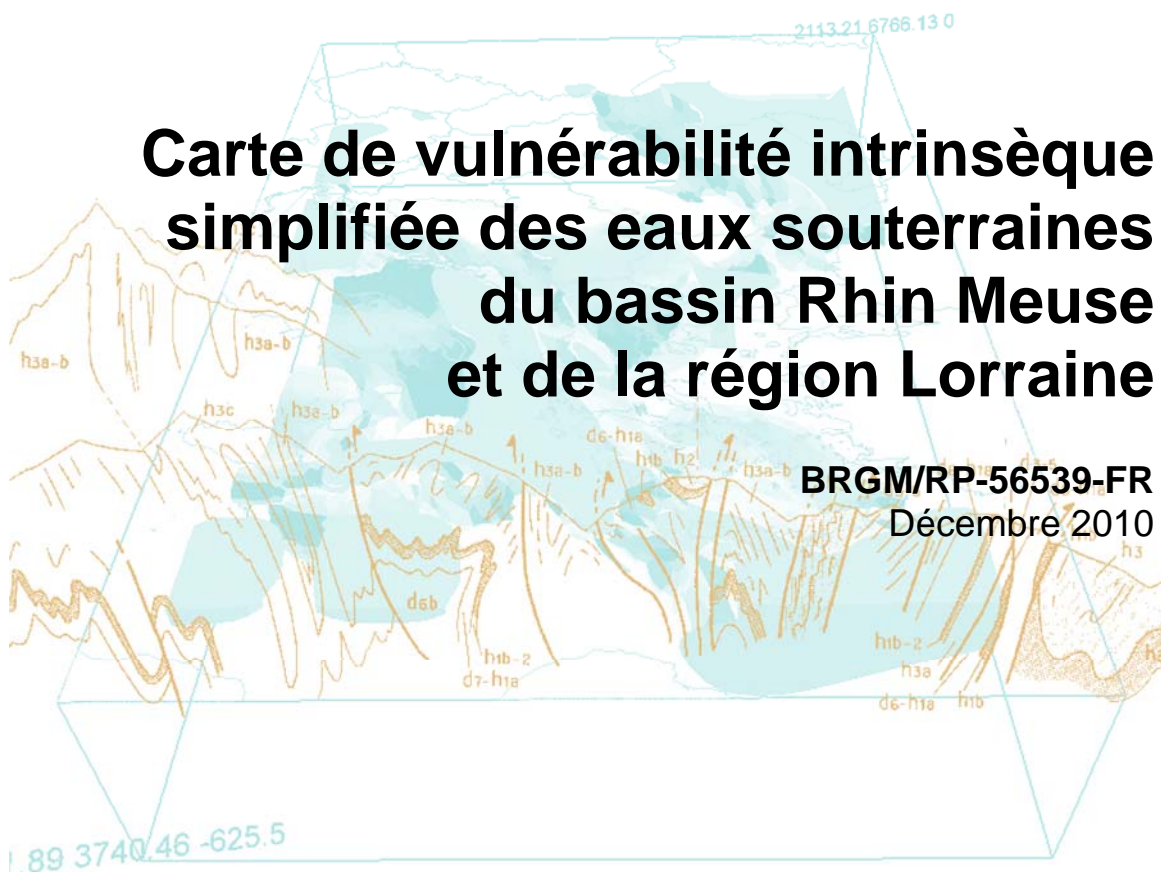




Carte de vulnérabilité intrinsèque simplifiée des eaux souterraines du bassin Rhin Meuse et de la région Lorraine



BRGM/RP-56539-FR
Décembre 2010

Carte de vulnérabilité intrinsèque simplifiée des eaux souterraines du bassin Rhin Meuse et de la région Lorraine

BRGM/RP-56539-FR
Décembre 2010

Étude réalisée dans le cadre des projets
de Service public du BRGM 2007 EAU J14

V. Mardhel

Vérificateur :

Nom : S. Ollagnier

Date : 26/11/2010

(Original signé)

Approbateur :

Nom : D. Midot

Date : 16/12/2010

(Original signé)

En l'absence de signature, notamment pour les rapports diffusés en version numérique,
l'original signé est disponible aux Archives du BRGM.

Le système de management de la qualité du BRGM est certifié AFAQ ISO 9001:2008.

Mots clés : Vulnérabilité intrinsèque simplifiée, Eaux souterraines, Agence de l'Eau Rhin Meuse, Lorraine, Masses d'eau souterraine, Analyse multicritère, SIG, IDPR.

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

V. Mardhel (2010) – Carte de vulnérabilité intrinsèque simplifiée des eaux souterraines du bassin Rhin Meuse et de la Région Lorraine, BRGM/RP-56539-FR, 67 p, 34 figures, 1 ann., 1 Cd-Rom.

Synthèse

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

- L'indice de développement et persistance des réseaux (IDPR)
- L'épaisseur de la zone non saturée (ZNS).

Elle porte sur la totalité du territoire décrit par les limites de l'Agence de l'Eau Rhin-Meuse étendue au territoire complet de la région Lorraine et à celui occupé par les masses d'eau souterraines codifiées 2xxx.

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 simplifiée car elle exploite à l'échelle d'un grand bassin hydrographique national, l'indice IDPR. Celui-ci a vocation à harmoniser, à de telles échelles, l'analyse de la vulnérabilité des eaux souterraines. 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 première combinaison des critères exploités parmi les différents scénarii de l'analyse proposée. Cette combinaison décrite à la suite de ce rapport peut être affinée, recomposée dans le cadre d'étude et d'enjeux particuliers. L'outil SIG développé et remis sur CDRom, contient les éléments nécessaires et suffisants à de telles analyses.

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.

Cette carte de vulnérabilité intrinsèque simplifiée des eaux souterraines constitue le document final qui pourra être exploité par la suite dans le cadre des études préalables à la mise en place des réseaux DCE Eaux souterraines

Avertissement : l'échelle de résolution de cette étude est le 1/100000. Les données de vulnérabilité peuvent être exploitées sur des cartes au 1/50000, à la condition de rappeler que la précision des données est décamétrique. Si l'on traduit cela en limites d'utilisation de la cartographie, les données de vulnérabilité peuvent être utilisées sans restriction à l'échelle d'un département, ou d'un SAGE. En revanche, les données ne doivent pas être exploitées à l'échelle d'une commune. En ce qui concerne les bassins d'alimentation de captage (BAC), les données sont utilisables – avec précaution – seulement pour de grands bassins (plusieurs dizaines de km²), et plutôt pour des milieux poreux et non alluviaux.

Sommaire

1. Introduction	9
1.1. CONTEXTE	9
1.2. OBJECTIF	9
2. La vulnérabilité des aquifères : rappels et méthodologie de cartographie	11
2.1. NOTIONS GENERALES DE VULNERABILITE.....	11
2.2. CRITERES UTILISES.....	13
2.3. METHODE D'ANALYSE SIMPLIFIEE DE LA VULNERABILITE DES EAUX....	14
2.4. DONNEES DE BASE UTILISEES DANS LE CADRE DE L'ETUDE	15
3. Extension spatiale du territoire d'étude	17
4. Détermination de l'épaisseur de la zone non saturée	19
4.1. CARTOGRAPHIE DES NIVEAUX D'EAU MOYENS.....	19
4.2. CALCUL ET CARTOGRAPHIE DE L'ÉPAISSEUR DE LA ZONE NON- SATURÉE	20
4.2.1. Définition des unités fonctionnelles	21
5. Cartographie de l'indice de développement et persistance des réseaux (IDPR)	25
5.1. GEOLOGIE ET RIVIERES.....	25
5.2. DEFINITION DE L'IDPR (INDICE DE DEVELOPPEMENT ET PERSISTANCE DES RESEAUX).....	27
5.3. COUCHES D'INFORMATIONS UTILISEES.....	27
5.4. CALCUL DU RESEAU DES TALWEGS.....	28
5.4.1. Pré traitement du MNT - zones de dépression	30
5.4.2. Pré traitement du MNT - zones planes.....	31
5.4.3. Réseau de Talweg calculé	31
5.5. CALCUL DE L'IDPR	32

5.6. ANALYSE DES RESULTATS FOURNIS PAR L'IDPR	37
5.6.1. Agrégation des données par unités spatiales	37
5.6.2. Nitrates observés dans ADES© et IDPR	38
6. Cartographie de l'indice simplifié de vulnérabilité.....	41
6.1. CALCUL DE LA VULNERABILITE DES EAUX SOUTERRAINES	41
6.2. CRITERE IDPR	42
6.3. CRITERE ZNS	43
6.4. ANALYSE CRITIQUE DES RESULTATS	54
6.4.1. Indice IDPR hors domaine sédimentaire.....	54
6.4.2. Poids relatifs IDPR/ZNS dans le cas des vallées alluviales.....	54
6.4.3. Poids relatifs IDPR/ZNS dans le cas des aquifères karstiques et des grandes masses d'eau identifiée comme imperméables localement aquifères	56
7. Le système d'information lié à la vulnérabilité des eaux souterraines du bassin Rhin Meuse.....	59
7.1. LES CARTES	59
7.2. LES DONNEES GEOGRAPHIQUES.....	59
7.3. LES GRILLES DE CALCUL INTERMEDIAIRES.....	60
8. Conclusion.....	61
9. Bibliographie	65

Liste des figures

Figure 1 : Définition de la zone non saturée. (Hydrogéologie, G. Castany, 2000).....	12
Figure 2 : Carte du territoire étudié.....	17
Figure 3 : Points d'eau et densité de points d'eau à l'échelle du territoire d'étude.....	20
Figure 4 : Carte de l'épaisseur moyenne de la zone non saturée, (grille de données).....	21
Figure 5 : Intersection des couches d'informations constituant les unités fonctionnelles	22
Figure 6 : Subdivision du domaine en unités fonctionnelles	22
Figure 7 : Carte de l'épaisseur moyenne de la zone non saturée par unités fonctionnelles.....	23

Figure 8 : Réseau hydrographique (Source BdCarthage)	29
Figure 9 : Carte du réseau des talwegs ("chemin de la vallée") : Données fournies en annexe (couche Talwegs)	32
Figure 10 : Données brutes du calcul de l'IDPR - Données fournies en annexe (Grille IDPR).....	35
Figure 11 : IDPR affecté aux unités fonctionnelles.....	36
Figure 12 : Relation entre les classes de valeurs de l'IDPR au voisinage immédiat des points de mesure (rayon de 500 mètres) et la dernière valeur de concentration en nitrates effectuée et archivée dans la base ADES en 2007.....	38
Figure 13 : Corrélation entre indice IDPR et concentration en nitrates.	39
Figure 14 : Valeurs normées du critère IDPR selon la nature des masses d'eau	43
Figure 15 : Valeurs normées du critère ZNS selon la nature et le type d'écoulement des masses d'eau	44
Figure 16 : Représentation du critère IDPR, avec une extension à l'emprise des masses d'eau qui intersectent le bassin Rhin Meuse (l'échelle de la carte se trouve fig. 27).	45
Figure 17 : Représentation du critère ZNS, avec une extension à l'emprise des masses d'eau qui intersectent le bassin Rhin Meuse (l'échelle de la carte se trouve fig. 27).	46
Figure 18: Scénario 10% IDPR et 90% ZNS	47
Figure 19: Scénario 20% IDPR et 80% ZNS	47
Figure 20: Scénario 30% IDPR et 70% ZNS	48
Figure 21: Scénario 40% IDPR et 60% ZNS	48
Figure 22: Scénario 50% IDPR et 50% ZNS	49
Figure 23: Scénario 60% IDPR et 40% ZNS	49
Figure 24: Scénario 70% IDPR et 30% ZNS	50
Figure 25: Scénario 80% IDPR et 20% ZNS	50
Figure 26: Scénario 90% IDPR et 10% ZNS	51
Figure 27 : Légende des scénarios présentés.....	51
Figure 28 : Poids du critère ZNS (en % du total)	52
Figure 29: Poids du critère IDPR (en % du total).....	53
Figure 30 : Vulnérabilité des eaux souterraines – Typologie selon un seuil ZNS à 3 m	55
Figure 31: Poids du critère IDPR (en % du total) – extrait ME 2002	56
Figure 32 : Carte de vulnérabilité intrinsèque du bassin Rhin-Meuse et de la Lorraine.....	57
Figure 33: Classe de vulnérabilité en parts relatives de la surface total du territoire d'étude.....	61
Figure 34: Classe de vulnérabilité en parts relatives par types de masses d'eau souterraine	62

Liste des annexes

Annexe 1 : Méthodes existantes de cartographie de la vulnérabilité des aquifères	67
--	----

1. Introduction

1.1. CONTEXTE

La Directive Cadre Européenne sur l'eau (DCE) impose à chaque état membre l'identification de masses d'eau souterraine qui correspondent à des unités géographiques pour lesquelles seront établis des états et définis des objectifs environnementaux. Ceux-ci sont assignés à chaque masse d'eau et doivent être atteints, pour l'essentiel, pour l'année 2015. Cela concerne notamment le bon état chimique. Pour ce faire, les masses d'eau ont été définies dans les différents domaines géologiques.

L'agence de l'eau doit mettre en place un réseau de surveillance permettant d'avoir des informations objectives et régulières sur l'état de ces masses d'eau (article 8 de la DCE). Les critères requis pour ces réseaux de surveillance sont décrits dans l'annexe V de la directive cadre.

Un cahier des charges national précise les grandes orientations pour la mise en place de ces réseaux. Néanmoins, de nombreux points de méthode restent à définir, comme par exemple la manière de déterminer l'indice de représentativité associé à un réseau, dont le calcul est demandé par la Directive.

C'est pourquoi l'Agence de l'eau Rhin-Meuse a engagé une collaboration avec le BRGM au début de l'année 2007, dans le but général de définir la densité et la localisation optimales des points de surveillance, ainsi que les fréquences d'analyses à réaliser sur chaque point. Cet objectif ne pouvait être atteint sans l'utilisation de données concernant la vulnérabilité des eaux souterraines.

1.2. OBJECTIF

Ainsi, l'une des tâches de l'étude confiée au BRGM a consisté à réaliser une carte de vulnérabilité intrinsèque simplifiée des eaux souterraines du bassin Rhin Meuse et de la Lorraine, en appliquant la méthode d'Indice de Développement et de Persistance des Réseaux (IDPR) déjà exploitée par les bassins Seine Normandie, Loire Bretagne et Rhône Méditerranée & Corse.

Le territoire d'étude est l'extension géographique des masses d'eau souterraines du district Rhin-Meuse.

2. La vulnérabilité des aquifères : rappels et méthodologie de cartographie

2.1. 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 : $R(\text{isque}) = A(\text{léa}) \times E(\text{njeux})$.
- **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 cible étant ainsi la première nappe d'eau souterraine rencontrée. 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.

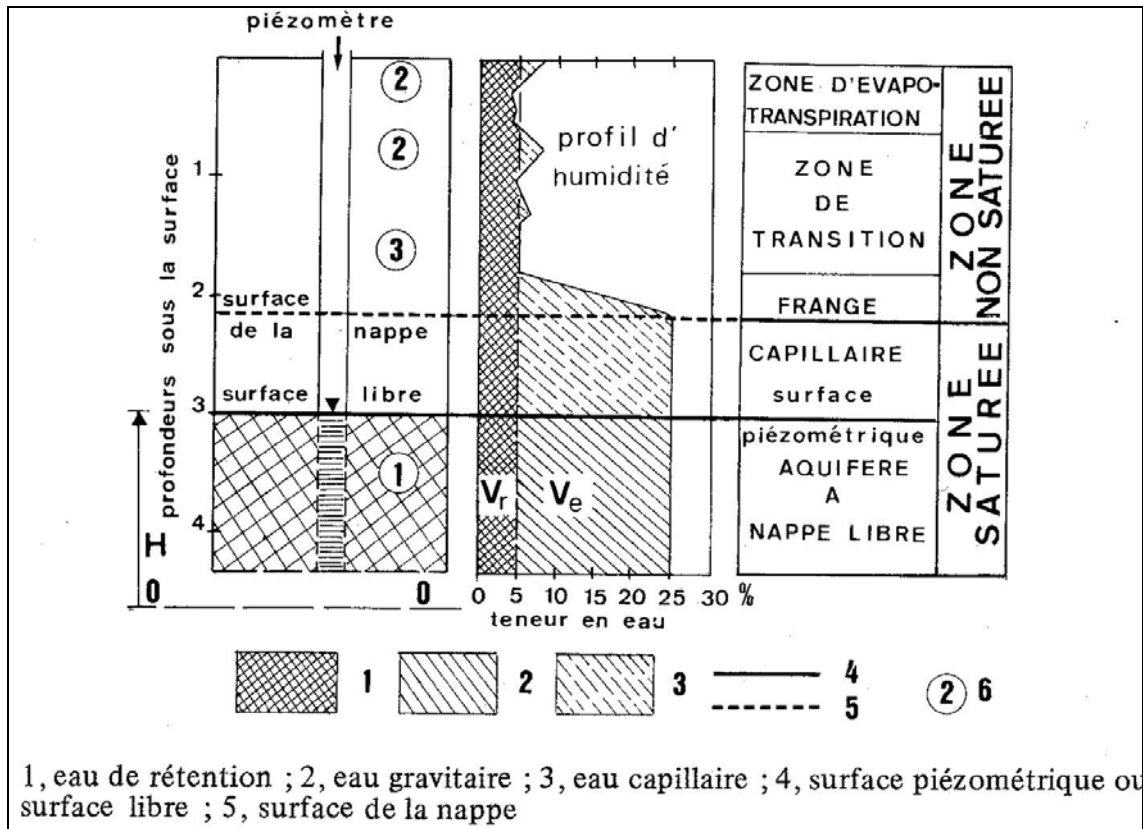


Figure 1 : Définition de la zone non saturée. (Hydrogéologie, G. Castany, 2000)

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.

2.2. 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.

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

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.

2.3. 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 Rhin-Meuse 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 (cf. § 4).
- ***L'indice de développement et de persistance des réseaux*** qui tend à unifier et simplifier l'approche géomorphologique relative à la nature des formations de couverture des premières nappes rencontrées. Il permet une analyse régionale simplifiée de la vulnérabilité des eaux qui en l'absence de données précises du milieu saturé, s'applique aux nappes dites phréatiques. Cet indice est détaillé au chapitre 5.

2.4. 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
- 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

3. Extension spatiale du territoire d'étude

L'espace de travail défini pour l'étude de vulnérabilité correspond à l'extension du territoire de l'Agence de l'Eau Rhin-Meuse étendu au territoire de la Région Lorraine et l'étendue effective des masses d'eau codifiées en (2xxx).

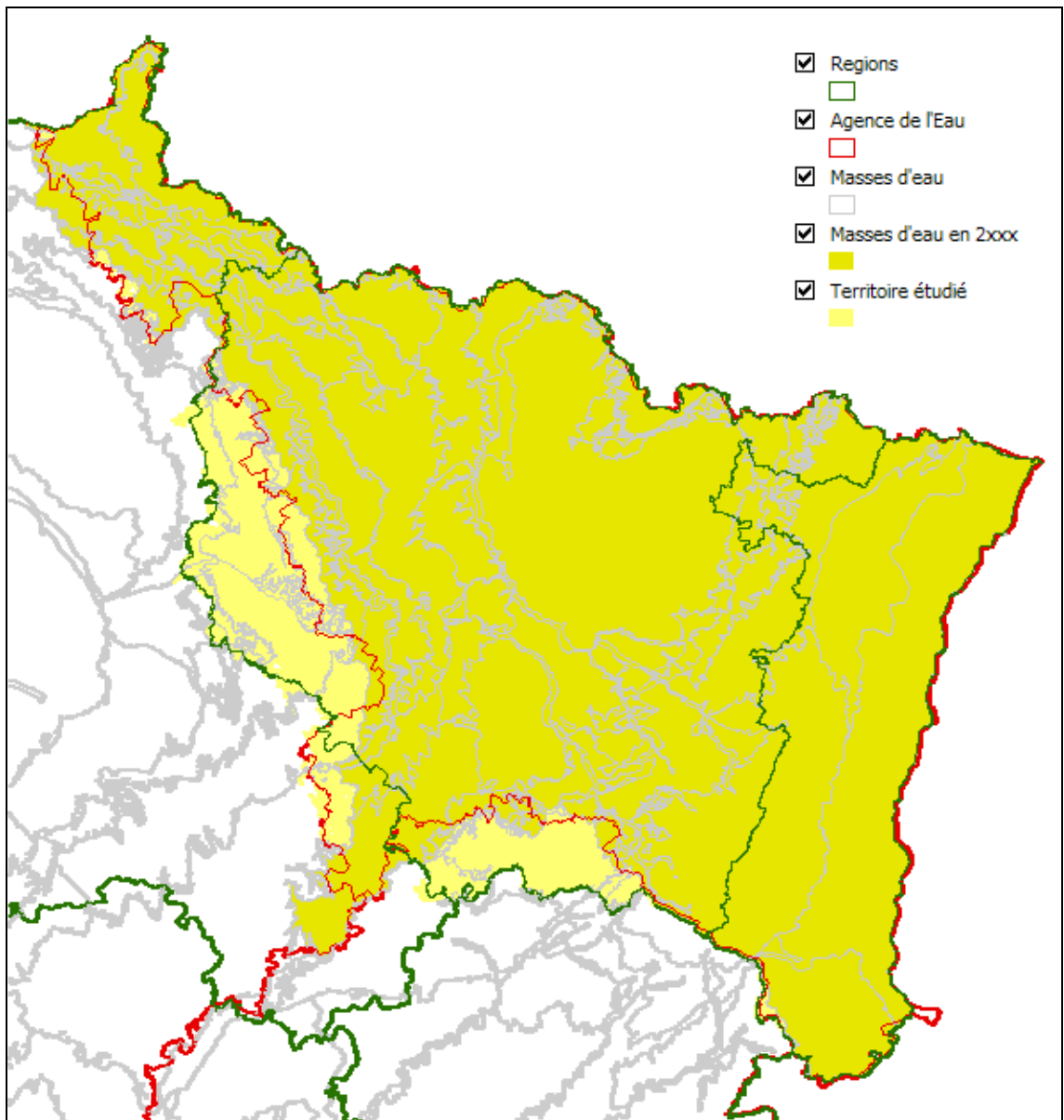


Figure 2 : Carte du territoire étudié.

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 du niveau moyen des eaux souterraines les moins profondes : il s'agit de relever en tout point de la zone d'étude, le niveau de la première nappe d'eau souterraine rencontrée depuis la surface, puis d'interpoler les valeurs pour obtenir une carte des premiers niveaux d'eau souterraine rencontrés, sans distinction des différentes nappes.
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

En domaine sédimentaire, pour obtenir une carte des niveaux d'eau moyens, une couche d'information 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 (10544 ouvrages).

Ces points, majoritairement présents en domaine sédimentaire sont accompagnés de quelques ouvrages en domaine de socle.

Enfin, lorsque des informations complémentaires existent, et notamment des cartes piézométriques récentes, celles-ci ont été prises en compte. Ainsi sur la plaine d'Alsace, la cartographie des isopièzes de basses eaux réalisée en 1991 a été intégrée au calcul.

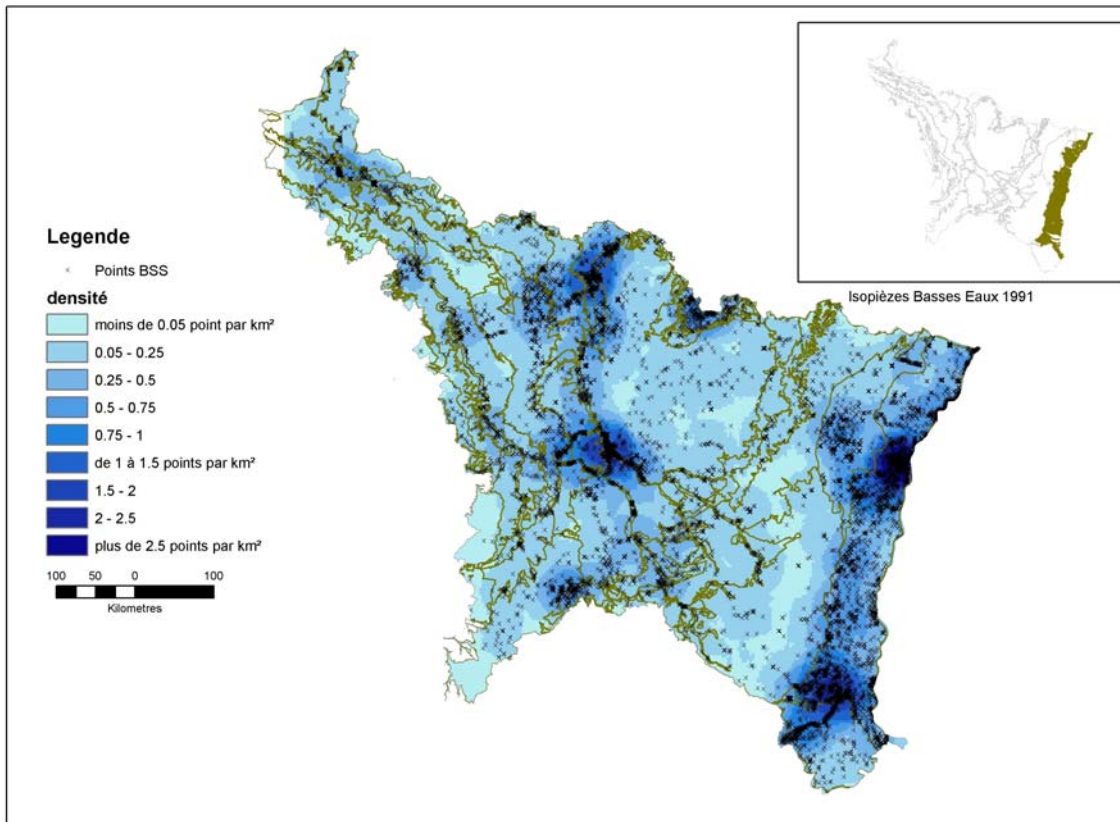


Figure 3 : Points d'eau et densité de points d'eau à l'échelle du territoire d'étude.

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

L'épaisseur de la ZNS est calculée à partir du niveau d'eau moyen obtenu précédemment et du modèle numérique de terrain (différence entre la cote altimétrique et le niveau d'eau). La figure ci-après présente la cartographie ainsi obtenue de l'épaisseur de la ZNS.

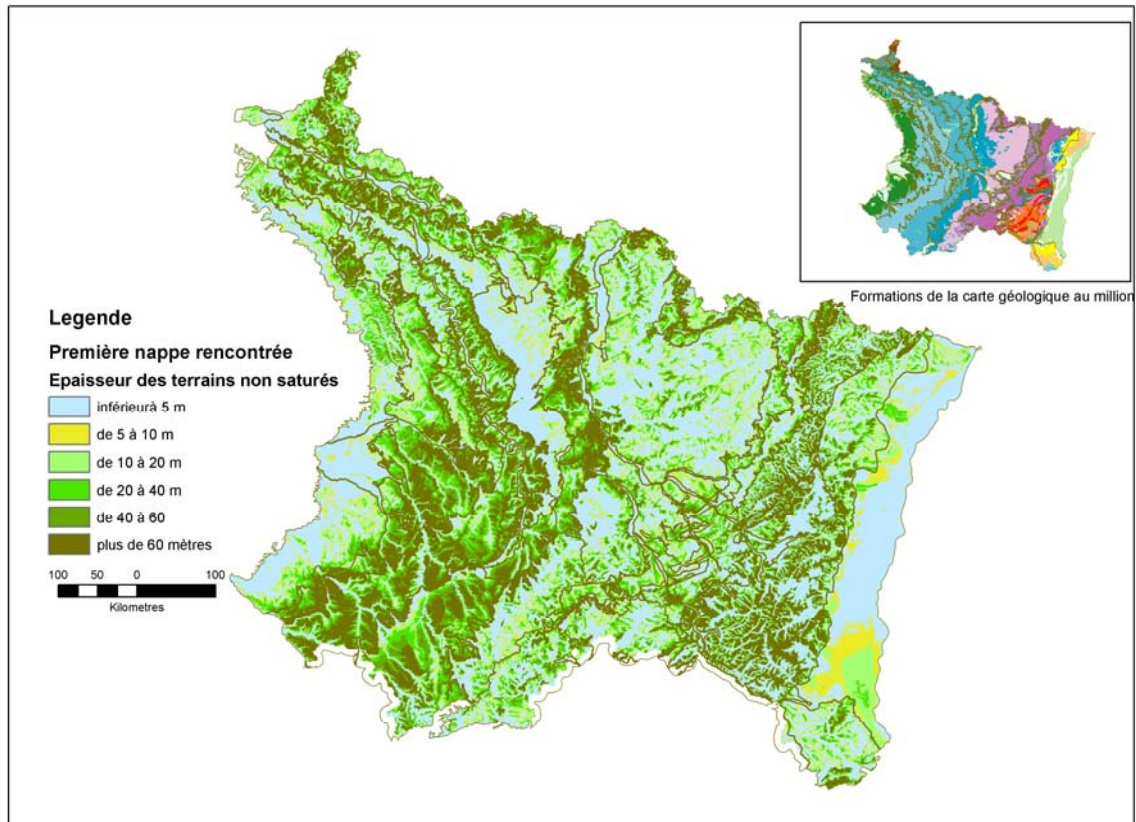


Figure 4 : Carte de l'épaisseur moyenne de la zone non saturée, (grille de données)

4.2.1. Définition des unités fonctionnelles

Afin de disposer d'une approche cartographique homogène, le territoire d'étude a été découpé en unités fonctionnelles du milieu souterrain supposées de comportement hydrogéologique continu. Ces unités fonctionnelles résultent de l'intersection de couches d'informations géographiques relatives avec les masses d'eau souterraines, les entités hydrogéologiques (BDRHFV1) et les formations sédimentaires issues de la carte géologique et aux bassins versants hydrologiques issus de la BD Carthage.

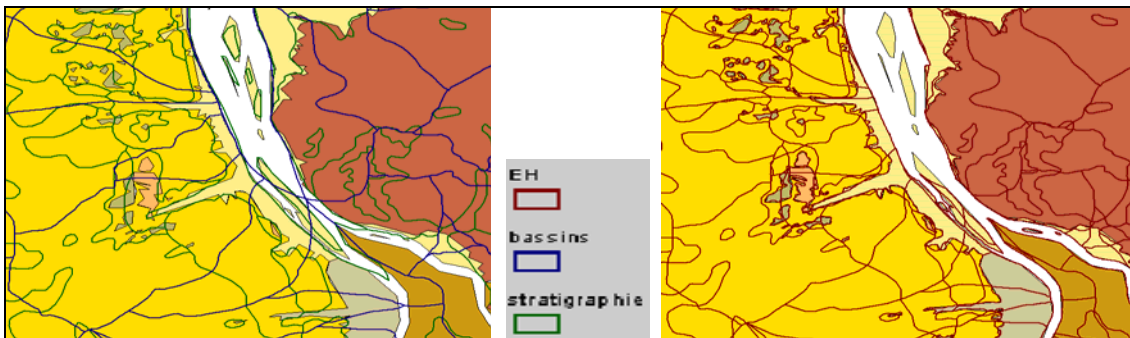


Figure 5 : Intersection des couches d'informations constituant les unités fonctionnelles

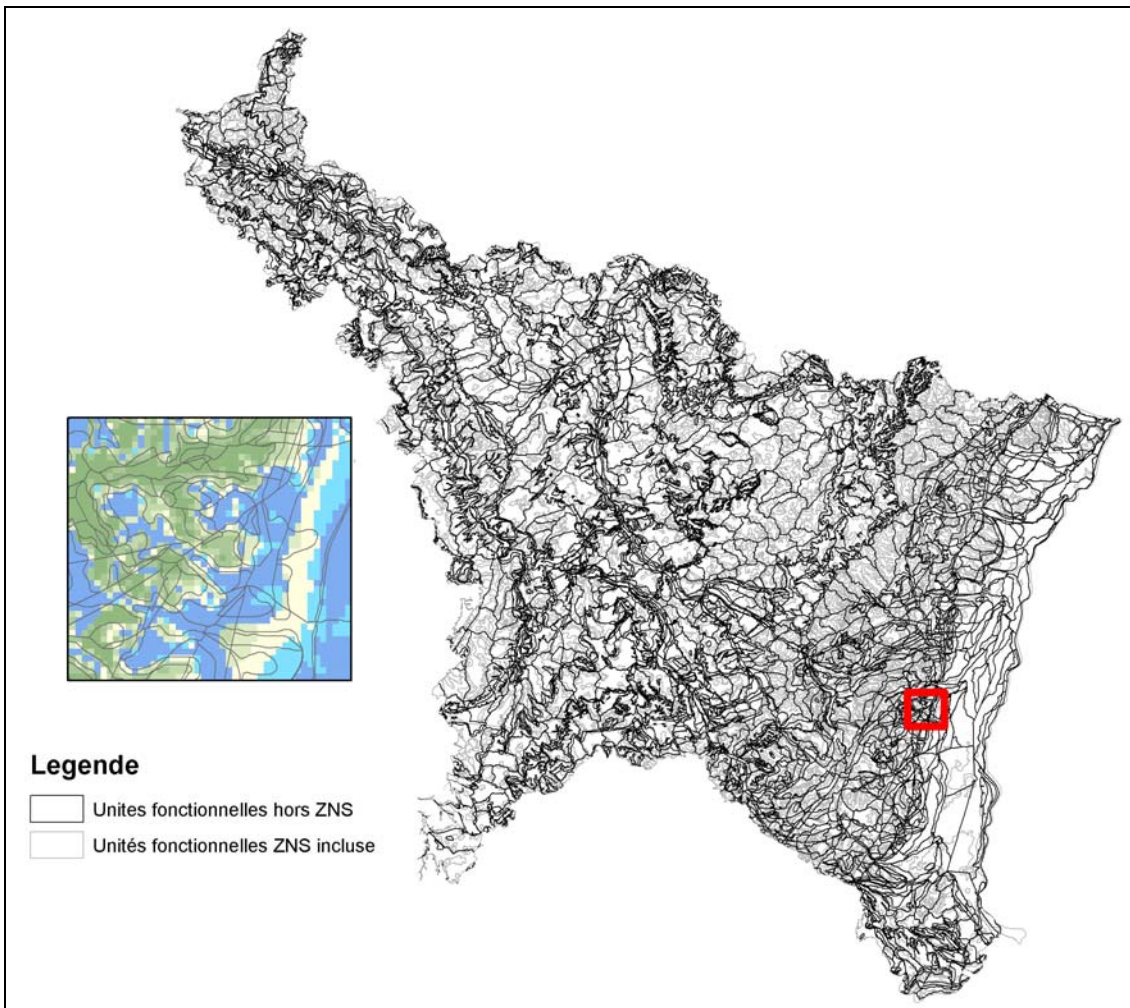


Figure 6 : Subdivision du domaine en unités fonctionnelles

Les unités fonctionnelles représentent approximativement 4689 polygones sur le territoire d'étude pour une surface moyenne de 773 ha.

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.

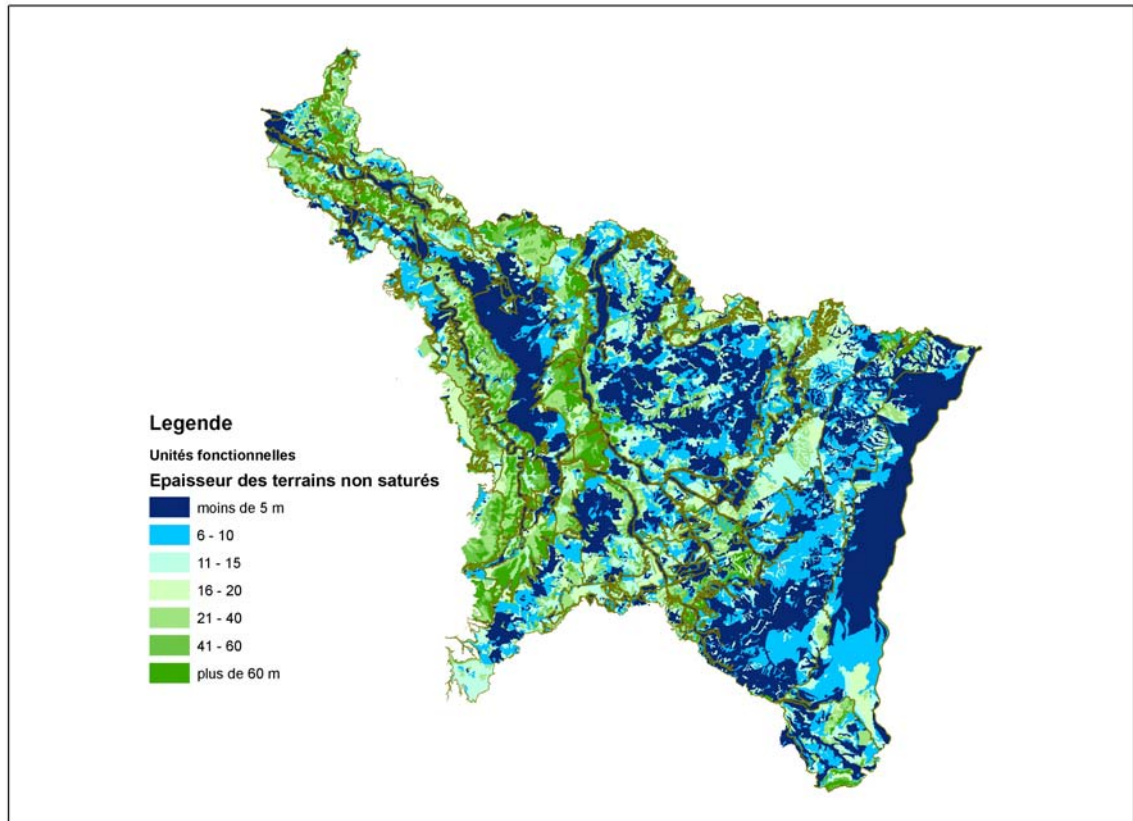


Figure 7 : Carte de l'épaisseur moyenne de la zone non saturée par unités fonctionnelles

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 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, poursuit les travaux de Prud'homme et consacre à l'analyse des réseaux hydrographiques une grande partie de son travail.

Deffontaines 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 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 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.

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.

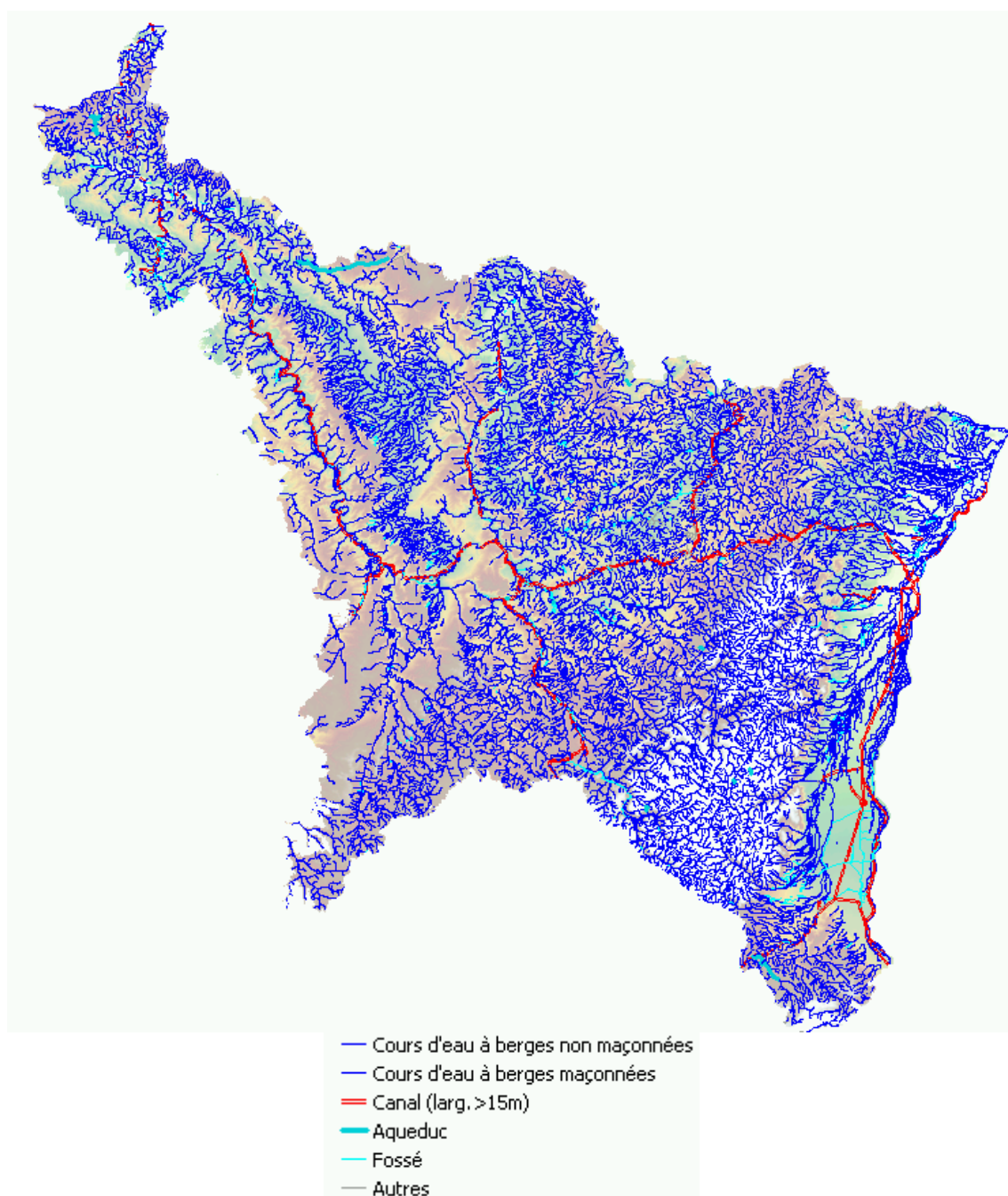


Figure 8 : Réseau hydrographique (Source BdCarthage)

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 si il y a une dépression naturelle, l'eau remplit préalablement celle-ci avant de continuer sa route vers l'aval.

La première des techniques de traitement des dépressions considère les dépressions comme des artefacts altimétriques ne représentant aucune forme réelle (Jenson et Domingue 1998). De ce fait, certains auteurs procèdent au comblement des dépressions après avoir déterminé l'exutoire de la dépression : c'est la technique dite du « bouche-trous ». Dans ce cas, on détermine la cellule exutoire et on affecte à toutes les cellules de la dépression l'altitude de cet exutoire.

La seconde, décrite par Fairfield et Leymarie (1991), vise à déterminer l'exutoire de la dépression puis à inverser le chemin d'écoulement entre le fond de la dépression et cet exutoire. Ceci aura pour effet de rendre la continuité du réseau hydrographique. Pour déterminer quelle cellule représente l'exutoire, il faut trouver, parmi toutes les cellules ne recevant pas d'eau d'une autre cellule et s'écoulant vers le fond de la dépression, laquelle possède l'altitude la plus basse.

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

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

5.4.2. Pré traitement du MNT - zones planes

Le problème des zones planes 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). Cela permet de concentrer les écoulements à l'amont de la cellule exutoire et au centre de la zone plate. Cet algorithme 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.

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 9x. Le système de projection utilisé est celui du "Lambert II Etendu".



*Figure 9 : Carte du réseau des talwegs ("chemin de la vallée") :
Données fournies en annexe (couche Talwegs)*

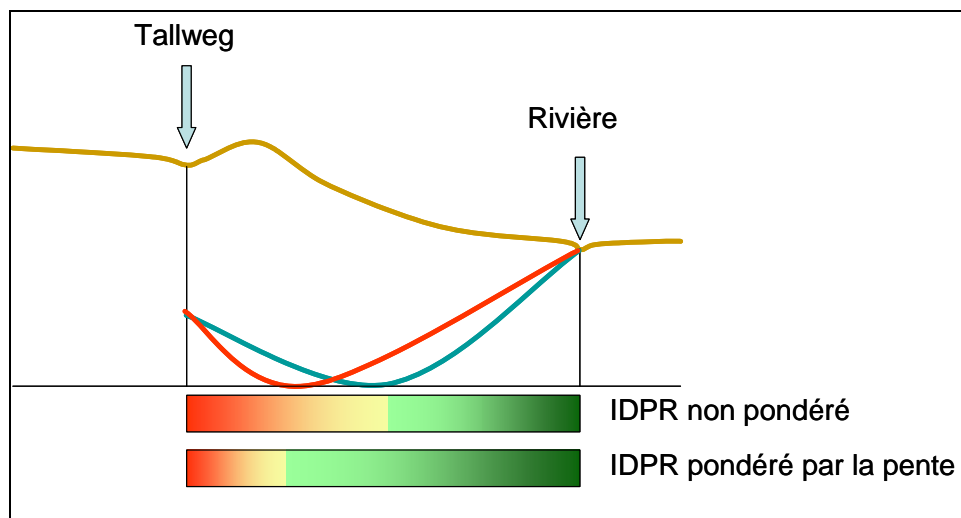
5.5. CALCUL DE L'IDPR

L'IDPR permet de rendre compte indirectement de la capacité intrinsèque du sol à laisser infiltrer ou ruisseler les eaux de surface. Cette fonction d'infiltration dépend de la perméabilité verticale qui traduit la capacité d'un sol à laisser passer un fluide.


Très variable, ce paramètre dépend essentiellement de la lithologie de la formation considérée. L'IDPR compare un réseau théorique établi selon l'hypothèse d'un milieu parfaitement homogène au réseau mis en place sous le contrôle d'un contexte géologique hétérogène, il résulte du rapport, pour tout point de l'espace étudié, entre :

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

Cette comparaison est pondérée par la pente naturelle des terrains, cette opération permet une meilleure restitution des contrastes entre les vallées alluviales et leur encaissant.



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



IDPR	Interprétation	
<1000	<p>Infiltration majoritaire</p> <p>Par rapport au</p> <p>Ruissellement superficiel</p>	<p>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.</p> <p>Développement d'un réseau de talweg de densité supérieure à l'expression du réseau de drainage naturel.</p>
=1000	<p>Infiltration et</p> <p>Ruissellement superficiel</p> <p>de même importance</p>	<p>Il y a conformité entre la disponibilité des axes de drainage liés au talweg et les axes hydrologiques en place</p>
>1000	<p>Ruissellement superficiel</p> <p>Par rapport à</p> <p>l'infiltration vers le milieu souterrain</p>	<p>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.</p>
> 2000	<p>Majoritairement assimilable à</p> <p>des milieux humides</p>	<p>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 humides¹.</p>

Tableau 2 : Valeurs de l'IDPR

¹ 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.

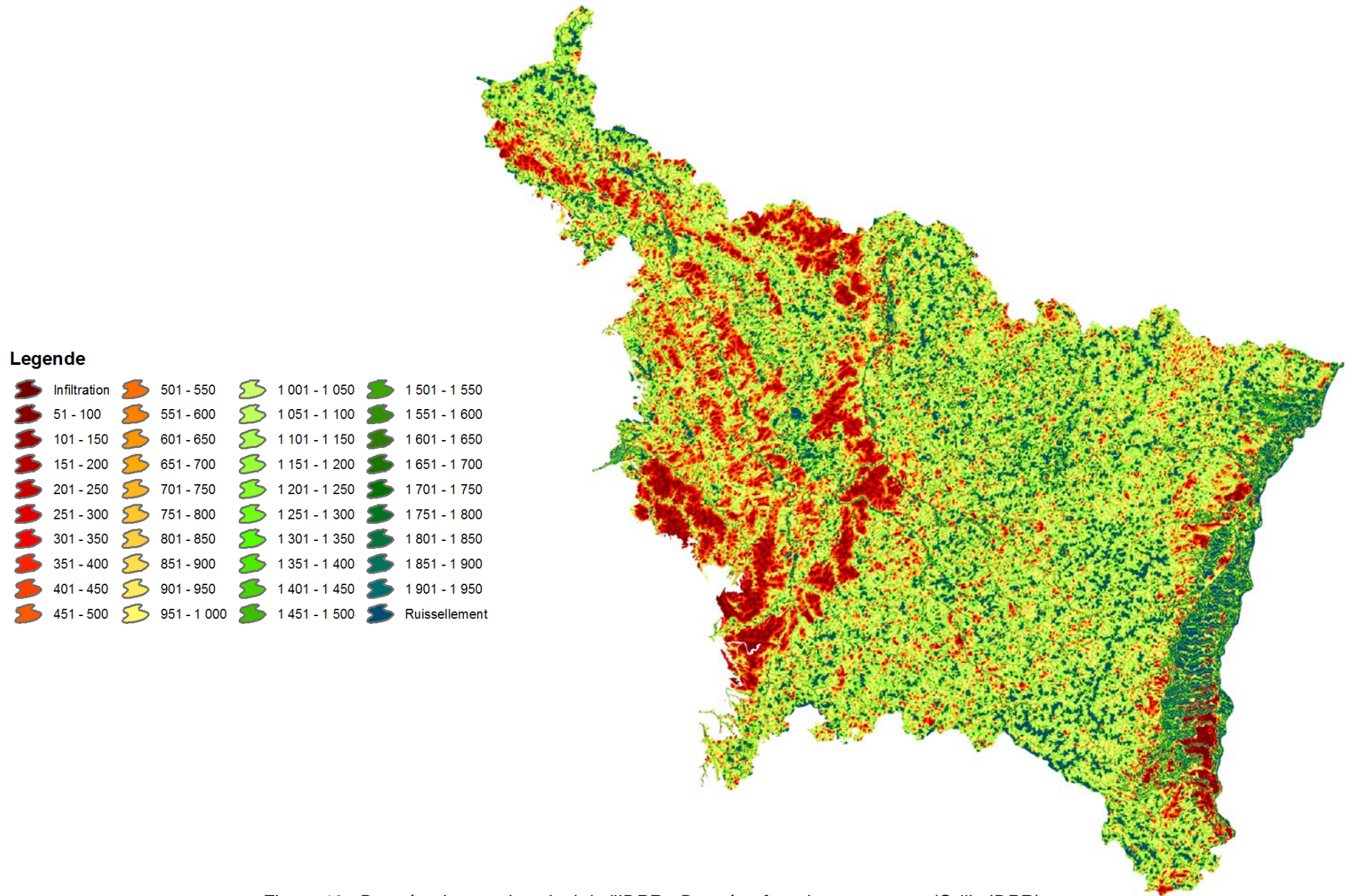


Figure 10 : Données brutes du calcul de l'IDPR - Données fournies en annexe (Grille IDPR).

Carte de vulnérabilité intrinsèque simplifiée des eaux souterraines
du bassin Rhin Meuse et de la Région Lorraine

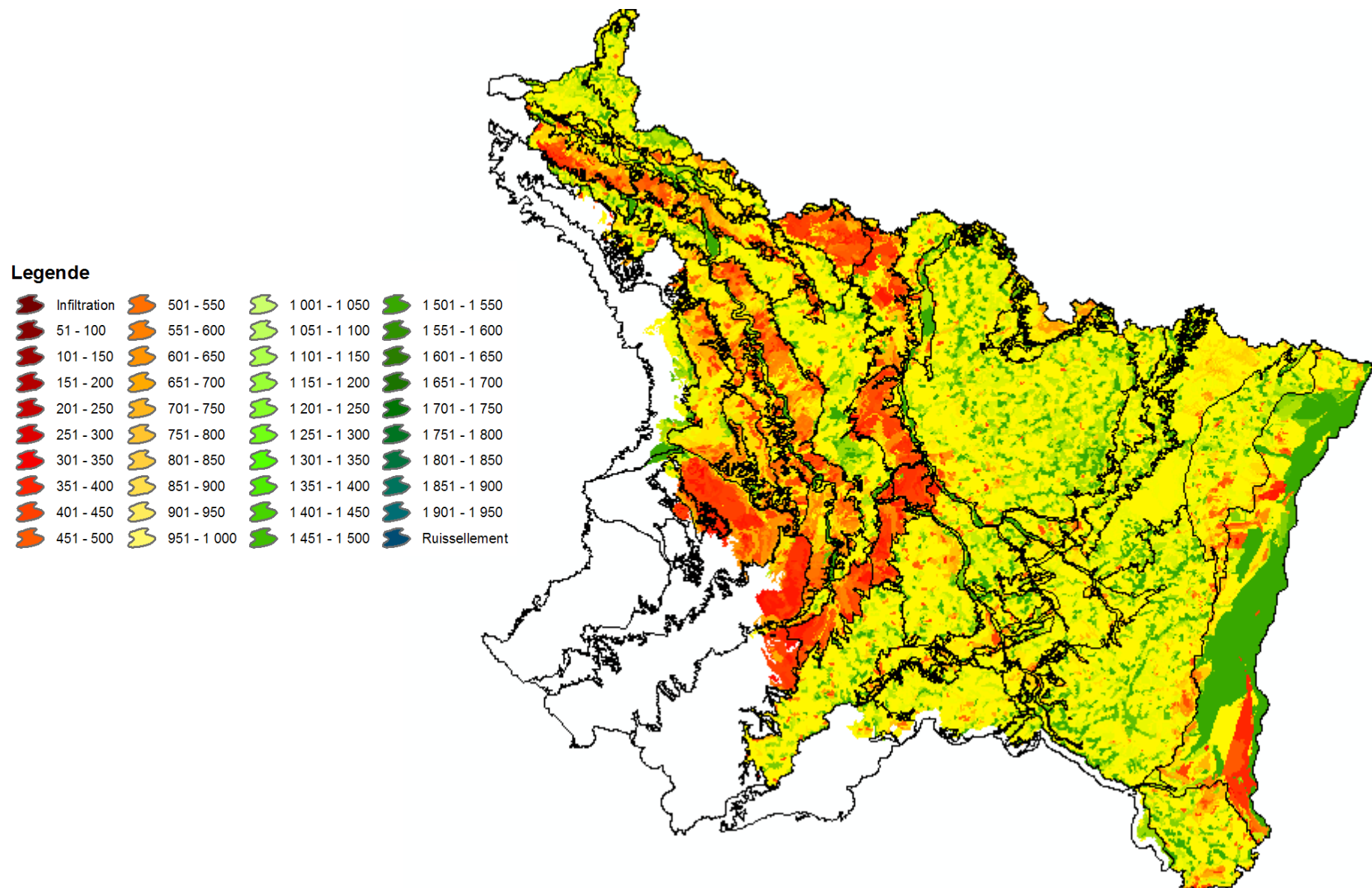


Figure 11 : IDPR affecté aux unités fonctionnelles.

5.6. ANALYSE DES RESULTATS FOURNIS PAR L'IDPR

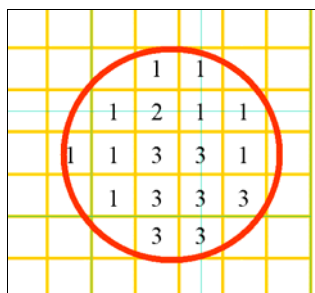
5.6.1. Agrégation des données par unités spatiales

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).

Cette opération s'apparente à une analyse géostatistique pour laquelle la moyenne et la médiane des valeurs de cellules de la grille initiale (IDPR) sont calculées pour chaque polygone de la couche vectorielle (les unités fonctionnelles)

Dans l'illustration ci-contre la statistique zonale fournie pour le cercle rouge les valeurs suivantes :

- moyenne : $32/17 = 1.88$,
- médiane² : 2.



La grandeur statistique retenue pour IDPR et les unités fonctionnelles est la médiane plutôt que de la moyenne. Celle-ci est susceptible de trop grande variabilité. En résumé, la médiane est le nombre au centre d'une distribution. La médiane est utile parce qu'elle n'est aucunement influencée par des valeurs extrêmes.

Le résultat de cette analyse est porté dans la carte de la page précédente et constituera pour la suite de l'étude de vulnérabilité, la voie d'utilisation de l'IDPR.

²Définition : on appelle médiane d'une série statistique tout nombre m tel que :

- Au moins la moitié des valeurs du caractère sont inférieures ou égales à m

- Au moins la moitié des valeurs du caractère sont supérieures ou égales à m .

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.

5.6.2. Nitrates observés dans ADES© et IDPR

Les nitrates constituent un polluant dont l'une des caractéristiques est de faiblement interagir avec le milieu souterrain. Sans pouvoir être assimilés à des traceurs parfaits, leur présence dans les eaux souterraines reflète en partie la capacité des terrains à les laisser transiter depuis la surface vers les aquifères souterrains. A l'échelle nationale, au terme de l'année 2007, un indice IDPR a été agrégé à partir des études régionales menées en 2005-2006-2007 et l'analyse d'une relation IDPR et concentration en nitrates par qualimètres ADES a été ébauchée.

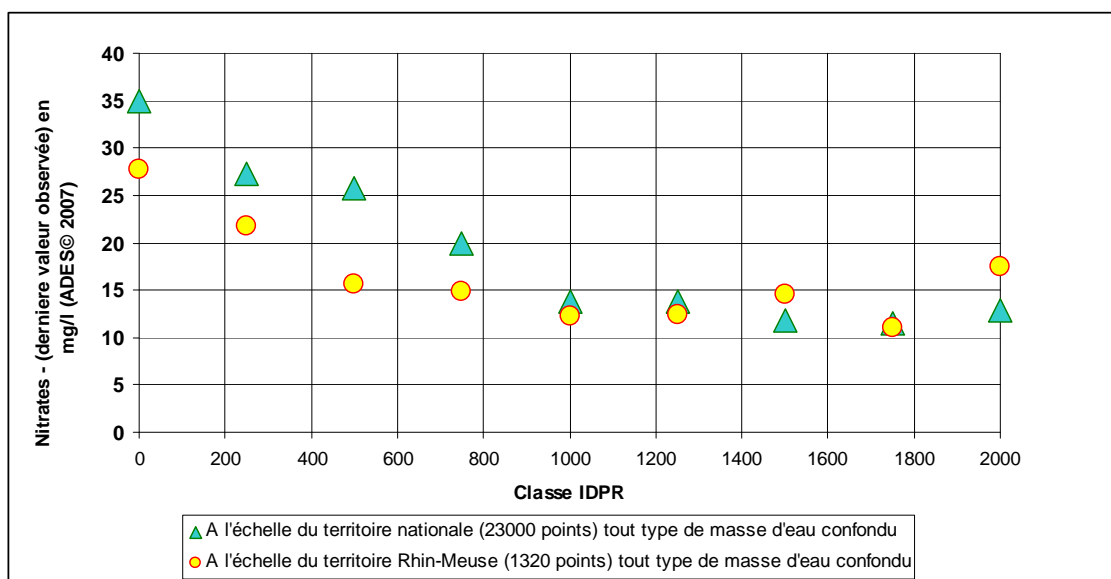


Figure 12 : Relation entre les classes de valeurs de l'IDPR au voisinage immédiat des points de mesure (rayon de 500 mètres) et la dernière valeur de concentration en nitrates effectuée et archivée dans la base ADES en 2007

Sur la figure précédente, il apparaît donc une concentration en nitrates moyenne plus élevée dans des terrains supposés plus perméables (IDPR le plus faible) par rapport à des terrains d'IDPR élevé.

Les valeurs les plus élevée d'IDPR sont traduites par la présence des zones dites ruisselantes (peu perméables) ou des aires où la ZNS est très faible. Dans le contexte de Rhin-Meuse, les valeurs d'IDPR élevées (1800-2000) traduisent surtout la proximité des nappes d'eau souterraines et non plus une perméabilité plus faible des terrains.

Le critère géomorphologique décrit par IDPR est donc confirmé par l'observation des concentrations en nitrates dans les eaux souterraines. A l'échelle nationale cette corrélation entre IDPR et NO3 est remarquable avec un coefficient R^2 égale à 0.921 avec l'hypothèse d'une régression selon une fonction non linéaire de type $Y = pr1 * \text{Exp}(pr2 * X1)$

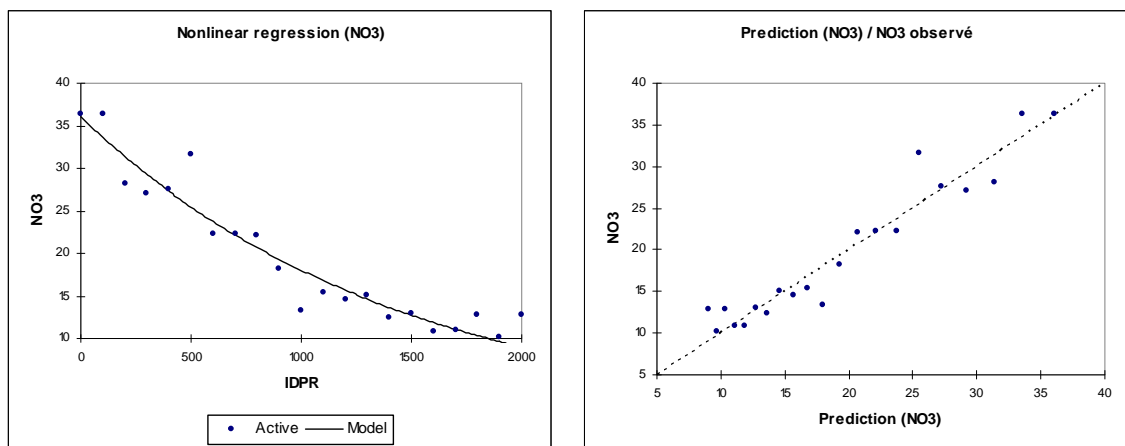


Figure 13 : Corrélation entre indice IDPR et concentration en nitrates.

6. Cartographie de l'indice simplifié de vulnérabilité

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

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

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

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

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

6.1. CALCUL DE LA VULNERABILITE DES EAUX SOUTERRAINES

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

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

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

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

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

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

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

- Critères (ou attributs): aspects suivant lesquels les alternatives sont examinées : qualitatifs ou quantitatifs.
- Poids (des critères) : importance attribuée aux critères ; subjectifs; normalisation.

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

6.2. CRITERE IDPR

Le critère IDPR a été, en première 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 sédimentaire 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 parfois par un phénomène de « lissage » des caractéristiques propres à chacune des masses d'eau amplifié par le caractère intégrateur de certains découpages.

Après l'élaboration de plusieurs scénarios d'interprétation, une ventilation non linéaire du critère l'IDPR a 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.

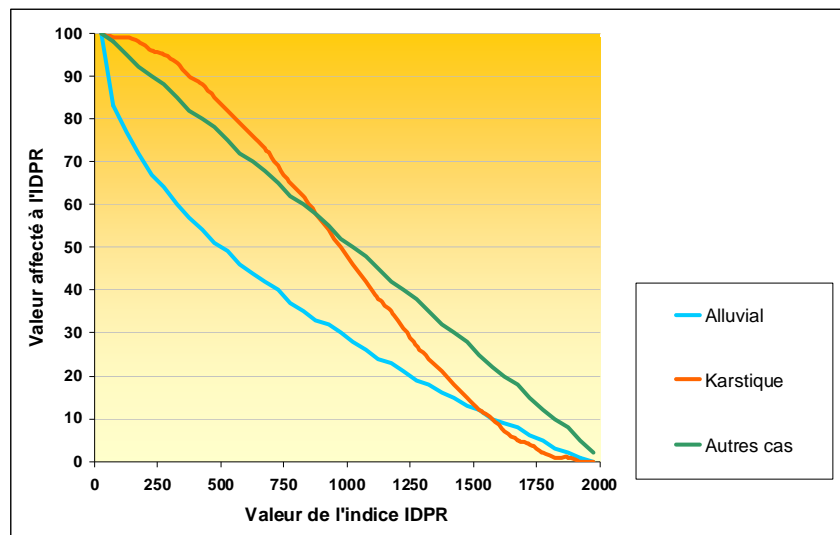


Figure 14 : Valeurs normées du critère IDPR selon la nature des masses d'eau

6.3. CRITERE ZNS

De manière similaire à celle envisagée pour l'indice IDPR, une ventilation non linéaire du critère ZNS a été prise en compte. Les concertations menées avec les experts du comité de pilotage de cette étude se sont ainsi orientées vers une différenciation 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.

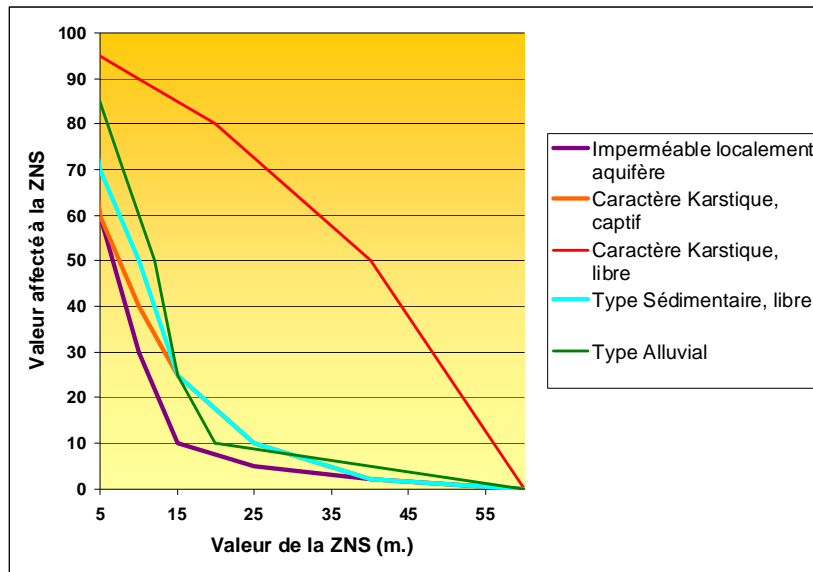


Figure 15 : Valeurs normées du critère ZNS selon la nature et le type d'écoulement des masses d'eau

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 compose la combinaison successive des poids relatifs des deux critères.

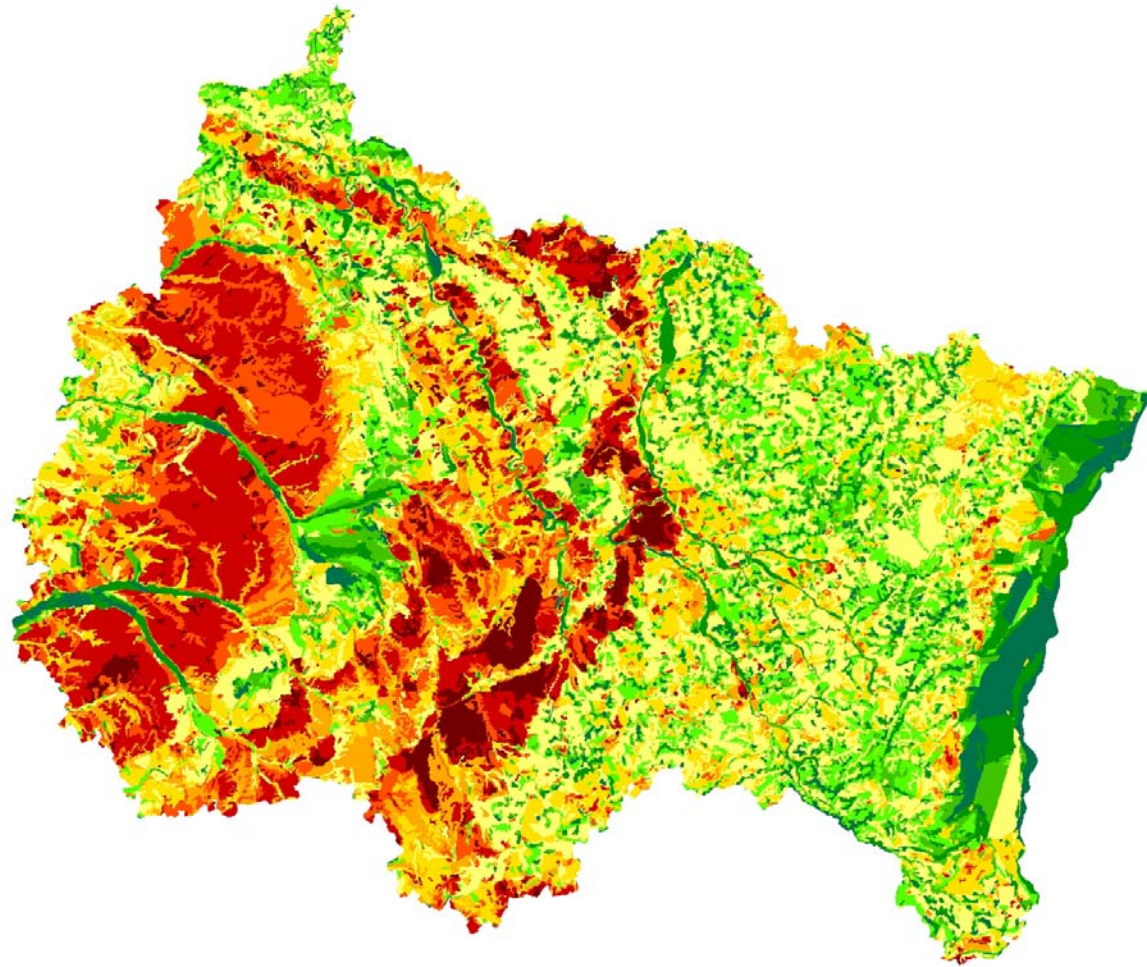


Figure 16 : Représentation du critère IDPR, avec une extension à l'emprise des masses d'eau qui intersectent le bassin Rhin Meuse (l'échelle de la carte se trouve fig. 27).

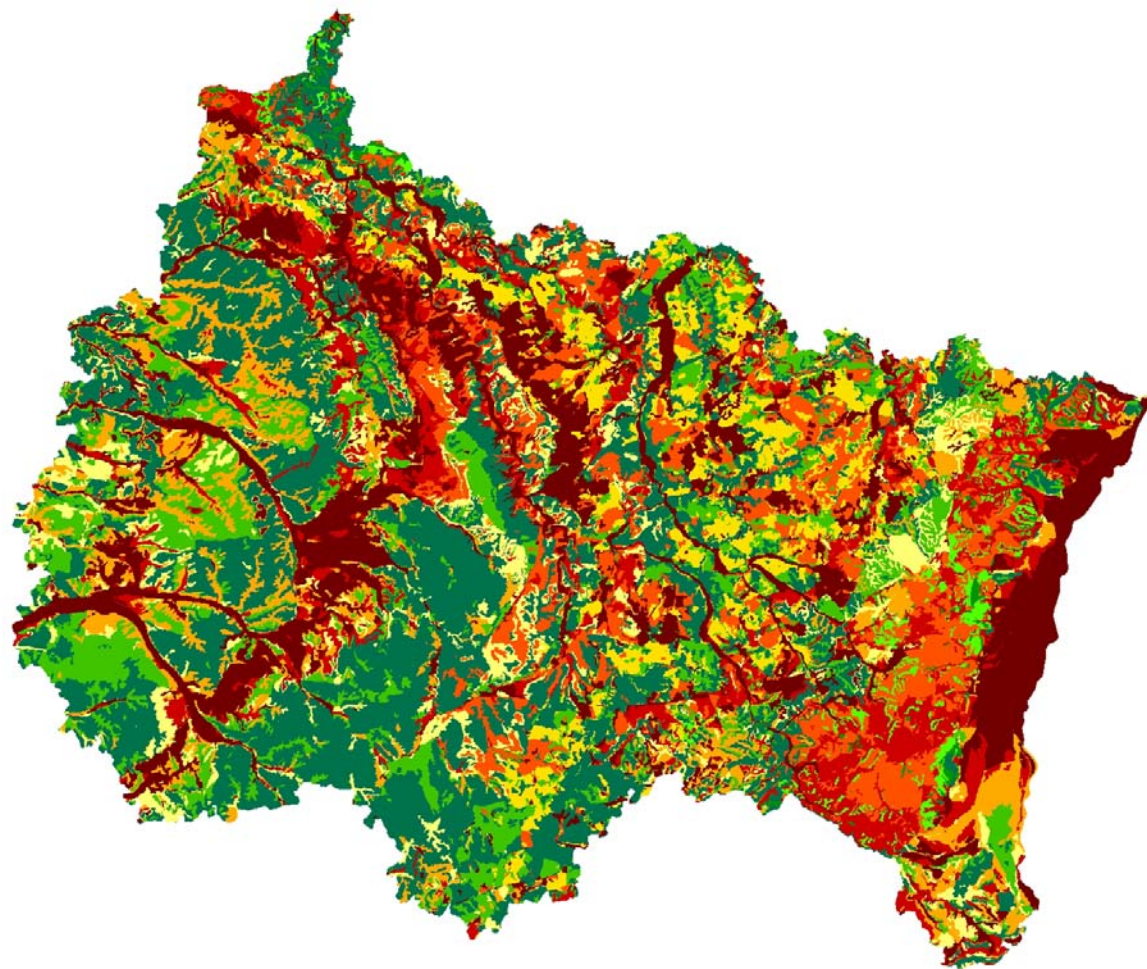


Figure 17 : Représentation du critère ZNS, avec une extension à l'emprise des masses d'eau qui intersectent le bassin Rhin Meuse (l'échelle de la carte se trouve fig. 27).

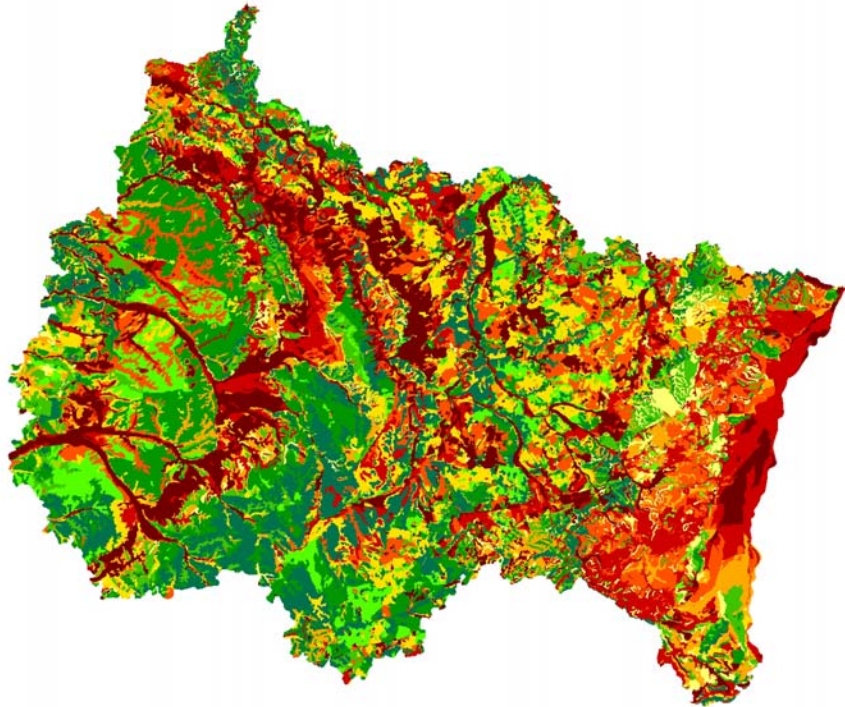


Figure 18: Scénario 10% IDPR et 90% ZNS

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 les formations du crétacé inf. de la champagne humide et les formations sédimentaires de la plaine d'alsace. Les nappes alluviales apparaissent vulnérables. La légende de cette carte et des suivantes est présentée à la fig. 25.

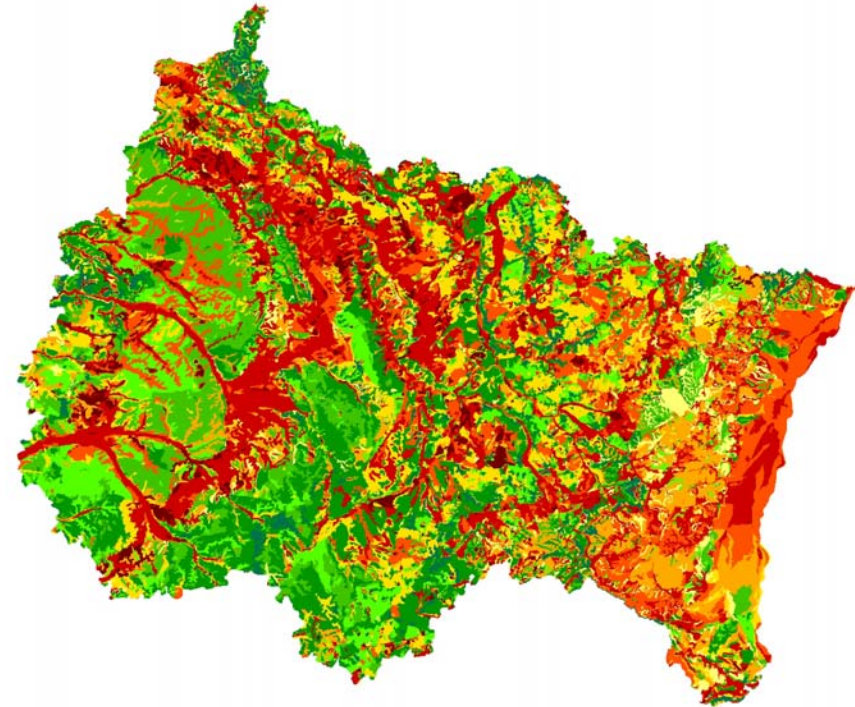


Figure 19: Scénario 20% IDPR et 80% ZNS

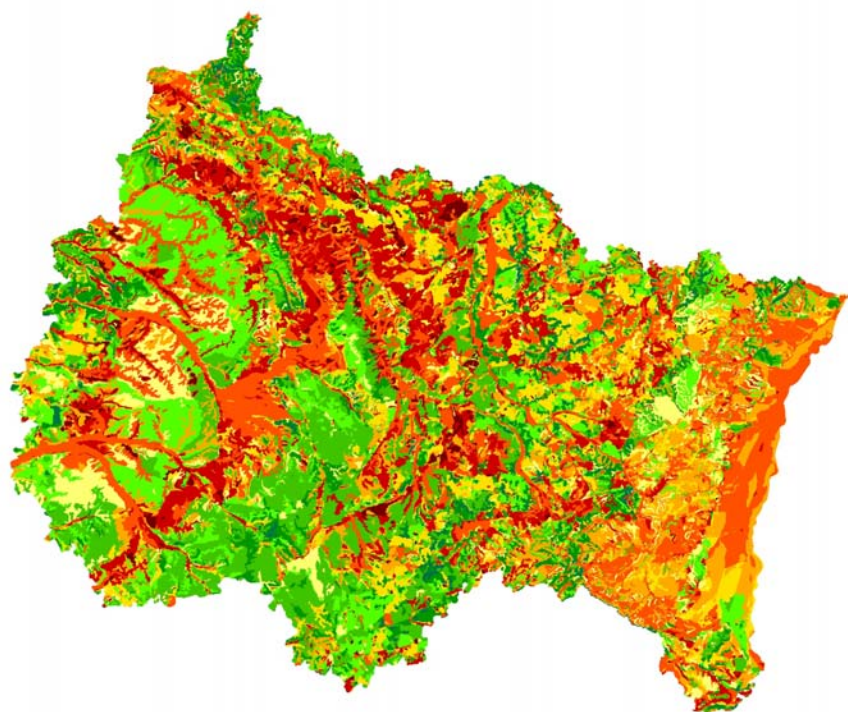


Figure 20: Scénario 30% IDPR et 70% ZNS

Ce scénario atténue l'influence de la proximité des nappes. Les formations de socle deviennent alors de vulnérabilité moindre que celle des formations carbonatées du Jurassique ou Tertiaire de Beauce où les écoulements peuvent prendre un caractère karstique.

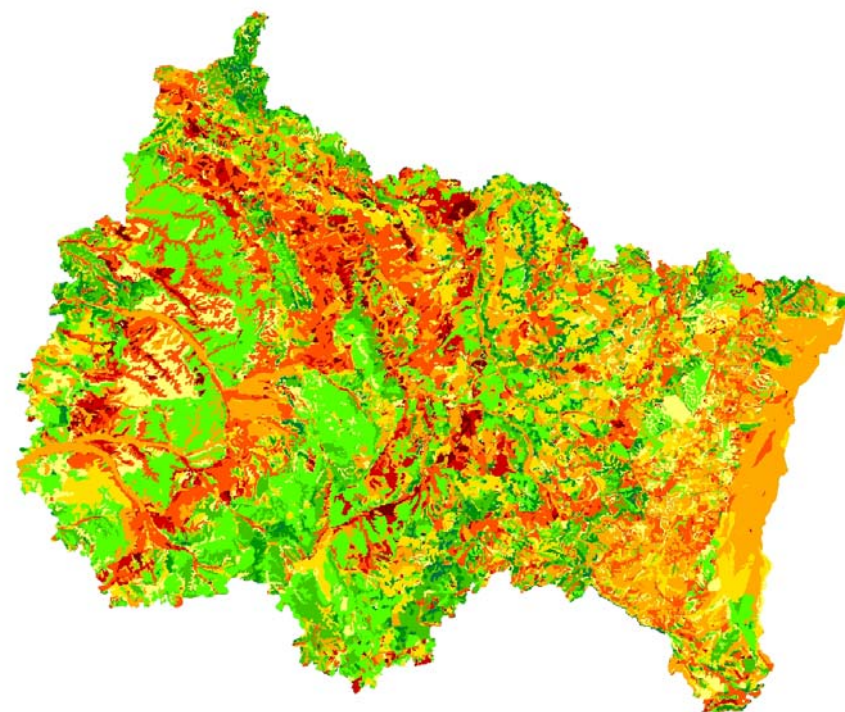


Figure 21: Scénario 40% IDPR et 60% ZNS

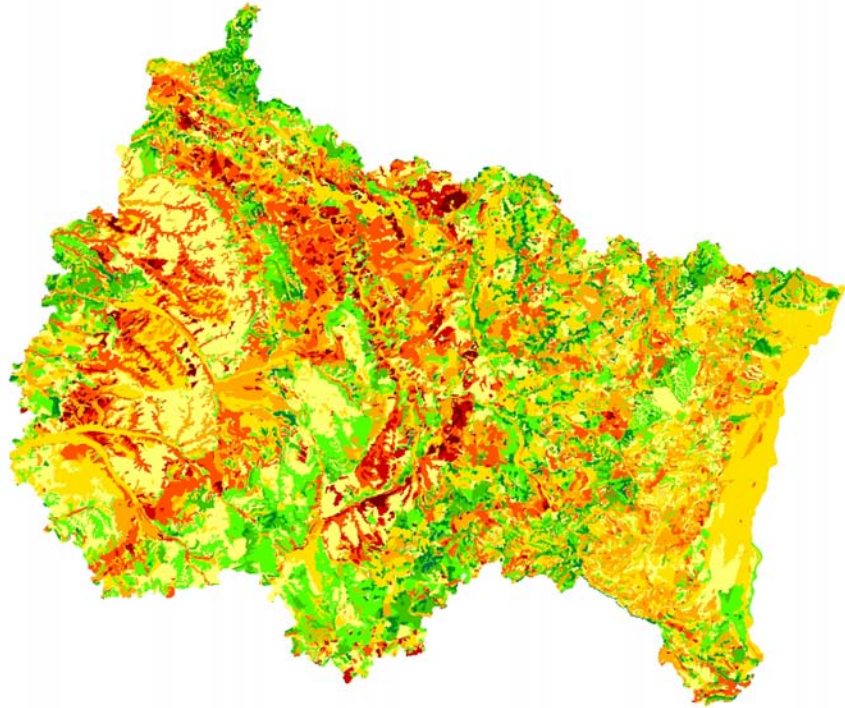


Figure 22: Scénario 50% IDPR et 50% ZNS

Ce scénario équilibre l'influence de la proximité des nappes avec l'aptitude à l'infiltration des terrains naturels que décrit indirectement l'IDPR.. 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.

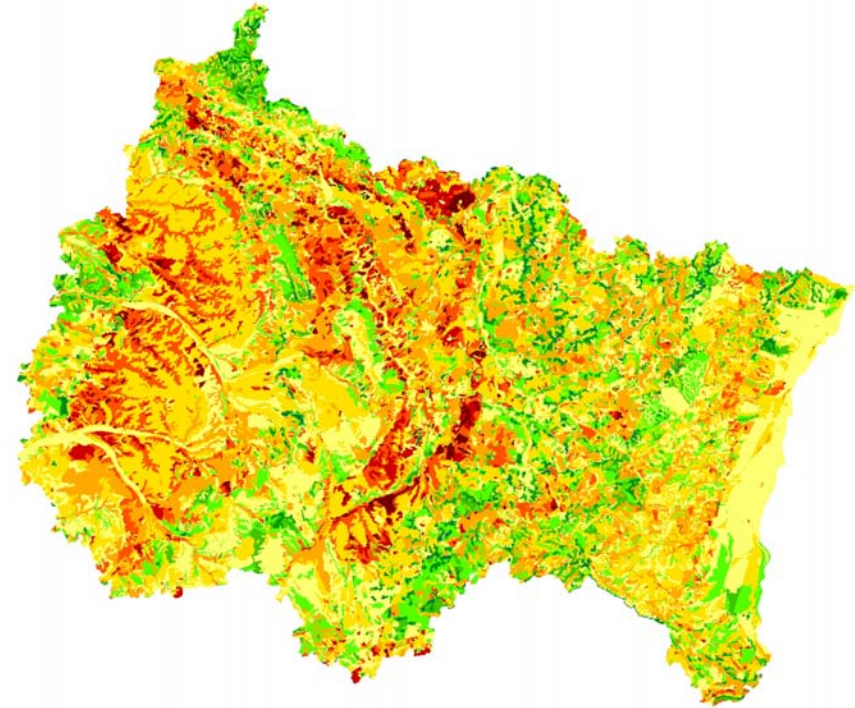
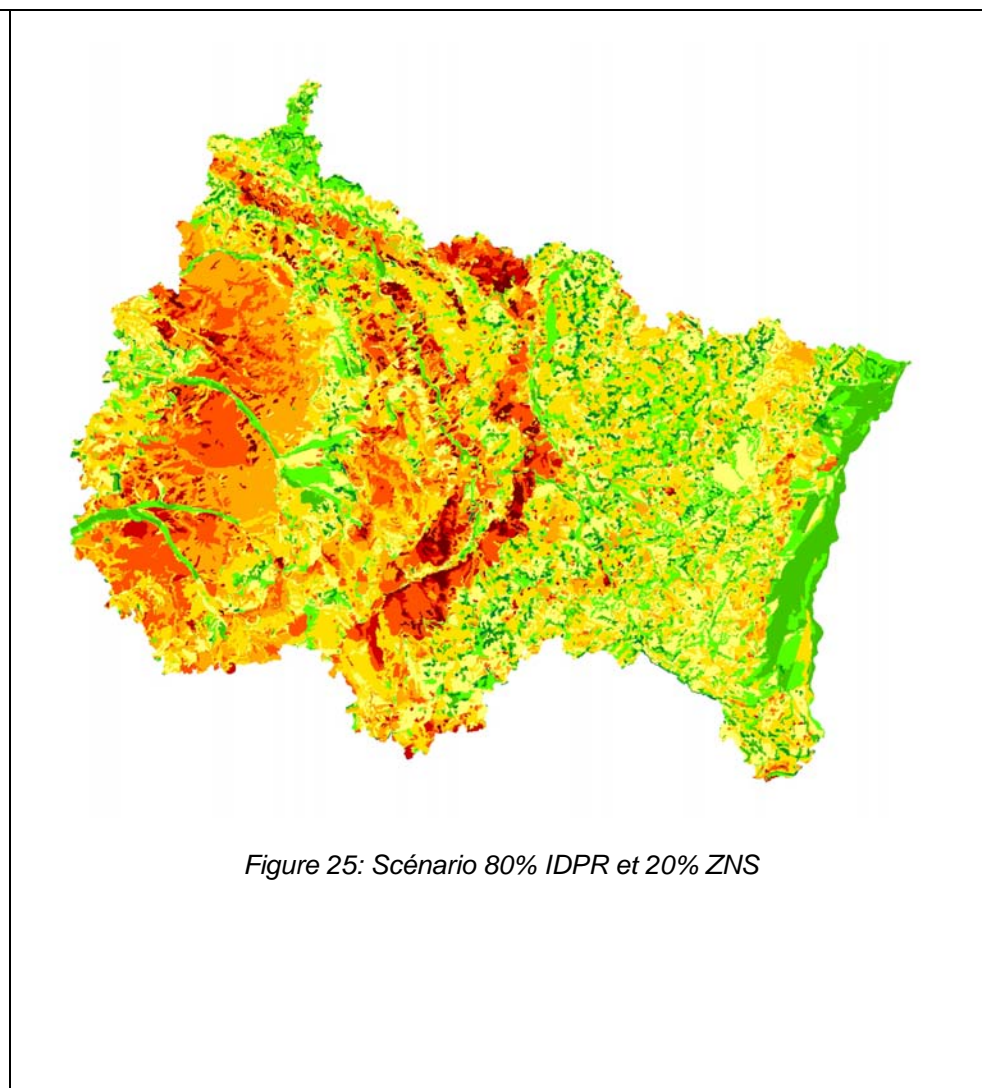
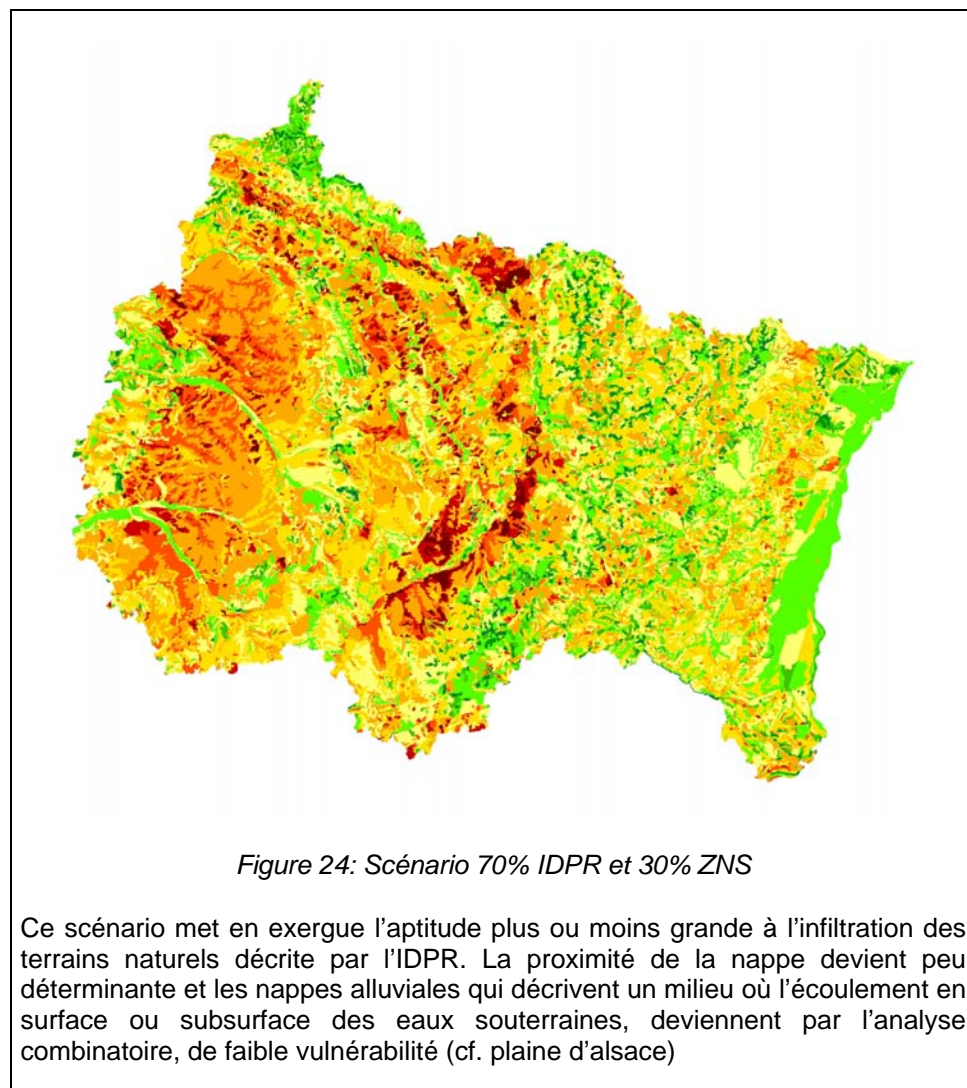


Figure 23: Scénario 60% IDPR et 40% ZNS



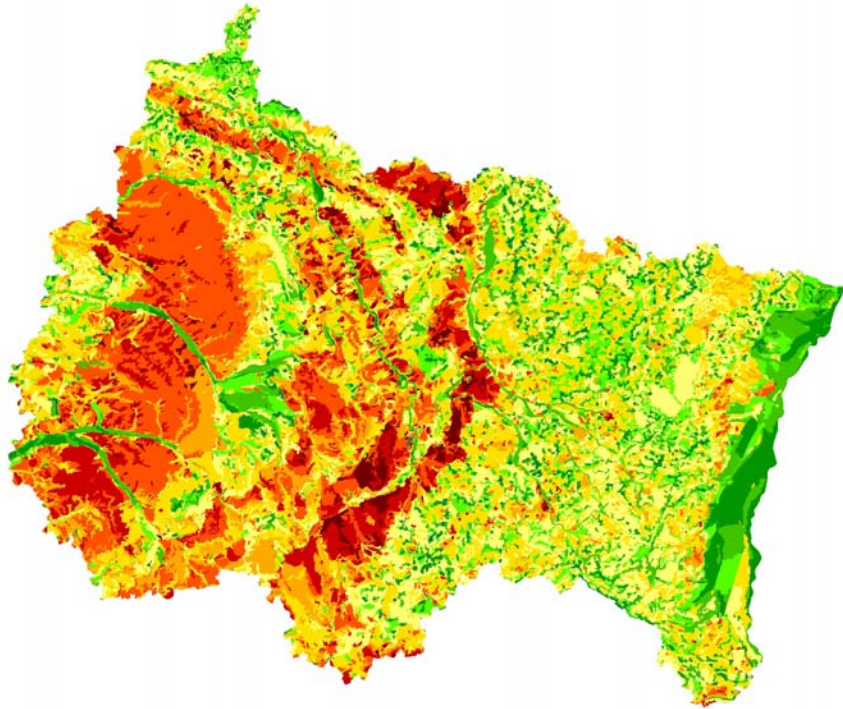


Figure 26: Scénario 90% IDPR et 10% ZNS

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

Scénarios

0 - 2	27 - 28	53 - 54	79 - 80
3 - 4	29 - 30	55 - 56	81 - 82
5 - 6	31 - 32	57 - 58	83 - 84
7 - 8	33 - 34	59 - 60	85 - 86
9 - 10	35 - 36	61 - 62	87 - 88
11 - 12	37 - 38	63 - 64	89 - 90
13 - 14	39 - 40	65 - 66	91 - 92
15 - 16	41 - 42	67 - 68	93 - 94
17 - 18	43 - 44	69 - 70	95 - 96
19 - 20	45 - 46	71 - 72	97 - 98
21 - 22	47 - 48	73 - 74	99 - 100
23 - 24	49 - 50	75 - 76	
25 - 26	51 - 52	77 - 78	

Figure 27 : Légende des scénarios présentés

La carte de vulnérabilité finalement retenue par les différents experts régionaux comme la plus représentative des connaissances acquises s'est fondée sur un poids égal des critères IDPR, ZNS (50% / 50%) avec, localement, l'ajustement de la combinaison IDPR/ZNS.

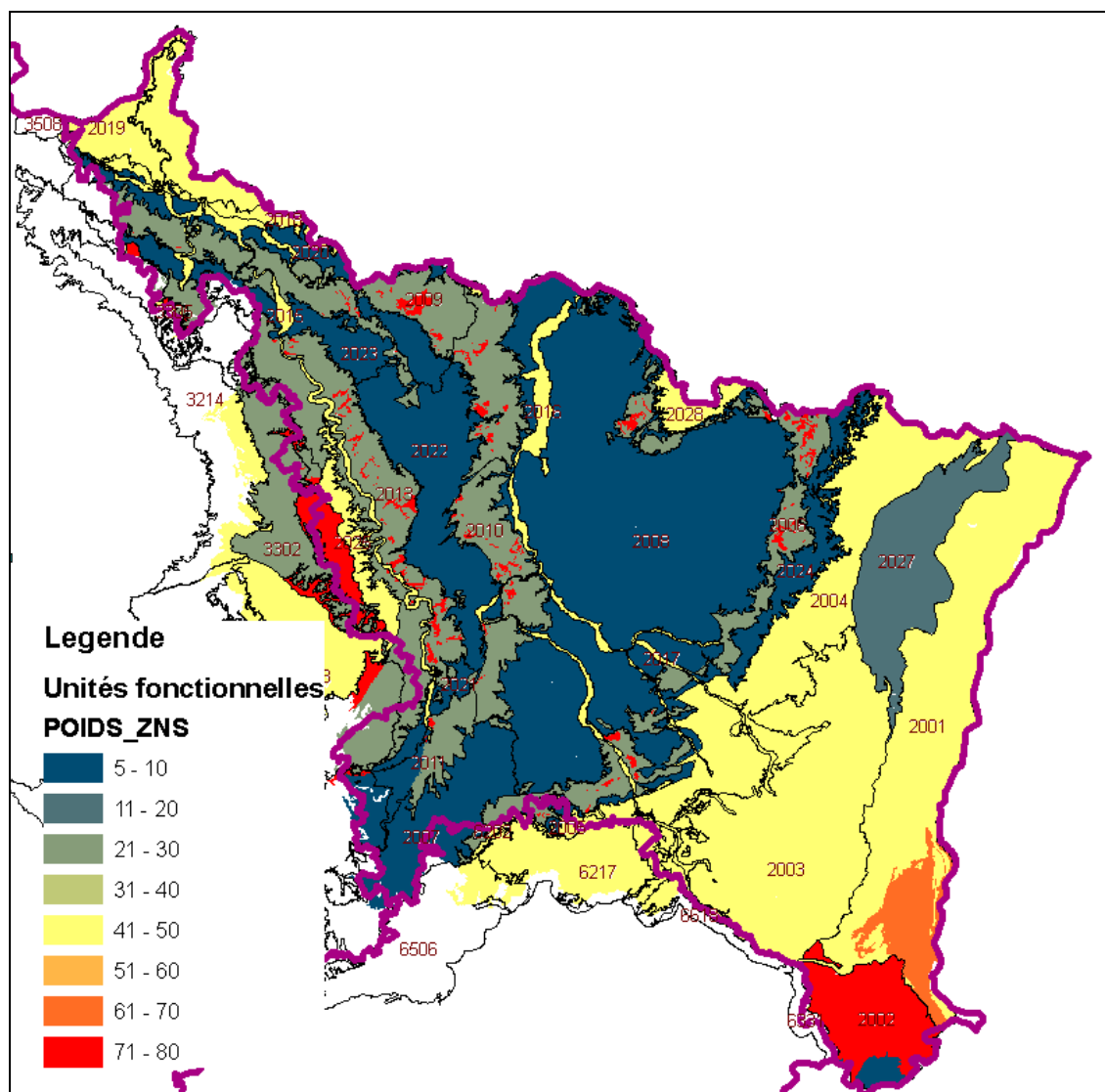


Figure 28 : Poids du critère ZNS (en % du total)

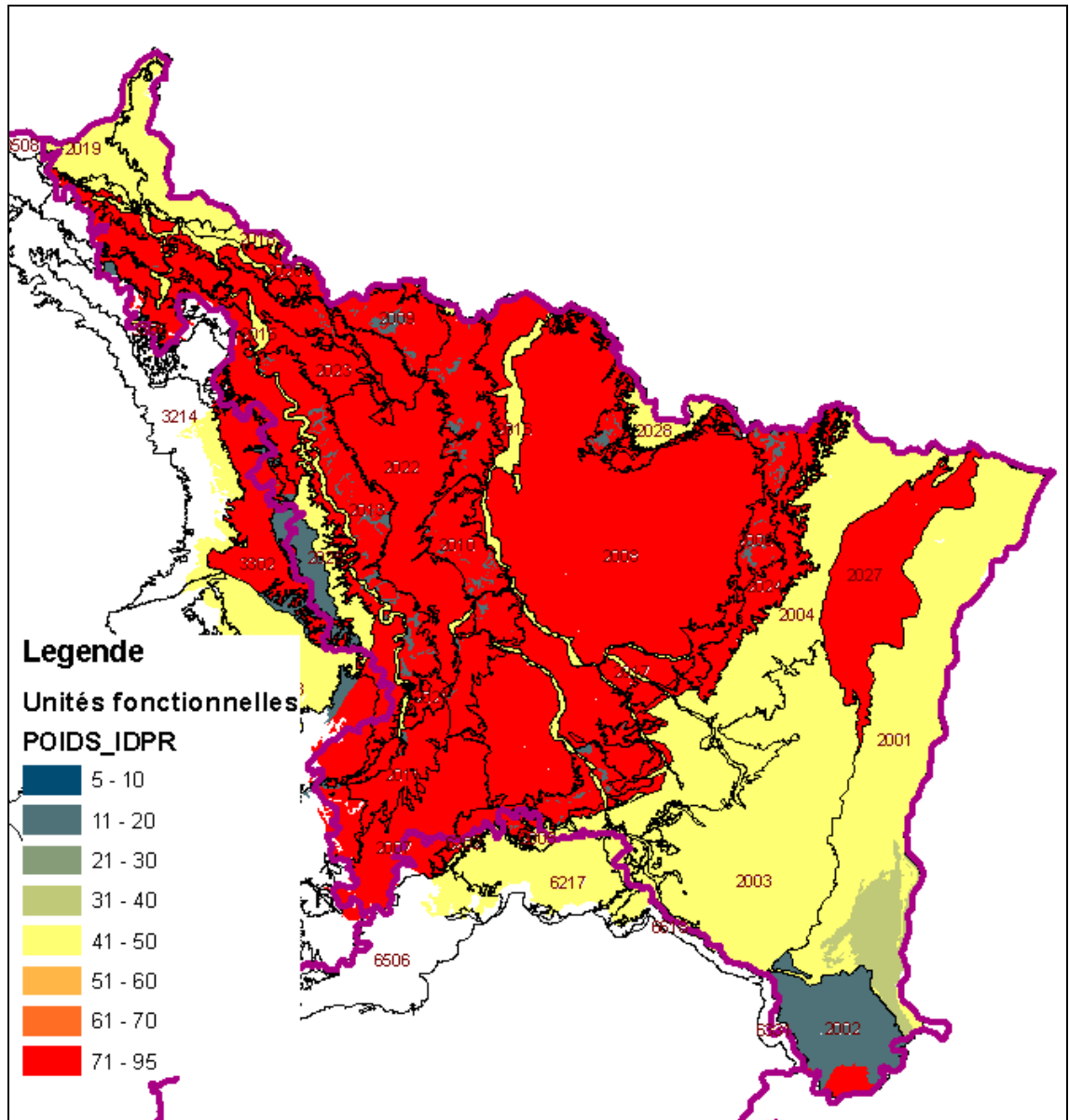


Figure 29: Poids du critère IDPR (en % du total)

6.4. ANALYSE CRITIQUE DES RESULTATS

6.4.1. Indice IDPR hors domaine sédimentaire

En dehors des territoires où affleurent de grands systèmes sédimentaires crayeux, la carte régionale de l'IDPR indique une prédominance du potentiel de ruissellement sur celui de l'infiltration (teintes vertes prédominantes en Alsace par exemple). Ceci est 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. Dans ces zones, en effet, le substrat est constitué d'alluvions formant un 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. C'est le cas de la plaine d'Alsace.

6.4.2. 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.

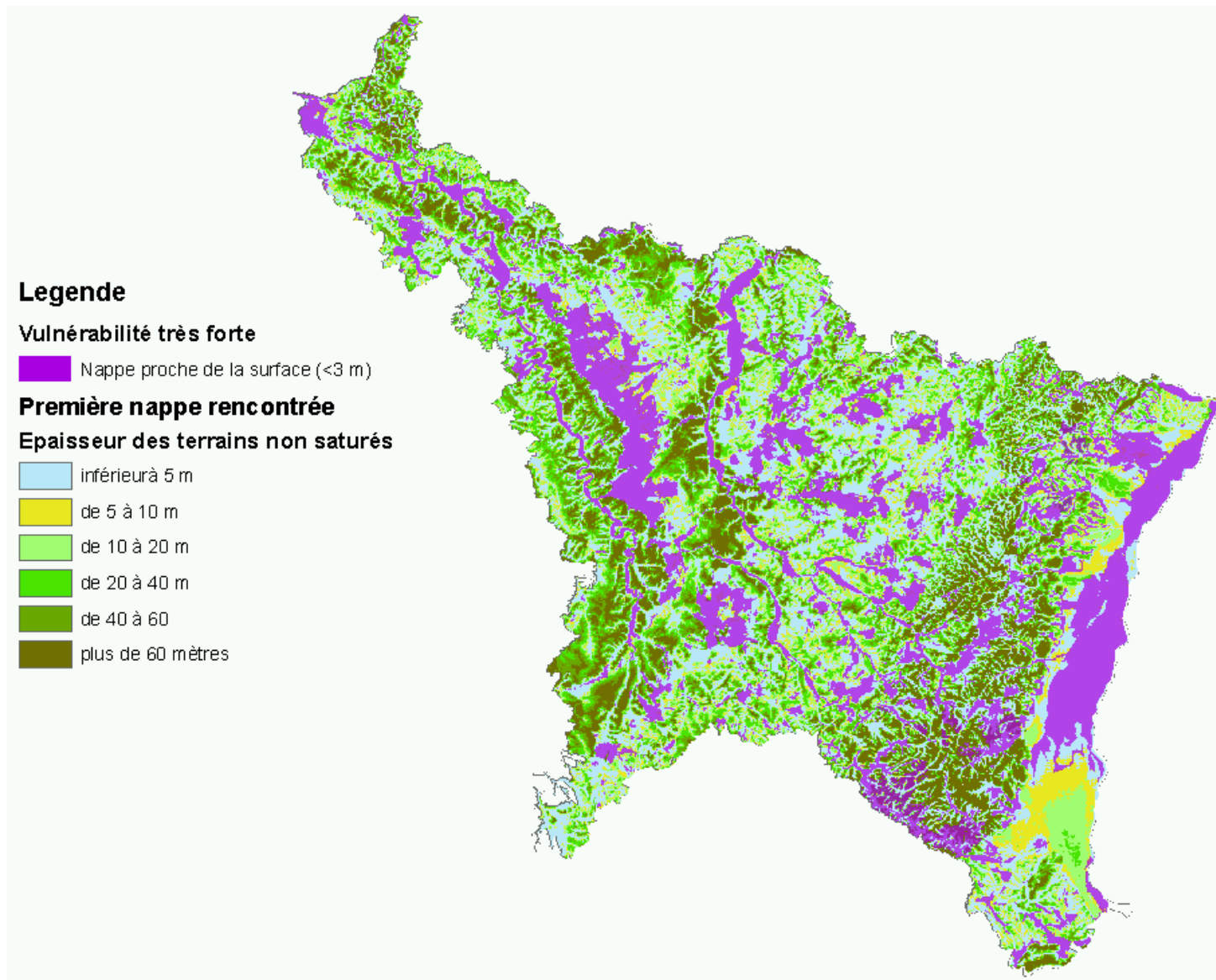


Figure 30 : Vulnérabilité des eaux souterraines – Typologie selon un seuil ZNS à 3 m

6.4.3. Poids relatifs IDPR/ZNS dans le cas des aquifères karstiques et des grandes masses d'eau identifiées comme imperméables localement aquifères

Pour les territoires majoritairement infiltrants tels que les zones où une organisation karstique du réservoir peut apparaître, le poids donné à l'IDPR par rapport à la ZNS est prépondérant. La proximité de la nappe par rapport à l'altitude des terrains naturels joue pour une part négligeable de l'équation de vulnérabilité. Ces zones de forte perméabilité ont été identifiées par les hydrogéologues régionaux à travers une subdivision des masses d'eau fondée sur le découpage du territoire réalisés pour le référentiels BDRHFV1 en 2000.

Cela explique, à titre d'exemple, la distinction opérée au sein de l'unité 2002, entre le poids du critère IDPR appliqué à la partie sud de la masse d'eau et celui appliqué pour le reste de son extension.



Figure 31: Poids du critère IDPR (en % du total) – extrait ME 2002

Pour les territoires majoritairement ruisselants où localement de petites nappes perchées peuvent exister sans former d'unités aquifères d'intérêt régional. Le critère ZNS, majoritairement élevé compte-tenu de ces petites nappes, a été minimisé. Ainsi l'accent a porté sur une valeur IDPR élevée (critère de vulnérabilité faible) qui, dans le cas de ces masses d'eau majoritairement imperméables et localement aquifères, traduit l'imperméabilité en grand de ces formations au regard de nappes plus profondes. La vulnérabilité de ces aires, étant majoritairement liée à l'IDPR, en est alors diminuée

La prise en compte des constats de l'analyse critique des données conduit à présenter ci-dessous une nouvelle carte de vulnérabilité à laquelle ont été portés les ajustements sus mentionnés et une typologie de vulnérabilité forte *de facto* pour les zones de faible épaisseur des terrains non saturés.

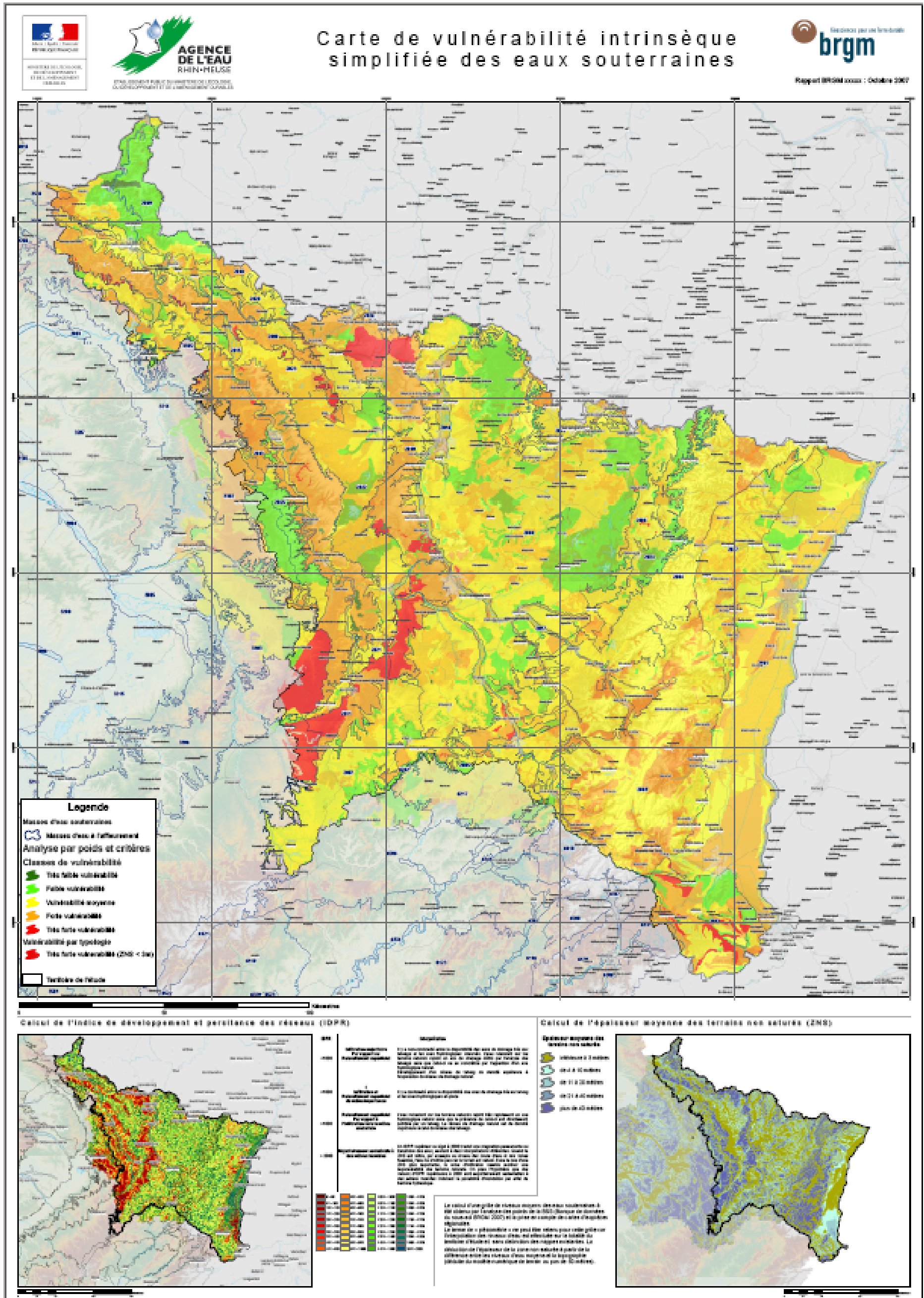


Figure 32 : Carte de vulnérabilité intrinsèque du bassin Rhin-Meuse et de la Lorraine

7. Le système d'information lié à la vulnérabilité des eaux souterraines du bassin Rhin Meuse

7.1. LES CARTES

Les cartes présentées sont archivées sur le CDROM au format PDF dans le répertoire « Cartes de Vulnérabilité ».

- Cartes de vulnérabilité par masses d'eau.
- Carte de vulnérabilité du bassin au format A0.

7.2. LES DONNEES GEOGRAPHIQUES

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 données du SIG sont contenues dans le répertoire « Géodatabase Vulnérabilité ». La géodatabase Vulnerabilite.mdb est au format MS/ACCESS2000®. Elle peut être, avec les précautions d'usage, exploitée directement sous le logiciel ACCESS2000®.

La géodatabase contient :

- Les unités fonctionnelles décrites dans ce rapport auxquelles sont jointes les informations résultantes du calcul de vulnérabilité. (Entites : Grandes_Unites)
 - IDPR et ZNS
 - Poids relatif IDPR et Poids relatif ZNS
 - Valeur de la vulnérabilité
 - Classe de vulnérabilité
 - Les champs Karstique³ et Degres_de_karstification permettant l'identification des entités karstiques

³ Le caractère karstique est attribué aux masses d'eau souterraine qui comportent des karsts actifs, fonctionnels (fonctionnement hydraulique particulier avec une organisation spécifique du drainage). Les masses d'eau de ce type sont caractérisées par la présence de zones de surface d'une extrême vulnérabilité et des écoulements souterrains particulièrement rapides. Les spécificités de ce caractère sont développées dans un paragraphe spécifique (source : BRGM, MISE EN OEUVRE DE LA DCE : IDENTIFICATION ET DELIMITATION DES MASSES D'EAU SOUTERRAINE - guide méthodologique, Janvier 2003) Décrit dans la nomenclature n°397.

- 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.

7.3. LES GRILLES DE CALCUL INTERMEDIAIRES

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 aussi fournies au format Grid d'ArcInfo. Ces données de calcul intermédiaire sont stockées dans le répertoire « Grilles » :

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

Nota bene : la projection utilisée pour l'ensemble des données et des cartes est de type Lambert II étendu.

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*).

Le critère *IDPR* présente une approche indirecte de la perméabilité verticale des terrains naturels qui conditionne la capacité d'un polluant à rejoindre les eaux souterraines (en négligeant toute interaction possible avec le milieu non saturé). Le critère d'épaisseur de la *ZNS* combinée à l'indice *IDPR* représente alors le « temps » de parcours du polluant vers les eaux souterraines. Plus ce temps de parcours est faible, plus la vulnérabilité du milieu est forte ; à contrario un temps de parcours très long définit une vulnérabilité faible.

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.

61 % de la surface du territoire étudié présente une vulnérabilité moyenne ou faible.

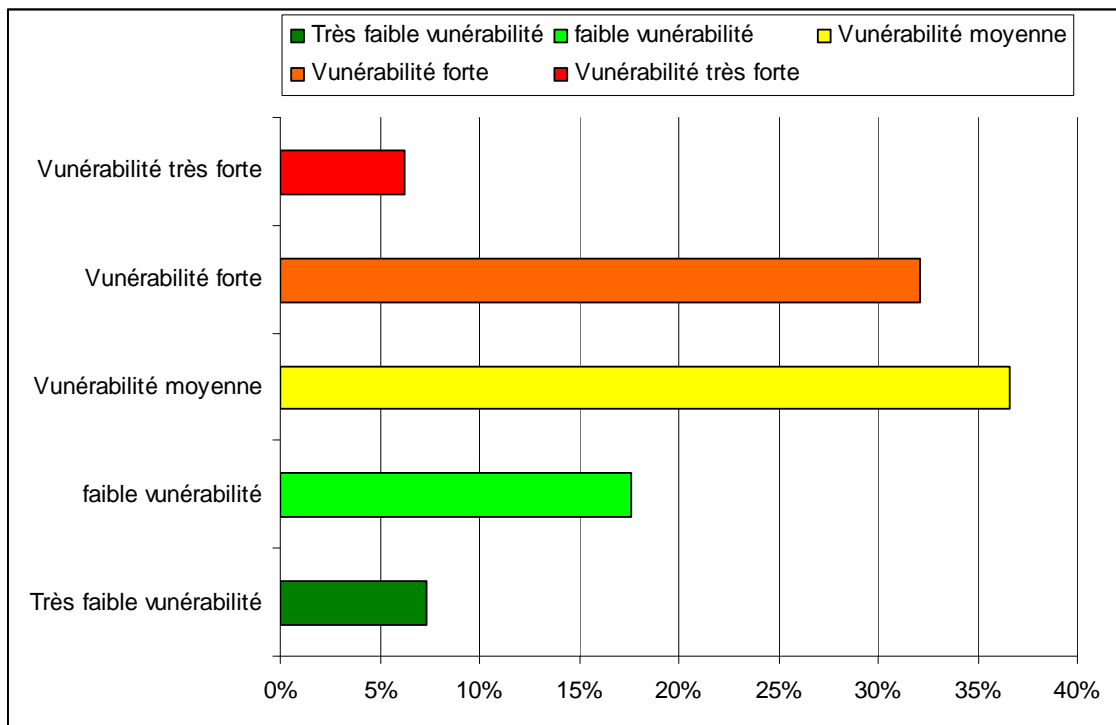


Figure 33: Classe de vulnérabilité en parts relatives de la surface total du territoire d'étude

La distribution de cette vulnérabilité suivant la typologie des masses d'eau met en avant la vulnérabilité des unités sédimentaires, la bonne protection relative des unités identifiées comme imperméables et localement aquifères. Les unités alluviales dont la plaine d'Alsace est le terme majoritaire sont de vulnérabilité moyenne, relativement protégée par l'épaisseur de leur zone non saturée.

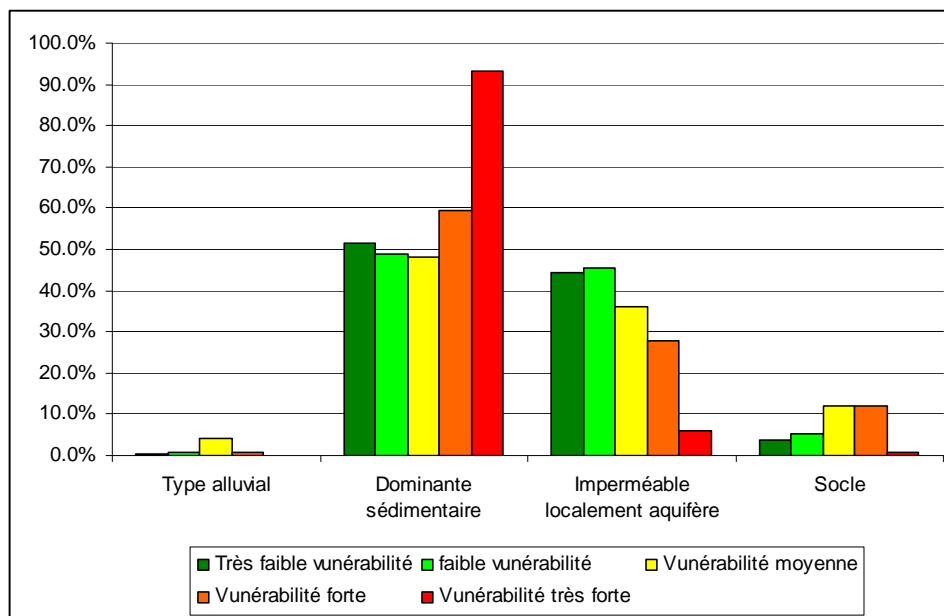


Figure 34: Classe de vulnérabilité en parts relatives par types de masses d'eau souterraine

	Type alluvial	Dominante sédimentaire	Imperméable localement aquifère	Socle
Très faible vulnérabilité	0.4%	51.7%	44.2%	3.8%
faible vulnérabilité	0.7%	48.8%	45.4%	5.2%
Vulnérabilité moyenne	4.0%	48.0%	36.0%	12.1%
Vulnérabilité forte	0.8%	59.4%	27.9%	11.9%
Vulnérabilité très forte	0.1%	93.3%	5.9%	0.7%

Avertissement : l'échelle de résolution de cette étude est le 1/100000. Elle est la combinaison des échelles produites par la carte géologique harmonisée au 1/50000, celle des entités de BDRHFV1, à l'échelle du 1/100000. L'indice IDPR est de son côté, extrait des données suivantes, BDCarthage, à l'échelle du 1/50 000 et MNT BDAIi au pas de 50 m, donc de précision décimétrique. L'échelle la plus grande est celle retenue.

Les données de vulnérabilité peuvent être exploitées sur des cartes au 1/50 000, à la condition de rappeler que la précision des données est décimétrique. Si l'on traduit cela en limites d'utilisation de la cartographie, les données de vulnérabilité peuvent être utilisées sans restriction à l'échelle d'un département, ou d'un SAGE. En revanche, les données ne doivent pas être exploitées à l'échelle d'une commune. En ce qui concerne les bassins d'alimentation de captage (BAC), les données sont utilisables – avec précaution – seulement pour de grands bassins (plusieurs dizaines de km²), et plutôt pour des milieux poreux et non alluviaux.

9. Bibliographie

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.

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

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.

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

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

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

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*.

Annexe 1 :

Méthodes existantes de cartographie de la vulnérabilité des aquifères

Notions générales de vulnérabilité

dans le cadre de la thématique des eaux souterraines

Quelques définitions :

- **Le risque de pollution** résulte du croisement d'un ou plusieurs aléas et d'un ou de plusieurs enjeux :

$$R(\text{isque}) = A(\text{léa}) \times E(\text{njeux}).$$

- **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.

$$R(\text{isque}) = A(\text{léa}) \times E(\text{njeux}).$$

$$R(\text{isque}) = (\text{Vulnérabilité} * \text{Facteur probabiliste}) \times E(\text{njeux}).$$

Méthodes existantes de cartographie de la vulnérabilité des aquifères (1/2)

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 :

A - 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) ;

- **Le système matriciel** : ce système, adapté à grande échelle (locale), se base sur un nombre limité de paramètres, judicieusement choisis. On procède à une combinaison de classes pour définir de façon descriptive le degré de vulnérabilité des aquifères ;
- **Le système de classe** : on définit un intervalle pour chaque paramètre jugé nécessaire pour l'évaluation de la vulnérabilité, ensuite on subdivise chacun des intervalles retenus en fonction de la variabilité du paramètre en question. Le score final résulte de la sommation de chaque note attribuée pour les différents paramètres. Il sera subdivisé en un nombre de classes limité.
- **Le système de classes pondérées** : basé sur l'affectation de notes aux paramètres qui sont retenus pour l'évaluation de la vulnérabilité des eaux souterraines en définissant des intervalles (id méthode précédente). Avant l'analyse combinatoire (sommation ou multiplication), une pondération est attribuée pour chaque paramètre selon son importance dans l'évaluation de la vulnérabilité.

Méthodes existantes de cartographie de la vulnérabilité des aquifères (2/2)

B - 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 car le « calage » dépend des polluants pris en compte (notion de facteur retard, K_d, \dots) ;

C - 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 cartographies à index

DRASTIC (1/2)

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).

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

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

$$D_i = D_n D_p + R_n R_p + A_n A_p + S_n S_p + T_n T_p + I_n I_p + C_n C_p$$

Où D, R, A, S, T, I, C, sont les paramètres cités plus haut

n : notation accordée à chaque paramètre ;

p : facteur de pondération accordé à chaque paramètre.

Les méthodes de cartographies à index

DRASTIC (2/2)

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

Les notations généralement accordées aux sept paramètres de la méthode DRASTIC sont présentées dans le tableau 1 ci-contre. La notation 10 correspond au degré de vulnérabilité le plus élevé.

Notations accordées aux paramètres de la méthode DRASTIC (d'après Lallemand-Barrès, 1994). La méthode DRASTIC propose deux systèmes de pondération suivant les conditions d'occupation du sol : occupation "normale" ou avec une occupation par une activité agricole intensive utilisant par exemple des produits phytosanitaires.

CRITERES	FACTEURS DE PONDERATION	
	"NORMAL"	"PRODUITS PHYTO"
D : Profondeur	5	5
R : Recharge	4	4
A : Milieu aquifère (zone saturée)	3	3
S : Milieu sol au-dessus de la zone non saturée	2	5
T : Topographie	1	3
I : Nature de la zone non saturée	5	4
C : Perméabilité aquifère	3	2

D : DISTANCE A LA NAPPE, EPAISSEUR DE LA ZONE NON SATURÉE		R : RECHARGE (PLUIE EFFICACE)	
Valeurs en mètres	Notation	Valeurs en mm	Notation
0 - 1,5	10	> 25,5	9
1,5 - 4,5	9	17,5 - 25,5	8
4,5 - 9	7	10 - 17,5	6
9 - 15	5	5 - 10	3
15 - 22	3	0 - 5	1
22,5 - 30	2		
> 30	1		

A : NATURE DE LA ZONE SATURÉE		S : NATURE DU SOL	
Calcaire karstique	10	Peu épais ou absent	10
Basalte	9	Gravier	10
Sable et gravier	8	Sable	9
Calcaire massif	6	Argile, agrégats ou pentes	7
Grès massif	6	Limons sableux	6
Shales en séquence	6	Limons	5
Métamorphique altéré, grès lités, calcaires	4	Limons silteux	4
Métamorphique	3	Limons argileux	3
Shale massif	2	Argile non agrégée et non fissurée	1

T : TOPOGRAPHIE, PENTES		I : NATURE DE LA ZONE NON SATURÉE	
Valeurs en % de pente	Notation	Calcaire karstique	10
0 - 2	10	Basalte	9
2 - 6	9	Sable et gravier	8
6 - 12	5	Sable et gravier avec silt et argile	6
12 - 18	3	Calcaire lité, grès, shale	6
> 18	1	Grès	6
		Calcaire	6
		Shale	3
		Silt/Argile	1

C : PERMÉABILITÉ	
> 9,4.10 ⁻³ m/s	10
4,7.10 ⁻⁴ - 9,4.10 ⁻³ m/s	8
32,9.10 ⁻⁵ - 4,7.10 ⁻⁴ m/s	6
14,7.10 ⁻⁵ - 32,9.10 ⁻⁵ m/s	4
4,7.10 ⁻⁵ - 14,7.10 ⁻⁵ m/s	2
4,7.10 ⁻⁶ - 4,7.10 ⁻⁵ m/s	1

La méthode DRASTIC est **principalement utilisée pour la cartographie à petite échelle** (Lyakhloufi *et al.* 1999).

BRGM/EAU/ADM

Les méthodes de cartographies à index

SINTACS

Elle est dérivée de la méthode DRASTIC, 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**;
- T : Tipologia della Copertura (sol) ;
- A : Carratteri Idrogeologici dell' **Acquifero** ;
- C : Conducibilita Idraulica (conductivité hydraulique) ;
- S : Acclività della **Superficie Topographica**

L'index de vulnérabilité I_v est calculé selon la formule :

$$I_v = \sum P(1,7) W(1,n)$$

Avec : $P(1, 7)$: index des critères 1 à 7

$W(1, n)$: poids de chaque classe (varie de 1 à n)

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).

L'index final résultant de cette méthode est divisé sous forme de pourcentage puis d'intervalles définis sur la base de 500 tests. Ces intervalles sont regroupés en six classes de vulnérabilité. SINTACS utilise donc les sept même paramètres que DRASTIC mais est plus flexible au niveau du système d'indexation et de pondération. L'utilisateur code les données d'entrée en fonction des situations locales de chaque cellule, avec la possibilité d'utiliser des classifications différentes suivant les conditions.

Les méthodes de cartographies à index

AVI (1/2)

Développée par l'institut de recherche de recherche national d'hydrologie (National Hydrology Research Institute - NHRI) à Saskatoon, Saskatchewan, la méthode de l'index de vulnérabilité des couches aquifères (Aquifer Vulnerability Index - AVI) détermine un critère de protection des eaux souterraines. Cette technique a été appliquée à une partie de la région frontalière entre le Saskatchewan et l'Alberta (Van Stempvoort, et d'Al, 1992), elle a impliqué la compilation de la stratigraphie, de l'identification des couches aquifères, et du calcul de l'AVI pour approximativement 2.000 points d'eau disponibles sur ce secteur pilote

Résistance hydraulique, $c = \sum D_i / K_i$, pour les couches de 1 à i

AVI mesure la vulnérabilité selon la résistance hydraulique (c) à l'écoulement **vertical de l'eau opposée par les formations géologiques situées au-dessus de la couche aquifère**. La résistance hydraulique est calculée à partir de l'épaisseur (d) de chaque couche sédimentaire et de la conductivité hydraulique (k) de chacune de ces couches .

Dans ce type d'approche, des valeurs hydrauliques saturées de conductivité (Ksat) sont assignées à chaque couche sédimentaire rapportée par point. Ces valeurs sont souvent établies à partir de valeurs typiques issues de recherches bibliographiques.

L'utilisation de Ksat pour les niveaux **insaturés** devrait donner des valeurs hydrauliques conservatrices de résistance donc une vulnérabilité moins élevée car la perméabilité à saturation est inférieure à la perméabilité d'un milieu non saturé.

Les méthodes de cartographies à index

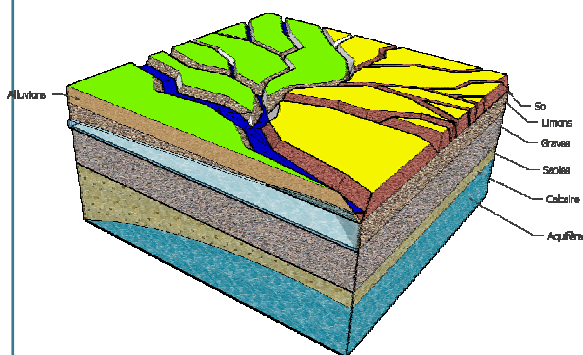
AVI (2/2)

L'épaisseur des différentes couches sédimentaires découle de l'étude des ouvrages existants sur le territoire de l'étude. La résistance hydraulique (c) a la dimension du temps (par exemple en années) et représente le flux-temps par gradient d'unité pour l'eau s'infiltrant au travers des diverses couches de sédiment vers la couche aquifère saturée.

Une résistance hydraulique (c) faible, suppose une vulnérabilité importante, à contrario, (c) élevée suppose une vulnérabilité faible.

Une carte de vulnérabilité peut être déduite en calculant le logarithme₁₀ de la résistance hydraulique (notation c) pour chacun des points inventoriés.

Les surfaces résultantes (*par interpolation des points, à fortiori pour un milieu supposé homogène*) représentent les secteurs de résistance différente. Elles sont groupés par catégories de vulnérabilité :



Résistance hydraulique, c (années)	Notation (c)	Catégorie de vulnérabilité
< 10 ans	< 1	vulnérabilité extrêmement élevée
10 - 100 ans	1 à 2	vulnérabilité élevée
100 - 1000 ans	2 à 3	vulnérabilité modérée
1000 - 10000 ans	3 à 4	basse vulnérabilité
> 10.000 ans	> 4	vulnérabilité extrêmement basse

Les méthodes de cartographies à index

EPIK

C'est la première méthode dédiée spécifiquement aux aquifères karstiques **sensu-stricto** (Doerfliger, 1996 ; Doerfliger et Zwahlen, 1997). Elle a été développée dans le but de délimiter les périmètres de protection des captages, conformément à la législation suisse, à partir d'une base cohérente et rigoureuse. Un des avantages de cette méthode est de traduire la sensibilité des eaux souterraines vis à vis de tout type de contaminant. La méthode est systématique puisqu'elle propose une **analyse détaillée du bassin d'alimentation** de la source karstique découpé en un maillage régulier.

Elle est basée sur quatre critères :

- **Epikarst** ;
- **Protective Cover (couverture protectrice : sol)** ;
- **Infiltration Conditions (conditions d'infiltration)** ;
- **Karst network development (développement du réseau karstique).**

Ces critères correspondent à quatre aspects spécifiques déterminant l'organisation des écoulements en milieu karstique. Chaque paramètre est divisé en classes traduisant des degrés d'impact vis à vis d'une pollution. Un coefficient multiplicateur (facteur de pondération) est appliqué à chaque paramètre afin de traduire son importance relative par rapport aux autres (Petelet-Giraud *et al.*, 2000).

L'indice final de vulnérabilité est calculé (facteur de protection) en chaque maille du système selon la formule : $F = \alpha E_i + \beta P_j + \gamma I_k + \delta K_l$
 $\alpha, \beta, \gamma, \delta$: coefficients de pondération des critères ;
 E_i, P_j, I_k, K_l : valeur de chacun des critères indexés.

Les méthodes de cartographies à index

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). La combinaison des 5 cartes correspondant à la transcription des 5 critères RISKE permet de calculer l'indice global de vulnérabilité (I_g) en chaque maille de la zone d'étude. Le choix de la taille de la maille se fait généralement en fonction du pas du Modèle Numérique de Terrain (50 x 50 m par exemple) ou de la densité de l'information disponible. A chaque maille correspond une valeur de l'indice de chacun des critères. La compilation des cinq cartes élémentaires se fait en introduisant un facteur de pondération entre les critères traduisant l'importance relative qui leur est attribuée. Toutes les alternatives des critères sont classées en 5 catégories indexées de 0 à 4, du moins au plus vulnérable. Dans la même logique, l'indice global de vulnérabilité (I_g) obtenu en chaque pixel de la zone d'étude est divisé en 5 classes égales (0 à 4) allant du moins au plus vulnérable.

Le calcul de l'indice global de vulnérabilité I_g se fait selon la formule :

$$I_g = \alpha R_i + \beta I_j + \delta S_k + \gamma K_l + \varepsilon E_m$$

$\alpha, \beta, \delta, \gamma, \varepsilon$: poids des critères RISKE ;

i, j, k, l, m : indices des critères RISKE

Les méthodes de cartographies à index

DISCO (1/2)

La méthode "DISCO" (discontinuités - couverture protectrice) a pour but de définir les zones de protection en tenant compte de l'hétérogénéité du milieu. Elle est basée sur une évaluation de la vulnérabilité intrinsèque prenant en considération les facteurs géologiques et hydrogéologiques conditionnant le fonctionnement de l'aquifère fissuré et le transport des polluants.

Trois paramètres sont jugés 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

L'importance relative de ces différents paramètres et le mode de combinaison **reposent sur des études de cas pratiques sur le terrain.**

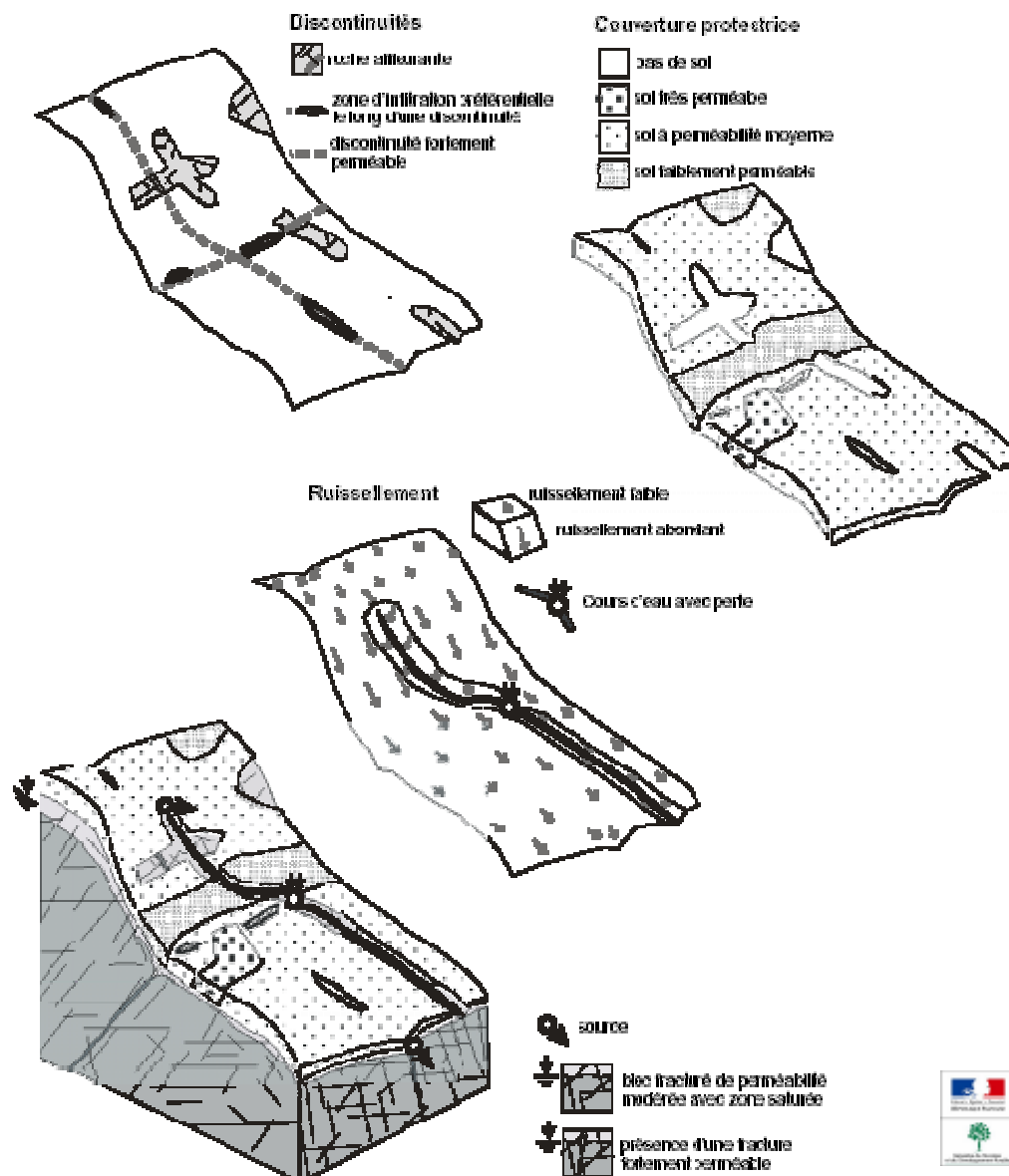
L'évaluation de l'influence combinée de ces trois paramètres permet de déterminer un facteur de protection naturel en tout point du bassin d'alimentation.

Les méthodes de cartographies à index DISCO (2/2)

le paramètre "discontinuités" prend en considération le transit de l'eau à l'intérieur de l'aquifère fissuré entre un point d'infiltration sur le bassin d'alimentation et le captage (p. ex. : zone fracturée fortement perméable en connexion rapide avec le captage ; secteur peu fracturé),

le paramètre "couverture protectrice" traduit l'effet protecteur des formations géologiques sur montant l'aquifère (sol, dépôts quaternaires),

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).



Les méthodes de cartographies à index

GOD

Développée par Foster en 1987, elle 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.

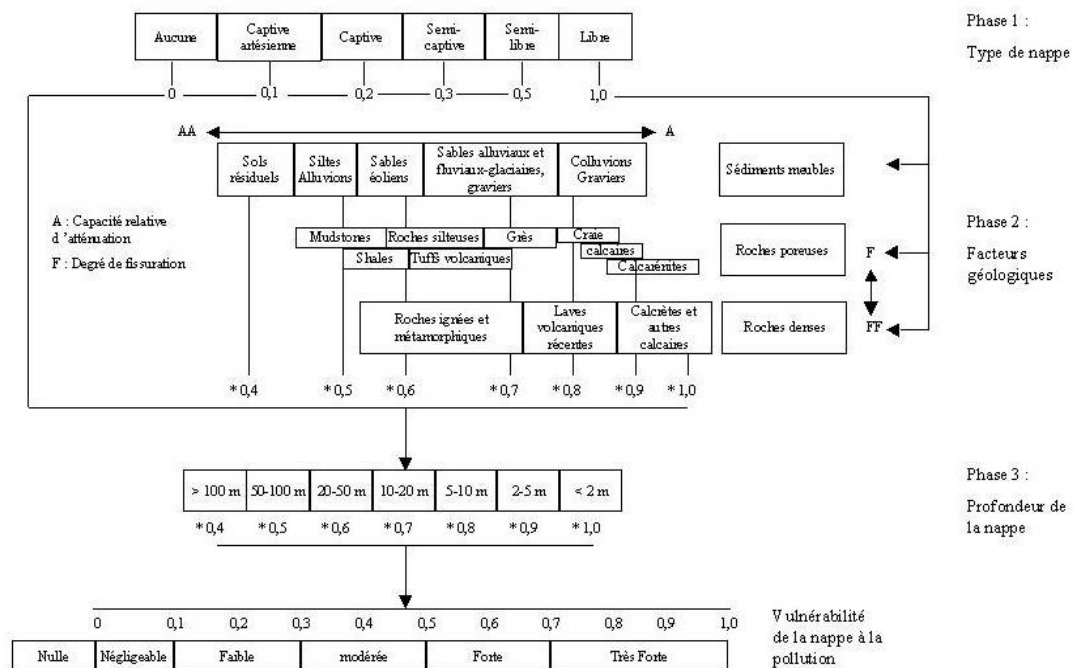
Cette méthode est basée sur l'identification de trois critères :

Type de nappe (**Groundwater occurrence**) ;

Type d'aquifère en termes de facteurs lithologiques (**Overall aquifer class**) ;

Profondeur de la nappe (**Depth to groundwater table**).

Le but de cette méthode est de réaliser une estimation rapide de la vulnérabilité d'un aquifère.



Les méthodes de cartographies à index :

Z. Alamy et C. Langevin (1989)

Z. Alamy et C. Langevin 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 suivant. On peut constater que la pondération des critères est très subjective.

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)	-

Les méthodes de cartographies à index :

J. Ricour (1988)

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 : nature du recouvrement sur l'aquifère crayeux, topographie et profondeur de la nappe sous le sol.

Cette carte de vulnérabilité 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).

Pressions

	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	
			forêts, friches		milieu agricole et marécageux	
			Classe 3		milieu urbain et industriel, routes, carrières, décharges...	

Les méthodes de cartographies à index :

S. Munoz, C. Langevin (1991)

S. Munoz (1989) et S. Munoz, C. Langevin (1991), pour élaborer les cartes de vulnérabilité au Guatemala, retiennent les paramètres suivants

Images	Variables Paramètres	Echelle de vulnérabilité et poids relatif de chaque paramètres										Poids Global
		(Très vulnérable)					(Peu vulnérable)					
Zone non saturée	Epaisseur	< 10 m		10-20 m		20-30 m		30-50 m		> 50 m		5
	Valeur attribuée	Initiale 1	Finale 5	Initiale 3	Finale 15	Initiale 10	Finale 50	Initiale 25	Finale 125	Initiale 50	Finale 250	
Zone de recharge	Type de milieu	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							

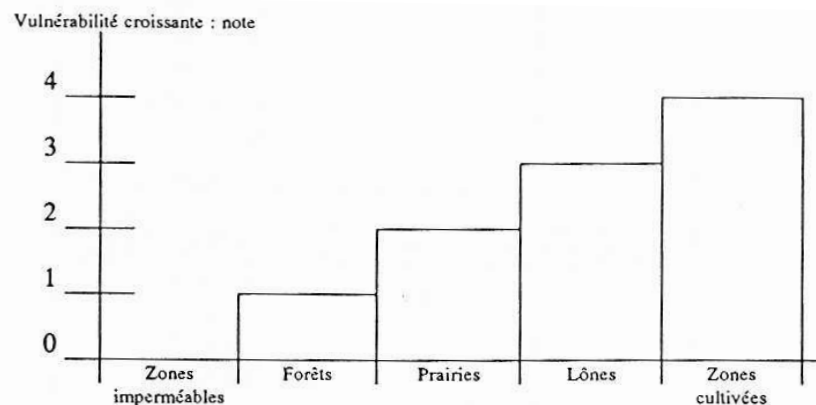
valeur finale de la vulnérabilité = valeur initiale * poids global

Les méthodes de cartographies à index :

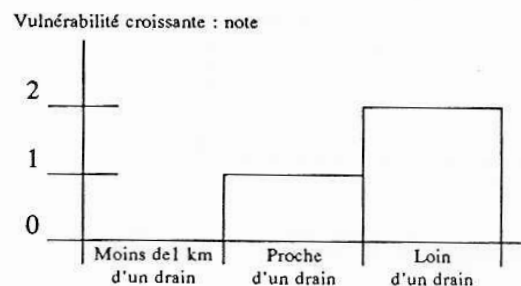
M.F. Suais (1990)

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.

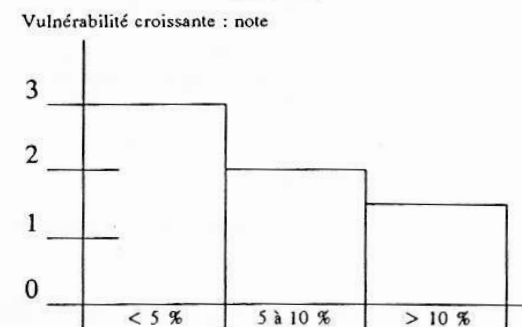
(degré d'imperméabilisation, densité et nature du couvert végétal et densité de drainage,...)



Densité de drainage



Pentes



Les méthodes de cartographies à index :

Démarches communes

La majorité des méthodes présentées exploite un critère relatif à la géomorphologie du territoire étudié à l'exception des méthodes GOD et AVI):

- soit la pente prise en compte directement au travers de sa valeur absolue (DRASTICS,SINTACS ou Z. Alamy et C. Langevin en 1989)
- soit la pente par un facteur indirect (DISCO,MF Suais 1990), reprenant la densité de drainage des réseaux hydrologique de surface

Au delà du facteur pente, la nature des couvertures en place au dessus des aquifères (sols, ZNS) sont en général regroupées en un critère prépondérant pour l'analyse de vulnérabilité ou identifiées de manière **systematique (AVI)**

Toutes ces méthodes d'étude (DRASTICS,SINTAC,AVI,...) supposent l'intégration de nombreuses données dont l'acquisition, à l'échelle régionale, suppose un investissement en temps et ressource difficilement mobilisable.

Les méthodes de cartographies à index : Synthèse des critères utilisés

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

Critères relatifs aux conditions de surface ou sub-surface:

- Topographie. Le ruissellement, donc la quantité d'eau s'infiltrant, dépend entre autre de la pente (issue du MNT ; Modèle Numérique de Terrain). Par ailleurs, elle est susceptible de favoriser le déplacement des pollutions et de participer à leur concentration dans des secteurs favorables ;
- Pédologie : la nature, la texture, la perméabilité verticale des sols vont réguler la nature et la quantité d'échanges entre la surface et la ZNS. Dans le cadre de cette étude, la nature des sols au droits des drains du réseau de surface peut être considérée comme homogène et non influente ;

Critères relatifs à la zone non saturée :

- Profondeur de la nappe libre (épaisseur de la Zone Non Saturée) : l'épaisseur de la ZNS conditionne de temps de transfert d'un polluant jusqu'à la nappe (rétention, stockage, interactions physico-chimiques avec l'encaissant) et donc son éventuelle dégradation en cours de transfert ;
- Amplitude de battement de nappe : l'amplitude de battement de la nappe, dans la mesure ou elle est significative, conditionne l'épaisseur du recouvrement de la nappe (sol + ZNS). De ce fait elle peut devenir un critère de vulnérabilité ;
- Perméabilité verticale de la ZNS : elle dicte le temps de transfert ou même peut empêcher le transfert vertical d'un polluant vers la nappe ;
- Structure de la ZNS : variation de faciès, épaisseur des discontinuités de faciès, position dans le profil vertical, texture, teneur en m.o. (matières organiques) et argile, sont autant de facteurs conditionnant la migration de fluides vers la nappe.

Critères relatifs à la zone saturée :

- Type de nappe (libre ou captive) : l'absence d'horizon imperméable entre la surface et le toit d'une nappe libre lui confère un caractère plus vulnérable qu'une nappe captive protégée par des formations imperméables.
- Paramètres hydrodynamiques des formations aquifères (transmissivité (T), perméabilité (K), coefficient d'emmagasinement (s), gradient hydraulique (i)) : ils déterminent la vitesse de migration des polluants dans la nappe ;
- Piézométrie : au cours d'un cycle hydrologique complet, la géométrie d'une nappe peut évoluer : par exemple, entre les hautes eaux et les basses eaux, les relations eaux superficielles/eaux souterraines peuvent s'inverser ;
- Directions et sens d'écoulement : ils déterminent les espaces susceptibles d'être atteint par un polluant une fois que celui-ci a atteint la nappe ;
- Type de système hydrogéologique : un caractère transmissif implique des temps de transfert rapide et également de faibles temps de séjour dans la nappe. Un caractère inertiel implique des temps de transfert lents et des temps de séjours élevés. Un caractère capacitif important permet l'intervention de phénomènes de dilutions des polluants.
- Relations nappe/cours d'eau : le type de relation entre les eaux superficielles et les eaux souterraines (drainage ou alimentation) conditionne la possibilité de contamination des eaux souterraines ;
- Epaisseur de l'aquifère (quantité de réserve) : la quantité d'eau en réserve détermine les conditions de dilution d'un polluant ayant atteint la nappe ;
- Présence ou non d'un horizon moins perméable et position de celui-ci. Cet horizon va déterminer le caractère libre ou captif de la nappe ;
- Recharge : quantité d'eau atteignant la Zone Saturée sur une période donnée (recharge annuelle nette). Elle dépend de l'infiltration efficace, donc du climat (ETP, précipitations) et de la topographie ; mais également de sa répartition dans le temps (périodes de recharge). Elle constitue un facteur de transfert des polluants vers les eaux souterraines.

Critères communs au sol, à la Zone Non Saturée et à la Zone Saturée

- Fracturation (directions et densité). Des discontinuités verticales telles que les failles peuvent augmenter très sensiblement les vitesses d'infiltration depuis la surface vers la nappe ;
- Bilan hydrique. Il détermine l'infiltration efficace et donc la potentialité d'un polluant à pénétrer le sous-sol. Les principaux facteurs le déterminant sont le climat, l'ETP (EvapoTransPiration) et les précipitations.



Centre scientifique et technique
3, avenue Claude-Guillemin
BP 36009
45060 – Orléans Cedex 2 – France
Tél. : 02 38 64 34 34

Service géologique régional lorraine
1, avenue du Parc de Brabois
54500 – Vandoeuvre-lès-Nancy - France
Tél. : 03 83 44 81 49