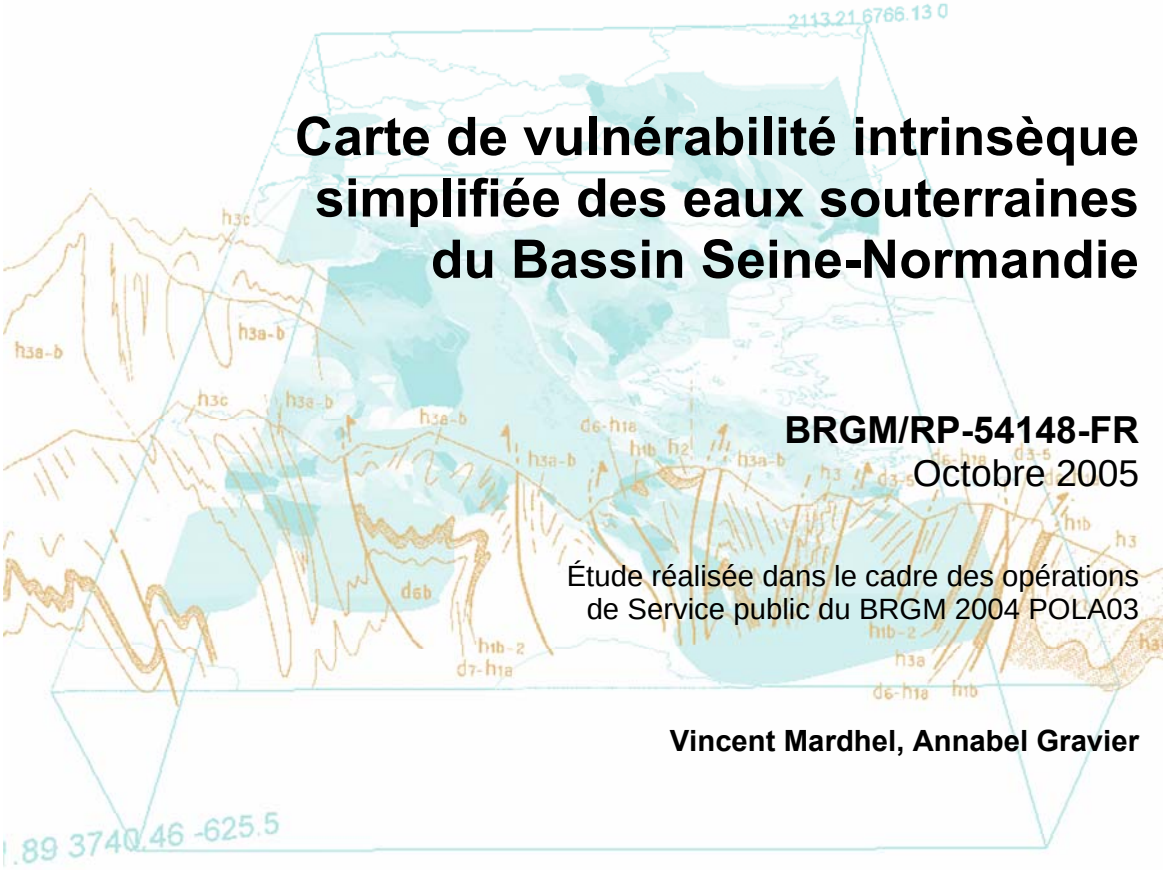
Document public

Carte de vulnérabilité intrinsèque simplifiée des eaux souterraines du Bassin Seine-Normandie



BRGM/RP-54148-FR
Octobre 2005

Étude réalisée dans le cadre des opérations de Service public du BRGM 2004 POLA03

Vincent Mardhel, Annabel Gravier

Liberté • Égalité • Fraternité
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable

AGENCE DE L'EAU SEINE-NORMANDIE

Géosciences pour une Terre durable
brgm

Document public

Carte de vulnérabilité intrinsèque simplifiée des eaux souterraines du Bassin Seine-Normandie

BRGM/RP-54148-FR
Octobre 2005

Étude réalisée dans le cadre des opérations
de Service public du BRGM 2004 POLA03

Vincent Mardhel, Annabel Gravier

Vérificateur :
Original signé par

Approbateur :
Original signé par

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

Liberté • Égalité • Fraternité
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable

AGENCE DE L'EAU
SEINE-NORMANDIE

Géosciences pour une Terre durable
brgm

Mots clés : Vulnérabilité, Bassin Seine-Normandie , Eaux souterraines, Masses d'eau souterraine, Analyse multicritère , SIG

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante : Carte de vulnérabilité intrinsèque simplifiée des eaux souterraines du Bassin Seine-Normandie (BRGM/RP-54148-FR Octobre 2005)

© BRGM, 2004, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Synthèse

L'analyse de la vulnérabilité 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 du district hydrographique de Seine-Normandie 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'un grand bassin hydrographique national, l'indice IDPR. Celui ci a vocation à simplifier, à de telles échelles, l'analyse de la vulnérabilité des eaux souterraines[1]. 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.

Enfin cette carte de vulnérabilité a également vocation d'être exploitée dans le cadre d'un nouveau scénario de traitement BASOLHYD. Son objectif est alors de se substituer à la méthode employée initialement dans cette étude (rapport BRGM/RP-53253-FR). La vulnérabilité des eaux souterraine pour le site étudié (composante de la note transfert de BasolHyd) sera alors issue du contexte hydrogéologique de l'unité fonctionnelle sur laquelle est situé le site et non plus des données calculées au droit de dernier.

[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 11

1.1 Contexte 11

1.2 Objectif 11

2 Contexte géologique, géomorphologique et hydrogéologique 12

2.1 Le Bassin parisien 12

2.2 Les formations du Cotentin 15

3 La vulnérabilité des aquifères : rappels et méthodologie de cartographie 17

3.1 Notions générales de vulnérabilité 17

3.2 Critères utilisés 18

3.3 Méthode d'analyse simplifiée de la vulnérabilité des eaux 19

3.4 Données de base utilisées dans le cadre de l'étude 19

4 Détermination de l'épaisseur de la zone non saturée 20

4.1 Cartographie des niveaux d'eau moyens 20

4.1.1 Données initiales 20
4.1.2 Densification du semis de points 21
4.1.3 Interpolation et cartographie des niveaux d'eau moyens 22

4.2 Calcul et cartographie de l'épaisseur de la zone non-saturée 24

5 Cartographie de l'indice de développement et persistance des réseaux (IDPR) 26

5.1 Géologie et rivières 26

5.2 Définition de l'IDPR (Indice de Développement et Persistance des Réseaux) 28

5.3 Couches d'informations utilisées 29

5.4 Calcul du réseau des talwegs 30
5.4.1 Pré traitement du MNT - zones de dépression 31
5.4.2 Pré traitement du MNT - zones planes 31
5.4.3 Réseau de Talweg calculé 32
5.5 Calcul de l'IDPR 33
5.6 Analyse des resultats fournis par l'IDPR 34
5.6.1 La champagne humide 35
5.6.2 Le calcaire de Beauce et la forêt d'Orléans 36
5.6.3 Le pays de Bray 37
5.7 Agrégation des données par unités spatiales 39
6 Cartographie de l'indice simplifié de vulnérabilité 40
6.1 Calcul de la Vulnérabilité des eaux souterraines 41
6.2 Critère IDPR 42
6.3 Critère ZNS 43
6.4 Analyse critique des résultats 53
6.4.1 Indice IDPR sur craie 53
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 62
6.5.1 Carte de vulnérabilité des eaux souterraines aux pollutions de surface 65
6.5.2 Carte de vulnérabilité du département des Yvelines (1981) 67
6.5.3 La Champagne (l'aquifère de la craie) 70
6.5.4 La Bourgogne 72
7 Le système d'information lié à la vulnérabilité des eaux souterraines du bassin Seine-Normandie 77
7.1 géodatabase « AESN Vulnerabilite.mdb » 77
7.2 Calculatrice - Critères IDPR et ZNS 79
7.3 Fichiers numériques associés au CDROM 80
7.3.1 Les cartes 80
7.3.2 Les données 80

7.3.3 Les documents et programmes 81
7.3.4 Atlas cartographique BASOLHYD 81

8 Conclusion..... 82

Liste des figures

Figure 1 : Carte schématique des affleurements des formations hydrogéologiques perméables des aquifères du bassin de Paris (d'après Castany)..... 14

Figure 2 : **Coupe géologique schématique du bassin sédimentaire de Paris. Formations lithostratigraphiques (d'après AESN)** 14

Figure 3 : Principales nappes de l'Isthme du Cotentin : Source : Diren Basse-Normandie 16

Figure 4 : Définition de la zone non saturée. (Hydrogéologie, G. Castany, 2000) 18

Figure 5 : Intersection des couches d'informations constituant les unités fonctionnelles21

Figure 6 : Unités fonctionnelles du district Seine-Normandie 21

Figure 7 : Densification des points d'eau 22

Figure 8 : Carte des niveaux d'eau moyens interpolés pour le district de Seine-Normandie (pas 250m) 23

Figure 9 : Carte de l'épaisseur moyenne de la zone non saturée pour le district Seine-Normandie (pas de 250m données fournies en annexe)..... 24

Figure 10 : Carte de l'épaisseur moyenne de la zone non saturée par unités fonctionnelles, par masses d'eau et par entités BDRHF V1 25

Figure 11 : Carte du réseau des talwegs : Données fournies en annexe (couche Talwegs) 32

Figure 12 : Données brutes du calcul de l'IDPR - Données fournies en annexe (Grille IDPR) 34

Figure 13: IDPR en région Champagne Ardenne..... 35

Figure 14: Résultat de du calcul IDPR extrait de la carte géologique à l'echelle du million en Beauce 36

Figure 15: Extrait de la carte géologique à l'échelle du million..... 36

Figure 16: Le contour de la masse d'eau 3050 « Pays de Bray » (en rouge) sur une vue cavalière vers le nord-ouest..... 37

Figure 17: Bloc diagramme simplifié du Pays de Bray 37

Figure 18: Coupe lithologique de l'anticlinal du pays de Bray 38

Figure 19: IDPR en Pays de Bray..... 38

Figure 20 : IDPR affecté aux unités fonctionnelles - Données fournies en annexe (couverture unités fonctionnelles – Attribut IDPR)..... 39

Figure 21 : Valeurs normées du critère IDPR selon la nature des masses d'eau 42

Figure 22 : Valeurs normées du critère ZNS selon la nature et le type d'écoulement des masses d'eau..... 43

Figure 23 : Carte du bassin Seine-Normandie, représentation du critère IDPR..... 45

Figure 24 : Carte du bassin Seine-Normandie, représentation du critère ZNS 46

Figure 25: Scénario 10% IDPR et 90% ZNS 47

Figure 26: Scénario 20% IDPR et 80% ZNS 47
Figure 27: Scénario 30% IDPR et 70% ZNS 48
Figure 28: Scénario 40% IDPR et 60% ZNS 48
Figure 29: Scénario 50% IDPR et 50% ZNS 49
Figure 30: Scénario 60% IDPR et 40% ZNS 49
Figure 31: Scénario 70% IDPR et 30% ZNS 50
Figure 32: Scénario 80% IDPR et 20% ZNS 50
Figure 33: Scénario 90% IDPR et 10% ZNS 51
Figure 34: Légende des scénarios présentés..... 51
Figure 35 : Carte du bassin Seine-Normandie, représentation de la vulnérabilité des eaux souterraines (ratio 50/50 IDPR et ZNS) 52
Figure 36: Etat d'avancement de l'alimentation de la base de données nationale BD Cavités (www.BDCavites.net)..... 54
Figure 37: localisation de ces cavités naturelles, gouffres, dolines et pertes 55
Figure 38 : Densité au km² des cavités naturelles, gouffres, dolines et pertes. 56
Figure 39: Bloc diagramme représentant un paysage karstique synthétique (extrait de : M. Bakalowicz (1999)) 57
Figure 40: Grille IDPR dans l'Eure et données issues de BDCavités..... 57
Figure 41 : Vulnérabilité des eaux souterraines du bassin Seine-Normandie (combinaison 50/50 plus Seuil ZNS à 3m) 59
Figure 42 : Carte de vulnérabilité finale 61
Figure 43: Vulnérabilité des nappes d'eau en Ile-de-France (source : IAURIF) 65
Figure 44: Exemple de l'étude comparée de la carte de vulnérabilité simplifiée du bassin Seine Normandie et de la carte IAURIF relatives à la vulnérabilité des eaux souterraines pour la masse d'eau 3103 66
Figure 45 : Comparaison de la carte de vulnérabilité des Yvelines (carte de gauche, source: BRGM : 81 SGN 348 IDF) avec la carte obtenue par le biais de la méthode simplifiée de définition des notions de vulnérabilité des eaux souterraines (carte de droite)..... 69
Figure 46 : Comparaison des cartes de vulnérabilité en craie champenoise (à gauche la méthode élaborée par J. Ricour, à droite méthode IDPR/ZNS 50/50)..... 71
Figure 47: Comparaison des cartes de vulnérabilité en Bourgogne (à droite la méthode élaborée en Bourgogne pour les phytosanitaires, à gauche la méthode IDPR)73
Figure 48 : formulaire Access de calcul de l'indice de vulnérabilité..... 77
Figure 49: 14 combinaisons type/nature de l'écoulement recensées en Seine-Normandie 78
Figure 50: Onglet IDPR de la calculatrice de vulnérabilité 79
Figure 51 : Onglet ZNS de la calculatrice de vulnérabilité..... 79
Figure 52: Définition des poids relatifs des critères IDPR et ZNS 79
Figure 53: Proposition d'étude de la vulnérabilité des eaux de surface par unités basins versants 83

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

Le projet de croisement des données des sites pollués, ou susceptibles de l'être, de l'outil BASOL et des données sur les nappes du bassin Seine-Normandie (rapport BRGM/RP-53253-FR) réalisé en 2004 dans le cadre des missions de Service Public du BRGM (fiche 04POLA03) en partenariat avec le MEDD/DPPR/SEI (convention CV 03 000755) et l'AESN (convention AESN 03 4402) avait pour objectif principal de contribuer à la définition des priorités utiles à l'évaluation des pressions polluantes sur les eaux souterraines (objectifs de la DCE) et aux orientations du programme d'intervention de l'Agence de l'Eau Seine-Normandie concernant les sites pollués inscrits dans BASOL selon une approche méthodologique globale, homogène et cohérente sur l'ensemble du bassin.
Les travaux, pilotés par un comité de suivi constitué de représentants du MEDD/SEI, de l'AESN et de DRIRE du bassin, ont consisté à recueillir des données sur la vulnérabilité des eaux souterraines exploitables à l'échelle du bassin, géoréférencer les sites de BASOL pour le croisement cartographique SIG et élaborer une méthodologie et un outil numérique multi-critères appelé BASOLHYD 2005.

Cette étude initiale, a été lancée sur la base d'un recueil de données bibliographiques sur la vulnérabilité des eaux souterraines. En cours d'étude, le BRGM a montré l'intérêt et la faisabilité de l'application de la méthode IDPR/ZNS, développée au sein de cet organisme, pour estimer de façon globale la vulnérabilité du premier niveau d'aquifères. Les indices associés aux eaux souterraines au droit des zones des sites pollués répertoriés ont ainsi été déterminés.

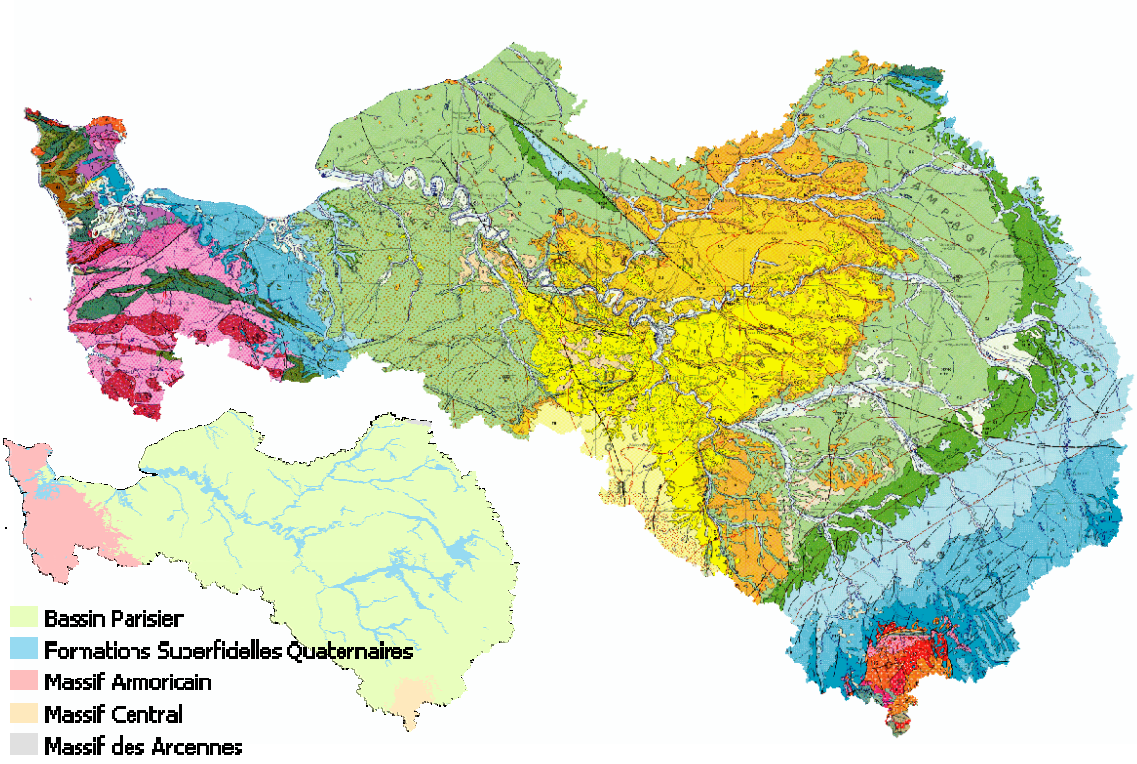
Au vu des résultats obtenus, le groupe de suivi a estimé souhaitable de compléter l'étude par la finalisation d'une carte numérique de vulnérabilité simplifiée des nappes sur l'ensemble du bassin permettant d'évaluer globalement le risque de migration de polluants à partir de n'importe quel point de pression. La réalisation de cet objectif conduit donc à la réalisation d'une carte de vulnérabilité simplifiée des eaux souterraines du bassin Seine-Normandie au 1/100000 ^{ème}.

1.2 OBJECTIF

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 et validée. Cette méthodologie et les hypothèses simplificatrices qui la sous tendent sont présentées au chapitre 2, après quelques rappels de définitions.

A partir de plusieurs paramètres, il sera défini un nombre limité de classes de vulnérabilité (5) pour les eaux souterraines. Une cartographie des zones de vulnérabilité sera réalisée sur l'ensemble du bassin 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 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.

Le centre du bassin de Paris se caractérise par des plateaux sub-horizontaux, des buttes allongées selon une direction nord-ouest sud-est ou ouest-nord-ouest est-sud-est, des vallées souvent larges, à versants raides et concaves.

Le bassin de Paris présente des altitudes partout modestes et ne dépassant pas les 250 m sauf vers les bordures septentrionales et orientales. Enfin, l'entaille des plateaux par la Seine et ses affluents engendre une assez forte énergie de relief, dépassant 100 m en plusieurs endroits.

Les paysages morphologiques qui le caractérisent découlent de son histoire géologique, ils en sont synchrones ou postérieurs.

Le Bassin parisien se constitue dès le Permien, il y a environ 295 millions d'années,

mais il ne recouvre son véritable aspect qu'à partir du Trias, il y a 245 millions d'années à l'Ere secondaire.

- Du Lias au Crétacé moyen, la mer gagne vers l'est sur les domaines germaniques ou alpins.
- A partir du Crétacé supérieur, le Bassin parisien est en communication avec le nouvel océan Atlantique par le seuil du Poitou ou par la Manche et la Mer du Nord.
- Au Paléogène, soit au début de l'Ere tertiaire, il y a 65 millions d'années, la surrection du dôme de l'Artois ferme le bassin vers le nord.

Le retrait de la mer stampienne des Sables de Fontainebleau à l'Oligocène, écarte définitivement la mer du Bassin parisien en général.
De cette histoire géologique subsistent des sédiments de lithologie contrastée où dominent en alternance, calcaires ou grès, d'une part, marnes, argiles ou sables, d'autre part. Les couches sont dans l'ensemble inclinées vers le centre du bassin, formant la cuvette parisienne avec des ondulations et des dislocations localement importantes.

Puis, des formations superficielles élaborées sous des climats d'abord chauds (allant de l'hyper-humide à l'aride) devenant plus frais (tempérés chauds au Pliocène et peut-être au Quaternaire ancien, tempérés ou froids au Quaternaire) témoignent de l'histoire continentale du Bassin parisien dès le début du Tertiaire à sa périphérie et au Miocène inférieur (il y a environ 23,5 millions d'années) pour la partie centrale, après l'assèchement du lac de Beauce. Enfin des formations superficielles héritées de deux types sont présentes:

- autochtones : altérites, paléosols, des formations résultant d'altération comme les argiles à silex, les meulières,
- allochtones (qui proviennent donc de substrats étrangers au Bassin parisien et qui furent transportées) : épandages fluviatiles du Massif Central notamment, dépôts éoliens du Quaternaire (moins de 2 millions d'années) à l'origine des limons loessiques, dont seront issus les sols bruns.

Le Pliocène supérieur et surtout le quaternaire ancien (-3,4 millions d'années) ont été presque partout la période fondamentale pour la mise en place des formes structurales. En effet, les contrecoups des mouvements agitant le massif des Alpes ont entraîné une remontée générale du Bassin parisien d'environ 200 mètres, assurant ainsi une intense érosion facilitée par le climat tropical chaud et humide.

Les grands aquifères du bassin parisien

L'illustration suivante donne une représentation d'ensemble simplifiée des aquifères du bassin sédimentaire parisien.

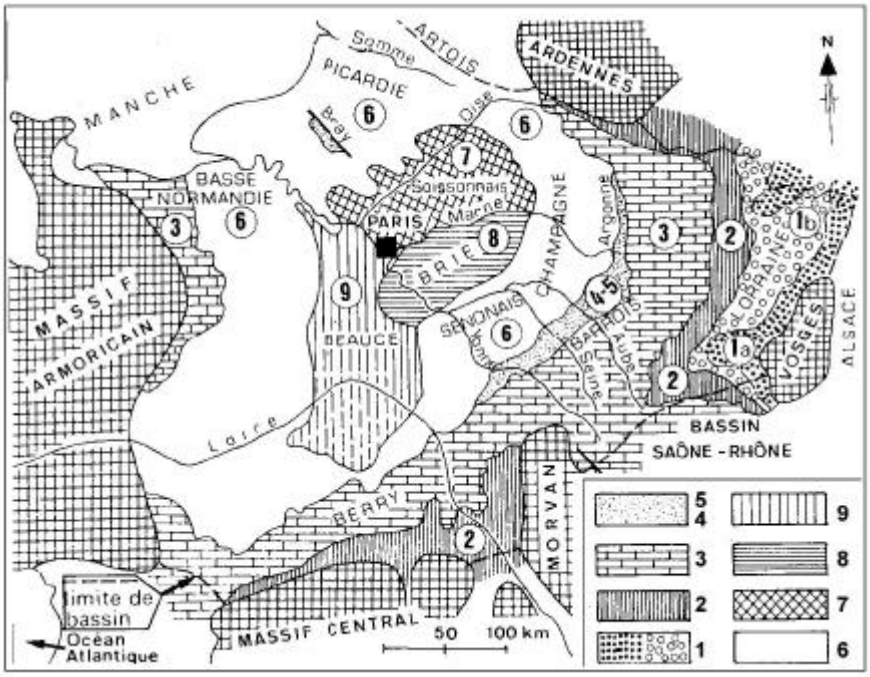


Figure 1 : Carte schématique des affleurements des formations hydrogéologiques perméables des aquifères du bassin de Paris (d'après Castany).

1 : aquifère multicouche du calcaire de Beauce.
2 : aquifère multicouche du calcaire de Champigny ;
3 : aquifère multicouche des sables du Soisonnais ;
4 : aquifère de la craie supérieure (Turonien-Sénonien) ;
5 : aquifère multicouche des sables albiens ;
6 : aquifère multicouche du Néocomien ;
7 : aquifère multicouche du Jurassique moyen et supérieur ;
8 : aquifères du Lias ;
9 : aquifère des grès du Trias (a, à nappe libre ; b, à nappe captive) ;

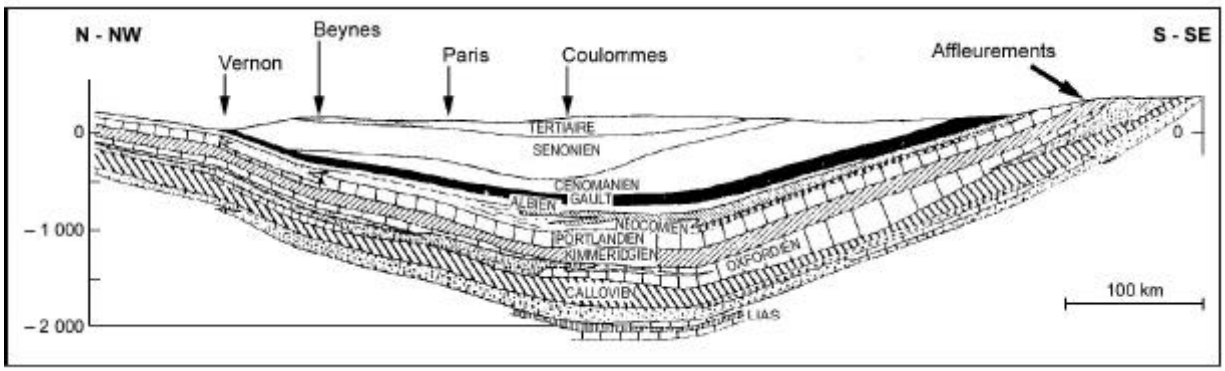


Figure 2 : **Coupe géologique schématique du bassin sédimentaire de Paris. Formations lithostratigraphiques (d'après AESN)**

2.2 LES FORMATIONS DU COTENTIN

La géologie du cotentin est marquée par une dichotomie structurelle, une architecture plissée appartenant au massif armoricain à l'ouest s'oppose à une architecture héritée du bassin sédimentaire parisien. La ligne de séparation entre ses deux substrats est franche et bien identifiable.
Le massif ancien se compose des unités suivantes

- Le précambrien

Le précambrien (-2600 à –595 m.a Protérozoïque) se compose d'un socle cristallophyllien : le Pentévrien et d'un système sédimentaire le Briovérien. Le Pentévrien (définit en baie de Saint-Brieuc) n'est connu que dans le nord du Cotentin où il constitue le tréfonds du cap de la Hague (Jobourg et Jardeheu). Le Briovérien sédimentaire se déroule entre –900 et 650m.a (Protérozoïque supérieur), il couvre plus des trois-quarts de la partie normande du Massif armoricain.

- Le paléozoïque.

La puissance de la couverture paléozoïque (du cambrien au permien inférieur) varie considérablement, elle atteint au maximum 3500 m en Normandie. Les conditions de sédimentation sont généralement littorales. Les transgressions marines commencent dès le cambrien inférieur dans le Cotentin.

- la couverture mésozoique et cénozoique.

A la fin du trias, la marge orientale du Massif armoricain se présente comme une surface d'érosion continentale presque aplanie. Les dépôts triasiques sont entièrement d'origine continentale. C'est dans le Cotentin que l'on retrouve la succession de dépôts la plus complète.
Puis vient le cycle Jurassique, la mer s'avance sur le socle, contournant les reliefs et isolant les crêtes, les dépôts sont marno-calcaire puis calcaires.
Le cycle Crétacé est le dernier de l'ère secondaire avec d'abondants dépôts Cénomanien

- Le tertiaire.

Après le retrait de la mer de la craie, la Normandie sera en grande partie émergée. Elle ne connaîtra plus que quatre intrusions marines discontinues. Cette période est caractérisée par des mouvements verticaux périodiques du socle, entraînant un compartimentage, avec ablations, des maigres dépôts existants. Dans le Cotentin le tertiaire est localisé dans la zone des marais de Carentan. La dernière transgression marine, plio-pleistocène, est importante et envahit la moitié Nord du département de la Manche. Les sables comblent les formes du relief ennoyées par cette transgression majeure, dont les dépôts furent déformés par de nouveaux mouvements verticaux.

- le quaternaire.

Le quaternaire est dominé par d'importantes oscillations climatiques. Transgressions et régressions se succèdent ; alternativement tempéré et périglaciaire, le climat a laissé son empreinte sur les formes et les dépôts continentaux. Les principaux témoins du quaternaire sont, dans le Cotentin, le pléistocène supérieur et l'holocène.

L'hydrogéologie régionale

L'hydrogéologie du Cotentin est complexe et contrastée entre le bassin parisien et le massif armoricain. Les ressources en eaux souterraines, alimentées par l'infiltration, sont inégalement réparties et jouent un rôle prépondérant dans les écoulements des rivières : certains secteurs comme le nord du Pays d'Auge sont caractérisés par un très fort soutien d'étiage alors que d'autres, comme en Suisse normande, subissent des tarissements rapides de leurs réserves.

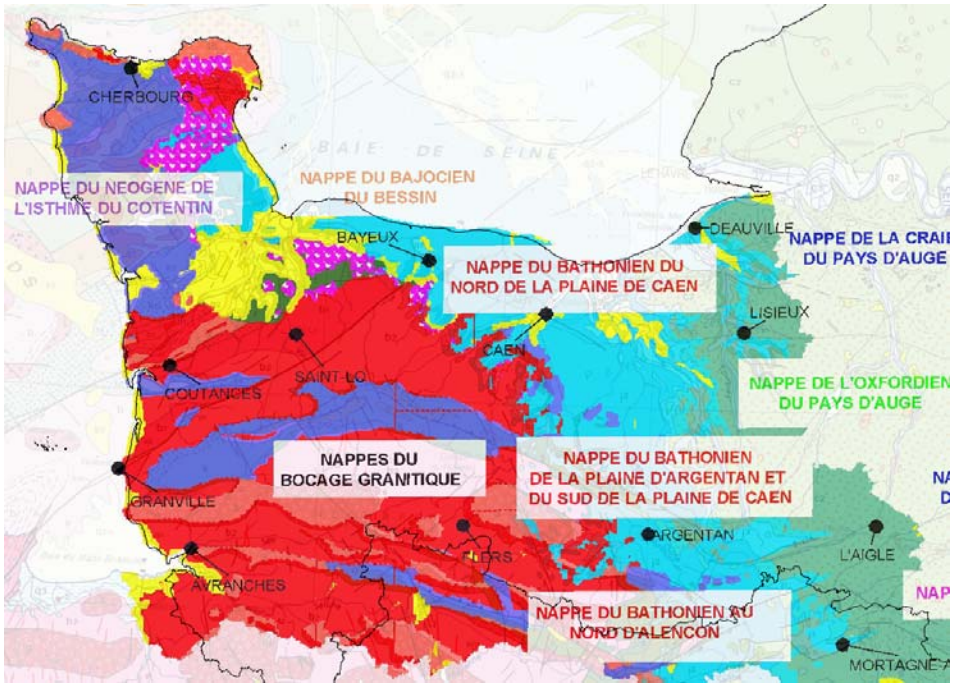


Figure 3 : Principales nappes de l'Isthme du Cotentin : Source : Diren Basse-Normandie

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) **x** **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.

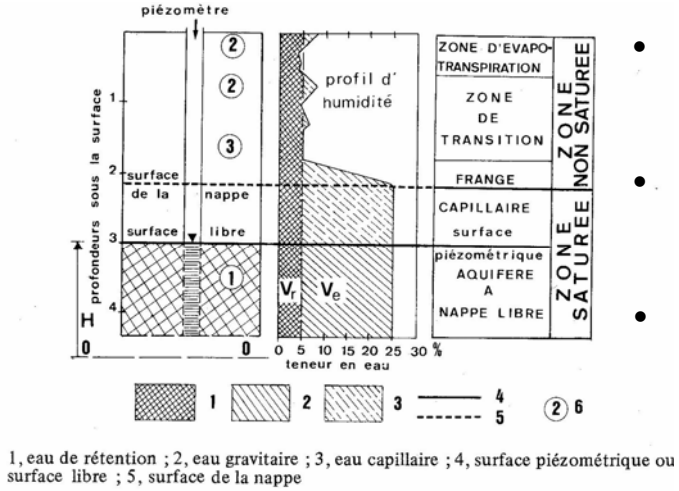
- ***Les enjeux*** représentent la cible qui ne doit pas être atteinte par les effets du stress sur le milieu naturel.

  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 :



- Une zone d'évapotranspiration qui est soumise à d'importantes variations de la saturation en eau ;
- Une zone de transition où la teneur en eau correspond à la capacité de rétention du sol ;
- La frange capillaire qui, en plus de la percolation per descensum (recharge) correspond à l'eau de la nappe remontant par ascension capillaire.

Figure 4 : 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 Tableau 1.

<table>
<tr><th colspan="3">VULNERABILITE INTRINSEQUE</th></tr>
<tr><th>Sol</th><th>Zone non saturée (ZNS)</th><th>Zone saturée</th></tr>
<tr><td>Topographie
(pente)</td><td>Profondeur de la nappe libre ou épaisseur de la ZNS</td><td>Type de nappe
(libre ou captive)</td></tr>
<tr><td>Pédologie
(perméabilité verticale des sols, nature et texture des sols)</td><td>Temps de transfert
(perméabilité verticale)</td><td>Temps de résidence
(dépend de l'hydrodynamisme des formations aquifères)</td></tr>
<tr><td colspan="2">Bilan hydrique (ruissellement et infiltration efficace)</td><td>Relation eaux souterraines/eaux superficielles</td></tr>
<tr><td></td><td>Structure de la ZNS
(variation de faciès, épaisseur des discontinuités de faciès, position dans le profil vertical, texture, teneur en matière organique et argile)</td><td>Piézométrie
(sens et direction d'écoulement et évolutions selon la période du cycle hydrologique)</td></tr>
<tr><td></td><td>Présence ou non d'un horizon moins perméable et position de celui-ci</td><td>Epaisseur de l'aquifère
(quantité de réserve)</td></tr>
<tr><td></td><td></td><td>La recharge
(recharge annuelle nette).</td></tr>
<tr><td></td><td></td><td>Type de système hydrogéologique
(caractères plus ou moins capacitif et transmissif)</td></tr>
<tr><td></td><td colspan="2">Battement de nappe</td></tr>
<tr><td colspan="3">Fracturation (directions et densité)</td></tr>
</table>

Tableau 1 : Critères de vulnérabilité

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 du bassin Seine-Normandie 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 précise 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 seront les suivantes :

- Carte géologique à l'échelle du 1/1 000 000 ou 1/250 000 (Région Ile de France) ,
- Données de la BSS (données piézométriques),
- 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 : Aqui'Brie, IAURIF, BRGM

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 « piézomètrie » 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.

A ces données seront ajoutés des points fictifs obtenus par densification du semis de points, obtenue par traitement des informations de la BSS.

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’informations 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.

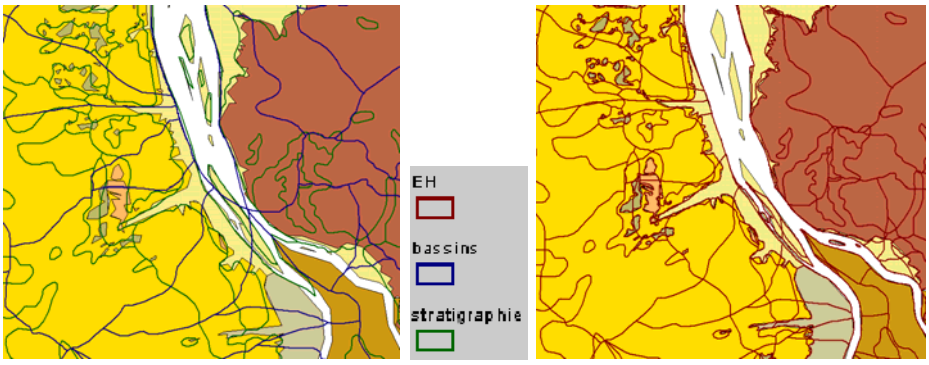


Figure 5 : Intersection des couches d'informations constituant les unités fonctionnelles

Les unités fonctionnelles représentent approximativement 55000 polygones sur le territoire d'étude pour une surface moyenne de 180ha. 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).

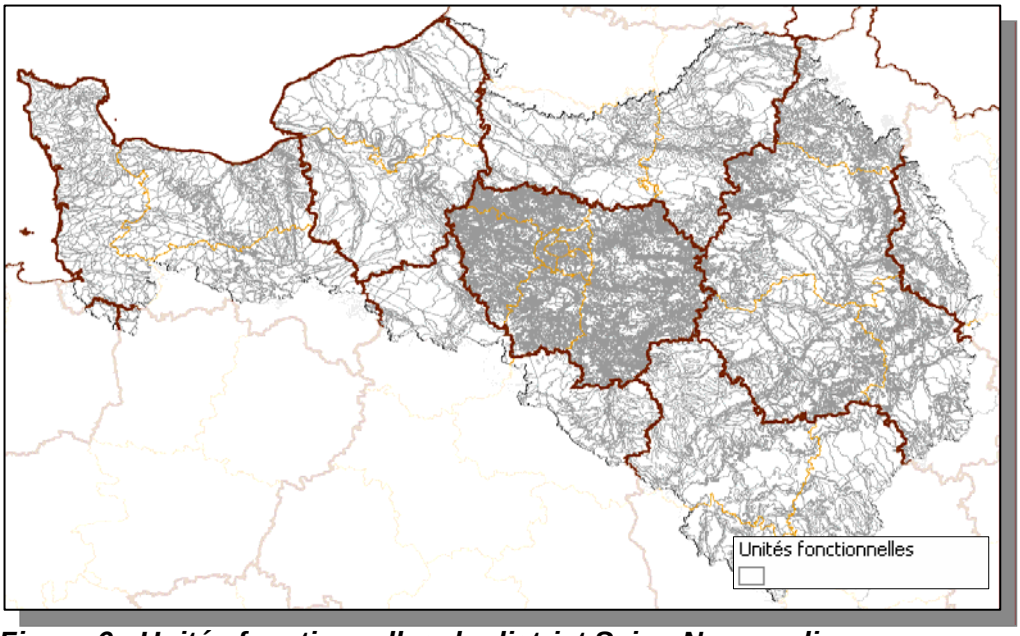


Figure 6 : Unités fonctionnelles du district Seine-Normandie

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 38546 dont

- 34271 points issus de BSS,
- 4275 points de densification.

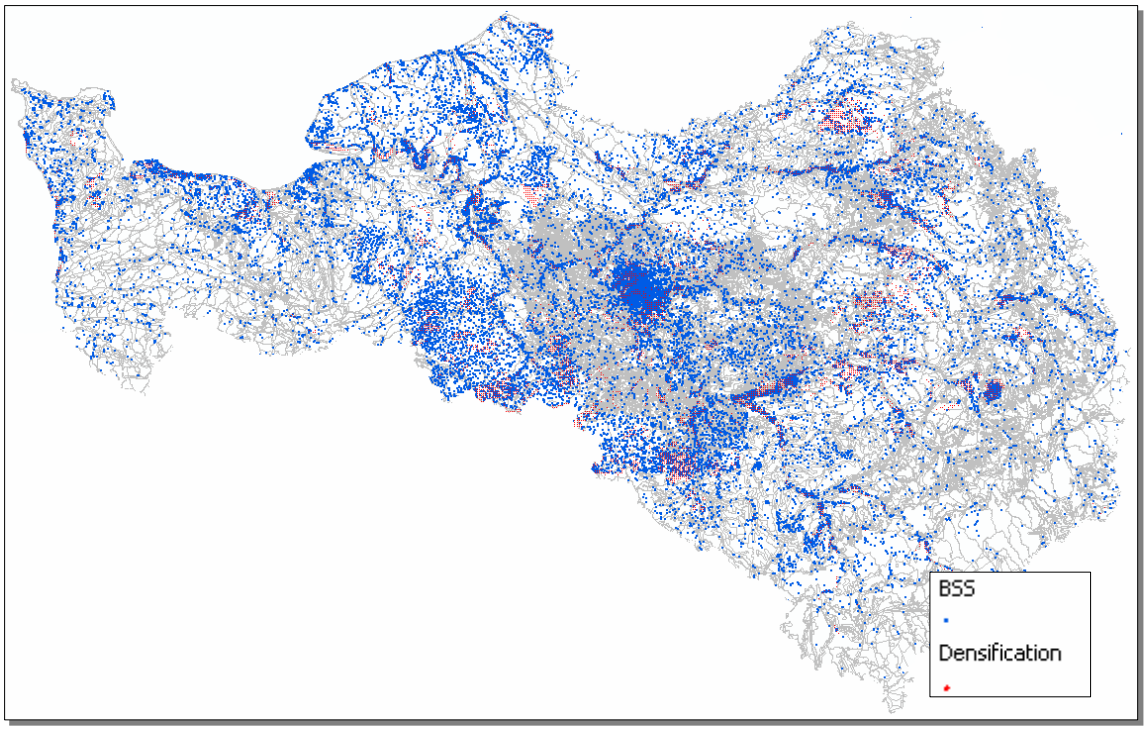


Figure 7 : Densification des points d'eau

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 fournie 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.

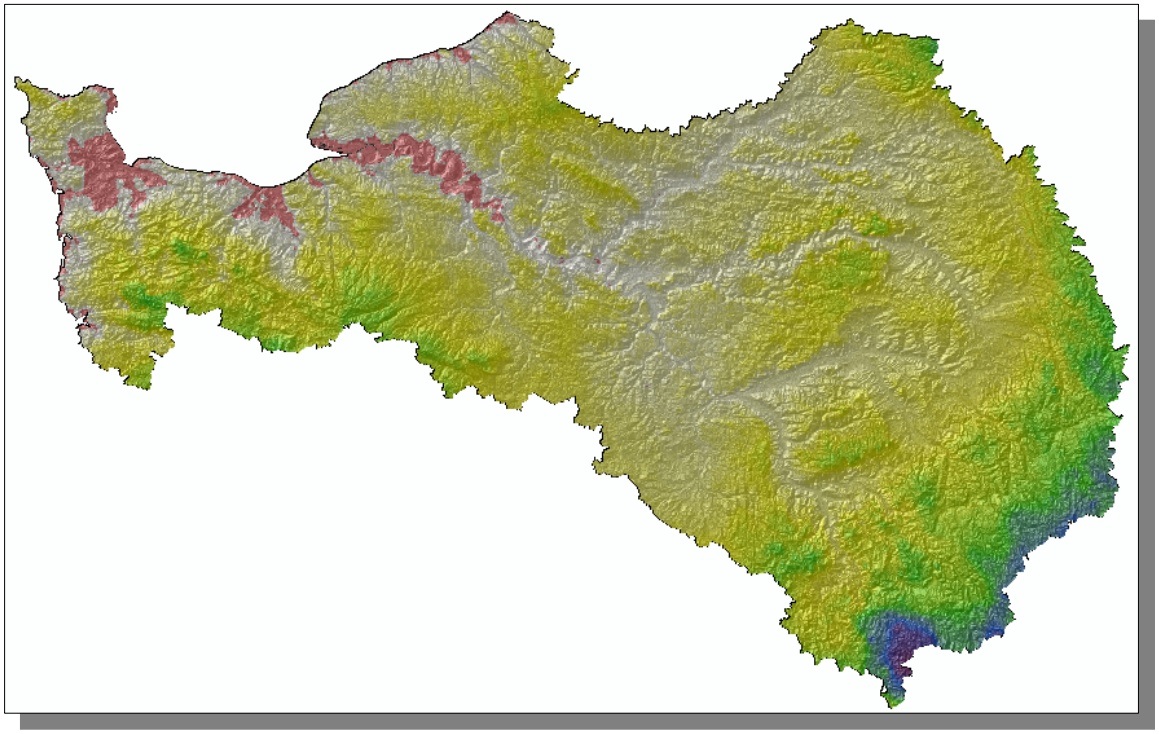


Figure 8 : Carte des niveaux d'eau moyens interpolés pour le district de Seine-Normandie (pas 250m)

4.2 CALCUL ET CARTOGRAPHIE DE L'EPAISSEUR DE LA ZONE NON-SATUREE

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.

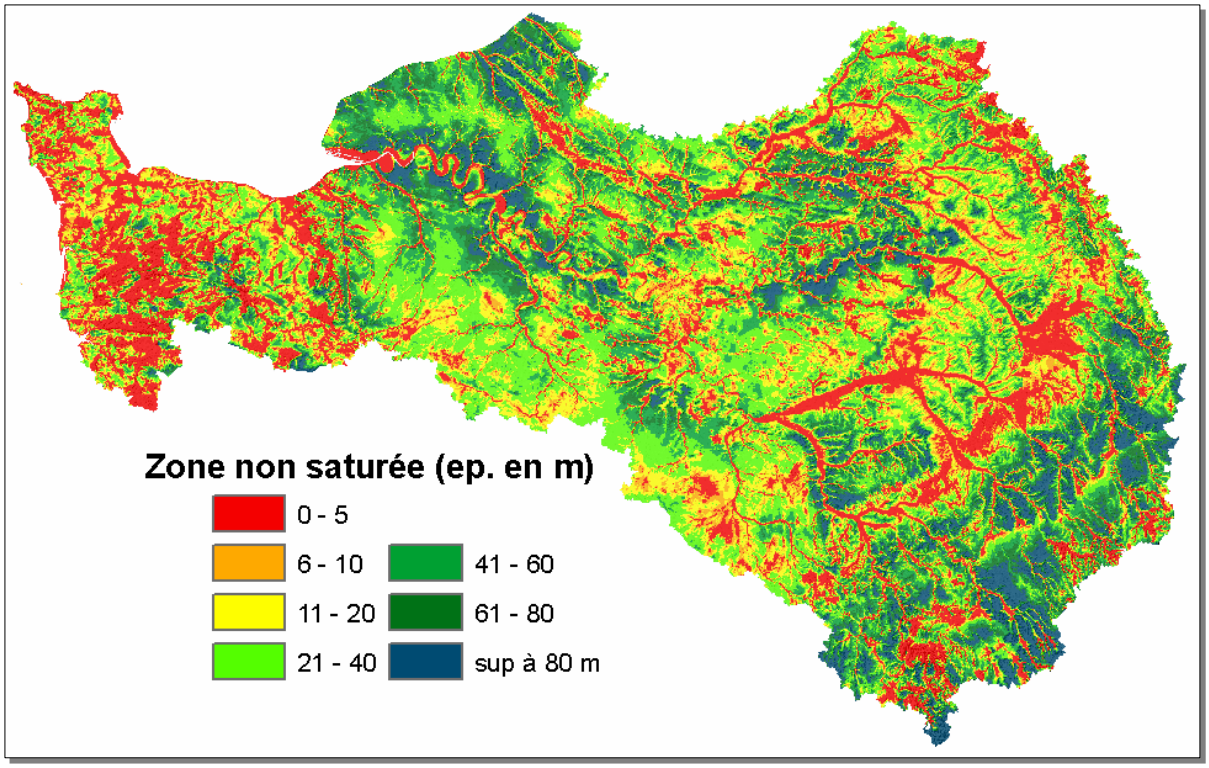


Figure 9 : Carte de l'épaisseur moyenne de la zone non saturée pour le district Seine-Normandie (pas de 250m données fournies en annexe)

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.

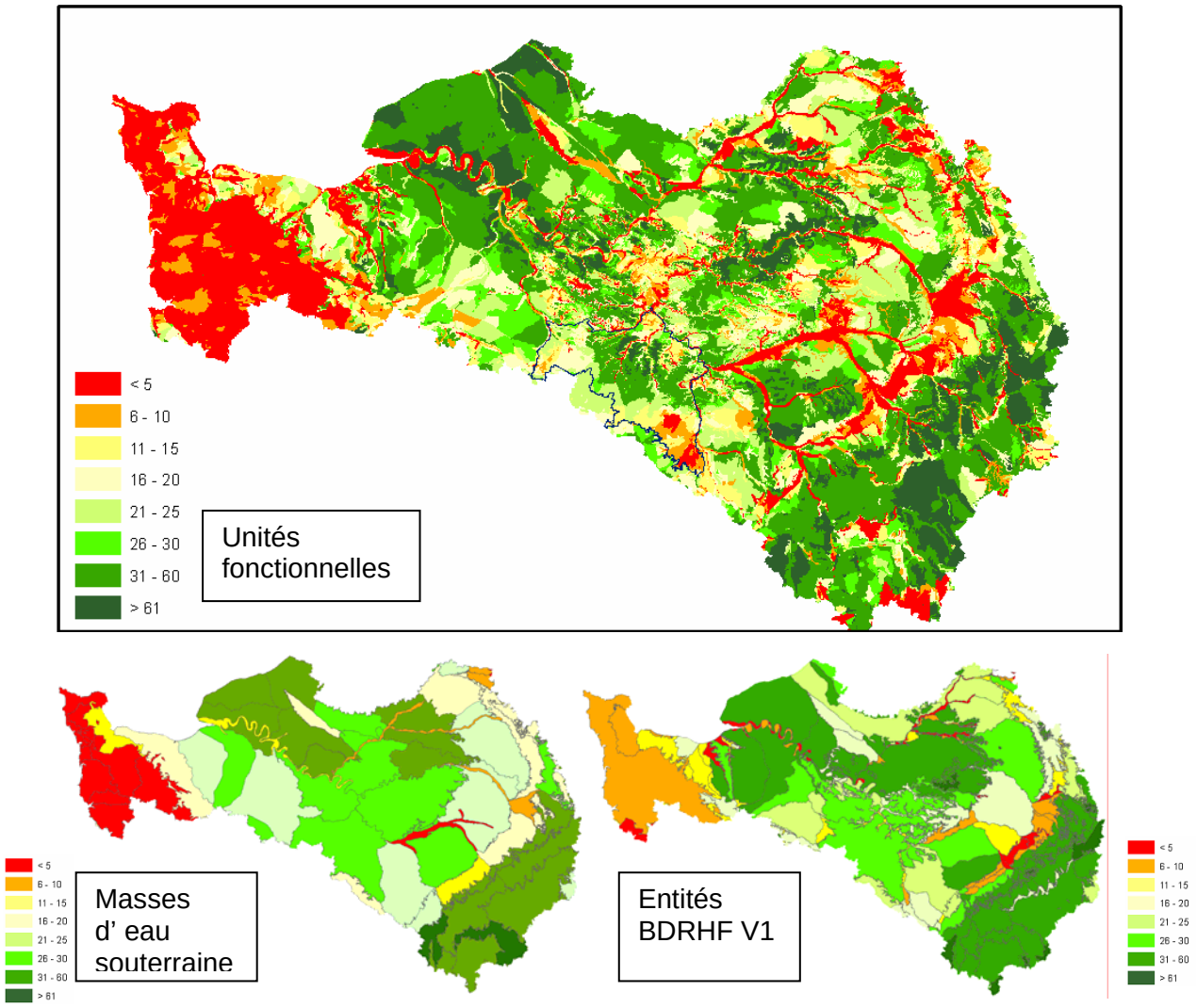


Figure 10 : Carte de l'épaisseur moyenne de la zone non saturée par unités fonctionnelles, par masses d'eau et par entités BDRHF V1

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 Robert[2] 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-Gwan[3], poursuit les travaux de Prud'homme et consacre à l'analyse des réseaux hydrographiques une grande partie de son travail.

Deffontaines[4] 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".

Riazanoff[5] 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, Delcaillau[6] 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 artéfacts 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 Martz[7]). Cela permet de concentrer les écoulements à l'amont de la cellule exutoire et au centre de la zone plate. Cet algorithme[8] 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" et les données de type « Raster » sont également fournies dans le système de projection Lambert 93[9].

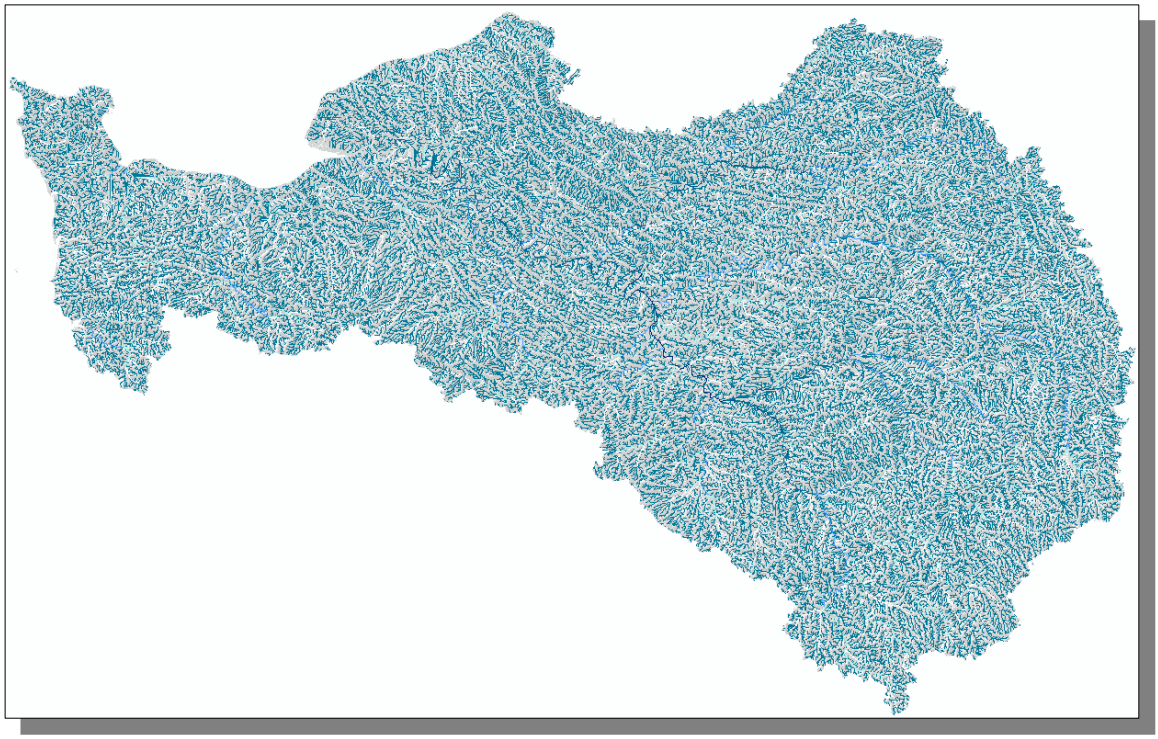


Figure 11 : Carte du réseau des talwegs : Données fournies en annexe (couche Talwegs)

.

[9] La projection Lambert93 (projection officielle pour les cartes de France métropolitaine depuis le décret du 26 décembre 2000) est la projection liée au système géodésique RGF93. Elle utilise deux parallèles sécants : 44°N et 49°N, le méridien de référence 3°E (Greenwich), le parallèle d'origine (qui n'est pas de référence puisqu'on utilise des parallèles sécants) 46°30', et les coordonnées d'origine (700 000m, 6 600 000m).
Son principal intérêt réside dans son référentiel RGF93, qui est d'une part commun à nos voisins européens (car fondé sur ETRS89), et d'autre part compatible avec le WGS84 utilisé notamment par le système GPS de positionnement par satellite. Ces trois systèmes ont de plus en commun l'ellipsoïde de référence IAG GRS80.

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 (Tableau 2).

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	**I 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 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'infiltre 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[10] induisant la possibilité d'inondation par effet de barrière hydraulique.

Tableau 2 : Valeurs de l'IDPR

[10] 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.

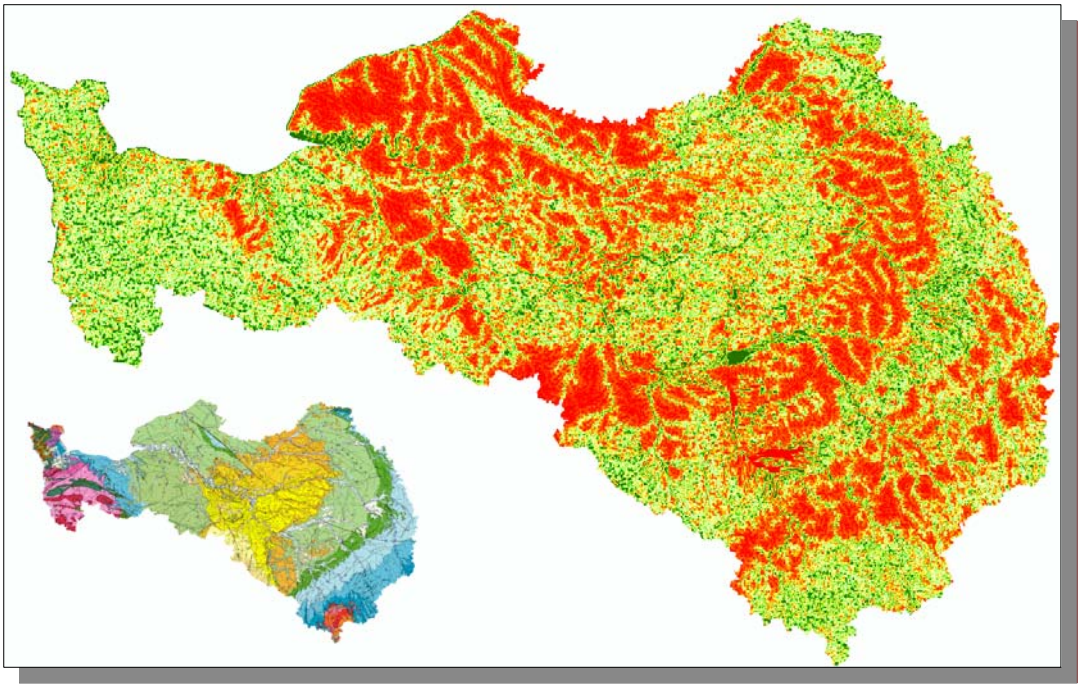


Figure 12 : Données brutes du calcul de l'IDPR - Données fournies en annexe (Grille IDPR)

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 100m de coté. Il est établit sur la seule analyse des données géomorphologiques et hydrologiques. Cependant, la comparaison avec la carte géologique présentée en médaillon montre des correspondances remarquables.

Les exemples suivants ont vocation à illustrer ces correspondances entre les résultats de l'IDPR et le comportement des eaux de surfaces 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.

5.6.1 La champagne humide

L'auréole crayeuse que forment les terrains du Crétacé supérieur apparaît nettement par le contraste qu'elle présente au contact des formations du Crétacé inférieur peu perméables (la champagne humide). Celle-ci est également soulignée au contact des formations plus anciennes souvent karstifiées du Jurassique à sa frontière est .

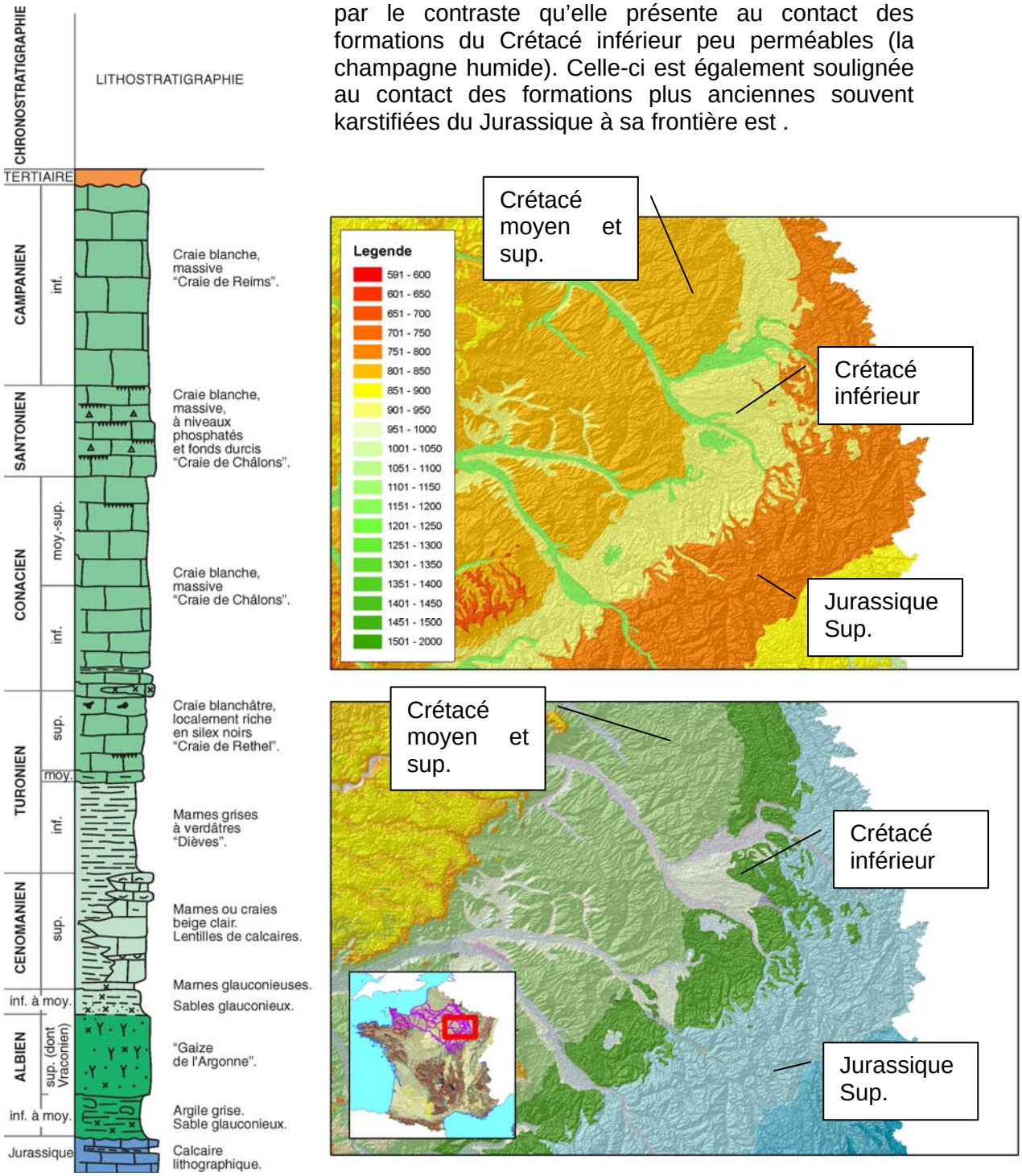


Figure 13: IDPR en région Champagne Ardenne

Le log illustré en partie gauche de la figure précédente montre la lithologie des formations concernées et notamment, le caractère marneux, argileux des formations du Crétacé inférieur qui tranche sur la craie franche des formations du Crétacé moyen et sup. et qui permet d'interpréter cette réponse IDPR.

5.6.2 Le calcaire de Beauce et la forêt d'Orléans

La nappe de Beauce que représente le complexe aquifère des calcaires de Beauce constitue une unité hydrographique qui s'étend sur environ 9000 km² entre la Seine et la Loire. Le district Seine et Côtiers Normands contient la majeure partie de cet aquifère au sein des masses d'eau 4092 et 4135. La masse d'eau n° 4092 correspondant à la nappe libre des calcaires de Beauce et la masse d'eau n° 4135 à la nappe captive des calcaires de Beauce sous forêt d'Orléans et recouvrement du Burdigalien.
Le réservoir aquifère est composé principalement de calcaires empilés dans une cuvette dont le fond est constitué d'argile imperméable, il est principalement libre, et de ce fait, réalimenté directement par les eaux de pluie excédentaires. Dans certains secteurs, comme la forêt d'Orléans, la nappe est captive, surmontée d'une couche d'argile.

La carte géologique à l'échelle du million qui est stratigraphique et non lithologique, ne montre pas (en partie inférieure de l'illustration ci-contre) ce recouvrement des formations de la forêt orléanaise alors que la grille IDPR la met clairement en évidence.

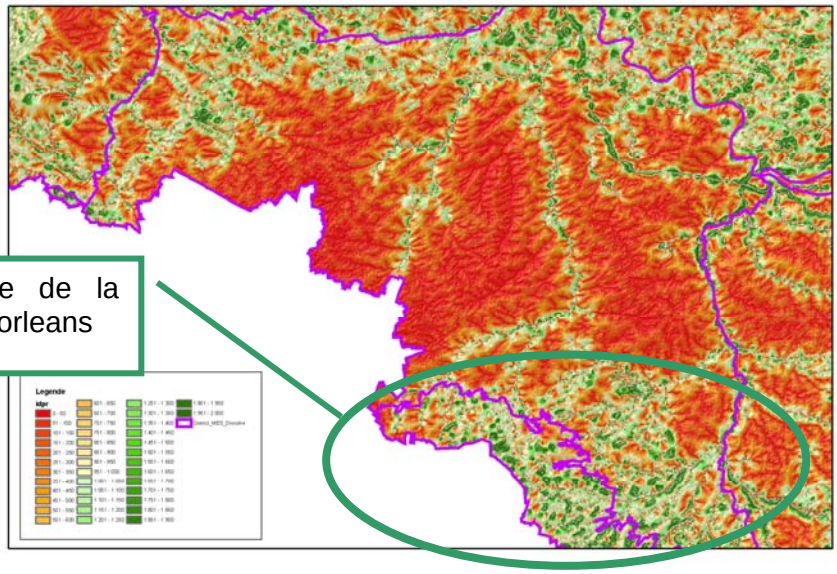


Figure 14: Résultat de du calcul IDPR extrait de la carte géologique à l'echelle du million en Beauce

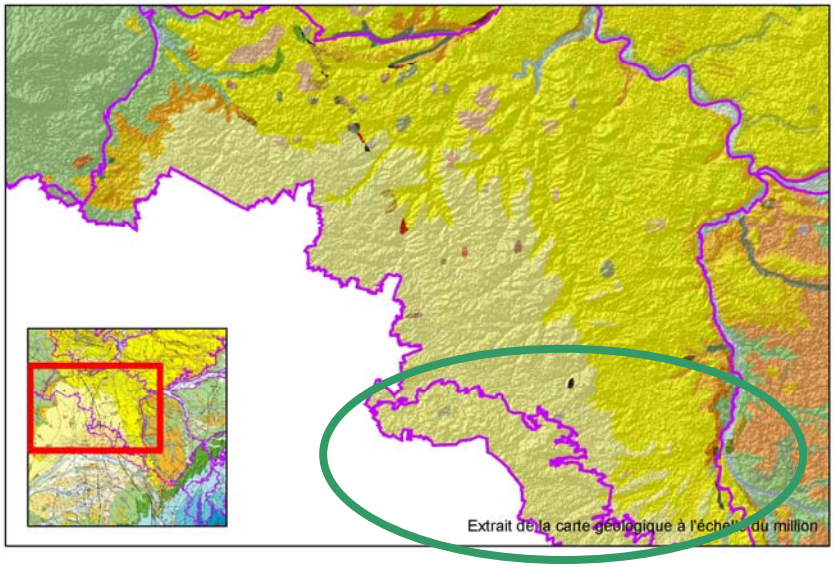


Figure 15: Extrait de la carte géologique à l'échelle du million

5.6.3 Le pays de Bray

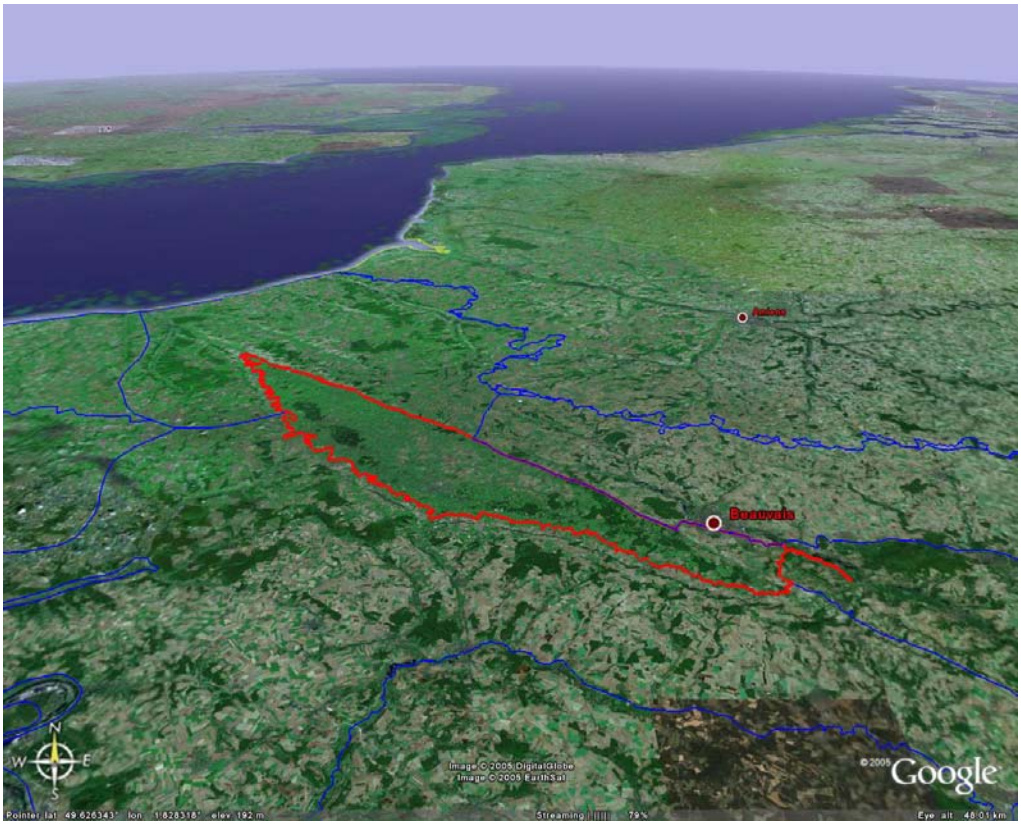


Figure 16: Le contour de la masse d'eau 3050 « Pays de Bray » (en rouge) sur une vue cavalière vers le nord-ouest

Dans la partie nord du Bassin sédimentaire de Paris, l'entité géologique majeure est composée des affleurements de l'auréole du Crétacé supérieur, sous un faciès de craie largement développé sur les territoires de la Somme, du nord de l'Aisne et de l'ouest de l'Oise. Localement existent des affleurements tertiaires (sables et argiles Eocène principalement) déposés sur le substrat crayeux.

Plus localement encore, des terrains plus anciens d'âge Jurassique affleurent en limite de région, dans le Beauvaisis, à la faveur de la « boutonnière » du Pays de Bray. Ces terrains sont formés par des argiles ou des marnes calcaires relativement imperméables. Le bloc diagramme suivant et la coupe associée en illustrent la morphologie et la structure géologique.

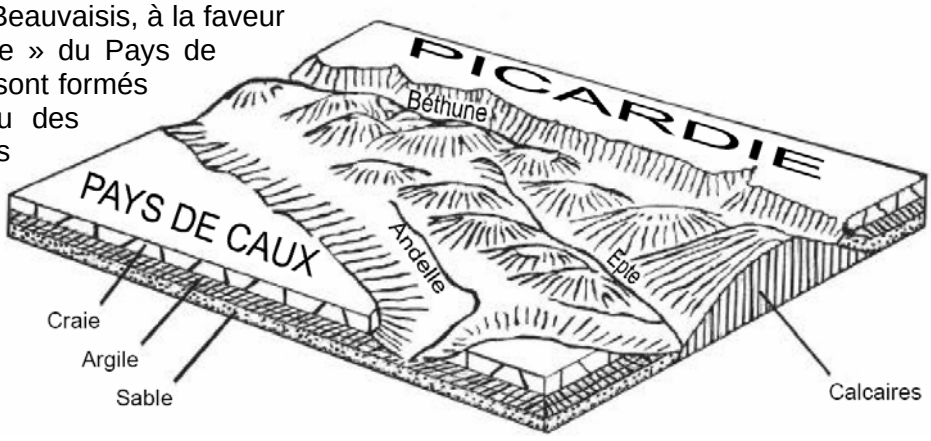


Figure 17: Bloc diagramme simplifié du Pays de Bray

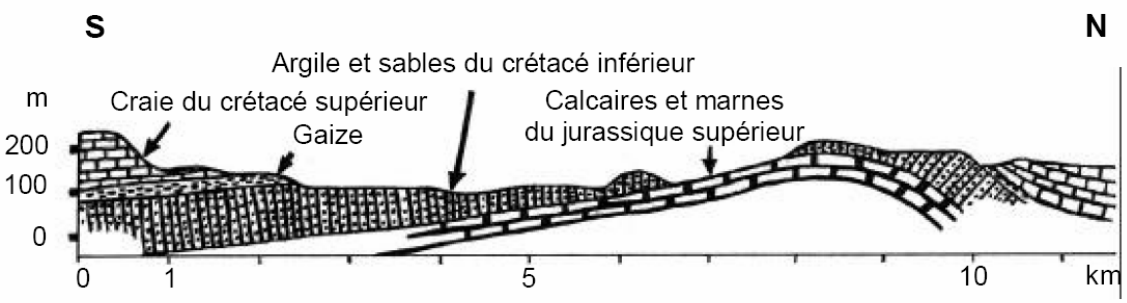
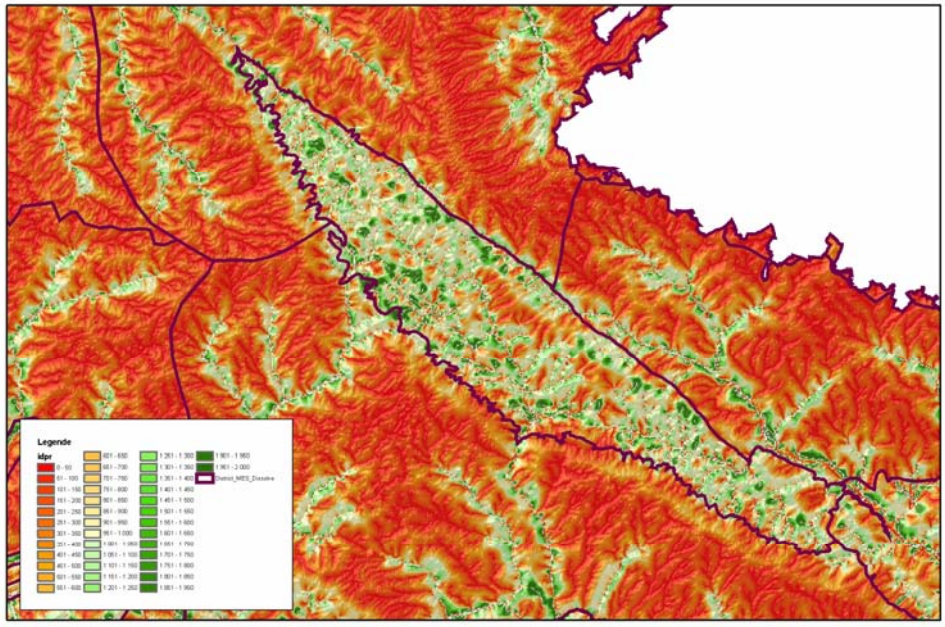


Figure 18: Coupe lithologique de l'anticlinal du pays de Bray

La grille de calcul de l'IDPR fournit pour cette région une réponse très détaillée où la présence des formations peu perméables du Crétacé inférieur souligne la structure de l'anticlinal du pays de Bray qui a formé cette boutonnière si particulière.



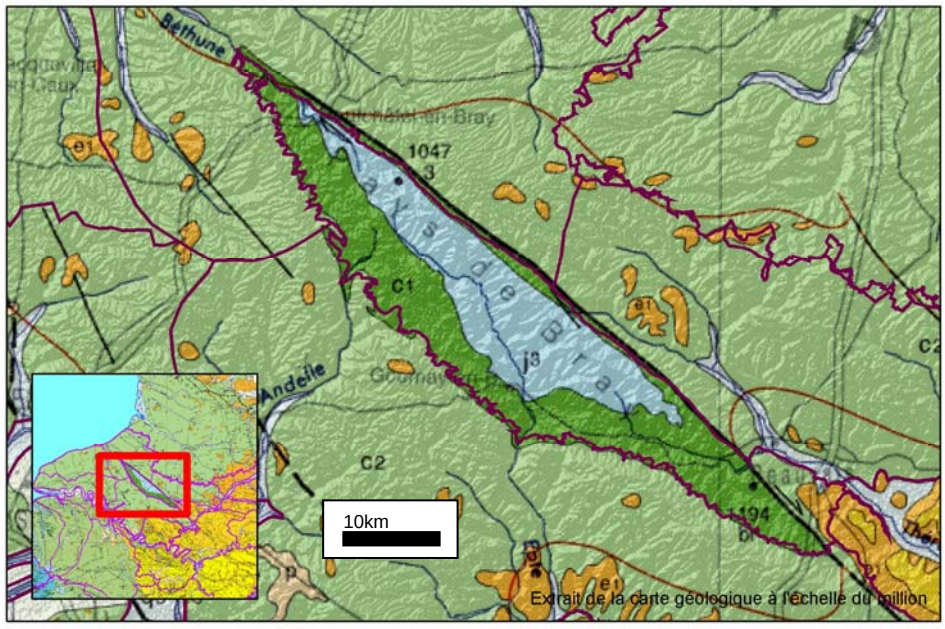


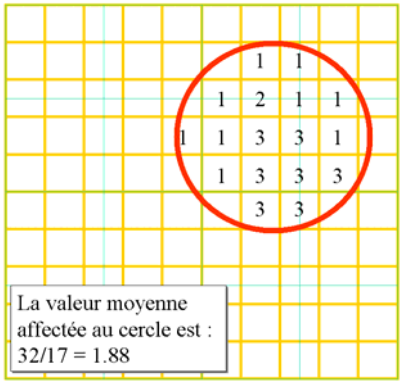
Figure 19: IDPR en Pays de Bray

5.7 AGREGATION DES DONNEES PAR UNITES SPATIALES

L'indice IDPR calculé précédemment sous la forme d'une grille au pas de 100m est pour les analyses suivantes rapporté aux unités fonctionnelles (cf paragraphe 4.1.2).

Compte tenu de la précision des fonds employés, il n'était pas envisageable d'affecter à une unité spatiale, une valeur directement issue des grilles de calcul. Les valeurs de IDPR ont donc été calculées à partir d'une fonction d'intégration spatiale

La figure ci-contre illustre ce mode d'agrégation des données, dans ce cas simplifié, une unité fonctionnelle a été schématisée par un cercle. Elle reçoit la valeur ***moyenne*** des cellules de la grille qu'elle intersecte **en totalité**.



Le résultat de cette analyse à l'échelle du bassin et sur les 55000 unités fonctionnelle, est porté dans la carte suivante et constituera pour la suite de l'étude de vulnérabilité, la voie d'utilisation de l'IDPR.

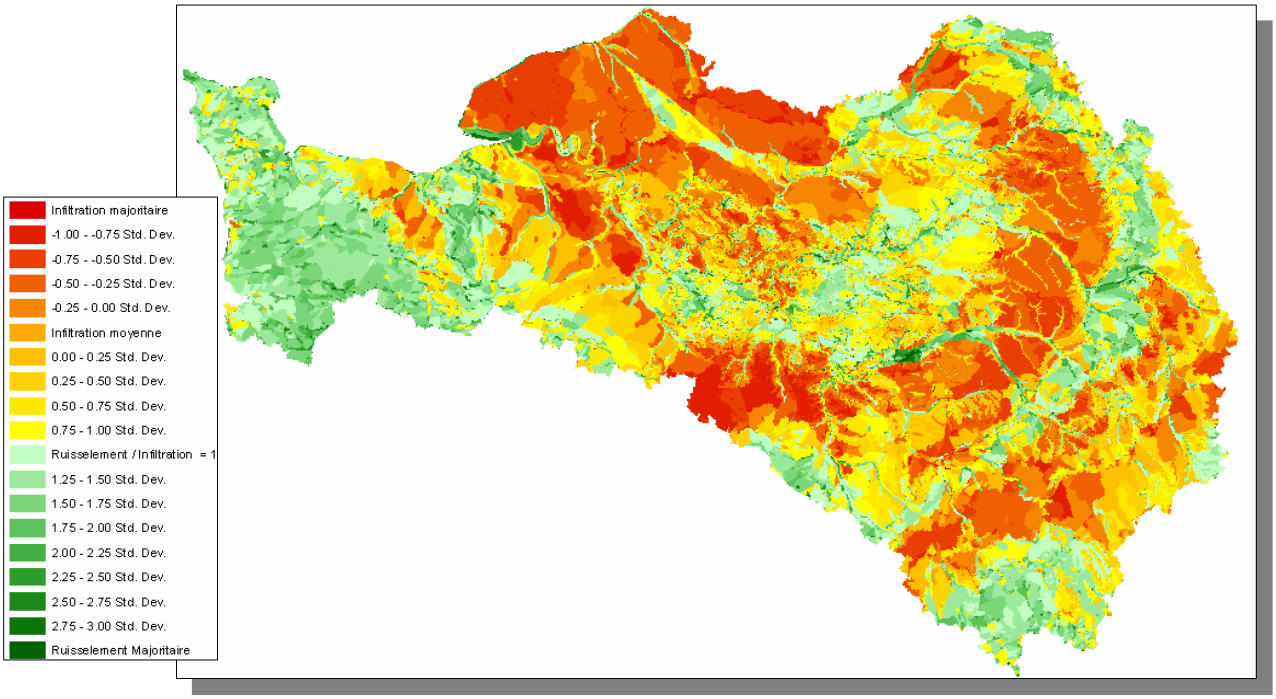


Figure 20 : IDPR affecté aux unités fonctionnelles - Données fournies en annexe (couverture unités fonctionnelles – Attribut IDPR)

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 considérés 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

Le critère IDPR a été, en premier estimation, pris en compte sans distinguer la nature des réservoirs aquifères auxquels il pouvait être associé. Ainsi, un réservoir alluvial, où la proximité de la nappe d'accompagnement de la rivière induit une divagation du cours d'eau, présente un indice IDPR élevé systématiquement associé à un milieu à priori ruisselant. D'autre part, le caractère karstique « franc » de certaines formations dans le contexte du Bassin Parisien, devient, si on réduit la gamme des valeurs de l'IDPR, peu différentiable des formations sédimentaires carbonatées non karstiques.
Ces observations se sont traduites par un phénomène de « lissage » du poids de l'indice IDPR à l'aune de l'ensemble des formations géologiques rencontrées. D'autre part, les caractéristiques propres à chacune des masses d'eau peuvent avoir été amplifié par le caractère intégrateur de certains découpages à l'exemple de formations alluviales de faible extension latérale.

Après l'élaboration de plusieurs scénarios d'interprétation, une ventilation non linéaire du critère l'IDPR à été retenue pour tenir compte des caractéristiques d'écoulement propres à chacune des masses d'eau souterraines rencontrées. Ainsi, dans la suite de l'étude, 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. Trois occurrences sont ainsi distinguées : les masses d'eau alluviales, les masses d'eau à caractère karstique, les autres cas

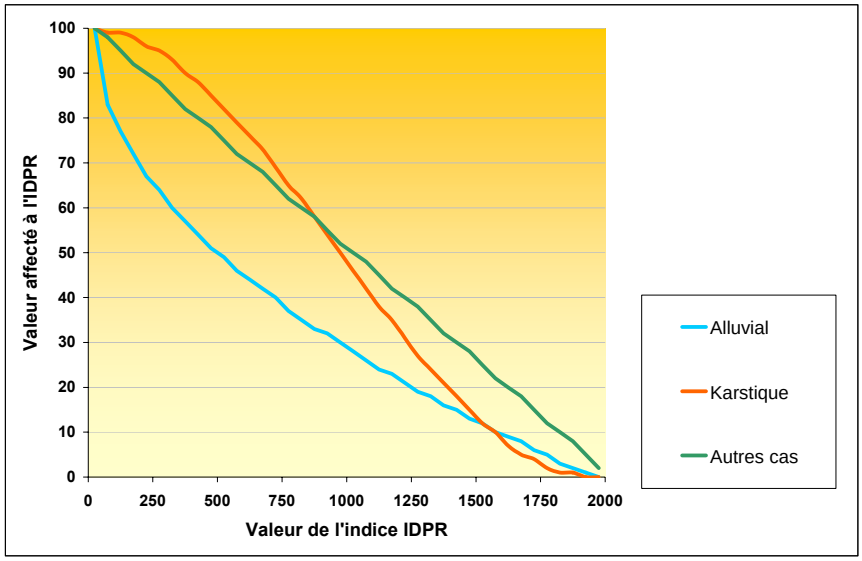


Figure 21 : Valeurs normées du critère IDPR selon la nature des masses d'eau

6.3 CRITERE ZNS

De manière similaire à celle envisagée pour l'indice IDPR, une ventilation non linéaire du critère de la ZNS à été pris en compte. Les concertations menées avec les experts du comité de pilotage de cette étude se sont ainsi orientées vers une différentiation de l'appréciation de l'épaisseur de la ZNS, selon que l'on soit dans un domaine karstique, où 30 mètres d'épaisseur de terrains non saturés sont un faible frein à l'infiltration comparativement à 10 mètres de ZNS dans un contexte imperméable, localement aquifère.

Les scénarios intermédiaires qui ont conduit à ces ajustements ont fait l'objet, dans le cadre des réunions du comité de pilotage, d 'éditions intermédiaires de cartes et fiches d'analyses par masses d'eau. Au travers des différentes étapes du projet, ces documents ont été diffusés auprès des partenaires et experts désignés par le comité de pilotage.

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). Cinq occurrences sont distinguées

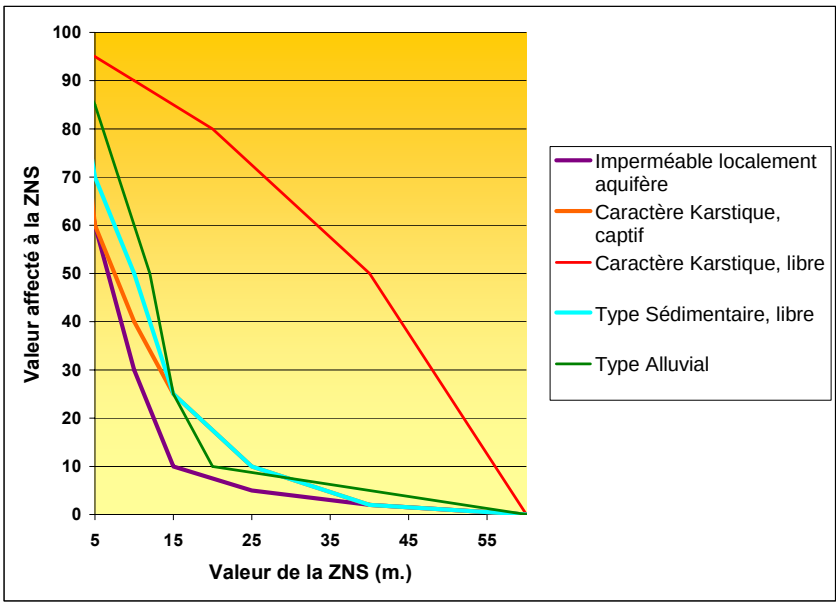


Figure 22 : Valeurs normées du critère ZNS selon la nature et le type d'écoulement des masses d'eau

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 que composent 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.

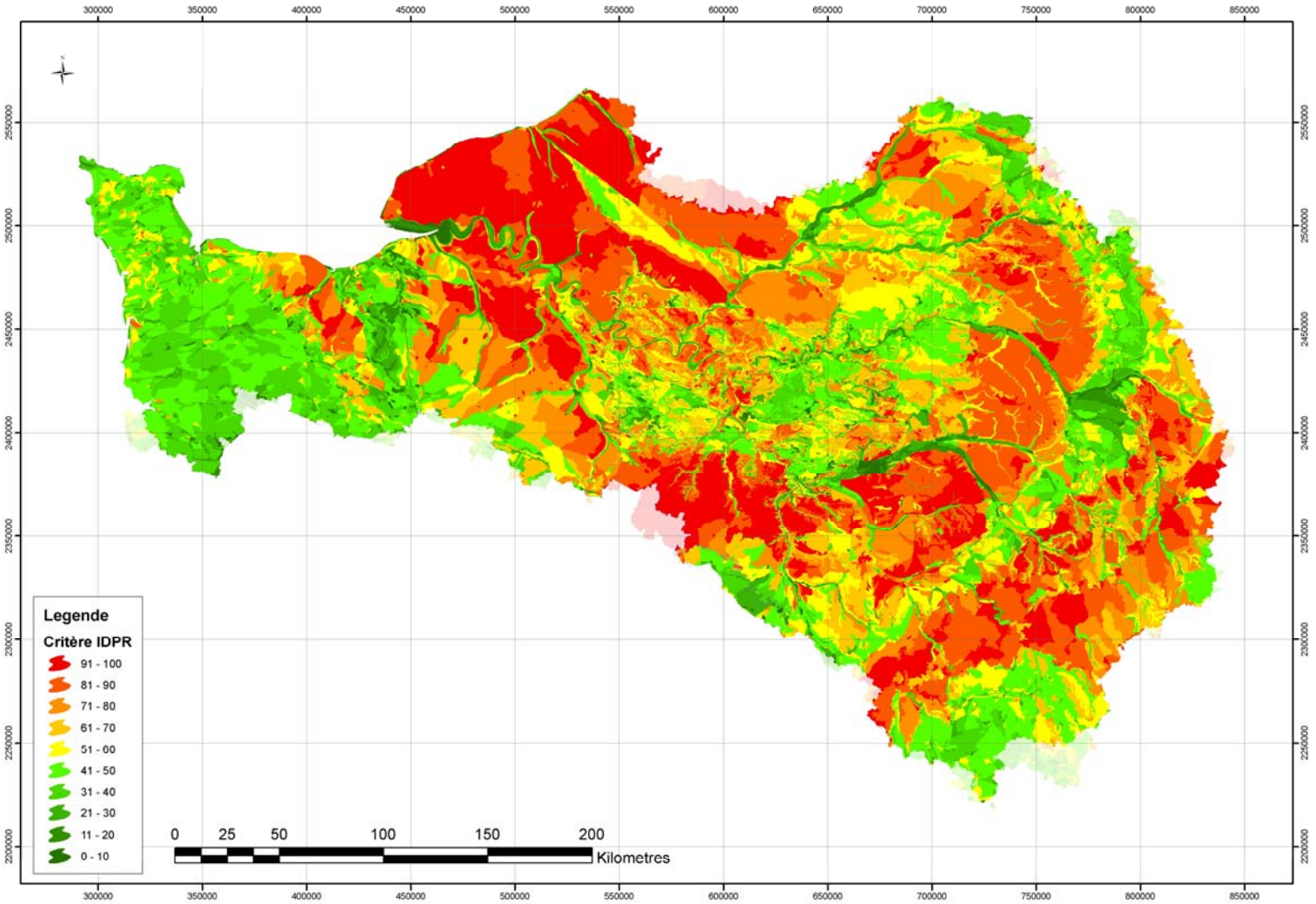


Figure 23 : Carte du bassin Seine-Normandie, représentation du critère IDPR

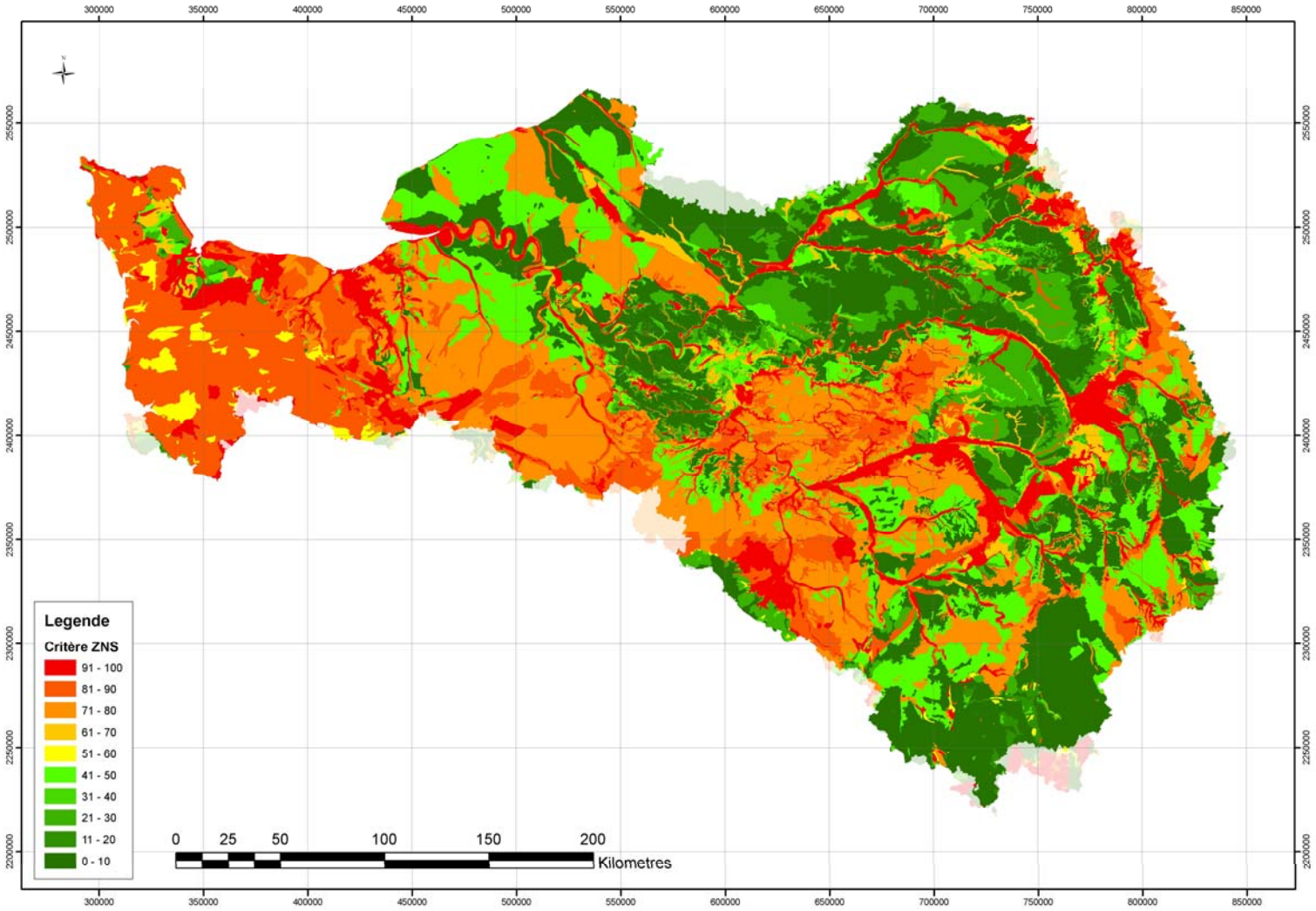


Figure 24 : Carte du bassin Seine-Normandie, représentation du critère ZNS

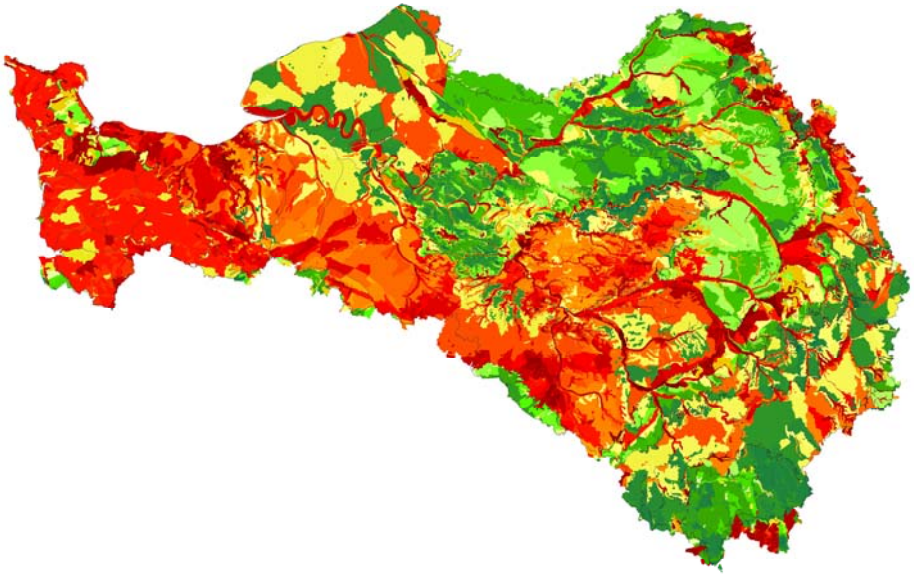


Figure 25: Scénario 10% IDPR et 90% ZNS

Ce scénario privilégie la proximité des nappes, il ne tient pas compte de la capacité des terrains qui les recouvrent à ralentir voire 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 la fig 34.

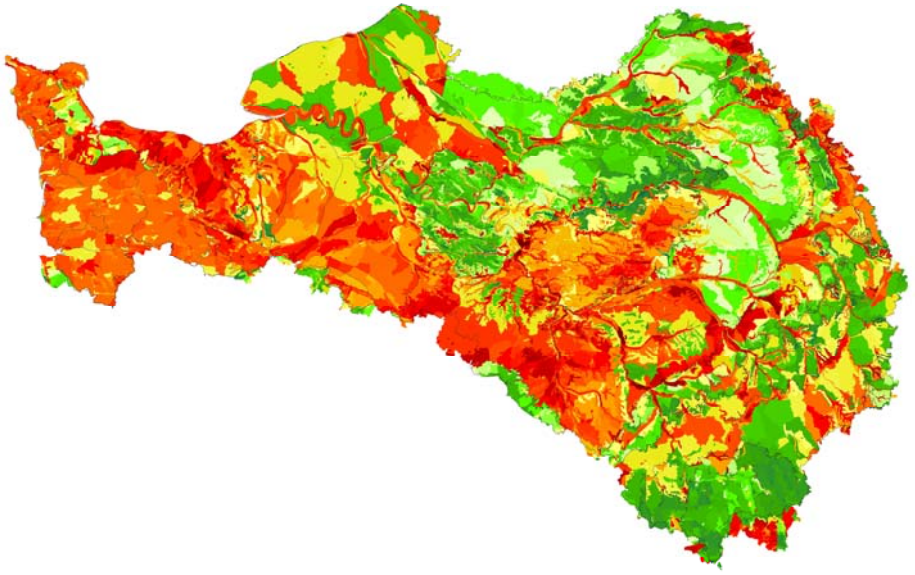


Figure 26: Scénario 20% IDPR et 80% ZNS

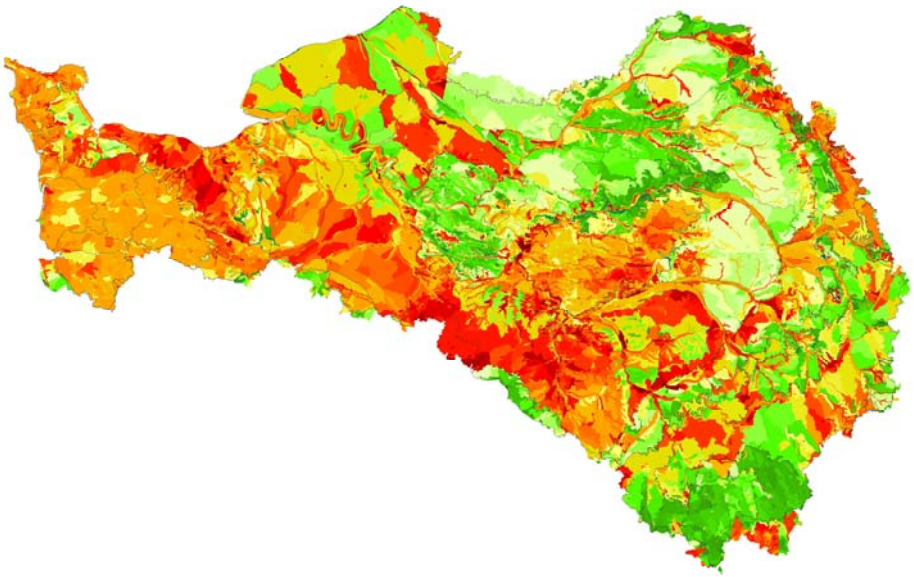


Figure 27: Scénario 30% IDPR et 70% ZNS

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.

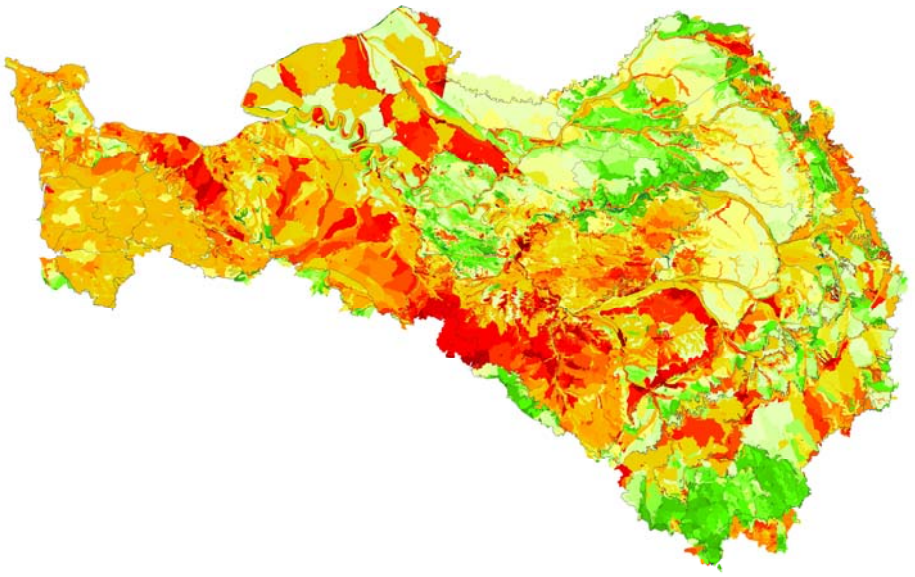


Figure 28: Scénario 40% IDPR et 60% ZNS

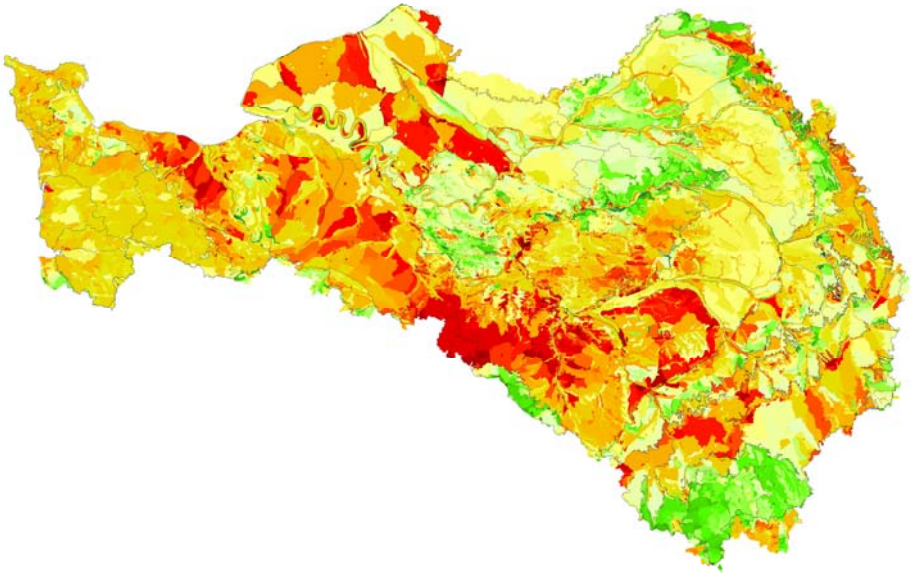


Figure 29: Scénario 50% IDPR et 50% ZNS

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.

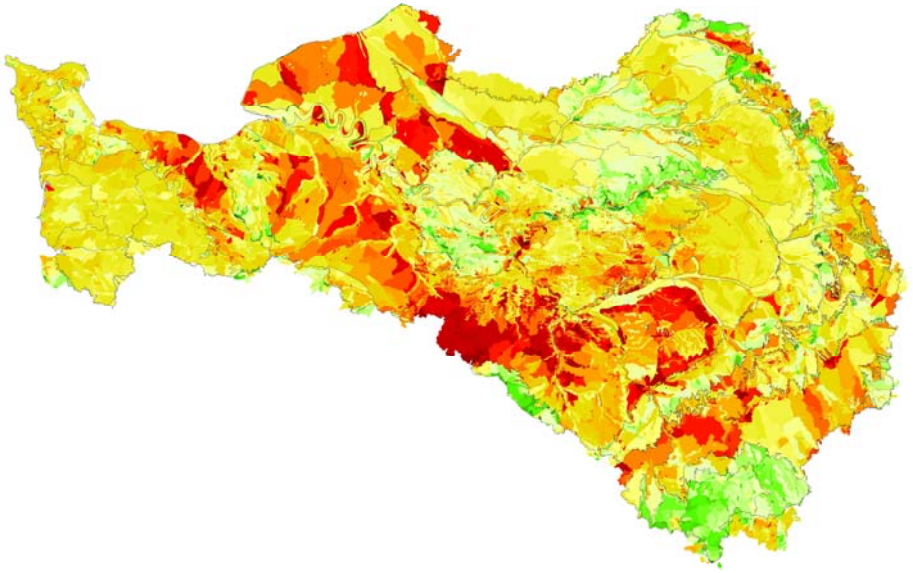


Figure 30: Scénario 60% IDPR et 40% ZNS

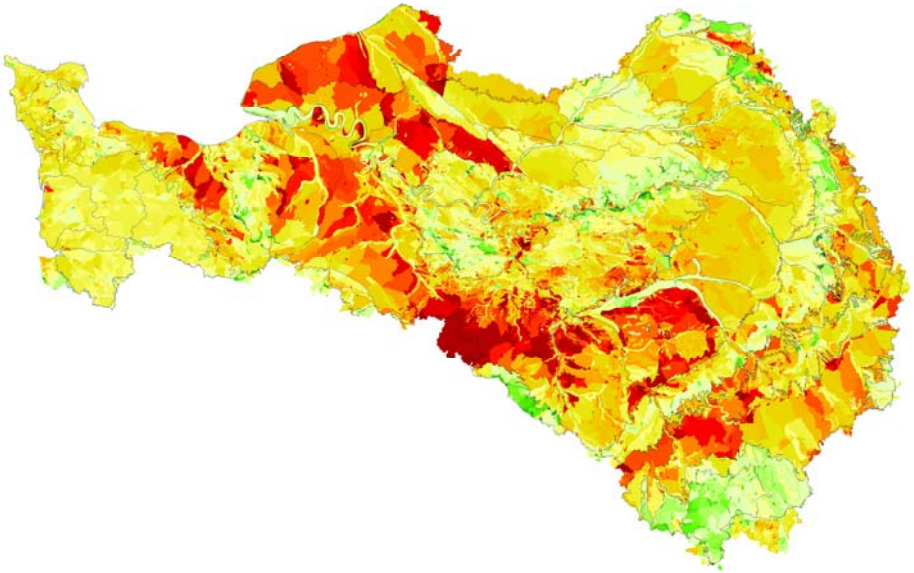


Figure 31: Scénario 70% IDPR et 30% ZNS

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 où l'écoulement en surface ou subsurface des eaux souterraines, deviennent par l'analyse combinatoire, de faible vulnérabilité

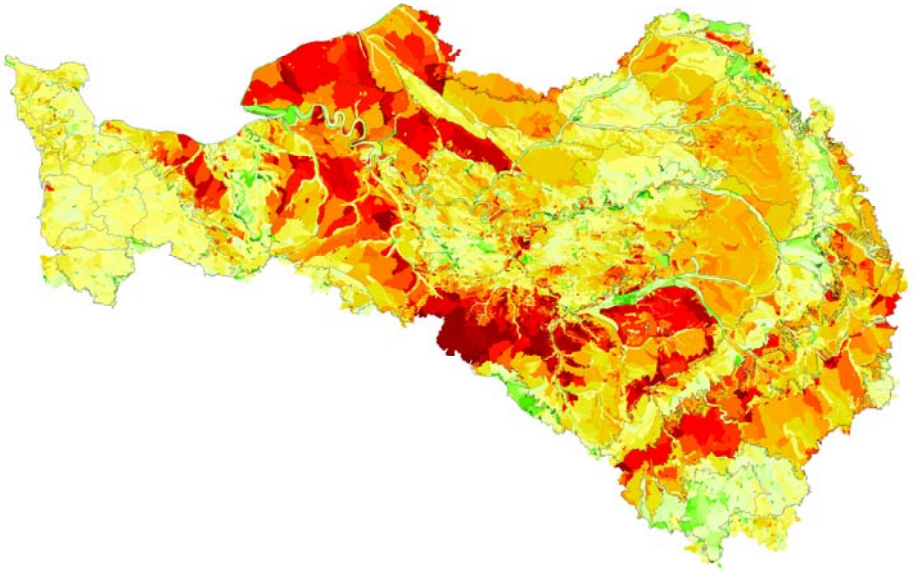


Figure 32: Scénario 80% IDPR et 20% ZNS

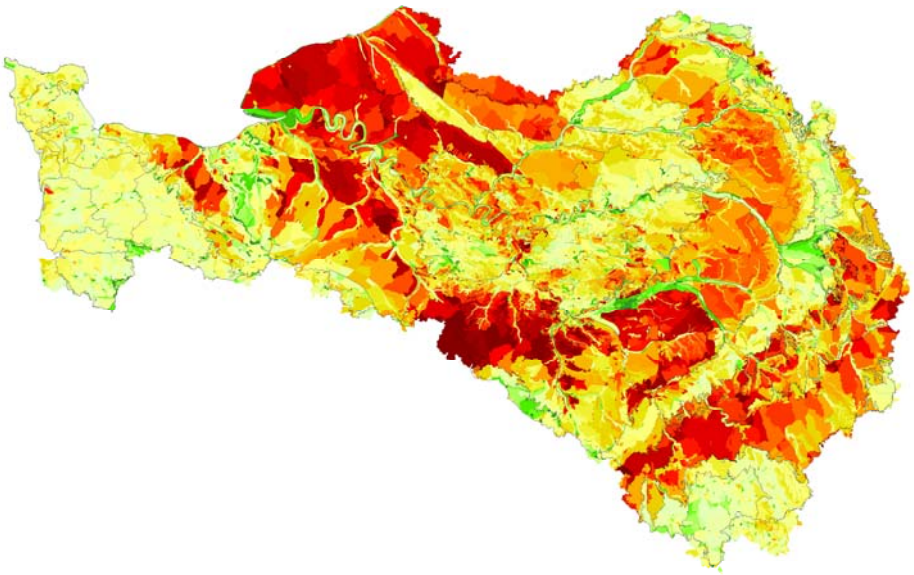


Figure 33: Scénario 90% IDPR et 10% ZNS

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.

Scénarios = (Poids IDPR * [Critère IDPR]) + (Poids ZNS * [Critère ZNS])

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

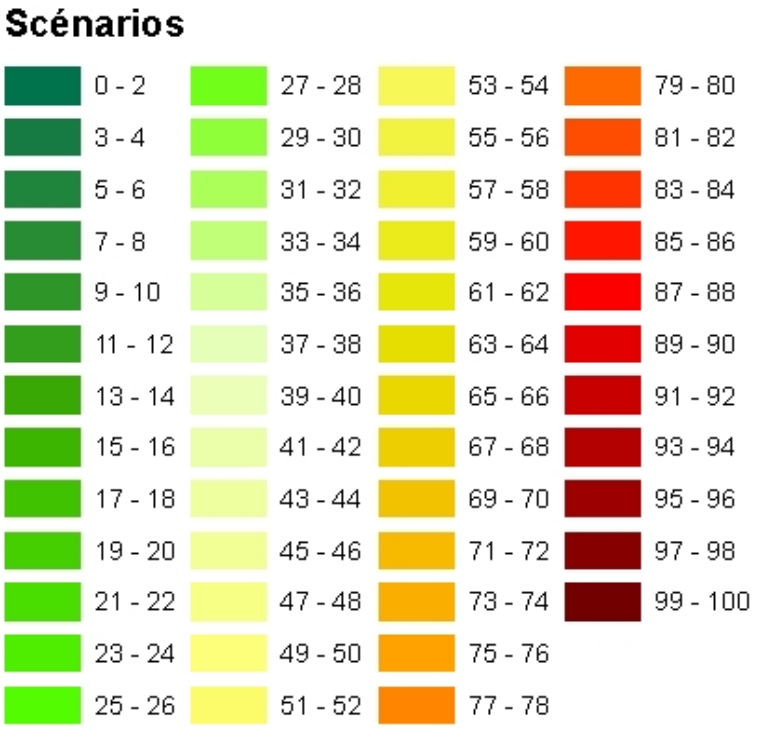


Figure 34: Légende des scénarios présentés

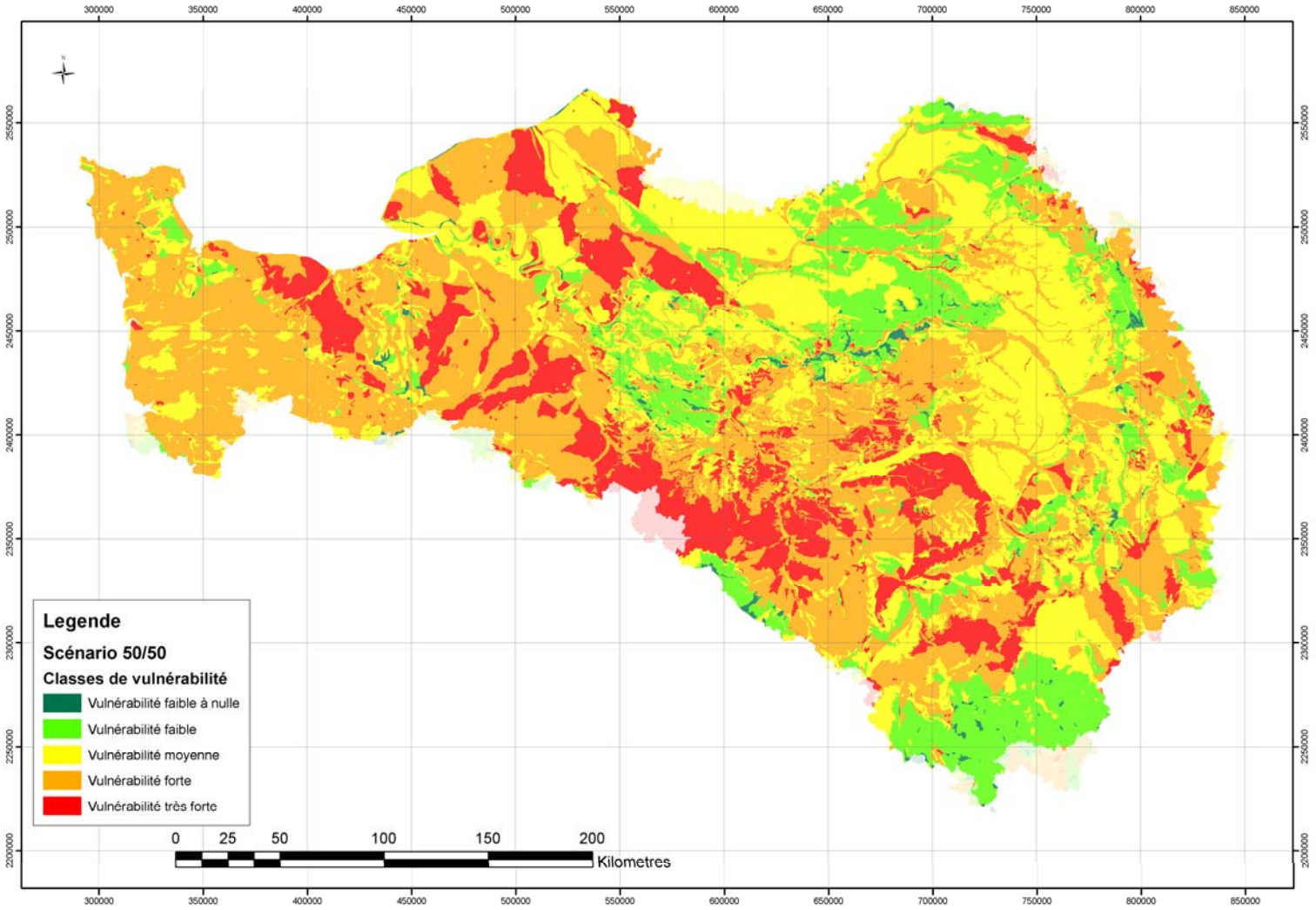


Figure 35 : Carte du bassin Seine-Normandie, représentation de la vulnérabilité des eaux souterraines (ratio 50/50 IDPR et ZNS)

6.4 ANALYSE CRITIQUE DES RESULTATS

L'échelle de restitution de l'IDPR est étroitement liée à la qualité des données sources qu'il exploite. Dans le cadre de cette étude. le modèle numérique de terrain au pas de 50 mètres est l'initiateur du calcul. Par conception, la grille résultante est une grille au pas de 50 mètres. Le second volume de données nécessaire au calcul de l'IDPR est le fond hydrologique de référence BDCarthage, sa précision à l'échelle de 1 : 50 000 est alors conforme à la précision du calcul des talwegs.
Il est probable que l'exploitation d'un MNT a un pas de mesure inférieur, de l'ordre de 25 mètres associé à des données géographiques de même précision (à l'exemple de la BD Topo) pourra conduire à un résultat d'intérêt similaire exploitable à une plus grande échelle de restitution (1/25 000). Ce type d'approche a été mené avec succès dans le cadre d'études sur le territoire du de l'ancien Bassin Minier Nord Pas de Calais avec un MNT au pas de 30 mètres (Etude réalisée dans le cadre des opérations de Service public du BRGM O2-PIR-602 Convention Mission Bassin Minier - Novembre 2002 BRGM/RP-51991-FR).

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'infiltrent 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'infiltrent 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 orageuses[11]. 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 décolmatage 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 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 à la vulnérabilité effective des grandes unités crayeuses. A contrario, les phénomènes de petite extension spatiale, dolines, gouffres et pertes, qui ne sont pas portés sur les documents numériques peuvent être écartés du traitement et minorés.

Par exemple: le cours de la rivière l'Yerres en Ile de France coule sur les calcaires karstifiés de Brie dans lesquels il existe des pertes avérées qui représentent les ¾ de l'alimentation de l'entité aquifère des Calcaires de Champigny. Ces pertes représentent un risque potentiel important de pollution de l'aquifère des Calcaires de Champigny par les eaux de surface.
C'est pour cette raison qu'une couche d'information supplémentaire a été ajoutée aux deux critères de cette étude. Les sources de données exploitées pour cette couche d'information résultantes d'études particulières ou de l'interrogation des bases de données nationales, Banque de données du Sous-Sol et BD Cavités. Pour cette dernière, l'état d'avancement des travaux d'inventaire couvre la majeure partie du bassin Seine-Normandie (fig ci contre).

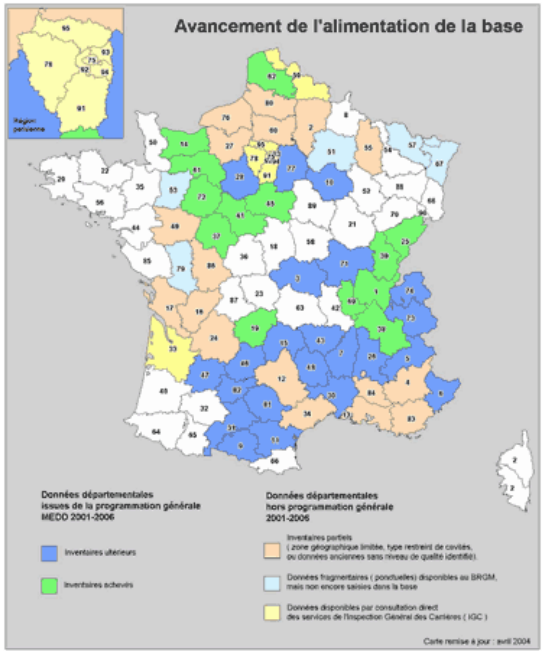


Figure 36: Etat d'avancement de l'alimentation de la base de données nationale BD Cavités (www.BDCavites.net)

Les cartes suivantes représentent à l'échelle du Bassin Seine Normandie, la localisation de ces cavités naturelles, gouffres, dolines et pertes et leur densité au km².

[11] 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.

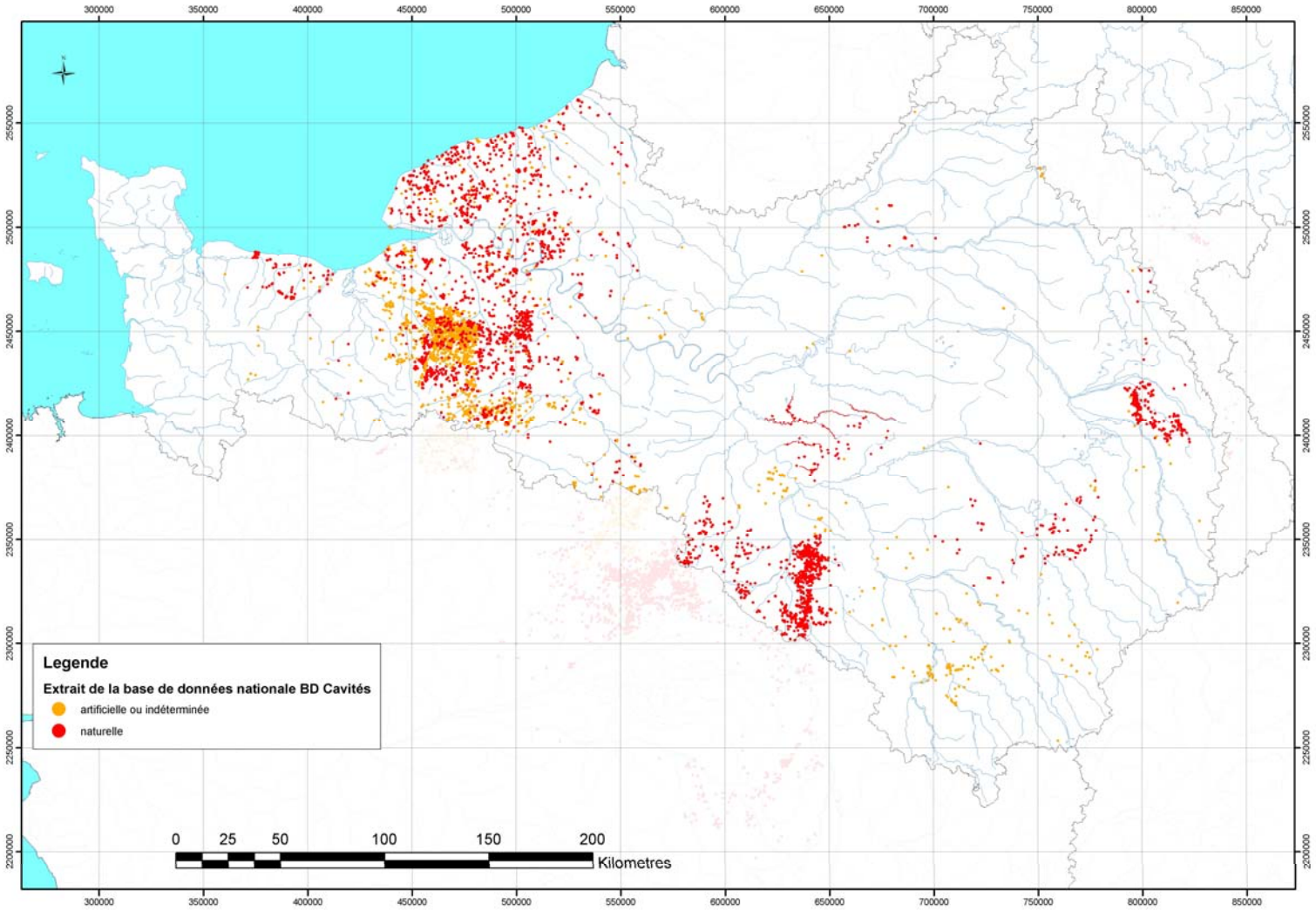


Figure 37: localisation de ces cavités naturelles, gouffres, dolines et pertes

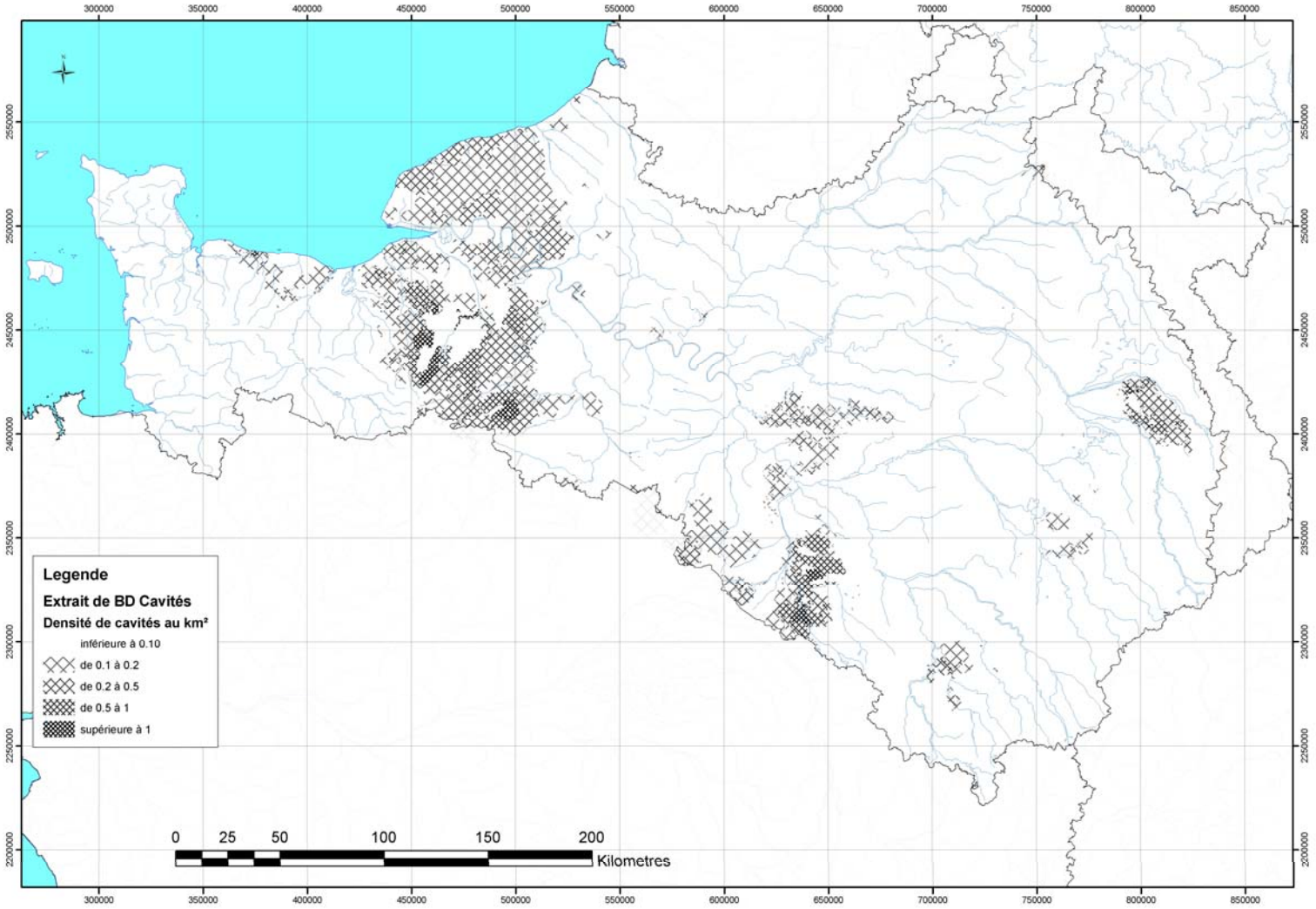


Figure 38 : Densité au km² des cavités naturelles, gouffres, dolines et pertes.

Le critère de densité des cavités naturelles et autres points susceptibles de favoriser localement une infiltration directe des eaux de surface vers le milieu souterrain est un indicateur. Il n'influe pas sur la vulnérabilité intrinsèque calculée mais a pour objet d'attirer l'attention localement sur la recherche de « points noirs » susceptibles de modifier de manière drastique la vulnérabilité d'une zone (à l'échelle parcellaire par exemple).

Lorsque cet indice devient très élevé, dans un domaine crayeux et sur des zones où l'IDPR est faible et indique une fonction d'infiltration forte, le milieu peut s'apparenter alors a un Karst dont la géomorphologie résulte des écoulements souterrains particuliers qui se mettent en place progressivement dans les roches carbonatées (calcaires et dolomies).

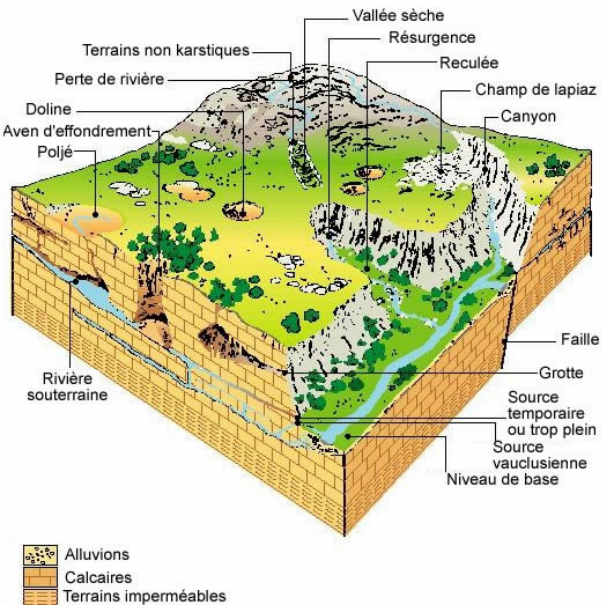


Figure 39: Bloc diagramme représentant un paysage karstique synthétique (extrait de : M. Bakalowicz (1999))

Ainsi dans le département de l'Eure, il est indicateur du caractère karstique des formations aquifères.

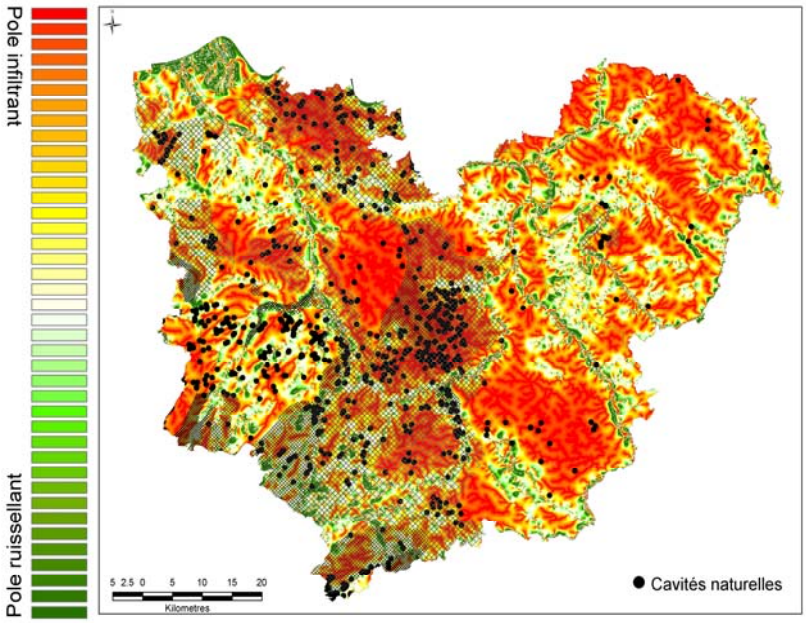


Figure 40: Grille IDPR dans l'Eure et données issues de BDCavités

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.

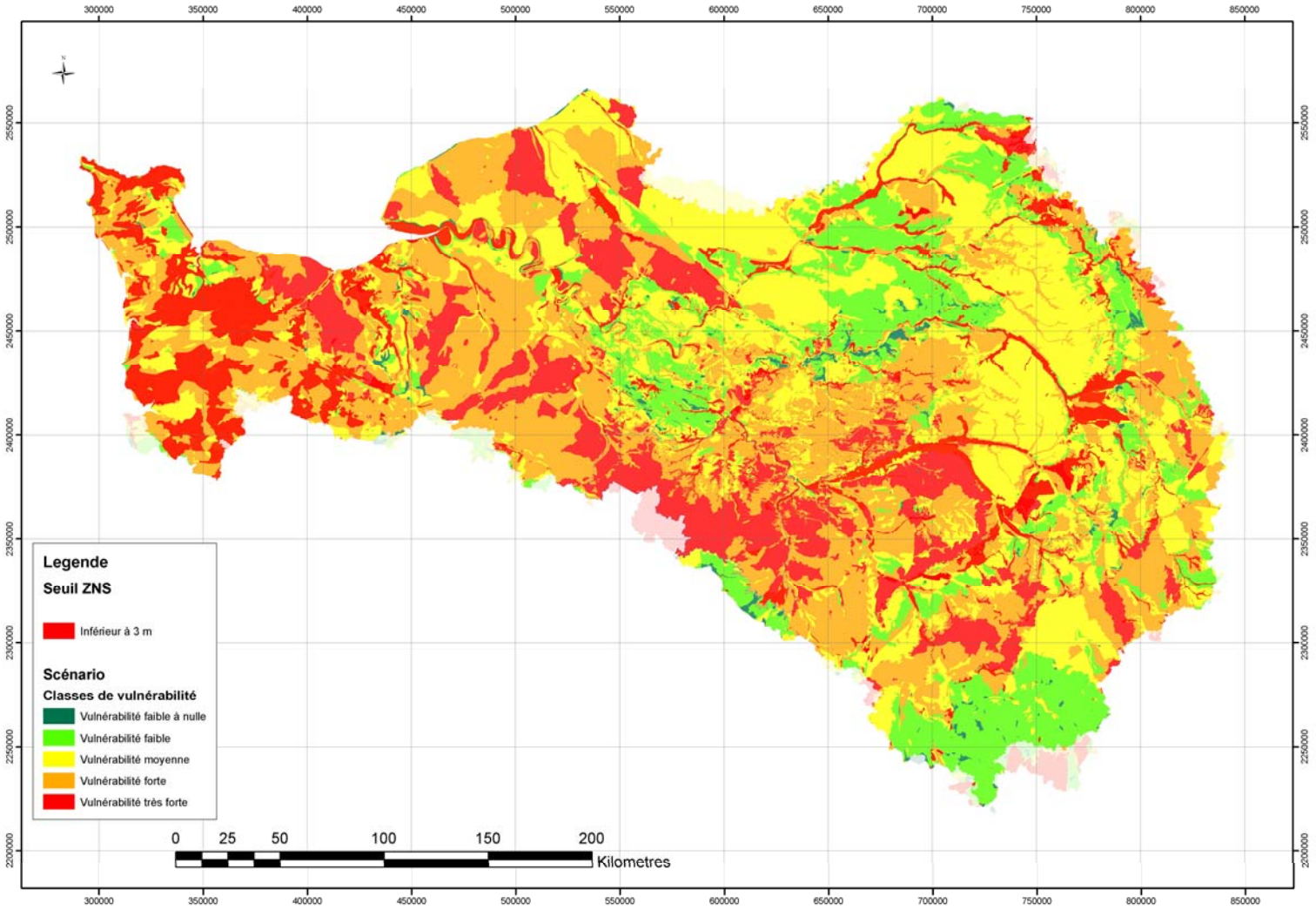


Figure 41 : Vulnérabilité des eaux souterraines du bassin Seine-Normandie (combinaison 50/50 plus Seuil ZNS à 3m)

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

- Présence de cavités naturelles, pertes ou gouffres susceptible de modifier de manière drastique la perméabilité des terrains situés à proximité immédiate de ces phénomènes. Ceux-ci étant ponctuels, la vulnérabilité de l'ensemble de la formation n'est pas altérée (critère 50/50), la présence de ces cavités est mentionnée par leur densité au km².

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 du traitement BASOLHYD qui est à l'initiative de cette étude en Seine-Normandie.

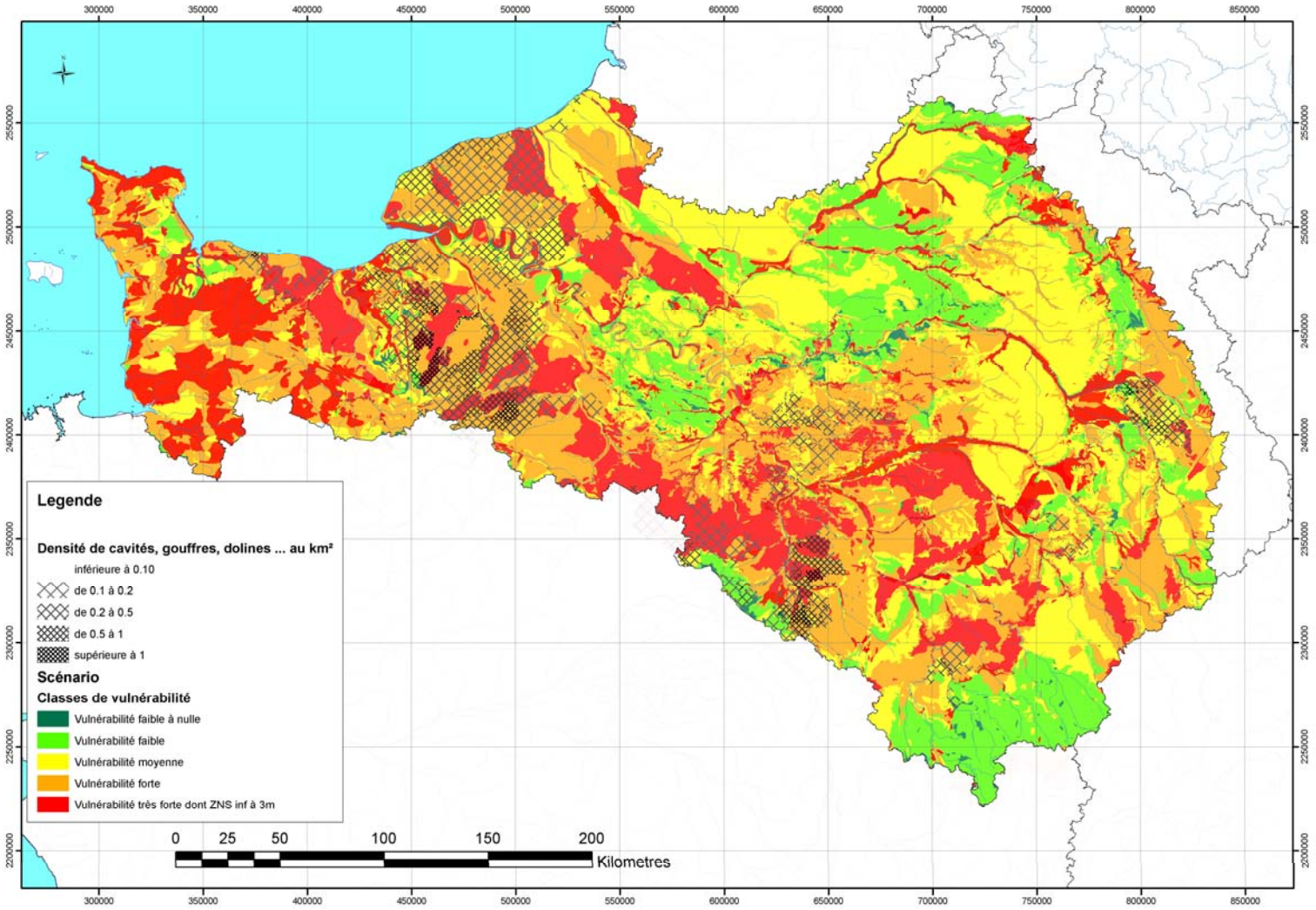


Figure 42 : Carte de vulnérabilité finale

6.5 INTERPRETATION ET LIMITES DE LA CARTE DE VULNERABILITE SIMPLIFIEE

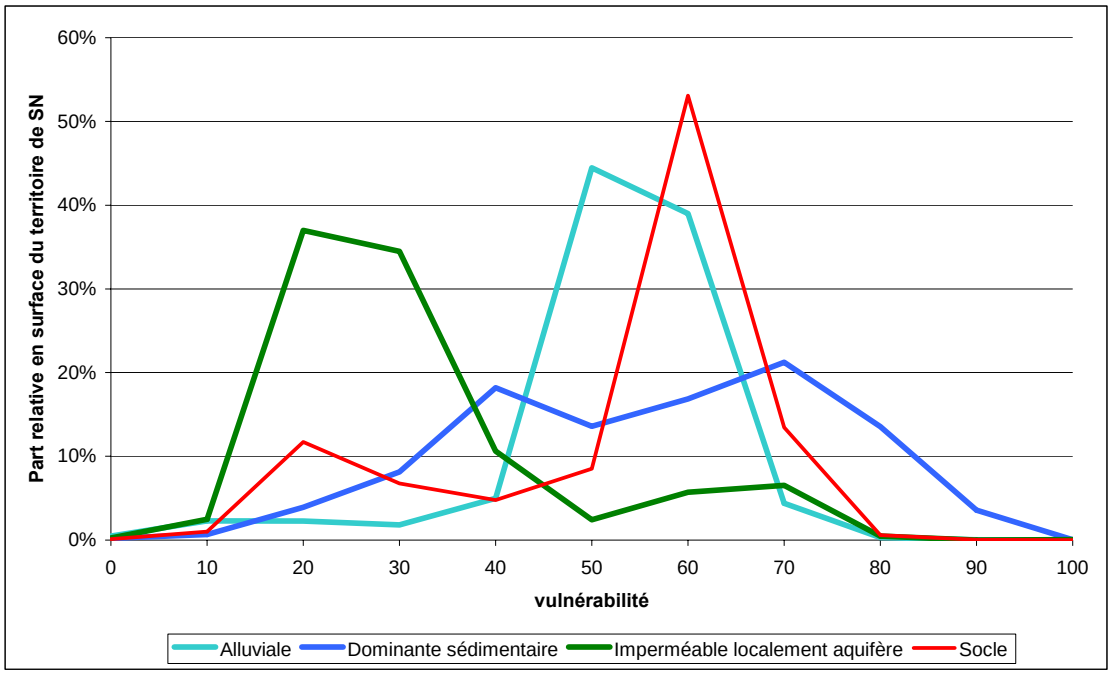
6.5.1 Limites d'interprétation

La limite d'interprétation, d'exploitation, de la carte de vulnérabilité simplifiée est fixée par la méthode d'élaboration des données qui la composent. Par construction, on peut considérer une échelle minimum de 1/100 000. Celle ci est directement due aux échelles de validité des données cartographiques exploitées (MNT, BD Carthage).

Localement, la précision des unités fonctionnelles qui sont déduites d'éléments issus de la carte géologique au 1/50000, induit une restitution cartographique qui semble de précision plus fine que celle citée précédemment. Seul l'avis des hydrogéologues régionaux permettra de trancher localement sur la pertinence d'une exploitation à plus grande échelle de ce document.

6.5.2 Remarques générales sur la carte de vulnérabilité intrinsèque simplifiée

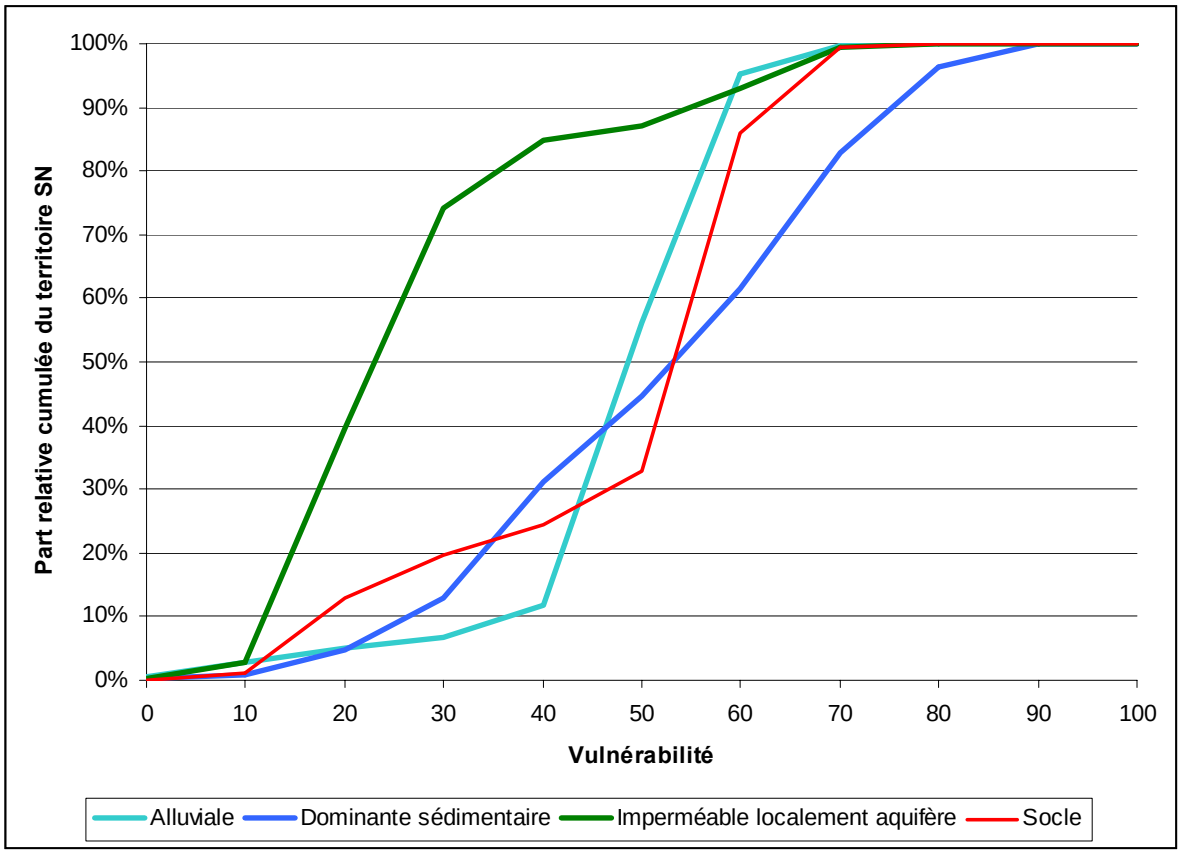
Le graphique suivant représente la part relative des différents types de masses d'eau selon la part relative du territoire occupé et la vulnérabilité déduite de l'analyse.



On peut ainsi lire sur celui-ci que la majorité des masses d'eau de type Socle (en rouge) ont une vulnérabilité élevée (autour de 60) ainsi que les masses d'eau de type alluvial. A contrario, les masses d'eau de type Imperméable Localement aquifère sont plutôt de faible vulnérabilité (en vert)

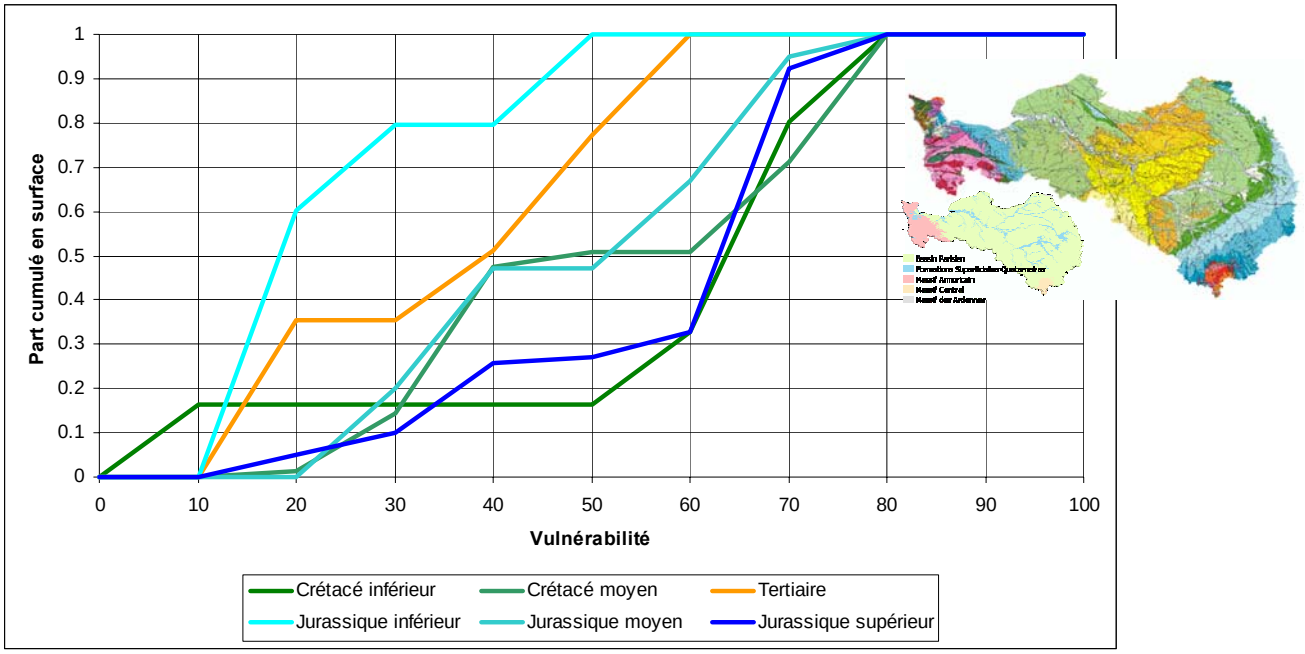
Enfin, les masses d'eau de type d*ominante sédimentaire* se répartissent entre vulnérabilité moyenne et vulnérabilité forte avec une majorité d'entre elles de vulnérabilité élevée, supérieure à 50.

Le graphique suivant montre, selon les surfaces cumulées, le comportement nettement différentié des masses d'eau de type i*mperméable, localement aquifère* dont plus de 85% de la superficie totale est en zone de faible vulnérabilité. La répartition du territoire des masses d'eau de type d*ominante sédimentaire* est à peu près équivalente de part et d'autre de la valeur 50 (vulnérabilité moyenne[12])



[12] Les valeurs qualitatives de vulnérabilité sont ventilées de la manière suivante : [0-20[vulnérabilité faible à très faible, [20-40[vulnérabilité faible, [40-60[vulnérabilité moyenne , [40-60[vulnérabilité forte, [60-80[vulnérabilité très forte,

Les données dérivées de la stratigraphie à l'échelle du million fournissent un résultat également différentié pour les seules masses d'eau à dominante sédimentaire



Ainsi, les formations sédimentaires tertiaires sont en règle générale moins vulnérables avec les formations du jurassique inférieures (elles sont en majorité marneuses à l'exemple des formations jurassique inf. de Picardie). A contrario le jurassique supérieur, en majorité karstique apparaît très vulnérable.

Ces grands traits d'analyse, fondés sur l'étude statistique des résultats obtenus par les 55000 unités fonctionnelles a été détaillée par région lors des différentes réunions de travail du comité de pilotage. Quatre régions seront ainsi détaillées au regard des études antérieures dans le chapitre suivant.

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

4 zones de contrôle ont été prises en compte pour la critique et l'analyse de pertinence de la méthodologie employée. Cependant les objets analysés (nappes exploitées pour l'AEP et qui ne correspondent pas toujours aux premières nappes rencontrées, IDF et Yvelines), le caractère spécifique ou intrinsèque de la vulnérabilité (Vulnérabilité aux nitrates pour la carte de Champagne Ardenne ou bien aux phytosanitaires pour celle de Bourgogne) limitent la portée de telles comparaisons. 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 du bassin n'est pas remise en cause par les résultats des approches régionales antérieures.

6.6.1 Carte de vulnérabilité des eaux souterraines aux pollutions de surface.

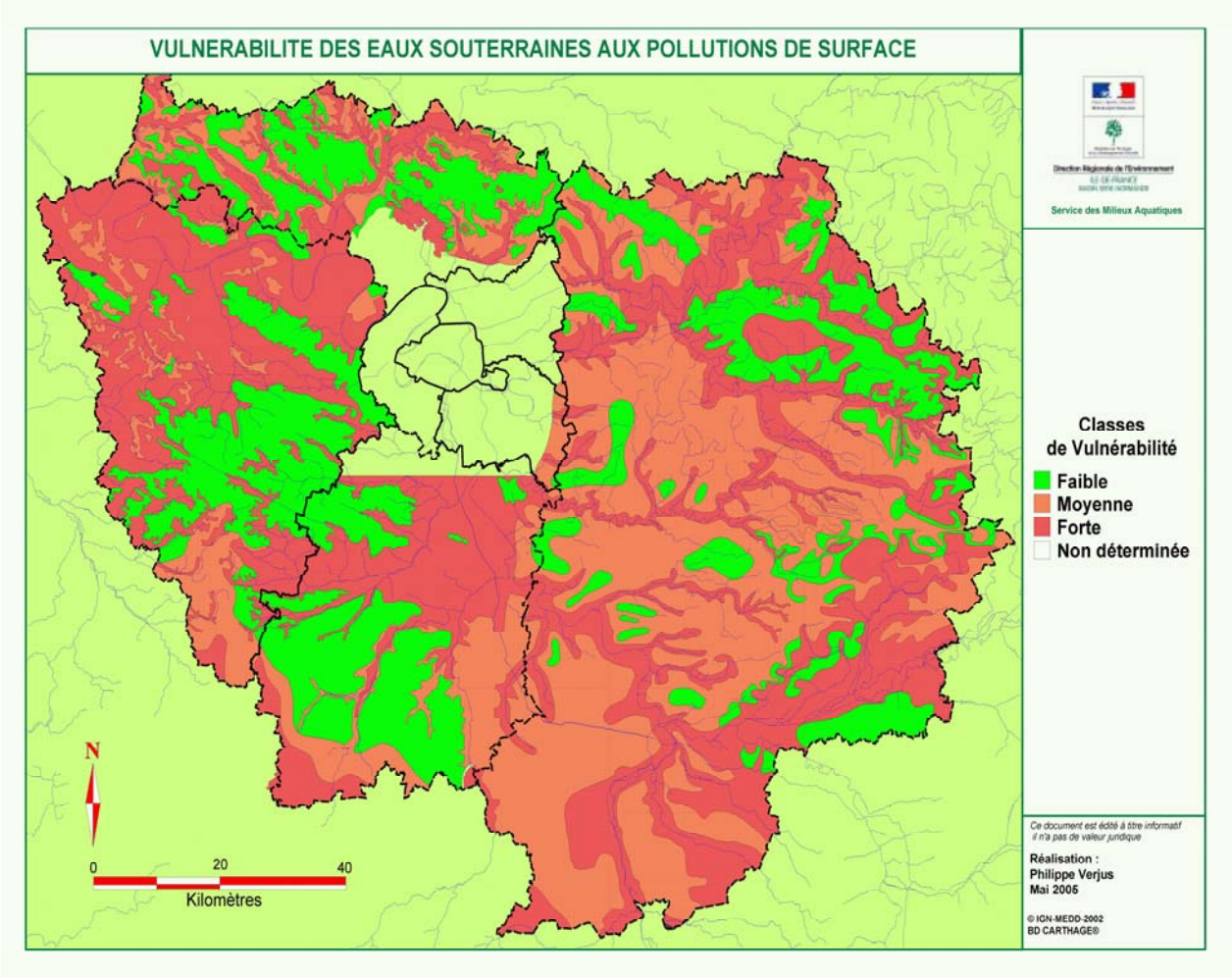


Figure 43: Vulnérabilité des nappes d'eau en Ile-de-France (source : IAURIF)

Pour cette comparaison, l'ensemble des masses d'eau concernées par ce secteur ont fait l'objet d'une édition spécifique de fiches comparatives dont un exemple est présentée à la figure suivante. Aucune contradiction majeure (inversion du degré de vulnérabilité) n'a été relevée.

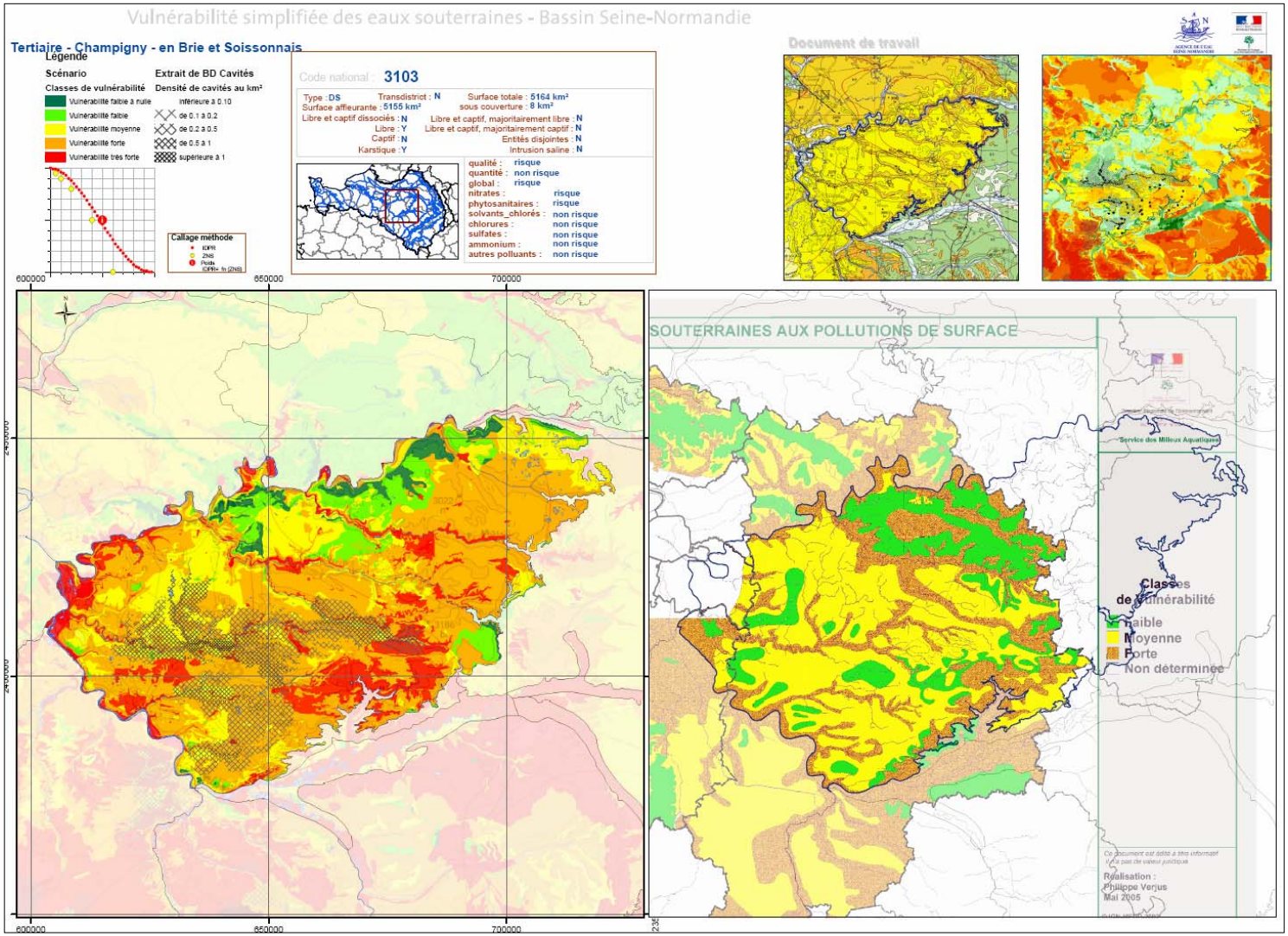


Figure 44: Exemple de l'étude comparée de la carte de vulnérabilité simplifiée du bassin Seine Normandie et de la carte IAURIF relatives à la vulnérabilité des eaux souterraines pour la masse d'eau 3103

6.6.2 Carte de vulnérabilité du département des Yvelines (1981)

Le document de référence utilisé est la carte de vulnérabilité du département des Yvelines réalisée en 1981 (cf. BRGM : 81 SGN 348 IDF – Inventaire des ressources aquifères et vulnérabilité des nappes du département des Yvelines) qui a permis de caler la méthode et de l'appliquer à l'ensemble de la région Ile de France.
L'hydrogéologie des Yvelines est caractérisée par l'existence de trois nappes principales, la nappe de l'Oligocène, celle de l'Eocène et celle de craie. Dans l'établissement de la carte de vulnérabilité des Yvelines, est considérée en priorité la nappe qui est captée par un ouvrage AEP (Alimentation en Eau Potable). La vulnérabilité a été définie en 6 classes en fonction de la nature et de l'épaisseur des formations sus-jacentes (zone non saturée).
Les données utilisées pour le calage de la méthode d'analyse simplifiée sur le département des Yvelines sont :

- la carte géologique harmonisée tirée des coupures à 1/50 000^{ième} ;
- la carte du réseau hydrographique ;
- la carte du réseau de drainage ;
- la carte de l'IDPR

Différents essais de croisement des valeurs de l'épaisseur moyenne de la zone non saturée (ZNS) et de celles de l'IDPR ont été réalisés selon les 3 hypothèses suivantes :

- La priorité a été donnée aux valeurs de la couche zone non saturée ;
- La priorité a été donnée aux valeurs de l'IDPR ;
- Aucune priorité n'a été donnée : les valeurs de la couche « zone non saturée » et celles de l'IDPR ont la même importance dans l'établissement de la carte.

L'essai qui se rapproche le plus de la carte de vulnérabilité des Yvelines est obtenue pour la dernière hypothèse. Le résultat du croisement des données est une carte présentée en illustration. Les différences qui apparaissent entre les deux cartes peuvent s'expliquer par le fait que la carte de vulnérabilité des Yvelines considère en priorité la nappe captée par un ouvrage AEP, alors que dans le cadre de cette étude, la priorité est donnée à la première nappe rencontrée.
L'illustration suivante présente la carte réalisée via la méthode simplifiée de définition des notions de vulnérabilité des eaux souterraines sur l'ensemble de la région Ile de France.

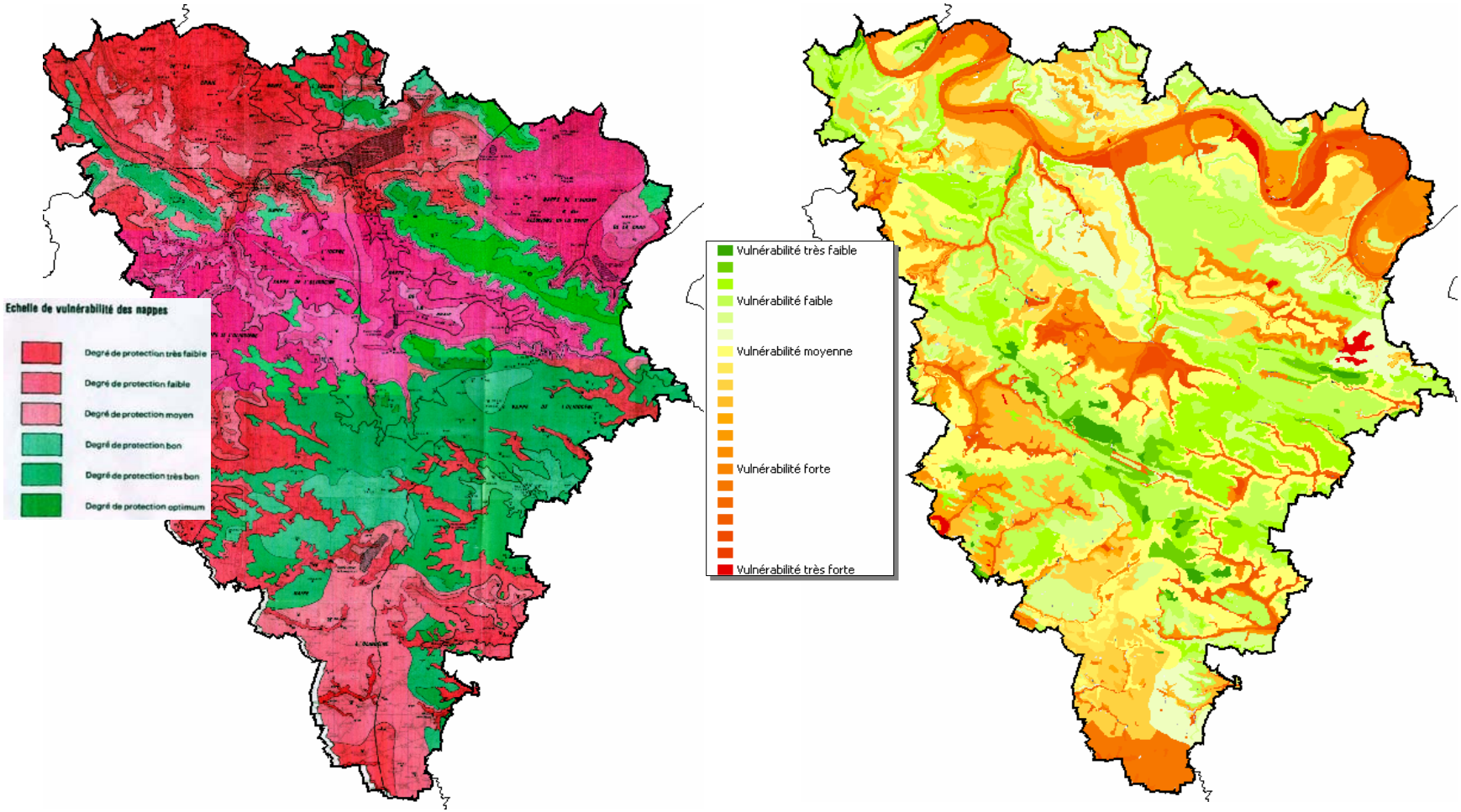


Figure 45 : Comparaison de la carte de vulnérabilité des Yvelines (carte de gauche, source: BRGM : 81 SGN 348 IDF) avec la carte obtenue par le biais de la méthode simplifiée de définition des notions de vulnérabilité des eaux souterraines (carte de droite)

6.6.3 La Champagne (l'aquifère de la craie)

Le document de référence utilisé pour cet essai réalisé en Champagne-Ardenne est la carte de vulnérabilité spécifique vis à vis des nitrates de la zone d'affleurement du faciès crayeux du Turonien supérieur et du Sénonien, Crétacé Supérieur.
Détermination de la vitesse de transfert de l'eau, des nitrates en zone non saturée crayeuse - Phase 1 : Identification des différents contextes hydrogéologiques. (cf. Rapport BRGM, en cours d'élaboration)

La méthode élaborée par J. Ricour (1998) dans le cadre d'une application à la nappe de la craie dans le secteur de Guines (Pas-de-Calais) a été utilisée et adaptée pour l'élaboration de la carte de référence. Les 4 critères considérés sont la lithologie de recouvrement, la topographie, l'épaisseur de la zone non saturée et la présence de tourbes qui jouent un rôle de dénitrification. Le degré de vulnérabilité est exprimé selon 4 classes (Vulnérabilité négligeable à nulle, Vulnérabilité faible, Vulnérabilité modérée et Vulnérabilité forte) représentées sur carte par un gradient de couleur (cf. figure suivante).

Le résultat du test de calage de la méthode d'analyse simplifiée de la vulnérabilité de l'aquifère de la craie est la carte présentée en illustration à droite. Sa comparaison avec la carte de référence (à gauche) indique un calage adéquat sur cette zone.

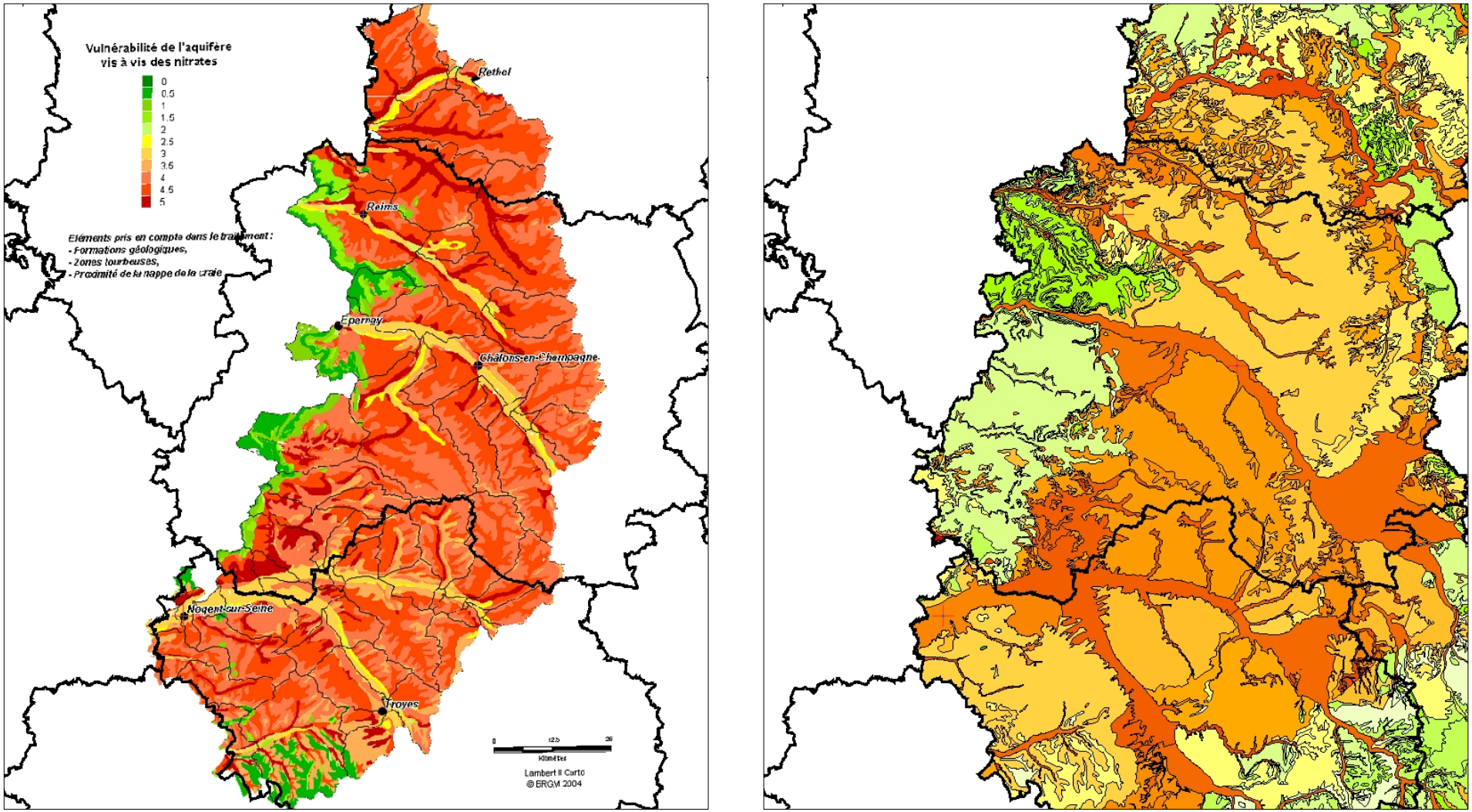


Figure 46 : Comparaison des cartes de vulnérabilité en craie champenoise (à gauche la méthode élaborée par J. Ricour, à droite méthode IDPR/ZNS 50/50)

6.6.4 La Bourgogne

Le calage de la méthode d'analyse simplifiée de la vulnérabilité des aquifères sur la Bourgogne a été réalisée de la même façon que pour les essais précédents. La carte de référence utilisée est la carte de vulnérabilité aux phytosanitaires des eaux de Bourgogne.

La comparaison de la carte de vulnérabilité des eaux de Bourgogne avec celle mise au point par la méthode simplifiée de définition des notions de vulnérabilité des eaux souterraines est présentée en illustration suivante

La comparaison des deux cartes (la carte de référence et celle obtenue à l'issue de la méthode d'analyse simplifiée) montre une nette correspondance concernant le degré de vulnérabilité affecté aux aquifères. Présentée en séance de travail, la comparaison de cette carte a montré la différence de perception existante entre une vulnérabilité spécifique (celle de grands aquifères généralisés aux produits phytosanitaires) et une vulnérabilité intrinsèque (celle des premières nappes d'eau rencontrées vis-à-vis d'un polluant supposé percoler, sans interaction avec le milieu, jusqu'aux niveaux saturés en eau)

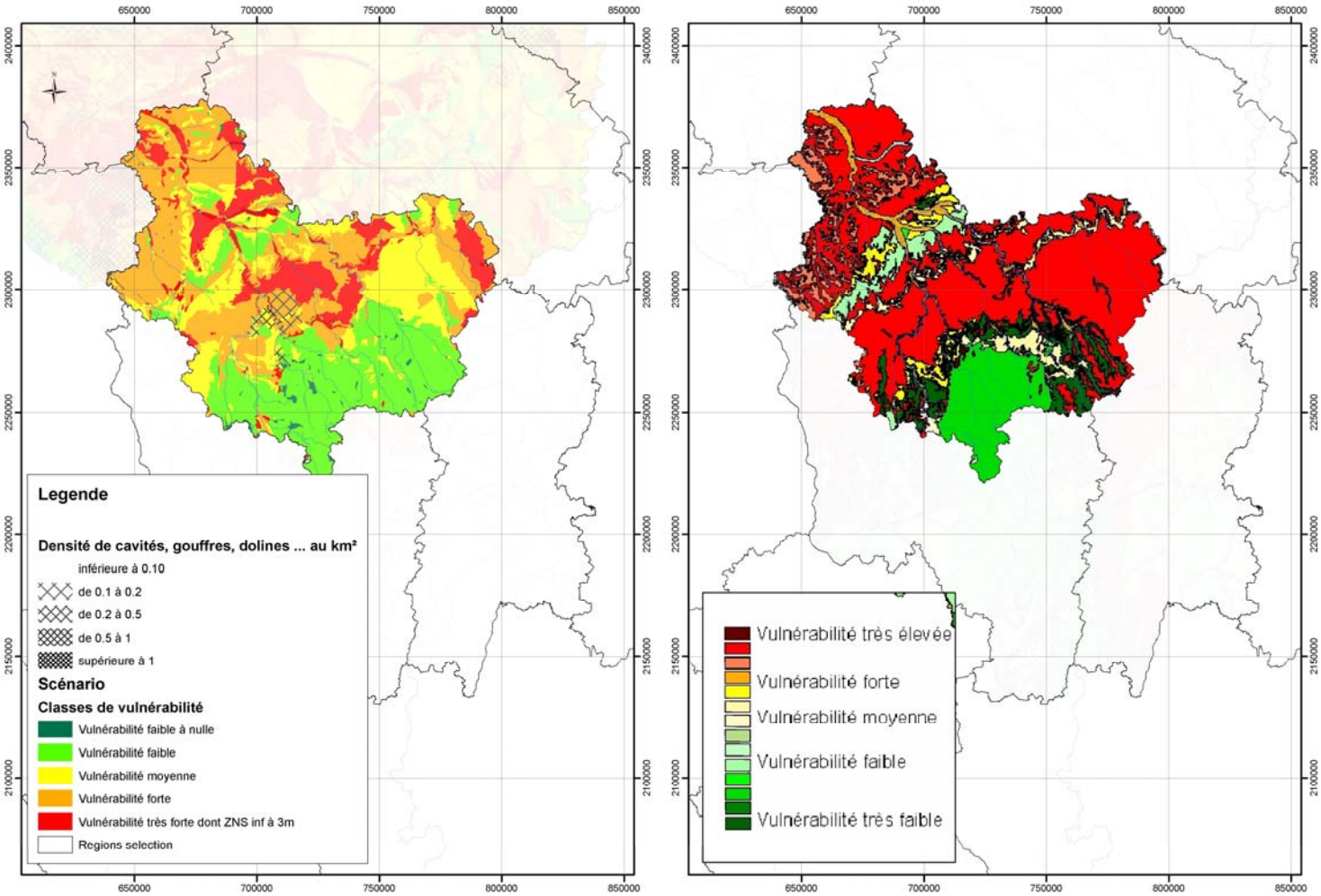


Figure 47: Comparaison des cartes de vulnérabilité en Bourgogne (à droite la méthode élaborée en Bourgogne pour les phytosanitaires, à gauche la méthode IDPR)

6.6.5 Conclusions de la validation de la méthode IDPR/ZNS par des zones de contrôle des résultats

Dans le cas de la Bourgogne, l'exploitation des résultats de la vulnérabilité simplifiée à l'échelle des unités fonctionnelles (même géologie, masse d'eau et bassin versant) permet en outre une meilleure précision cartographique de la vulnérabilité. Celle-ci a été confortée par les avis des experts déjà sollicités lors de l'établissement de la carte de vulnérabilité spécifique. Elle s'affranchi de l'approche intégratrice utilisée par ceux-ci pour la cartographie de la vulnérabilité spécifique en permettant un surcroit de détail mais la vision globale déduite de sa lecture reste identique.

Ces discussions d'experts lors des séances de travail collectives ont permit d'assurer la cohérence de la vulnérabilité simplifiée.

Pour le Cotentin et la Beauce, l'analyse de données complémentaires fournies au terme de l'étude ont permis de confirmer les hypothèses initiales (proximité de la nappe en milieu de socle, niveaux piézométriques issus des cartes piézométrique de 2002 pour la nappe de Beauce[13])

En région Champagne, la comparaison de cartes de vulnérabilité intrinsèque et spécifique montre également la limite de cet exercice avec le cas remarquable des formations alluviales. Dans la cartographie de la vulnérabilité intrinsèque, celles-ci sont de vulnérabilité très forte, due essentiellement à la proximité immédiate des eaux souterraines au sein des nappes d'accompagnement et un IDPR faible sur les formations des terrasses alluviales éloignées du lit mineur. Pour la vulnérabilité spécifique aux nitrates, les zones alluviales, hors des zones d'intrants, apparaissent moins vulnérables que les terres agricoles des grands interfluves.

[13] Analyse comparative sur une sélection de stations utilisées lors de la piézométrie 2002 sur la nappe de Beauce. Résultats : une grande majorité des valeurs mesurées restent encadrées ou débordent légèrement des bornes résultant du traitement. *« Ces différences qui apparaissent (les raisons peuvent être mutiples : piézométrie 2002 en très hautes eaux, nappes perchées, mesures piézo dans un ouvrage qui n'a pas retrouvé son niveau statique,...) ne sont donc pas de nature à remettre en question la méthologie utilisée au regard de l'échelle du projet. (DIREN Centre - SEMA) »*

6.7 MISE EN ŒUVRE DE LA CARTE DE VULNERABILITE

La carte de vulnérabilité intrinsèque simplifiée des eaux souterraines est composée de polygones élémentaires résultants de l'intersection des entités Géologie/BDRHF V1/Zones hydrographiques de BD Carthage et Référentiel des masses d'eau de niveau 1. Les attributs qui la composent sont décrits dans l'illustration suivante, la table est nommée ALL_UF dans la Geodatabase **AESN Vulnerabilite.mdb**

	Nom du champ	Type de données	Description
▶	OBJECTID	NuméroAuto	
	Shape	Objet OLE	
🔑	Rang_unique	Numérique	Identifiant unique de l'unité fonctionnelle
	Region	Texte	Région ou grand domaine géologique
	ZONEHYDRO	Texte	Code de la zone hydrographique au sens BD CARTHAGE
	CODE_BDRHFV1	Texte	Code de l'unité BDRHF V1
	NOM_BDRHFV1	Texte	Nom de l'unité BDRHF V1
	Type1_BDRHFV1	Texte	Type de l'unité BDRHF V1
	Type2_BDRHFV1	Texte	Type de l'unité BDRHF V1
	SOURCE_GEO	Texte	Origine de l'unité géologique
	Stratigraphie	Texte	Stratigraphie simplifiée (origine 1M)
	Lithologie	Texte	Lithologie simplifiée (origine 50000)
🔑	MASSE_EAU_	Texte	Code la masse d'eau souterraine
	TYPE_FR	Texte	Type de la masse d'eau souterraine
	LIBRE	Texte	Caractère LIBRE de la masse d'eau souterraine
	CAPTIF	Texte	Caractère CAPTIF de la masse d'eau souterraine
	ASS_LIBRE	Texte	Caractère ASS_LIBRE de la masse d'eau souterraine
	ASS_CAPTIF	Texte	Caractère ASS_CAPTIF de la masse d'eau souterraine
	KARSTIQUE	Texte	Caractère KARSTIQUE de la masse d'eau souterraine
	IDPR	Numérique	Valeur moyenne de la grille IDPR lue pour l'unité spatiale
	ZNS	Numérique	Valeur moyenne de la grille ZNS lue pour l'unité spatiale
	VCritere_IDPR	Numérique	Critère (0-100) déduit de la valeur moyenne de la grille IDPR lue pour l'unité spatiale
	VCritere_ZNS	Numérique	Critère (0-100) déduit de la valeur moyenne de la grille ZNS lue pour l'unité spatiale
	part_IDPR	Numérique	Part relative du critère IDPR
	part_ZNS	Numérique	Part relative du critère ZNS
	Vulnerabilite	Numérique	Vulnérabilité calculée
	Den_Ind_Riv	Numérique	Densité de cavité
	CLASS_V	Texte	Classification A-E (0-20,20-40,40-60,60-80,80-100)
	Shape_Length	Numérique	
	Shape_Area	Numérique	

Figure 48: Liste des champs composants le fonds cartographique de la vulnérabilité intrinsèque

Il existe un découpage supplémentaire de ces unités selon les polygones de la base de données Corine Land Cover[14] version 2000 où ont été distingués les cultures permanentes, les forêts et milieux semi-naturels, prairies, surfaces en eau, terres arables, territoires artificialisés, zones agricoles hétérogènes et zones humides.
Ce traitement permet les analyses suivantes

	Vulnérabilité faible	Vulnérabilité faible	Vulnérabilité moyenne	Vulnérabilité forte	Vulnérabilité très forte	Nappe sub affleurante
Cultures permanentes	2.8%	26.7%	33.9%	30.8%	5.7%	0.0%
Forêts et milieux semi-naturels	1.9%	21.9%	31.8%	34.5%	9.8%	0.0%
Prairies	0.9%	16.9%	21.0%	54.7%	6.5%	0.0%
Surfaces en eau	0.5%	5.6%	36.3%	47.0%	10.2%	0.3%
Terres arables	0.5%	10.3%	32.0%	38.1%	19.0%	0.0%
Territoires artificialisés	1.0%	11.5%	29.8%	42.6%	15.0%	0.2%
Zones agricoles hétérogènes	0.7%	12.5%	22.0%	53.0%	11.7%	0.0%
Zones humides	0.5%	2.9%	21.8%	69.4%	5.4%	0.0%

Tableau 3 : Part relative du territoire selon Corine-Land-Cover simplifiée à 8 classes et la vulnérabilité intrinsèque

[14] Table : Vulnerabilite_Corine_Land_Cover dans la géodatabase

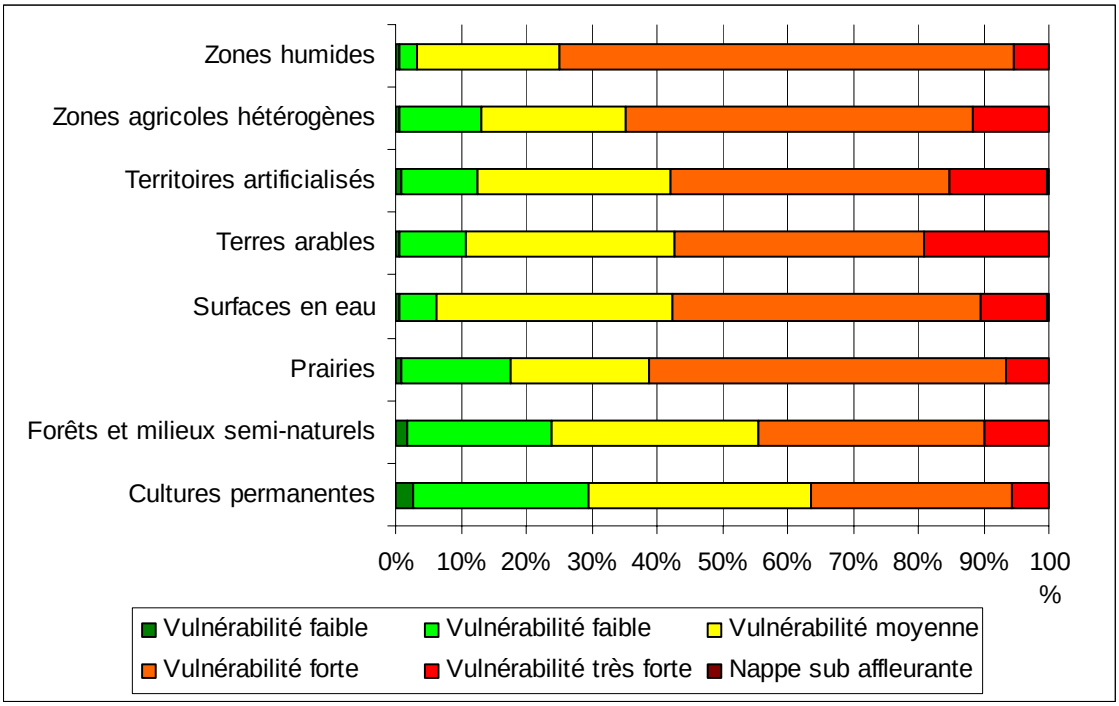


Figure 49 : Parts relatives des territoires des différentes typologies de la couverture Corine LC selon leur vulnérabilité intrinsèque simplifiée.

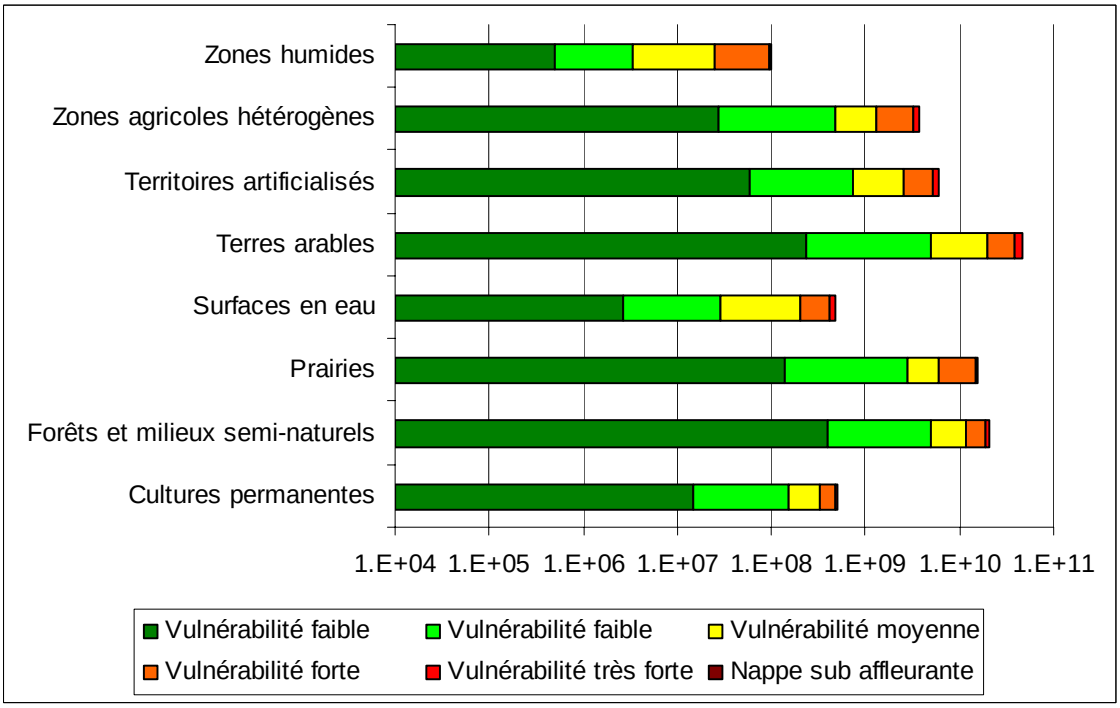


Figure 50 : Surface des territoires des différentes typologies de la couverture Corine LC selon leur vulnérabilité intrinsèque simplifiée.

7 Le système d'information lié à la vulnérabilité des eaux souterraines du bassin Seine-Normandie

L'ensemble des données cartographiques présentées dans cette étude a été porté dans une base de données géographique au format ArcDesktop©
Les entités fonctionnelles composent ainsi une couverture géographique composée de polygones et d'une table attributaire. 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 sont fournies au format Grid d'ArcInfo.

7.1 GEODATABASE « AESN VULNERABILITE.MDB »

La géodatabase AESN Vulnerabilite.mdb est au format MS/ACCESS2000©. Elle peut être, avec les précautions d'usage, exploitée directement sous le logiciel ACCESS2000©. Ainsi, à son lancement apparaît le formulaire suivant :

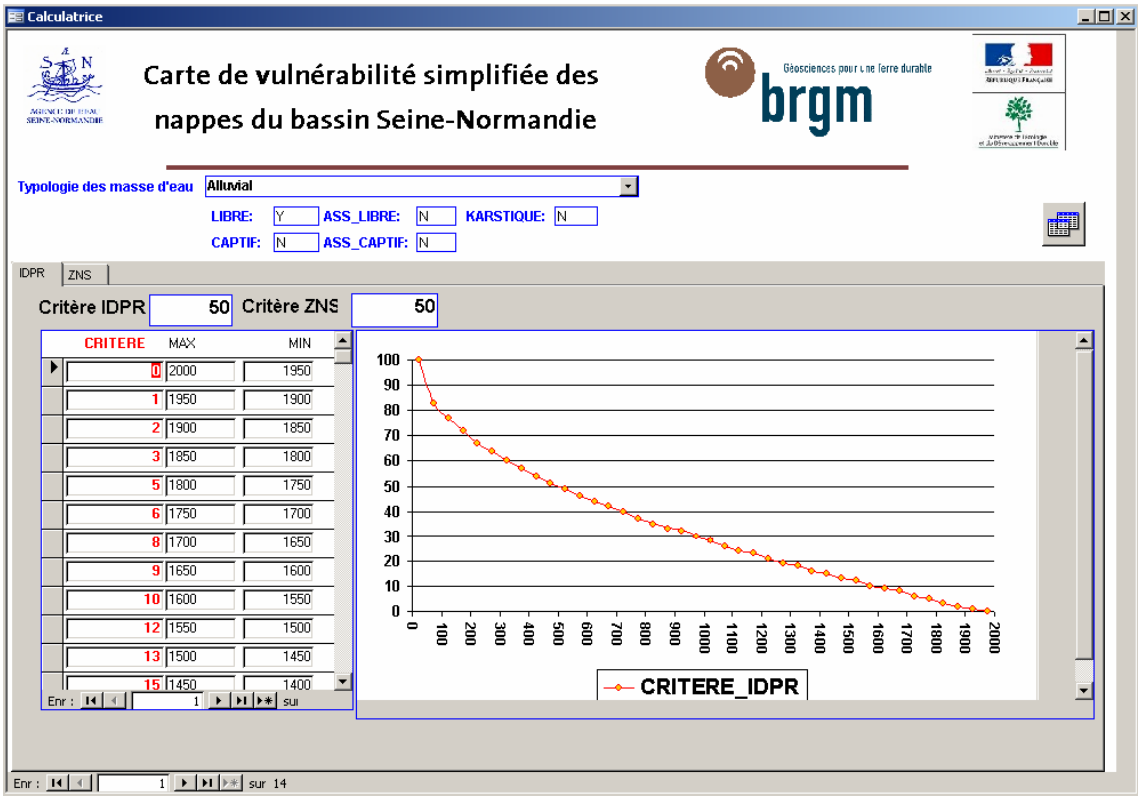


Figure 51 : formulaire Access de calcul de l'indice de vulnérabilité

Ce formulaire permet d'établir l'indice de vulnérabilité de chacune des entités fonctionnelles composant la carte générale. Il présente selon le type de masse d'eau souterraine et ses caractéristiques (14 combinaisons possibles en SN), les éléments du calcul multicritère.

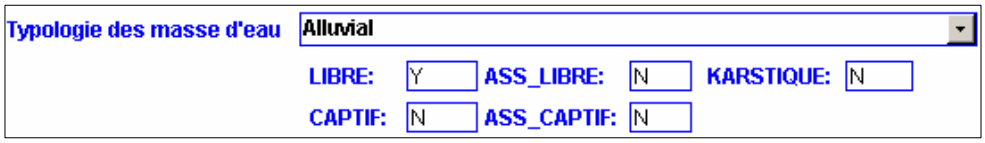


Figure 52: 14 combinaisons type/nature de l'écoulement recensées en Seine-Normandie

7.2 CALCULATRICE - CRITERES IDPR ET ZNS

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.**

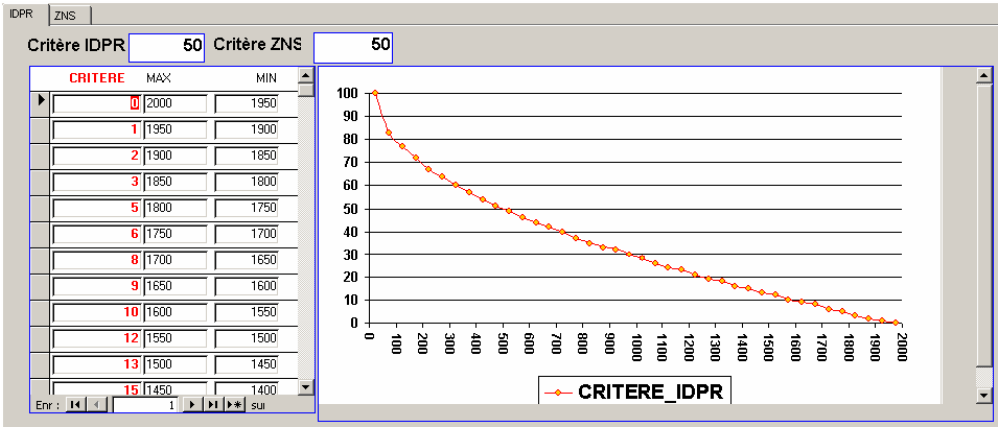


Figure 53: Onglet IDPR de la calculatrice de vulnérabilité

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

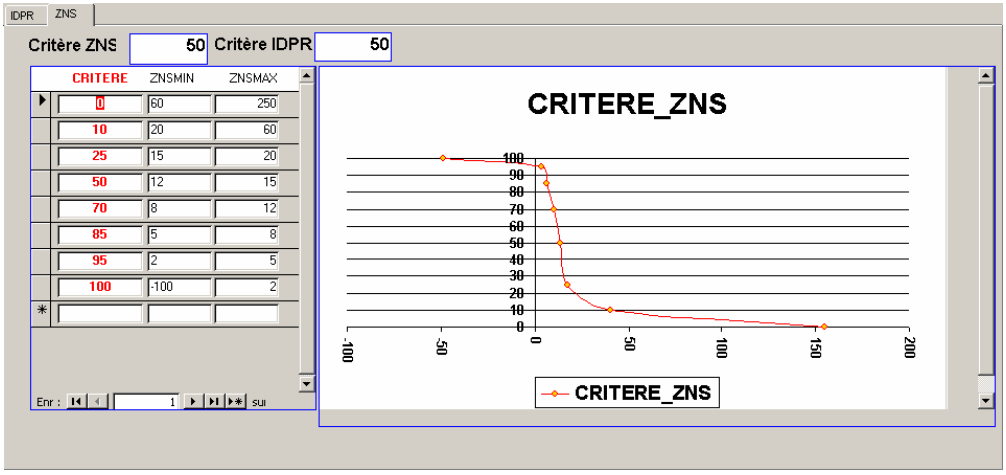


Figure 54 : Onglet ZNS de la calculatrice de vulnérabilité

Le poids relatif des deux critères, pour chacune des 14 occurrences est modifiable avec les précautions d'usage citées ci-dessus.

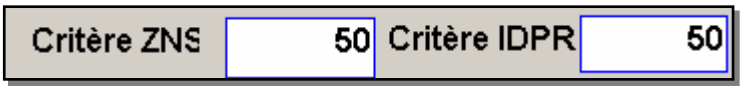


Figure 55: Définition des poids relatifs des critères IDPR et ZNS

Le résultat des modifications apportées aux paramètres du calcul de la vulnérabilité des unités fonctionnelles des eaux souterraines du Bassin Seine-Normandie 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.

7.3 FICHIERS NUMERIQUES ASSOCIES AU CDROM

7.3.1 Les cartes

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

- Cartes de vulnérabilité par masses d'eau.
- Carte de vulnérabilité du bassin Seine-Normandie au format AO.

7.3.2 Les données

Les données du SIG sont contenues dans le répertoire SIG sous forme d'une géodatabase contenant :

- 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,
    - Densité de cavité pour l'unité fonctionnelle considérée.

- 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 mètres,
- La grille de calcul de l'IDPR au pas de 100m,
- La grille de calcul de la ZNS moyenne au pas de 250m.

Ces dernières informations sont fournies selon deux projections distinctes : Lambert II étendue et Lambert 93 (répertoires SIG/GRID2E et SIG/GRID93). Concernant les données vectorielles la projection utilisée est de type Lambert II étendue.

7.3.3 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

La calculatrice du critère de la vulnérabilité est composée d'un formulaire ACCESS celui-ci est inclus dans la géodatabase décrite au paragraphe précédent.

7.3.4 Atlas cartographique BASOLHYD

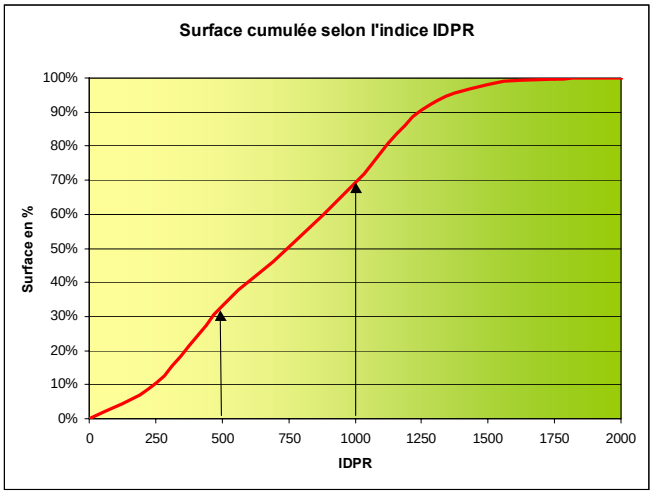
Les documents cartographiques comprenant les résultats de l'analyse BASOLHYD fondée sur le nouveau scénario issue de la carte de vulnérabilité des eaux souterraines (cf annexe 4) sont également inclus dans ce CDRom (Répertoire ATLAS BASOLHYD).

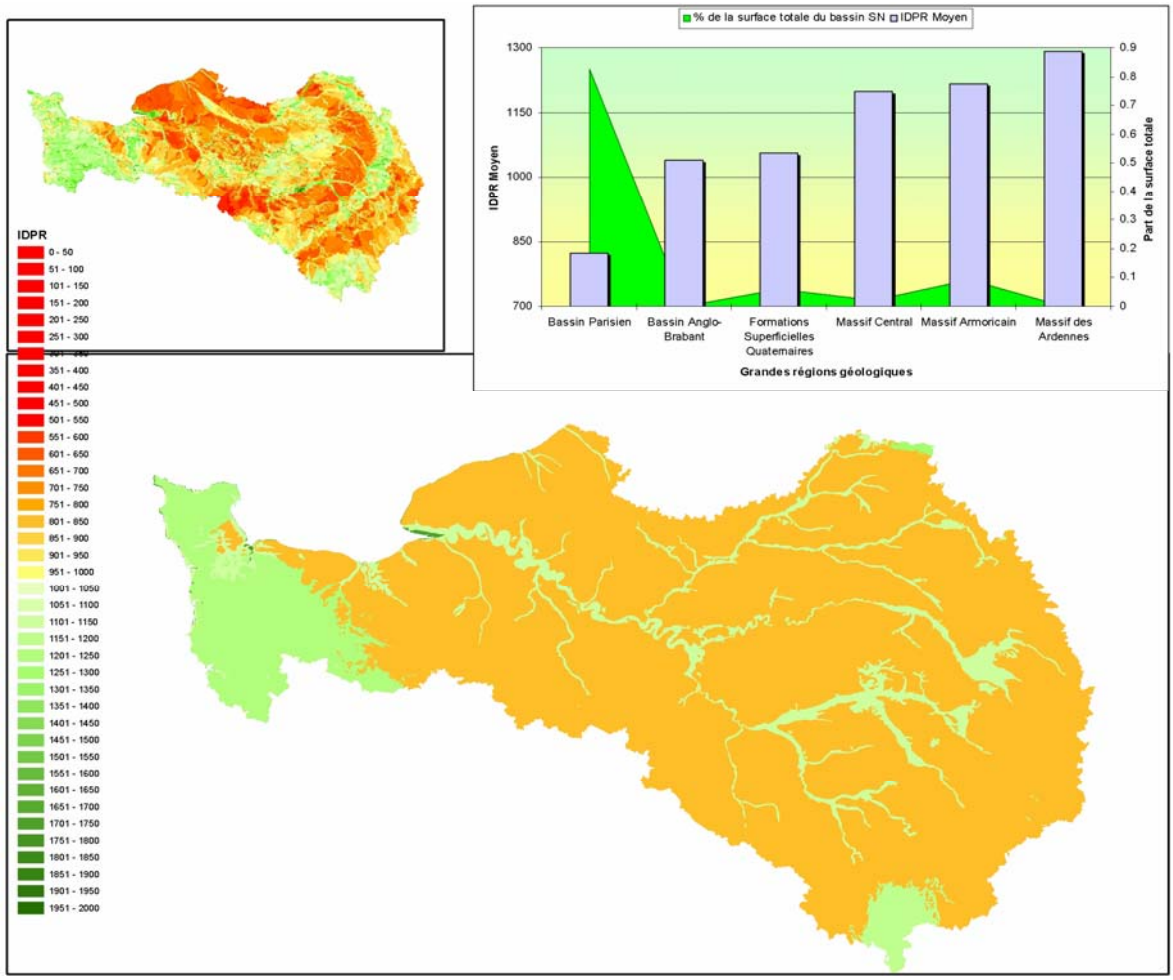
8 Conclusion

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 du Bassin de Seine-Normandie, 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.

Ainsi le contraste observé entre les domaines post-orogéniques et les formations du socle est nettement redevable au critère IDPR.





Ce contraste marqué, qui place le domaine sédimentaire comme majoritairement plus infiltrant que le domaine du socle est conforme à la connaissance régionale des experts. Ce caractère est indirectement reconnu également par la classification qui a été faite du risque de non atteinte du bon état qualitatif initial des masses d'eau (NABE). En effet sur 134 masses d'eau à dominante sédimentaire du district Seine et Côtiers Normands, 122 sont classées à risque de non atteinte de bon état qualitatif contre 8 masses d'eau en domaine de socle parmi les 14 que comprend le district.

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 naturels 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.

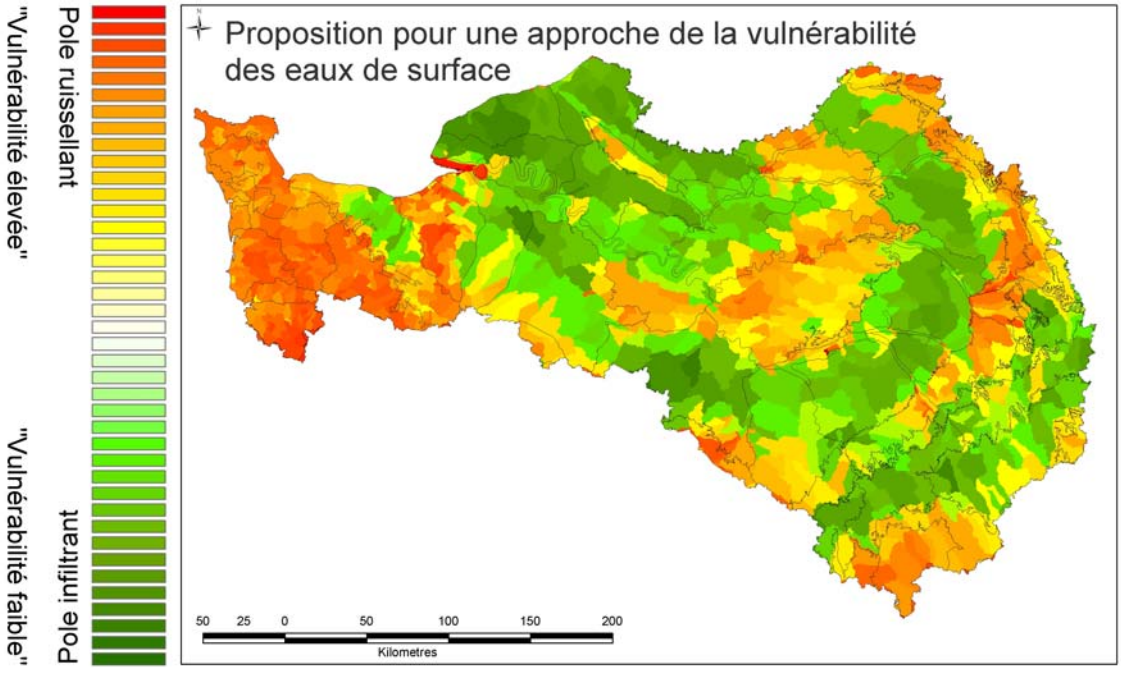


Figure 56: Proposition d'étude de la vulnérabilité des eaux de surface par unités basins versants

Sur la base de ce travail fait à l'échelle du Bassin Seine-Normandie, 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.

L’outil BASOLHyd, développé à l’issue de la première étape intègrera les données de la carte de vulnérabilité présentée dans cette analyse. Les résultats du croisement de ces informations seront diffusés dans un document de synthèse générale de la convention cadre de cette étude.

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 représentants 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 4 : 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
			1	2	3	4
	Zone fracturée	1	Zone linéamentaire susceptible de correspondre à des zones fracturées			
			1			
Carte de sensibilité	Typologie de l'occupation du sol (urbanisation, routes, forêts...)	Superposition par classe à la carte de vulnérabilité	Classe 1	Classe 2	Classe 3	
			forêts, friches	milieu agricole et marécageux	milieu urbain et industriel, routes, carrières, décharges...	

Tableau 5 : 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 présenté dans le tableau ci-après.

Images	Variables Paramètres	Echelle de vulnérabilité et poids relatif de chaque paramètres (Très vulnérable) (Peu vulnérable)										Poids Global
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					de recharge		hors zone de recharge		urbain		3
	Valeur attribuée					Initiale 1	Finale 3	Initiale 10	Finale 30	Initiale 25	Finale 75	
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					très fracturé		peu fracturé				1
	Valeur attribuée					Initiale 1	Finale 1	Initiale 25	Finale 25			

Tableau 6 : 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).

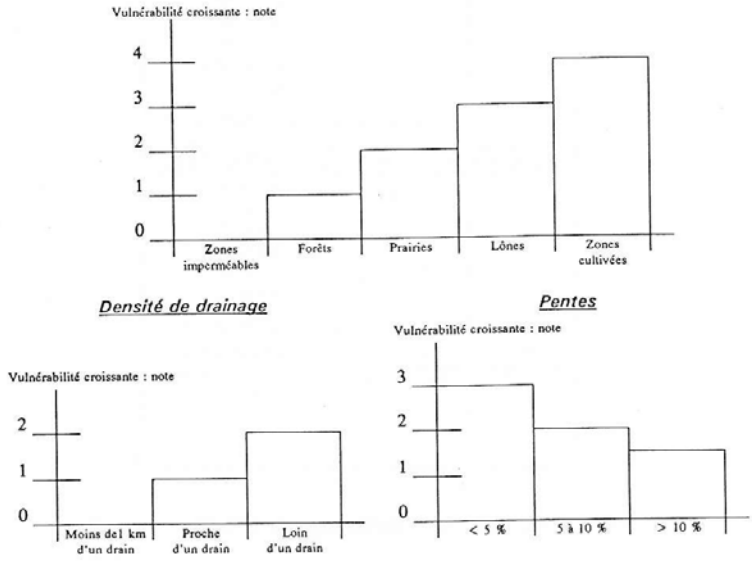


Figure : Critères relatifs à la surface du sol (M.F. Suais et al., 1990)

ANNEXE 2

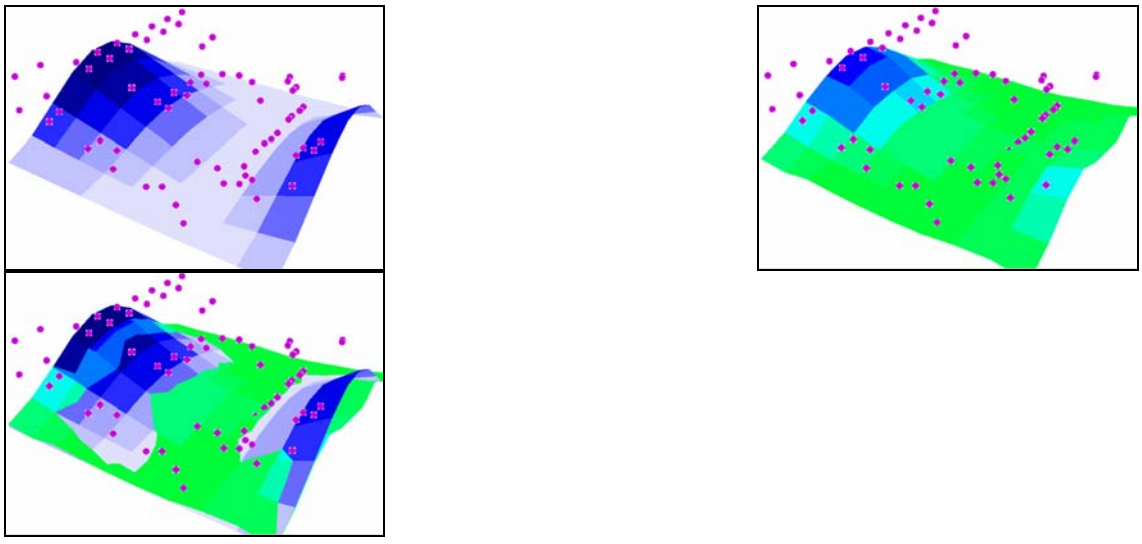
Les méthodes d'interpolation

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 (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.

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



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'interfluves 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

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

$\mathbf{N_h}$: Nombre de paires d'échantillons séparées par le vecteur h.

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

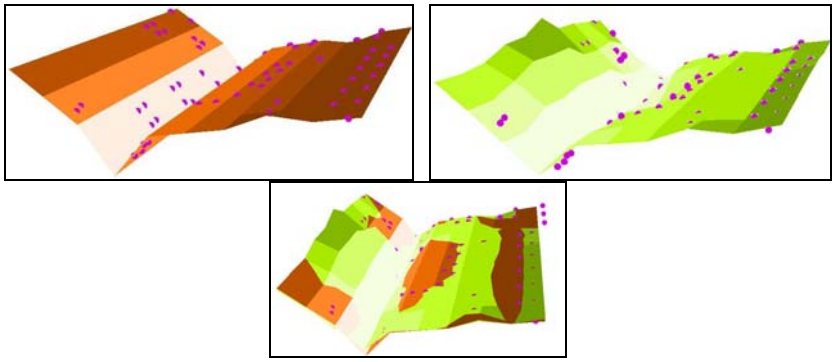
Le krigeage en un point de l'espace s'écrit comme une combinaison linéaire des points voisins.

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.

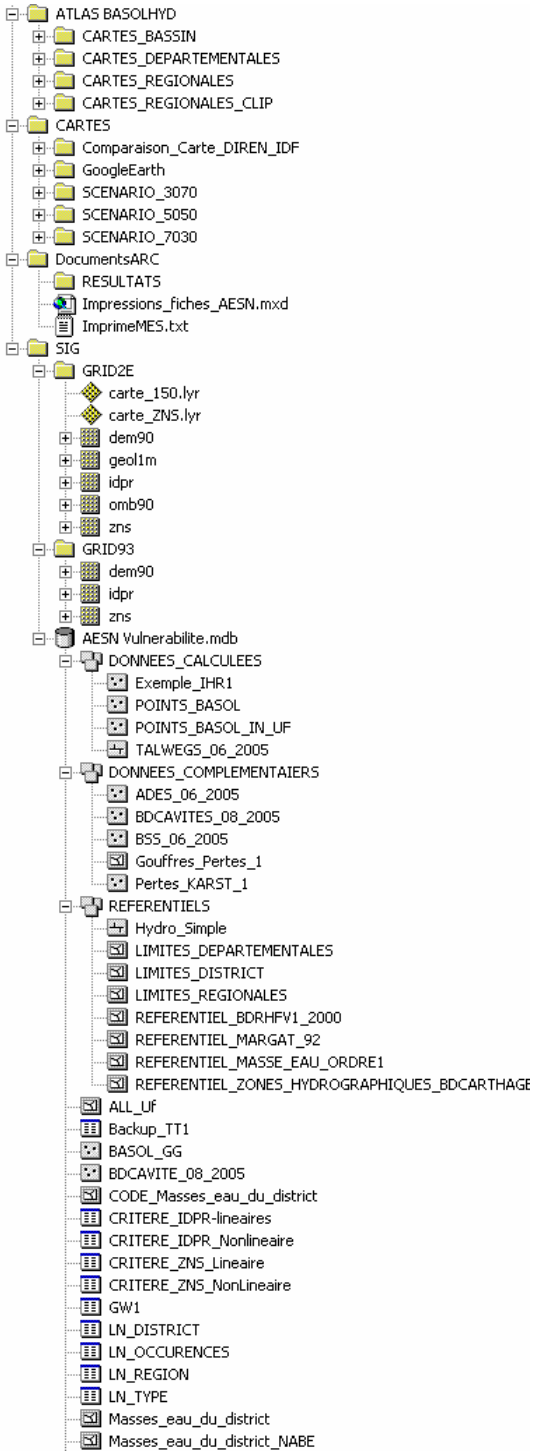
ANNEXE 3

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 les répertoires **ATLAS BASOLHYD** et **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 GRID93) et d'une géodatabase (AESNVulnerabilite.mdb au format MsAccess 2000).