenues sous des formes différentes pouvant parfois poser quelques difficultés.

Les organismes interrogés ne possèdent pas toujours de SIG et les données sont donc parfois stockées sous format "papier". Ce sont soit des cartes, du type cartes illustration un rapport d'étude, qu'il convient ensuite de numériser et de géoréférencer, soit des données tabulaires qu'il faut également géoréférencer et convertir en table dans la base de données.

Le problème majeur de ce type de données peut provenir du géoréférencement avec le risque d'une perte de précision lors du passage entre les coordonnées terrain et les coordonnées pixels de la carte, notamment si les projections cartographiques utilisées ne sont pas identiques. Systématiquement, le cas échéant, la projection native du document a été conservée lors de l'étape de numérisation ou d'intégration au SIG. Cela vaut surtout pour les fichiers raster non géoréférencés.

Dans la majorité des cas, les données ont été obtenues aux formats numériques standards utilisés dans les SIG (.shp, .dxf, .mif). La compatibilité entre les différents SIG étant désormais une notion bien répandue, les formats de fichiers sont le plus souvent lisibles par la plupart des logiciels.

8.2 OUTIL SIG MIS EN PLACE

L'outil SIG retenu pour cette étude est ArcMAP en version 9.x et la suite logiciel ArcDesktop

La mise en place du SIG relatif à l'étude de vulnérabilité du Nord Pas de Calais a commencé par un état de l'art de l'information géographique disponible régionalement. Ce bilan a montré que le SGR était, en matière de données relatives à la thématique des eaux souterraine, riche d'un savoir et d'une organisation des données parfaitement opérationnelle dans le cadre de la constitution d'un SIG sous ArcView. Historiquement La mise en place du SIG du SGR débute dès les années 1980. Destiné à gérer toute l'information géographique de la thématique sol et sous sol de la région Nord pas de calais, ce SIG contient au départ une base de données importante constituée des informations de la Banque de données du Sous-Sol et de la carte géologique.

Dans le cadre de notre étude, après une conception technique du SIG et la définition de ses caractéristiques étroitement dérivée de celui en place au SGR, des données complémentaires ont été acquises auprès de partenaires régionaux pour constituer et/ou enrichir les diverses couches thématiques de la base de données.

Le SIG ainsi obtenu constitue le seul réservoir de donnée utilisé pour l'étude menée dans le cadre de la vulnérabilité intrinsèque simplifiée des eaux souterraines.

Enfin, un prototype d'application permettant d'en exploiter les résultats à travers différents scénarios de pondération des critères d'analyse a été mis en place. Les objectifs sont doubles : en premier lieu réaliser et conserver l'étude de vulnérabilité telle qu'elle résulte de cette étude et élaborer des scénarios pouvant intéresser les différents partenaires l'étude fondés sur des pondérations adaptées aux enjeux de chacun.

8.2.1 Le réservoir de données, la géodatabase

La mise en place du SIG nécessite la constitution d'une base de données. En l'occurrence il s'agit d'une géodatabase. Ce format est celui utilisé par le logiciel ArcGIS[®]. Cette géodatabase est le cœur du système d'information. Elle effectue les opérations d'archivage, de stockage, d'affichage ou encore d'analyse. Elle se compose de données de référence et de données thématiques.

La géodatabase est un modèle de données permettant de représenter des informations géographiques à l'aide des technologies standard de bases de données relationnelles. La géodatabase prend en charge le stockage et la gestion des informations géographiques dans des tables du système de gestion de bases de données relationnelles standard. Accessibles par tous les utilisateurs ArcGIS, elles utilisent la structure de fichiers de base de données Microsoft Jet Engine pour conserver les données SIG dans des bases de données. Ce sont des espaces de travail à base de fichiers et renferment des bases de données dont la taille ne dépasse pas 2 Go. Ce type de géodatabase est idéal pour travailler sur des projets SIG dont les jeux de données sont de taille relativement restreinte.

La création de cette base de données s'est déroulée en trois étapes avec :

- la conception (identification spatiale, définition des attributs ou reprise des attributs, paramétrage des limites et choix du système de coordonnées),
- l'automatisation des données (conversion de données depuis le format MAPInfo© vers la géodatabase, vérification et correction d'erreurs)
- la gestion (vérification des systèmes de coordonnées et cohérences des relations spatiales entre les couches).

8.2.2 Structuration des données au sein d'une géodatabase

La géodatabase stocke des objets qui peuvent être des entités spatiales ou non. Une géodatabase peut être constituée d'une collection de jeux de classes d'entités ("Feature DataSet"), de classes d'entités ("Feature Class"), de tables, de rasters ... Contrairement à une couverture, le schéma d'une géodatabase n'est pas prédéfini. L'utilisateur peut organiser les tables, les classes d'entités et les jeux de classes d'entités comme il le souhaite.

La géodatabase est stockée dans un fichier .mdb dans le cas d'une géodatabase personnelle. Ce fichier est au format MS/ACCESS 2000 et a ce titre utilisable, pour la partie thématique des données, directement via Microsoft Access(c)

- **Jeu de classes d'entités (Feature Data Set)**

C'est un ensemble de classes d'entités ayant des relations topologiques entre elles (par exemple, le système de projection constitue une relation topologique entre tout les objets d'une classe d'entité ainsi qu'éventuellement des relations entre ces classes). Toutes les classes d'entités appartenant à un même jeu de classes d'entités sont donc stockées avec la même référence spatiale.

- **Classes d'entités (Feature Class)**

Les classes d'entités stockent les objets représentant des entités spatiales. C'est un ensemble homogène d'entités. Toutes les entités d'une même classe ont la même géométrie (point, polyligne, polygone ...) et les mêmes attributs. Ces attributs sont stockés dans la table de la classe d'entité. Une classe d'entité peut être stockée en dehors d'un jeu de classe d'entités. La notion de classe d'entité est similaire à la notion de fichier de forme (shapefile) .

- **Table**

Les tables stockent les objets représentant des entités non spatiales. Une table peut être reliée ou jointe à des tables ou des classes d'entités de la même géodatabase.

- **Raster**

La géodatabase mise en place dans le cadre de cette étude stocke de plus les informations liées aux grilles de données (les « raster » par exemple le modèle numérique de terrain au pas de 90 m). Les données composant les « raster » ne sont pas archivées au sein de la géodatabase. Elles sont stockées dans un répertoire distinct. Cependant leur projection, les relations topologiques qui éventuellement les lient, sont gérée par la géodatabase.

8.3 MAINTENANCE ET EVOLUTION DU SIG

L'évolution future du SIG passe par l'acquisition de nouvelles données pour consolider la base déjà construite. Les partenariats en cours ou à venir permettront de développer le SIG Vulnérabilité. Des données géographiques de référence comme les données d'occupation du sol, les enjeux ou des données plus thématiques seront à fortiori intéressantes pour l'outil.

La mise à jour des couches de données déjà présentes est devra également être un point de réflexion. Les perspectives liées à cette base de données sont nombreuses pour chacun des partenaires de l'étude.

9 Le système d'information lié à la vulnérabilité des eaux souterraines du Nord-Pas-de-Calais

L'ensemble des données cartographiques présentées dans cette étude a été porté dans une base de données géographique au format ArcDesktop© (cf. chapitre 8).

La géodatabase est au format MS/ACCESS2000©. Elle peut être, avec les précautions d'usage, exploitée directement sous le logiciel ACCESS2000©. Les grilles de données relatives à l'Indice de développement et persistance des réseaux (IDPR) et l'épaisseur moyenne de la zone non saturée en mètres (ZNS) ainsi que les grilles ayant servi aux calculs DRASTIC sont fournies au format Grid d'ArcInfo.

9.1 FICHIERS NUMERIQUES ASSOCIES AU CDROM

9.1.1 Les cartes

Les cartes sont archivées sur le CDROM au format PDF dans le répertoire CARTES.

- Cartes de vulnérabilité des unités fonctionnelles par masse d'eau
- Cartes de vulnérabilité des communes par masse d'eau
- Carte de vulnérabilité des unités fonctionnelles de la région Nord-Pas-de-Calais au format A0
- Carte de vulnérabilité des communes de la région Nord-Pas-de-Calais au format A0

9.1.2 Les données

Les données du SIG sont contenues dans le répertoire SIG au sein de la géodatabase :

- Les unités fonctionnelles décrites dans ce rapport auxquelles sont jointes les informations résultantes du calcul de vulnérabilité
 - IDPR
 - ZNS
 - Poids relatif IDPR
 - Poids relatif ZNS
 - Valeur de la vulnérabilité
 - Classe de vulnérabilité
- Les données extraites des référentiels courants pour la zone d'étude
 - Les zones hydrologiques (BDCarthage© V3)
 - Les entités hydrogéologiques BDRHF V1
 - Les masses d'eau d'ordre de recouvrement égal à 1
- Les données issues du calcul IDPR
 - Le réseau des talwegs hiérarchisés selon la classification Strahler

Elles sont également contenues sous forme de grilles (format ARC/Info Grid) avec :

- La grille du modèle numérique de terrain au pas de 90 m
- La grille de calcul de l'IDPR au pas de 100m
- La grille de calcul de la ZNS moyenne au pas de 250m
- Les grilles utilisées dans le calcul DRASTIC

Les grilles et les données vectorielles sont fournies dans la projection Lambert II étendu.

9.1.3 Les documents et programmes

Les documents permettant l'édition automatique des cartes de vulnérabilité par masse d'eau souterraine sont fournis sur le CDROM dans le répertoire DocumentsARC. Il s'agit de fichiers portant l'extension .MXD et conservant les programmes VisualBasic permettant l'automatisation des sorties graphiques. Ils sont utilisables avec ArcGis.

9.2 CALCULATRICE - POIDS ET CRITERES IDPR ET ZNS

Une calculatrice permettant de modifier automatiquement les critères IDPR et ZNS en fonction de leurs valeurs respectives et les pondérations des critères IDPR et ZNS dans le calcul de la vulnérabilité a été mise en place dans l'étude menée pour le bassin Seine-Normandie en 2005. Cette calculatrice est mise à disposition de la région Nord-Pas-de-Calais et pourrait être exploitée dans le cadre de la vulnérabilité des eaux souterraines de la région Nord-Pas-de-Calais en concertation avec le SGR NPC.

Cette calculatrice se présente de la façon suivante :

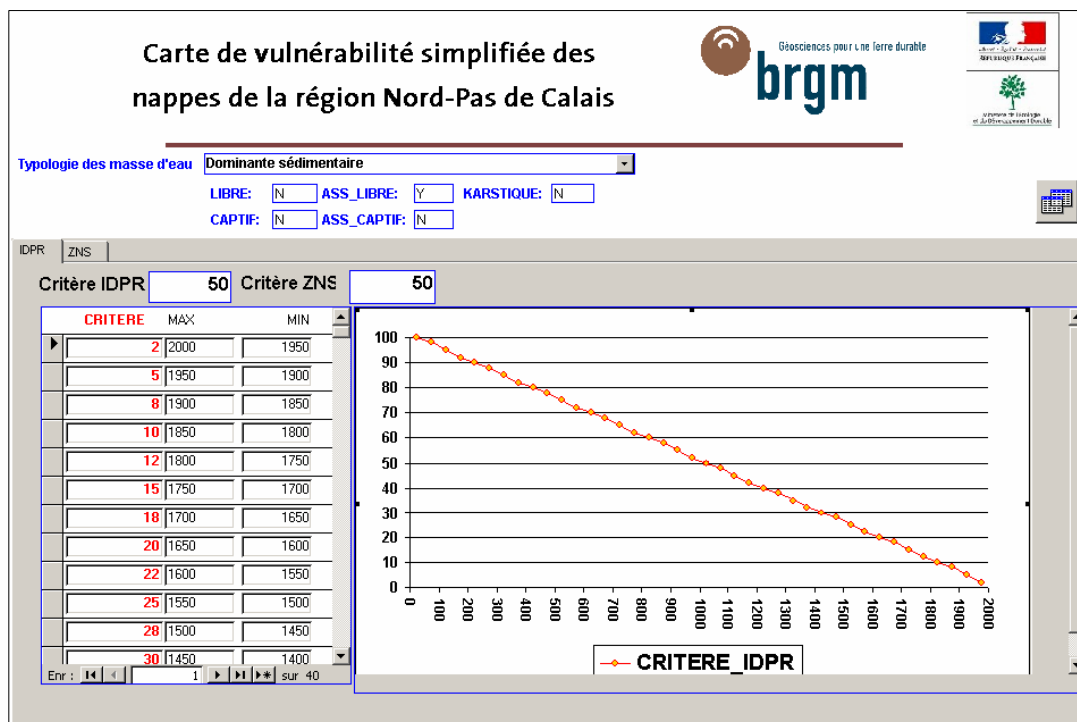


Illustration 80 : Formulaire Access de calcul de l'indice de vulnérabilité

Ce formulaire permet d'établir l'indice de vulnérabilité de chacune des entités fonctionnelles composant la carte générale de vulnérabilité simplifiée. Il présente selon

le type de masse d'eau souterraine et ses caractéristiques (5 combinaisons possibles en région Nord-Pas-de-Calais), les éléments du calcul multicritère.

Typologie des masse d'eau Dominante sédimentaire

LIBRE: N ASS_LIBRE: Y KARSTIQUE: N

CAPTIF: N ASS_CAPTIF: N

Illustration 81 : Exemple de combinaison d'une masse d'aeu souterraine

Pour chacune des occurrences présentées, la répartition des valeurs associées au critère IDPR est présentée sous forme d'un tableau (partie gauche de l'illustration ci dessous) et d'un graphique en partie droite. Les valeurs présentées sont celles du scénario retenu dans le cadre de cette étude. **Elles sont modifiables mais elles modifieront alors la carte de vulnérabilité. Cette possibilité est laissée aux utilisateurs finaux des données de cette étude dans le cadre d'actions particulières ayant pour objectif de modifier le poids ou l'importance des critères retenus. Les données présentées dans cette étude se fondent sur les valeurs affectées aux unités fonctionnelles décrites dans le CDRom non réinscriptible associé à ce rapport.**

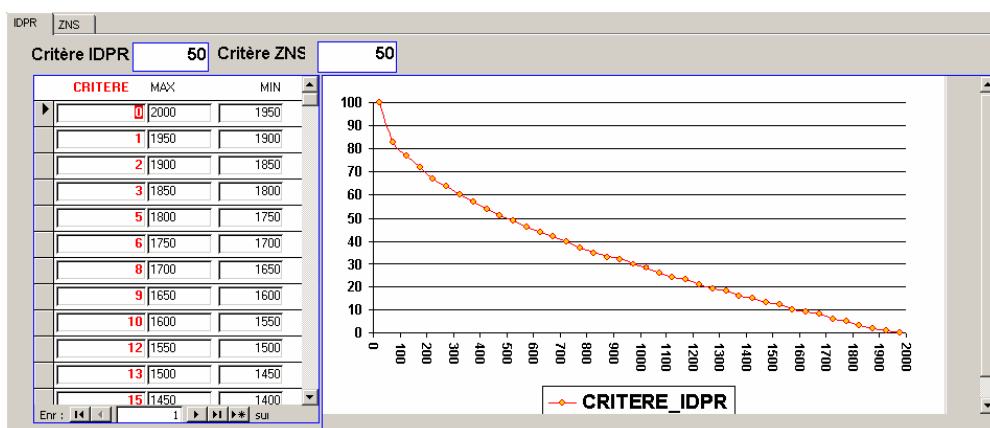


Illustration 82 : Onglet IDPR de la calculatrice de vulnérabilité

La visualisation du critère ZNS se fait en sélectionnant l'onglet ZNS

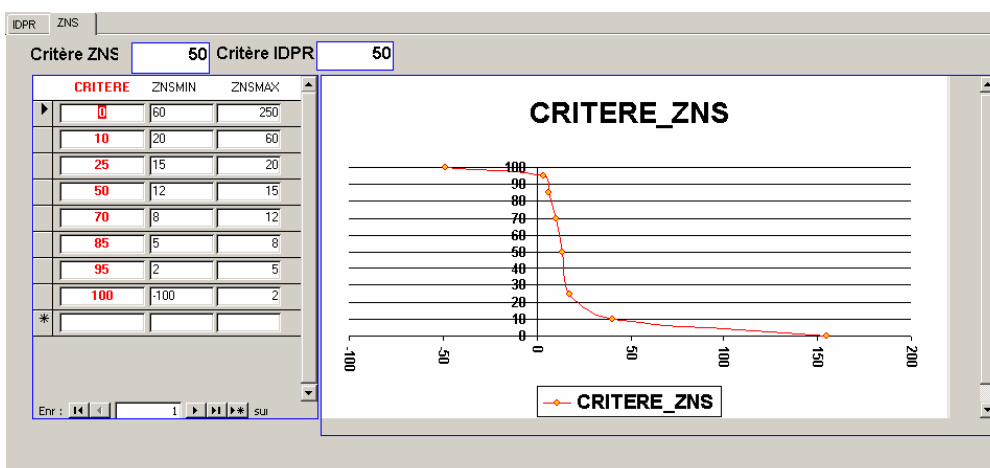


Illustration 83 : Onglet ZNS de la calculatrice de vulnérabilité

Le poids relatif des deux critères, pour chacune des 5 occurrences est modifiable avec les précautions d'usage citées ci-dessus.

Critère ZNS	50	Critère IDPR	50
-------------	----	--------------	----

Illustration 84 : Définition des poids relatifs des critères IDPR et ZNS

Le résultat des modifications apportées aux paramètres du calcul de la vulnérabilité des unités fonctionnelles des eaux souterraines de la région Nord-Pas-de-Calais est visible après l'activation du bouton de mise à jour des données.



Cette action n'est valide que si la base de données n'est plus archivée en mode « *lecture seule* » sur le périphérique de stockage de masse de l'ordinateur hébergeant les données de la carte.

10 Conclusion

L'analyse de la vulnérabilité des eaux souterraines présentée dans cette étude est dite simplifiée parce qu'elle est fondée sur la combinaison de deux critères (*IDPR* et *ZNS*). La combinaison des données géographiques est faite au moyen du logiciel de traitement cartographique multicritère ArcGis© et s'apparente à une méthodologie de cartographie à index.

L'*IDPR* permet de rendre compte indirectement de la capacité intrinsèque du sol à laisser infiltrer ou ruisseler les eaux de surface. A l'échelle de la région Nord-Pas-de-Calais, la cartographie de cet indice est conforme au comportement attendu des grandes régions géologiques avec une répartition qui souligne la disposition à l'infiltration des terrains naturels.

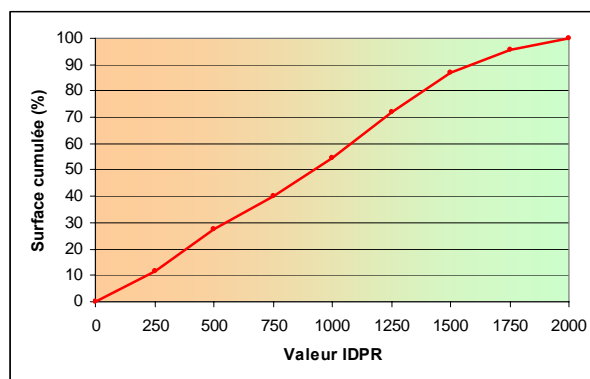
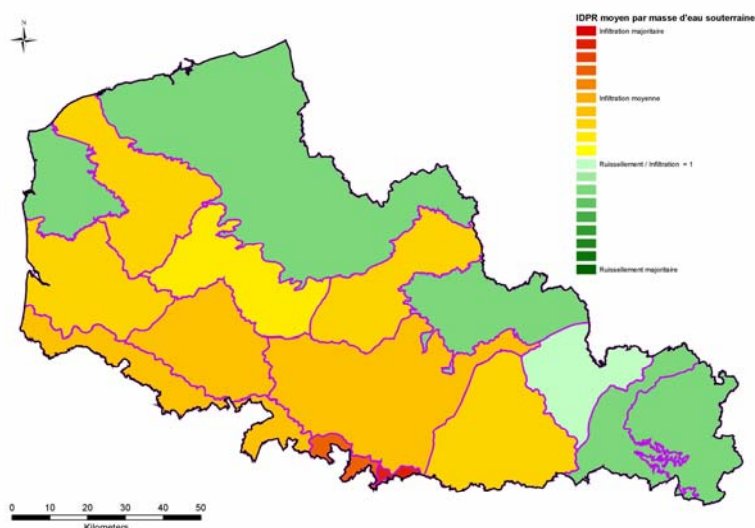


Illustration 85 : Surface cumulée en pourcentage selon la valeur IDPR pour la région Nord- Pas- de- Calais



La transition de l'IDPR vers la notion de vulnérabilité se fait avec l'exploitation du critère lié à l'épaisseur de la ZNS. Ce critère permet de hiérarchiser la cible eau souterraine selon la distance à parcourir depuis la surface des terrains naturel jusqu'au milieu saturé. Ainsi la vulnérabilité des eaux souterraines est plus importante dans les vallées (par la faible épaisseur de la zone non saturée). Plus généralement, dans le domaine sédimentaire, le critère lié à l'épaisseur de la zone non saturée conditionne à part égale avec l'IDPR l'indice de vulnérabilité des eaux souterraines.

Enfin l'IDPR qui représente une fonction de transfert vers les eaux souterraines ou les eaux superficielles peut également être exploité dans le cadre d'études de vulnérabilité de ces dernières. L'illustration suivante montre ainsi une piste d'investigation possible de la vulnérabilité des eaux superficielles en analysant l'IDPR à l'échelle de bassins versants et en modifiant la charte des couleurs utilisées pour rendre compte de ses variations.

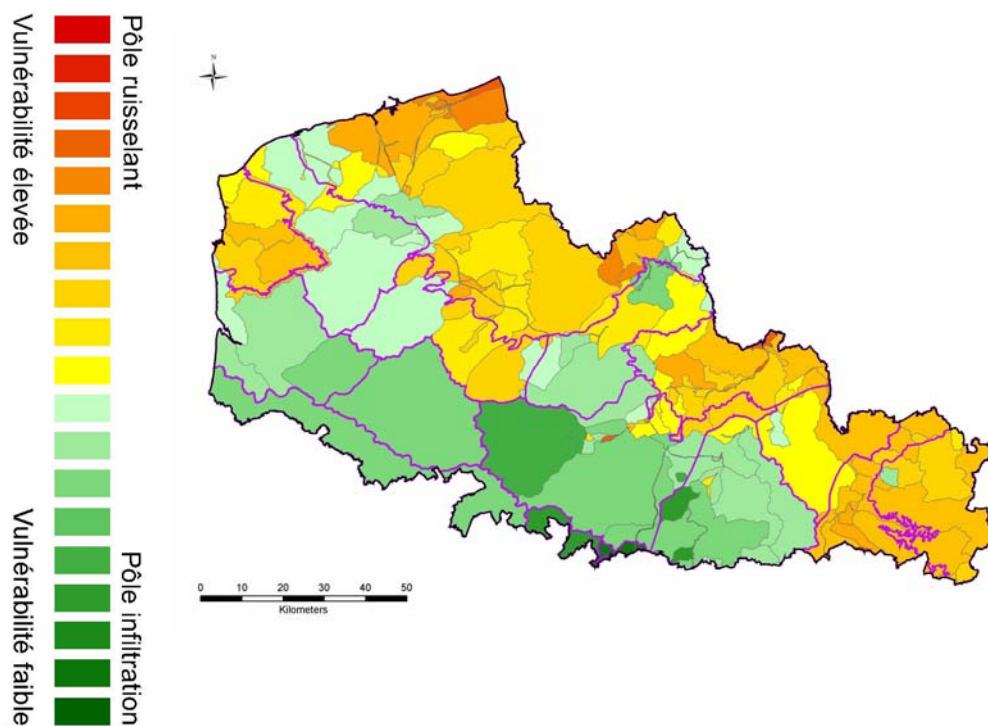


Illustration 86 : Proposition d'étude de la vulnérabilité des eaux de surface par masse d'eau

Sur la base de ce travail fait à l'échelle de la région Nord-Pas-de-Calais, une cartographie plus précise de la vulnérabilité associée à une carte de sensibilité (occupation du sol, typologie selon caractère polluant de l'activité) permettrait de dresser une carte d'aléa dans les zones déjà définies comme très vulnérables et présentant un véritable enjeu. Dans le cadre de la préservation de la qualité des ressources en eaux, ceci constituerait un véritable outil de réflexion à une échelle plus locale.

Cette carte de vulnérabilité constitue le document final qui sera exploité par la suite pour l'édition des fiches de vulnérabilité par masse d'eau et elle pourra être exploitée dans le cadre d'un traitement BASOLHYD tel qu'il a pu être mené en Seine - Normandie.

ANNEXES

ANNEXE 1 : Méthodes existantes de cartographie de la vulnérabilité des aquifères

De nombreuses méthodes de détermination de la vulnérabilité des eaux souterraines ont été développées dans le monde, allant des plus complexes avec des modèles prenant en compte les processus physiques, chimiques et biologiques dans la zone noyée, à des méthodes de pondération entre différents critères affectant la vulnérabilité (Gogu et Dassargues, 1998 b).

Elles peuvent être classées en trois grandes catégories :

- Les **méthodes de cartographies à index** basées sur la combinaison de cartes de divers paramètres d'une région (critères de vulnérabilité), en donnant un index numérique ou une valeur à chaque paramètre. La combinaison des cartes se fait au moyen de logiciels de traitement multicritères (SIG, par exemple) ;
- Les **modèles de simulation** : ils consistent à trouver une solution numérique à des équations mathématiques représentant le processus de transfert de contaminants (Schnebelen 2002). Ils donnent une image de vulnérabilité spécifique de la nappe ;
- Les **méthodes statistiques** : elles sont basées sur une variable qui dépend de la concentration en contaminant ou d'une probabilité de contamination. Ces méthodes intègrent des données sur la distribution des contaminants sur la zone d'étude et fournissent des caractéristiques sur les probabilités de contamination sur la zone d'étude. Elles donnent une image de la vulnérabilité spécifique de la nappe.

Les **méthodes de cartographie à index** comportent deux types d'approche : les systèmes hiérarchisés et les systèmes paramétrés. (N. Schnebelen et al., 2002)

- La méthode des systèmes hiérarchisés est basée sur la comparaison d'une zone donnée avec les critères représentant les conditions de vulnérabilité d'autres zones (autres bassins ou autres systèmes aquifères). Elle est généralement utilisée pour évaluer la vulnérabilité de contextes hydrogéologiques variés à moyenne ou grande échelle (régionale ou nationale) ;
- La méthode des systèmes paramétrés repose sur la sélection de paramètres (ou critères) considérés comme représentatifs pour estimer la vulnérabilité d'une eau souterraine. Chaque critère a une gamme de variation naturelle définie qui est subdivisée en intervalles discrétisés et hiérarchisés. Un index est attribué à chaque intervalle, reflétant le degré de sensibilité relatif à une contamination. Les systèmes paramétrés peuvent être classés en trois

principaux groupes : systèmes matriciels, systèmes indexés et méthodes de pondération et d'indexation des paramètres. Chacun est adapté à un objectif différent : respectivement, petite échelle d'étude, échelle moyenne d'étude, mais non prise en compte de l'importance relative des critères de vulnérabilité, échelle moyenne d'étude et prise en compte de l'importance relative des critères de vulnérabilité.

Les **méthodes de cartographie à index avec pondération des critères** (Point Count Systems Models, PCSM) sont les plus pertinentes vis à vis des réalités de terrain du fait de la prise en compte de l'importance relative de chaque critère vis-à-vis de la vulnérabilité générale de la nappe. Ce sont aussi les plus reconnues et utilisées à l'heure actuelle (Gogu et Dassargues 2000 ; Zaporozec et Vrba 1994).

Différentes méthodes développées et normalisées sont présentées ci-après, les deux premières méthodes présentées sont spécifiques du milieu karstique, elles sont citées pour mémoire car le milieu qui nous concerne est de type poreux/fracturé.

EPIK : C'est la première méthode dédiée spécifiquement aux aquifères karstiques sensus-stricto (Doerfliger, 1996 ; Doerfliger et Zwahlen, 1997). Elle est basée sur quatre critères : Epikarst ; Protective Cover (couverture protectrice : sol) ; Infiltration Conditions (conditions d'infiltration) ; Karst network development (développement du réseau karstique).

RISKE : Cette méthode s'inspire de la méthode suisse EPIK en raison de sa spécificité karstique. RISKE est un acronyme qui reprend les initiales des 5 critères pris en compte : Roche aquifère, Infiltration, Sol, Karstification, Epikarst (Petelet-Giraud *et al.*, 2000).

DISCO : La méthode "DISCO" (discontinuités - couverture protectrice) a pour but de définir les zones de protection en tenant compte de l'hétérogénéité du milieu. Trois paramètres sont nécessaires et suffisants pour évaluer le transport d'un polluant d'un point quel conque du bassin d'alimentation jusqu'à son arrivée au captage : le paramètre "discontinuités" ; le paramètre "couverture protectrice" ; le paramètre "ruissellement" englobe les phénomènes d'écoulement de l'eau en surface avant son infiltration (ruissellement de pente, cours d'eau permanents ou temporaires).

GOD : Ce système a été développé par Foster en 1987. Il présente la vulnérabilité de l'aquifère face à la percolation verticale de polluants à travers la zone non saturée et ne traite pas de la migration latérale des polluants dans la zone saturée.

Cette méthode est basée sur l'identification de trois critères : Type de nappe (**G**roundwater occurrence) ; Type d'aquifère en termes de facteurs lithologiques (**O**verall aquifer class) ; Profondeur de la nappe (**D**epth to groundwater table).

DRASTIC : La méthode DRASTIC a été mise au point par l'EPA (Environmental Protection Agency) aux Etats-Unis en 1985 et Aller *et al.* en 1987, afin d'estimer le potentiel de pollution des eaux souterraines (Schnebelen *et al.*, 2002). Elle permet d'évaluer la vulnérabilité verticale en se basant sur sept critères : D : Depth to groundwater (distance à la nappe, épaisseur de la zone non saturée) ; R : Recharge (recharge) ; A : Aquifer media (nature de la zone saturée) ; S : Soil media (nature du sol) ; T : Topographie (topographie, pente en %) ; I : Impact of the vadose zone (nature de la zone non saturée) ; C : Conductivity (perméabilité de l'aquifère). La méthode DRASTIC est principalement utilisée pour la cartographie à petite échelle (Lyakhloufi *et al.* 1999).

SINTACS : La méthode SINTACS est dérivée de la méthode DRASTIC. Elle a été développée en Italie, au début des années 1990, de manière à s'adapter à la cartographie à plus grande échelle compte tenu de la grande diversité hydrogéologique de l'Italie (Petelet *et al.*, 2000). Les paramètres de caractérisation de la vulnérabilité qui ont été retenus dans cette approche sont les mêmes que ceux de la méthode DRASTIC, soit en italien : S : Soggiacenza (profondeur de la nappe) ; I : Infiltrazione (infiltration) ; N : Azione del Non Saturo (fonction de la zone non saturée) ; T : Tipologia della Copertura (sol) ; A : Carratteri Idrogeologici dell' Acquifero (caractéristique hydrogéologiques de l'aquifère) ; C : Conducibilita Idraulica (conductivité hydraulique) ; S : Acclività della Superficie Topographica (pente moyenne de la surface topographique).

Contrairement à DRASTIC, la méthode SINTACS permet d'utiliser, en même temps et dans des cellules différentes, des facteurs de pondération variables selon les situations (Schnebelen *et al.*, 2002).

Autres méthodes :

Z. Alamy et C. Langevin (1989) procèdent à une analyse détaillée de la couverture de sol (Lallemand-Barrès, 1994). Les facteurs et critères retenus par ces auteurs, ainsi que la notation et le poids attribués aux critères sont résumés dans le tableau ci-après.

Paramètres	Classes				Poids
Pente	0 - 5 % (5)	5 - 10 % (2)	10 - 15 % (1)	> 15 % (1)	1/2
Epaisseur couverture	< 5 m (1)	5 - 2 m (3)	2 - 1 m (5)	< 1 m (5)	-
Perméabilité couverture ou de l'affleurement	> 10 ⁻⁴ (25)	> 10 ⁻⁴ .10 ⁻⁶ (5)	10 ⁻⁶ .10 ⁻⁹ (3)	10 ⁻⁹ (2)	1
Perméabilité sous-sol non saturé	> 10 ⁻⁴ (25)	> 10 ⁻⁴ .10 ⁻⁶ (5)	10 ⁻⁴ .10 ⁻⁹ (3)	< 10 ⁻⁹ (2)	1
Hydromorphie	sans (5)	temporaire (3)	temporaire (2)	permanente (1)	1/3
Profondeur nappe	> 20 m (1)	5 - 20 m (3)	1 - 5 m (5)	< 1 m (25)	1/2
Nature couverture	sable (3)	gravier (5)	argile sableuse limon (2)	argile (1)	-
Fracturation	sans (1)	1 direction proche (3)	2 directions proches (5)	champ (25)	-
Densité de fracturation	(1)	(3)	(5)	(25)	-

Tableau 1 : Paramètres valeur et poids retenus pour l'élaboration d'une carte de vulnérabilité (Alamy, Langevin, 1989).

Dans le cadre d'une application à la nappe de la craie dans le secteur de Guines (Pas-de-Calais), **J. Ricour (1988)** propose les paramètres suivants comme critères pour l'élaboration de la carte de vulnérabilité. La carte de vulnérabilité obtenue est superposée à des facteurs à caractère évolutif ayant trait à l'occupation des sols pour constituer une carte de sensibilité aux risques de pollution (Lallemand-Barrès, 1994).

	Paramètre	Poids global	--- Echelle de vulnérabilité croissante et poids relatifs de chaque paramètre → +			
Carte de vulnérabilité	Lithologie et recouvrement	1	Argile sur craie	Alluvions sur craie	Limons sur craie	Craie en affleurement
			0	1	2	3
	Topographie	0,5	Pente > 10 %	5 < pente ≤ 10 %	1 < pente ≤ 5 %	pente ≤ 1 %
			1	2	3	4
	Profondeur du niveau sous le sol	0,5	profondeur > 30 m	15 < profondeur ≤ 30 m	5 < profondeur ≤ 15 m	profondeur ≤ 5 m
Carte de sensibilité	Zone fracturée	1	1	2	3	4
			Zone linéamentaire susceptible de correspondre à des zones fracturées			
Carte de sensibilité	Typologie de l'occupation du sol (urbanisation, routes, forêts...)	Superposition par classe à la carte de vulnérabilité	1			
			Classe 1 forêts, friches	Classe 2 milieu agricole et marécageux	Classe 3 milieu urbain et industriel, routes, carrières, décharges...	

Tableau 2 : Paramètres pris en compte dans l'élaboration des cartes de vulnérabilité et de sensibilité du milieu souterrain aux risques de pollution (Ricour, 1988).

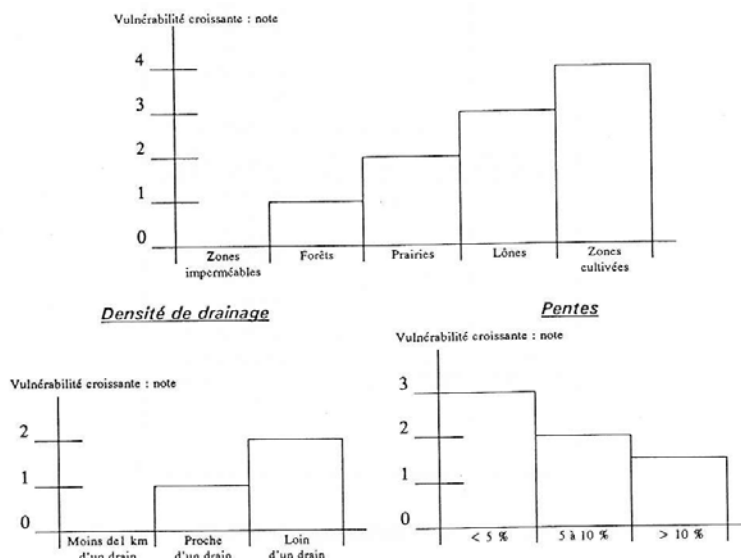
S. Munoz (1989) et S. Munoz, C. Langevin (1991), pour élaborer les cartes de vulnérabilité au Guatemala, retiennent les paramètres présentés dans le tableau ci-après.

Images	Variables Paramètres	Echelle de vulnérabilité et poids relatif de chaque paramètres										Poids Global
		(Très vulnérable)					(Peu vulnérable)					
Zone non saturée	Epaisseur	< 10 m		10-20 m		20-30 m		30-50 m		> 50 m		5
	Valeur attribuée	Initiale 1	Finale 5	Initiale 3	Finale 15	Initiale 10	Finale 50	Initiale 25	Finale 125	Initiale 50	Finale 250	
Zone de recharge	Type de milieux	Valeur attribuée	de recharge					hors zone de recharge		urbain		3
								Initiale 1	Finale 3	Initiale 10	Finale 30	
Densité de drainage	Degré de perméabilité	très perméable		perméable		semi-perméable		ruisselant		très ruisselant		2
	Valeur attribuée	Initiale 1	Finale 2	Initiale 2	Finale 4	Initiale 3	Finale 6	Initiale 10	Finale 20	Initiale 25	Finale 50	
Fracturation	Niveau probable de fracturation	Valeur attribuée	très fracturé					peu fracturé				1
								Initiale 1	Finale 1	Initiale 25	Finale 25	

Tableau 3 : Paramètres pris en compte dans l'élaboration de la carte vulnérabilité (valeur finale = valeur initiale * poids global) (Munoz, Langevin, 1991).

Dans l'étude de **M.F. Suais (1990)** où les critères de vulnérabilité sont assimilés aux critères d'évaluation des risques de pollution, on peut retenir la proposition de nouveaux critères relatifs aux sols, qui sont des critères non plus stables, mais variables dans le temps ou par intervention humaine, tels que degré d'imperméabilisation, densité et nature du couvert végétal et densité de drainage (cf figure ci-contre).

Figure : Critères relatifs à la surface du sol (M.F. Suais et al., 1990)



ANNEXE 2

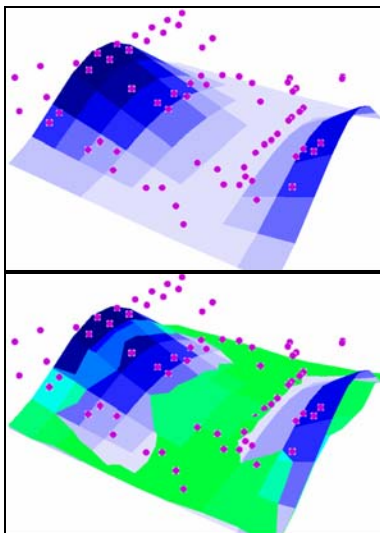
Les méthodes d'interpolation

Le **but de l'interpolation** est d'obtenir un maillage régulier de valeurs à partir de données échantillonnées selon un plan aléatoire. Il existe deux approches, l'une est déterministe, l'autre probabiliste.

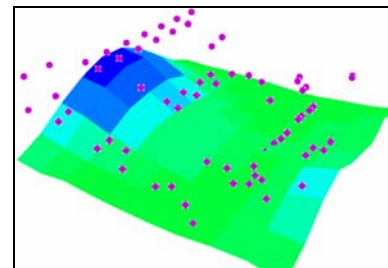
L'approche déterministe :

Elle correspond, par exemple, à la méthode de l'inverse des distances au carré (**IDW**). Chaque valeur de la grille à interpoler est calculée comme étant la moyenne (\bar{M}) pondérée des observations existantes ($P_{i,j}$). Cette moyenne est ici déterminée à partir des douze plus proches voisins. Le facteur de pondération correspond à l'inverse de la distance élevé à une puissance α .

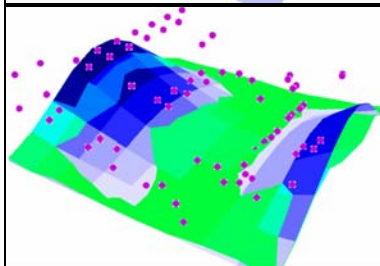
$$\bar{M} = \frac{1}{12} \left[\sum (P_{i,j}) * 1/(d_{i,j})^\alpha \right]$$



1



2



3

Interpolation par méthode IDW d'une surface à partir d'un semis de points.

1 : Surface réelle. **2** : Surface obtenue par interpolation IDW. **3** : Comparaison entre les deux surfaces.

Le risque d'erreur d'interpolation correspond aux régions où la densité d'information est inégalement répartie ou faible, ainsi que les zones où la géomorphologie change brutalement. Ces aires coïncident avec les zones d'interfluvies et les régions de socle,

les territoires les mieux simulés se trouvent aux endroits les plus exploités (majoritairement le long des cours d'eau).

L'approche probabiliste :

Le **krigeage** est une interpolation qui estime les valeurs aux points non échantillonnés par une combinaison de données (Figure 24). La pondération des points est réalisée par une fonction de structure issue des données. Il est donc tenu compte des distances, des valeurs et des corrélations. C'est une technique de calcul de moyennes mobiles utilisant les paramètres d'un variogramme pour obtenir une bonne estimation de la relation entre les points de données. Le variogramme correspond à l'évolution de la semi-variance en fonction du décalage entre les points.

γ : Semi-variance (Variogramme)

h : Distance entre deux valeurs observées

Z_{-h} et Z_{+h} : Décomptes des échantillons séparés par le vecteur de décalage h

N_h : Nombre de paires d'échantillons séparées par le vecteur h .

$$\gamma(h) = \frac{\sum (Z_{-h} - Z_{+h})^2}{2N_h}$$

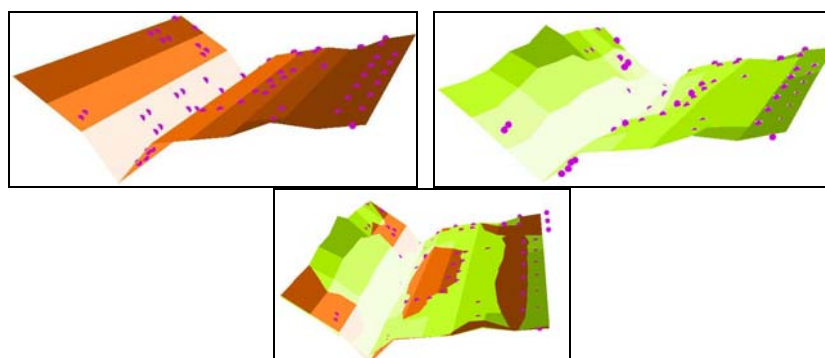
Le krigeage en un point de l'espace s'écrit comme une combinaison linéaire des points voisins.

λ_i : Coefficient de corrélation

$$Z^* = \sum_{i=1}^M \lambda_i * Z_i$$

L'objectif est de trouver les valeurs de λ_i telles que Z^* soit de variance minimale. La contrainte suivante en est déduite :

$$\sum_{i=1}^M \lambda_i = 1$$



1

2

3

Interpolation par krigeage d'une surface à partir d'un semis de points

1 : Surface réelle, **2** : Surface obtenue par krigeage, **3** : Comparaison entre les deux surfaces.

ANNEXE 3

Contenu du CDROM

Le Cdrom contient les données exploitées dans le cadre de cette étude. Elles sont présentées sous forme de documents disponibles à l'impression (format .pdf) et de documents numériques issus du fonds SIG de l'étude.

1 - documents disponibles à l'impression

Il s'agit des informations contenues dans le répertoire **CARTES**. Leur lecture nécessite le logiciel Adobe Acrobat Reader, libre d'usage et dont on peut télécharger l'application sur le site <http://www.adobe.fr>

2 - documents et fonds SIG

Ces informations sont contenues dans le répertoire SIG, elles se présentent sous la forme de grilles (GRID2E) et d'une géodatabase (Vulnerabilite_npc.mdb au format MsAccess 2000).