



Convention Région wallonne et HGE-ULiège

Développement d'un module SIG de cartographie de la vulnérabilité des eaux souterraines et de risques et application aux principales masses d'eau souterraine de Wallonie

Délivrable D03: Description des applications réalisées et cartes de vulnérabilité produites avec l'outil SIG

Coordinateurs du projet :

Dr. ir. Serge Brouyère (HGE-ULg) & Prof. Alain Dassargues

Partenaires scientifiques :

ULg-HGE : Fabien Dollé, Caroline Thomas, Dr. ir. Philippe Orban

GxABT-ULg-AEESP : ir. Kevin Lefebure, Dr. ir. Boubacar Billo Bah, Dr. ir. Christophe Vandenberghe, Prof. Gilles Colinet

Rédaction : Caroline Thomas, Philippe Orban, Alain Dassargues & Serge Brouyère

Table des matières

1.	Introduction et objectifs du délivrable.....	9
2.	Données nécessaires et hypothèses prises	10
2.1.	Modèle numérique de terrain (MNT).....	12
2.2.	Classes de pentes	13
2.3.	Directions d'écoulement.....	13
2.4.	Zones d'infiltration préférentielle	14
2.4.1.	Atlas du Karst.....	15
2.4.2.	Cavités.....	16
2.4.3.	Carrières	17
2.5.	Coefficients d'infiltration et de ruissellement et eau utile	17
2.6.	Réseau hydrographique.....	20
2.7.	Discréétisation sol / sous-sol	21
2.7.1	Définition des lithologies	22
2.6.2.	Définition des épaisseurs des couches géologiques.....	24
2.8.	Propriétés hydrogéologiques	32
2.9.	Autres couches de la BD APSUGIS	36
2.10.	Bassins versants.....	36
3.	Production des cartes de vulnérabilité intrinsèque	39
3.1.	Rappel des principes de base de la vulnérabilité	39
3.2.	Exemple du bassin de la Dendre orientale	42
3.3.	Résultats par masse d'eau souterraine	46
3.3.1.	Localisation des masses d'eau cartographiées.....	47
3.3.2.	Masse d'eau BERWE013 (uniquement le bassin de la Dendre orientale).....	49
3.3.3.	Masse d'eau BERWE030 et BERWE033.....	50
3.3.4.	Masses d'eau BERWE051 et BERWM052.....	50
3.3.5.	Masses d'eau BERWM011.....	52

3.3.6.	Masses d'eau BERWM012, BERWM021 et BERWM071	53
3.3.7.	Masses d'eau BERWM022 et BERWM023	54
3.3.8.	Masse d'eau BERWM040	55
3.3.9.	Masses d'eau BERW100, BERWM102, BERWM103 et BERWR101	56
3.3.10.	Masse d'eau BERWM142	Erreur ! Signet non défini.
3.4	Production des cartes à l'échelle de la Région wallonne	68
4.	Vulnérabilité spécifique.....	77
4.1.	Hypothèses prises et données nécessaires.....	77
4.2.	Résultats de la vulnérabilité spécifique	82
5.	Risque	85
5.1.	Définition du risque.....	85
5.2.	Ressources disponibles en Région wallonne pour la cartographie du risque.....	86
5.2.1.	Evaluation de l'Aléa	86
5.2.2.	Evaluation des Conséquences	88
5.2.	Exemple d'application	88
5.3.	Perspectives pour le risque.....	95
6.	Conclusions et perspectives	96
7.	Bibliographie.....	97
8.	Annexe : Procès-verbal de la réunion du 23/11/2018 : Réunion de Coordination Géomatique Apsû-Gis et Atlas du Karst	99
8.1.	Présentation de l'utilisation de l'Atlas du Karst dans Apsû-Gis	99
8.2.	Discussion	100

Table des illustrations

Figure 1 : Structure de la géodatabase d'APSUGIS.....	10
Figure 2 : Modèle numérique de terrain issu du projet ERRUISSOL.....	12
Figure 3 : Classes de pentes	13

Figure 4 : Directions d'écoulement.....	14
Figure 5 : Zones d'infiltration préférentielle	15
Figure 6 : Etapes de la création de la couche "ATLAS_KARST".....	16
Figure 7 : Coefficients d'infiltration	19
Figure 8 coefficients de ruissellement	19
Figure 9 : Eau utile (mm)	20
Figure 10 : Réseau hydrographique	21
Figure 11 : Discréétisation du sous-sol (Popescu et al., 2004)	22
Figure 12 : Raster des identifiants lithologiques de la couche 1 (sol).....	23
Figure 13 : Unités hydrogéologiques (cartes hydrogéologiques fournies le 28/06/2018)	23
Figure 14 : Epaisseur du sol fixée dans APSÙ-GIS sur base des données du PCNSW : Valorisation de la Carte Numérique des Sols de Wallonie, 2016	25
Figure 15 : Détermination de la l'épaisseur de la couche 1 de APSÙ-GIS en fonction de l'épaisseur de la couche sol du PCNSW et de l'épaisseur de la zone non saturée (ZNS)	26
Figure 16 : Etape de création de la couche 1 épaisseur de APSÙ-GIS	26
Figure 17 : Données ponctuelles de piézométrie et isopièzes provenant de la carte hydrogéologique	28
Figure 18 : Estimation de la piézométrie et création de la couche d'épaisseur de zone non saturée en fonction du degré de connaissance de l'aquifère.....	29
Figure 19 : Les différentes échelles des bassins versants en Région wallonne.....	37
Figure 20 : Les 61 bassins versants utilisés dans l'outil APSUGIS	38
Figure 21 : Critères de vulnérabilité (d'après Brouyère et al., 2001).....	39
Figure 22 : 4 cartes de vulnérabilité associées à chaque critère	41
Figure 23 : Dangerosité directe du bassin de la Dendre orientale	43
Figure 24 : Dangerosité latérale du bassin de la Dendre orientale	43
Figure 25 : Dangerosité latérale cumulée du bassin de la Dendre orientale	43
Figure 26 : temps de transfert de la Dendre orientale	45
Figure 27 : Classes de temps de transfert de la Dendre orientale.....	45
Figure 28 : Temps de transferts pondéré de la Dendre orientale	45

Figure 29 : Classe de temps de transfert pondéré de la Dendre orientale	45
Figure 30 : Classe de temps de transfert pondéré de la Dendre orientale (classe par percentile 10) ..	45
Figure 31 : Classes de temps de transfert de la Dendre orientale.....	46
Figure 32 : Classes de durée de pollution de la Dendre orientale.....	46
Figure 33 : Classes de coefficient atténuation de la Dendre orientale.....	46
Figure 34 : Carte de vulnérabilité globale de la Dendre orientale.....	46
Figure 35 : Localisation des masses d'eau cartographiées.....	48
Figure 36 : Mise en évidence des phénomènes karstiques dans les cartes de vulnérabilité dans la région de Mont-Godinne	54
Figure 37 : Classe des temps de transfert pondérés de la masse d'eau BERWE013	58
Figure 38 : Classe des temps de transfert pondérés des masses d'eau BERWME030 et BERWME033	59
Figure 39 : Classe des temps de transfert pondérés de la masse d'eau BERWE051	60
Figure 40 : Classe des temps de transfert pondérés de la masse d'eau BERWM052	61
Figure 41 : Classe des temps de transfert pondérés de la masse d'eau BERWM011	62
Figure 42 : Classe des temps de transfert pondérés de la masse d'eau BERWM012 et une partie de la masse d'eau BERWM071	63
Figure 43 : Classe des temps de transfert pondérés de la masse d'eau BERWM021 et une partie de la masse d'eau BERWM071	64
Figure 44 : Classe des temps de transfert pondérés des masses d'eau BERWM022 et BERWM023	65
Figure 45 : Classe des temps de transfert pondérés de la masse d'eau BERWM040	66
Figure 46 : Classe des temps de transfert pondérés des masses d'eau BERWM100, BERWM102, BERWM103, BERWR101	67
Figure 47 : Structure de la géodatabase des résultats de la vulnérabilité intrinsèque	68
Figure 48 : Dangerosité directe	69
Figure 49 : Dangerosité latérale	69
Figure 50 : Dangerosité latérale cumulée	70
Figure 51 : Temps de transfert	70
Figure 52 : Durées de pollution	71
Figure 53 : Coefficients d'atténuation	71

Figure 54 : Classes de Temps de transfert	72
Figure 55 : Classes de Durée de pollution	72
Figure 56: Classes de Coefficients d'atténuation	73
Figure 57: Temps de transfert pondérés.....	73
Figure 58: Durées de pollution pondérées.....	74
Figure 59: Coefficients d'atténuation pondérés.....	74
Figure 60: Classes de Temps de transfert pondérés	75
Figure 61: Classes de durées de pollution pondérées	75
Figure 62: Classes de coefficients d'atténuation pondérés	76
Figure 63: Classes de vulnérabilité globale	76
Figure 64 : Classes de temps de transfert du Geer (vulnérabilité intrinsèque).....	83
Figure 65 : Classes de temps de transfert du Geer (vulnérabilité spécifique : atrazine)	83
Figure 66 : Classes de temps de transfert du Geer (vulnérabilité spécifique : bentazone)	83
Figure 67 : Classes de temps de transfert du Geer (vulnérabilité spécifique : glyphosate).....	83
Figure 68 : Classes de temps de transfert du Geer (vulnérabilité spécifique : EC10_EC12)	83
Figure 69 : Classes de temps de transfert du Geer (vulnérabilité spécifique : trichlorethylene).....	83
Figure 70 : Classes de restitution massique du Geer (vulnérabilité intrinsèque).....	84
Figure 71 : Classes de restitution massique du Geer (vulnérabilité spécifique : atrazine)	84
Figure 72 : Classes de restitution massique du Geer (vulnérabilité spécifique : bentazone)	84
Figure 73 : Classes de restitution massique du Geer (vulnérabilité spécifique : glyphosate).....	84
Figure 74 : Classes de restitution massique du Geer (vulnérabilité spécifique : EC10_EC12)	84
Figure 75 : Classes de restitution massique du Geer (vulnérabilité spécifique : trichloréthylène).....	84
Figure 76 : Définition du risque (modifié d'après (Zwahlen, 2004))	85
Figure 77 : Zone d'étude pour la cartographie du risque	89
Figure 78 : Carte de vulnérabilité intrinsèque et localisation de la zone de protection des galeries de la CILE	90
Figure 79 : Distribution spatiale de l'aléa « azote ».....	91

Figure 80 : Carte d'aléa « azote » classée selon l'indice de toxicité	91
Figure 81 : Croisement des cartes d'aléa et de vulnérabilité	92
Figure 82 : Carte d'intensité du risque « azote ».....	93
Figure 83 : Localisation des zones de protection de captages (conséquences)	94
Figure 84 : Carte des conséquences, un indice est fixé en fonction de l'importance de la nappe	94
Figure 85 : Risque « total ».....	95

Table des tableaux

Tableau 1 : Détail des différentes couches présentes dans la BD APSUGIS.....	11
Tableau 2 : Equivalence entre les classes de valeurs du projet PCNSW et la valeur considérée dans APSU-GIS	25
Tableau 3 : Données d'épaisseur de la zone non saturée de certaines unités hydrogéologiques de l'Ardenne et de la Calestienne	31
Tableau 4 : Détail des propriétés hydrogéologiques pour chaque unité hydrogéologique ou type de sol.....	36
Tableau 5 : Détail des cartes produites par l'outil APSUGIS.....	40
Tableau 6 : Classes de vulnérabilité pour chacun des critères considérés	41
Tableau 7 : Pondérations des 4 critères pour une carte de vulnérabilité globale.....	42
Tableau 8 : Liste des masses d'eau cartographiées	47
Tableau 9 : Résumé des hypothèses prises et données disponibles pour la masse d'eau BERWE013 .	50
Tableau 10 : Résumé des hypothèses prises et données disponibles pour les masses d'eau BERWM030 et BERWE033	50
Tableau 11 : Résumé des hypothèses prises et données disponibles pour les masses d'eau BERWE051 et BERWM052	51
Tableau 12 : Résumé des hypothèses prises et données disponibles pour la masse d'eau BERWM011	52
Tableau 13 : Résumé des hypothèses posées et des données disponibles pour les masses d'eau BERWM021 et BERWM012	54
Tableau 14 : Résumé des hypothèses prises et données disponibles pour les masses d'eau BERWM022 et BERWM023	55

Tableau 15 : Résumé des hypothèses prises et données disponibles pour la masse d'eau BERWM040	56
Tableau 16 : Résumé des hypothèses prises et données disponibles pour les masses d'eau BERWM100, BERWM102, BERWM103 et BERWR101.....	57
Tableau 17 : Résumé des hypothèses prises et données disponibles pour la masse d'eau BERWM142	
..... Erreur ! Signet non défini.	
Tableau 18 : Détail de la table POLL_PROP de la BD APSUGIS.....	82
Tableau 19: Principales activités potentiellement polluantes (d'après COST 620) et données disponibles en Région wallonne	87

1. Introduction et objectifs du délivrable

Le présent délivrable est réalisé dans le cadre de la convention « Développement d'un module SIG de cartographie de la vulnérabilité des eaux souterraines et application aux principales masses d'eau souterraine de Wallonie ». Cette convention est financée par le Service public de Wallonie et menée par l'équipe d'Hydrogéologie et Géologie de l'Environnement et l'équipe GxABT – BIOSE de l'Université de Liège.

Les objectifs de la convention sont d'une part le développement d'un outil SIG de cartographie de la vulnérabilité des eaux souterraines de Wallonie basé sur la méthode APSÛ (Popescu *et al.*, 2004), d'autre part la production de cartes de vulnérabilité intrinsèque et spécifique pour les principales masses d'eau souterraine de Wallonie et le développement d'une méthodologie pour la cartographie du risque.

L'activité 3 porte sur l'application de l'outil et l'établissement des cartes de vulnérabilité pour des masses d'eau souterraine sélectionnées. Cette activité comprend 3 grandes étapes : (1) la constitution des couches SIG sol / sous-sol, (2) le calcul des indices de vulnérabilité, et (3) la production des cartes finales. L'activité 3 porte également sur l'étude exploratoire relative à l'établissement d'une carte de risque pour l'une ou l'autre masse d'eau souterraine.

Le présent délivrable rend compte de ces travaux. Pour plus d'informations concernant les principes de bases de la méthode APSÛ ou des explications sur le module SIG, le lecteur sera renvoyé vers les précédents délivrables :

- D01 : Travail Préparatoire au développement de l'outil SIG pour la cartographie de la vulnérabilité
- D02 (version provisoire) : Développement de l'interface SIG et des modules et outils qu'elle comporte
- D02 (final) : Développement de l'interface SIG et des modules et outils qu'elle comporte

Le délivrable D02 version provisoire détaille les différentes hypothèses qui ont été prises et les adaptations qui ont été faites de l'outil pour qu'il soit applicable à l'ensemble de la Wallonie et la version finale comporte le manuel utilisateur de l'outil APSÛ-GIS.

2. Données nécessaires et hypothèses prises

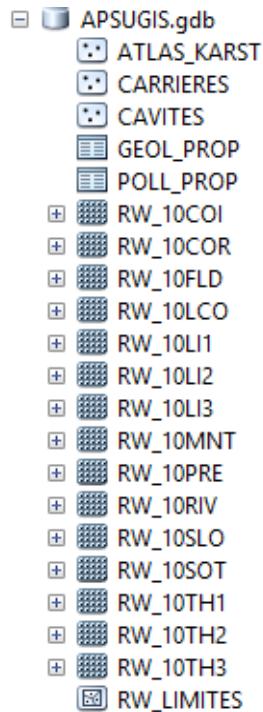


Figure 1 : Structure de la géodatabase d'APSUGIS

Pour pouvoir établir des cartes de vulnérabilité, de nombreuses données sont nécessaires. Celles-ci sont contenues dans la géodatabase APSUGIS. Ce chapitre va détailler l'origine des données, les hypothèses prises et les différents traitements dont ces données font l'objet avant d'être incorporées dans la géodatabase. Certains des aspects ont déjà été traités de manière détaillée dans les précédents délivrables. Les informations seront tout de même reprises de manière synthétique dans ce chapitre. Pour plus de précision, le lecteur sera parfois redirigé vers les précédents délivrables.

La Figure 1 et le Tableau 1 détaillent les différentes données qui sont présentes dans la géodatabase APSUGIS. Les différentes couches d'information contenue dans la géodatabase sont ensuite décrites de manière plus détaillée.

Nom	Type	Dénomination longue	Description
GEOL_PROP	Table attributaire	Propriétés hydrogéologiques	Contient les propriétés hydrogéologiques des couches lithologiques
CAVITES	Vectoriel de type point	Cavités	Liste des cavités sélectionnées dans l'atlas du karst comme points d'infiltration préférentielle. Cette couche est peu susceptible d'évoluer
ATLAS_KARST	Vectoriel de type point	Atlas du karst	Liste des phénomènes karstiques sélectionnés dans l'atlas du karst comme points d'infiltration et qui sont susceptibles d'évoluer
CARRIERES	Vectoriel de type point	Carrières	Liste des carrières
RW_LIMITES	Vectoriel de type polygone	Limites territoriales de la région wallonne	Limites territoriales de l'ensemble de la Région Wallonne
POLL_PROP	Table attributaire	Propriétés des polluants	Contient les propriétés des polluants (retard et dégradation) pour chaque couche de sol ou horizon géologique
RW_10MNT	Matriciel	Modèle Numérique de Terrain	Raster du Modèle Numérique de Terrain
RW_10SLO	Matriciel	Classes de pente	Raster des classes de pente
RW_10FLD	Matriciel	Directions d'écoulement	Raster des directions d'écoulement
RW_10LCO	Matriciel	Classes d'occupation du sol	Raster de l'occupation des sols issue de la COSW
RW_10SOT	Matriciel	Classes pédologiques	Raster des classes pédologiques issues de la CNSW
RW_10COI	Matriciel	Coefficients d'infiltration	Raster des coefficients d'infiltration
RW_10COR	Matriciel	Coefficients de ruissellement	Raster des coefficients de ruissellement
RW_10RIV	Matriciel	Réseau hydrographique	Raster du réseau hydrographique
RW_10PRE	Matriciel	Moyenne annuelle de l'eau utile	Raster de la moyenne annuelle de l'eau utile (précipitation – évapotranspiration) sur 10 ans
RW_10LIX	Matriciel	Matériau lithologie	Raster des identifiants des horizons lithologiques rencontrés jusqu'à la zone saturée (jusqu'à X horizons)
RW_10TH X	Matriciel	Epaisseur des matériaux lithologies	Raster des épaisseurs des horizons lithologiques rencontrées jusqu'à la zone saturée (jusqu'à X horizons)

Tableau 1 : Détail des différentes couches présentes dans la BD APSUGIS

2.1. Modèle numérique de terrain (MNT)

Le modèle numérique de terrain utilisé est celui issu du projet ERRUISSOL (Demarcin *et al.*, 2009). Il est présenté à la Figure 2. La taille des pixels est de 10m x 10m. Il existe un modèle numérique de terrain plus précis : le Lidar (pixels de 1m x 1m) mais son utilisation aurait généré des temps de calcul trop importants (pour plus de précision voir le Délivrable D02).

Le modèle numérique de terrain sert de trame de référence (taille des pixels, projection spatiale, alignement des pixels, extension spatiale). Il est utilisé dans la création de toutes les données cartographiques matricielles afin que ces dernières aient les mêmes propriétés spatiales.

C'est donc le MNT qui sert de trame pour discréteriser l'espace mais il faut rappeler que l'outil APSÙ-GIS est divisé en deux modules : un module de surface et un module souterrain. Le module de surface repose sur la discréterisation de 10m du MNT tandis que le module souterrain repose sur une discréterisation de 30m basée sur l'agrégation de 9 mailles contigües du MNT (sauf au voisinage de points particuliers tels que des pertes karstiques). Le module souterrain est basé sur une discréterisation moins fine pour diminuer le temps de calcul et parce que les données géologiques dont nous disposons ne requièrent en général pas une discréterisation aussi poussée qu'en surface.

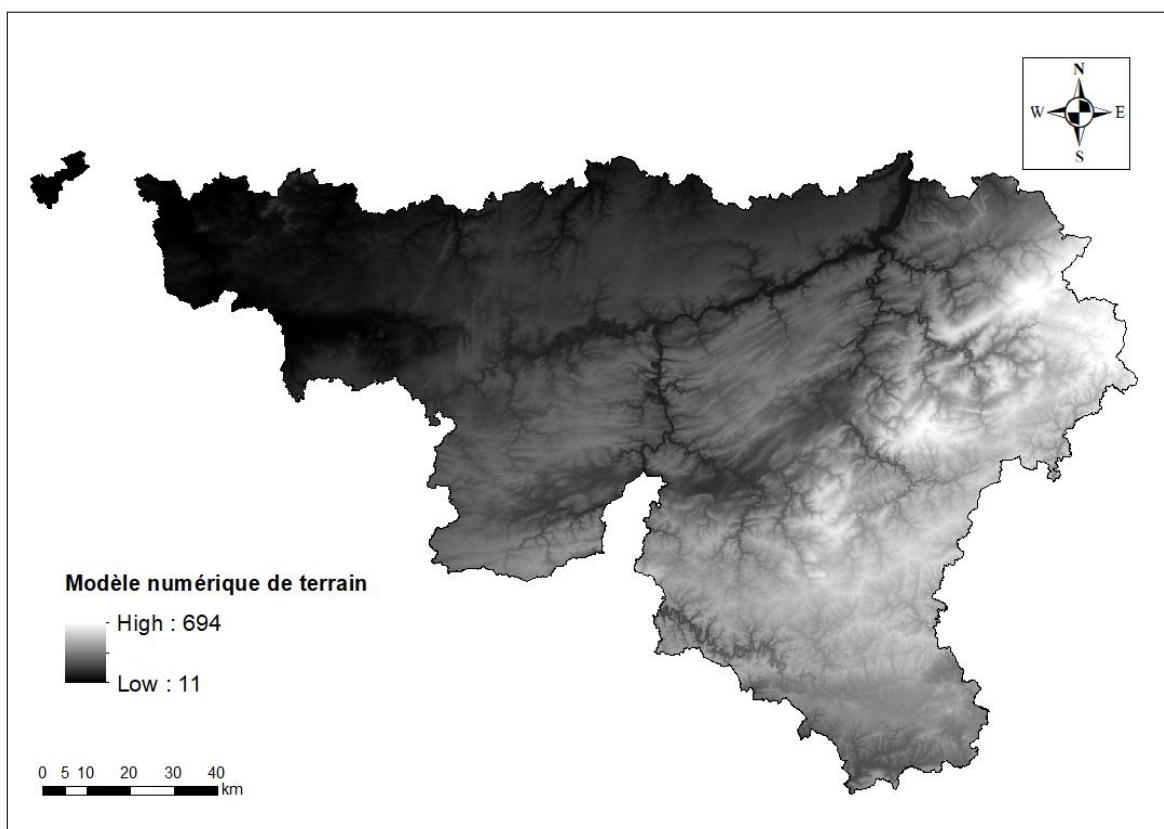


Figure 2 : Modèle numérique de terrain issu du projet ERRUISSOL

Pour discréteriser l'espace, une autre donnée est également utilisée, il s'agit des sous-bassins principaux, ceux-ci permettent de découper la région wallonne en zones de travail plus restreintes.

L'utilisation de cette donnée sera détaillée plus loin (chapitre 2.10) parce que cette donnée ne fait pas partie de la géodatabase APSUGIS, elle est dans la géodatabase BV.

Le MNT sert également de grille de base pour le calcul et la génération de plusieurs données : les coefficients d'infiltration et de ruissellement, le raster des classes de pentes et le raster des directions d'écoulements.

2.2. Classes de pentes

Le raster des classes de pentes (Figure 3) est dérivé du modèle numérique de terrain. Une 'arctoolbox' d'APSU-GIS permet de générer et d'intégrer directement le raster dans la géodatabase APSUGIS (voir manuel utilisateur pour plus de précision). Ce raster est utilisé dans la création des cartographies des coefficients de ruissellement et d'infiltration. Les intervalles des classes sont 0,5%, 5%, 10% et >10%.

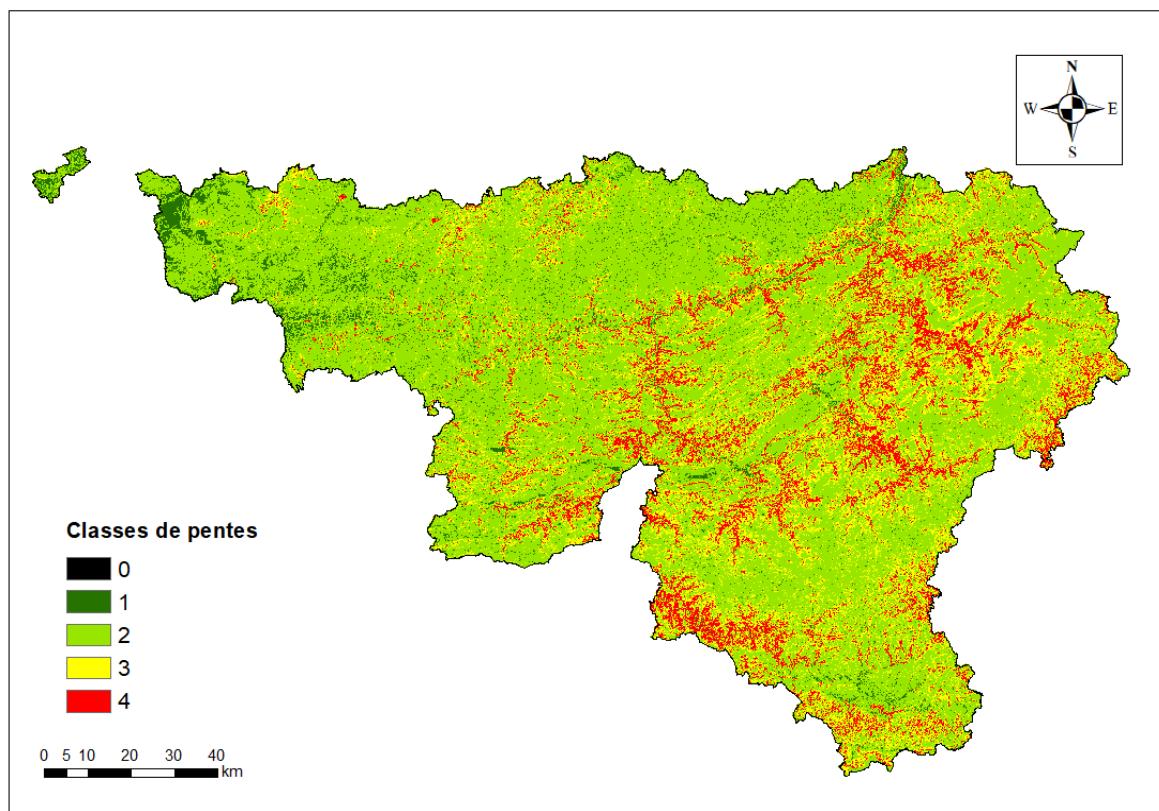


Figure 3 : Classes de pentes

2.3. Directions d'écoulement

Le raster des directions d'écoulement (Figure 4) est produit à partir du modèle numérique de terrain. Une 'arctoolbox' d'APSU-GIS permet de générer et d'intégrer directement le raster dans la géodatabase APSUGIS (voir manuel utilisateur pour plus de précision). Le raster des directions d'écoulement est utilisé dans l'outil APSU-GIS pour générer les cartes de dangerosité directe et latérale.

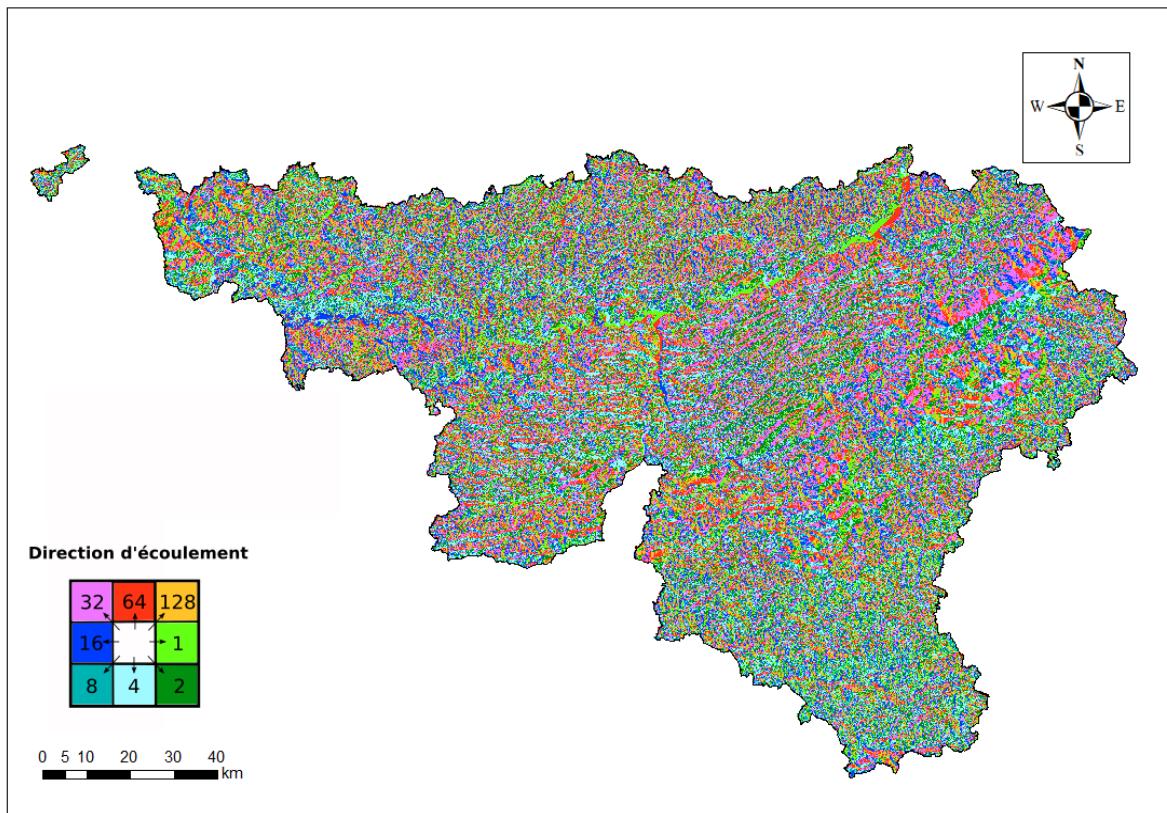


Figure 4 : Directions d'écoulement

2.4. Zones d'infiltration préférentielle

Une zone d'infiltration préférentielle est une zone où on considère que toute l'eau pénètre dans le milieu souterrain et rien ne ruisselle vers l'aval (ex : une perte dans un terrain karstique). Dans la géodatabase APSUGIS, 3 classes d'entités concernent des zones d'infiltration préférentielle : ATLAS_KARST, CARRIERES et CAVITES (Figure 5). Cette distinction en trois couches vise à permettre ultérieurement et si nécessaire, une mise à jour plus aisée des données associées. Ces trois couches sont décrites de manière plus détaillée ci-dessous.

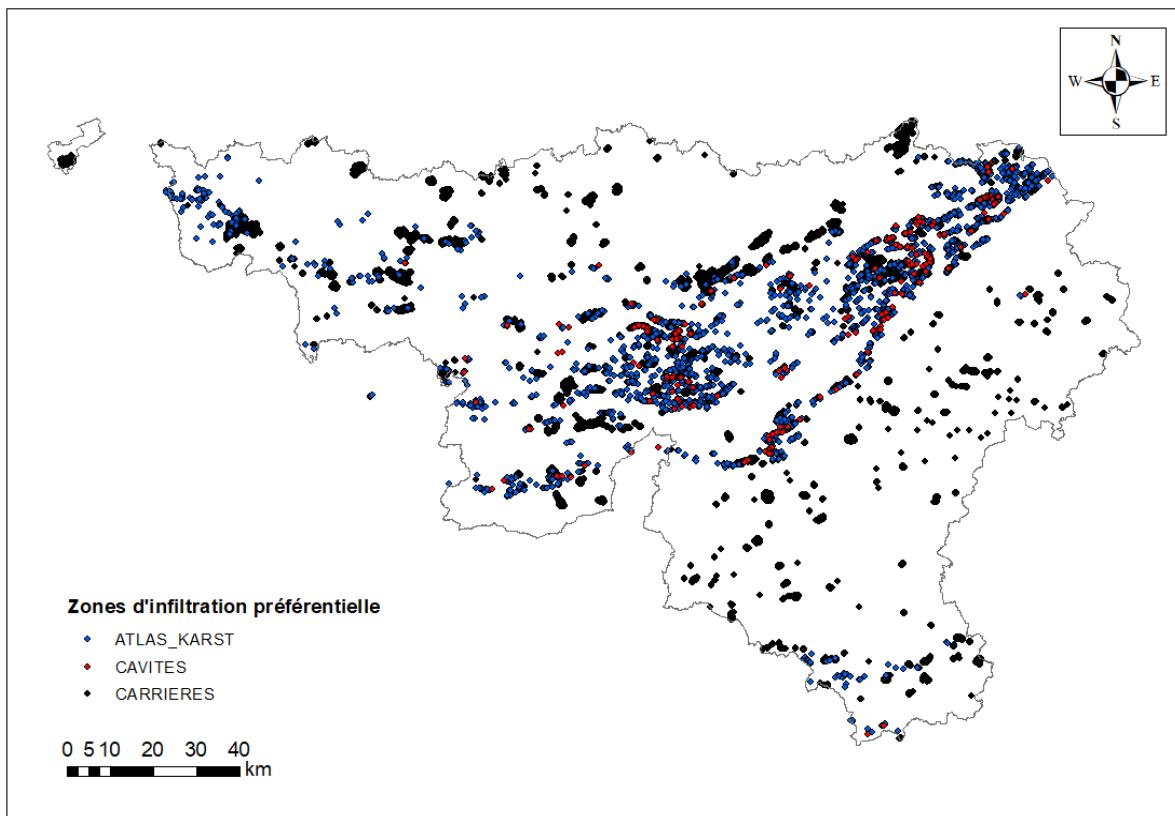


Figure 5 : Zones d'infiltration préférentielle

2.4.1. Atlas du Karst

En Wallonie un très grand nombre de phénomènes karstiques sont répertoriés dans l'Atlas du Karst. Celle liste n'est pas totalement exhaustive parce que la donnée peut varier au cours du temps (déplacement des points de perte, formation de nouvelles dolines, nouvelles découvertes, ...) mais elle est régulièrement mise à jour. La donnée qui est actuellement dans la BD APSUSGIS a été envoyée par le SPW le 28 janvier 2017.

Dans l'Atlas du Karst, les phénomènes karstiques sont répartis en plusieurs catégories : divers (poche de dissolution, fissures, travertins ...), doline/dépression, dépressions paléokarstiques, puits houiller, puits naturel, résurgence/exsurgence, abri sous roche et cavité (vide souterrain pénétrable par l'homme).

La classification des phénomènes karstiques en tant que zone d'infiltration préférentielle (ou pas) a été réalisé en concertation avec la CWEPPS. Par exemple, les phénomènes karstiques « *divers* », les puits houillers, les résurgences/exsurgences et les abris sous roches n'ont a priori pas une grande incidence sur l'infiltration ; ils ne sont donc pas pris en compte. Par contre, les zones de pertes, les dolines et les puits naturels ont un impact potentiellement important sur l'infiltration. Ces points ont donc été sélectionnés comme des zones d'infiltration préférentielle. Les dépressions paléokarstiques

sont aussi des dolines mais comme elles sont protégées par un matériau de couverture, elles n'ont pas été prises en compte¹ en tant que zone d'infiltration préférentielle. Pour les cavités, la sélection n'est pas évidente. Elle sera détaillée dans le point suivant.

L'intégration des données mise à jour de l'Atlas du Karst dans la BD APSUGIS est réalisée en plusieurs étapes. Il faut d'abord sélectionner les catégories Perte/Chantoir, Doline/Dépression et Puits naturel dans le champ PHENO_DESC des tables d'attributs de l'Atlas du Karst. Dans l'outil APSU-GIS, pour les zones d'infiltration, il faut que les classes d'entités soient de type point mais dans l'Atlas du Karst, il y a des données ponctuelles et des données surfaciques. Il faut donc convertir les données surfaciques en données ponctuelles. Il n'y a pas d'outil dans ArcGIS permettant de faire directement cette transformation. Il faut donc procéder en deux étapes. Il faut d'abord convertir les données surfaciques vectorielles en format raster avec l'outil « *Polygon to Raster* » (en précisant une taille de pixel de 10m et en sélectionnant le MNT de la BD APSUGIS comme trame de référence). Il faut ensuite convertir le raster en classes d'entités de type point avec l'outil « *Raster to Point* qui crée un point au centre de chaque pixel». Il reste encore à compiler le shapefile ponctuel nouvellement créé avec les données ponctuelles de l'Atlas du Karst. Les différentes étapes de la création de la couche « ATLAS_KARST » sont détaillées à la Figure 6.

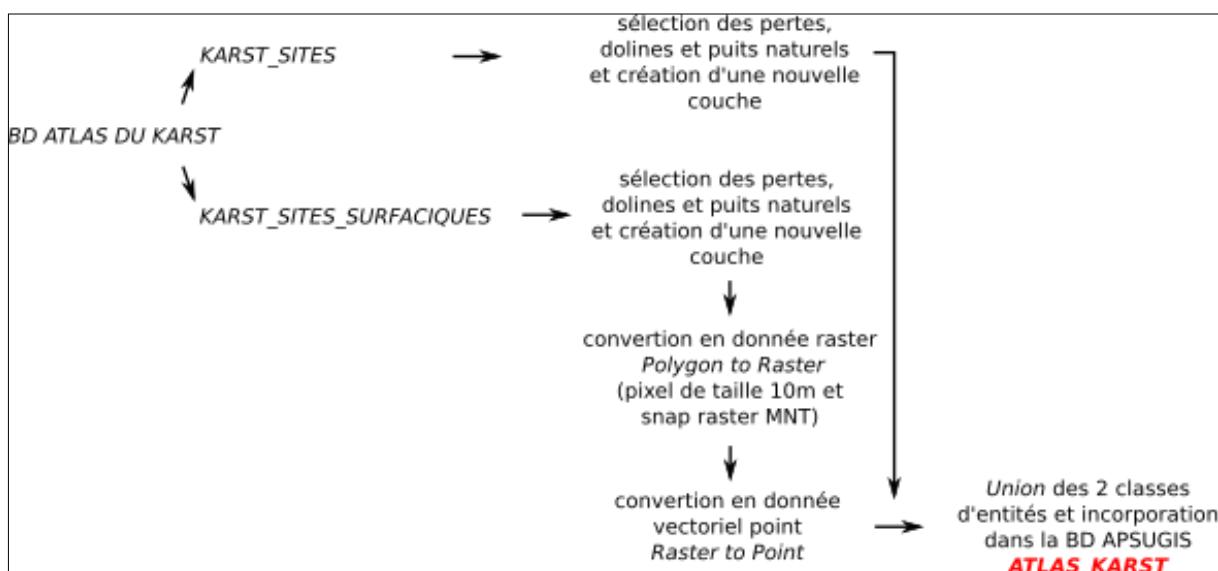


Figure 6 : Etapes de la création de la couche "ATLAS_KARST"

2.4.2. Cavités

Dans l'Atlas du Karst, les phénomènes encodés comme des cavités sont des phénomènes karstiques « pénétrables » par l'homme. Cependant, certaines cavités fonctionnent comme perte/chantoir,

¹ Lors d'une Réunion de travail (23/11/2018) avec Patrick Engels et Georges Michel (CWEPPS), il a été conclu que les dépressions paléokarstiques et certains phénomènes divers peuvent également constituer des points d'infiltration préférentielle et seront pris en compte dans une prochaine mise à jour de l'outil.

d'autres sont situées dans des dolines, certaines ont un fort développement vertical avec un accès à une rivière souterraine. Une partie des cavités peuvent donc constituer des zones d'infiltration préférentielle. Il y a 1731 phénomènes karstiques décrits comme cavités dans l'Atlas du Karst et il n'y a pas de méthode permettant de les sélectionner de manière automatique sur base du critère de zone d'infiltration préférentielle recherché dans APSÙ-GIS. Une sélection manuelle des cavités (ponctuelles et surfaciques) a donc dû être réalisée sur base de mots clés (gouffre, perte, doline, ...) suivie d'une vérification sur base de la description détaillée. La couche fixe « CAVITES » a donc été ajoutée dans l'outil APSÙ-GIS pour inclure ces phénomènes karstiques qui ne peuvent pas être sélectionnés de manière automatique. Cette couche devra donc être mise à jour au cas par cas, en refaisant le même travail pour les nouvelles cavités ajoutées dans la BD de l'Atlas du Karst².

2.4.3. Carrières

Les carrières sont également des zones potentiellement plus vulnérables. En effet, les eaux s'infiltraient généralement plus facilement dans ces zones en dépression où le sol et le sous-sol ont été excavés et où la nappe d'eau souterraine sous-jacente ne bénéficie plus de la protection du sol et des horizons géologiques surincombants. Les carrières ont donc été considérées comme des zones d'infiltration préférentielle. Il y a eu une réflexion sur une éventuelle distinction entre les carrières situées au-dessus du niveau de la nappe et celles situées en dessous. Ces dernières ne constituent pas des zones d'infiltration préférentielle parce que l'eau est constamment pompée (eau d'exhaure) pour maintenir la carrière hors de l'eau. Cependant, en adoptant une logique sécuritaire, l'ensemble des carrières en activités ont tout de même été considérées. De toute manière, lorsque l'exploitation cessera, le pompage cessera également et la carrière deviendra effectivement une zone d'infiltration préférentielle.

Pour constituer la couche « Carrières », les données de niveau 5 de la couche d'occupation du sol en Wallonie (COSW V2.07) ont été utilisées. Il s'agit des carrières en activité, à cette donnée a été rajoutée la couche « *carrière* » de la carte hydrogéologique. Les *fosses d'extraction* de la carte numérique des sols de Wallonie (CNSW) n'ont pas été utilisées parce que de nombreuses anciennes carrières ont été remblayées.

Les données utilisées étant de type vectoriel surfacique, elles ont été converties en données ponctuelles comme les données de l'Atlas du Karst pour pouvoir être intégrées dans l'outil APSÙ-GIS.

2.5. Coefficients d'infiltration et de ruissellement et eau utile

Les cartes de coefficients d'infiltration et de ruissellement ont été produites par l'équipe de Gembloux, ULiège – GxABT – BIOSE. Les coefficients ont été calculés par la méthode des CN (*curve number*). Le coefficient d'infiltration (CI) est défini comme le rapport de la hauteur d'eau s'infiltrant à

² Lors d'une Réunion de travail (23/11/2018) avec Patrick Engels et Georges Michel (CWEPPS), il a été conclu qu'il n'était pas possible de mettre à jour cette donnée de manière automatique à moins de réaliser en amont un travail considérable ce qui n'est pas envisageable actuellement. Pour plus de précisions, le compte rendu de cette réunion se trouve en annexe.

la hauteur de précipitation annuelle totale tandis que le coefficient de ruissellement (CR) est défini comme le rapport de la hauteur d'eau ruisselant à la hauteur de précipitation annuelle totale. Ces deux grandeurs sont estimées pour chaque pixel du maillage de référence.

Pour pouvoir déterminer les coefficients d'infiltration (Figure 7) et de ruissellement (Figure 8), plusieurs données sont nécessaires : l'occupation du sol, la topographie, le type de sol, les précipitations et l'évapotranspiration réelle.

L'occupation du sol a été déterminée pour chacune des années de 2009 à 2015 à partir du parcellaire agricole anonyme du SIGEC, complété par l'information fournie par la carte d'occupation des sols de 2007 (eau, zone urbaine, route). L'occupation du sol a fait l'objet d'une reclassification après les catégories suivantes : prairies, cultures sarclées, cultures non sarclées, forêts et bois, zones humides, surfaces imperméables, plan d'eau, zones urbaines denses, zones urbaines peu denses, sol nu.

La donnée utilisée pour la topographie est celle provenant du MNT du projet ERRUISSOL (Demarcin *et al.*, 2009).

La méthode des CN nécessite d'avoir préalablement discriminé les sols en quatre groupes hydrologiques selon leur capacité d'infiltration. Cette classification a été établie à partir de la carte numérique des sols de Wallonie en extrayant les informations suivantes :

1. la texture du sol
2. le variation de développement de profil pédologique,
3. le drainage naturel du sol,
4. l'épaisseur du sol et la teneur en charge caillouteuse pour les sols limono-caillouteux.

Les données de précipitations et d'évapotranspiration proviennent du réseau PAMESEB. Des données journalières sont utilisées, couvrant les années 2007 à 2016. Ces données météorologiques ont été spatialisés en attribuant la station météo la plus proche à chaque sous bassin versant principal. A partir des données météo, l'eau utile (RW_10PRE) a également pu être calculée comme la moyenne de la différence entre les précipitations et l'évapotranspiration annuelles (Figure 9).

Certains pixels ont été traités de manière spécifique dans la détermination des CI et des CR. C'est le cas des zones non couvertes par la carte numérique des sols de Wallonie. Ces zones concernent principalement les zones urbaines et les plans d'eau. Dans le premier cas, le CR a été fixé à 70% tandis que dans le deuxième, le CR a été fixé à 100%.

Pour plus d'informations concernant la détermination des coefficients d'infiltration et de ruissellement, le lecteur pourra se référer à l'annexe du délivrable D02 (version provisoire) qui décrit de manière détaillée toutes les hypothèses prises.

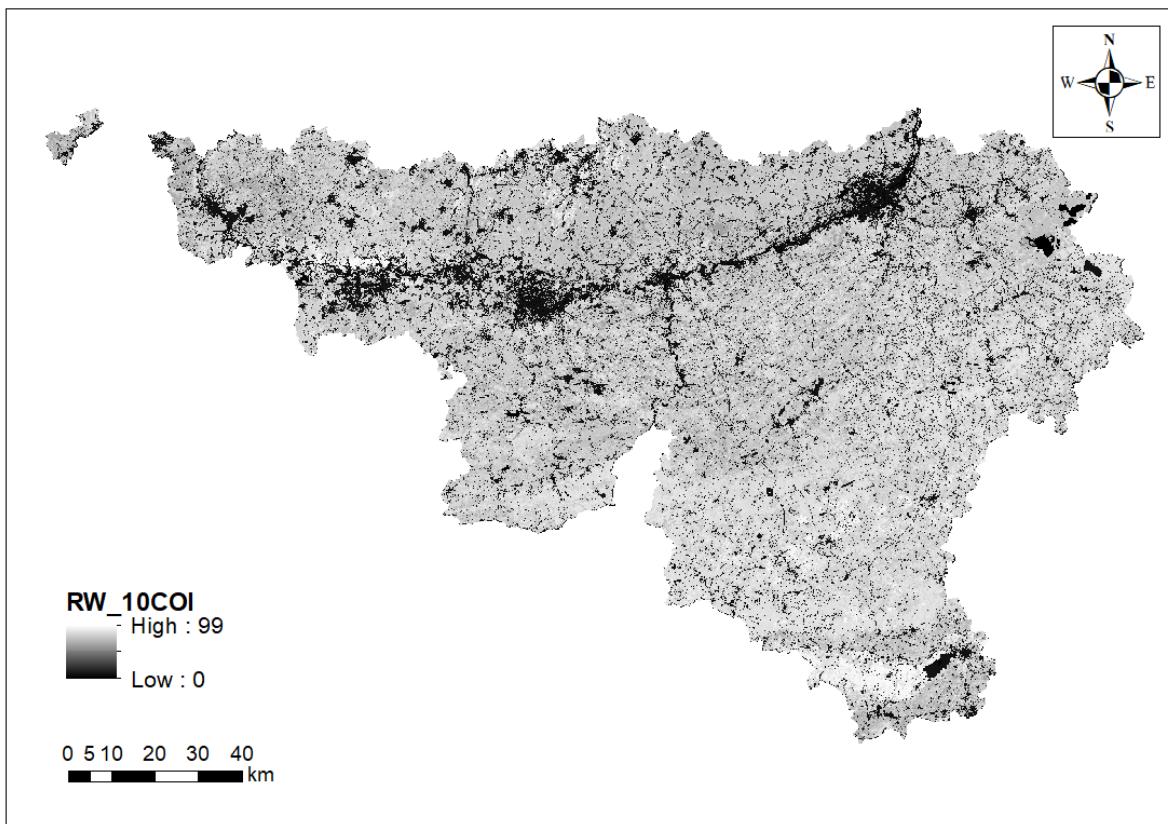


Figure 7 : Coefficients d'infiltration

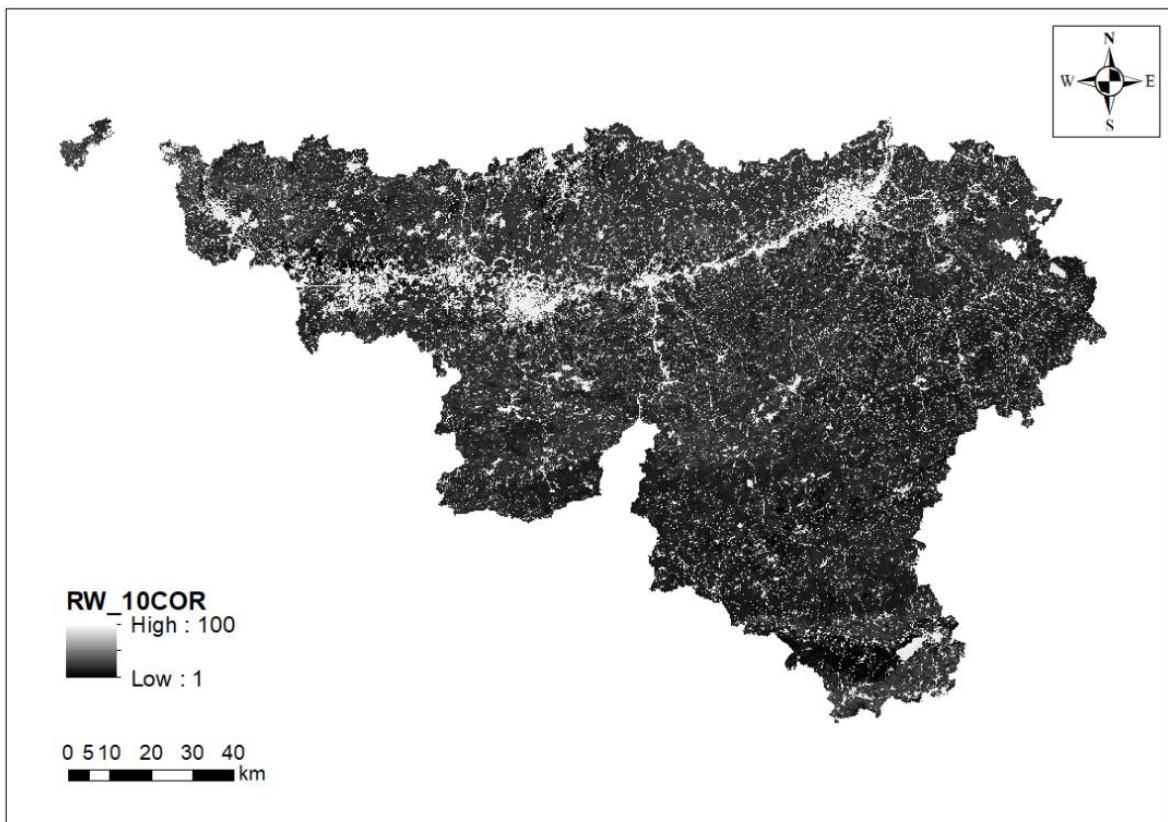


Figure 8 coefficients de ruissellement

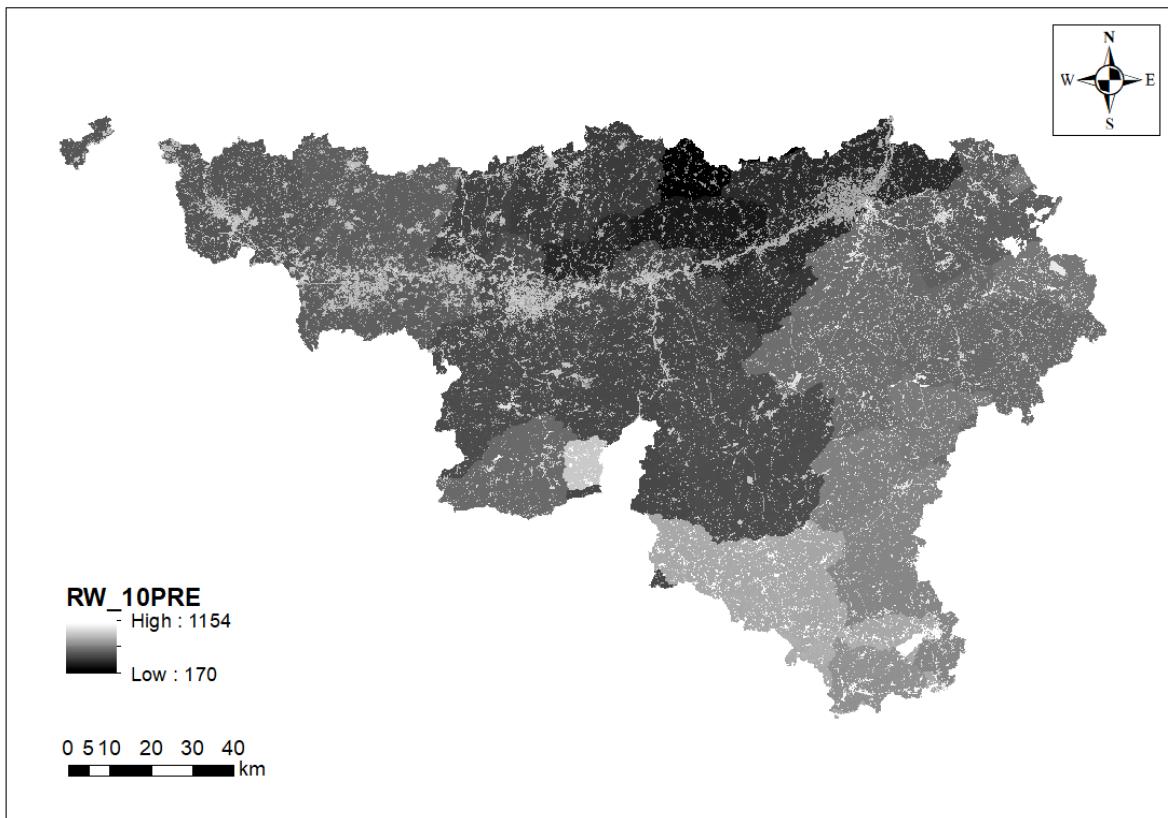


Figure 9 : Eau utile (mm)

2.6. Réseau hydrographique

La couche RW_10RIV, est obtenue simplement en convertissant en raster les données du réseau hydrographique (Atlas des cours d'eau non navigables)³. Il est important d'utiliser la même taille de cellules et le même alignement que le MNT. Le Réseau hydrographique est utilisé dans l'outil APS-GIS parce qu'une dangerosité maximale est attribuée aux cellules localisées sur le passage des cours d'eau.

³ Il existe maintenant une version actualisée de cette donnée, la série de couche de données « Réseau Hydrographique Wallon ». Cette donnée sera prise en compte dans une prochaine mise à jour de l'outil.

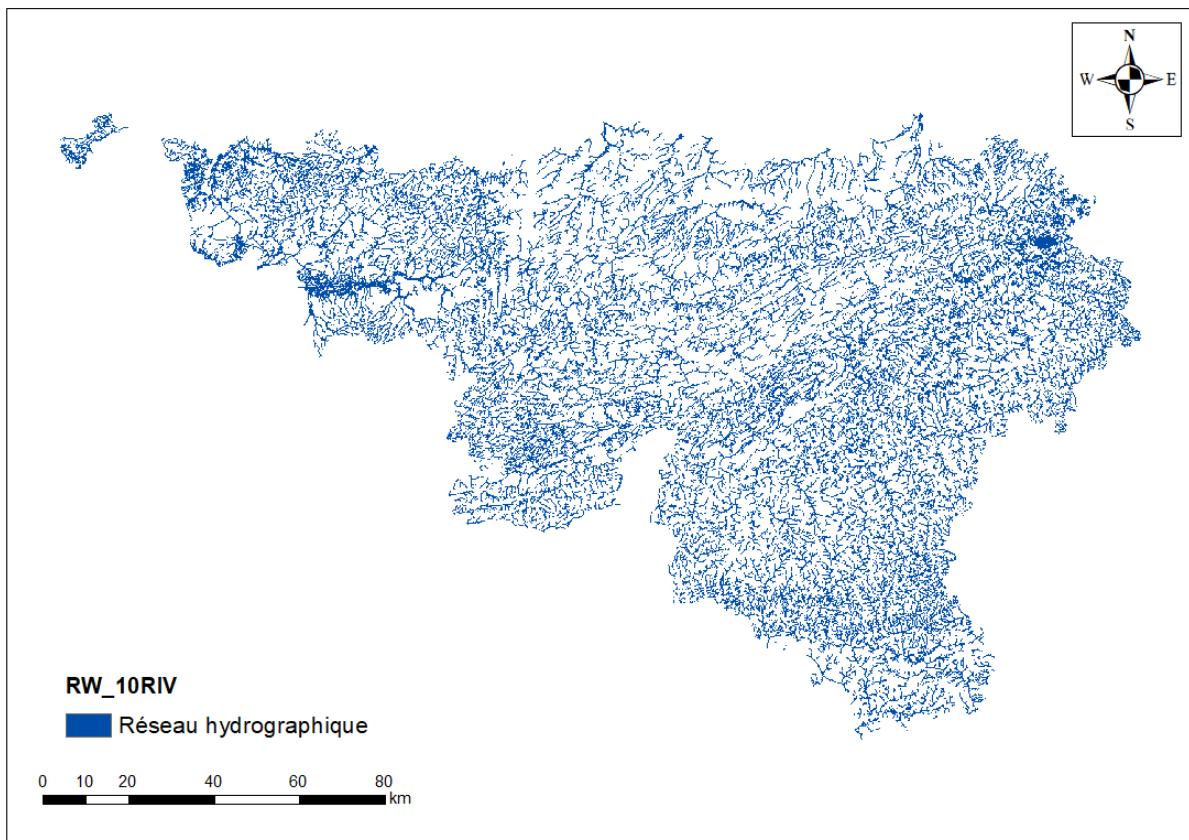


Figure 10 : Réseau hydrographique

2.7. Discrétisation sol / sous-sol

Pour pouvoir évaluer la capacité d'atténuation de la zone non saturée, celle-ci est discrétisée en plusieurs couches (Figure 11). Il y a une première couche « sol » puis une ou plusieurs couches représentant les différents horizons géologiques rencontrés jusqu'au toit de l'aquifère.

La lithologie de chaque couche est renseignée dans les rasters RW_10LIX au moyen d'un identifiant. Les identifiants renvoient à la table d'attribut PROP_GEOL qui reprend les paramètres hydrodynamiques (conductivité hydraulique, porosité effective de transport et dispersivité) attribués à chaque lithologie. A chaque couche, une épaisseur est également attribuée au moyen des rasters RW_10THX.

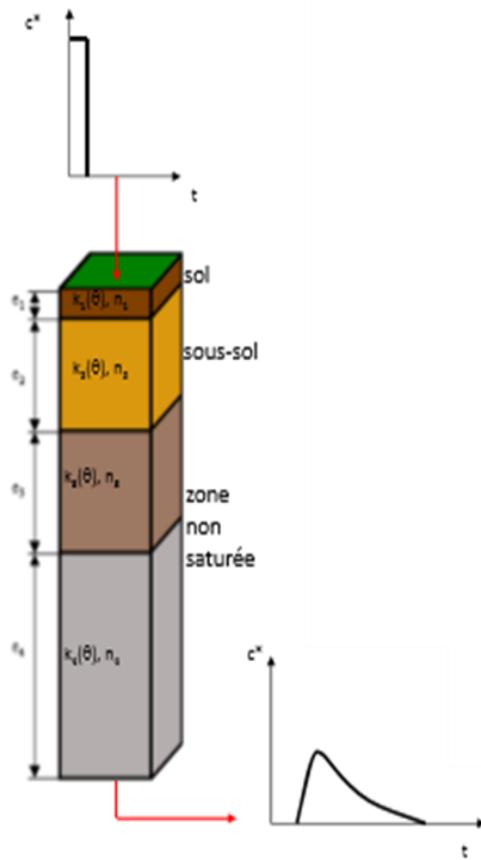


Figure 11 : Discrétisation du sous-sol (Popescu et al., 2004)

2.7.1. Définition des lithologies

La lithologie de la première couche (couche sol), est basée sur la « Carte des Principaux Types de Sols de Wallonie à 1/250000 ». Cette couche est constituée de polygones regroupés en 23 classes. Celles-ci sont conçues à partir de regroupements des sols sur base de trois critères : la texture, le drainage naturel et la nature de la charge caillouteuse pour les sols contenant plus de 15% en éléments grossiers. Pour chaque classe, un identifiant unique est fixé et renvoie à la table des propriétés hydrodynamiques.

Les identifiants de chaque lithologie sont ensuite convertis au format raster via l'outil « *polygon to raster* » (en précisant une taille de pixel de 10m et en sélectionnant le MNT de la BD APSUGIS comme trame de référence). Le raster obtenu (Figure 12) est ensuite importé dans la BD APSUGIS.

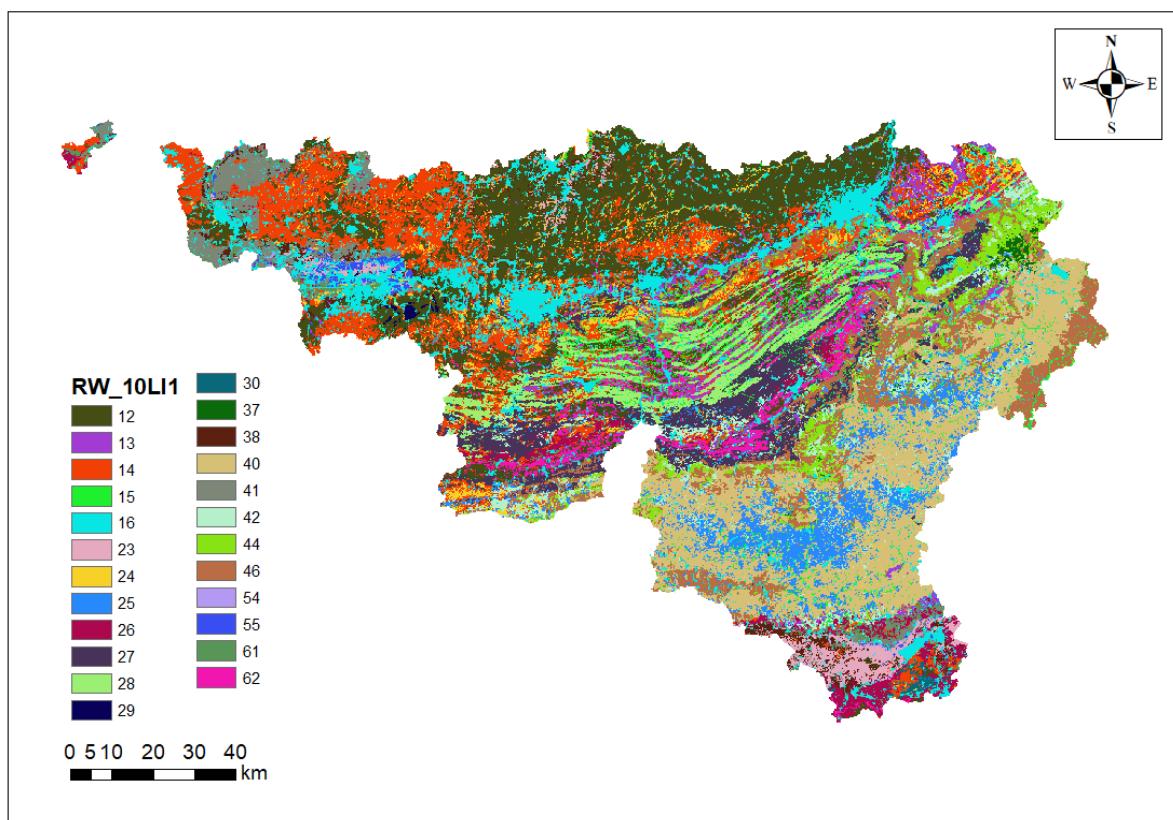


Figure 12 : Raster des identifiants lithologiques de la couche 1 (sol)

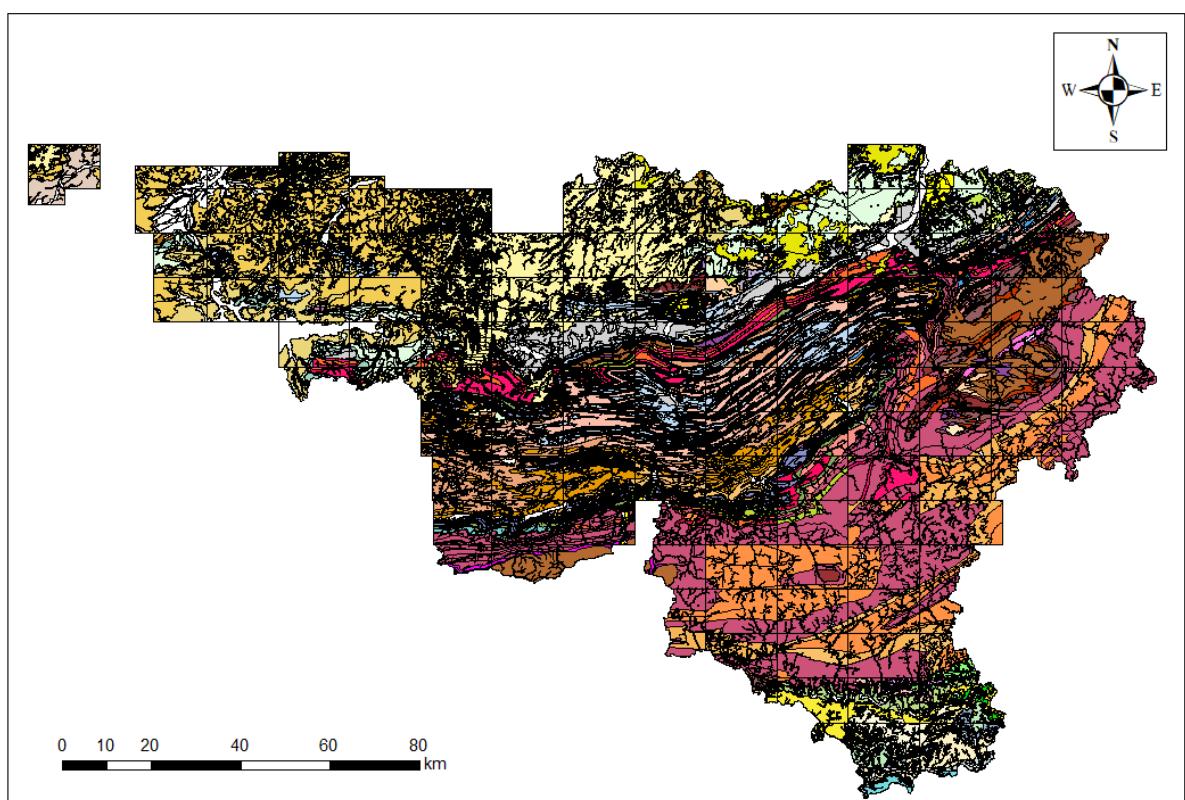


Figure 13 : Unités hydrogéologiques (cartes hydrogéologiques fournies le 28/06/2018)

Pour la deuxième couche, la lithologie est basée sur les unités hydrogéologiques de la carte hydrogéologique (Figure 13) mais il y a quelques exceptions. Par exemple, dans le bassin du Geer, la deuxième couche correspond aux limons éoliens.

Pour la réalisation des deuxièmes (et éventuellement troisièmes couches), le travail n'a pas été fait en une fois pour toute la Région wallonne. Celle-ci a été divisée en zones de travail pour pouvoir prendre en compte les hétérogénéités de chaque région. Le travail a d'abord été appliqué sur de relativement petits bassins pour tester l'outil. Le travail a ensuite été réalisé sur des plus grandes zones (masses d'eau souterraine ou groupe de masses d'eau) afin d'éviter des manipulations répétitives.

L'ensemble des cartes hydrogéologiques ont été fournies le 28/06/2018, à l'exception de la carte 39/3-4_31/7-8. Cependant, certaines cartes de vulnérabilité ont été réalisées avant cette date et pour ces zones-là, certaines cartes hydrogéologiques étaient manquantes et un autre fond géologique a été utilisé ou des hypothèses très simplificatrices ont dû être prises. Les hypothèses qui ont été posées sont précisées par masse d'eau souterraine par la suite (chapitre 4.3).

2.7.2. Définition des épaisseurs des couches géologiques

A chaque couche de matériaux lithologiques est associée une couche d'épaisseur.

Epaisseur de la couche 1 « sol »

Pour déterminer l'épaisseur de la couche « sol », une donnée provenant de la Valorisation de la Carte Numérique des Sols de Wallonie 2016 a été utilisée (Legrain *et al.*, 2017). Cette donnée spatialise des classes d'épaisseurs interpolées à partir de la Carte Numérique des Sols de Wallonie (CNSW) et de la base de données Aardewerk. Sur cette carte, la profondeur maximale du sol est donc de 125 cm, ce qui sous-estime largement l'épaisseur du sol dans certaines régions mais il n'est pas possible d'avoir une information plus précise à partir de la CNSW à l'échelle de la Région wallonne. Pour certaines zones comme le bassin du Geer, l'épaisseur de limon est connue et donc prise en compte, mais ce n'est malheureusement pas le cas partout.

EPAISSEUR PCNSW	Epaisseur APSÙ-GIS (m)
non cartographié	1.25
indéterminée	0.5
> 125 cm	1.25
> 80 cm	0.8
> 40 cm	0.4
40-80 cm	0.6
20-80 cm	0.5
20-40 cm	0.3
< 20 cm	0.2
variable	0.5



Tableau 2 : Equivalence entre les classes de valeurs du projet PCNSW et la valeur considérée dans APSÙ-GIS

Le Tableau 2 reprend les classes de valeurs de la donnée du PCNSW et les valeurs correspondantes prises pour APSÙ-GIS. La Figure 14 illustre ces valeurs d'épaisseur du sol déduites de la donnée du PCNSW. Cependant, pour obtenir la carte finale de l'épaisseur de la couche 1 d'APSÙ-GIS, il faut corriger l'estimation du PCNSW aux endroits où l'épaisseur théorique de la couche sol est supérieure à l'épaisseur escomptée de la ZNS (Figure 15). La couche 1 d'APSÙ-GIS n'est pas réalisée de manière automatique pour toute la Wallonie mais zone par zone après l'estimation de l'épaisseur de la zone non saturée. Les différentes étapes de la création de la couche d'épaisseur n°1 sont résumées à la Figure 16.

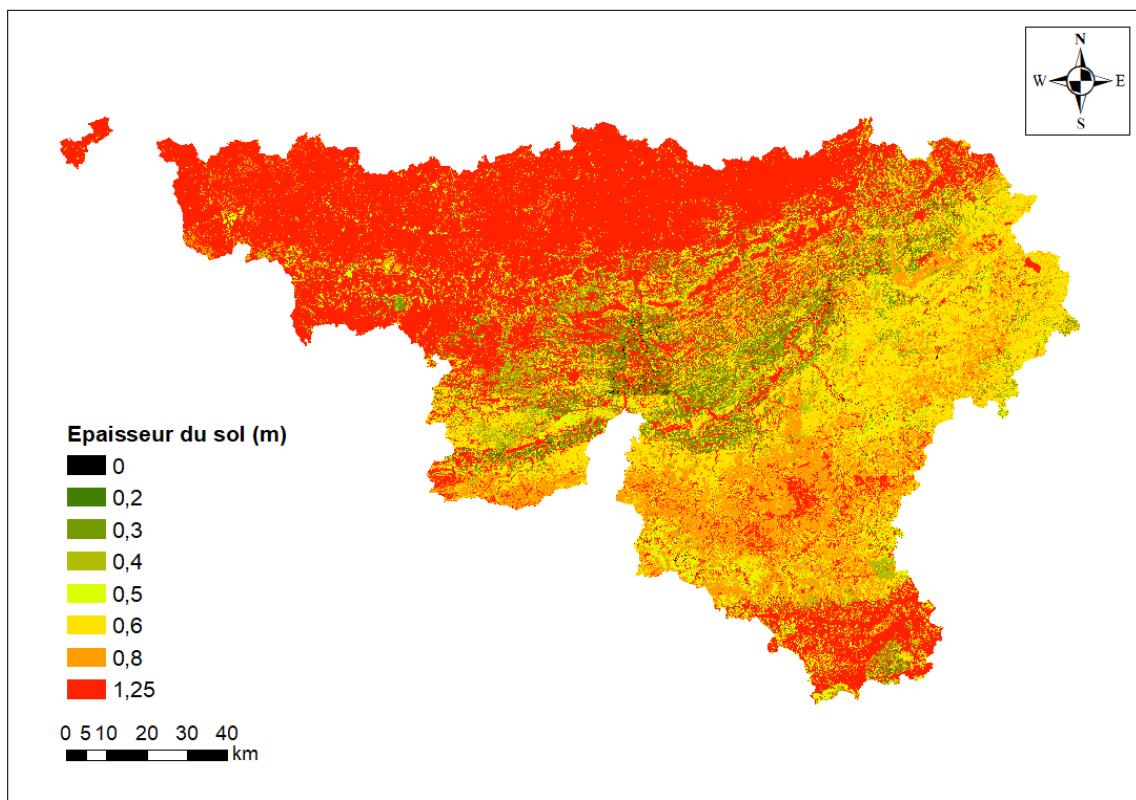


Figure 14 : Epaisseur du sol fixée dans APSÙ-GIS sur base des données du PCNSW : Valorisation de la Carte Numérique des Sols de Wallonie, 2016

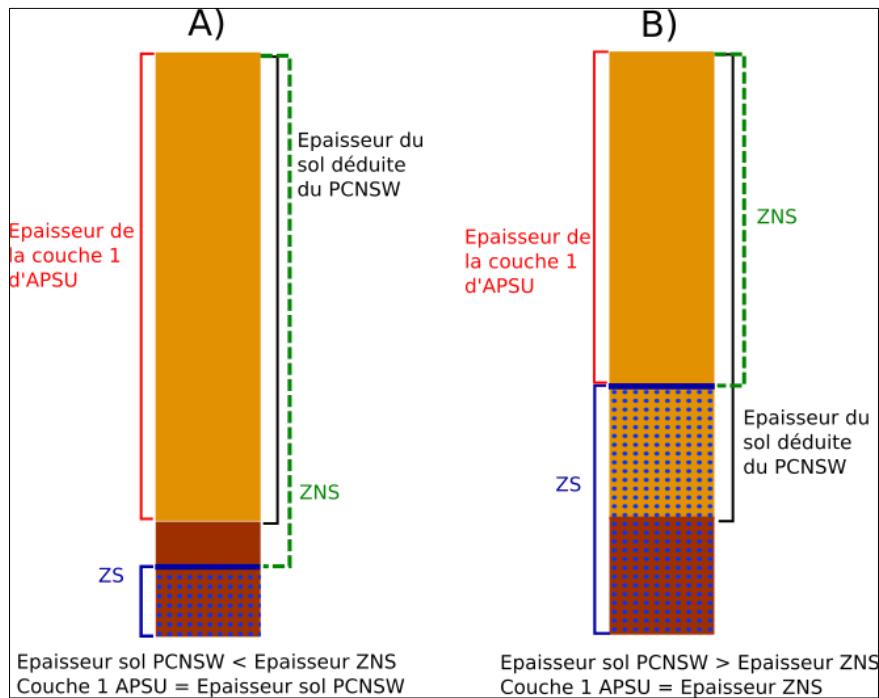


Figure 15 : Détermination de l'épaisseur de la couche 1 de APSU-GIS en fonction de l'épaisseur de la couche sol du PCNSW et de l'épaisseur de la zone non saturée (ZNS)



Figure 16 : Etape de création de la couche 1 épaisseur de APSU-GIS

Epaisseur de la zone non saturée (ZNS)

Pour estimer l'épaisseur de la zone saturée, il n'existe actuellement pas de carte piézométrique pour l'ensemble de la Wallonie. La Figure 17 présente les données piézométriques ponctuelles et les isopièzes provenant des cartes hydrogéologiques. Elle montre que les tentatives de tracé d'isopièzes ne couvrent qu'une partie fort restreinte de la Wallonie. En dehors de quelques aquifères, les auteurs des cartes ont jugé qu'ils disposaient de trop peu de données, ou que les conditions hétérogènes prévalant dans les aquifères rendaient les connaissances trop incertaines pour pouvoir tracer des isopièzes fiables. Il n'est donc pas possible d'interpoler les données disponibles dans la carte hydrogéologique pour réaliser une carte piézométrique pour l'ensemble de la Wallonie de manière automatique.

En fonction du niveau de connaissance de l'aquifère, différentes approches ont donc été considérées pour estimer la piézométrie. La Figure 198 détaille 5 niveaux de connaissance. Le niveau de connaissance le plus élevé (niveau 5) est le cas où les courbes isopièzes sont disponibles dans la carte hydrogéologique. Le niveau 4 correspond à des zones pour lesquelles la piézométrie a été estimée

par modélisation lors de précédentes études, par exemple : projet Synclin'EAU (Orban *et al.*, 2010) pour les masses d'eau RWM021, RWM012, RWM011 ; projet PAI – TIMOTHY (Wildemeersch *et al.*, 2009) pour le bassin de la Haine. Le niveau 3 correspond à certains cas pour lesquels, même s'il n'y a pas de tracés d'isopièzes disponibles, il est possible d'estimer la piézométrie en faisant certaines hypothèses. C'est notamment le cas pour les calcaires de la Calestienne où le niveau piézométrique a été fixé au niveau des résurgences. C'est également le cas pour certaines zones dans les sables du Bruxellien où la piézométrie a été fixée au niveau des cours d'eau et des sources.

Pour les zones restantes, la profondeur de la nappe a été fixée en considérant une épaisseur de zone non saturée représentative de chaque unité hydrogéologique. S'il y a beaucoup de données (niveau 2), l'épaisseur de la zone non saturée a été fixée sur base de la médiane des valeurs. Dans le cas où il y a peu ou pas de données piézométriques (niveau 1), l'épaisseur de la zone non saturée a été déterminée sur base du caractère aquiclude, aquitard, aquifère de l'unité hydrogéologique. Au regard des unités hydrogéologiques pour lesquelles il y a beaucoup de données, une tendance semble se dégager avec, généralement, une épaisseur de zone non saturée de l'ordre de 3m dans les formations aquiclades et de 5m dans les formations aquitards. Pour les formations aquifères, cela dépend fortement de la nature de l'aquifère : de l'ordre de 7 à 10m pour les aquifères gréseux et de 10 à 20m pour les aquifères calcaires. Les données d'épaisseur de la zone non saturée qui ont été considérées pour certaines unités hydrogéologiques de l'Ardenne et de la Calestienne sont présentées dans le Tableau 3.

En fonction du niveau de connaissance de la piézométrie de l'aquifère, il y a différentes étapes pour créer le raster d'épaisseur de zone non saturée. Ces étapes sont détaillées également dans la Figure 18. Pour une même zone de travail, il peut y avoir plusieurs manières d'estimer la piézométrie pour les différentes unités hydrogéologiques. Par exemple, dans le bassin du Néblon, il y a des isopièzes pour les calcaires ; par contre, pour les autres unités aquiclades et aquitards, une valeur représentative de l'épaisseur de la zone non saturée a dû être fixée a priori. Toutes les hypothèses qui ont été prises pour estimer la piézométrie des différentes masses d'eau souterraine sont expliquées dans le chapitre 4.3.

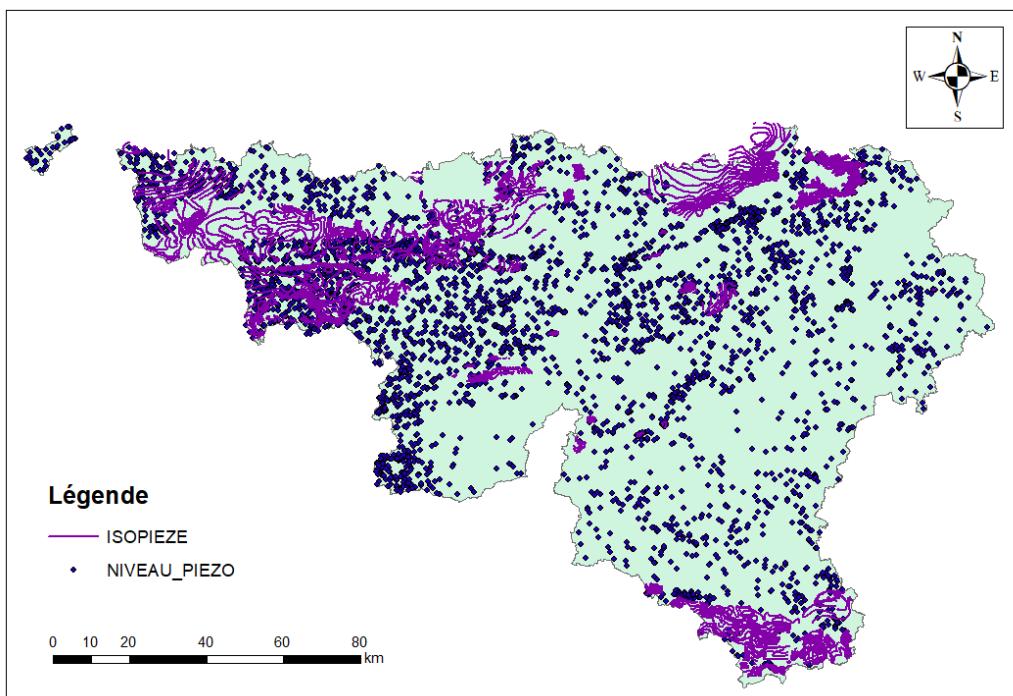


Figure 17 : Données ponctuelles de piézométrie et isopièzes provenant de la carte hydrogéologique

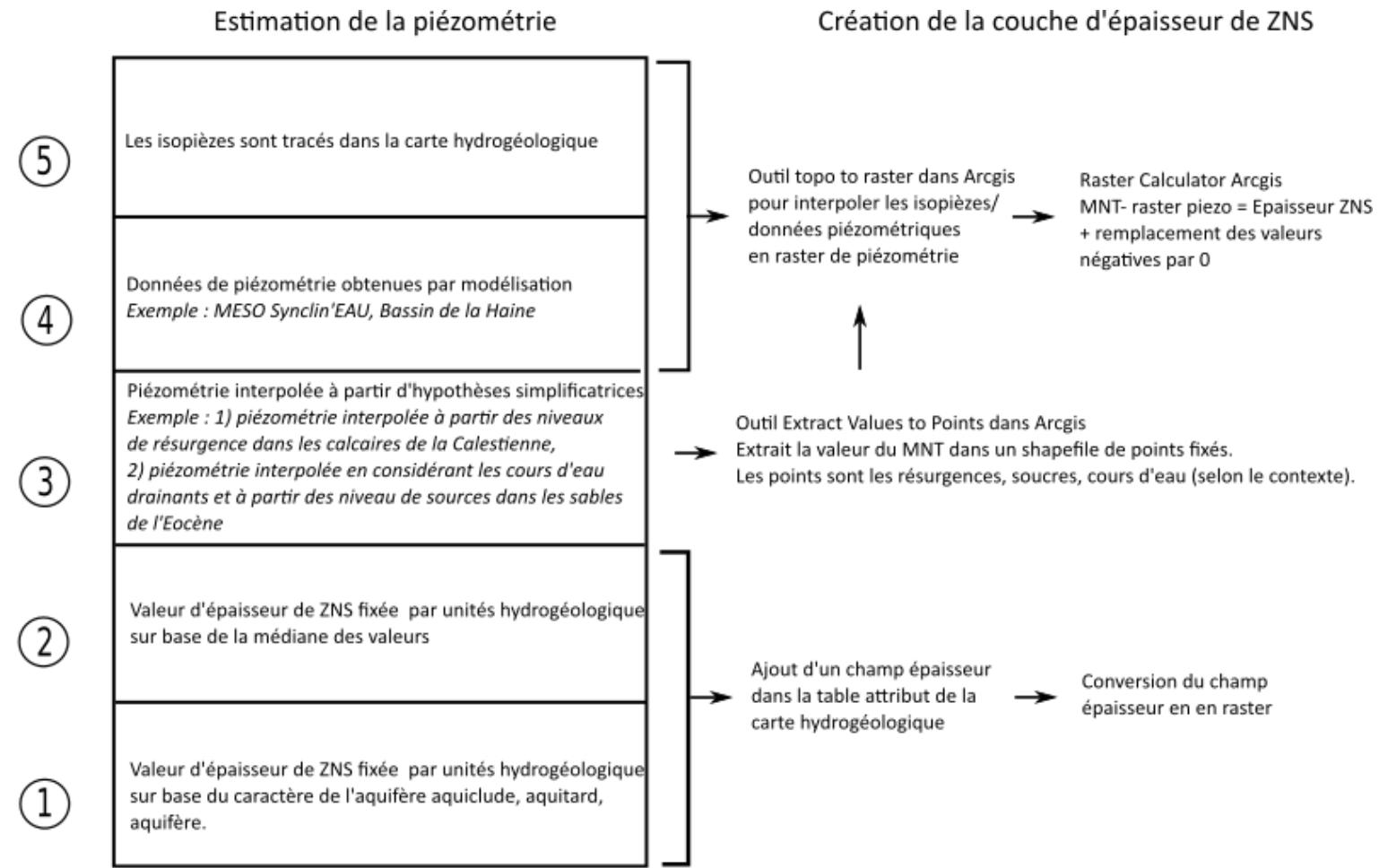
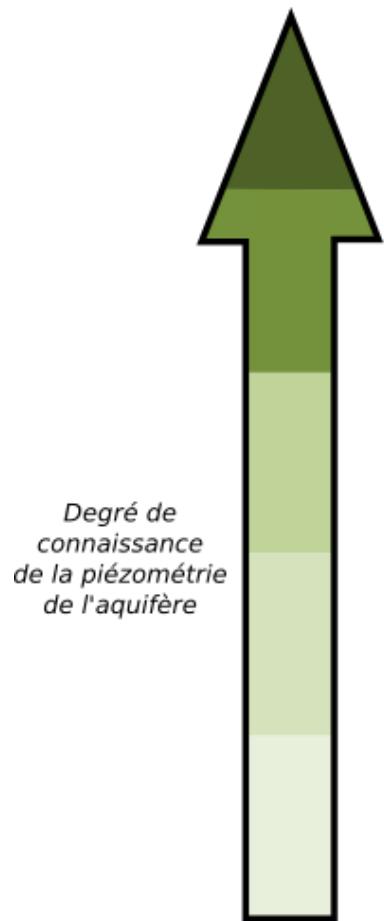


Figure 18 : Estimation de la piézométrie et création de la couche d'épaisseur de zone non saturée en fonction du degré de connaissance de l'aquifère

UNITE_HYDR	UNITE_HY_	min	médiane	moy geom	max	nombre	valeur proposée
CHM019_	Aquiclude à niveaux aquifères de Jamoigne	0.1	0.7	0.7	21.3	19	3
CHP040_	Aquiclude à niveaux aquifères de Villé	0.4	4.8	5.6	50.0	41	3
CHM022_	Aquiclude à niveaux aquifères d'Habay	0.1	4.8	2.3	8.0	8	3
CHP022_	Aquiclude à niveaux aquifères du Dévonien inférieur	0.0	3.8	3.4	64.8	320	3
CHP033_	Aquiclude à niveaux aquifères du socle cambro-silurien	0.3	3.4	3.0	34.0	54	3
CHP043_	Aquiclude à niveaux aquitards du socle cambro-silurien	2.4	4.2	4.1	7.2	6	3
CHM021_	Aquiclude d'Attert	3.3	3.6	3.8	5.3	6	3
CHP044_	Aquiclude de l'Eifelien	0.4	11.9	6.4	42.1	9	3
CHP021_	Aquiclude du Dévonien inférieur	0.0	4.3	3.7	48.0	137	3
CHP013_	Aquiclude du Famennien	0.3	4.6	3.8	39.5	52	3
CHP015_	Aquiclude du Frasnien	0.2	1.1	1.3	12.8	20	3
CHP014_	Aquiclude du Famennien - Frasnien	0.2	2.3	2.7	59.9	51	3
CHP007_	Aquifère - Aquitard - Aquiclude de l'Hastarien	0.7	18.7	14.5	109.4	50	18
CHP030_	Aquifère à niveaux aquicludes du Dévonien inférieur	0.1	7.4	5.9	46.4	108	7
CHP020_	Aquifère de l'Eifelien	0.5	9.4	7.0	57.8	26	10
CHM020_	Aquifère de Mortinsart	3.4	8.3	8.3	18.0	6	8
CHP016_	Aquifère des calcaires du Frasnien	0.4	12.1	10.4	82.6	135.0	12
CHP017_	Aquifère des calcaires du Givetien	0.4	12.6	11.2	89.5	73.00	12
CHP024_	Aquitard à niveaux aquicludes de Villé	0.9	5.2	6.5	61.2	14	5

CHP023_	Aquitard à niveaux aquiclude du Dévonien inférieur	0.8	5.0	5.7	70.4	20.0	5
CHP031_	Aquitard à niveaux aquifères du Dévonien inférieur	0.1	4.9	4.6	42.9	82.0	5
CHP026_	Aquitard à niveaux aquifères du socle cambro-silurien	0.3	7.7	6.6	37.4	44	5
CHP019_	Aquitard de l'Eifelien	0.2	3.1	4.3	60.0	49	5
CHP034_	Aquitard du Dévonien inférieur	1.5	7.7	6.9	26.3	16	5
CHP010_	Aquitard du Famennien	0.0	2.9	2.7	94.5	168	3
CHP011_	Aquitard du Famennien - Frasnien	2.5	10.9	9.9	26.4	10	5
CHP038_	Aquitard du socle cambro-silurien	1.3	6.8	7.8	28.6	37	5

Tableau 3 : Données d'épaisseur de la zone non saturée de certaines unités hydrogéologiques de l'Ardenne et de la Calestienne

Epaisseur des autres couches

Pour la plupart des bassins/masses d'eau étudiés, la zone non saturée a été divisée en deux : une couche « sol » et une couche matériau géologique (unités de la carte hydrogéologique). Après avoir déterminé l'épaisseur de la ZNS et de la couche 1 « sol », pour déterminer l'épaisseur de la couche 2, il suffit de soustraire l'épaisseur de la couche sol de l'épaisseur de la zone non saturée.

Dans certains cas, en fonction du contexte géologique local, il peut y avoir une troisième couche. C'est notamment le cas du bassin du Geer où il y a une couche limon entre la couche sol (≤ 1.25 m) et la couche de craie non saturée. L'épaisseur de la couche de limon est connue parce que les isohypsides du toit de la craie ont été précédemment tracés pour le bassin du Geer.

2.8. Propriétés hydrogéologiques

Pour toutes les couches définies lors de la discréétisation sol/ sous-sol il faut définir des paramètres hydrodynamiques : conductivité hydraulique, porosité effective de transport et dispersivité (ou nombre de Peclet). Il y a également un quatrième paramètre : KPREF (binaire, soit 0, soit 1) qui est pris égal à 1 dans les formations géologiques susceptibles d'être caractérisées par un réseau préférentiel d'écoulement (macropores, fractures...). Ici, KREF a été fixé à 1 dans les unités calcaires. Ces différents paramètres sont encodés dans la table attributaire PROP_GEOL qui est dans la BD APSUGIS (Tableau 4).

Pour chaque unité hydrogéologique et chaque type de sol, des propriétés hydrogéologiques ont été fixées d'après les données rassemblées lors de la convention SERAN (Briers *et al.*, 2017). Dans le cadre de cette convention, une base de données a été créée reprenant les paramètres hydrodynamiques qui ont été mesurés lors d'études globales (caractérisation des masses d'eau souterraine) et lors d'études locales de type zone de prévention où de nombreux essais hydrogéologiques ont été réalisés.

Pour les unités où il n'y a pas de valeurs, les paramètres hydrodynamiques ont été estimés par des données d'une unité avec une lithologie similaire. Chaque unité est détaillée dans le tableau pour pouvoir, si besoin, faire des modifications plus facilement, mais les unités avec la même lithologie ont globalement les mêmes propriétés.

OBJECTIF	ID	TYPE	UNITE_HYDR	NOM	CONDUC (m/S)	PORO EFF	PECLET	KPREF
1	1	GEOL	CHP015_	Aquiclude du Frasnien	1.00×10^{-8}	0.05	20	0
2	2	GEOL	CHP013_	Aquiclude du Famennien	1.00×10^{-8}	0.05	20	0
3	3	GEOL	CHP010_	Aquitard du Famennien	5.00×10^{-7}	0.05	15	0
4	4	GEOL	CHP009_	Aquifère des grès du Famennien	7.70×10^{-6}	0.05	5	0
5	5	GEOL	CHP008_	Aquifère d'Hastièvre	5.00×10^{-5}	0.05	5	1
6	6	GEOL	CHP005_	Aquiclude des schistes du Carbonifère	1.00×10^{-8}	0.05	20	0
7	7	GEOL	CHP007_	Aquifère - Aquitard - Aquiclude de l'Hastarien	1.00×10^{-5}	0.05	7	1
8	8	GEOL	CHP003_	Aquifère des calcaires du Carbonifère	5.50×10^{-5}	0.05	5	1

9	9	GEOL	CHP001_	Aquiclude à niveaux aquifères du Houiller	1.00×10^{-7}	0.05	15	0
10	10	GEOL	CHC006_	Aquifère des sables de remplissage	3.00×10^{-4}	0.15	10	0
11	11	GEOL	CHC001_	Aquifère alluvial	1.00×10^{-6}	0.35	20	0
12	12	SOL	4010	Sols limoneux à drainage naturel favorable	1.00×10^{-7}	0.40	20	0
13	13	SOL	7610	Sols limono-caillouteux à charge de silex ou de gravier ou de congolérat et à drainage naturel principalement favorable	5.00×10^{-6}	0.32	20	0
14	14	SOL	4020	Sols limoneux à drainage naturel modéré ou imparfait	1.00×10^{-7}	0.40	20	0
15	15	SOL	10000	Regroupement de complexes de sols de textures différentes ou sur fortes pentes et de sols de fonds de vallons limoneux ou rocheux	1.00×10^{-6}	0.35	20	0
16	16	SOL	30000	Sols artificiels ou non cartographiés	1.00×10^{-6}	0.35	20	0
17	17	GEOL	CHM001_	Aquifère des craies du Crétacé	7.80×10^{-5}	0.40	10	0
18	18	GEOL	CHC013_	Aquifère des sables de l'Oligocène	3.00×10^{-4}	0.15	10	0
20	20	GEOL	CHC015_	Aquifère à niveaux aquiclades du Paléocène	1.00×10^{-5}	0.20	15	0
21	21	GEOL	CHC014_	Aquifère à niveaux aquiclades de l'Oligocène	1.00×10^{-5}	0.20	15	0
22	22	GEOL	CHC004_	Aquifère des terrasses fluviatiles	1.00×10^{-6}	0.40	20	0
23	23	SOL	2010	Sols sableux ou limono-sableux à drainage naturel excessif ou légèrement excessif	1.00×10^{-6}	0.35	20	0
24	24	SOL	4030	Sols limoneux à drainage naturel assez pauvre à très pauvre	1.00×10^{-7}	0.40	20	0
25	25	SOL	6010	Sols limoneux peu caillouteux à drainage naturel favorable	5.00×10^{-6}	0.35	20	0
26	26	SOL	5010	Sols argileux à drainage naturel favorable ou imparfait	1.00×10^{-8}	0.50	20	0
27	27	SOL	7310	Sols limono-caillouteux à charge schisteuse et à drainage naturel principalement favorable	5.00×10^{-6}	0.32	20	0
28	28	SOL	7410	Sols limono-caillouteux à charge psammitique ou schisto-psammitique et à drainage naturel principalement favorable	5.00×10^{-6}	0.32	20	0
29	29	SOL	7810	Sols limono-caillouteux à charge crayeuse et à drainage naturel favorable	5.00×10^{-6}	0.32	20	0
30	30	SOL	7710	Sols limono-caillouteux à charge de grès argilo-calcaire et à drainage naturel favorable à imparfait	5.00×10^{-6}	0.32	20	0
31	31	GEOL	CHP022_	Aquiclude à niveaux aquifères du Dévonien inférieur	3.00×10^{-7}	0.05	15	0
32	32	GEOL	CHP031_	Aquitard à niveaux aquifères du Dévonien inférieur	7.00×10^{-7}	0.05	10	0
34	34	GEOL	CHP021_	Aquiclude du Dévonien inférieur	1.00×10^{-7}	0.05	20	0
35	35	GEOL	CHP029_	Aquitard à niveaux aquiclades du socle cambro-silurien	5.00×10^{-7}	0.05	20	0
36	36	GEOL	CHP040_	Aquiclude à niveaux aquifères de Villé	4.00×10^{-7}	0.05	15	0

37	37	SOL	1000	Sols tourbeux ou tourbières	1.00×10^{-4}	0.50	20	0
38	38	SOL	3010	Sols sablo-limoneux à drainage naturel principalement favorable	1.00×10^{-6}	0.35	20	0
39	39	GEOL	CHC011_	Aquiclude des argiles du Paléocène	1.00×10^{-8}	0.50	20	0
40	40	SOL	7110	Sols limono-caillouteux à charge schisto-phylladeuse et à drainage naturel quasi-exclusivement favorable	5.00×10^{-6}	0.32	20	0
41	41	SOL	3020	Sols sablo-limoneux à drainage naturel principalement modéré ou imparfait	1.00×10^{-6}	0.35	20	0
42	42	SOL	6020	Sols limoneux peu caillouteux à drainage naturel principalement modéré à assez pauvre	5.00×10^{-6}	0.35	20	0
43	43	GEOL	CHM006_	Aquiclude des marnes du Turonien	1.00×10^{-8}	0.50	20	0
44	44	SOL	7220	Sols limono-caillouteux à charge schisto-gréseuse ou gréseuse et à drainage naturel modéré à assez pauvre	5.00×10^{-6}	0.32	20	0
45	45	GEOL	CHM007_	Aquifère du Cénomano-Albien	1.00×10^{-5}	0.15	10	0
46	46	SOL	7210	Sols limono-caillouteux à charge schisto-gréseuse ou griséuse et à drainage naturel favorable	5.00×10^{-6}	0.32	20	0
47	47	GEOL	CHP002_	Aquifère des calcaires dévono-carbonifères (sous couverture)	1.50×10^{-4}	0.02	5	0
48	48	GEOL	CHP002_	Aquifère des calcaires dévono-carbonifères	1.50×10^{-4}	0.02	5	1
49	49	GEOL	CHP004_	Intercalation schisteuse des calcaires dévono-carbonifères	1.00×10^{-8}	0.05	20	0
50	50	GEOL	CHP014_	Aquiclude du Famennien - Frasnien	1.00×10^{-8}	0.05	20	0
51	51	GEOL	CHC010_	Aquifère des sables du Paléocène	3.00×10^{-4}	0.15	10	0
52	52	GEOL	CHC009_	Aquiclude - Aquitard des argiles de l'Eocène	5.00×10^{-7}	0.45	20	0
53	53	GEOL	CHC008_	Aquifère des sables de l'Eocène	3.00×10^{-4}	0.15	10	0
54	54	SOL	1000	Sols tourbeux ou tourbières	1.00×10^{-9}	0.50	20	0
55	55	SOL	2020	Sols sableux ou limono-sableux à drainage naturel principalement modéré ou imparfait	1.00×10^{-6}	0.35	20	0
56	56	GEOL	CHM002_	Aquiclude des marnes du Campanien	1.00×10^{-8}	0.50	20	0
57	57	GEOL	CHM004_	Aquitard du Santonien	1.00×10^{-7}	0.40	20	0
58	58	GEOL	CHC003_	Aquitard limoneux	1.00×10^{-7}	0.40	20	0
59	59	GEOL	CHP039_	Aquifère-aquitard-aquiclude du socle cambro-silurien	3.00×10^{-7}	0.05	15	0
60	60	GEOL	CHP045_	Aquitard à niveaux aquifères du Givetien	1.00×10^{-7}	0.05	15	0
61	61	SOL	5020	Sols argileux à drainage naturel assez pauvre à très pauvre	1.00×10^{-8}	0.50	20	0
62	62	SOL	7510	Sols limono-caillouteux à charge calcaire et à drainage naturel quasi-exclusivement favorable	1.00×10^{-4}	0.05	5	1
63	63	SOL	4010	Sols limoneux à drainage naturel favorable (2eme couche Geer)	1.00×10^{-7}	0.40	20	0

64	64	GEOL	CHC002_	Aquifère des tourbes	1.00×10^{-4}	0.30	20	0
65	65	GEOL	CHM005_	Aquifère des sables du Santonien	3.00×10^{-4}	0.15	10	0
66	66	GEOL	CHM009_	Aquifère de Longwy - Mont-Saint-Martin	5.50×10^{-5}	0.05	5	1
67	67	GEOL	CHM010_	Aquiclude de Grandcourt	5.00×10^{-8}	0.48	20	0
68	68	GEOL	CHM011_	Aquifère d'Aubange - Messancy	1.00×10^{-5}	0.15	10	0
69	69	GEOL	CHM012_	Aquiclude d'Ethe	1.00×10^{-8}	0.50	20	0
70	70	GEOL	CHM013_	Aquitard d'Arlon - Hondelange	8.00×10^{-7}	0.2	10	0
71	71	GEOL	CHM014_	Aquiclude d'Arlon	1.00×10^{-8}	0.50	20	0
72	72	GEOL	CHM015_	Aquifère de Virton	1.00×10^{-5}	0.1	10	0
73	73	GEOL	CHM016_	Aquifère d'Orval	1.00×10^{-5}	0.1	10	0
74	74	GEOL	CHM017_	Aquifère de Florenville	1.00×10^{-5}	0.1	10	0
75	75	GEOL	CHM018_	Aquifère de la Chevratte	1.00×10^{-5}	0.1	10	0
76	76	GEOL	CHM019_	Aquiclude à niveaux aquifères de Jamoigne	1.00×10^{-7}	0.40	20	0
77	77	GEOL	CHM020_	Aquifère de Mortinsart	1.00×10^{-6}	0.1	10	0
78	78	GEOL	CHM021_	Aquiclude d'Attert	5.00×10^{-8}	0.50	20	0
79	79	GEOL	CHM022_	Aquiclude à niveaux aquifères d'Habay	1.00×10^{-7}	0.05	20	0
80	80	GEOL	CHP011_	Aquitard du Famennien - Frasnien	5.00×10^{-7}	0.05	15	0
81	81	GEOL	CHP016_	Aquifère des calcaires du Frasnien	5.50×10^{-5}	0.05	5	1
82	82	GEOL	CHP017_	Aquifère des calcaires du Givetien	5.50×10^{-5}	0.05	5	1
83	83	GEOL	CHP019_	Aquitard de l'Eifelien	1.00×10^{-6}	0.05	10	0
84	84	GEOL	CHP020_	Aquifère de l'Eifelien	1.00×10^{-5}	0.05	5	0
85	85	GEOL	CHP023_	Aquitard à niveaux aquicludes du Dévonien inférieur	5.00×10^{-7}	0.05	15	0
86	86	GEOL	CHP024_	Aquitard à niveaux aquicludes de Villé	5.00×10^{-7}	0.05	15	0
87	87	GEOL	CHP025_	Aquifère de Fépin	1.00×10^{-6}	0.05	10	0
88	88	GEOL	CHP026_	Aquitard à niveaux aquifères du socle cambro-silurien	7.00×10^{-7}	0.05	10	0
89	89	GEOL	CHP027_	Aquifère du socle cambro-silurien	1.00×10^{-6}	0.05	5	0
90	90	GEOL	CHP028_	Aquiclude du socle cambro-silurien	1.00×10^{-7}	0.05	20	0
91	91	GEOL	CHP030_	Aquifère à niveaux aquicludes du Dévonien inférieur	7.00×10^{-7}	0.05	10	0
92	92	GEOL	CHP032_	Aquifère du Permien	1.00×10^{-5}	0.05	5	1
93	93	GEOL	CHP033_	Aquiclude à niveaux aquifères du socle cambro-silurien	3.00×10^{-7}	0.05	15	0
94	94	GEOL	CHP034_	Aquitard du Dévonien inférieur	5.00×10^{-7}	0.05	10	0
95	95	GEOL	CHP036_	Aquifère des calcaires du Frasnien-Givetien	5.50×10^{-5}	0.05	5	1

96	96	GEOL	CHP038_	Aquitard du socle cambro-silurien	5.00×10^{-7}	0.05	10	0
97	97	GEOL	CHP041_	Aquitard à niveaux aquifères de Villé	7.00×10^{-7}	0.05	10	0
98	98	GEOL	CHP043_	Aquiclude à niveaux aquitards du socle cambro-silurien	2.00×10^{-7}	0.05	20	0
99	99	GEOL	CHP044_	Aquiclude de l'Eifelien	1.00×10^{-7}	0.05	20	0
100	100	GEOL	CHC012_	Aquiclude d'argiles de remplissage	1.00×10^{-8}	0.50	20	0
101	101	GEOL	CHP006_	Aquitard du Carbonifère	8.00×10^{-7}	0.05	10	0
102	102	GEOL	CHP012_	Aquitard du Frasnien	8.00×10^{-7}	0.05	10	0
103	103	GEOL	CHM008_	Aquiclude de remplissage du Hainaut	1.00×10^{-8}	0.50	20	0
104	104	GEOL	CHM025_	Aquiclude et aquifère du Groupe du Hainaut	1.00×10^{-6}	0.35	20	0
105	105	GEOL	CHP018_	Aquiclude - Aquitard du Givetien	5.00×10^{-7}	0.05	15	0
106	106	GEOL	CHM003_	Aquifère - Aquitard de Vaals	3.00×10^{-4}	0.15	10	0
107	107.00	GEOL	CHM024_	Aquifère des grès du Crétacé	7.70×10^{-6}	0.05	5	0
108	108	GEOL	CHP035_	Aquifère de Baelen	1.50×10^{-4}	0.02	5	1

Tableau 4 : Détail des propriétés hydrogéologiques pour chaque unité hydrogéologique ou type de sol

2.9. Autres couches de la BD APSUGIS

Les couches RW_10LCO et RW_10SOT sont présentes dans la BD APSUGIS mais ne sont actuellement pas utilisées dans l'outil. Elles correspondent aux anciennes classifications de l'occupation du sol et du type de sol qui étaient utilisé lors de la précédente convention.

2.10. Bassins versants

En plus de la géodatabase APSUGIS, il y a une géodatabase BV (bassins versants) qui permet de subdiviser la Région wallonne en 61 bassins versants. Il est nécessaire de faire tourner l'outil à l'échelle des bassins versants pour prendre en compte le ruissellement sur l'ensemble de ces bassins dans le calcul de la dangerosité. Au final toutefois, les cartes de vulnérabilité sont agrégées pour couvrir l'ensemble de la Région wallonne et l'utilisateur peut « clipper » la zone qu'il souhaite afficher.

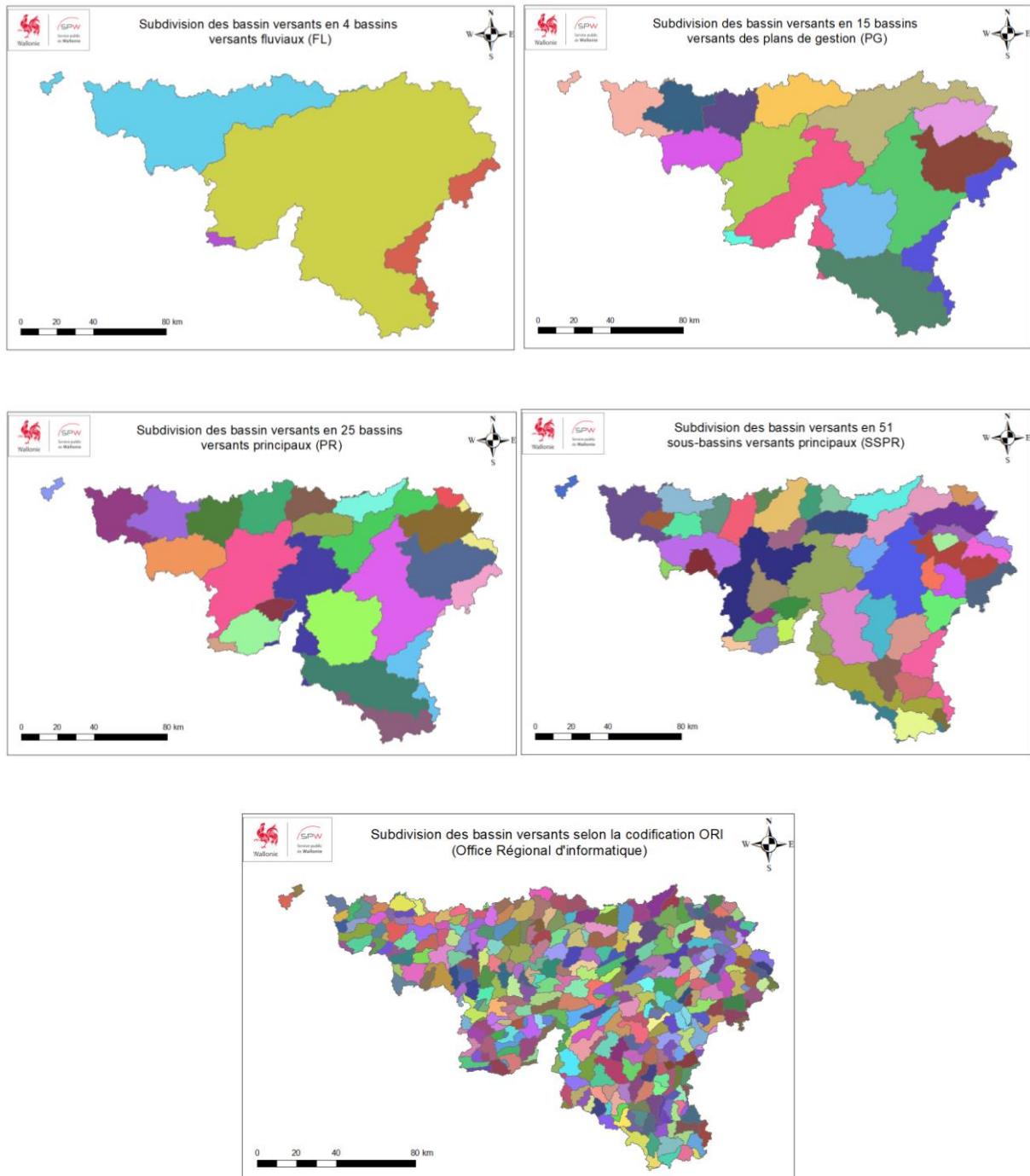


Figure 19 : Les différentes échelles des bassins versants en Région wallonne

Il existe plusieurs données à des échelles différentes concernant les bassins versants en Région wallonne (Figure 19). La donnée retenue pour diviser la Wallonie est celle des sous-bassins versants principaux qui compte une cinquantaine de bassins (voir le délivrable D02). Cependant, il est préférable d'exécuter l'outil sur des zones n'excédant pas 500 km² et donc certains sous-bassins ont dû être divisés en 2 ou en 3. La division de ces grands sous-bassins versants principaux a été faite en agrégeant plusieurs bassins ORI. Les 61 bassins qui en résultent sont présentés à la Figure 20. Un nom de maximum 6 caractères a été assigné à chaque bassin. Généralement il s'agit des premières

lettres du bassin, d'un numéro s'il y a plusieurs noms semblables (ex : Ourthe occidentale et Ourthe occidentale). Si le sous-bassin versant a été divisé en 2 ou 3, une lettre minuscule (a,b,c) a également été ajoutée.

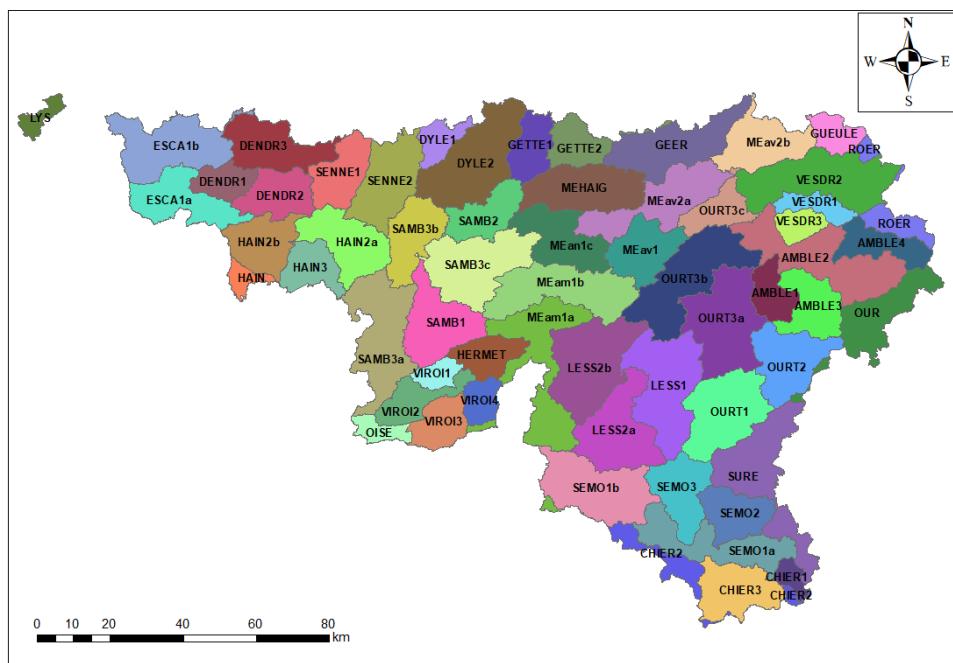


Figure 20 : Les 61 bassins versants utilisés dans l'outil APSÙ-GIS

3. Production des cartes de vulnérabilité intrinsèque

Ce chapitre est organisé de la manière suivante. Il ya d'abord un premier point où les principes de bases sont expliqués. Dans le deuxième point, les cartes de vulnérabilité sont illustrées par un exemple, celui du bassin de la Dendre. Le troisième point décrit les masses d'eau pour lesquelles le travail de cartographie de la vulnérabilité a été réalisé, les principales hypothèses prises et une illustration des résultats avec la carte des temps de transfert pondérés. Enfin le dernier point présente les cartes produites à l'échelle de la Wallonie.

3.1. Rappel des principes de base de la vulnérabilité

Le Tableau 5 détaille les différentes cartes produites et ce à quoi elles correspondent. Il y a d'abord les cartes de dangerosité de surface. Pour rappel (Popescu et al., 2004), la dangerosité de surface évalue la manière dont le polluant se distribue à la surface du sol et en quelles proportions il peut potentiellement s'infiltrer ou ruisseler. La dangerosité directe représente l'impact direct potentiel au point où la pollution se produit. La dangerosité latérale représente l'impact latéral potentiel de la contamination, dépendant de la proportion de contaminant qui va migrer latéralement (par ruissellement) mais aussi des possibilités « latérales » d'infiltration le long du cheminement emprunté par le contaminant au cours de son ruissellement. Il y a également la carte de dangerosité latérale cumulée qui représente la somme des termes de dangerosité amont relatifs à chaque cellule. Une cellule caractérisée par une dangerosité latérale cumulée élevée correspond donc potentiellement à un point très sensible du bassin puisqu'elle correspond à un emplacement particulièrement exposé au ruissellement.

Après les cartes de dangerosité de surface, il y a les cartes de vulnérabilité qui prennent en compte la capacité d'atténuation du milieu souterrain. Les cartes de vulnérabilité reposent sur 4 critères (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**) qui sont :

- Le temps de transfert (t_1)
- La durée de pollution (d)
- L'atténuation (C_{max}) qui est le rapport entre la concentration maximale qui atteint la nappe et la concentration initiale
- La restitution massique (M_{out})

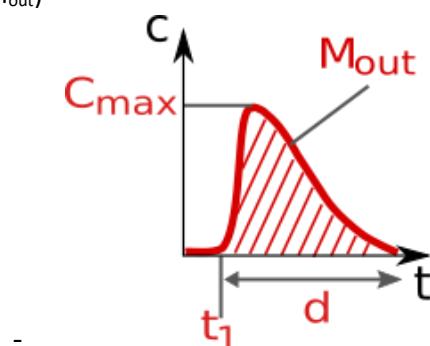


Figure 21 : Critères de vulnérabilité (d'après Brouyère et al., 2001)

Le critère de restitution massique n'est pertinent que pour la vulnérabilité spécifique parce que, pour la vulnérabilité intrinsèque, le polluant étant considéré conservatif, la restitution massique est d'office égale à 100%.

Pour une description détaillée de la manière dont sont calculés les différents critères de vulnérabilité et la dangerosité, le lecteur est renvoyé au délivrable D02 intermédiaire et au rapport du précédent projet (Popescu *et al.*, 2004).

raster	Description	Critère / Classe – Pondération (W)
Cartes de dangerosité de surface		
DID	Dangerosité directe	Critère
TLD	Dangerosité latérale totale	Critère
CLD	Dangerosité latérale cumulée	Critère
Cartes de vulnérabilité		
TMI	Temps de transfert	Critère
DUR	Durées de pollution	Critère
ATT	Coefficients d'atténuation	Critère
MAS	Taux de restitution massique	Critère
VTM	Classes de Temps de transfert	Classe
VDU	Classes de Durées de pollution	Classe
VAT	Classes de Coefficients d'atténuation	Classe
VMA	Classes de Taux de restitution massique	Classe
WTM	Temps de transfert pondérés	Critère (W)
WDU	Durées de pollution pondérées	Critère (W)
WAT	Coefficients d'atténuation pondérés	Critère (W)
WMA	Taux de restitution massique pondérés	Critère (W)
WVT	Classes de Temps de transfert pondérés	Classe (W)
WVD	Classes de Durées de pollution pondérées	Classe (W)
WVA	Classes de Coefficients d'atténuation pondérés	Classe (W)
WVM	Classes de Taux de restitution massique pondérés	Classe (W)
VUL	Classes de vulnérabilité globales	Classe (W++)

Tableau 5 : Détail des cartes produites par l'outil APSÙ-GIS

Pour chacun des 4 critères de vulnérabilité, il y a 4 cartes (raster) associées (Figure 22). Le critère peut être non pondéré ou pondéré par les coefficients de dangerosité directe et latérale. Et ces critères peuvent être représentés par une symbologie continue ou sous forme de classes. Pour chaque critère, 6 classes sont proposées. Elles sont présentées dans le Tableau 6. Pour afficher les cartes de vulnérabilité, il est plus approprié d'utiliser une symbologie avec des classes fixes. Cela permet notamment de comparer des cartes de différentes zones. Les classes de vulnérabilité ont d'ailleurs été légèrement modifiées par rapport au projet de 2004 (Popescu *et al.* 2004), pour pouvoir représenter des cartes de vulnérabilité plus contrastée à l'échelle de la Région wallonne. Les cartes non classées permettent surtout de visualiser les valeurs extrêmes et permettent à l'utilisateur de tester plusieurs symbologies et de créer d'autres classes sans refaire tourner l'outil.

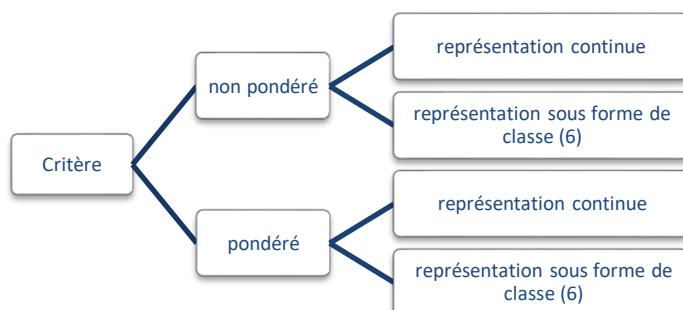


Figure 22 : 4 cartes de vulnérabilité associées à chaque critère

Critères	Vulnérabilité	Extrêmement élevée	Très élevée	Elevée	Modérée	Faible	Très faible
	Classe	6	5	4	3	2	1
Temps de transfert	<1j	1j-50j	50j-1an	1an-5ans	5ans-10 ans	>10 ans	
Durée	>10 ans	5ans-10 ans	1an-5ans	50j-1an	1j-50j	<1j	
Atténuation (dans l'outil elle est exprimée en -log)	$>10^{-4}$ (<4)	$10^{-4}-10^{-6}$ (4-6)	$10^{-6}-10^{-8}$ (6-8)	$10^{-8}-10^{-10}$ (8-10)	$10^{-10}-10^{-12}$ (10-12)	$<10^{-12}$ (>12)	
Restitution massique	100%-80%	80%-50%	50%-25%	25%-10%	10%-1%	<1%	

Tableau 6 : Classes de vulnérabilité pour chacun des critères considérés

Avec les critères pondérés (par la dangerosité de surface) et classés, il est possible d'obtenir une carte unique/globale en combinant les différents critères. Dans l'outil, la pondération par défaut des critères est la suivante :

Pondération	Temps de transfert	Durée de restitution	Atténuation	Restitution massique
$\Sigma = 1$	0,45	0,45	0,1	0

Tableau 7 : Pondérations des 4 critères pour une carte de vulnérabilité globale

Les critères qui sont proposés sont les mêmes que ceux qui avaient été adoptés pour le projet de 2004 mais l'utilisateur est libre de les modifier en fonction du critère qu'il estime le plus important pour son cas d'étude. Parmi les trois critères pris en compte dans la méthode APSU, le temps de transfert pondéré est certainement le plus pertinent pour l'évaluation de la vulnérabilité des ressources en eau souterraine, car le temps est le facteur clé dans les processus d'atténuation des contaminants. Le critère de concentration maximale est utile pour identifier les secteurs où les valeurs seuils de polluants sont plus susceptibles d'être dépassées. Enfin, le critère de la durée de la pollution est pertinent pour le gestionnaire d'un bassin versant d'eau souterraine qui veut savoir pendant combien de temps la pollution détériorera la qualité de l'eau souterraine d'un aquifère (Popescu *et al.*, 2019).

Pour la cartographie de la vulnérabilité intrinsèque, le critère de restitution massique a une pondération de 0 parce qu'il n'est pertinent que pour les cartes de vulnérabilité spécifique.

3.2. Exemple du bassin de la Dendre orientale

Dans ce deuxième point, les cartes de dangerosité et de vulnérabilité du bassin de la Dendre permettront d'illustrer les différents concepts qui ont été expliqués dans le point 3.1. Ces explications sont principalement d'ordre général et peuvent s'appliquer aux autres bassins de Wallonie.

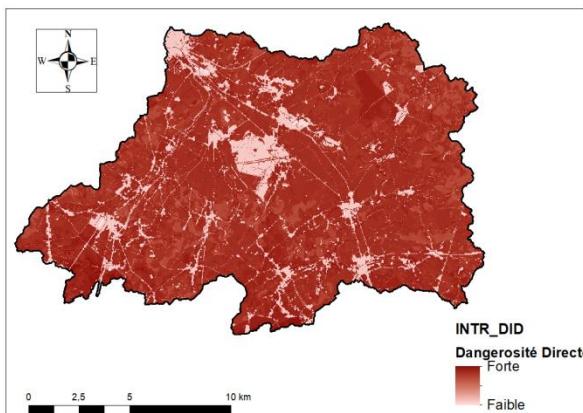


Figure 23 : Dangerosité directe du bassin de la Dendre orientale

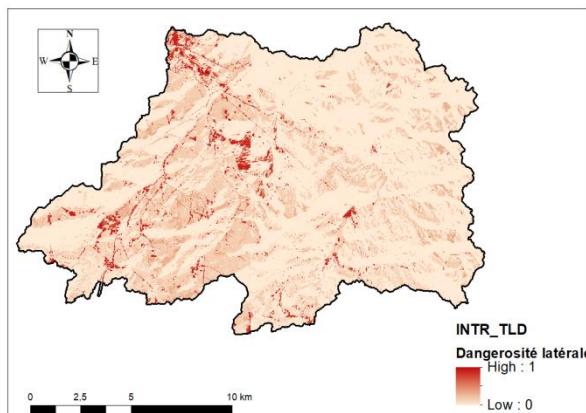


Figure 24 : Dangerosité latérale du bassin de la Dendre orientale

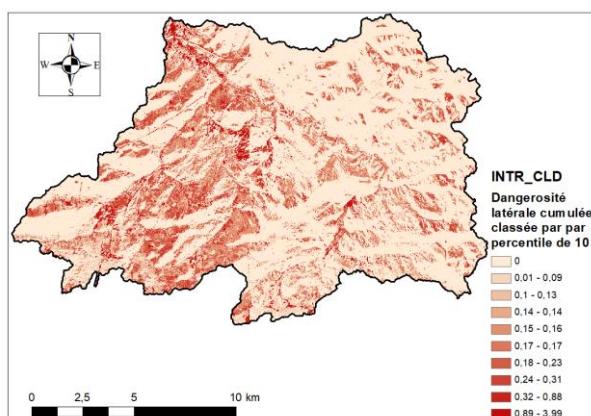


Figure 25 : Dangerosité latérale cumulée du bassin de la Dendre orientale

Aux Figures 23, 24 et 25, les cartes de dangerosité de surface sont présentées. La Figure 23 montre la carte de dangerosité directe qui varie de 0 quand rien ne s'infiltre à 1 quand toute l'eau s'infiltre dans la cellule. Ce qui ressort surtout, ce sont les zones urbanisées qui sont considérées comme très peu perméables. Il y a d'autres variations liées à l'occupation du sol, le type de sol, le relief, ... mais elles sont beaucoup moins perceptibles. La dangerosité latérale totale est présentée à la Figure 24. Elle varie également entre 0 et 1. Les zones en rouges, correspondant à une dangerosité latérale élevée, sont situées à proximité de zones imperméables ou de zones avec des pentes élevées (ces deux facteurs conduisant à un ruissellement potentiellement élevé). La Figure 25 représente la dangerosité latérale cumulée au sein du bassin de la Dendre. Cette carte met en exergue les zones particulièrement exposées au ruissellement ; il s'agit principalement des fonds de vallée et des espaces bordant les surfaces imperméables. Ces zones ont une dangerosité latérale cumulée élevée.

Comme cela a été précisé précédemment (Figure 22), pour chaque critère (temps de transfert, durée de pollution et atténuation), il y a au moins 4 cartes (rasters) associées. Le critère peut être pondéré par les coefficients de dangerosité directe et latérale. Il est également possible de visualiser le critère non pondéré. Et ces critères peuvent être représentés de manière « brute » ou sous forme de classes. Les cartes « brutes » (non classées) constituent l'information de base sur chaque critère sans

aucun traitement interprétatif. Les cartes par classées permettent d'avoir une vue « objective » de la vulnérabilité au regard de ces critères et elles permettent de comparer différents bassins ou aquifères en termes de vulnérabilité plus ou moins élevée. A partir des données brutes, il est également possible de classer les données avec des intervalles choisies par l'utilisateur. Il peut notamment être intéressant de faire des cartes classées sur base de percentiles qui offriraient une vue « relative » de la vulnérabilité au sein d'un et un seul bassin, pour visualiser les zones plus vulnérables et le moins vulnérables du bassin.

Pour la Dendre orientale, 5 cartes associées au critère de temps de transfert sont présentées aux Figures 26 à 29. Il y a 2 cartes brutes et 3 cartes classées. La première chose qu'il est possible de constater c'est que pour les représentations brutes (non classées), les cartes apparaissent très rouges et ce sont les valeurs extrêmes qui ressortent légèrement. Par contre les cartes classées sont très contrastées avec la première classe qui correspond à une vulnérabilité faible et la sixième qui correspond à une vulnérabilité élevée. A la Figure 30, les temps de transferts pondérés sont classés avec des percentiles de 10., ce qui permet d'évaluer la vulnérabilité à l'échelle du bassin sans la comparer aux autres. Au niveau du bassin de la Dendre, la carte n'est pas très différente de celles représentées avec les 6 classes du Tableau 6 mais cette représentation peut être adéquate pour des bassins dont la vulnérabilité n'est pas très contrastée avec les 6 classes.

On constate également qu'il y a des différences entre les cartes pondérées et non pondérées. Sur les cartes de vulnérabilité pondérées, la dangerosité latérale est prise en compte, ce qui a pour effet d'étendre l'extension des zones les plus vulnérables. Ceci s'observe en particulier dans les fonds de vallées parce que c'est là que les eaux de ruissellement du bassin vont s'infiltrer. La même chose devra s'observer au voisinage de points d'infiltration préférentielle. Les différences se marquent mieux sur les cartes classées (Figures 27 et 29), que sur les cartes non classées (Figures 26 et 28).

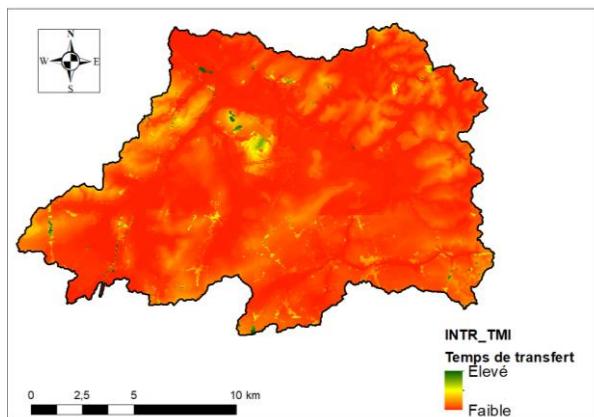


Figure 26 : temps de transfert de la Dendre orientale

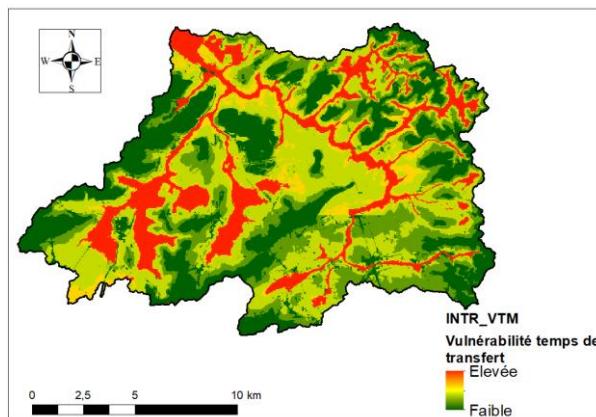


Figure 27 : Classes de temps de transfert de la Dendre orientale

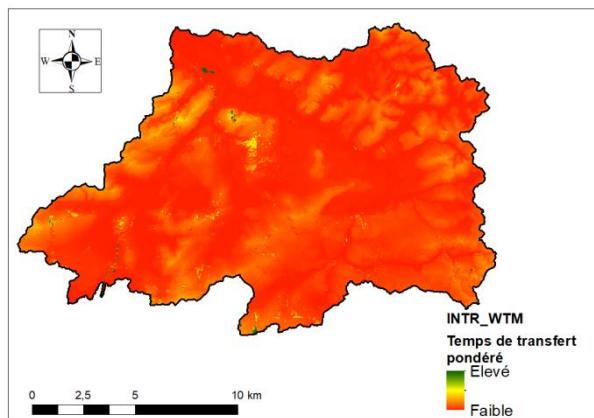


Figure 28 : Temps de transferts pondéré de la Dendre orientale

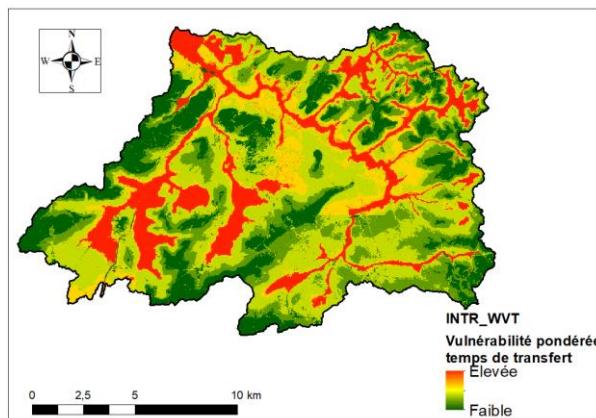


Figure 29 : Classe de temps de transfert pondéré de la Dendre orientale

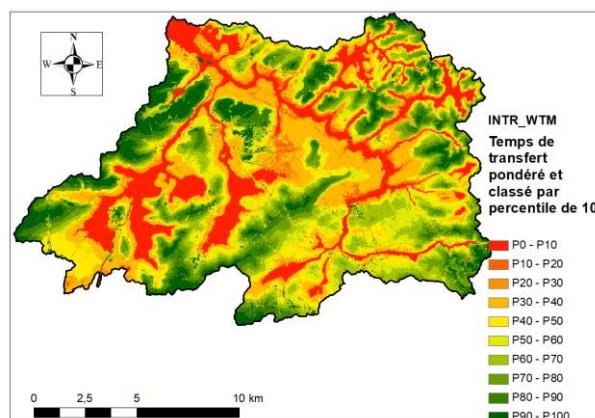


Figure 30 : Classe de temps de transfert pondéré de la Dendre orientale (classe par percentile 10)

Les 3 critères qui définissent la vulnérabilité intrinsèque (temps de transfert, durée de pollution, coefficient d'atténuation), sont présentés pour le bassin de la Dendre orientale aux Figures 31 à 33. Ces 3 critères ne semblent pas totalement indépendants. La durée de pollution est inversement proportionnelle au temps de transfert tandis que l'atténuation est proportionnelle au temps de transfert. La carte de vulnérabilité globale qui combine les différents critères est présentée à la Figure 34. Les critères sont combinés d'après les pondérations du Tableau 7, qui sont les pondérations par défaut de l'outil. Cette carte globale a une vulnérabilité moyenne et la carte est

très lissée parce qu'elle combine des critères fortement corrélés. Cette carte n'est donc pas très adéquate pour représenter la vulnérabilité. Il vaut mieux faire plusieurs cartes, une carte par critère. Le critère qui paraît d'ailleurs être le plus pertinent est celui des temps de transfert.

Dans la suite de ce chapitre, où la vulnérabilité des différentes masses d'eau sera présentée, c'est le critère des temps de transfert qui sera représenté.

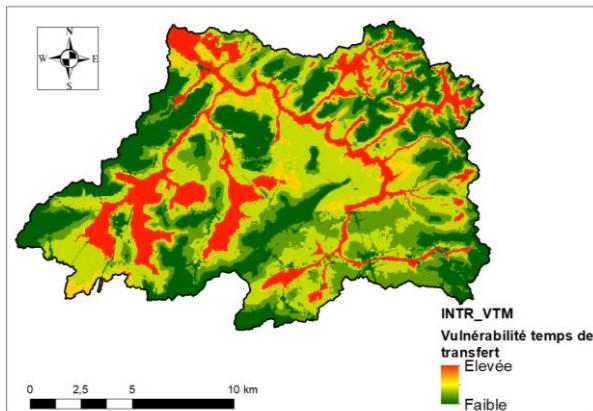


Figure 31 : Classes de temps de transfert de la Dendre orientale

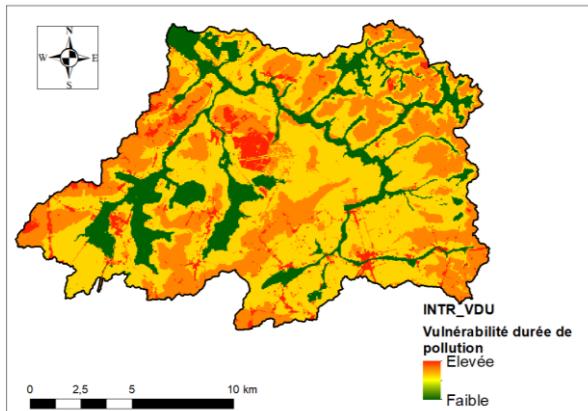


Figure 32 : Classes de durée de pollution de la Dendre orientale

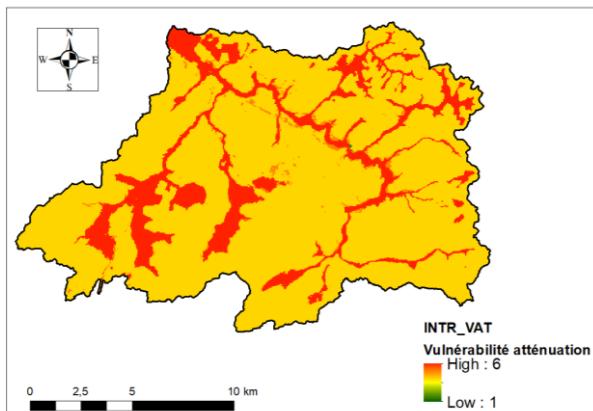


Figure 33 : Classes de coefficient atténuation de la Dendre orientale

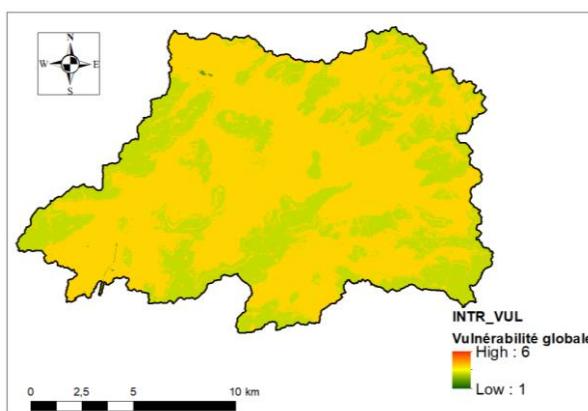


Figure 34 : Carte de vulnérabilité globale de la Dendre orientale

3.3. Résultats par masse d'eau souterraine

L'objectif de ce chapitre est d'expliquer les principales hypothèses qui ont été posées pour produire les cartes de vulnérabilité. Il y a d'abord un premier point situant les masses d'eau qui ont été cartographiée. Ensuite, pour chaque masse d'eau (ou groupe de masses d'eau), il y a un tableau reprenant les principales hypothèses qui ont été prises pour estimer l'épaisseur de la zone non saturée, le nombre de couches sol/sous-sol, le fond géologique utilisé, ... Il faut également rappeler que, pour l'ensemble des cartes présentées, la vulnérabilité concerne le premier aquifère rencontré. Par exemple, en Ardenne, c'est l'aquifère superficiel du manteau d'altération qui est considéré et pas celui plus profond logé dans des fractures. Autre exemple, pour la masse d'eau BERWE051, où les sables du Tertiaire surmontent le Socle paléozoïque, l'aquifère des sables est généralement celui qui est considéré, sauf dans les fonds de vallée où le Socle est à l'affleurement et est donc le premier aquifère rencontré.

Pour clôturer ce chapitre, la carte des temps de transfert pondérés est présentée pour illustrer les résultats.

3.3.1. Localisation des masses d'eau cartographiées

Les masses d'eau qui ont été cartographiées sont listées dans le Tableau 8 et représentées à la Figure 35. Le tableau renvoie pour chaque masse d'eau vers le sous chapitre qui détaille les hypothèses prises pour la cartographie et vers la carte de résultat. Certaines masses d'eau ont été parfois regroupées à cause de leur proximité géographique ou parce que les hypothèses prises étaient très semblables.

Code Masse d'eau supérieure	Nom masse d'eau	Hypothèses prise	Carte de résultat
BERWE013	Calcaires de Peruwelz-Ath-Soignies	3.3.2	Figure 37
BERWE030	Craies du bassin de la Haine	3.3.3	Figure 38
BERWE033	Alluvions et Sables de la vallée de la Haine	3.3.3	Figure 38
BERWE051	Sables du Bruxellien	3.3.3	Figure 39
BERWM011	Calcaires du bassin de la Meuse bord Nord	3.3.5	Figure 41
BERWM012	Calcaires du bassin de la Meuse bord Sud	3.3.6	Figure 42
BERWM021	Calcaires et grès du Condroz	3.3.6	Figure 43
BERWM022	Calcaires et grès dévoniens du bassin de la Sambre	3.3.7	Figure 44
BERWM023	Calcaires et grès de la Calestienne et de la Famenne	3.3.7	Figure 44
BERWM040	Crétacé du bassin du Geer	3.3.8	Figure 45
BERWM052	Sables Bruxelliens des bassins Haine et Sambre	3.3.3	Figure 40
BERWM071	Alluvions et graviers de Meuse (Givet - Namur)	3.3.6	Figure 42, Figure 43
BERWM100	Grès et schistes du massif ardennais :Lesse, Ourthe, Amblève et Vesdre	3.3.9	Figure 46
BERWM102	Grès et schistes du massif ardennais: bassin de la Roer	3.3.9	Figure 46
BERWM103	Grès et schistes du massif ardennais : Semois, Chiers, Houille et Viroin	3.3.9	Figure 46
BERWR101	Grès et schistes du massif ardennais : bassin de la Moselle	3.3.9	Figure 46

Tableau 8 : Liste des masses d'eau cartographiées

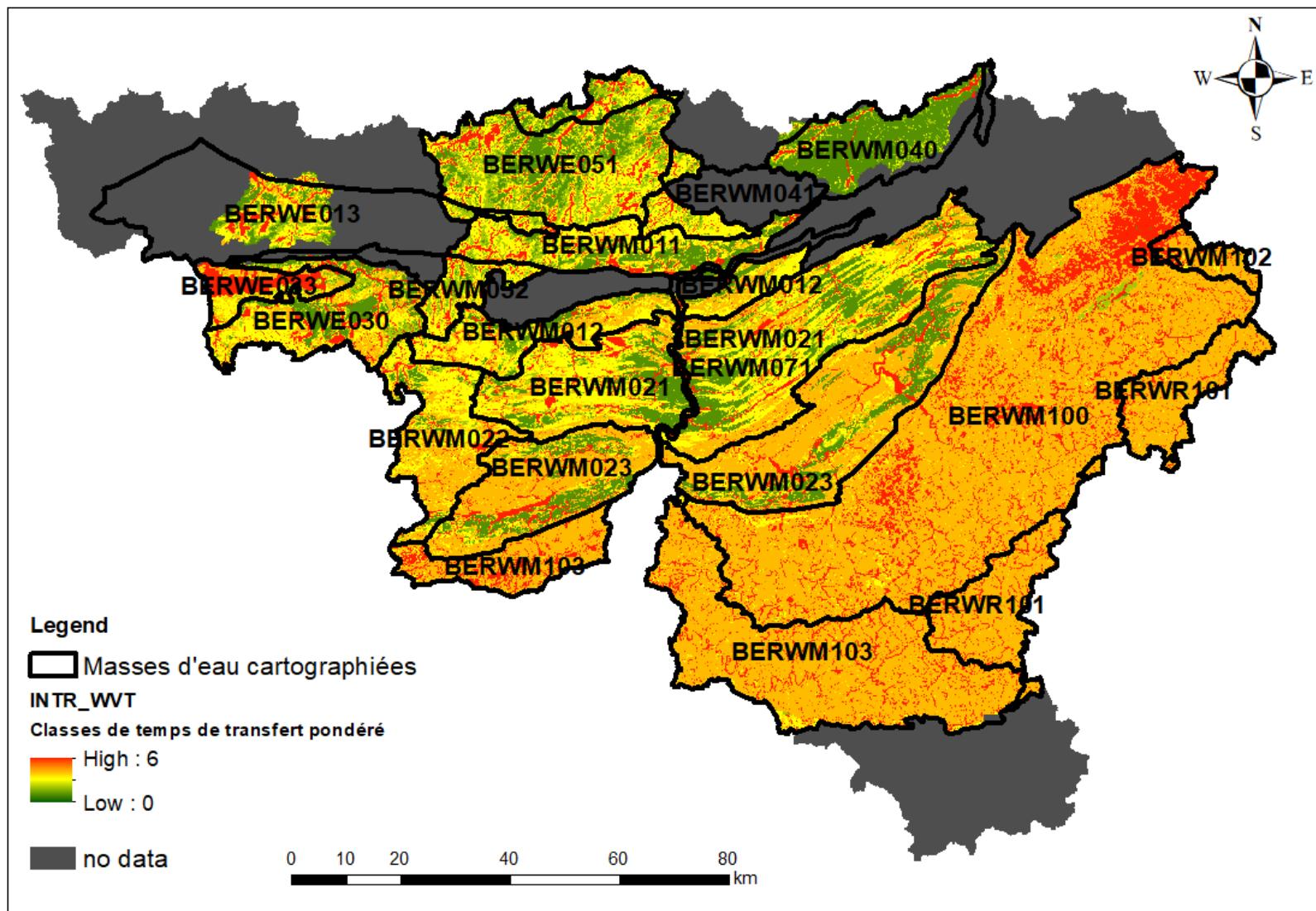


Figure 35 : Localisation des masses d'eau cartographiées

3.3.2. Masse d'eau BERWE013 (uniquement le bassin de la Dendre orientale)

La masse d'eau souterraine BERWE013 « Calcaires de Peruwelz-Ath-Soignies », est localisée dans le nord-ouest de la Wallonie. La nappe principale est celle des calcaires dévono-carbonifères. Cette nappe est recouverte par des dépôts tertiaires (principalement l'aquifères des sables du Paléocène, lui-même recouvert par l'aquiclude des argiles de l'Eocène).

Les principales hypothèses prises pour la masse d'eau BERWE013 sont présentées dans le Tableau 9. La masse d'eau BERWE013 est relativement bien étudiée, les isopièzes et les isohypses sont tracées dans cette zone, peu d'hypothèses simplificatrices ont donc dû être prises. Par contre, l'entièreté de la masse d'eau n'est pas couverte, la carte de vulnérabilité est uniquement réalisée pour le bassin de la Dendre orientale. Dans un premier temps, les cartes de vulnérabilité avaient été réalisées pour certains bassins test dont faisait partie la Dendre orientale mais pour le reste de la masse d'eau les couches sol/sous-sol n'ont pas encore été discréétisées.

La carte de vulnérabilité des temps de transfert pondérés est illustrée à la Figure 37. La carte montre des temps de transfert assez contrastés. L'aquifère des calcaires est relativement peu vulnérable sauf dans les vallées où il n'est pas recouvert d'argiles du Tertiaire.

MESO E013 (uniquement bassin de la Dendre orientale)		Résumé des hypothèses prises et données disponibles	
Estimation de l'épaisseur de la zone non saturée (ZNS)		<ul style="list-style-type: none"> - La piézométrie a été estimée par les isopièzes de la carte hydrogéologique et il y a également des isohypses qui permettent de connaître l'épaisseur des dépôts qui recouvrent l'aquifère calcaire. - Pour les aquifères alluviaux : une piézométrie subaffleurante est fixée 	<u>Degré de connaissance</u> 5 1
Discréétisation de la ZNS	Sol	<ul style="list-style-type: none"> - <u>Lithologie</u> : carte des principaux types de sol (plus de précision sous chapitre 2.7.1) - <u>Epaisseur</u> : utilisation de la donnée produite par le PCNSW (Legrain et al., 2017), avec épaisseur du sol maximum de 1,25 m et correction aux endroits où l'épaisseur théorique de la couche sol est supérieure à l'épaisseur escomptée de la ZNS (plus de précision sous chapitre 2.7.2) - Des limons sont présents sur la zone mais leur épaisseur n'a pas pu être estimée. 	
	Couche sous-sol 1	<ul style="list-style-type: none"> - <u>Lithologie</u> : basée sur les cartes hydrogéologiques fournies le 04/04/2018 - <u>Epaisseur</u> : épaisseur de la ZNS - épaisseur du sol (sauf dans les zones où il y a la 2ème couche sol) 	
	Couche sous-sol 2	<ul style="list-style-type: none"> - <u>Lithologie</u> : Uniquement calcaire, cette couche n'est pas présente sur toute la zone mais uniquement quand le toit de l'aquifère, se trouve dans les calcaires et ceux-ci sont recouverts par une autre unité géologique - <u>Epaisseur</u> : niveau du toit des calcaires – niveau du toit de la ZNS 	
Zones d'infiltrations préférentielles		<ul style="list-style-type: none"> - Les carrières et certains phénomènes karstiques sont considérés comme des zones d'infiltrations préférentielles 	

Tableau 9 : Résumé des hypothèses prises et données disponibles pour la masse d'eau BERWE013

3.3.3. Masse d'eau BERWE030 et BERWE033

Les masses d'eau souterraine BERWE030 « Craies du bassin de la Haine » et BERWE033 « Alluvions et Sables de la vallée de la Haine », sont situées dans le nord-ouest de la Wallonie. Pour la masse d'eau BERWE030, la nappe principale est celle des craies du crétacé mais il y également des unités du paléozoïque. La masse d'eau BERWE030 est en partie captive sous les sédiments du Tertiaire et des alluvions de la masse d'eau BERWE033.

Le Tableau 10 présente les principales hypothèses qui ont été prises pour les masses d'eau BERWE030 et BERWE033. Cette zone est relativement bien étudiée et la piézométrie est connue dans la zone grâce notamment à de travaux de modélisation (Wildemeersch *et al.*, 2009).

La carte de vulnérabilité est illustrée à la Figure 38. La carte de vulnérabilité est encore une fois très contrastée. Comme pour les autres zones, il s'agit de la vulnérabilité du premier aquifère rencontré. La masse d'eau BERWE033 apparaît très vulnérable parce il est question des alluvions et des sables qui ont une piézométrie relativement proche de la surface. Pour la masse d'eau BERWE030, la partie captive de la masse d'eau (sous la masse d'eau BERWE033) n'est pas considérée, parce que la craie n'est pas le premier aquifère rencontré.

MESO-s E030 et E033	Résumé des hypothèses prises et données disponibles		
Estimation de l'épaisseur de la zone non saturée (ZNS)		<ul style="list-style-type: none"> - La piézométrie des craies a été estimée sur base de la modélisation du projet PAI-Timothy (Wildemeersch <i>et al.</i>, 2009) - Pour les unités aquiclades et aquitards du socle paléozoïque l'épaisseur de la ZNS a été estimée sur base de valeurs médianes - Dans l'aquifère alluvial, la piézométrie a été fixée subaffleurante (0.25m) - Pour l'aquifère des sables du Paléocène, l'épaisseur de la ZNS a été estimée sur base de la valeur médiane (environ 2 m) à l'exception des zones où les sables sont protégés par l'unité aquiclude-aquitard des argiles de l'Eocène où la ZNS a été estimée plus profonde (10m) 	<u>Degré de connaissance :</u> 4 1 et 2 1 2
Discrémination de la ZNS	Sol	<ul style="list-style-type: none"> - <u>Lithologie</u> : carte des principaux types de sol (plus de précision sous chapitre 2.7.1) - <u>Epaisseur</u> : utilisation de la donnée produite par le PCNSW (Legrain <i>et al.</i>, 2017), avec épaisseur du sol maximum de 1,25 m et correction aux endroits où l'épaisseur théorique de la couche sol est supérieure à l'épaisseur escomptée de la ZNS (plus de précision sous chapitre 2.7.2) - Des limons sont présents sur la zone mais leur épaisseur n'a pas pu être estimée. 	
	Couche sous-sol	<ul style="list-style-type: none"> - <u>Lithologie</u> : basée sur les cartes hydrogéologiques fournies le 28/06/2018 même les cartes 51/1-2 et 51/3-4 qui ne sont pas encore validées - <u>Epaisseur</u> : épaisseur de la ZNS - épaisseur du sol 	
Zones d'infiltration préférentielle		<ul style="list-style-type: none"> - Les carrières et certains phénomènes karstiques sont considérés comme des zones d'infiltrations préférentielles 	

Tableau 10 : Résumé des hypothèses prises et données disponibles pour les masses d'eau BERWM030 et BERWE033

3.3.4. Masses d'eau BERWE051 et BERWM052

Les masses d'eau souterraine BERWE051 « Sables du Bruxellien » et BERWM052 « Sables Bruxelliens des bassins Haine et Sambre » sont toutes les deux situées au Nord de la Wallonie. Elles ne sont pas jointives mais leur principal aquifère est celui des sables de l'Eocène.

Les hypothèses prises pour ces deux masses d'eau sont présentées dans le Tableau 11. La masse d'eau BERWE051 est très bien étudiée, parce que les isopièzes sont tracées pour toute la zone, ce qui n'est pas le cas pour la masse d'eau BERWM052, où la piézométrie a été interpolée à partir du niveau des sources.

La masse d'eau BERWE051 surmonte en partie la masse d'eau BERWE160 du Socle paléozoïque. Dans les fonds de vallée, le Socle est à l'affleurement, il est donc le premier aquifère rencontré. Dans les fonds de vallées, c'est donc de la vulnérabilité de la masse d'eau BERWE160 dont il s'agit plutôt que de la masse d'eau BERWE051.

Les deux cartes de vulnérabilités sont présentées à la Figure 39 et à la Figure 40. La piézométrie des sables de l'Eocène est fortement influencée par la topographie. La vulnérabilité est donc très élevée dans le fond de vallée et moyenne à faible sur les plateaux.

MESO E051 et M052		Résumé des hypothèses prises et données disponibles	
Estimation de l'épaisseur de la zone non saturée (ZNS)		<u>Sables du Bruxellien :</u> <ul style="list-style-type: none"> - Des isopièzes sont tracées pour la majorité des cartes de la zone - Pour les zones où ce n'est pas le cas, la piézométrie a été interpolée en considérant les cours d'eau comme drainants. <u>Autres unités hydrogéologiques :</u> <ul style="list-style-type: none"> - Les unités hydrogéologiques du Socle paléozoïque n'affleurent que dans les fonds de vallées. La piézométrie a été fixée à 3 m pour ces unités à l'exception des aquifères alluviaux (<1m) 	<u>Degré de connaissance :</u> 5 3 1 et 2
Discrémination de la ZNS	Sol	<ul style="list-style-type: none"> - <u>Lithologie</u> : carte des principaux types de sol (plus de précision sous chapitre 2.7.1) - <u>Epaisseur</u> : utilisation de la donnée produite par le PCNSW (Legrain et al., 2017), avec épaisseur du sol maximum de 1,25 m et correction aux endroits où l'épaisseur théorique de la couche sol est supérieure à l'épaisseur escomptée de la ZNS (plus de précision sous chapitre 2.7.2) - Des limons sont présents sur la zone mais leur épaisseur n'a pas pu être estimée. 	
	Couche sous-sol 1	<ul style="list-style-type: none"> - <u>Lithologie</u> : basée sur les cartes hydrogéologiques fournies le 28/06/2018 à l'exception de la carte 39/3-4 qui n'a pas été fournie à cause d'erreurs importantes sur la géologie. Dans cette zone, la lithologie a été approximée comme étant homogène (uniquement des sables du Bruxellien). - <u>Epaisseur</u> : épaisseur de la ZNS - épaisseur du sol 	
Zones d'infiltrations préférentielles		<ul style="list-style-type: none"> - Les carrières sont considérées comme des zones d'infiltrations préférentielles 	

Tableau 11 : Résumé des hypothèses prises et données disponibles pour les masses d'eau BERWE051 et BERWM052

3.3.5. Masses d'eau BERWM011

La masse d'eau BERWM011 (Calcaires du bassin de la Meuse bord Nord) est située au Nord du Sillon Sambre et Meuse. La nappe principale est celle de l'aquifère dévono-carbonifères mais il y a également d'autres unités du socle paléozoïque. Ces unités paléozoïques sont localement recouvertes par des dépôts tertiaires, principalement au nord et à l'ouest de la masse d'eau.

Les principales hypothèses posées pour la masse d'eau souterraine BERWM011 sont présentées dans le Tableau 12. La piézométrie est principalement basée sur les résultats de la modélisation du projet Synclin'EAU (Orban *et al.*, 2010). Cependant, la modélisation a été réalisée pour les unités du Paléozoïque qui ne sont pas forcément les premiers aquifères rencontrés dans la masse d'eau BERWM011. Il y certaines zones où les calcaires sont captifs sous des dépôts tertiaires, la piézométrie des dépôts tertiaires a donc dû être estimée pour le projet APSU-GIS.

La carte de vulnérabilité est illustrée à la Figure 41. La carte est assez contrastée et fort influencé par l'épaisseur de la zone non saturée. La vulnérabilité est plus importante dans les dépôts tertiaires et dans les unités aquiclude et aquitard du socle paléozoïque.

MESO M011		Résumé des hypothèses prises et données disponibles	
Estimation de l'épaisseur de la zone non saturée (ZNS)		<ul style="list-style-type: none"> - Piézométrie estimée principalement sur base de la modélisation réalisée dans le cadre du projet Synclin'EAU (Orban <i>et al.</i>, 2010) - A l'exception : <ul style="list-style-type: none"> o des unités aquiclude, aquitards où la zone non saturée a été fixée sur base de la médiane des valeurs o de l'Ouest de la zone, où les calcaires sont captifs sous une couche d'argile surmontés de sables de l'Eocène. Dans cette zone, la piézométrie a été interpolée à partir des isopièzes des sables de l'Eocène de la carte hydrogéologique. 	<u>Degré de connaissance</u> 4 1 et 2 5
Discrémination de la ZNS	Sol	<ul style="list-style-type: none"> - <u>Lithologie</u> : carte des principaux types de sol (plus de précision sous chapitre 2.7.1) - <u>Epaisseur</u> : utilisation de la donnée produite par le PCNSW (Legrain <i>et al.</i>, 2017), avec épaisseur du sol maximum de 1,25 m et correction aux endroits où l'épaisseur théorique de la couche sol est supérieure à l'épaisseur escomptée de la ZNS (plus de précision sous chapitre 2.7.2) - Des limons sont présents sur la zone mais leur épaisseur n'a pas pu être estimée. 	
	Couche sous-sol 1	<ul style="list-style-type: none"> - <u>Lithologie</u> : basée sur les cartes hydrogéologiques fournies le 28/06/2018 - <u>Epaisseur</u> : épaisseur de la ZNS - épaisseur du sol 	
Zones d'infiltrations préférentielles		<ul style="list-style-type: none"> - Les carrières et certains phénomènes karstiques sont considérés comme des zones d'infiltration préférentielle 	

Tableau 12 : Résumé des hypothèses prises et données disponibles pour la masse d'eau BERWM011

3.3.6. Masses d'eau BERWM012, BERWM021 et BERWM071

Les masses d'eau BERWM012 (Calcaires du bassin de la Meuse bord Sud et) BERWM021 (Calcaires et grès du Condroz) sont situées au centre de la Wallonie. Les principaux aquifères de ces deux masses d'eau sont les calcaires du Carbonifères et les grès du Famennien pour la masse d'eau BERWM021. Il y a également d'autres unités du Paléozoïque mais à caractères plutôt aquiclades et aquitards. La masse d'eau BERWM071 est principalement composée des alluvions de la Meuse et elle recoupe en grande partie les masses d'eau BERWM012 et BERWM021. Cette partie est également présentée dans ce chapitre.

Le Tableau 13 décrit les principales hypothèses qui ont été prises pour établir les cartes de vulnérabilité des masses d'eau BERWM021 et BERWM012. Les deux masses d'eau étudiées sont relativement bien connues notamment grâce à la modélisation du projet Synclin'EAU (Orban *et al.*, 2010).

Les cartes de vulnérabilité de ces deux masses d'eau sont présentées à la Figure 42 et à la Figure 43. Une partie de la masse d'eau BERWM071 est également représentée.

Les cartes de vulnérabilité sont assez contrastées. Les zones apparaissant en vert sur la carte correspondent à des contextes de nappe relativement profonde, ce qui est principalement le cas pour les unités calcaires. A contrario, les unités aquiclades et aquitards où la nappe est plus superficielle apparaissent en rouge car les temps de transfert escomptés sont a priori relativement courts. Toutefois, la vulnérabilité attribuée aux formations calcaires semble un peu sous-estimée par rapport à ce qu'on serait en droit d'attendre dans ce contexte aquifère. Il y a néanmoins déjà de forts contrastes de vulnérabilité dans les unités calcaires, notamment dans les zones où il y a des phénomènes karstiques. Ceux-ci ne sont pas visibles à l'échelle de la masse d'eau, mais en zoomant, il est possible de constater que les zones karstiques sont très vulnérables (Figure 36). De plus, grâce à l'influence de la dangerosité latérale, l'aire d'influence des phénomènes karstiques sur la carte de vulnérabilité est d'autant plus grande s'il y a beaucoup de ruissellement à l'amont.

MESO M021 et M012	Résumé des hypothèses prises et données disponibles	Degré de connaissance
Estimation de l'épaisseur de la zone non saturée (ZNS)	<ul style="list-style-type: none"> - Piézométrie estimée principalement sur base de la modélisation réalisée dans le cadre du projet Synclin'EAU (Orban <i>et al.</i>, 2010) - A l'exception <ul style="list-style-type: none"> o de la zone du Synclinal de Morialmé où des isopièzes sont tracées dans la carte hydrogéologique et où la modélisation ne correspond pas aux isopièzes o des valeurs d'épaisseur de zones non saturées ont été fixées en fonction des valeurs moyennes de chaque unité ou du caractère aquitard, aquiclude, aquifère, s'il n'y a pas de valeurs piézométriques o des aquifères alluviaux où une piézométrie sub-affleurante est fixée 	4 5 1 et 2 1

	Sol	<ul style="list-style-type: none"> <u>Lithologie</u> : carte des principaux types de sol (plus de précision sous chapitre 2.7.1) <u>Epaisseur</u> : utilisation de la donnée produite par le PCNSW (Legrain et al., 2017), avec épaisseur du sol maximum de 1,25 m et correction aux endroits où l'épaisseur théorique de la couche sol est supérieure à l'épaisseur escomptée de la ZNS (plus de précision sous chapitre 2.7.2) Des limons sont présents sur la zone mais leur épaisseur n'a pas pu être estimée.
Discrémination de la ZNS	Couche sous-sol 1	<ul style="list-style-type: none"> <u>Lithologie</u> : basée sur les cartes hydrogéologiques fournies le 04/04/2018 La carte 54/1-2 n'avait pas encore été fournie au moment du travail sur cette zone d'étude. La carte géologique utilisée était la carte qui avait été fournie pour le projet Synclin'EAU (Brouyère et al, 2009). <u>Epaisseur</u> : épaisseur de la ZNS - épaisseur du sol (sauf dans les zones où il y a la 2ème couche sol)
	Couche sous-sol 2	<ul style="list-style-type: none"> <u>Lithologie</u> : Uniquement calcaire, cette couche n'est pas présente sur toute la zone, mais uniquement là où des poches d'argiles sont situées au-dessus des calcaires. <u>Epaisseur</u> : l'épaisseur des poches d'argiles a été fixée à 3m pour avoir une valeur minimale et ne pas surestimer la protection de l'aquifère calcaire
	Zones d'infiltrations préférentielles	<ul style="list-style-type: none"> Les carrières et certains phénomènes karstiques sont considérés comme des zones d'infiltrations préférentielles

Tableau 13 : Résumé des hypothèses posées et des données disponibles pour les masses d'eau BERWM021 et BERWM012

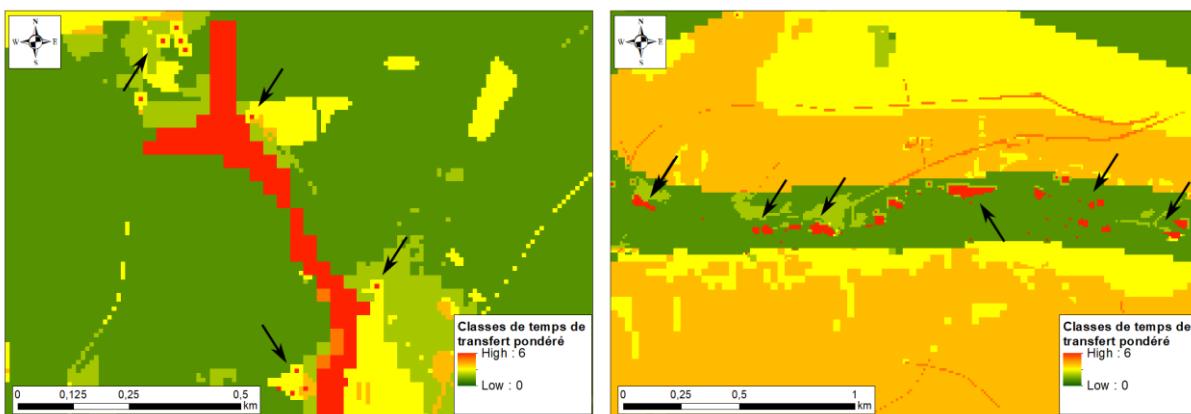


Figure 36 : Mise en évidence des phénomènes karstiques dans les cartes de vulnérabilité dans la région de Mont-Godinne

3.3.7. Masses d'eau BERWM022 et BERWM023

Les masses d'eau BERWM022 (Calcaires et grès dévoniens du bassin de la Sambre) et BERWM023 (Calcaires et grès de la Calestienne et de la Famenne), sont situées dans le centre de la Wallonie. La nappe principale est celle des calcaires givetiens et frasniens mais il y a également des d'autres unités du Dévonien mais plutôt à caractères aquiclades et aquitards. La masse d'eau BERWM071 est principalement composée des alluvions de la Meuse et elle recoupe en partie les masses d'eau BERWM022 et BERWM023. Cette partie est également présentée dans ce chapitre.

Le Tableau 14 reprend les principales hypothèses qui ont été prises pour ces masses d'eau souterraine. Il y a assez peu de données piézométriques donc beaucoup d'hypothèses simplificatrice ont dû être prises pour établir les cartes de vulnérabilité.

La carte de vulnérabilité est présentée à la Figure 44. Les unités aquiclude et aquitards sont plus vulnérables parce que la nappe est proche de la surface et les calcaires présentent des vulnérabilités allant de très élevées à très faibles en fonction de l'épaisseur de la zone non saturée et de la présence de karst ou non.

MESO M022 et M023	Résumé des hypothèses prises et données disponibles		
Estimation de l'épaisseur de la zone saturée (ZNS)	- Il n'y a que 3 zones très locales ou des isopièzes ont été tracées ; il n'est donc pas possible d'interpoler la piézométrie pour l'ensemble de la zone. <u>Calcaires dévoiens (Calestienne) :</u> <ul style="list-style-type: none">○ La piézométrie a été fixée aux niveaux des résurgences référencées dans l'Atlas du karst, au niveau de seuils hydrogéologiques et des quelques niveau piézométrique disponibles○ Une carte piézométrique de 2011 est tracée pour le plateau du Gerny (Bonniver <i>et al.</i>, 2012)○ A l'exception de la zone du Gerny la carte piézométrique obtenue est relativement peu précise <u>Autres unités hydrogéologiques :</u> <ul style="list-style-type: none">○ Des valeurs d'épaisseur de zones non saturées ont été fixées en fonction des valeurs moyennes de chaque unité ou du caractère aquitard, aquiclude, aquifère, s'il n'y a pas de valeurs piézométriques○ Pour les aquifères alluviaux : une piézométrie subaffleurante est fixée	Degré de connaissance	
		3	
		5	
		1 et 2	
Discrémination de la ZNS	Sol	- <u>Lithologie</u> : carte des principaux types de sol (plus de précision sous chapitre 2.7.1) - <u>Epaisseur</u> : utilisation de la donnée produite par le PCNSW (Legrain <i>et al.</i> , 2017), avec épaisseur du sol maximum de 1,25 m et correction aux endroits où l'épaisseur théorique de la couche sol est supérieure à l'épaisseur escomptée de la ZNS (plus de précision sous chapitre 2.7.2) - Des limons sont présents sur la zone mais leur épaisseur n'a pas pu être estimée.	
	Couche sous-sol 1	- <u>Lithologie</u> : basée sur les cartes hydrogéologiques fournies le 28/06/2018 (la carte hydrogéologique 54/7_8 a été fournie malgré le fait qu'elle ne soit pas validée) - <u>Epaisseur</u> : épaisseur de la ZNS - épaisseur du sol	
Zones d'infiltrations préférentielles		- Les carrières et certains phénomènes karstiques sont considérés comme des zones d'infiltrations préférentielles	

Tableau 14 : Résumé des hypothèses prises et données disponibles pour les masses d'eau BERWM022 et BERWM023

3.3.8. Masse d'eau BERWM040

La masse d'eau BERWM040 : Crétacé du bassin du Geer est située dans le nord-est de la Wallonie. L'aquifère principal est celui des craies du Crétacé, qui est recouvert d'une épaisse couverture de limon.

Le Tableau 15 présente les principales hypothèses qui ont été prises pour la masse d'eau RWM040. Cette masse est très bien étudiée donc très peu d'hypothèses simplificatrices ont dû être prises pour la cartographie de la vulnérabilité.

La Figure 45 illustre la carte de vulnérabilité associée. La masse d'eau BERWM040 est globalement peu vulnérable car l'aquifère des craies est protégé par une épaisse couche de limon. Les temps de transferts sont donc très élevés. Au premier abord, constater que la vulnérabilité intrinsèque est peu élevée dans cette masse d'eau peut paraître étrange, parce qu'elle présente de fortes concentrations en nitrate et pesticides, mais cette pollution est liée à un épandage intensif qui a lieu depuis plusieurs décennies. Une pollution ponctuelle actuelle mettrait plusieurs années à atteindre éventuellement la nappe.

MESO M040		Résumé des hypothèses prises et données disponibles	Degré de connaissance
Estimation de l'épaisseur de la zone saturée (ZNS)		<ul style="list-style-type: none"> - La piézométrie a été estimée par les isopièzes de 2008 de la carte hydrogéologique - Les données concernent principalement le bassin du Geer, pour le reste de la zone, l'estimation de la piézométrie est moins précise - Pour les aquifères alluviaux : une piézométrie subaffleurante est fixée 	5 1
Discrémination de la ZNS	Sol	<ul style="list-style-type: none"> - <u>Lithologie</u> : carte des principaux types de sol (plus de précision sous chapitre 2.7.1) - <u>Epaisseur</u> : utilisation de la donnée produite par le PCNSW (Legrain et al., 2017), avec épaisseur du sol maximum de 1,25 m et correction aux endroits où l'épaisseur théorique de la couche sol est supérieure à l'épaisseur escomptée de la ZNS (plus de précision sous chapitre 2.7.2) 	
	Couche sous-sol 1	<ul style="list-style-type: none"> - <u>Lithologie</u> : Limon - <u>Epaisseur</u> : interpolée grâce aux données des isohypses du sommet de la craie qui ont été interpolés pour l'ensemble du bassin du Geer dans le projet PIRENE (Brouyère et al, 2004) 	
	Couche sous-sol 2	<ul style="list-style-type: none"> - <u>Lithologie</u> : basée sur les cartes hydrogéologiques fournies le 04/04/2018 - <u>Epaisseur</u> : égale à ZNS- (SOL + Limon) 	
Zones d'infiltrations préférentielles		<ul style="list-style-type: none"> - Les carrières sont considérées comme des zones d'infiltrations préférentielles 	

Tableau 15 : Résumé des hypothèses prises et données disponibles pour la masse d'eau BERWM040

3.3.9. Masses d'eau BERWM100, BERWM102, BERWM103 et BERWR101

Les masses d'eau BERWM100 : Grès et schistes du massif ardennais : Lesse, Ourthe, Amblève et Vesdre, BERWM102 : Grès et schistes du massif ardennais : bassin de la Roer, BERWM1 : Grès et schistes du massif ardennais : Semois, Chiers, Houille et Viroin et BERWR101 : Grès et schistes du massif ardennais : bassin de la Moselle sont situées dans le sud de la Belgique, en Ardenne. Ces masses d'eau sont constituées de dépôts du Dévonien inférieur, de l'Ordovicien et du Cambrien. La lithologie est constituée de schistes, de phyllades, de grès, de quartzites et de quartzophyllades. Ces unités sont plutôt de nature aquitards et aquicludes mais il y a quand même des aquifères : les nappes superficielles logées dans le manteau d'altération et les nappes profondes contenues dans les fissures des intercalations gréseuses et quartzitiques et dans les zones de fractures.

Le Tableau 16 décrit les principales hypothèses qui ont été prises pour établir les cartes de vulnérabilité des masses d'eau BERW100, BERWM102, BERWM103 et BERWR101. Il existe peu de données sur ces masses d'eau, beaucoup d'hypothèses ont dû être posées pour cette zone, pour établir les cartes de vulnérabilité.

La carte de vulnérabilité est présentée à la Figure 46. Il est possible de constater que globalement la vulnérabilité est moyenne à élevée parce que la nappe est assez proche de la surface dans cette zone. Les zones en rouge correspondent principalement aux tourbières et aux sols avec drainage à engorgement d'eau temporaire ou permanent où l'eau est très proche de la surface. Les zones où la vulnérabilité est moindre, correspondent à des unités plus aquifères où la nappe est plus profonde.

MESO BERWM100, BERWM102, BERWM103 et BERWR101		Résumé des hypothèses prises et données disponibles		
Estimation de l'épaisseur de la zone saturée (ZNS)	- Il n'y a pratiquement pas d'isopières tracés dans cette zone dans la carte hydrogéologique et il n'y a pas de données piézométriques issues de la modélisation. - L'aquifère considéré est le premier aquifère rencontré, c'est-à-dire, l'aquifère du manteau d'altération et pas l'aquifère profond de fissures. - Les épaisseurs de zones non saturées ont été fixées en fonction des valeurs moyennes de chaque unité hydrogéologique ou du caractère aquitard, aquiclude ou aquifère s'il n'y a pas de données piézométriques. - Pour les alluvions, les tourbières, les sols avec drainage à engorgement d'eau temporaire (i, h, l) et les sols avec drainage à engorgement d'eau permanent (e, f, g), l'épaisseur de la zone non saturée a été fixée à 0,25m	<u>Degré de connaissance</u> 1 et 2 1		
Discretisation de la ZNS	Sol Couche sous-sol 1	- <u>Lithologie</u> : carte des principaux types de sol (plus de précision sous chapitre 2.7.1) - <u>Epaisseur</u> : utilisation de la donnée produite par le PCNSW (Legrain et al., 2017), avec épaisseur du sol maximum de 1,25 m et correction aux endroits où l'épaisseur théorique de la couche sol est supérieure à l'épaisseur escomptée de la ZNS (plus de précision sous chapitre 2.7.2) - <u>Lithologie</u> : basée sur les cartes hydrogéologiques fournies le 04/04/2018, les cartes 55/34 et 68/78 étaient manquantes. Pour la première, une unité hydrogéologique unique a été fixée (aquiclude à niveaux aquifères du Dévonien inférieur, ID 31), parce que les unités de l'Ardenne ont des propriétés hydrogéologiques relativement semblables. Pour la deuxième carte, un vide a été laissé parce que la zone est située à la transition entre l'Ardenne et la Lorraine et la géologie n'a pas pu être extrapolée. - <u>Epaisseur</u> : égale à ZNS- SOL		
Zones d'infiltrations préférentielles	- Les carrières sont considérées comme des zones d'infiltration préférentielle			

Tableau 16 : Résumé des hypothèses prises et données disponibles pour les masses d'eau BERWM100, BERWM102, BERWM103 et BERWR101

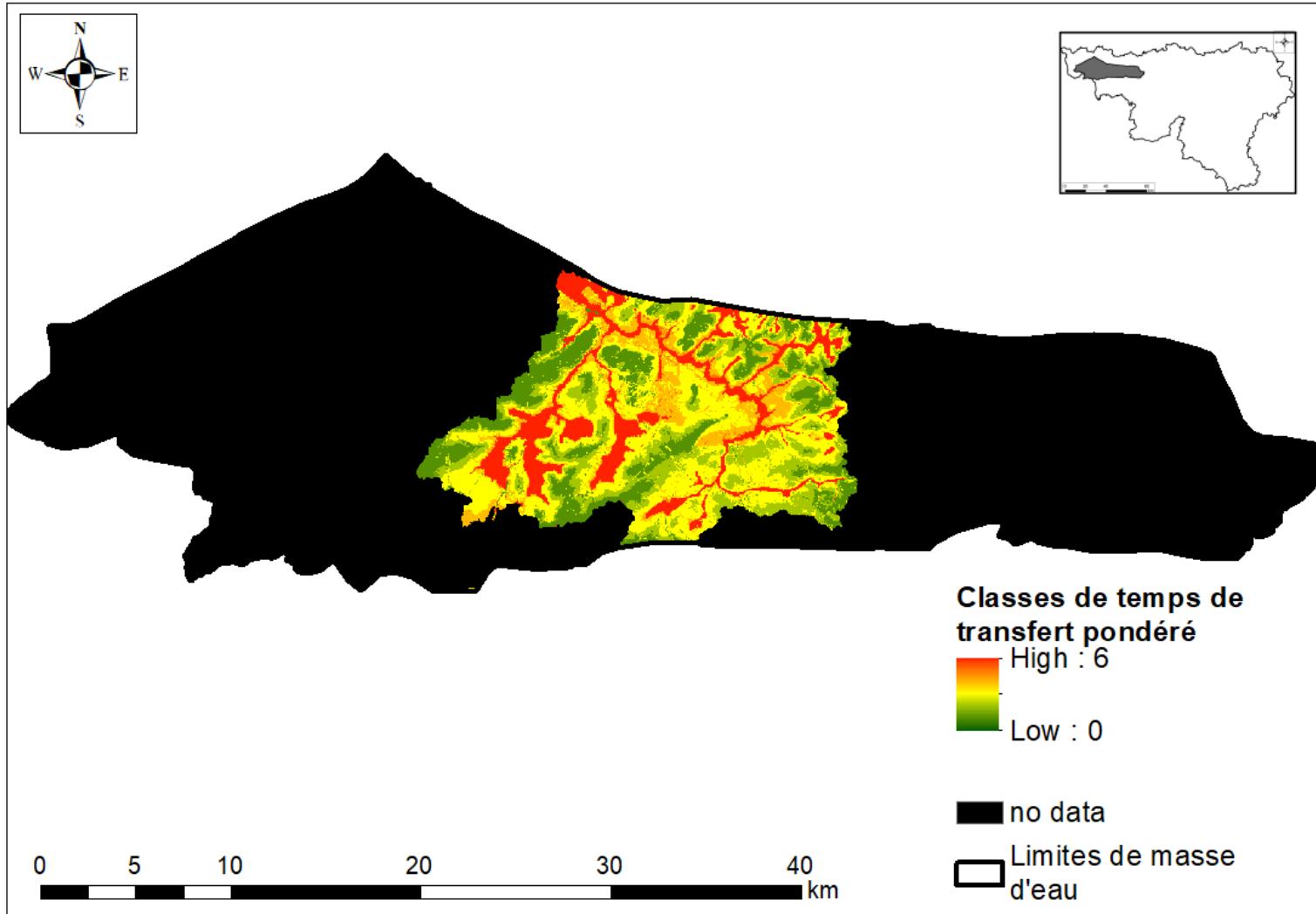


Figure 37 : Classe des temps de transfert pondérés de la masse d'eau BERWE013

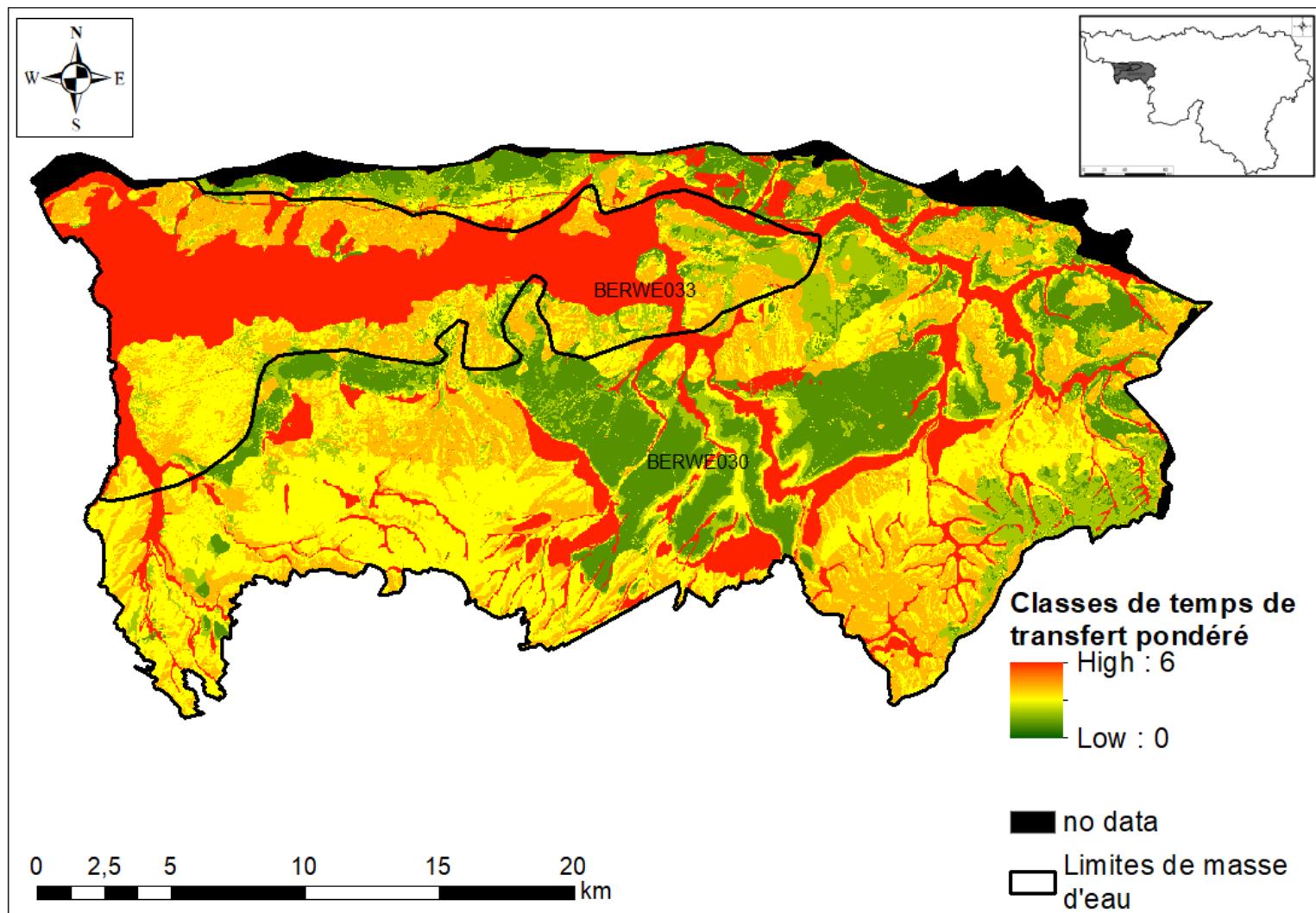


Figure 38 : Classe des temps de transfert pondérés des masses d'eau BERWME030 et BERWME033

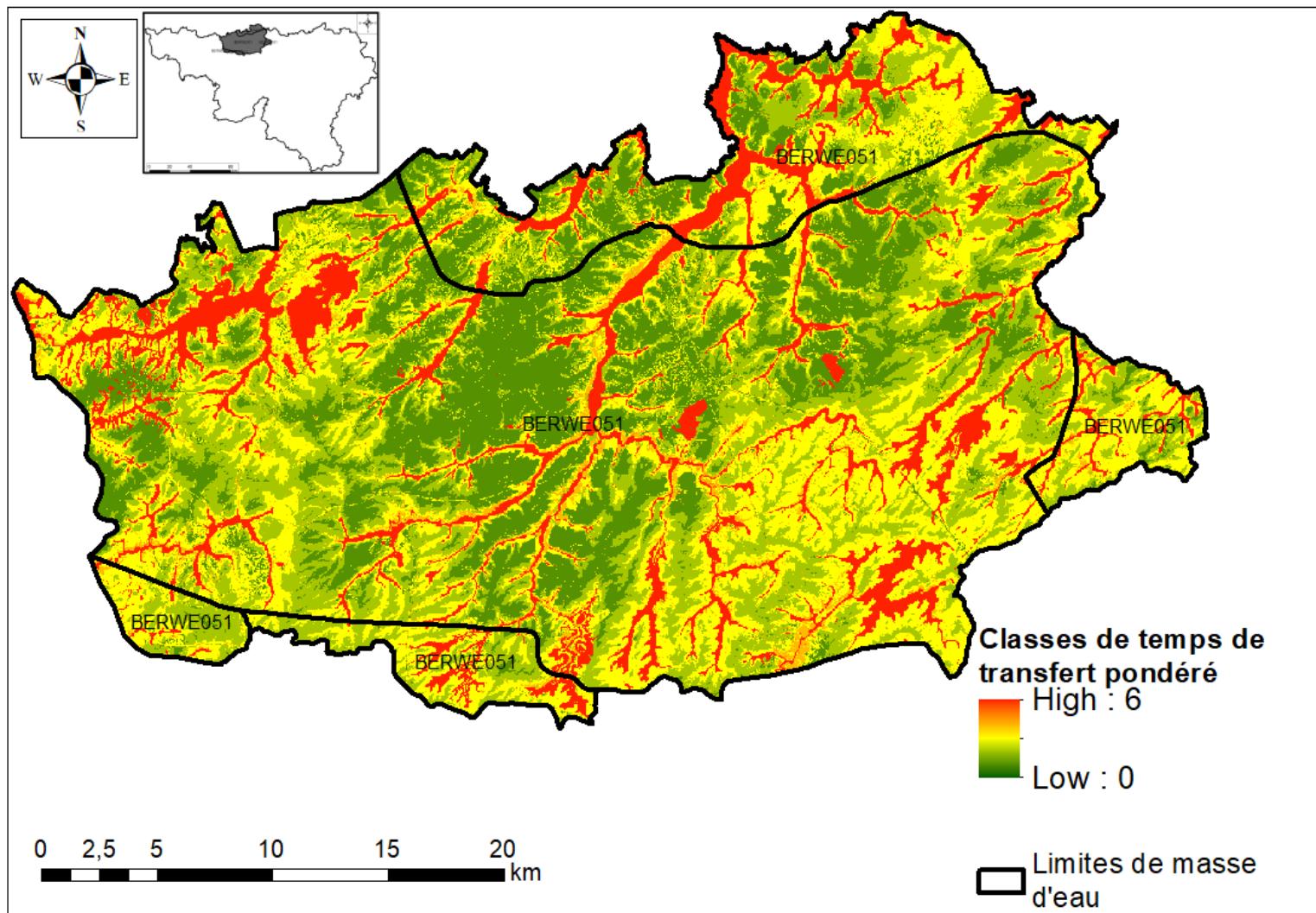


Figure 39 : Classe des temps de transfert pondérés de la masse d'eau BERWE051

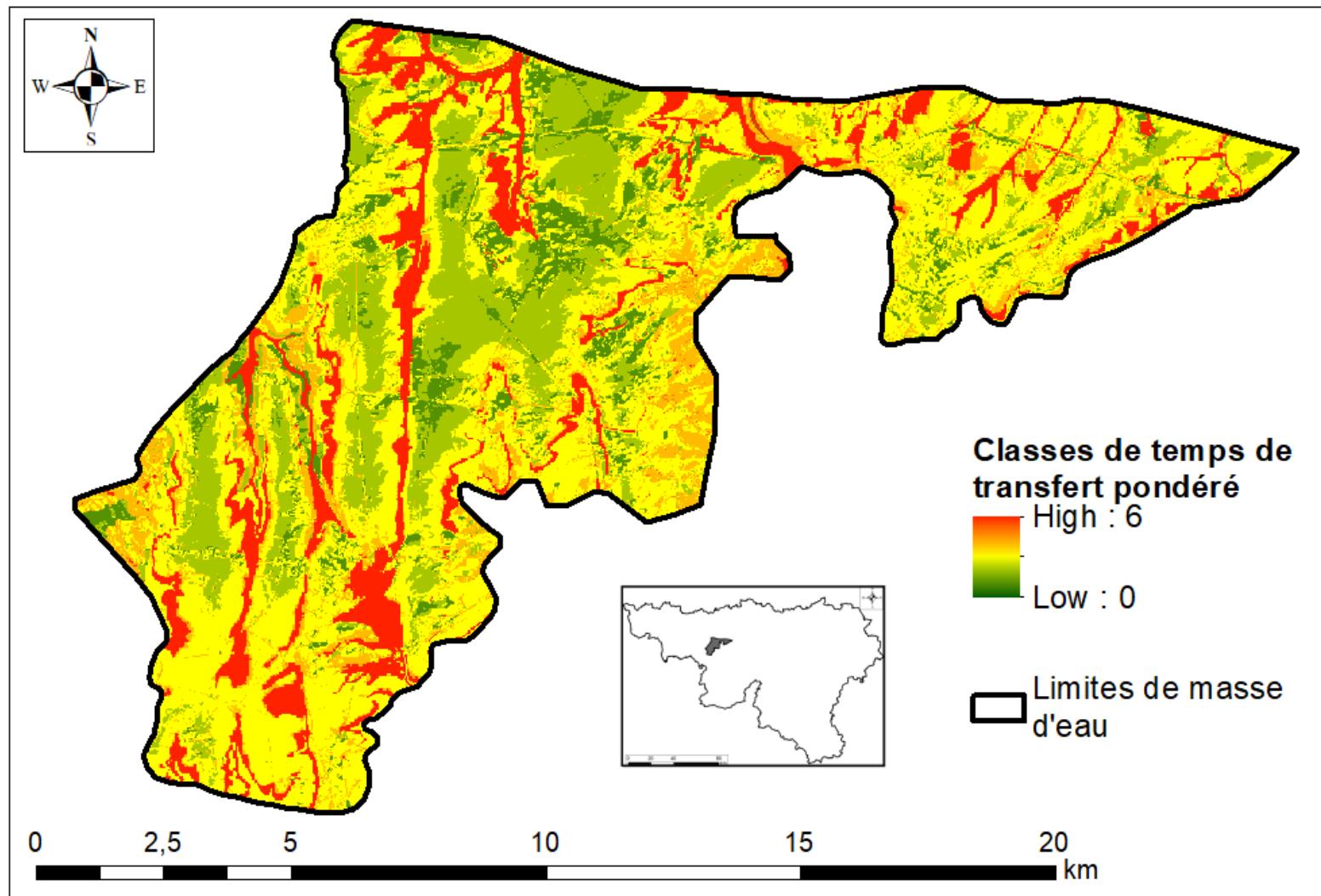


Figure 40 : Classe des temps de transfert pondérés de la masse d'eau BERWM052

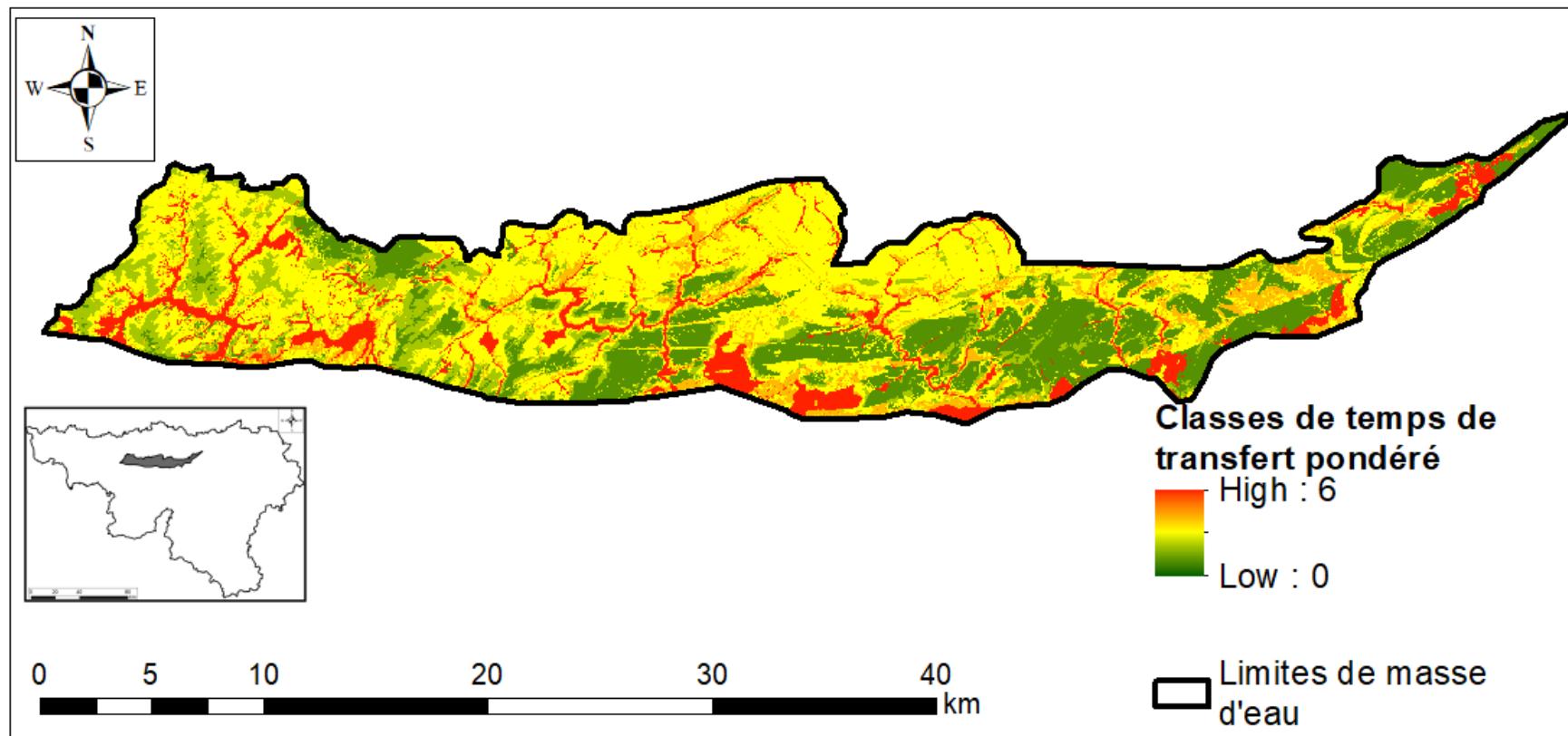


Figure 41 : Classe des temps de transfert pondérés de la masse d'eau BERWM011

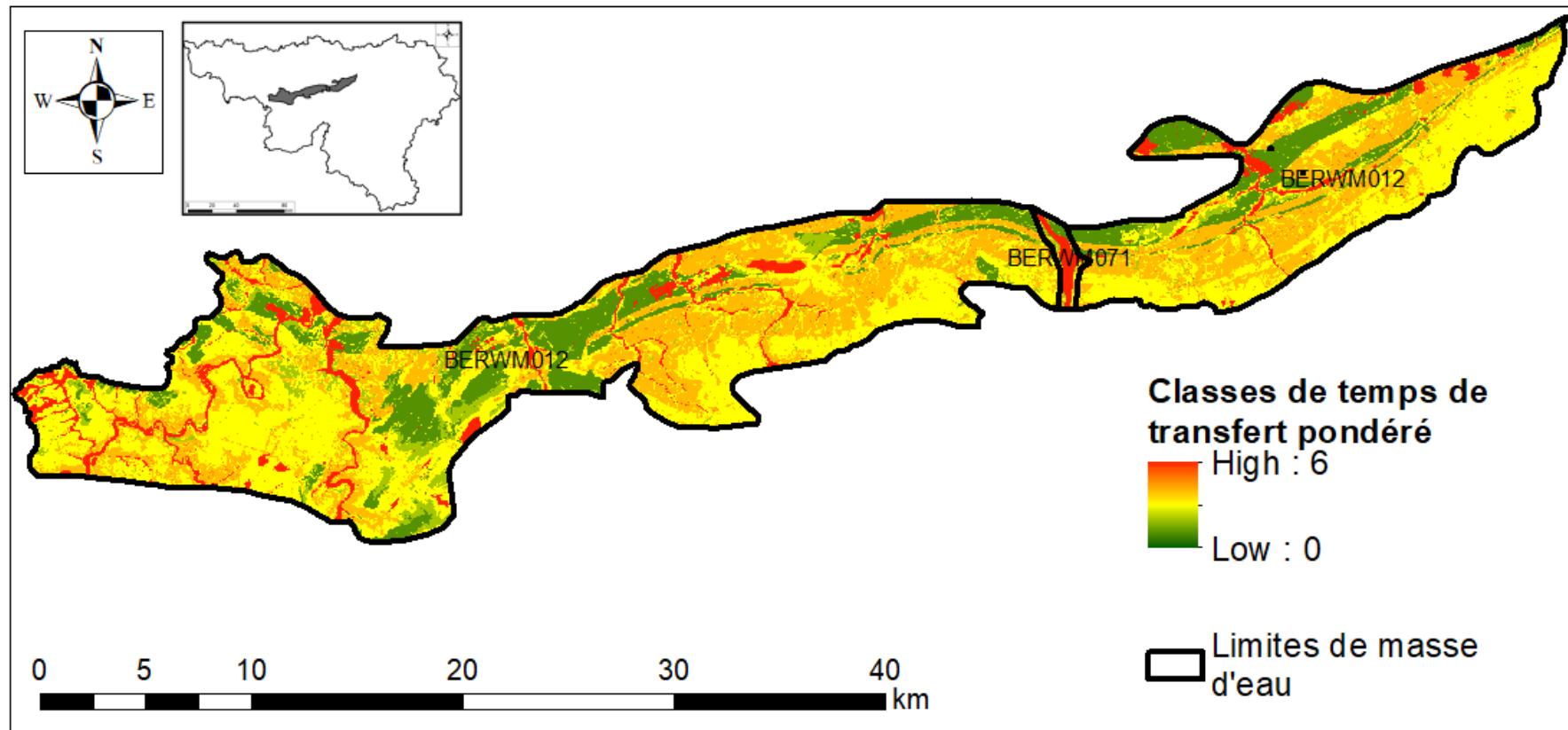


Figure 42 : Classe des temps de transfert pondérés de la masse d'eau BERWM012 et une partie de la masse d'eau BERWM071

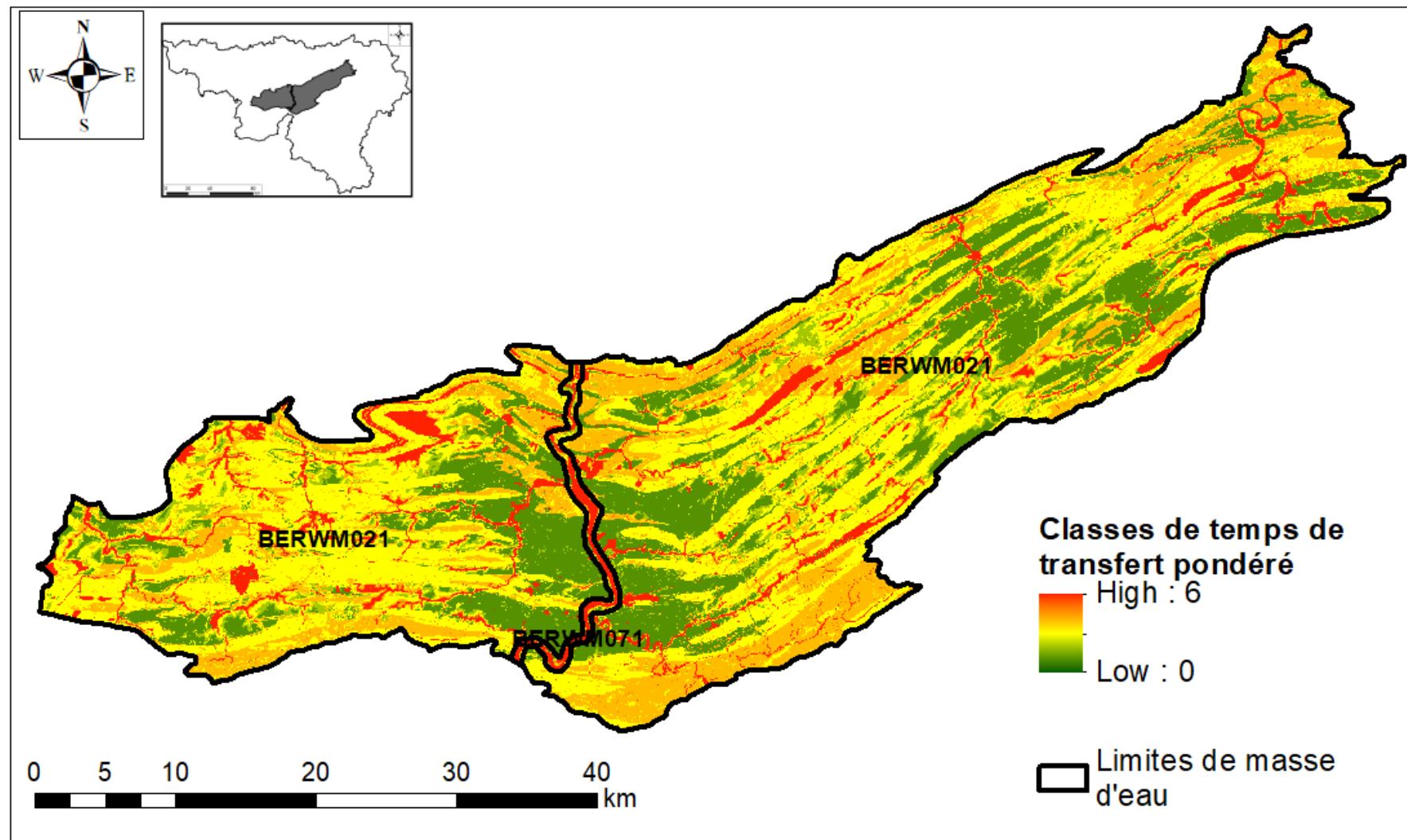


Figure 43 : Classe des temps de transfert pondérés de la masse d'eau BERWM021 et une partie de la masse d'eau BERWM071

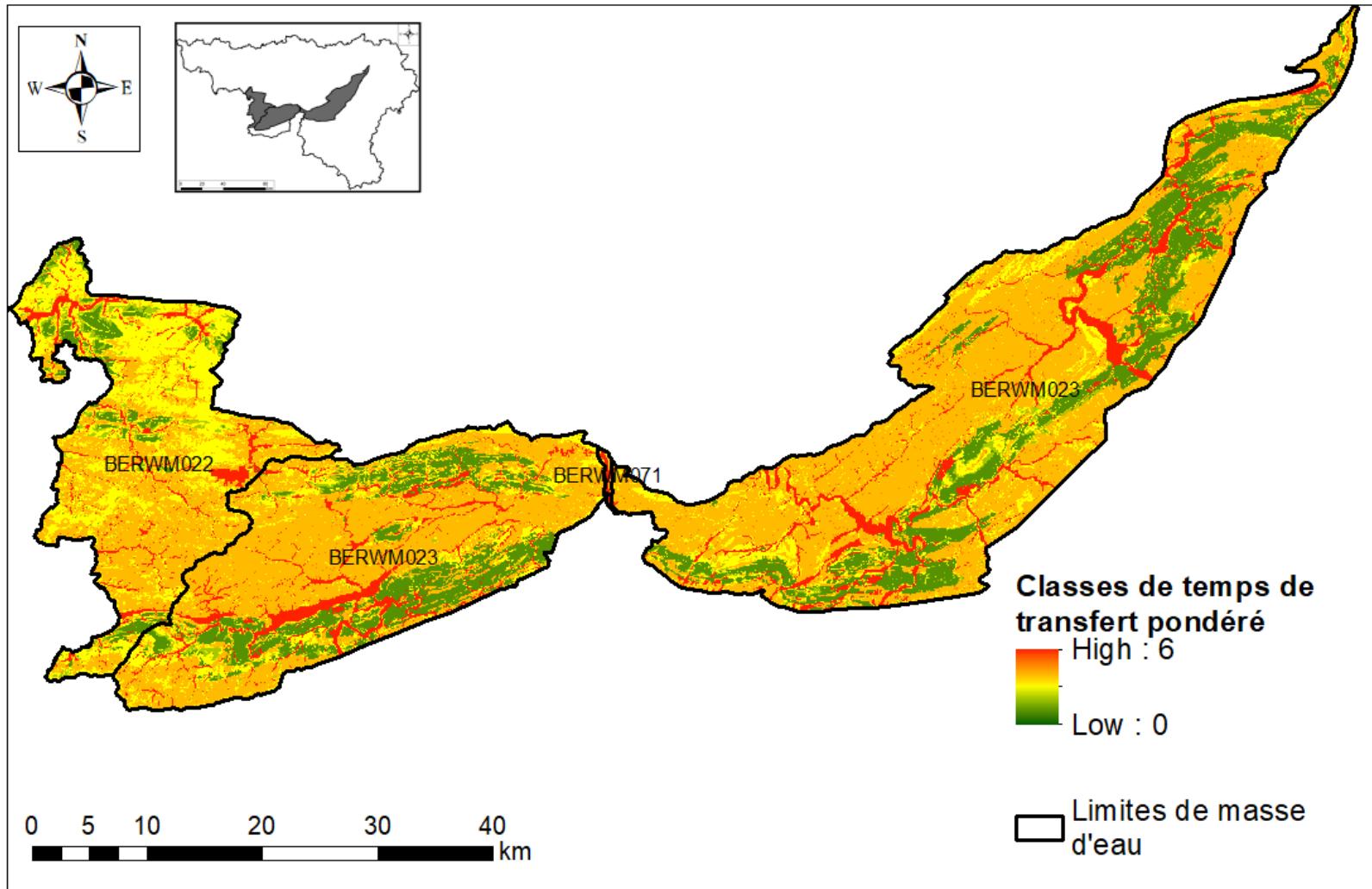


Figure 44 : Classe des temps de transfert pondérés des masses d'eau BERWM022 et BERWM023

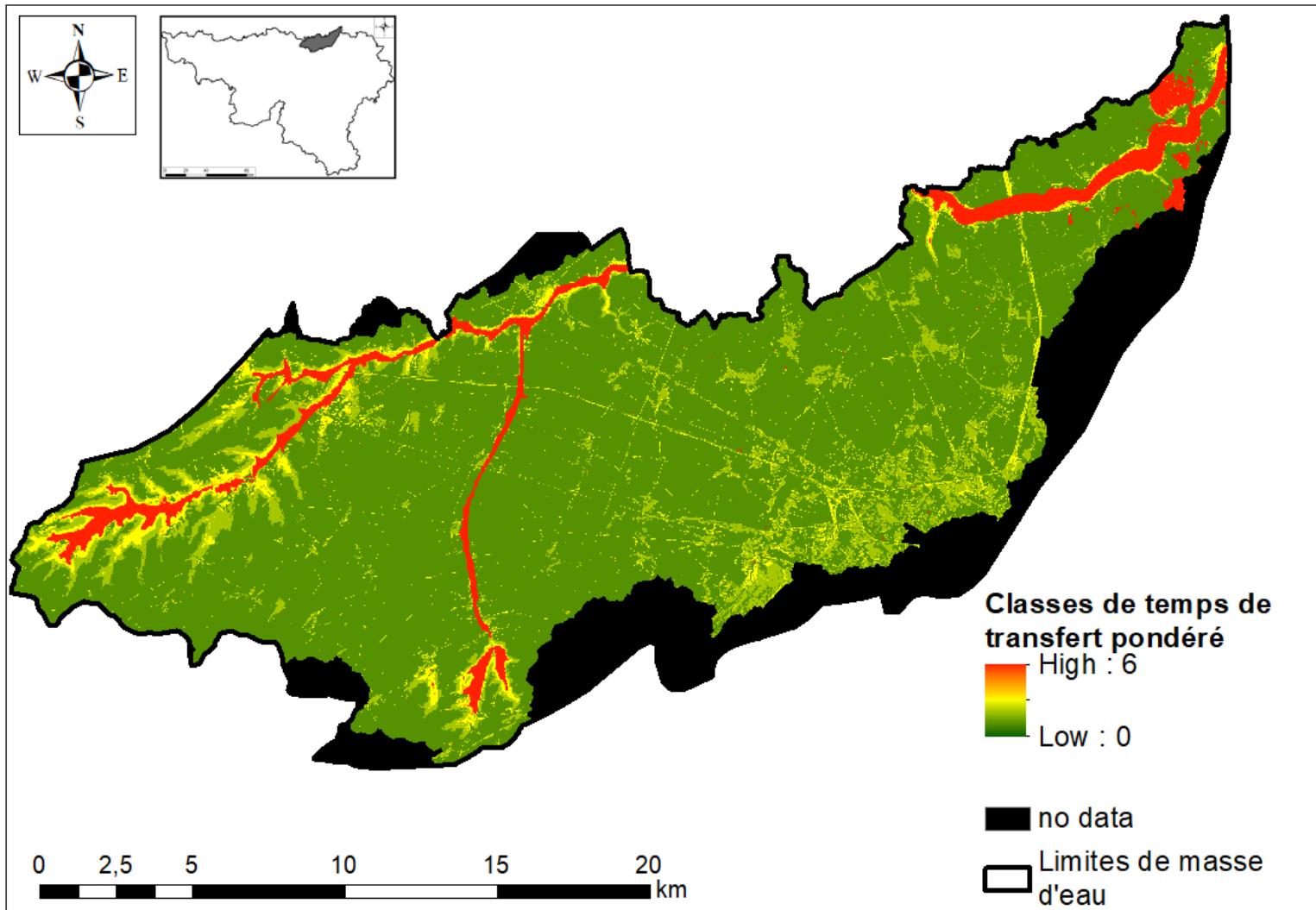


Figure 45 : Classe des temps de transfert pondérés de la masse d'eau BERWM040

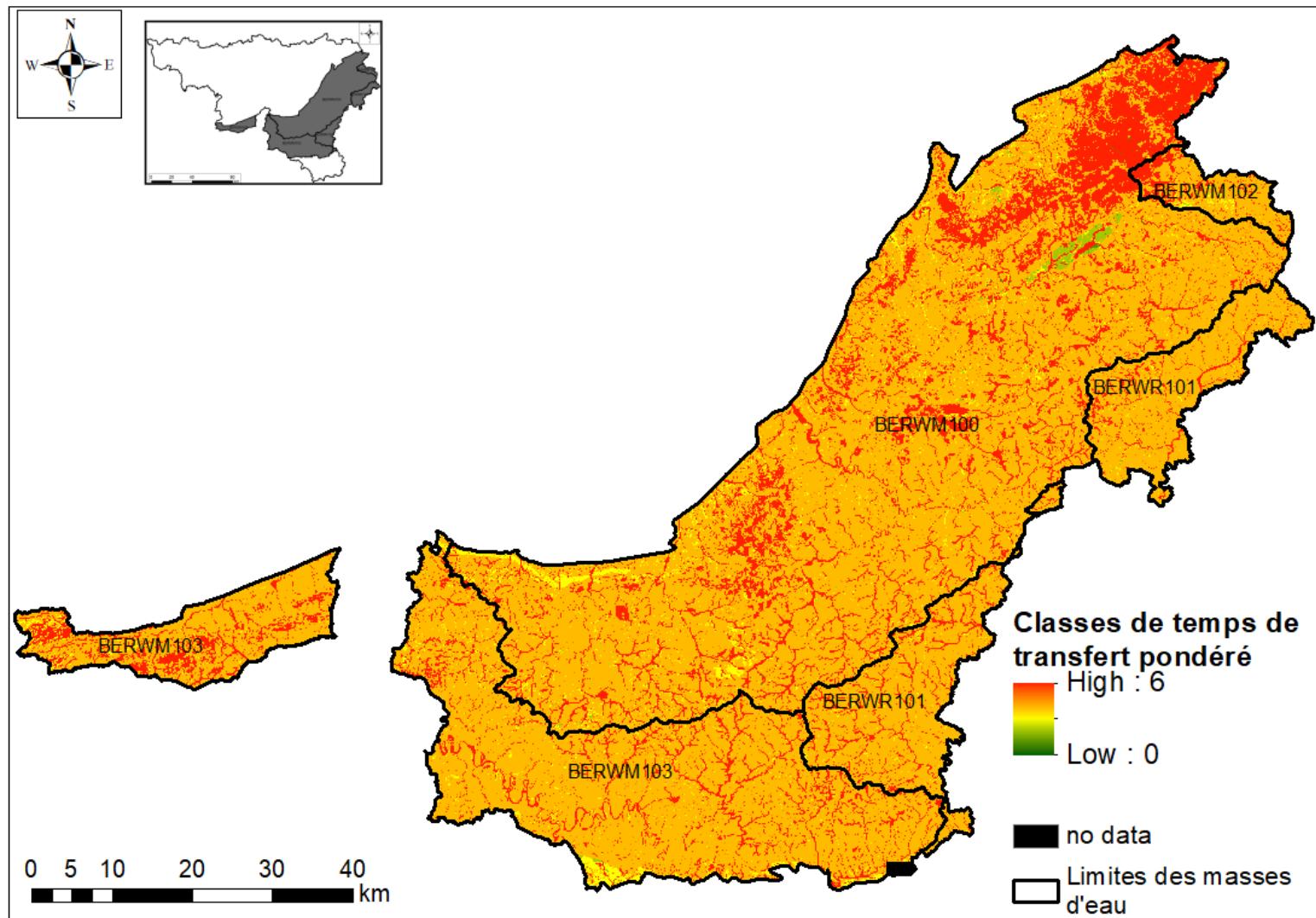


Figure 46 : Classe des temps de transfert pondérés des masses d'eau BERWM100, BERWM102, BERWM103, BERWR101

3.4 Production des cartes à l'échelle de la Région wallonne

Dans les fichiers qui ont été transmis au SPW, il y a un dossier intitulé BD_RESULT qui contient une géodatabase « INT.gdb » avec les résultats de la vulnérabilité intrinsèque (Figure 47). Il y a également un dossier des résultats de la vulnérabilité spécifique dont il sera question dans le prochain chapitre. Ces différentes cartes de cartes de dangerosité et de vulnérabilité à l'échelle de la Région wallonne sont présentées aux Figures 48 à 63. En plus de ces cartes, dans la géodatabase, il y a un raster nommé MASK. A l'exception des cartes de dangerosité qui couvrent l'entièreté de la Région wallonne, les cartes de vulnérabilité ne couvrent pas toutes les zones parce qu'il y a certaines zones pour lesquelles les couches sol/sous-sol n'ont pas pu être finalisées dans les délais de la convention (principalement suite à la mise à disposition différée de certaines cartes hydrogéologiques). Le raster MASK permet de couvrir ces zones où tous les rasters d'entrée ne sont pas terminés afin qu'elles n'apparaissent pas en rouge sur les cartes de vulnérabilité et être alors prises pour des zones très vulnérables.

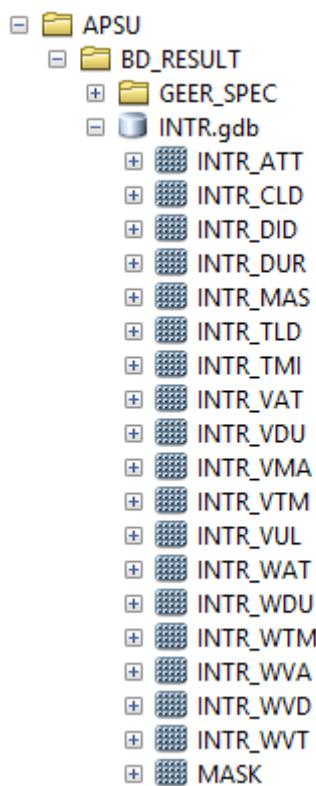


Figure 47 : Structure de la géodatabase des résultats de la vulnérabilité intrinsèque

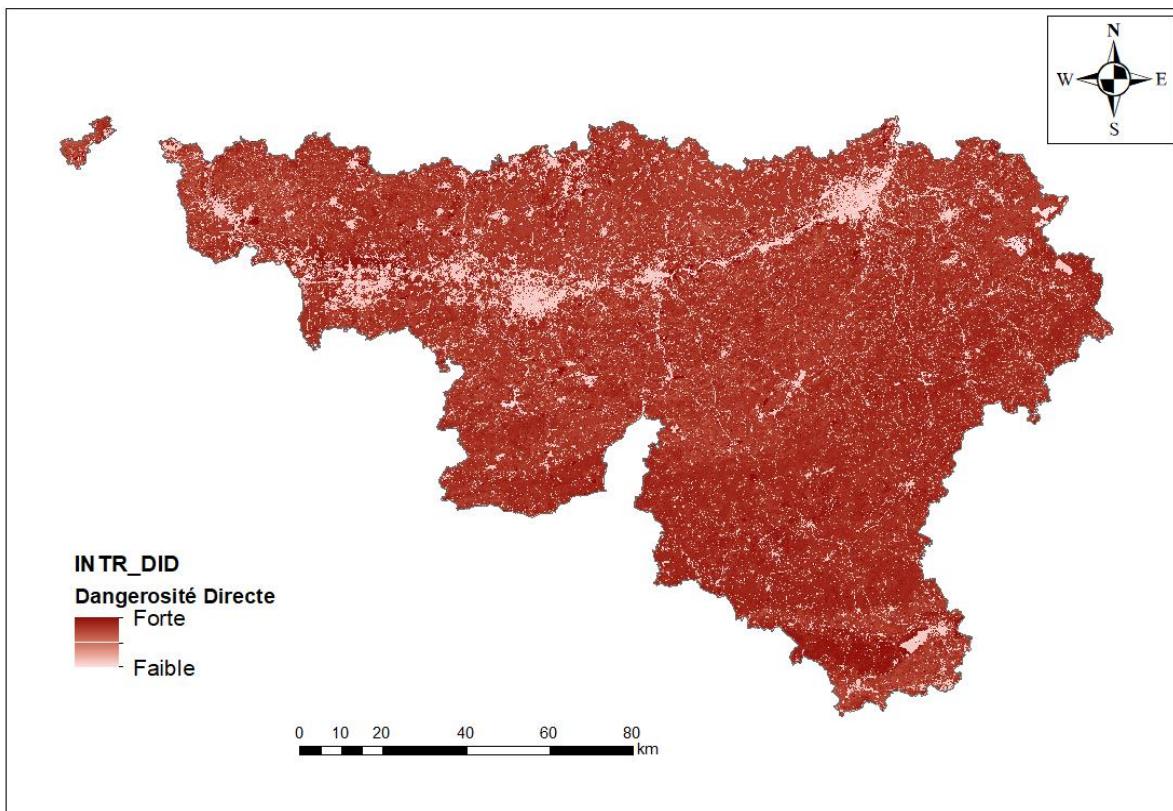


Figure 48 : Dangerosité directe

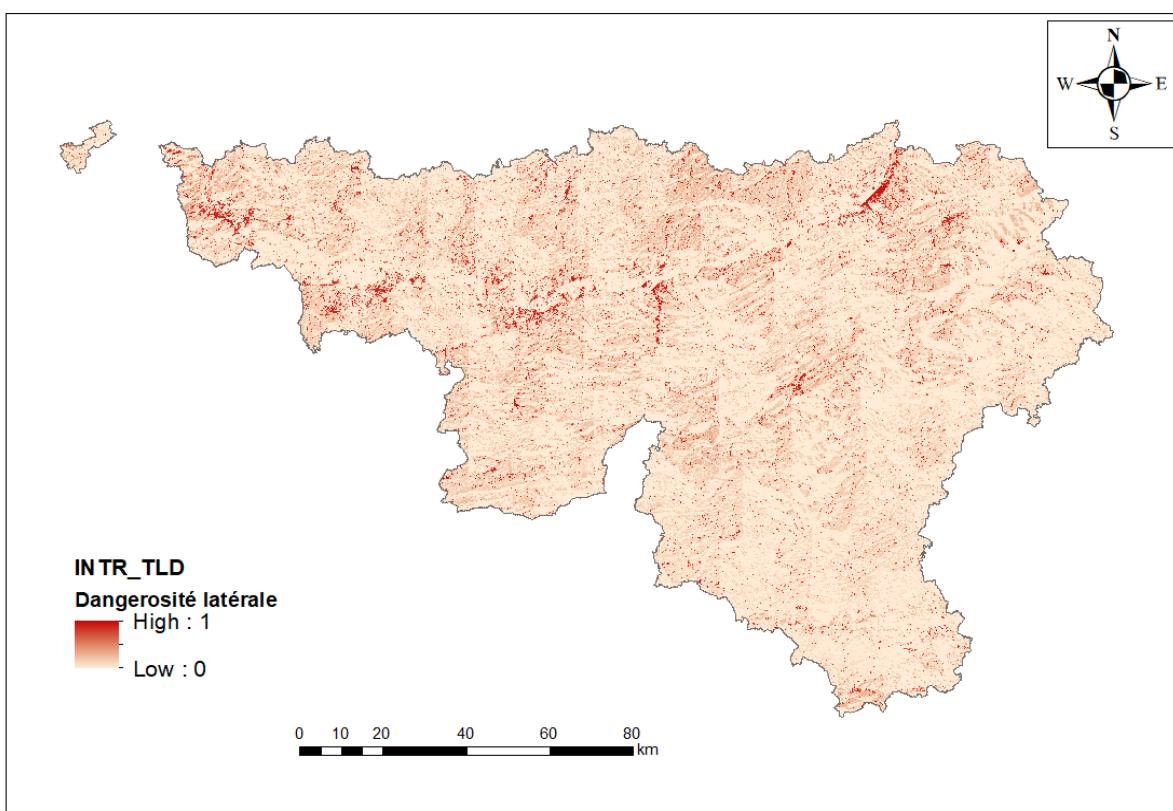


Figure 49 : Dangerosité latérale

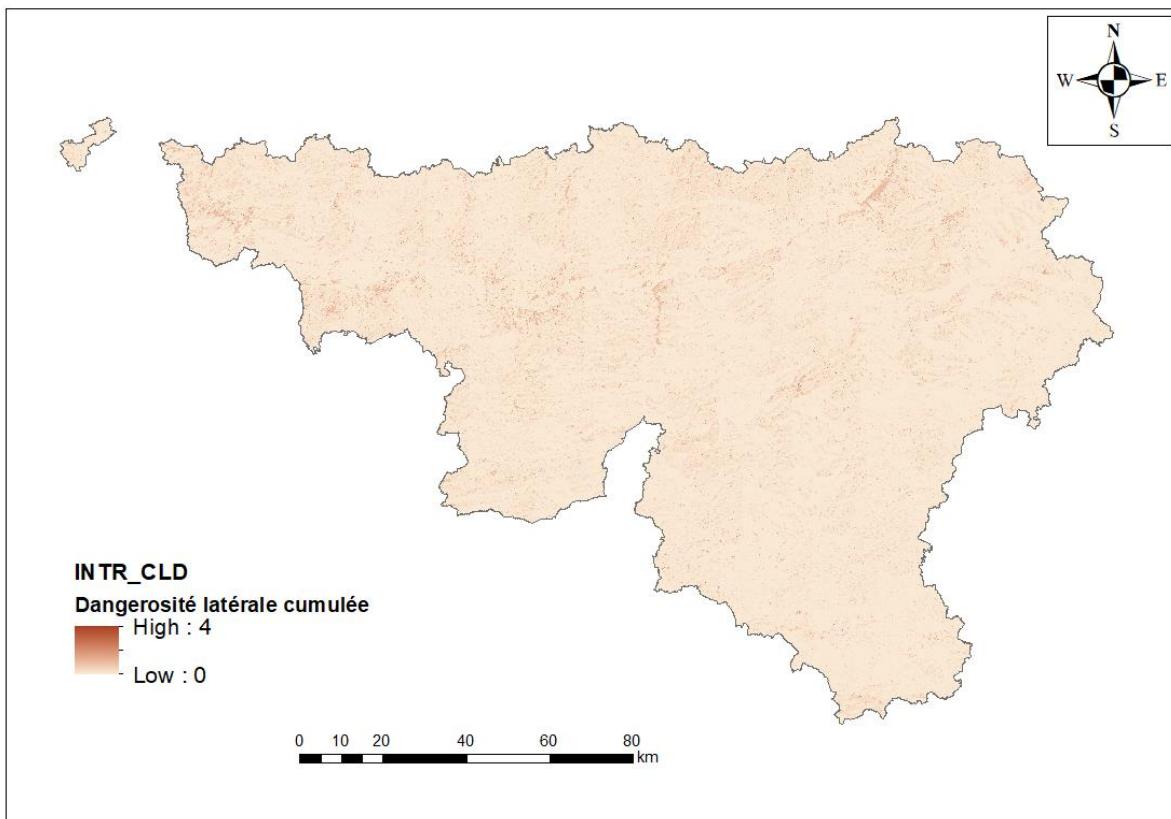


Figure 50 : Dangerosité latérale cumulée

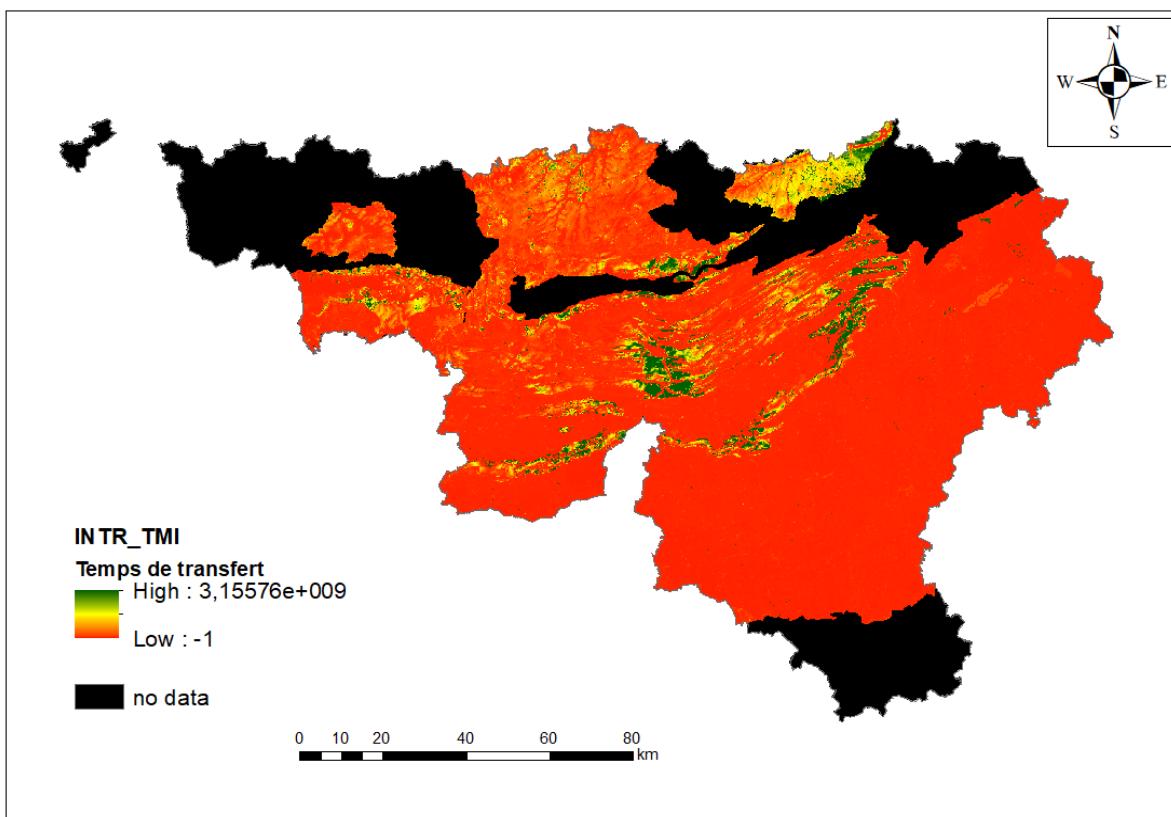


Figure 51 : Temps de transfert

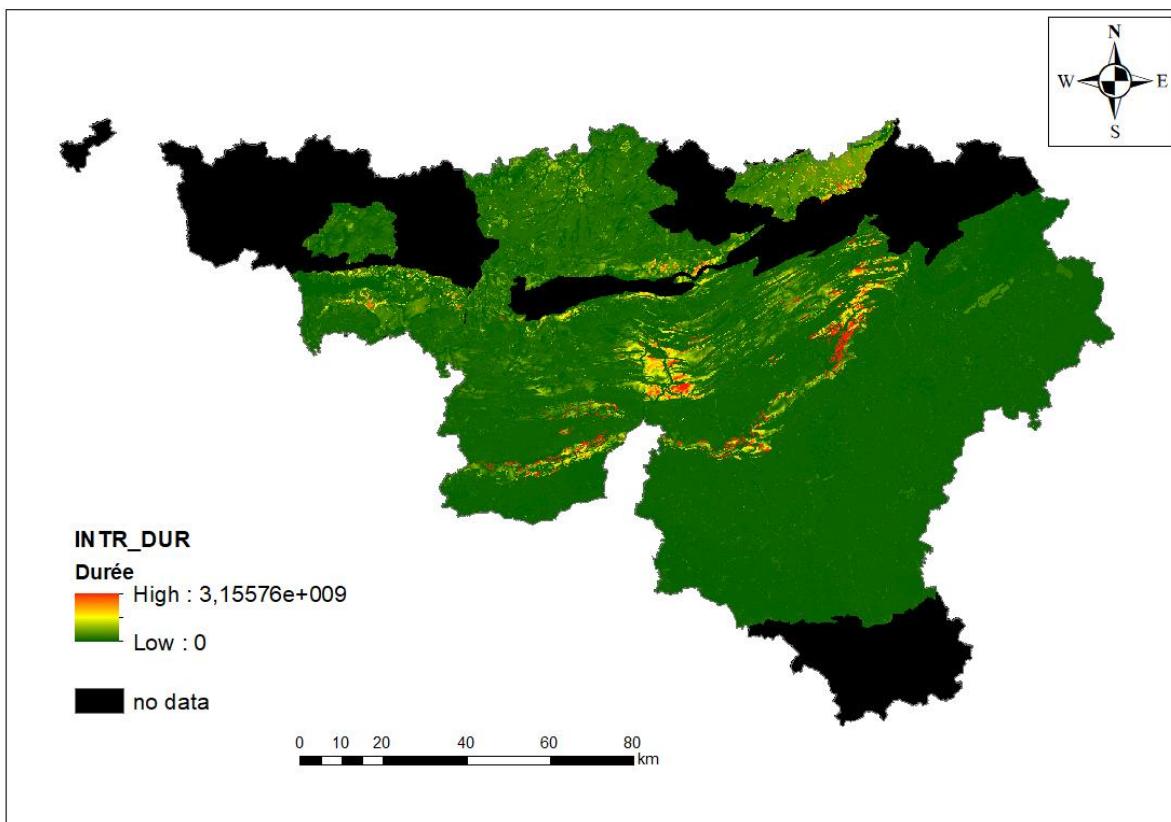


Figure 52 : Durées de pollution

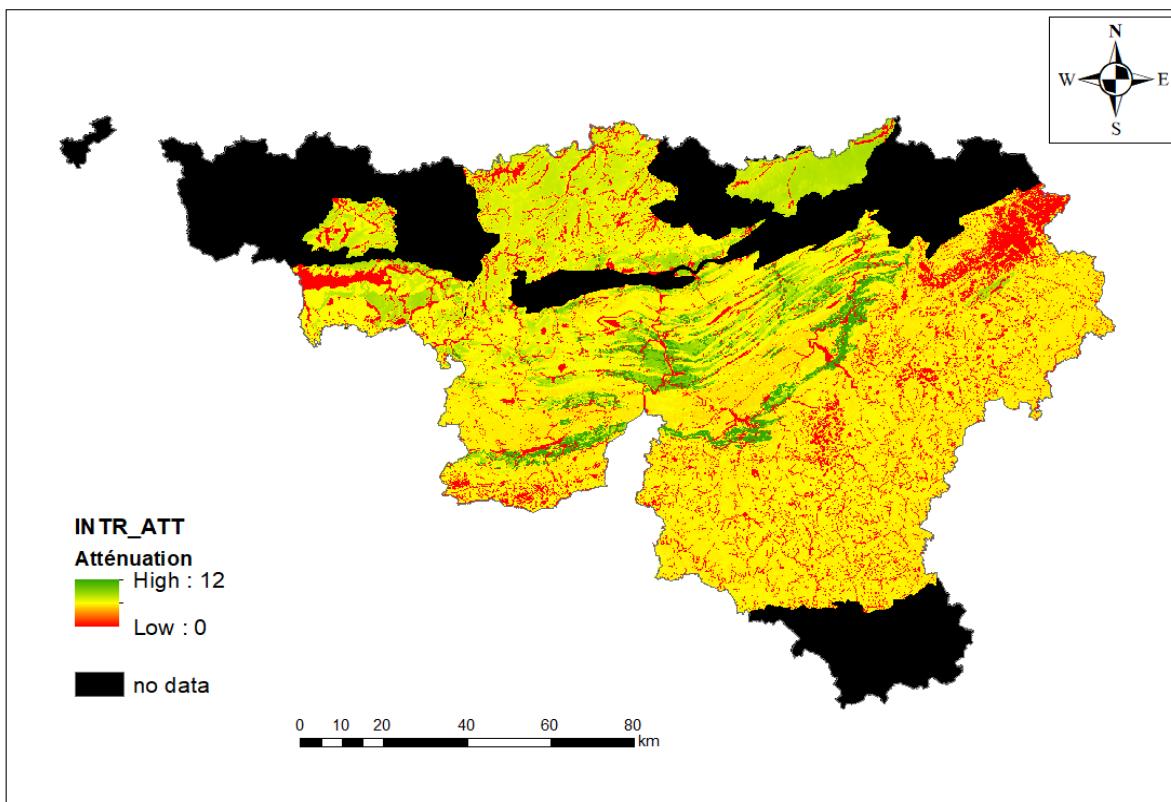


Figure 53 : Coefficients d'atténuation

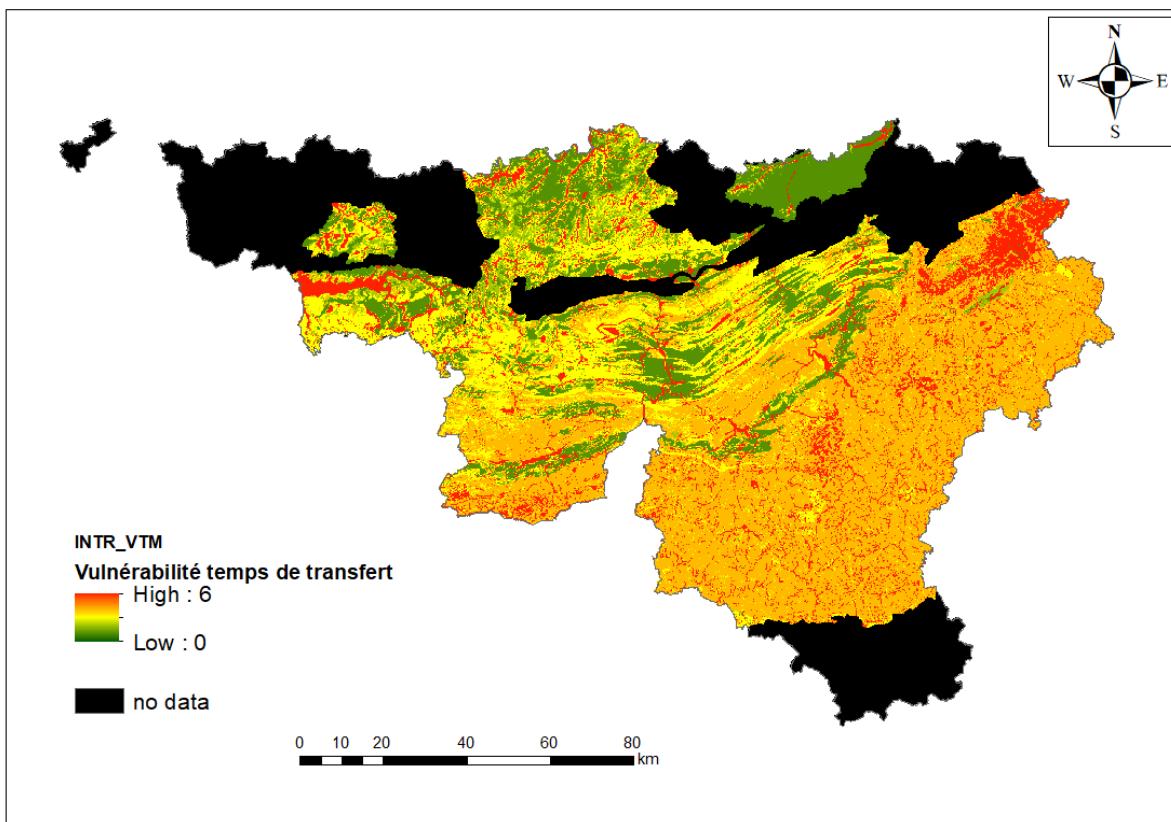


Figure 54 : Classes de Temps de transfert

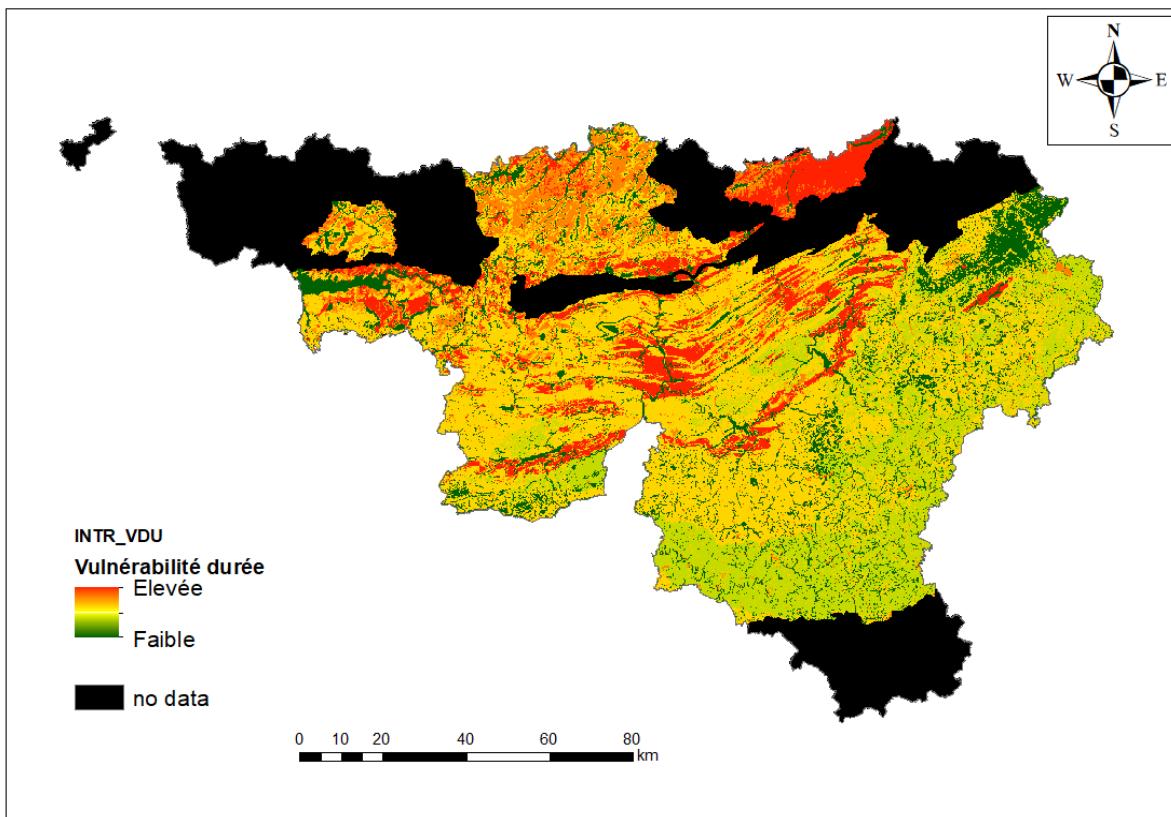


Figure 55 : Classes de Durée de pollution

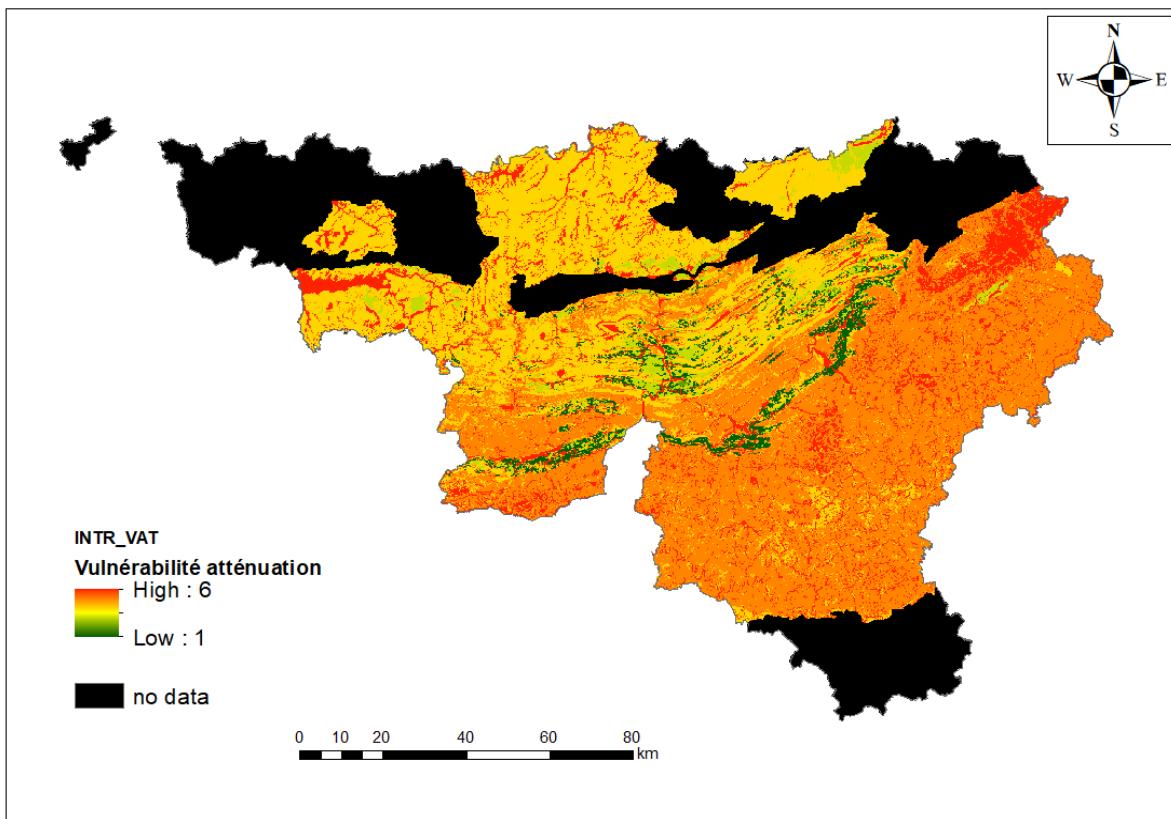


Figure 56: Classes de Coefficients d'atténuation

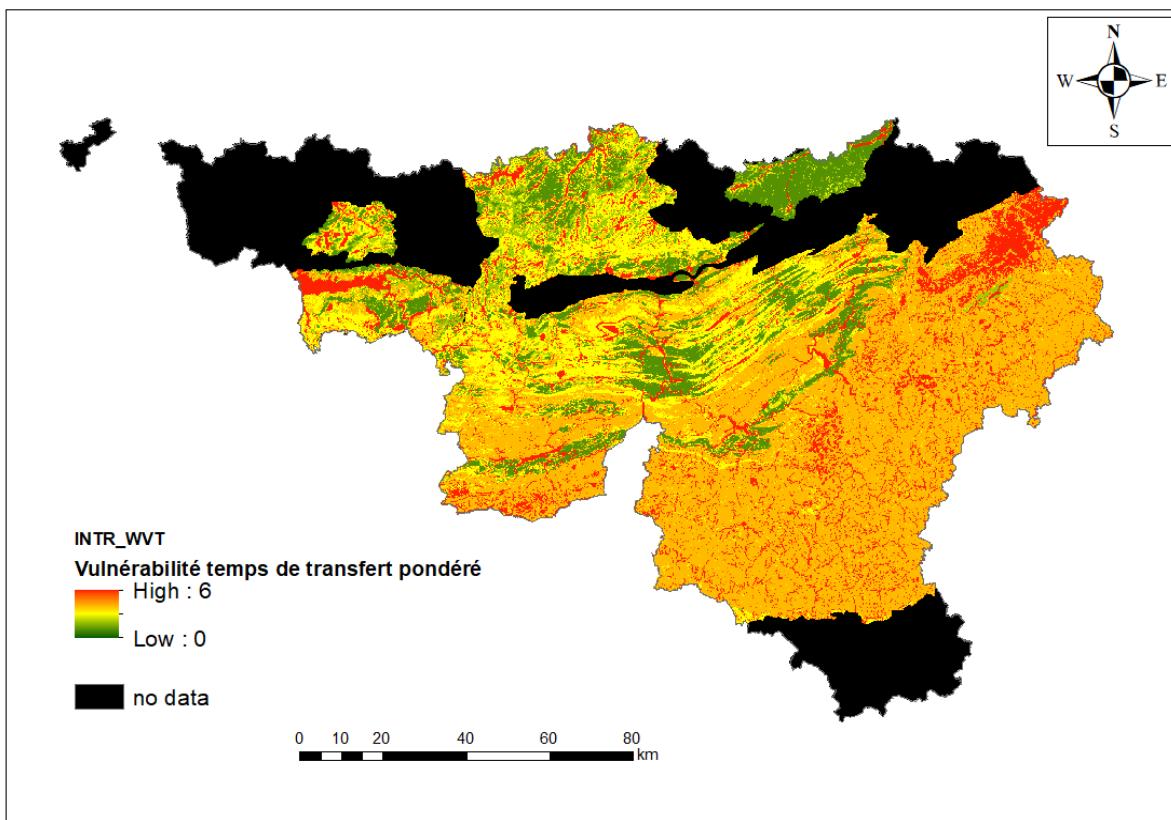


Figure 57: Temps de transfert pondérés

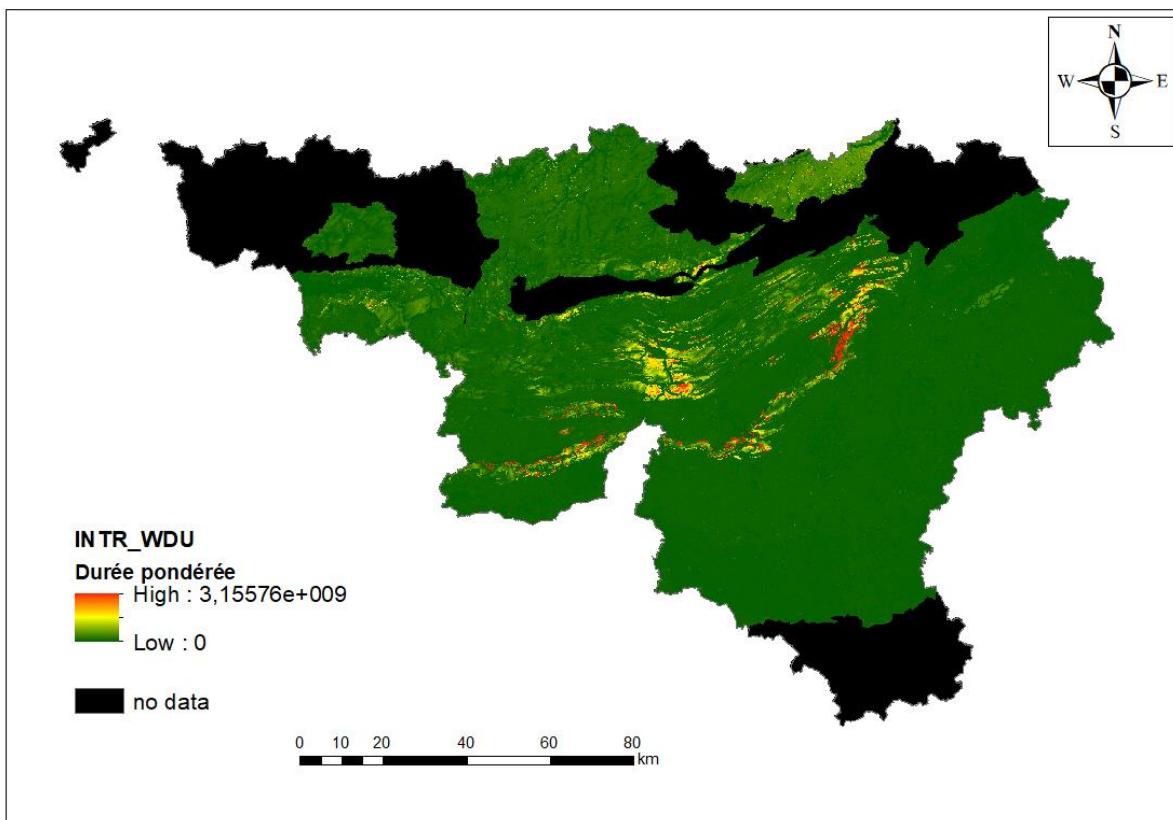


Figure 58: Durées de pollution pondérées

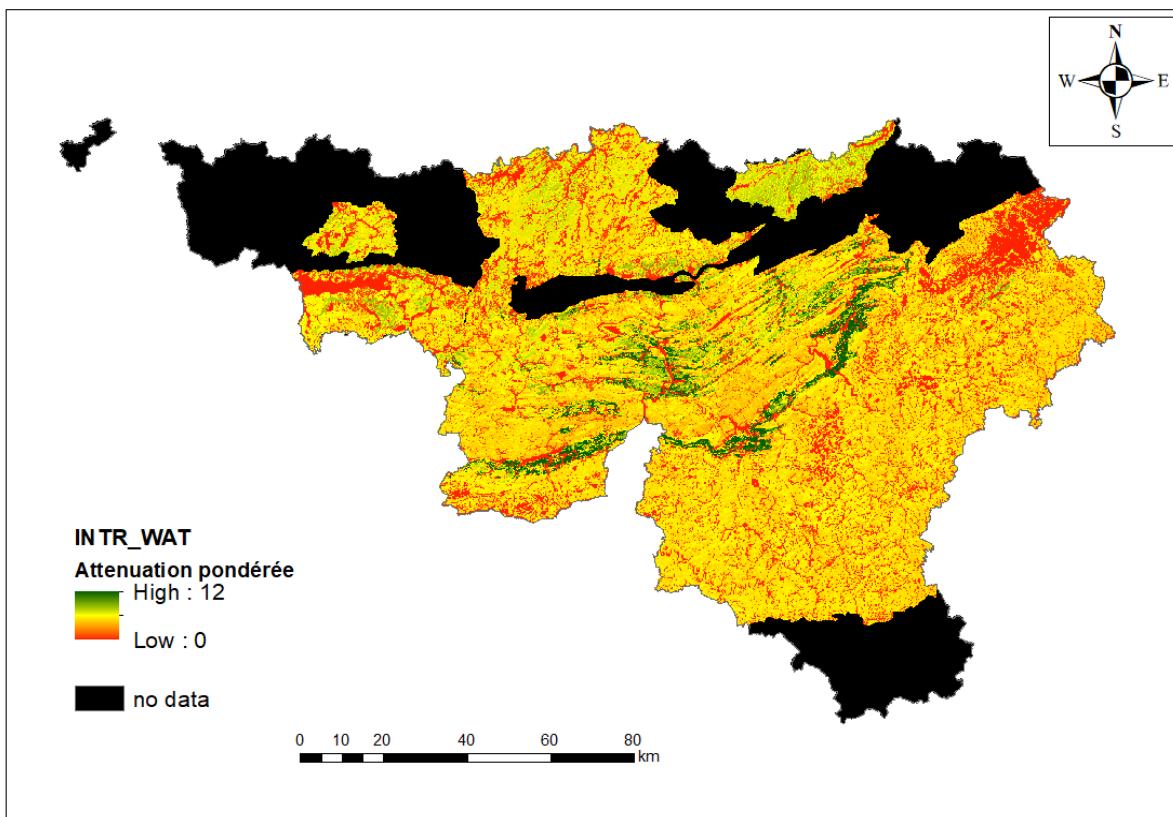


Figure 59: Coefficients d'atténuation pondérés

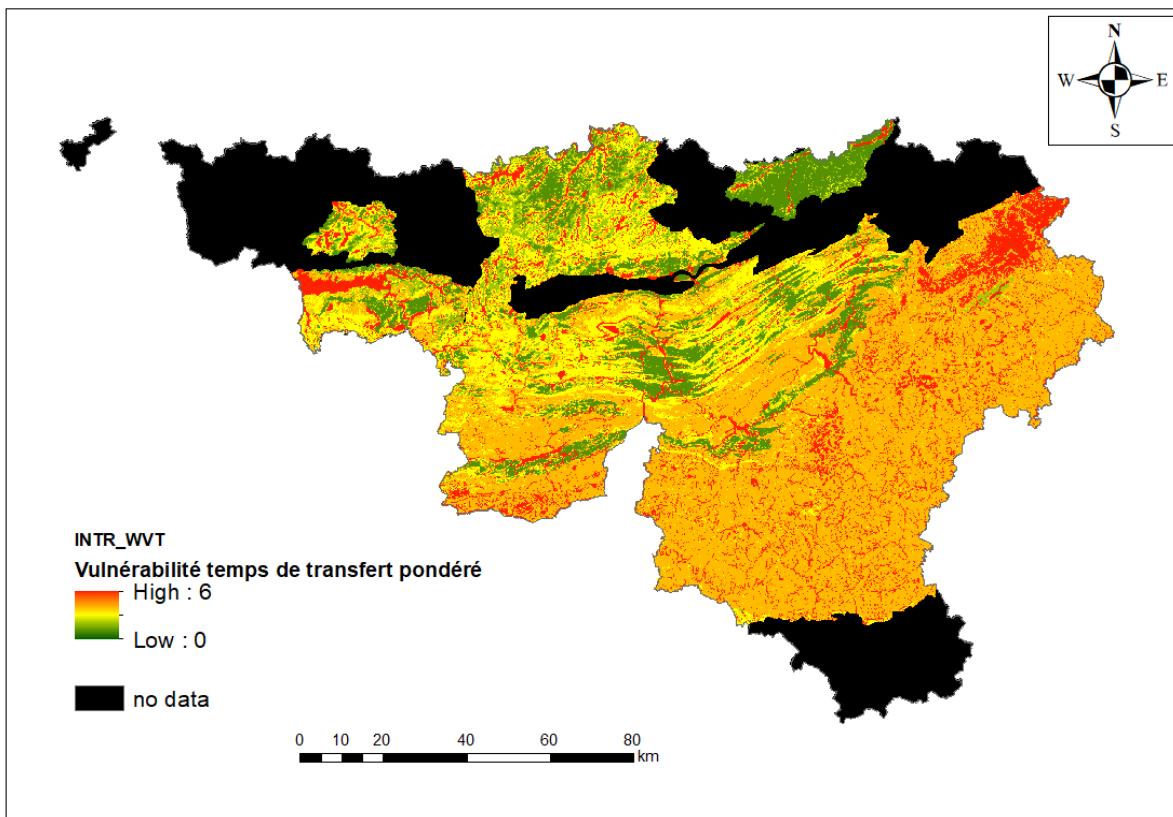


Figure 60: Classes de Temps de transfert pondérés

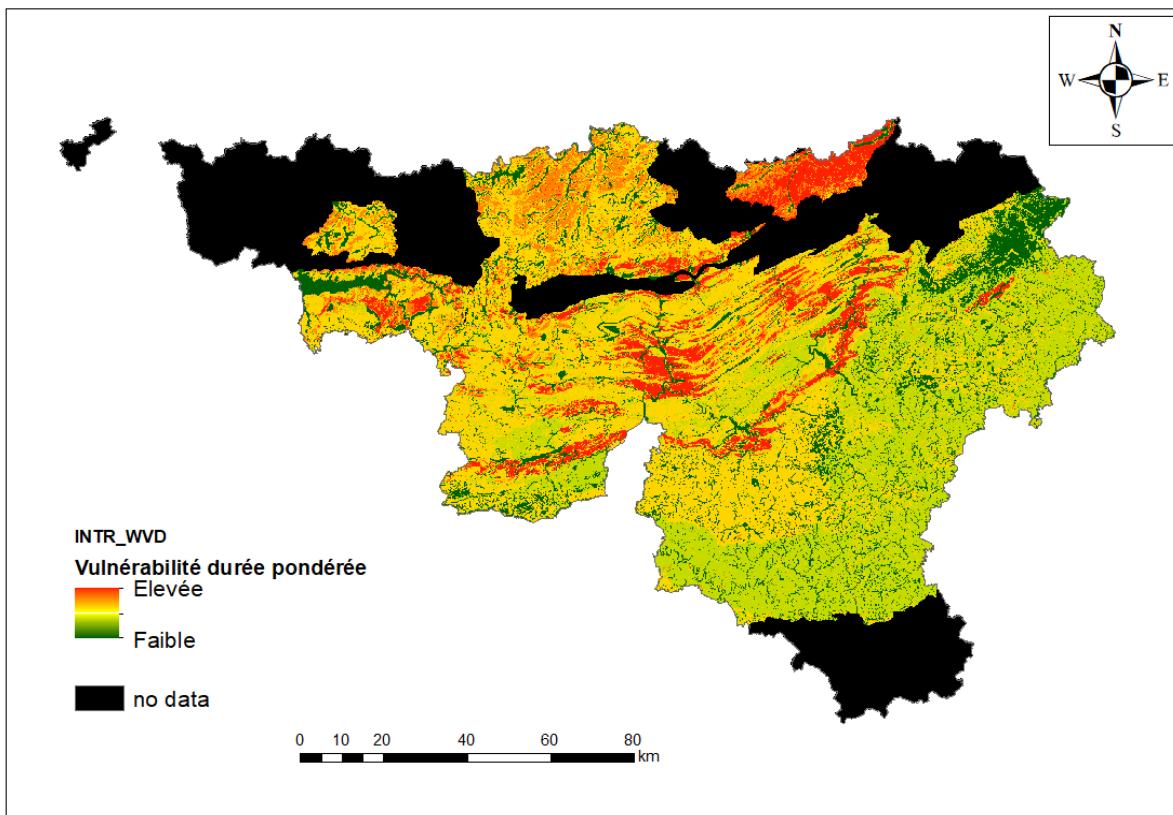


Figure 61: Classes de durées de pollution pondérées

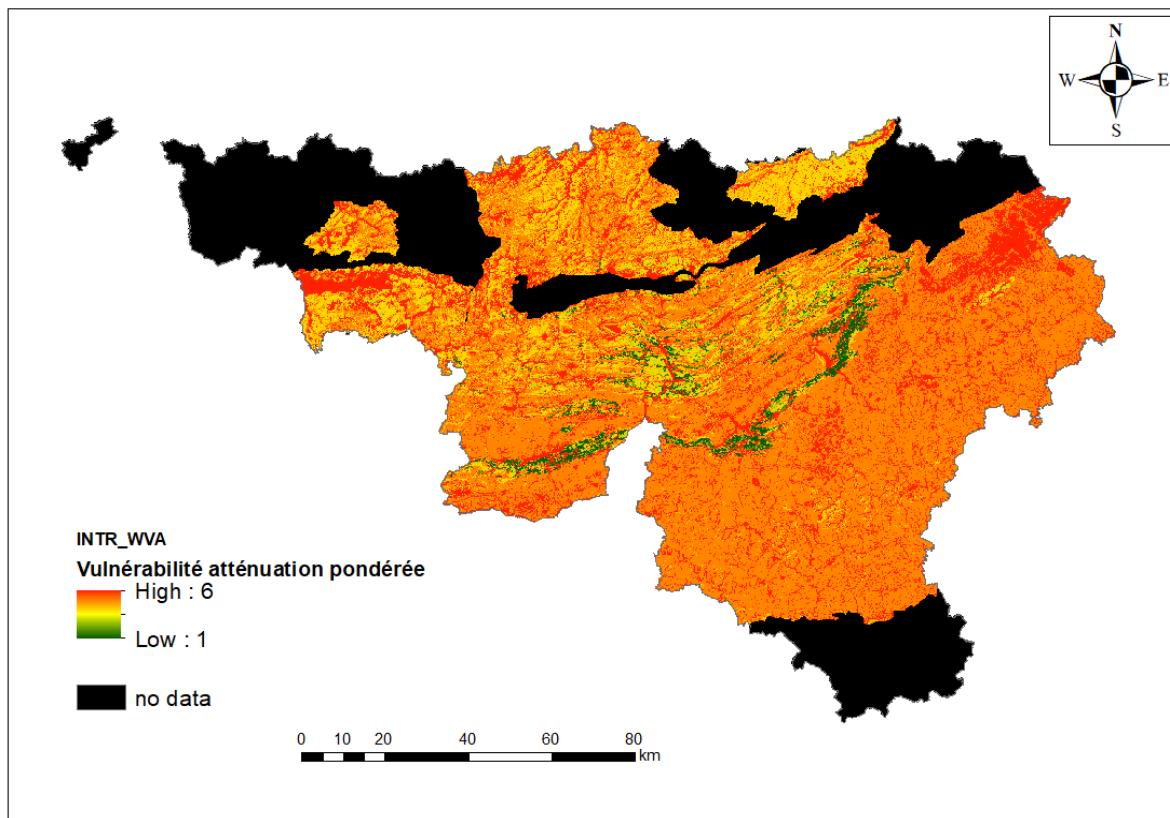


Figure 62: Classes de coefficients d'atténuation pondérés

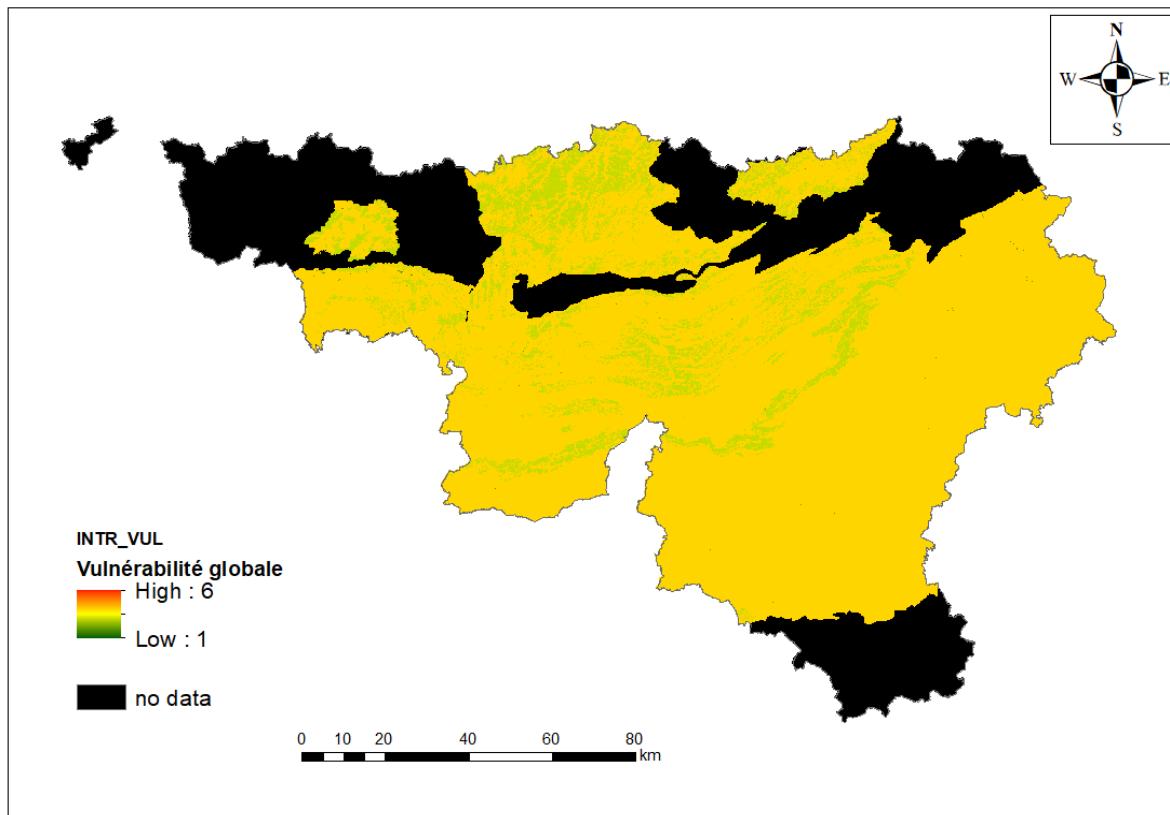


Figure 63: Classes de vulnérabilité globale

4. Vulnérabilité spécifique

4.1. Hypothèses prises et données nécessaires

Pour illustrer la vulnérabilité spécifique, l'étude s'est focalisée sur le bassin du Geer. Il a été choisi parce qu'il est très bien étudié et l'épaisseur de limon est connue. De plus, ce bassin est impacté par des activités variées avec plusieurs types de polluants potentiels.

Dans la géodatabase APSUGIS, une table n'a pas été décrite dans le chapitre 2. Il s'agit de la table POLL_PROP. Elle contient les coefficients de dégradation et de retard pour 13 polluants pour chaque type de sol (Tableau 17). Parmi les 13 polluants, il y a quelques pesticides de la BD-polluants créée par l'équipe de Gembloux : l'atrazine, le bentazone, la simazine, le diuron et le glyphosate. Cette base de BD-polluants reprend les données de la PPBD (Pesticides Properties DataBase) de l'Université de Hertfordshire. D'autres polluants ont également été sélectionnés pour tester d'autres familles de polluants. Il s'agit du benzène (BTEX), benzo(a)pyrène (HAP), naphtalène (HAP), trichlorobenzène (solvant chloré), trichloréthylène (trichlorobenzène (solvant chloré), 1,2-dichloroéthane trichlorobenzène (solvant chloré), EC10-EC12 (huiles minérales), EC16-EC21 (huiles minérales). Des valeurs de DT50 et de Koc ont été trouvées dans la littérature et une valeur moyenne de FOC a été estimée d'après les résultats du projet Carbiosol (Chartin, et al, 2016) qui établit une cartographie des teneurs en carbone organique total des sols pour l'ensemble des zones agricoles en Wallonie pour la période allant de 2004 à 2014.

Pour calculer le coefficient de retard et le coefficient de dégradation à partir des données de DT50 et de Koc, les équations suivantes (Dassargues, 2018) ont été utilisées :

$$R = 1 + \frac{\rho_b K_d}{\theta} \quad \text{Équation 1}$$

R , le coefficient de retard

θ , la teneur en eau [L^3L^{-3}]

ρ_b , la densité apparente du milieu poreux [ML^{-3}]

K_d , la constante de distribution empirique entre la phase liquide et la phase solide

$$K_d = K_{oc} * foc \quad \text{Équation 2}$$

K_{oc} , constante d'affinité pour la matrice organique du sol

f , teneur en carbone organique dans le sol [MM^{-1}]

$$\mu = \frac{\ln 2}{DT_{50}} \quad \text{Équation 3}$$

μ , le coefficient de dégradation de premier ordre [T^{-1}]

DT_{50} , le temps de demi-vie

Actuellement la table POLL_PROP est adaptée au bassin du Geer avec la densité apparente estimée à 1,45 (Montgomery, 2007) et la teneur en carbone fixée à 15 gC/Kg (valeur moyenne pour le bassin du Geer). Il est également considéré que les processus de sorption et de dégradation ont lieu uniquement dans la première couche de sol et non pas dans toute l'épaisseur de limon.

Pour pouvoir compléter le tableau pour d'autres zones d'étude il suffit de recalculer le coefficient de retard en adaptant les valeurs de densité apparente et de teneur en carbone des sols de la zone étudiée.

LITHO_ID	LITHO_NAME	POLL_ID	POLL_NAME	DEGRAD (s^{-1})	RETARD
12	Sols limoneux à drainage naturel favorable	1	Atrazine	5.35×10^{-8}	6.44
13	Sols limono-caillouteux à charge de silexite ou de gravier ou de conglomérat et à drainage naturel principalement favorable	1	Atrazine	5.35×10^{-8}	7.21
14	Sols limoneux à drainage naturel modéré ou imparfait	1	Atrazine	5.35×10^{-8}	6.44
15	Regroupement de complexes de sols de textures différentes ou sur fortes pentes et de sols de fonds de vallons limoneux ou rocaillieux	1	Atrazine	5.35×10^{-8}	7.21
16	Sols artificiels ou non cartographiés	1	Atrazine	5.35×10^{-8}	7.21
23	Sols sableux ou limono-sableux à drainage naturel excessif ou légèrement excessif	1	Atrazine	5.35×10^{-8}	7.21
24	Sols limoneux à drainage naturel assez pauvre à très pauvre	1	Atrazine	5.35×10^{-8}	6.44
25	Sols limoneux peu caillouteux à drainage naturel favorable	1	Atrazine	5.35×10^{-8}	7.21
12	Sols limoneux à drainage naturel favorable	2	Bentazone	2.29×10^{-7}	4.01
13	Sols limono-caillouteux à charge de silexite ou de gravier ou de conglomérat et à drainage naturel principalement favorable	2	Bentazone	2.29×10^{-7}	4.44
14	Sols limoneux à drainage naturel modéré ou imparfait	2	Bentazone	2.29×10^{-7}	4.01
15	Regroupement de complexes de sols de textures différentes ou sur fortes pentes et de sols de fonds de vallons limoneux ou rocaillieux	2	Bentazone	2.29×10^{-7}	4.44
16	Sols artificiels ou non cartographiés	2	Bentazone	2.29×10^{-7}	4.44
23	Sols sableux ou limono-sableux à drainage naturel excessif ou légèrement excessif	2	Bentazone	2.29×10^{-7}	4.44
24	Sols limoneux à drainage naturel assez pauvre à très pauvre	2	Bentazone	2.29×10^{-7}	4.01
25	Sols limoneux peu caillouteux à drainage naturel favorable	2	Bentazone	2.29×10^{-7}	4.44
12	Sols limoneux à drainage naturel favorable	3	Diuron	3.47×10^{-8}	45.21
13	Sols limono-caillouteux à charge de silexite ou de gravier ou de conglomérat et à drainage naturel principalement favorable	3	Diuron	3.47×10^{-8}	51.52
14	Sols limoneux à drainage naturel modéré ou imparfait	3	Diuron	3.47×10^{-8}	45.21

15	Regroupement de complexes de sols de textures différentes ou sur fortes pentes et de sols de fonds de vallons limoneux ou rocheux	3	Diuron	3.4710-8	51.52
16	Sols artificiels ou non cartographiés	3	Diuron	3.4710-8	51.52
23	Sols sableux ou limono-sableux à drainage naturel excessif ou légèrement excessif	3	Diuron	3.4710-8	51.52
24	Sols limoneux à drainage naturel assez pauvre à très pauvre	3	Diuron	3.4710-8	45.21
25	Sols limoneux peu caillouteux à drainage naturel favorable	3	Diuron	3.4710-8	51.52
12	Sols limoneux à drainage naturel favorable	4	Simazine	7.8710-8	8.07
13	Sols limono-caillouteux à charge de silexite ou de gravier ou de conglomérat et à drainage naturel principalement favorable	4	Simazine	7.8710-8	9.08
14	Sols limoneux à drainage naturel modéré ou imparfait	4	Simazine	7.8710-8	8.07
15	Regroupement de complexes de sols de textures différentes ou sur fortes pentes et de sols de fonds de vallons limoneux ou rocheux	4	Simazine	7.8710-8	9.08
16	Sols artificiels ou non cartographiés	4	Simazine	7.8710-8	9.08
23	Sols sableux ou limono-sableux à drainage naturel excessif ou légèrement excessif	4	Simazine	7.8710-8	9.08
24	Sols limoneux à drainage naturel assez pauvre à très pauvre	4	Simazine	7.8710-8	8.07
25	Sols limoneux peu caillouteux à drainage naturel favorable	4	Simazine	7.8710-8	9.08
12	Sols limoneux à drainage naturel favorable	5	Glyphosate	1.96*10-7	45.26
13	Sols limono-caillouteux à charge de silexite ou de gravier ou de conglomérat et à drainage naturel principalement favorable	5	Glyphosate	1.96*10-7	51.58
14	Sols limoneux à drainage naturel modéré ou imparfait	5	Glyphosate	1.96*10-7	45.26
15	Regroupement de complexes de sols de textures différentes ou sur fortes pentes et de sols de fonds de vallons limoneux ou rocheux	5	Glyphosate	1.96*10-7	51.58
16	Sols artificiels ou non cartographiés	5	Glyphosate	1.96*10-7	51.58
23	Sols sableux ou limono-sableux à drainage naturel excessif ou légèrement excessif	5	Glyphosate	1.96*10-7	51.58
24	Sols limoneux à drainage naturel assez pauvre à très pauvre	5	Glyphosate	1.96*10-7	45.26
25	Sols limoneux peu caillouteux à drainage naturel favorable	5	Glyphosate	1.96*10-7	51.58
12	Sols limoneux à drainage naturel favorable	6	Benzène	2.87*10-7	4.59
13	Sols limono-caillouteux à charge de silexite ou de gravier ou de conglomérat et à drainage naturel principalement favorable	6	Benzène	2.87*10-7	5.10
14	Sols limoneux à drainage naturel modéré ou imparfait	6	Benzène	2.87*10-7	4.59
15	Regroupement de complexes de sols de textures différentes ou sur fortes pentes et de sols de fonds de vallons limoneux ou rocheux	6	Benzène	2.87*10-7	5.10

16	Sols artificiels ou non cartographiés	6	Benzène	2.87*10-7	5.10
23	Sols sableux ou limono-sableux à drainage naturel excessif ou légèrement excessif	6	Benzène	2.87*10-7	5.10
24	Sols limoneux à drainage naturel assez pauvre à très pauvre	6	Benzène	2.87*10-7	4.59
25	Sols limoneux peu caillouteux à drainage naturel favorable	6	Benzène	2.87*10-7	5.10
12	Sols limoneux à drainage naturel favorable	7	Benzoapyrène	2.6010-8	54376.00
13	Sols limono-caillouteux à charge de silexite ou de gravier ou de conglomérat et à drainage naturel principalement favorable	7	Benzoapyrène	2.6010-8	62143.86
14	Sols limoneux à drainage naturel modéré ou imparfait	7	Benzoapyrène	2.6010-8	54376.00
15	Regroupement de complexes de sols de textures différentes ou sur fortes pentes et de sols de fonds de vallons limoneux ou rocailleux	7	Benzoapyrène	2.6010-8	62143.86
16	Sols artificiels ou non cartographiés	7	Benzoapyrène	2.6010-8	62143.86
23	Sols sableux ou limono-sableux à drainage naturel excessif ou légèrement excessif	7	Benzoapyrène	2.6010-8	62143.86
24	Sols limoneux à drainage naturel assez pauvre à très pauvre	7	Benzoapyrène	2.6010-8	54376.00
25	Sols limoneux peu caillouteux à drainage naturel favorable	7	Benzoapyrène	2.6010-8	62143.86
12	Sols limoneux à drainage naturel favorable	8	Naphtalène	4.4610-8	82.56
13	Sols limono-caillouteux à charge de silexite ou de gravier ou de conglomérat et à drainage naturel principalement favorable	8	Naphtalène	4.4610-8	94.21
14	Sols limoneux à drainage naturel modéré ou imparfait	8	Naphtalène	4.4610-8	82.56
15	Regroupement de complexes de sols de textures différentes ou sur fortes pentes et de sols de fonds de vallons limoneux ou rocailleux	8	Naphtalène	4.4610-8	94.21
16	Sols artificiels ou non cartographiés	8	Naphtalène	4.4610-8	94.21
23	Sols sableux ou limono-sableux à drainage naturel excessif ou légèrement excessif	8	Naphtalène	4.4610-8	94.21
24	Sols limoneux à drainage naturel assez pauvre à très pauvre	8	Naphtalène	4.4610-8	82.56
25	Sols limoneux peu caillouteux à drainage naturel favorable	8	Naphtalène	4.4610-8	94.21
12	Sols limoneux à drainage naturel favorable	9	Trichlorobenzène	2.2310-8	136.94
13	Sols limono-caillouteux à charge de silexite ou de gravier ou de conglomérat et à drainage naturel principalement favorable	9	Trichlorobenzène	2.2310-8	156.36
14	Sols limoneux à drainage naturel modéré ou imparfait	9	Trichlorobenzène	2.2310-8	136.94
15	Regroupement de complexes de sols de textures différentes ou sur fortes pentes et de sols de fonds de vallons limoneux ou rocailleux	9	Trichlorobenzène	2.2310-8	156.36

16	Sols artificiels ou non cartographiés	9	Trichlorobenzène	2.2310-8	156.36
23	Sols sableux ou limono-sableux à drainage naturel excessif ou légèrement excessif	9	Trichlorobenzène	2.2310-8	156.36
24	Sols limoneux à drainage naturel assez pauvre à très pauvre	9	Trichlorobenzène	2.2310-8	136.94
25	Sols limoneux peu caillouteux à drainage naturel favorable	9	Trichlorobenzène	2.2310-8	156.36
12	Sols limoneux à drainage naturel favorable	10	Trichloréthylène	2.5110-8	5.89
13	Sols limono-caillouteux à charge de silexite ou de gravier ou de conglomérat et à drainage naturel principalement favorable	10	Trichloréthylène	2.5110-8	6.59
14	Sols limoneux à drainage naturel modéré ou imparfait	10	Trichloréthylène	2.5110-8	5.89
15	Regroupement de complexes de sols de textures différentes ou sur fortes pentes et de sols de fonds de vallons limoneux ou rocallieux	10	Trichloréthylène	2.5110-8	6.59
16	Sols artificiels ou non cartographiés	10	Trichloréthylène	2.5110-8	6.59
23	Sols sableux ou limono-sableux à drainage naturel excessif ou légèrement excessif	10	Trichloréthylène	2.5110-8	6.59
24	Sols limoneux à drainage naturel assez pauvre à très pauvre	10	Trichloréthylène	2.5110-8	5.89
25	Sols limoneux peu caillouteux à drainage naturel favorable	10	Trichloréthylène	2.5110-8	6.59
12	Sols limoneux à drainage naturel favorable	11	1_2_dichloroethane	3.10E-10	2.03
13	Sols limono-caillouteux à charge de silexite ou de gravier ou de conglomérat et à drainage naturel principalement favorable	11	1_2_dichloroethane	3.10E-10	2.18
14	Sols limoneux à drainage naturel modéré ou imparfait	11	1_2_dichloroethane	3.10E-10	2.03
15	Regroupement de complexes de sols de textures différentes ou sur fortes pentes et de sols de fonds de vallons limoneux ou rocallieux	11	1_2_dichloroethane	3.10E-10	2.18
16	Sols artificiels ou non cartographiés	11	1_2_dichloroethane	3.10E-10	2.18
23	Sols sableux ou limono-sableux à drainage naturel excessif ou légèrement excessif	11	1_2_dichloroethane	3.10E-10	2.18
24	Sols limoneux à drainage naturel assez pauvre à très pauvre	11	1_2_dichloroethane	3.10E-10	2.03
25	Sols limoneux peu caillouteux à drainage naturel favorable	11	1_2_dichloroethane	3.10E-10	2.18
12	Sols limoneux à drainage naturel favorable	12	EC10_EC12	1.78*10-7	137.58
13	Sols limono-caillouteux à charge de silexite ou de gravier ou de conglomérat et à drainage naturel principalement favorable	12	EC10_EC12	1.78*10-7	157.10
14	Sols limoneux à drainage naturel modéré ou imparfait	12	EC10_EC12	1.78*10-7	137.58
15	Regroupement de complexes de sols de textures différentes ou sur fortes pentes et de sols de fonds de vallons limoneux ou rocallieux	12	EC10_EC12	1.78*10-7	157.10
16	Sols artificiels ou non cartographiés	12	EC10_EC12	1.78*10-7	157.10
23	Sols sableux ou limono-sableux à drainage naturel excessif ou légèrement excessif	12	EC10_EC12	1.78*10-7	157.10

24	Sols limoneux à drainage naturel assez pauvre à très pauvre	12	EC10_EC12	1.78×10^{-7}	137.58
25	Sols limoneux peu caillouteux à drainage naturel favorable	12	EC10_EC12	1.78×10^{-7}	157.10
12	Sols limoneux à drainage naturel favorable	13	EC16-EC21	6.55×10^{-8}	862.79
13	Sols limono-caillouteux à charge de silexite ou de gravier ou de conglomerat et à drainage naturel principalement favorable	13	EC16-EC21	6.55×10^{-8}	985.90
14	Sols limoneux à drainage naturel modéré ou imparfait	13	EC16-EC21	6.55×10^{-8}	862.79
15	Regroupement de complexes de sols de textures différentes ou sur fortes pentes et de sols de fonds de vallons limoneux ou rocallieux	13	EC16-EC21	6.55×10^{-8}	985.90
16	Sols artificiels ou non cartographiés	13	EC16-EC21	6.55×10^{-8}	985.90
23	Sols sableux ou limono-sableux à drainage naturel excessif ou légèrement excessif	13	EC16-EC21	6.55×10^{-8}	985.90
24	Sols limoneux à drainage naturel assez pauvre à très pauvre	13	EC16-EC21	6.55×10^{-8}	862.79
25	Sols limoneux peu caillouteux à drainage naturel favorable	13	EC16-EC21	6.55×10^{-8}	985.90

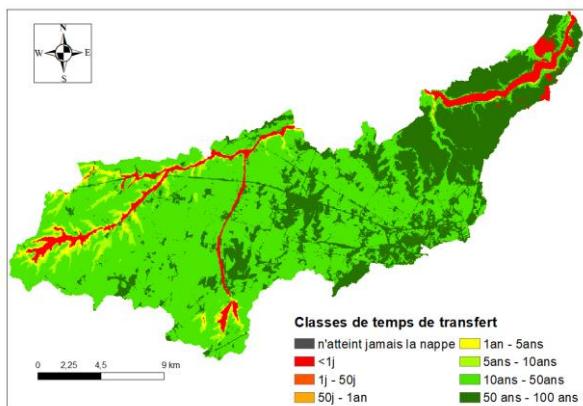
Tableau 17 : Détail de la table POLL_PROP de la BD APSUGIS

4.2. Résultats de la vulnérabilité spécifique

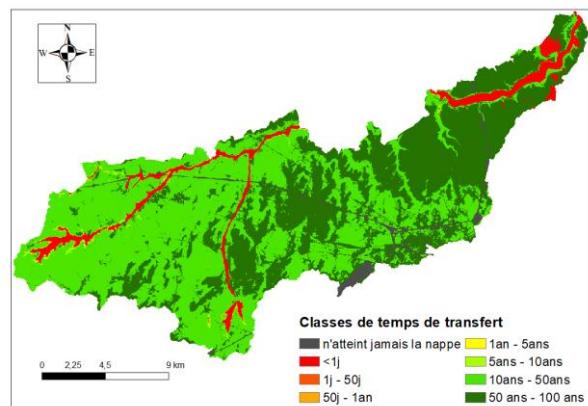
Certains résultats des classes de temps de transfert et de classes de restitution massique sont présentés aux Figures 66 à 77 et les résultats sont comparés à ceux de la vulnérabilité intrinsèque. Les cartes de vulnérabilité des autres polluants peuvent être consultées dans la BD_RESULT.

Il est important de regarder en même temps les cartes de temps de transfert et de restitution massique pour voir quand le polluant atteint la nappe et en quelle quantité. Il faut néanmoins préciser que la restitution massique est fixée à 0% si le temps de transfert est supérieur à 100 ans parce que dans ce cas il est supposé que le polluant n'arrive jamais à la nappe.

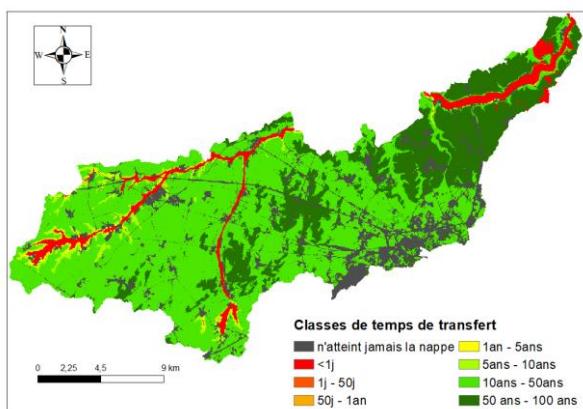
Il y a de fortes différences entre les polluants choisis. Par exemple, le glyphosate et l'huile minérale EC10_EC12 n'atteignent la nappe qu'après de nombreuses décennies (> 50 ans) et dans des quantités très faibles tandis que l'atrazine et le trichloréthylène sont susceptibles d'atteindre la nappe après plusieurs années mais en quantités non négligeables. Le bentazone est susceptible d'atteindre la nappe après plusieurs dizaines d'années et en quantités très faibles.



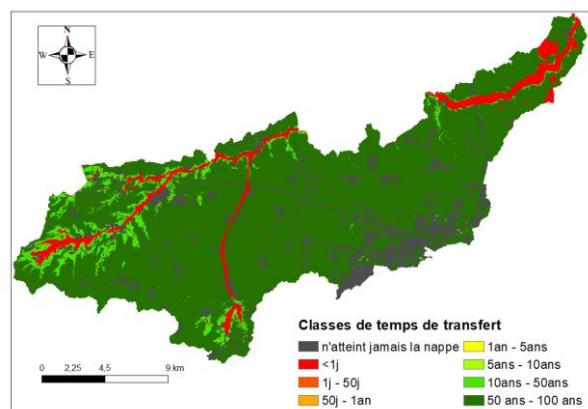
**Figure 64 : Classes de temps de transfert du Geer
(vulnérabilité intrinsèque)**



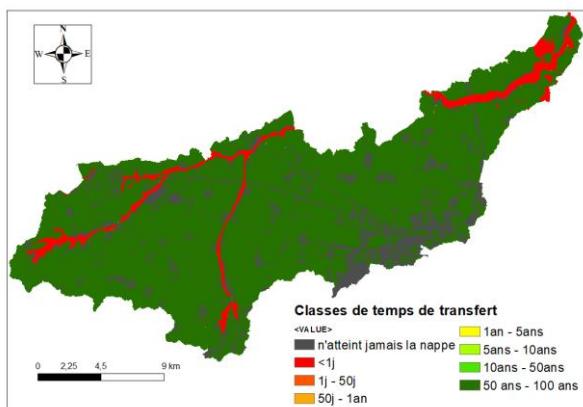
**Figure 65 : Classes de temps de transfert du Geer
(vulnérabilité spécifique : atrazine)**



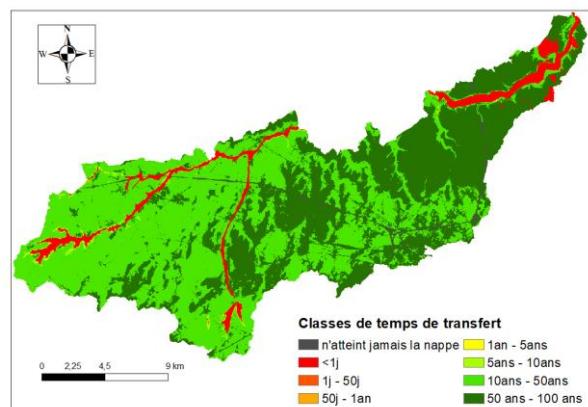
**Figure 66 : Classes de temps de transfert du Geer
(vulnérabilité spécifique : bentazone)**



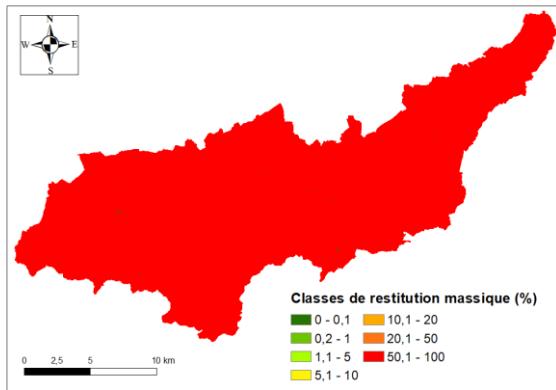
**Figure 67 : Classes de temps de transfert du Geer
(vulnérabilité spécifique : glyphosate)**



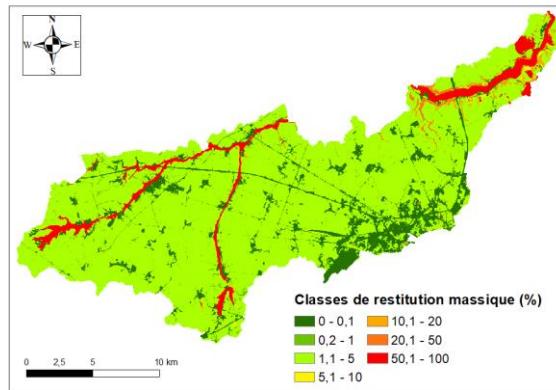
**Figure 68 : Classes de temps de transfert du Geer
(vulnérabilité spécifique : EC10_EC12)**



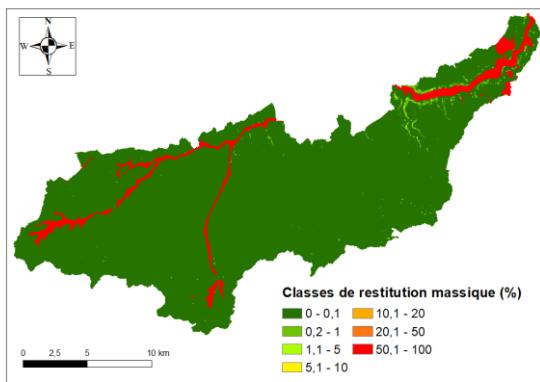
**Figure 69 : Classes de temps de transfert du Geer
(vulnérabilité spécifique : trichlorethylene)**



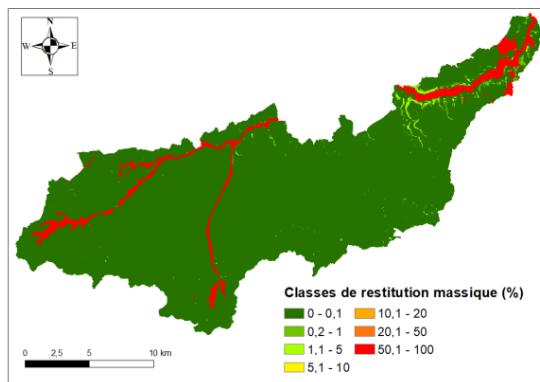
**Figure 70 : Classes de restitution massique du Geer
(vulnérabilité intrinsèque)**



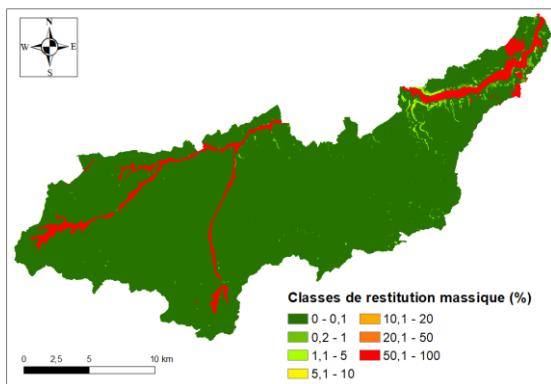
**Figure 71 : Classes de restitution massique du Geer
(vulnérabilité spécifique : atrazine)**



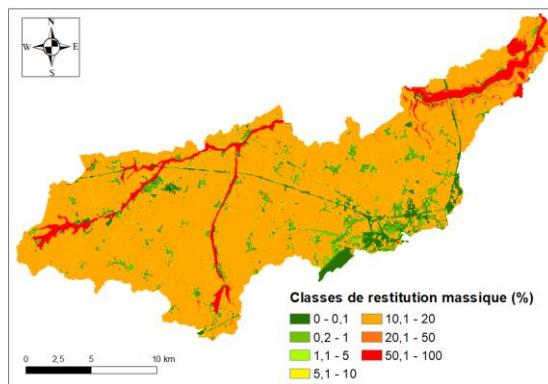
**Figure 72 : Classes de restitution massique du Geer
(vulnérabilité spécifique : bentazone)**



**Figure 73 : Classes de restitution massique du Geer
(vulnérabilité spécifique : glyphosate)**



**Figure 74 : Classes de restitution massique du Geer
(vulnérabilité spécifique : EC10_EC12)**



**Figure 75 : Classes de restitution massique du Geer
(vulnérabilité spécifique : trichloréthylène)**

5. Risque

L'Activité n°3 de la convention portait sur une étude exploratoire relative à l'établissement d'une carte de risque (croisement vulnérabilité et aléa) pour l'une ou l'autre masse d'eau. Dans ce cadre, des réunions ont été organisées (30/01/2018 et 26/06/2018) en vue de baliser les développements envisageables et d'identifier les sources d'information et les données disponibles pour la cartographie du risque en Wallonie. Il s'est rapidement avéré qu'un travail important était encore nécessaire à l'amont sur la cartographie des activités à risque, des sources potentielles de pollution et sur la manière de croiser ces couches d'informations de manière interactive avec la cartographie de la vulnérabilité des eaux souterraines.

A la suite, les premières pistes qui ont été identifiées sont esquissées, principalement sur base des travaux de l'Action COST620 d'un point de vue méthodologique et un premier exemple d'application possible est fourni pour une partie du bassin du Geer, sur base de certaines hypothèses de travail simplificatrices.

5.1. Définition du risque

La notion de « risque » est souvent ambiguë. La définition proposée ici est celle reprise dans le cadre de l'Action COST 620 (Zwahlen, 2004). Le risque de contamination de l'eau souterraine dépend de trois éléments :

- l'aléa lié aux activités potentiellement polluantes ;
- la vulnérabilité (intrinsèque ou spécifique) de l'eau souterraine à la contamination ;
- les conséquences potentielles de la contamination.

Ces trois éléments sont illustrés à la Figure 76 .

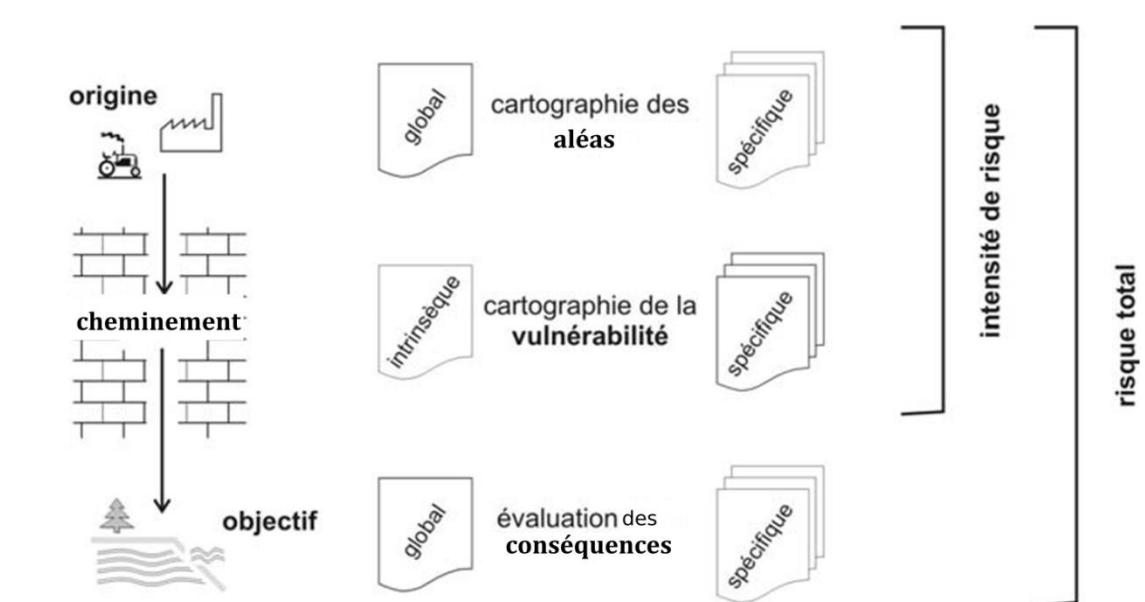


Figure 76 : Définition du risque (modifié d'après (Zwahlen, 2004))

Pour cartographier l'aléa, plusieurs éléments sont nécessaires :

- Identifier les activités potentiellement polluantes,
- Pouvoir lier le type d'activité avec les polluants susceptibles d'être présents,
- Définir la probabilité d'occurrence d'un accident,
- Connaître la charge éventuelle de polluant.

Il est très difficile de pouvoir quantifier la probabilité d'occurrence d'un accident et la charge éventuelle de polluant. Dans le projet COST 620 (Zwahlen, 2004), une première approche est proposée dans le cas où il n'est pas possible d'avoir des données quantifiées de l'aléa. Un poids est alors assigné à chaque activité polluante en fonction du degré de « toxicité » que peut représenter l'activité.

La méthodologie pour cartographier la vulnérabilité a été abordée dans les précédents chapitres. Il faut néanmoins revenir sur un point. Il s'agit d'une cartographie de vulnérabilité de la ressource (l'eau souterraine) qui prend en compte uniquement l'effet de la zone non saturée. Il ne s'agit pas d'une cartographie de vulnérabilité de sources/captages (second récepteur) où en plus de considérer l'effet de la zone saturée (transfert vertical), il faut aussi prendre en compte le transfert (latéral) au sein de la nappe.

Comme il s'agit d'une cartographie de la ressource en tant que telle, la carte de risque peut être obtenue uniquement en croisant la carte de vulnérabilité et la carte d'aléa. Cependant, ajouter la notion de conséquence permet de refléter l'importance de la nappe ou de certains secteurs. Par exemple, dans les cartes de vulnérabilité produites dans le cadre du présent projet, les unités aquiclude sont généralement classifiées comme très vulnérables parce que le niveau piézométrique est proche de la surface. Par contre ces nappes ne sont pratiquement pas exploitées. La conséquence d'une contamination dans un tel contexte est a priori de moindre importance en considérant qu'il n'y aura pas d'utilisation de l'eau pour la consommation humaine. A contrario, pour les unités hydrogéologiques aquifères qui sont fortement exploitées comme les craies de Hesbaye, une grande vulnérabilité aura des conséquences beaucoup plus importantes en cas de pollution.

Pour illustrer cette notion de conséquence, il peut être intéressant de croiser les cartes de vulnérabilité obtenues avec d'autres types d'approches comme, par exemple, les zones de protection de captages et les zones protégées Natura 2000 pour avoir une idée des conséquences d'une pollution sur les écosystèmes associés (en particulier les écosystèmes aquatiques dépendants).

5.2. Ressources disponibles en Région wallonne pour la cartographie du risque

5.2.1. Evaluation de l'Aléa

Dans le rapport de l'action COST 620 (Zwahlen, 2004), une liste des principales activités potentiellement polluantes pour l'eau souterraine a été dressée. Elle est présentée dans le Tableau 18. Pour collecter les informations relatives à ces différentes activités, il y a plusieurs moyens : extraire l'information des cartes topographiques, de photos aériennes et d'autres données SIG, ou aller sur le terrain répertorier les activités potentiellement polluantes et enquêter auprès des différents acteurs pour avoir une idée des polluants pouvant être émis et en quelle quantité.

N°	Niveau I Catégories d'Aléas	Niveau II Catégories d'Aléas	Données disponibles en Région wallonne
1	Infrastructures		
1.1		Eaux usées	Réseau d'égouttage, station d'épuration, Bassins d'orage (PASH)
1.2		Déchets urbains	Décharges (COSW)
1.3		Carburants	Inventaire des citernes à mazout (réflexion en cours au niveau de la DPS mais à priori pas encore de cartographie) Localisation des stations services (PICC : Projet Informatique de Cartographie Continue)
1.4		Trafic et transport	COSW
1.5		Installations récréatives	COSW
1.6		Aléas divers (cimetières,...)	COSW
2	Activités industrielles		
2.1		Industries minières	L'ensemble des sites où des activités susceptibles de dégrader l'état des sols existent (BDES) ⁴ repris anciennement dans l'annexe 3 du décret sol (2008) (métallurgie, industrie du textile, industrie chimique, installation ou activité consommant des solvants, centre de tri des déchets,...)
2.2		Sites d'excavation et d'extraction	
2.3		Exploitations de gaz et de pétrole	
2.4		Installations industrielles	
2.5		Centrales (nucléaires,...)	
2.6		Entreposage industriel	
2.7		Effluents industriels	
3	Agriculture et élevage		
3.1		Elevage	Terres arables, pépinières, prairies, vergers (COSW+ données du parcellaire agricole anonyme) Bâtiments agricoles, serres (COSW)
3.1		Agriculture	

Tableau 18: Principales activités potentiellement polluantes (d'après COST 620) et données disponibles en Région wallonne

⁴ <http://dps.environnement.wallonie.be/files/BDES/Referentiel/index.htm>

Une enquête sur le terrain est plus précise mais demande une quantité de travail très conséquente, difficilement réalisable à l'échelle du territoire de la Wallonie dans des délais raisonnables. Dans un premier temps, il a été décidé de se baser sur les données déjà cartographiées.

Il y a beaucoup d'information qui pourrait être extraite de la carte d'occupation des sols (COSW) même si celle-ci date de 2007 et qu'elle n'est pas toujours très précise, par exemple sur la nature des activités industrielles. Il y a également d'autres sources d'information qui pourraient être utilisées, comme la cartographie des PASH (plans d'assainissement) de la SPGE et la banque de données de l'état des sols (BDES) de la direction de l'Assainissement et Protection des Sols (DGO3). La liste non exhaustive des activités potentiellement polluantes qui sont cartographiées en Région wallonne a également été ajoutée dans le Tableau 18.

La BDES reprend également les sites sur lesquels des activités susceptibles de dégrader l'état des sols ont existé et l'ensemble des sites soumis à une procédure 'décret sol' ou autres. Mais, a priori, la cartographie du risque pour le projet APSU-GIS concernera plutôt les activités potentiellement polluantes actuelles plutôt que d'expliquer les pollutions déjà observées. L'outil servira d'aide à la gestion du territoire.

Pour lier les activités potentiellement polluantes de la BDES avec les cartes de vulnérabilité spécifique, il faut également une matrice activités-polluants qui détaille les polluants susceptibles d'être présents pour chaque activité. Il existe plusieurs matrices de ce type provenant notamment du BRGM, de Bruxelles Environnement, voire celle réalisée pour le SPW par RamSes en 2011, mais qui n'a pas été validée. Il y a également une convention en cours entre le SPW et Almadius pour créer une matrice activités-polluants basée sur les activités décrites dans la BDES. Cette convention n'est pas encore terminée.

Actuellement la BDES et la matrice activités-polluants qui y est associée n'ont pas encore été finalisées et/ou fournies dans le cadre du projet APSU-GIS. Elles n'ont donc pas encore pu être intégrées pour réaliser des cartes de risque.

5.2.2. Evaluation des Conséquences

Dans l'évaluation des conséquences d'une pollution, il y a généralement deux aspects, l'aspect écologique et l'aspect économique. Pour avoir une idée de l'importance « économique » de l'aquifère, la donnée relative aux zones de protection de captage sera utilisée. Pour évaluer l'aspect concernant l'impact d'une pollution sur les écosystèmes les cartes de vulnérabilité et d'aléa seront croisées avec les zones Natura 2000.

5.2. Exemple d'application

L'application risque proposée ici est un premier essai visant à alimenter la discussion avec la DGO3 et de baliser le travail qui reste à mener sur le plan méthodologique en vue de mettre au point la méthode en fonction des attentes du SPW. A côté de cela, un travail conséquent devrait encore être mené en vue de sélectionner les sources d'information, les réorganiser en vue des besoins de la cartographie du risque de pollution de l'eau souterraine et de les intégrer dans une couche d'information adaptée à cette tâche.

La zone qui a été sélectionnée pour ce premier essai exploratoire correspond à la partie sud-ouest amont du bassin du Geer, aux alentours de la commune de Verlaine (Figure 77). Cette zone a été choisie parce que la cartographie de la vulnérabilité intrinsèque (en se basant ici purement sur le critère de temps de transfert pondéré) indique que la nappe des craies y est relativement plus vulnérable que dans le reste du bassin du Geer, en particulier au droit des fonds de vallée et d'une zone où la piézométrie semble relativement proche de la surface (Figure 78). Cette zone est d'autant plus intéressante qu'elle recoupe en partie les zones de protection de captage des galeries de la CILE (non arrêtées à ce jour). Il semble donc pertinent d'évaluer si le risque de contamination de l'eau souterraine est élevé dans cette zone.

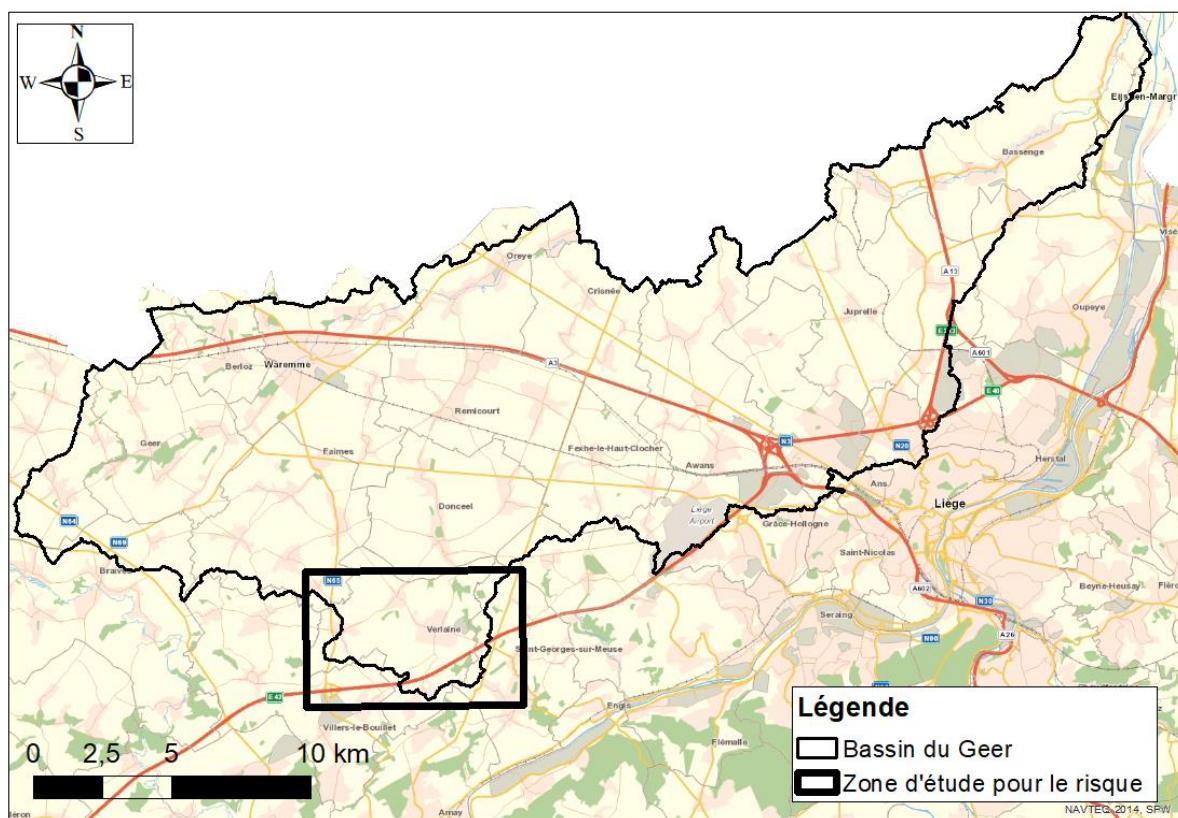


Figure 77 : Zone d'étude pour la cartographie du risque

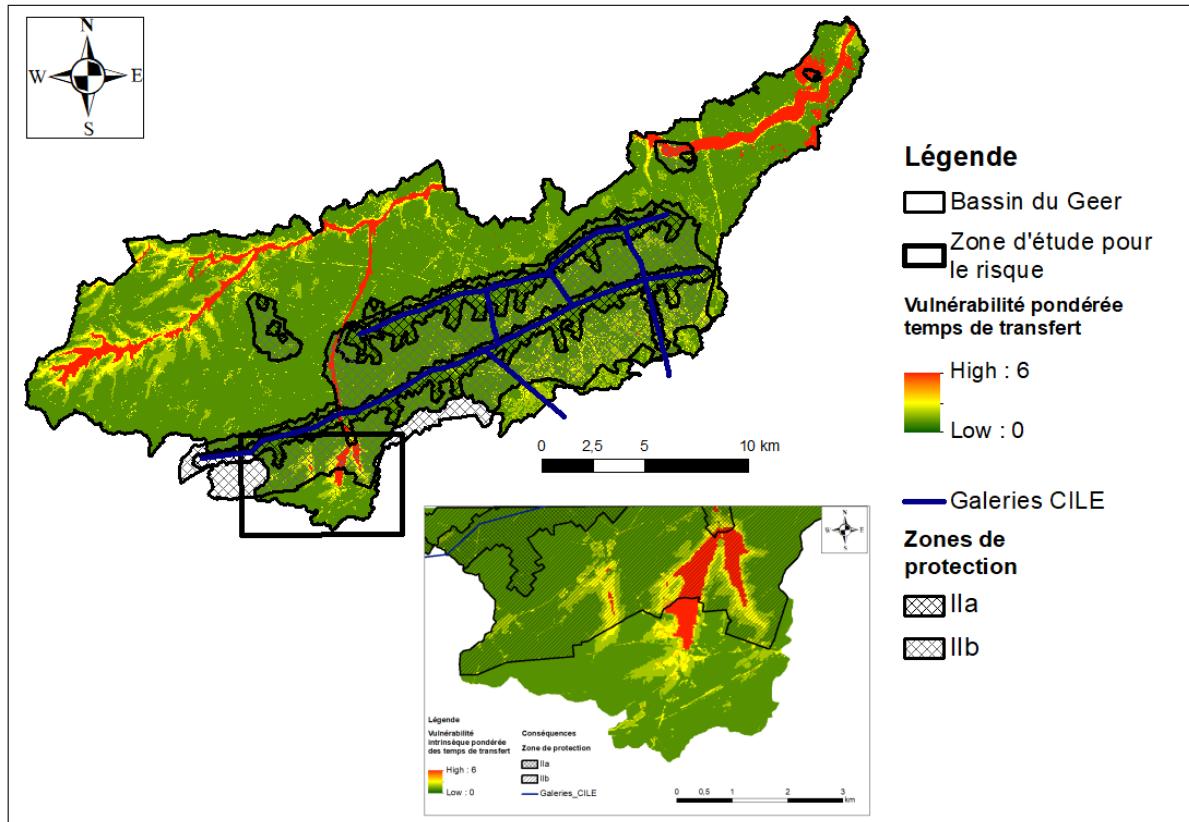


Figure 78 : Carte de vulnérabilité intrinsèque et localisation de la zone de protection des galeries de la CILE

Une cartographie des aléas liés à l'azote (en faisant l'hypothèse que celui-ci se retrouve in fine dans le sous-sol sous forme de nitrate) a été établie à partir des données de la carte d'occupation des sols (COSW) et de la cartographie des PASH (plans d'assainissement) (Figure 79). Les activités potentiellement polluantes sont le réseau d'égouttage (avec une attention particulière apportée aux secteurs correspondant au réseau « à diagnostiquer », « à rénover » ou « à réaliser » qui présentent évidemment un risque plus important) et l'agriculture et l'élevage. Pour cette dernière catégorie, une distinction a été faite entre les prairies et cultures d'une part et les bâtiments agricoles d'autre part. Pour ceux-ci, l'aléa est associé à un indice de toxicité plus important parce que les polluants peuvent s'y trouver en quantité plus importante (lisier, étable ...). La Figure 80 présente les aléas classés avec des indices attribués selon l'approche proposée par l'action COST 620 (Zwahlen, 2004).

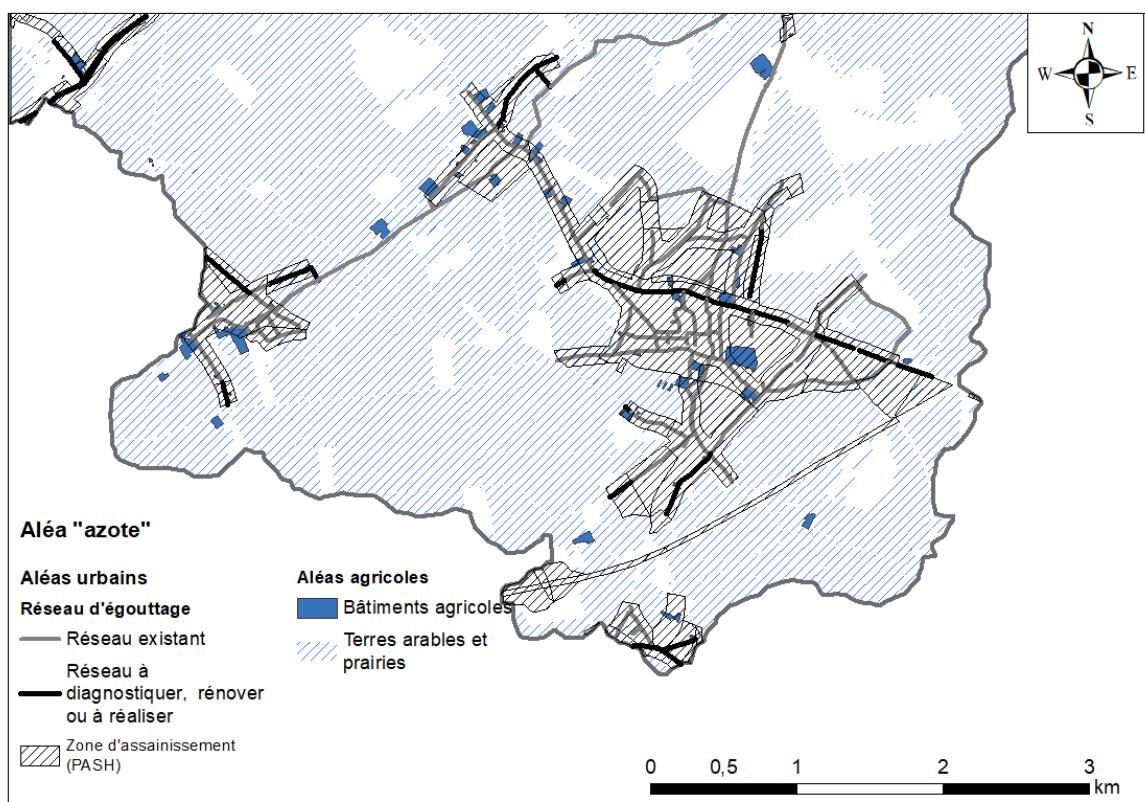


Figure 79 : Distribution spatiale de l'aléa « azote »

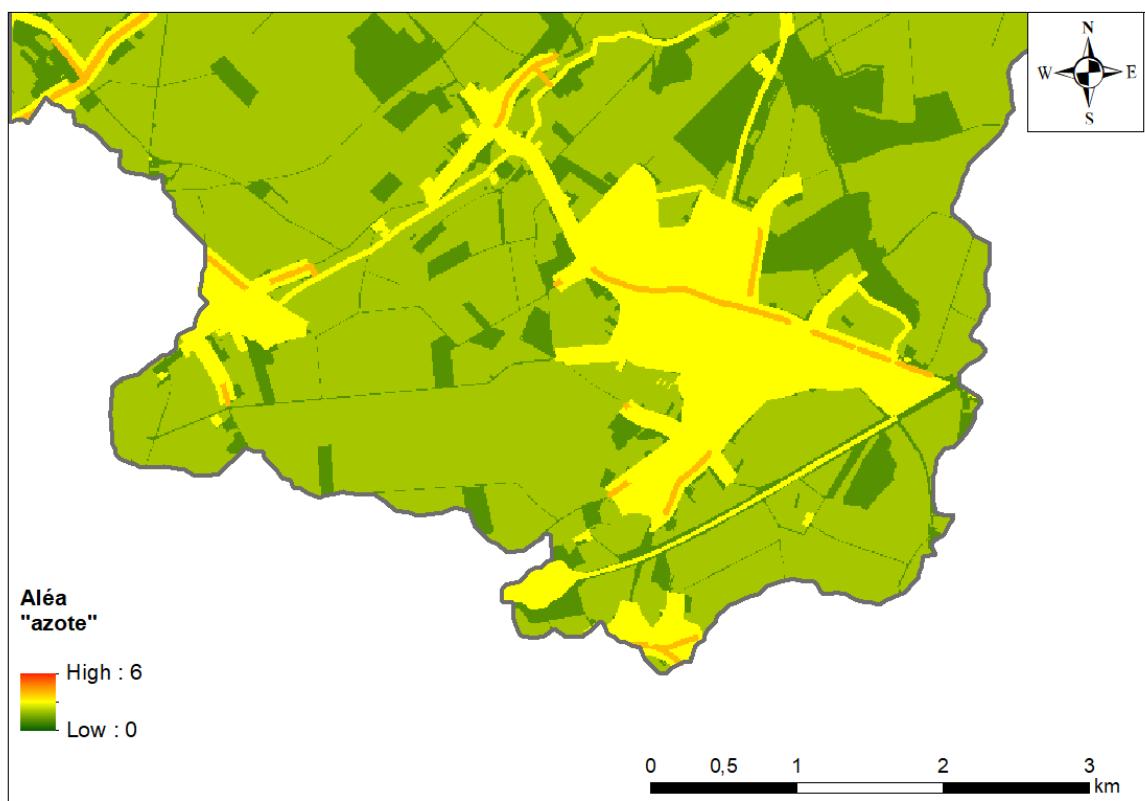


Figure 80 : Carte d'aléa « azote » classée selon l'indice de toxicité

Les cartes d'aléa et de vulnérabilité sont classées en 6 indices avec 1 indiquant une faible vulnérabilité ou aléa et 6 une vulnérabilité ou un aléa élevé. Pour croiser ces deux cartes, les indices ont été additionnés. La carte résultante a donc un indice entre 1 et 12. A terme, il faudra normaliser ces valeurs entre 0 et 1 pour faciliter la lecture des cartes.

Le croisement de la carte de vulnérabilité et de la carte d'aléa est présenté à la Figure 81. Cela correspond à la carte d'intensité du risque (Figure 82). Cette carte représente le risque pour la ressource en eau souterraine.

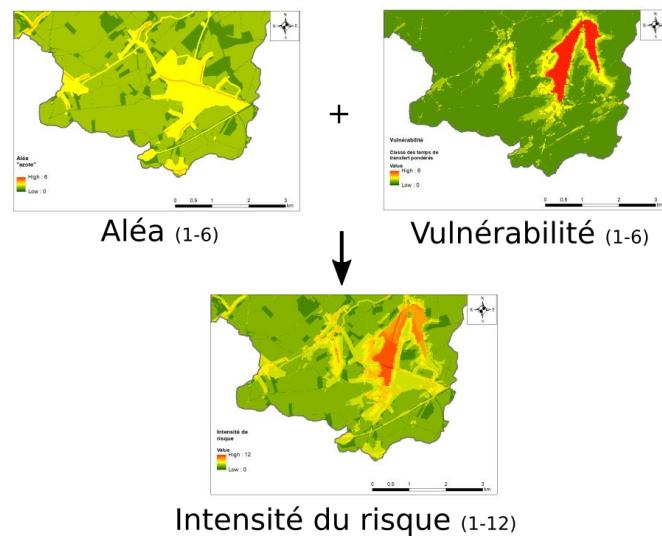


Figure 81 : Croisement des cartes d'aléa et de vulnérabilité

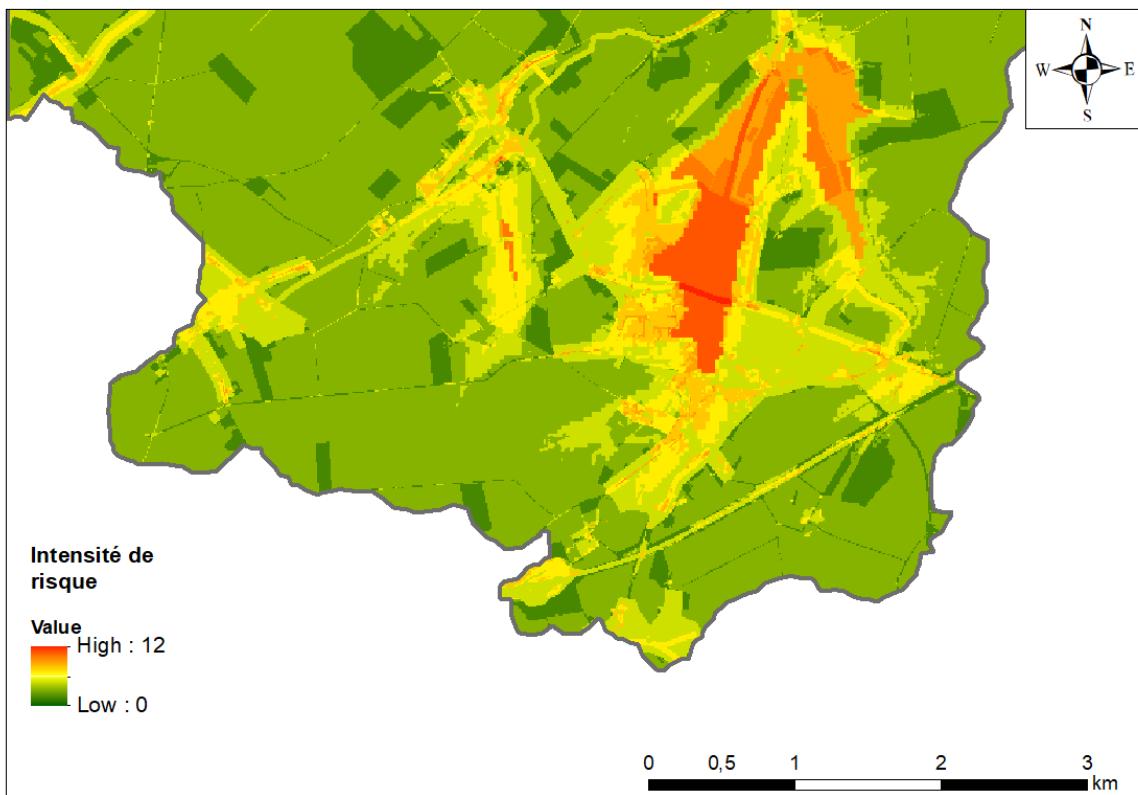


Figure 82 : Carte d'intensité du risque « azote »

La carte de risque « total » est ensuite obtenue en croisant la carte d'intensité du risque « azote » (Figure 82) avec la carte des conséquences. Les conséquences sont ici associées aux galeries de la CILE et à leur zone de protection (Figure 83). Un indice a été attribué pour différentes zones de la nappe (Figure 84) : un indice maximal (=6) pour la zone de protection IIa, un indice moyen (=4) pour la zone IIb et un indice faible (= 2) pour le reste de la nappe. En additionnant la carte d'intensité du risque et la carte des conséquences la carte résultante a alors un indice entre 0 et 18. La carte de risque total est illustrée à la Figure 85.

Idéalement, pour obtenir une carte de risque total, il faudrait également prendre en compte le transfert dans la nappe. Pour l'exemple qui vient d'être illustré il faudrait donc remplacer les zones de protection par l'ensemble du bassin d'alimentation des galeries. La carte de risque obtenue serait alors la carte de risque des galeries. Cette carte finale permettrait par exemple au décideur (gestionnaire de la ressource, gestionnaire des captages...) d'identifier des secteurs du territoire où il serait prioritaire de prendre des mesures pour empêcher ou réduire la pollution par les nitrates.

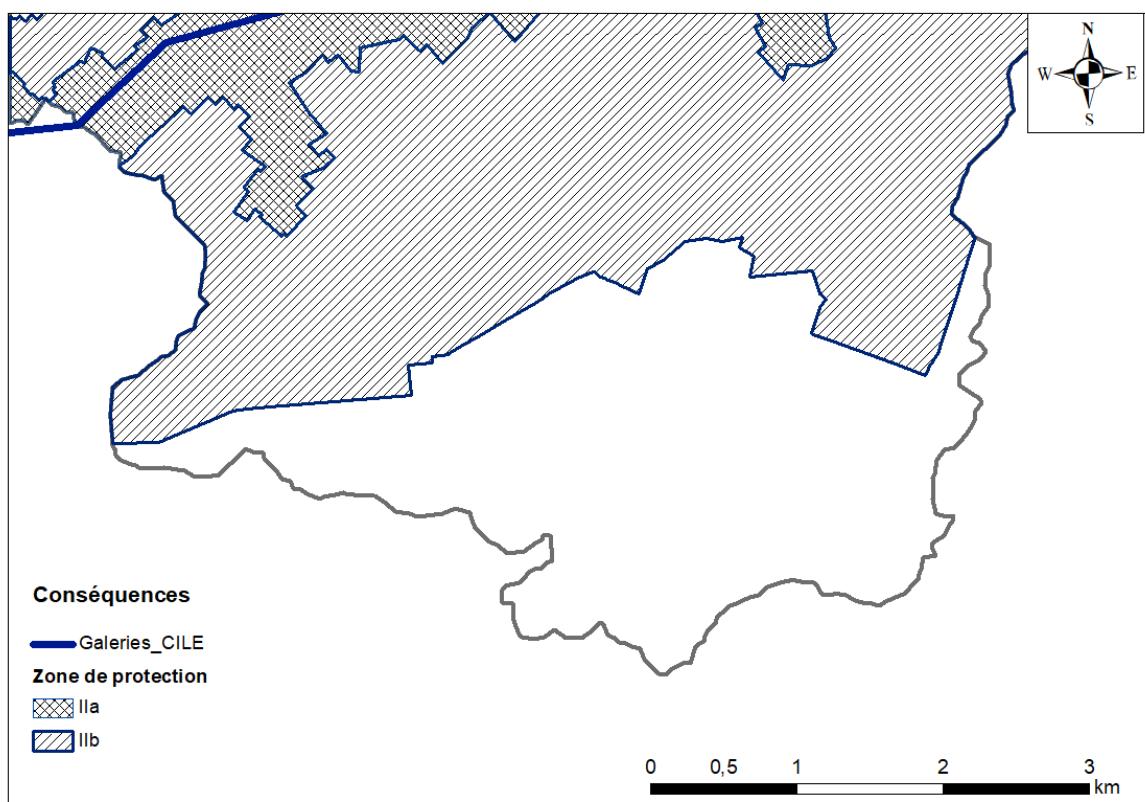


Figure 83 : Localisation des zones de protection de captages (conséquences)

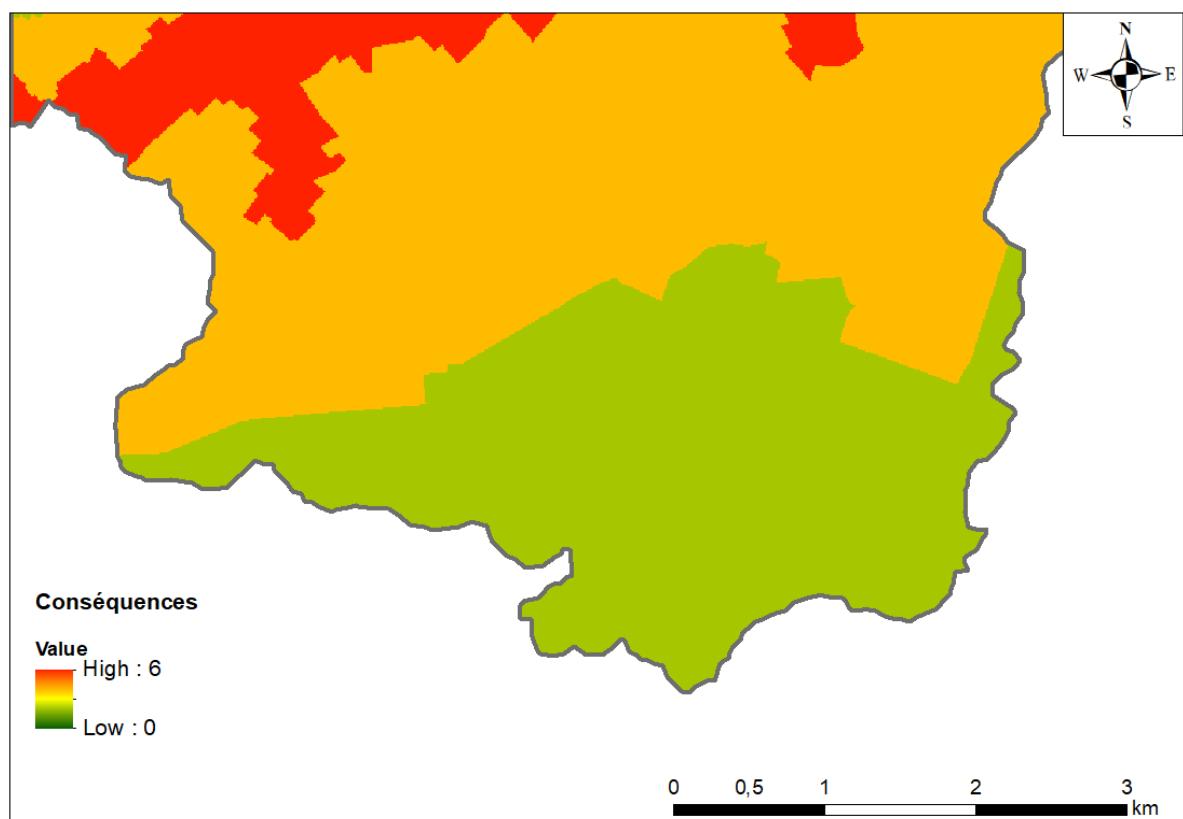


Figure 84 : Carte des conséquences, un indice est fixé en fonction de l'importance de la nappe

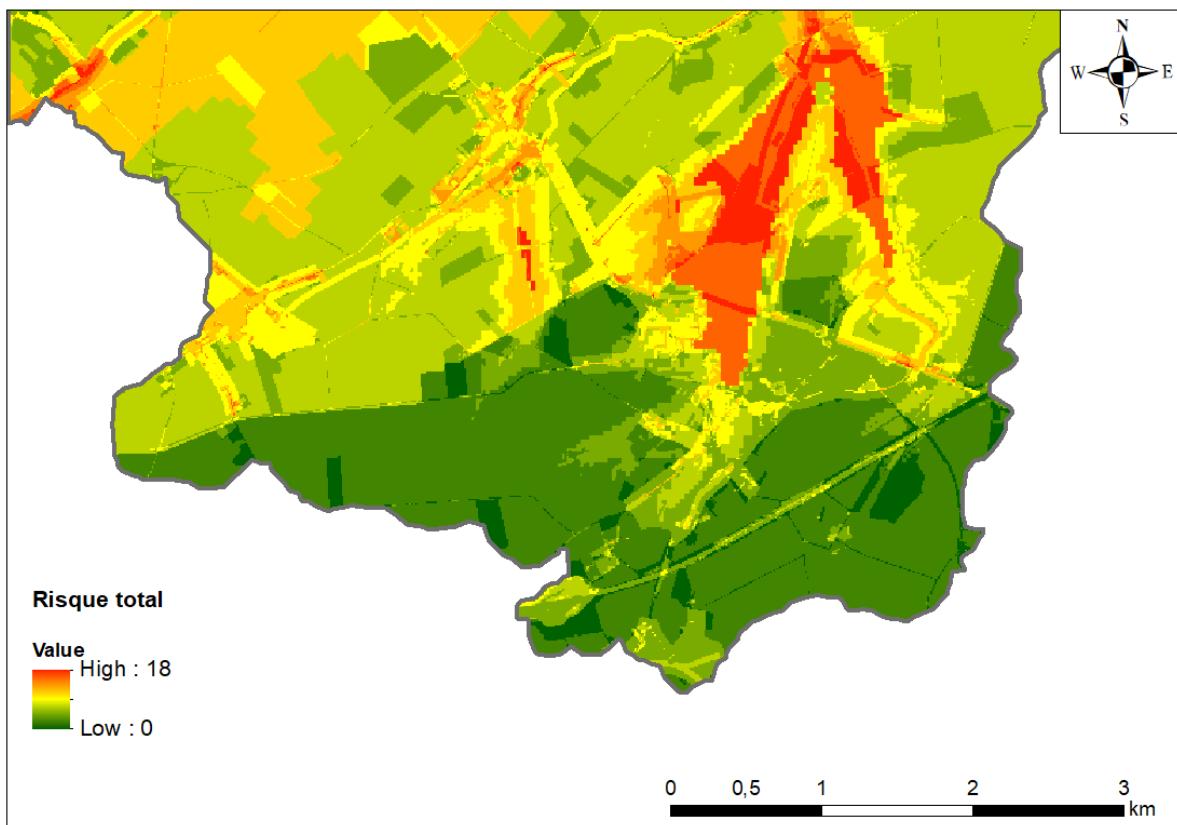


Figure 85 : Risque « total »

5.3. Perspectives pour le risque

Comme cela a déjà été mentionné, il reste beaucoup de travail pour la cartographie du risque. Cette première application était un essai visant à alimenter la discussion avec la DGO3 vue de mettre au point la méthode en fonction des attentes du SPW.

Voici une liste des principales tâches qu'il faudra réaliser pour une cartographie du risque :

- Une cartographie des activités potentiellement polluantes. Il faudra sélectionner les sources d'information, les réorganiser en vue des besoins de la cartographie du risque de pollution de l'eau souterraine et de les intégrer dans une couche d'information adaptée à cette tâche. Pour que cette cartographie puisse être réalisée il faudra avoir accès aux données de la BDES et à la matrice activité polluant associée.
- Discuter de la méthodologie pour croiser les cartes d'aléas et de vulnérabilité avec le DGO3, savoir quel poids accorder à chaque critère et la manière dont les cartes seront représentées.
- Pour établir des cartes de risque total pour un récepteur secondaire comme un captage, il faudrait travailler avec la zone d'alimentation du captage.
- Il faudra aussi définir à quoi serviront ces cartes de risque : Evaluer le risque pour l'ensemble d'une masse d'eau (pour certains polluants choisis), Evaluer le risque total pour un captage ? Pour justifier le choix d'emplacement d'activités potentiellement polluantes dans le cas d'un permis d'environnement ?

6. Conclusions et perspectives

L'activité 3 de la convention portait sur l'application de l'outil APSU-GIS et l'établissement des cartes de vulnérabilité pour des masses d'eau souterraine sélectionnées.

Ce présent rapport décrit les différentes hypothèses qui ont été prises et les données qui ont été utilisées. Pour pouvoir établir des cartes de vulnérabilité, de nombreuses données sont nécessaires et la précision des cartes de vulnérabilité dépend fortement de la précision de ces données d'entrée. Il est donc important d'avoir en tête les hypothèses prises pour pouvoir analyser les cartes de vulnérabilité. Dans une future mise à jour de l'outil, plusieurs nouvelles données seront d'ailleurs intégrées, notamment les versions plus récentes de l'Atlas du Karst et du réseau hydrographique, la carte de texture des sols, ... Il pourrait également être intéressant d'acquérir de nouvelles mesures sur le terrain pour pouvoir comparer les résultats de temps de transferts réels et ceux des cartes de vulnérabilité.

Les cartes de vulnérabilité intrinsèques ont été fournies à la DGO3 sous forme de géodatabase. Ce rapport décrit à quoi correspondent les différentes cartes et des exemples illustrent la manière dont il faut les interpréter. Les cartes de temps de transfert sont également présentées par masse d'eau. C'est la carte qui semble la plus pertinente pour l'évaluation de la vulnérabilité intrinsèque de la nappe.

La vulnérabilité spécifique a été illustrée par l'exemple du bassin du Geer. Des cartes de vulnérabilités spécifiques ont été réalisées pour 13 polluants. Pour évaluer la vulnérabilité spécifique, il est important de considérer le critère de temps de transfert mais également celui de restitution massique.

Une étude exploratoire relative à l'établissement d'une carte de risque a également été réalisée. Il s'agit d'une première esquisse d'une méthodologie basée sur les travaux de l'Action COST620 et un premier exemple d'application possible a été fourni pour une partie du bassin du Geer, sur base de certaines hypothèses de travail simplificatrices. Ce premier essai vise à alimenter la discussion avec la DGO3 et de baliser le travail qui reste à mener sur le plan méthodologique en vue de mettre au point la méthode en fonction des attentes du SPW.

7. Bibliographie

Bonniver I., Meus Ph., Hallet V. (2012). Caractérisation hydrogéologique du plateau calcaire du Gerny entre Rochefort, Humain et Jemelle en vue du projet d'approfondissement de la carrière de la Boverie (Groupe Lhoist) sous le niveau actuel de la nappe d'eau souterraine –Etude de faisabilité. Pp 240

Briers P., Piront L., Dollé F., Orban P. & Brouyère S. 2017. Etablissement des valeurs représentatives par type d'aquifère des paramètres hydrogéologiques intervenant dans l'Evaluation des risques pour les eaux souterraines en application du Décret du 5 décembre 2008 relatif à la Gestion des Sol. Convention SERAN SPW- HGE-ULg, 53 p + annexes.

Brouyère S., Corbeau H., Dachy M., Gardin N., Orban P. et Dassargues A (Hydrogéologie-Geo³-ArGENCo-ULg). 2004. *PIRENE (Programme Intégré de Recherche Environnement Eau) - Partim eaux souterraines - Rapport final*. Aquapôle. 103p (Projet subsidié par le SPW)

Brouyère S., Gesels J., Goderniaux P., Jamin P., Robert T., Thomas L., Dassargues A., Bastien J., Van Wittenberge F., Rorive A., Dossin F., Lacourt J.-L., Le Madec D., Nogarède P., Hallet V. 2009. Caractérisation hydrogéologique et support à la mise en œuvre de la Directive Européenne 2000/60 sur les masses d'eau souterraine en Région Wallonne (Projet Synclin'EAU) : délivrable D.2.22 Rapport de caractérisation de masse d'eau souterraine - partie RWM012 et partie RWM021. Convention RW et SPGE-Aquapôle

Brouyère S., Jeannin P.Y., Dassargues A., Goldscheider N., Popescu I.C., Sauter M., Vadillo I., F. Zwahlen. 2001. Evaluation and validation of vulnerability concepts using a physically based approach, Proc. of the 7th Conf. on Limestone Hydrology and Fissured Media, J. Mudry & F. Zwahlen (Eds.), Sciences et Techniques de l'Environnement, Université de Franche-Comté, Mémoire n°13, pp. 67-72.

Chartin C., Krüger I., van Wesemael B., Carnol M. 2016. Subvention CARBIOSOL III: Carbone organique, biomasse et activité microbienne des sols: vers un indicateur de la qualité des sols en Wallonie, Service Publique de Wallonie, DGO3-DSD.

Dassargues, A. 2018. Hydrogeology: groundwater science and engineering, Taylor & Francis CRC Press, 472p.

Demarcin P., Degré A., Smoos A. & Dautrebande S., 2009. Projet ERRUISSOL. Cartographie numérique des zones à risque de ruissellement et d'érosion des sols en région wallonne. Rapport final de convention DGO3- FUSAGx.

Legrain X., Michel B. Roda M. 2017. Valorisation de la Carte Numérique des Sols de Wallonie 2016 ; Projet de Cartographie Numérique des Sols de Wallonie (PCNSW), convention DGO3- ULg – GxABT.

Montgomery, J.H. (2007) Groundwater Chemicals Desk Reference. CRC Press, Boca Raton

Orban P., Brouyère S., Leroy M., Couturier J., Dassargues A. 2010. Caractérisation hydrogéologique et support à la mise en oeuvre de la Directive Européenne 2000/60 sur les masses d'eau souterraine en Région Wallonne - Délivrable 6.2 - Travaux de calibration et validation des modèles d'écoulement et

de transport de solutés développés pour les trois masses d'eau souterraine RWM011, RWM012 et RWM021. Convention RW et SPGE-Aquapôle.

Popescu I.C., Brouyère S. & Dassargues A., 2019. *The APSU method for process-based groundwater vulnerability assessment*. Hydrogeology Journal. <https://doi.org/10.1007/s10040-019-02013-z>

Popescu I.C., Dachy M., Brouyère S. & Dassargues A., 2004. Tests d'une méthode de cartographie de la vulnérabilité intrinsèque applicable aux nappes aquifères de la Région Wallonne Application à l'aquifère calcaire du Néblon. Convention RW - ULg, GéomaC (Hydrogéologie), 140 p + annexes.

Wildemeersch S., Couturier J., Orban P. & Dassargues A. (2009). PAI - TIMOTHY - Annual Scientific Report, WP3: model development and process studies - groundwater dynamics, Partie eaux souterraines, Rapport scientifique 2008.

Zwahlen, F. (Ed.) (2004) Vulnerability and Risk Mapping for the Protection of Carbonate (Karst) Aquifers. Final Report (COST Action 620) European Commission, Brussels.

8. Annexe : Procès-verbal de la réunion du 23/11/2018 : Réunion de Coordination Géomatique APSÙ-GIS et Atlas du Karst

Présents :

SPW – DGO3 – DEMNA DCoD	P. Engels	PE
ULg- ArGENCo – Geo ³	C. Thomas	CT
Cwepss	G. Michel	GM

L'objectif de cette réunion était de présenter la manière dont l'Atlas du Karst est utilisé dans l'outil APSÙ-GIS et de valider les choix réalisés pour pérenniser l'outil.

8.1. Présentation de l'utilisation de l'Atlas du Karst dans Apsù-Gis

CT présente brièvement la manière dont les phénomènes karstiques décrits dans l'Atlas du Karst sont utilisés dans le cadre la convention APSÙ-GIS. Cette convention vise à cartographier la vulnérabilité des principales masses d'eau souterraines de Wallonie. Dans l'outil APSÙ-GIS, uniquement les phénomènes karstiques considérés comme des zones d'infiltration préférentielle sont sélectionnés.

Dans l'outil, il y a deux couches qui décrivent les zones d'infiltration préférentielle karstiques : « ATLAS_KARST » et « CAVITES ».

Couche variable (ATLAS_KARST)

- Pertes-chantoirs, dolines-dépressions et puits naturels (tant ponctuels que surfaciques) **Catégorie 1**

Couche fixe (CAVITES)

- Sélection de certaines cavités de l'Atlas du Karst considérée comme des zones d'infiltration préférentielle **Catégorie 2**
- Sélection des phénomènes avec le champ PHENO_DESC vide, mais dont le nom laissait penser à une zone d'infiltration préférentielle (doline, perte, ...) **Catégorie 3**

Dans la couche variable « ATLAS_KARST » (catégorie 1), les phénomènes karstiques sont sélectionnés de manière semi-automatique d'après le champ PHENO_DESC de la table d'attribut. Les phénomènes concernés sont intitulés : perte/chantoir, doline/ dépression et puits naturel. La sélection a été faite pour les données ponctuelles et les données surfaciques. Ces données sont ensuite rassemblées sous forme de donnée ponctuelle dans une seule couche. La couche variable ATLAS_KARST peut facilement être mise à jour avec de nouvelles données de l'Atlas du Karst.

La couche fixe « CAVITES » a été ajoutée dans l'outil APSÙ-GIS pour les phénomènes karstiques qui ne pouvait pas être sélectionnés de manière automatique. Dans l'Atlas du Karst, les phénomènes encodés comme des cavités sont des phénomènes karstiques « pénétrables » par l'homme.

Cependant, certaines cavités fonctionnent comme perte/chantoir, d'autres sont situées dans des dolines, certaines ont un fort développement vertical avec un accès à une rivière souterraine, ... Une partie des cavités peuvent donc constituer des zones d'infiltration préférentielle (catégorie 2). Il y a 1731, phénomènes karstiques décrits comme cavité dans l'Atlas du Karst et il n'y a pas de méthode permettant de les sélectionner de manière automatique sur base des critères de zones d'infiltration préférentielle recherchés dans APSÙ-GIS. Il y a donc eu une sélection manuelle des cavités (ponctuelles et surfaciques) sur base de mot clés (gouffre, perte, doline, ...) et une vérification sur base de la description. Cette couche ne peut pas facilement être mise à jour à moins de refaire le travail pour les nouvelles cavités ajoutées dans la BD de l'Atlas du Karst. Le but de rajouter la couche fixe « CAVITES » à l'outil APSÙ-GIS était de compléter l'information de la couche variable « ATLAS KARST » pour ne pas négliger certaines zones d'infiltration préférentielle importantes (exemple : Gouffre de Belvaux, Vallon des Chantoirs) mais elle n'est sans doute pas exhaustive.

La couche fixe « CAVITES » dans APSÙ-GIS comprend également des phénomènes karstiques surfaciques dont le champ « PHENO_DESC » est vide, mais dont le nom (doline, perte, ...) laissait penser à une zone d'infiltration préférentielle. Comme le champ est vide, il n'est pas possible de sélectionner ces phénomènes karstiques de manière automatique comme pour la catégorie 1 (catégorie 3). Ces phénomènes ont donc été rajoutés à la couche fixe « CAVITES » d'APSÙ-GIS pour ne pas les négliger même si ces points ne sont pas des « cavités » au sens de l'Atlas du Karst.

8.2. Discussion

PE précise que la donnée Atlas du Karst qui a été fournie en janvier 2017 comprenait des erreurs (notamment des points avec des mauvaises coordonnées). Il faudra donc réactualiser les zones d'infiltration de l'outil APSÙ-GIS avec le nouvel Atlas du Karst. PE suggère aussi à CT de s'abonner au FLUX RSS pour être au courant de la mise à jour des données sur le géoportail.

L'objectif de la réunion, était principalement de vérifier les données de la catégorie 3 qui ont un champ « PHENO_DESC » vide. Il y a 48 sites dans la catégorie 3 et cela concerne uniquement les phénomènes surfaciques. Lors de la réunion, GM vérifie quelques points dans la BD de l'Atlas du Karst et ces points ont bien un champ PHENO_DESC rempli. Dans la nouvelle version de l'Atlas du Karst, il ne semble donc pas qu'il y ait des problèmes de champ vide. De plus, GM explique que chaque donnée surfacique est liée à une donnée ponctuelle avec des informations plus complètes. Les points de la catégorie 3 pourront donc être intégrés à la catégorie 1 et être sélectionnés de manière automatique ou être ajoutés à la catégorie 2 s'il s'agit de cavités. Le problème de la catégorie 3 est donc résolu.

Suite à la sélection des phénomènes karstiques dans l'outil APSÙ-GIS, GM fais plusieurs remarques :

- Il faudrait également sélectionner les dépressions paléokarstiques dans la catégorie 1 car celles-ci peuvent également constituer des zones d'infiltration préférentielle.
- Certains phénomènes avec le champ « divers » peuvent également être des zones d'infiltration préférentielle. Il faudrait donc faire le tri parmi ces phénomènes pour regarder ceux qu'il faudrait considérer dans APSÙ-GIS. Cette catégorie comprend assez peu de points donc le travail sera relativement modeste.

Pour les cavités c'est un peu plus compliqué. Actuellement, plus de 1700 cavités sont répertoriées et il n'existe pas à ce jour de manière fiable et automatique pour sélectionner celles qui pourraient constituer des zones d'infiltration préférentielle. Idéalement il faudrait rajouter un champ dans la table d'attribut de l'Atlas du Karst, intitulé infiltration préférentielle. Ce champ aurait 4 valeurs : sélection automatique (perte, doline, puits naturel, dépression paléokarstique), indéterminé (cavité pour laquelle la réflexion n'a pas encore eu lieu), infiltration, pas d'infiltration. Pour les nouvelles cavités investiguées, il serait facile de remplir le champ mais pour les cavités déjà répertoriées cela représente un travail considérable. Lors de la réunion, il est conclu qu'à ce jour, faire un tel travail n'est pas envisageable.

PE et GM suggèrent de montrer la sensibilité de l'outil APSU-GIS aux phénomènes karstiques. Il faudrait faire tourner l'outil plusieurs fois : sans les phénomènes karstiques, avec l'ensemble des phénomènes karstiques, avec uniquement les phénomènes karstiques sélectionnés comme zones d'infiltration préférentielle. Si les tests, s'avèrent concluant cela pourrait servir d'argument pour rajouter le champ zone d'infiltration préférentielle dans l'Atlas du Karst. PE demande à ce que ce test de sensibilité figure parmi les tâches à réaliser dans la deuxième convention APSU-GIS.