



Convention SERAN Région wallonne et HGE-ULg

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 Sols

Rapport final

Coordinateur du projet :

Dr. ir. Serge Brouyère (HGE-ULg)

Partenaires scientifiques :

ULg-HGE : Pierre Briers, Dr. ir. Philippe Orban, Fabien Dollé

Geolys : Laurent Piront

Rédaction : Pierre Briers, Laurent Piront, Fabien Dollé, Philippe Orban, Serge Brouyère

Table des matières

1.	Introduction et objectifs.....	4
2.	Description de la méthodologie appliquée dans le cadre de la convention	6
2.1.	Identification des paramètres hydrogéologiques intervenant dans les études de risque.....	6
2.2.	Choix et inventaire des sources de données utilisées.....	7
2.3.	Encodage dans une base de données	8
2.4.	Agrégation et traitements statistiques	8
3.	Développement de la base de données.....	10
3.1.	Choix de la base de données	10
3.2.	Structure de la géodatabase	10
3.3.	Encodage des données hydrogéologiques	12
4.	Vue d'ensemble de l'encodage des données.....	15
5.	Propositions d'agrégation des données.....	21
5.1.	Agrégation sur base de la lithologie	21
	Différenciation sur base de la lithologie principale.....	21
	Différenciation au sein des calcaires.....	28
	Différenciation au sein des craies	29
5.2.	Agrégation sur base de la classification actuelle du GRER.....	30
5.3.	Agrégation sur base de la classification EuroWaterNet.....	34
5.4.	Agrégation sur base de la classification des masses d'eau souterraine.....	37
6.	Valeurs de référence pour les paramètres hydrogéologiques.....	39
6.1.	Conductivité hydraulique (K).....	39
6.2.	Porosité efficace de transport (n_e)	41
6.3.	Dispersivité longitudinale (α_L)	42
6.4.	Infiltration (I)	42
6.5.	Gradient hydraulique	43
7.	Recommandations.....	44
7.1.	Opportunité F-Leach	44
7.2.	Incohérence Nappe exploitable/Nappe non exploitable	46
7.3.	Ajustement obligatoire VS_N et VI_N	48
7.4.	Proposition de nouveaux facteurs de dilution par défaut	49
7.5.	Autres pistes d'amélioration	51
8.	Conclusions et perspectives	53

9.	Bibliographie.....	55
10.	Annexes	56
10.1.	Domaines de la géodatabase	56
10.2.	Synthèse des études consultées et encodées dans le cadre de la convention	58

1. Introduction et objectifs

Le Guide de Référence pour l'Étude des Risques (GRER), contenu dans le Code Wallon de Bonnes Pratiques (CWBP) défini à l'article 1^{er} de l'Arrêté du Gouvernement wallon du 27 mai 2009 relatif à la gestion des sols, est basé sur une série de valeurs représentatives attribuées, par type d'aquifère, aux principaux paramètres hydrogéologiques intervenant dans l'évaluation des risques pour les eaux souterraines (partie C du GRER, SPW 2008a) et notamment dans les formules d'ajustement des Valeurs limites (VS_N et VI_N).

Les valeurs représentatives de paramètres hydrogéologiques reprises actuellement dans le GRER ont été estimées en 2002 sur base d'un nombre très limité d'études (24 sites), et sur base d'une méthodologie simplifiée, et non adaptée à la portée actuelle de l'usage de ces paramètres, à savoir les études d'évaluation de risques pour les eaux souterraines dans le cadre de la mise en œuvre du décret sur la gestion des sols en Région wallonne. Il peut en résulter des valeurs peu pertinentes, a priori non sécuritaires, avec pour conséquence des décisions inadéquates en matière d'actions à mener (notamment sur la nécessité ou l'absence d'assainissement) sur base des impositions du Décret Sol.

L'établissement de valeurs de paramètres hydrogéologiques, consolidées et sécuritaires, s'est donc avéré indispensable, nécessitant une révision majeure du travail réalisé en 2002. La présente convention vise donc à réviser cette problématique et les problèmes associés. Les objectifs de la convention sont les suivants :

1. L'établissement d'une méthodologie permettant une détermination pertinente des valeurs représentatives par type d'aquifère des paramètres hydrogéologiques intervenant dans la partie C du GRER ;
2. La réalisation d'un inventaire, par type d'aquifère et par masse d'eau souterraine, des sources de données pertinentes (études, rapports, publications, bases de données, etc.) disponibles et valorisables pour l'évaluation des valeurs représentatives par type d'aquifère des paramètres hydrogéologiques intervenant dans le GRER ;
3. La valorisation des sources de données pertinentes pour l'évaluation des valeurs représentatives par type d'aquifère des paramètres hydrogéologiques intervenant dans le GRER, incluant :
 - Le développement d'une base de données adaptée pour l'encodage et la consultation de l'inventaire des sources de données et des données hydrogéologiques valorisées ;
 - L'encodage, dans la base de données développée, des sources de données et des données hydrogéologiques valorisées ;

- La détermination, à partir des sources de données identifiées et selon la méthodologie retenue, des valeurs représentatives par type d'aquifère des paramètres hydrogéologiques intervenant dans le GRER partie C ;
4. La rédaction d'un rapport de synthèse, reprenant notamment les valeurs représentatives par type d'aquifère des paramètres hydrogéologiques intervenant dans le GRER, et permettant une mise à jour de la partie C du GRER relative à ces paramètres ;
 5. L'établissement de recommandations pour une amélioration, sur le plan méthodologique et à la lumière des retours d'expérience d'utilisation actuelle du GRER, de la partie C de celui-ci et de l'outil informatique qui lui y est associé.

Le travail réalisé en vue de répondre à ces objectifs a été effectué par le Groupe d'Hydrogéologie et de Géologie de l'Environnement de l'Université de Liège (HGE-ULg) avec, en appui, le bureau d'études Geolys.

2. Description de la méthodologie appliquée dans le cadre de la convention

La méthodologie appliquée dans le cadre de la convention est relativement calquée sur la déclinaison des objectifs du projet. Dans un premier temps, un inventaire des études disponibles ainsi qu'une identification des paramètres hydrogéologiques intervenant dans les études de risque a été réalisé. Ensuite, une réflexion concernant l'encodage et la création d'un nouvel outil de travail (base de données) a été entreprise. Le travail de consultation a suivi le développement de la base de données afin d'arriver à la finalité du travail, à savoir une analyse statistique sur le jeu de données afin d'obtenir des valeurs représentatives des paramètres hydrogéologiques. Différentes échelles d'agrégation ont été envisagées pour le traitement statistique, et ce afin de proposer, si nécessaire, différentes alternatives à la classification des nappes actuellement utilisée dans les études de risques. Ces différents volets sont présentés et détaillés dans les chapitres suivants.

2.1. Identification des paramètres hydrogéologiques intervenant dans les études de risque

De nombreux termes et formules interviennent dans les différentes annexes de la partie C du GRER (établissement et ajustement des VS_N , VI_N , calcul du temps de lessivage en milieu non saturé). Cependant, tous ces termes ne font pas spécifiquement référence à des paramètres hydrogéologiques et de nombreux paramètres « géométriques » de site interviennent.

Un des premiers travaux de la convention a été d'identifier clairement les paramètres hydrogéologiques intervenant dans les études de risque. Ce travail a été réalisé en amont de l'inventaire afin d'orienter le choix de consultation et d'encodage des études.

Les paramètres hydrogéologiques intervenant dans les études de risque sont :

- la conductivité hydraulique (K) ;
- la porosité efficace de transport (n_e) ;
- les dispersivités longitudinale (α_L), transversale (α_T) et verticale (α_v).

Ces termes interviennent notamment dans le calcul du facteur de dilution (FD - Equation 1) ou dans l'équation de Domenico (1987).

$$FD = 1 + \frac{d_{zm} \times K \times \nabla H}{I \times L} \quad [1]$$

Avec

- d_{zm} : Epaisseur de la zone de mélange [L] ;
- K : Conductivité hydraulique du milieu saturé [LT^{-1}] ;
- ∇H : Gradient hydraulique [-] ;
- I : Infiltration nette [LT^{-1}] ;

- L : Longueur de la zone contaminée parallèle au flux souterrain [L].

La conductivité hydraulique est utilisée au niveau des équations reprises dans le GRER. L'encodage de ce paramètre a donc été préféré à la transmissivité. Dans le cas d'études où seules les valeurs de transmissivité sont disponibles, ces valeurs ont été transformées en conductivité hydraulique selon l'Equation (2).

$$T = K \times e \quad [2]$$

Avec

- T : transmissivité [L^2T^{-1}];
- K : conductivité hydraulique [LT^{-1}];
- e : épaisseur de l'aquifère [L].

Dans le cas fréquent où l'épaisseur de l'aquifère est inconnue, l'épaisseur crépignée ou la profondeur de l'ouvrage a été utilisée en fonction des informations disponibles. Une remarque a été encodée dans la base de données lorsque la conductivité hydraulique encodée provient d'une valeur de transmissivité.

L'intervention du gradient hydraulique dans l'équation du facteur de dilution pose problème. Idéalement, cette valeur devrait être déterminée sur base de mesures piézométriques effectuées sur le site étudié ou sur base d'études locales du fait de sa dépendance intrinsèque aux conditions hydrogéologiques. Ce point sera traité au chapitre 6.5.

Bien que n'étant pas un paramètre hydrogéologique au sens strict, les valeurs de référence de l'infiltration nette ont également été actualisées dans le cadre de la présente convention.

2.2. Choix et inventaire des sources de données utilisées

Le nombre d'études environnementales disponibles a augmenté de manière considérable au cours de ces dernières années (études SPAQuE, études de sites pollués, caractérisation des masses d'eau souterraine, études de délimitation des zones de prévention, cartes hydrogéologiques de Wallonie, ...). Cependant, toutes ces études n'ont pas forcément le même degré de pertinence du point de vue de l'actualisation des paramètres hydrogéologiques intervenant dans les études de risques. Ainsi, de nombreuses études de sites pollués concernent les premiers mètres de sol et peu d'essais ont en général été réalisés au niveau de la nappe d'eau souterraine. Ces études ne contiennent donc que peu, voire pas de valeurs concernant les paramètres hydrogéologiques à actualiser.

Le second travail effectué dans le cadre de la convention a donc porté sur le choix des études à consulter. Cette sélection a été réalisée principalement en concertation avec la DGARNE-DESO. Dans un premier temps, les études de type « caractérisation des masses d'eau souterraine » ont été prises en considération afin d'obtenir des valeurs de paramètres à une échelle régionale. Dans un second temps, et après un examen de la distribution spatiale des études et des paramètres obtenus en fonction des masses d'eau souterraine,

ces études ont été complétées par des études plus locales afin d'homogénéiser la répartition spatiale et étoffer le jeu de données où il était considéré comme insuffisant. Ces études locales ont essentiellement porté sur des études de type « zones de prévention » dans le cadre desquelles de nombreux essais hydrogéologiques ont souvent été réalisés. Le choix de consultation de ces différentes études a permis d'acquérir des données dans des contextes géologiques/hydrogéologiques variés.

Les cartes hydrogéologiques auraient pu servir d'appoint à l'encodage réalisé au vu du chapitre de synthèse des paramètres hydrogéologiques. Cependant, les valeurs présentées dans les notices des cartes hydrogéologiques font majoritairement référence à d'autres études (dont les études de caractérisation régionales et les zones de prévention). Outre la redondance qui était à craindre, les cartes hydrogéologiques n'auraient apporté que des gammes de valeurs ou des moyennes, ce qui ne correspond pas à l'encodage réalisé dans le cadre de cette étude. Au final, il a donc été décidé de ne pas consulter les cartes hydrogéologiques pour l'inventaire et l'acquisition des données.

2.3. Encodage dans une base de données

Une base de données était nécessaire pour l'encodage et la consultation de l'inventaire des sources de données et des données hydrogéologiques valorisées. Cette base de données avait comme objectif d'être simple d'utilisation et d'encodage. A priori, la base de données '*BD-Hydro*' ne semblait pas adaptée au travail prévu au vu de sa structure d'encodage (de l'étude vers la donnée, entraînant un temps nécessaire important pour encoder un jeu de données...). Partant de ce constat, un nouvel outil a été développé.

Les données ont donc été encodées dans une base de données propre à la convention. Cette base de données sert également de base pour les calculs. Elle a été développée de telle sorte que l'information 'brute' soit conservée. Au vu du caractère spatial des études et des paramètres, la base de données doit permettre de distinguer les données du point de vue géographique, entre aquifères et au sein d'un même type d'aquifère notamment en vue d'analyses statistiques pertinentes. Pour cette raison, elle prend la forme d'une '*géodatabase*' (GDB).

La structure, l'encodage et les relations utilisées dans la base de données sont détaillés au chapitre 3.

2.4. Agrégation et traitements statistiques

La dernière partie du travail a porté sur la production des valeurs de référence des paramètres hydrogéologiques. Différentes statistiques ont été calculées afin d'explorer le jeu de données. Ces statistiques ont été calculées pour différentes échelles d'agrégation, tant du point de vue lithologique que géographique. Cette façon de procéder permet de comparer les résultats et de tendre vers la meilleure échelle d'agrégation des données afin de proposer des valeurs de référence optimales des paramètres hydrogéologiques. En plus

de ces grandeurs statistiques, les fréquences cumulées des paramètres ont été calculées pour les différentes classes des échelles d'agrégation.

Les différentes échelles d'agrégation ainsi que les traitements statistiques effectuées sont détaillés au chapitre 5.

3. Développement de la base de données

La présente convention prévoit le développement d'une base de données adaptée pour l'encodage et la consultation de l'inventaire des sources de données et des données hydrogéologiques à valoriser. La base de données développée dans le cadre du projet présente également un intérêt pour une réutilisation ultérieure à la convention. Sa structure et sa facilité d'encodage en font un outil facilement mis à jour.

3.1. Choix de la base de données

Les premières réflexions sur la structure de la base de données à développer ont permis d'écartier la possibilité d'utiliser la « BD-Hydro » pour encoder ces données, notamment à cause de sa structure d'encodage très ramifiée (lien de l'étude vers la donnée), ou encore vis-à-vis du temps d'encodage des données trop élevé au vu du nombre d'études existantes à traiter.

Par conséquent, une base de données spécifique au projet a été développée, la « **BD-SERAN** ». Cette base de données a été conçue afin de pouvoir encoder facilement et rapidement toutes les données contenues dans les études hydrogéologiques existantes et pouvant être valorisées par la suite. Étant donné le caractère spatial de certains types de données (localisation de piézomètres, délimitations des zones d'études, délimitations des masses d'eau, etc.), la création et l'utilisation d'une géodatabase paraissait logique. Une géodatabase est un ensemble de jeux de données géographiques de différents types (données géographiques de types 'points' ou 'polygones', données tabulaires, etc.) stockées généralement dans un dossier de système de fichier, ou dans une base de données Microsoft Access. Le choix définitif s'est porté sur une géodatabase contenue dans une base de données Microsoft Access, afin de permettre aux utilisateurs ne possédant pas de licence ArcGIS de pouvoir consulter et interroger la base de données via le logiciel Microsoft Access.

3.2. Structure de la géodatabase

La géodatabase contient d'une part les données brutes répertoriées dans les études hydrogéologiques, et d'autres parts les données valorisées sous la forme de valeurs de référence. Le schéma relationnel de la géodatabase est présenté à la Figure 1. Les domaines liés à ce schéma sont repris en Annexe.

Simple feature class						Geometry Polygon	
Projets						Contains M values: No	
						Contains Z values: No	
Field name	Data type	Allow nulls	Default value	Domain	Prec-ision	Scale	Length
OBJECTID	Object ID	Yes					
SHAPE	Geometry	Yes					
Intitule	String	Yes					255
Auteurs	String	Yes					255
Type	Short integer	Yes	0	Type_rapport	0		
Nappe_GRER	Short integer	Yes		GRER	0		
Nappe_SPAQuE	Short integer	Yes		SPAQuE	0		
Etendue	Short integer	Yes	0	Etendue	0		
Densite	Short integer	Yes	1	Densite	0		
SHAPE_Length	Double	Yes			0	0	
SHAPE_Area	Double	Yes			0	0	
ID	Long integer	Yes					
Annee	Long integer	Yes					
MESO	Short integer	Yes		MESO	0		
Contact	String	Yes					255
Nappe_GRER_rem	String	Yes					255
Nappe_SPAQuE_rem	String	Yes					50
MESO_rem	String	Yes					255

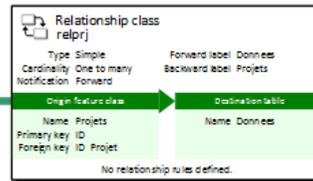


Table Donnees							
Field name	Data type	Allow nulls	Default value	Domain	Prec-ision	Scale	Length
OBJECTID	Object ID						
ID_Projet	Long integer	Yes			0		
ID_Point	Long integer	Yes			0		
Date_	Date	Yes			0	0	8
Remarques	String	Yes					255
Trapage	Short integer	Yes	0	Trapage	0		
K1	Double	Yes			0	0	
K2	Double	Yes			0	0	
K_ref	Double	Yes			0	0	
ne1	Double	Yes			0	0	
ne2	Double	Yes			0	0	
ne_ref	Double	Yes			0	0	
disp_long1	Double	Yes			0	0	
disp_long2	Double	Yes			0	0	
disp_long_ref	Double	Yes			0	0	
Infiltration	Double	Yes			0	0	
Type_essai	Short integer	Yes	0	Type_essai	0		
dist_trapage	String	Yes					255
Gradient	String	Yes					255

Simple feature class						Geometry Point	
Points						Contains M values: No	
						Contains Z values: No	
Field name	Data type	Allow nulls	Default value	Domain	Prec-ision	Scale	Length
OBJECTID	Object ID	Yes					
SHAPE	Geometry	Yes					
Nom	String	Yes					20
Type	Short integer	Yes	0	Type_points	0		
X	Double	Yes			0	0	
Y	Double	Yes			0	0	
Z	Double	Yes			0	0	
ID	Long integer	Yes					
ID_RW	Double	Yes			0	0	
Remarque	String	Yes					200
Lithologie	String	Yes					100

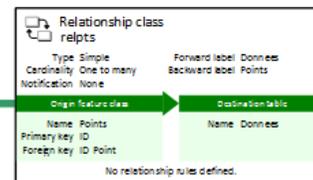


Figure 1 : Schéma relationnel des différentes couches de la géodatabase

3.3. Encodage des données hydrogéologiques

Afin d'encoder les données hydrogéologiques, trois couches de données ont été créées, reliées entre-elles par des relations de classes.

- Une couverture spatiale « Zone d'étude », délimitant spatialement les limites du projet et leurs propriétés ;
- Une couverture spatiale « Point », localisant spatialement les points de mesures et leurs propriétés ;
- Une couverture tabulaire « Données », contenant les types de paramètres et leurs valeurs associées ;
- Une relation de classe « Projet-Données », permettant de retrouver tous les paramètres spécifiques à un projet ;
- Une relation de classe « Points-Données », permettant de retrouver tous les paramètres spécifiques à un point de mesure.

Une ou plusieurs couvertures supplémentaires pourraient être créées à l'issue de la valorisation des données, sous la forme de 'shapefiles' de types polygones reposant sur les limites de nappes, et contenant les valeurs de références obtenues statistiquement dans le cadre du projet.

Le Tableau 3-1 reprend les trois principales couches de données de la géodatabase et les champs qui lui sont associés :

Tableau 3-1 : Description des couches et des champs de la géodatabase

Couverture spatiale	Nom du champ	Description
Zone d'étude	ID	Identifiant de l'étude (propre à la convention)
	Titre	Titre de l'étude
	Auteurs	Auteurs de l'étude
	Type	Type de rapport (thèse, bureau d'étude, etc.)
	Année	Année de publication du rapport
	MESO	Masse d'eau souterraine concernée
	Nappe_GRER	Nappe GRER concernée
	Nappe_SPAQuE	Nappe SPAQuE concernée
	Etendue	Étendue du projet (locale, régionale)
	Densité	Densité d'informations (Faible, moyen, élevé)

	MESO_rem	Indique si plusieurs masses d'eaux sont concernées
	Nappe_GRER_rem	Indique si plusieurs nappes GRER sont concernées
	Nappe_SPAQuE_rem	Indique si plusieurs nappes SPAQuE sont concernées
	Contact	Spécifie une adresse de contact (mail, organisme, téléphone, etc...)
Point	ID	Identifiant du point de mesure (propre à la convention)
	Nom	Nom du point de mesure
	Type	Type de point de mesure
	X	Coordonnées X
	Y	Coordonnées Y
	Z	Profondeur de l'ouvrage
	ID_RW	Identifiant région wallonne du point de mesure
	Lithologie	Lithologie rencontrée au droit du point de mesure
Données	ID_Projet	Identifiant de l'étude concernée
	ID_Point	Identifiant du point de mesure concerné
	Date	Date de la mesure
	Remarques	Remarques particulières sur la mesure
	Traçage	Spécifie si la mesure est issue d'un test de traçage
	Dist_traçage	Spécifie la distance entre le point d'injection et le point de restitution
	Type_essai	Précise le type d'essai (slug test, essai de pompage, etc.)
	K1	Valeur de conductivité hydraulique minimum (LT^{-1})
	K2	Valeur de conductivité hydraulique maximum (LT^{-1})
	K_ref	Valeur de conductivité hydraulique de référence (moyenne géométrique de l'ensemble des valeurs de l'essai) (LT^{-1})

	ne1	Valeur minimum de porosité efficace de transport (%)
	ne2	Valeur maximum de porosité efficace de transport
	ne_ref	Valeur de référence porosité efficace de transport (%)
	disp_long1	Valeur de dispersivité longitudinale minimum (L)
	disp_long2	Valeur de dispersivité longitudinale maximum (L)
	disp_long_ref	Valeur de dispersivité longitudinale de référence (L)
	infiltration	Valeur d'infiltration (L)

4. Vue d'ensemble de l'encodage des données

De nombreuses valeurs ont été encodées durant l'acquisition des données. Afin d'avoir une vue globale sur l'ensemble du jeu de données, une quantification globale du nombre de données a été effectuée.

Au total, 172 études ont été encodées (Annexe 1). L'ensemble de ces études représentent 795 points de mesures (Figure 2) pour lesquels au moins une valeur de paramètre a été encodée. Sur ces points, la lithologie a été encodée pour la majorité d'entre eux à l'exception de 216 ouvrages, dont 81 pour la zone du sud Luxembourg et 135 concernant les masses d'eau calcaires. L'encodage de la lithologie dans la base de données a été décidé en cours de projet et l'encodage antérieur à cette décision explique le manque d'informations pour ces ouvrages. Faut de temps, il n'a pas été possible de refaire le travail sur ces études. Vu la forte hétérogénéité du sous-sol dans ces zones, aucune association de la lithologie de la masse d'eau n'a été tentée à posteriori pour ne pas biaiser le jeu de données.

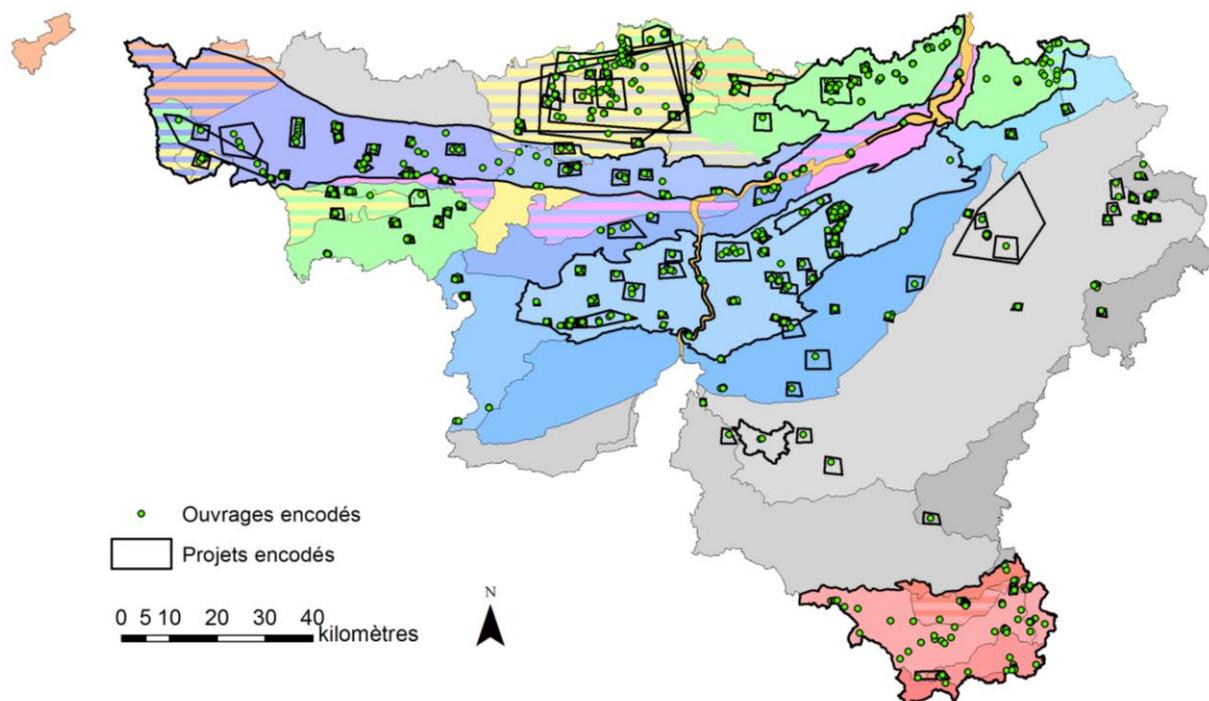


Figure 2 : Localisation des études et des ouvrages encodés dans la base de données

Sur le jeu de données, la majorité des encodages (773 points) concernent des valeurs de conductivité hydraulique (K). Environ 150 points correspondent à des valeurs de porosité efficace (n_e) et de dispersivité longitudinale (α_L). Finalement, très peu de valeurs d'infiltration ont été identifiées et donc encodées (7).

La répartition du nombre d'études, de points et des différents paramètres encodés (K , n_e , α_L) est reprise dans les tableaux suivants. Les différentes classifications utilisées lors de l'encodage sont présentées.

Du point de vue des lithologies (Tableau 4-1), la majorité des études et des données concernent les calcaires et les craies. Comme mentionné précédemment, un nombre important d'ouvrages n'ont pas de lithologie associée du fait que la décision concernant l'encodage de cette lithologie a été prise après le début de la consultation des études. Vu le faible nombre d'ouvrages situés dans les dolomies, ceux-ci ont été regroupés avec les calcaires. Du point de vue de la conductivité hydraulique, les différentes lithologies sont relativement bien représentées à l'exception des argiles et des marnes. En ce qui concerne la porosité efficace et la dispersivité, seuls les calcaires et les craies présentent a priori un jeu de données assez important pour être traités de manière statistique.

Tableau 4-1 : Répartition du nombre d'études et de points encodés ainsi que des différents paramètres en fonction de la lithologie

Lithologie	Etudes	Points	K	n_e	αL
Calcaire	51	178	176	45	45
Grès	10	18	18	5	5
Sable	21	64	63	7	7
Argile	6	10	10	/	/
Craies	30	168	165	49	47
Gravier	7	46	41	9	8
Marne	4	15	15	2	2
Schisto-gréseux	29	80	80	16	10
Non déterminé	14	216	205	21	19
Total	172	795	773	154	143

En ce qui concerne la répartition des études en fonction des principales nappes, différentes classifications ont été utilisées. La classification par nappe actuellement utilisée dans le GRER a évidemment été conservée afin d'être comparée aux valeurs de référence actuellement utilisées. En plus de celle-ci, une classification selon l'EuroWaterNet (issu de SPAQuE 2005) et les masses d'eau souterraine a également été utilisée.

La classification EuroWaterNet est un regroupement par apparemment hydrogéologique en une vingtaine d'aquifères principaux appelés macro-nappes. Il s'agit d'une classification intermédiaire entre celle utilisée actuellement dans le GRER et la classification par masses d'eau souterraine. Il a semblé opportun d'encoder cette classification afin de disposer de différentes échelles de travail pour effectuer des tests d'agrégation des données.

Du point de vue de la classification du GRER (Tableau 4-2), la majorité des données est issue des nappes des calcaires et du Crétacé. Les conductivités hydrauliques sont bien représentées pour les différentes classes mais seules les craies et les calcaires disposent de suffisamment de points pour effectuer un traitement statistique sur la porosité efficace et la dispersivité.

A titre de comparaison, le nombre d'études utilisées par le groupe de travail pour établir les valeurs de référence en 2002 est également présenté. Bien que le nombre d'études ne reflète pas forcément le nombre de données qu'elles contiennent, une nette augmentation du nombre d'études utilisées pour établir les valeurs de référence est constatée. Cette augmentation concerne essentiellement la nappe du Crétacé, la nappe des calcaires et la nappe des schistes et grès.

Tableau 4-2 : Répartition du nombre d'études et de points encodés ainsi que des différents paramètres en fonction de la classification utilisée actuellement dans le GRER ; le nombre d'étude utilisée par le groupe de travail est également présenté

Nappe GRER	Nombre d'étude		Points	K	n _e	α _L
	Convention (2016)	Groupe de travail SPAQuE (2002)				
Alluviale	9	4	65	56	9	8
Crétacé	29	3	173	172	49	49
Bruxellien	16	6	47	47	6	6
Calcaire	79	7	330	318	67	63
Sinémurien	6	3	101	101	6	6
Schistes et grès	32	1	76	76	17	11
Non exploitable	1	/	3	3	/	/
Total	172	24	795	773	154	143

Les classifications EuroWaterNet (Tableau 4-3) et par masses d'eau souterraine (Tableau 4-4) présentent une échelle de travail plus fine ce qui a pour conséquence une diminution du nombre de projets/points associées à chacune des classes, celles-ci étant plus nombreuses. Seules les valeurs de conductivité hydraulique ont fait l'objet d'un traitement statistique. A nouveau, les nappes calcaires et les craies présentent le plus de données. Certaines classes n'ont aucune données (BE011, BE013 et BE016 pour la classification EuroWaterNet et RWE031, RWE060, RWM052, RWM091 et RWM094 pour la classification des masses d'eau).

Tableau 4-3 : Répartition du nombre d'études et de points encodés ainsi que des différents paramètres en fonction de la classification EuroWaterNet

EuroWaterNet		Etudes	Points	K	n _e	α _L
BE001	Calcaires du bord Nord du bassin de Namur	21	117	114	25	24
BE002	Calcaires carbonifères du bassin de Dinant	40	170	162	33	32
BE003	Craies du bassin de Mons	12	55	54	11	11
BE004	Craies de Hesbaye	11	63	60	34	32
BE005	Sables bruxelliens	15	47	46	6	6
BE006	Calcaires carbonifères du Tournaisis	3	9	9	/	/
BE007	Graviers de la Meuse	8	46	41	9	8
BE008	Craies captives du Brabant	5	36	36	4	4
BE009	Formations jurassiques du Sud-Luxembourg	6	101	101	6	6
BE010	Massif schisto-gréseux de l'Ardenne	31	76	76	16	10
BE011	Massif schisto-gréseux du bassin de Dinant	/	/	/	/	/
BE012	Calcaires dévonien du bassin de Dinant	11	29	28	6	6
BE013	Socle cambro-silurien de l'Ardenne	/	/	/	/	/
BE014	Aquifère du massif de la Vesdre	2	6	6	2	2
BE015	Crétacé du pays de Herve	2	19	19	/	/
BE016	Socle cambro-silurien du Brabant	/	/	/	/	/
	Autre/Multiple	5	21	21	2	2
Total		172	795	773	154	143

Tableau 4-4 : Répartition du nombre d'études et de points encodés ainsi que des différents paramètres en fonction de la classification des masses d'eau souterraine

Masse d'eau souterraine (MESO)		Etudes	Points	K	n _e	α _L
RWE013	Calcaires de Peruwelz-Ath-Soignies	16	77	74	15	15
RWE017	Houiller	1	3	3	/	/
RWE030	Craies du bassin de la Haine	11	49	49	10	10
RWE031	Sables de la vallée de la Haine	/	/	/	/	/
RWE032	Craies de la vallée de la Deûle	1	6	5	1	1
RWE051	Sables du Bruxellien	14	57	56	6	6
RWE053	Sables du Landénien (Est)	1	3	3	/	/
RWE060	Calcaires du Tournaisis	/	/	/	/	/
RWE061	Sables des Flandres	/	/	/	/	/
RWE080	Craies captives du Brabant	5	39	39	4	4
RWE160	Socle du Brabant	5	14	14	5	1
RWM011	Calcaires du bassin de la Meuse bord Nord	8	45	45	10	9
RWM012	Calcaires du bassin de la Meuse bord Sud	5	13	13	4	4
RWM021	Calcaires et Grès du Condroz	35	157	149	29	28
RWM022	Calcaires et Grès du bassin de la Sambre	4	15	14	5	5
RWM023	Calcaires et Grès de la Calestienne et de la Famenne	8	15	15	1	1
RWM040	Craies du bassin du Geer	10	62	59	33	31
RWM041	Sables et Craies de la Mehaigne	1	1	1	1	1
RWM052	Sables Bruxelliens Haine et Sambre	/	/	/	/	/
RWM071	Alluvions et Graviers de la Meuse (amont de Namur)	1	2	2	1	1
RWM072	Alluvions et Graviers de la Meuse (Namur - Lanaye)	5	37	33	7	6
RWM073	Alluvions et Graviers de la Meuse (Engis - Herstal)	2	7	6	1	1
RWM091	Conglomérats du Rhétien (Trias supérieur)	/	/	/	/	/
RWM092	Lias inférieur (Sinémurien)	2	14	14	2	2
RWM093	Lias supérieur (Domérien)	2	7	7	2	2
RWM094	Calcaires du Bajocien-Bathonien (Dogger)	/	/	/	/	/
RWM100	Grès et schistes du massif ardennais	21	50	50	10	8
RWM102	Grès et schistes du massif ardennais: bassin de la Roer	2	4	4	/	/
RWM103	Grès et schistes du massif ardennais: Semois,	1	1	1	/	/

	Chiers et Viroin					
RWM141	Calcaires et grès du bassin de la Gueule	2	5	5	2	2
RWM142	Calcaires et grès du bassin de la Vesdre	1	3	3	/	/
RWM151	Craies du Pays de Herve	2	19	19	/	/
RWR092	Grès du Luxembourg (Sinémurien - Lias inférieur)	1	6	6	1	1
RWR101	Grès et Schistes du massif ardennais: bassin de la Moselle	2	7	7	1	1
	Multiple	3	77	77	1	3
	Total	172	795	773	154	143

5. Propositions d'agrégation des données

Un traitement du jeu de données encodées est nécessaire afin de proposer des valeurs de référence pour les paramètres hydrogéologiques intervenant dans les études de risque. Différentes approches ont été utilisées afin de fournir le plus d'informations possibles et d'être représentatifs des différents contextes géologiques/hydrogéologiques de Wallonie. Quatre agrégations ont été testées, d'une part sur base de la lithologie principale dans laquelle le test a été réalisé et d'autre part sur base de différentes classifications hydrogéologiques des nappes d'eau souterraine (classification actuelle du GRER, EuroWaterNet et masses d'eau souterraine). Les valeurs de conductivité hydraulique ont été traitées pour l'ensemble des échelles d'agrégation proposées. Dans le cas où le jeu de données était suffisant, les données de porosité efficace et de dispersivité ont également été traitées. Ces valeurs proviennent d'essai de traçage réalisés sur des distances qui peuvent fortement varier, or certains paramètres de transport (la dispersivité longitudinale en particulier) sont connus pour être fortement dépendant de l'échelle à (la distance sur) laquelle l'essai a été réalisé. Afin de tenter de s'affranchir de ce facteur, la valeur de dispersivité (α_L) a été divisée par la distance de traçage. En outre, certaines données de porosité efficace semblant complètement aberrantes et ont été écartées du jeu de données pour ne pas fausser les résultats.

Pour chaque agrégation réalisée, différentes grandeurs statistiques ont été calculées sur le jeu de données : la valeur minimale, le 1^{er} quartile (percentile 25), la moyenne arithmétique, la moyenne géométrique, la médiane (percentile 50), le 3^{ème} quartile (percentile 75), le percentile 90 et la valeur maximale. Les classes présentées dans le tableau de synthèse des statistiques réalisées sont classées par ordre décroissant selon le 3^{ème} quartile (P75).

En plus de ces grandeurs statistiques, la fréquence cumulée a également été calculée et est représentée sous forme de graphe.

5.1. Agrégation sur base de la lithologie

Afin de s'affranchir d'une dépendance à une zone géographique précise, le jeu de données a été agrégé sur base uniquement de la lithologie principale renseignée pour l'ouvrage sur lequel le test hydrogéologique a été réalisé. Vu le nombre important de données au niveau des calcaires et des craies, une différenciation géographique de ces lithologies a néanmoins été effectuée.

Différenciation sur base de la lithologie principale

L'agrégation sur base de la lithologie principale est présentée à la Figure 3 sous forme de fréquences cumulées et sous forme de « boxplot » à la Figure 4. Figure 4 : Boxplot des valeurs de conductivités hydrauliques (m/s) pour les différentes lithologies encodées. Les valeurs statistiques précédemment décrites sont synthétisées au Tableau 5-1.

Les fréquences cumulées montrent clairement une différenciation du jeu de données. Les graviers (P75 : 1.2×10^{-2} m/s) sont caractérisés par des valeurs de conductivité hydraulique nettement plus élevées que les autres lithologies. Les sables (P75 : 7.17×10^{-4} m/s) présentent également des valeurs de conductivité hydraulique plus importantes que le reste du jeu de données. A l'opposé, les lithologies de type schisto-gréseux (P75 : 4.51×10^{-5} m/s) et les grès (P75 : 7.29×10^{-5} m/s) présentent les valeurs de conductivité hydraulique les plus faibles.

De manière assez surprenante, les valeurs de conductivité hydraulique associées à ce que les sources d'information consultées qualifient d'« argiles » ou de « marnes » présentent des valeurs de conductivité hydraulique anormalement élevées par rapport à ce que l'on serait en droit d'attendre dans de tels contextes géologiques (argile : P75 = 9×10^{-4} m/s ; marne : P75 = 1.13×10^{-3} m/s). Différentes explications peuvent être avancées. Peu de données sont disponibles pour ces lithologies (10 pour les argiles et 15 pour les marnes) et le traitement statistique qui leur est appliqué est probablement peu représentatif. De plus, les ouvrages concernés sont généralement implantés dans des milieux hétérogènes et c'est la lithologie dominante qui a été considérée. Pour peu qu'il y ait quelques passées plus sableuses dans un matériau à dominance argileuse ou marneuse, la conductivité hydraulique de l'ensemble serait essentiellement contrôlée par ces niveaux plus perméables. Il est également possible que les essais réalisés sur les ouvrages (pompage) aient été interprétés par des méthodes non adaptés (ex : pas de prise en compte de la capacité du piézomètre testé ...). Enfin, dans des matériaux qualifiés d'argiles ou de marnes, si un test hydraulique de type essai de pompage a pu être réalisé c'est que l'on est effectivement sur un forage qui recoupe un milieu plus perméable, sans quoi l'essai n'aurait rien donné. Il y a donc probablement un biais vers les valeurs élevées de conductivité hydraulique.

Partant de ces constats, les valeurs obtenus sur ces formations « argileuses » et « marneuses » ont été jugés peu représentatifs, voire peu fiables et ils n'ont pas été conservés pour le calcul des valeurs de référence (cf. chapitre 6). Les valeurs et statistiques associées ne sont donc reprises ni à la Figure 5, ni au Tableau 5-1.

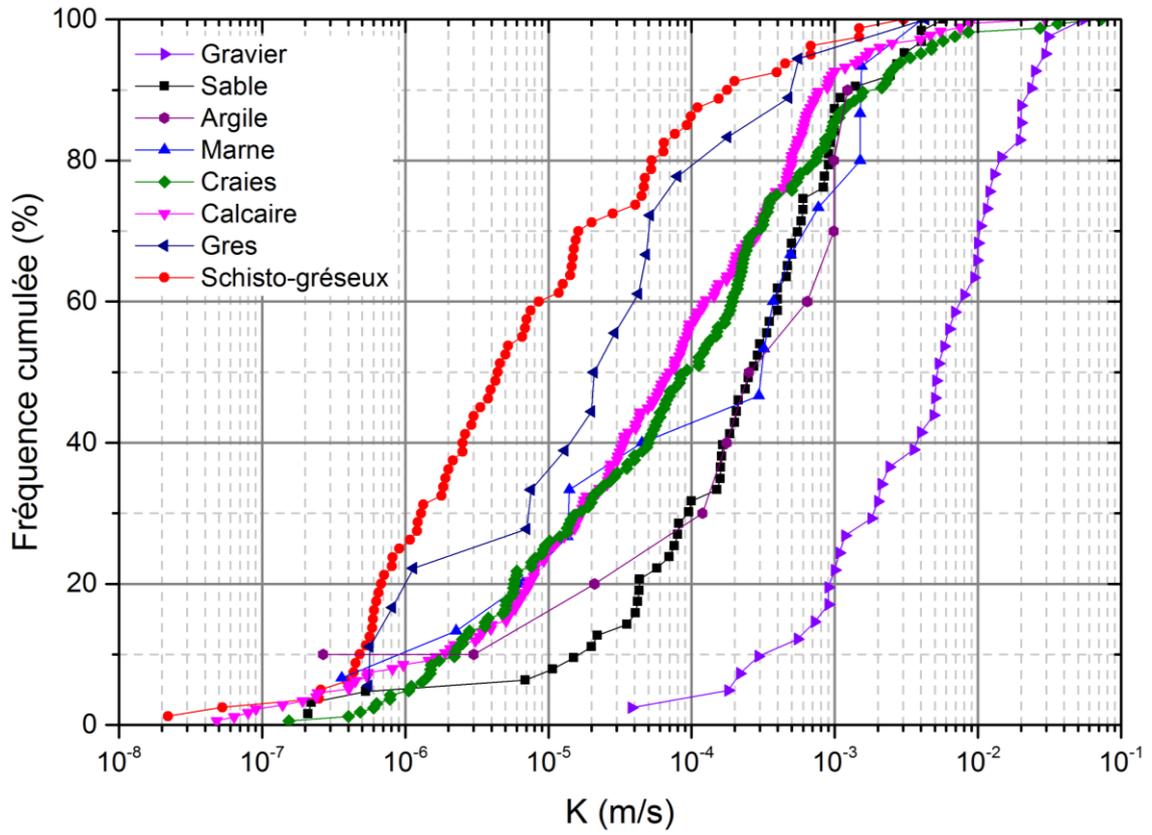


Figure 3 : Fréquence cumulée de la conductivité hydraulique pour les différentes lithologies encodées

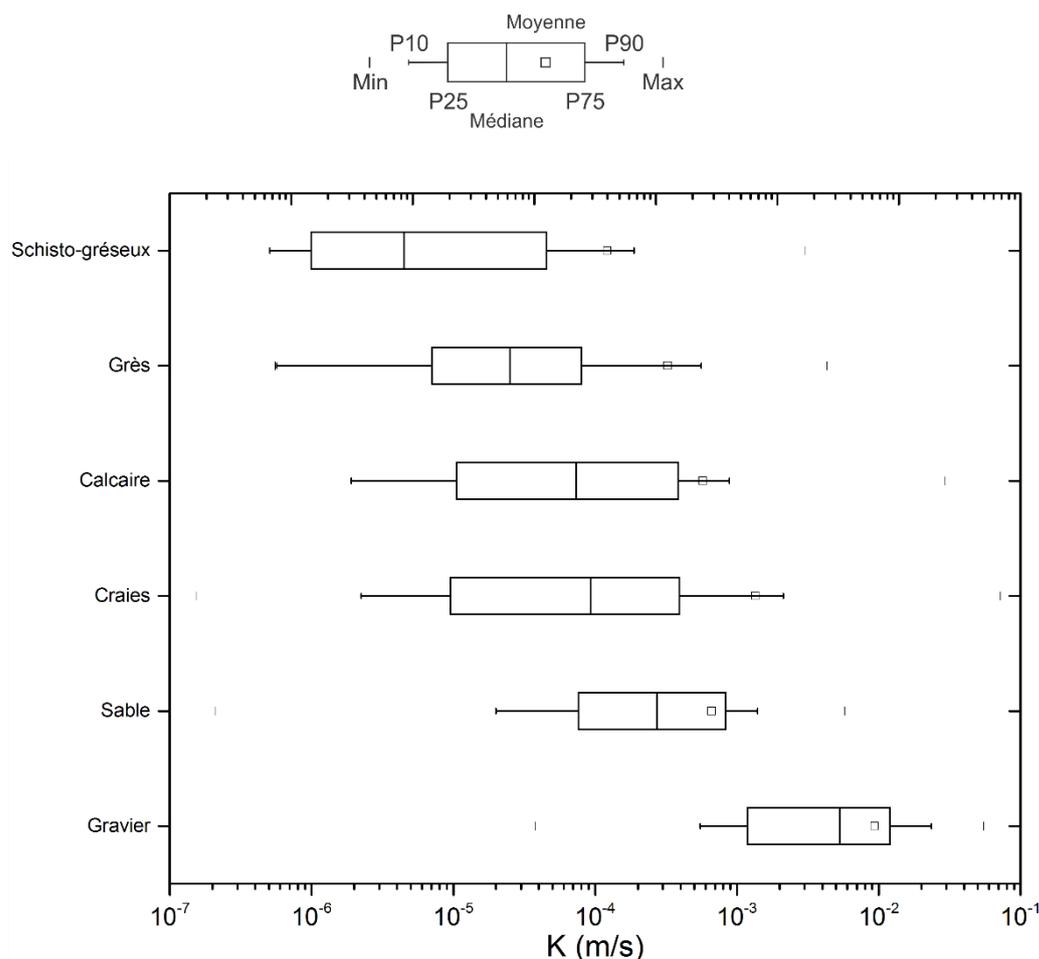


Figure 4 : Boxplot des valeurs de conductivités hydrauliques (m/s) pour les différentes lithologies encodées

Tableau 5-1 : Grandeurs statistiques calculées pour l'agrégation du jeu de données sur base de la lithologie (classé selon un ordre décroissant du 3^{ème} quartile) ; les marnes et les argiles ont été écartées du jeu de données car considérées comme non représentatives

	Gravier	Sable	Craie	Calcaire	Grès	Schisto-gréseux
Nombre ouvrages	41	63	165	176	18	80
Min	$3,81 \times 10^{-5}$	$2,09 \times 10^{-7}$	$1,54 \times 10^{-7}$	$4,83 \times 10^{-8}$	$5,55 \times 10^{-7}$	$2,20 \times 10^{-8}$
1er quartile	$1,18 \times 10^{-3}$	$7,80 \times 10^{-5}$	$9,50 \times 10^{-6}$	$1,08 \times 10^{-5}$	$7,20 \times 10^{-6}$	$1,04 \times 10^{-6}$
Moyenne arith.	$9,37 \times 10^{-3}$	$6,66 \times 10^{-4}$	$1,35 \times 10^{-3}$	$5,75 \times 10^{-4}$	$3,26 \times 10^{-4}$	$1,22 \times 10^{-4}$
Moyenne geom.	$3,97 \times 10^{-3}$	$1,91 \times 10^{-4}$	$7,53 \times 10^{-5}$	$5,42 \times 10^{-5}$	$2,34 \times 10^{-5}$	$6,82 \times 10^{-6}$
Médiane	$5,30 \times 10^{-3}$	$2,72 \times 10^{-4}$	$9,30 \times 10^{-5}$	$7,32 \times 10^{-5}$	$2,50 \times 10^{-5}$	$4,51 \times 10^{-6}$
3ème quartile	$1,20 \times 10^{-2}$	$7,17 \times 10^{-4}$	$3,92 \times 10^{-4}$	$3,84 \times 10^{-4}$	$7,29 \times 10^{-5}$	$4,51 \times 10^{-5}$
P90	$2,35 \times 10^{-2}$	$1,34 \times 10^{-3}$	$1,90 \times 10^{-3}$	$8,25 \times 10^{-4}$	$5,02 \times 10^{-4}$	$1,79 \times 10^{-4}$
Max	$5,50 \times 10^{-2}$	$5,74 \times 10^{-3}$	$7,23 \times 10^{-2}$	$2,95 \times 10^{-2}$	$4,32 \times 10^{-3}$	$3,02 \times 10^{-3}$

La lithologie semble également influencer l'allure de la courbe de fréquence cumulée. Pour le mettre en évidence, le graphe de fréquence cumulée en fonction du rapport de la conductivité hydraulique par rapport à la médiane de conductivité hydraulique ($K / K_{\text{médiane}}$)

a été tracé (Figure 5). Ce graphe permet de croiser toutes les courbes à la fréquence cumulée de 50% et ainsi de mettre en évidence les différences d'étalement. Les milieux poreux (graviers et sables) présentent une sigmoïde bien régulière tandis que les milieux rocheux (potentiellement fracturés) tels que les terrains calcaires ou schisto-gréseux présentent une dissymétrie vers les valeurs élevées. Ceci se reflète également sur la différence d'ordre de grandeur entre les valeurs minimales et maximales (3 ordres de grandeur pour les graviers et 6 ordres de grandeurs pour les calcaires).

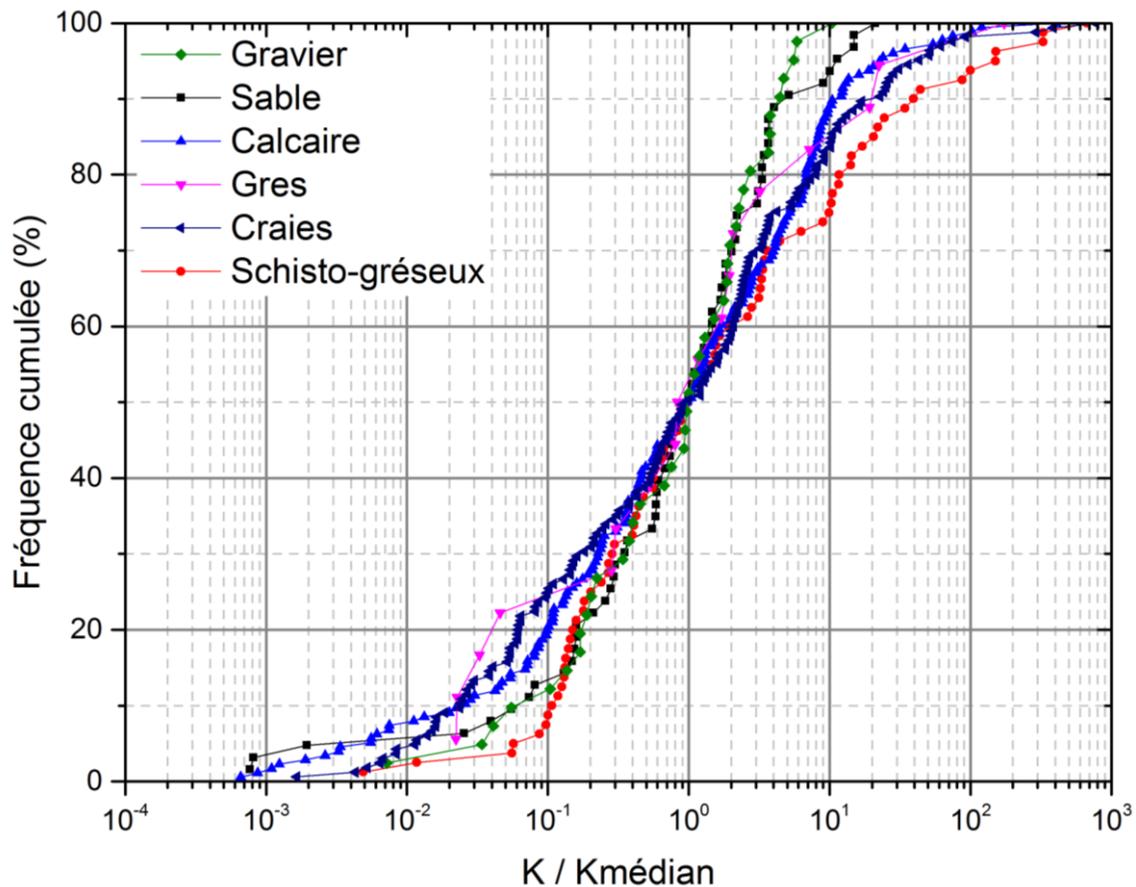


Figure 5 : Fréquence cumulée du rapport de conductivité hydraulique par la médiane de la conductivité hydraulique pour les différentes lithologies encodées

Le même travail a été effectué en ce qui concerne la porosité efficace (Figure 6) et la dispersivité (Figure 7) pour les calcaires et les craies. Du point de vue de la porosité efficace, les calcaires présentent un étalement moindre que les craies. Les valeurs varient globalement entre 0.1 et 5%. Du point de vue du ratio dispersivité/distance de traçage, aucune différence ne semble vraiment se marquer entre les deux lithologies. Les valeurs varient entre 0.1 et 0.7 m/m.

A titre de comparaison, le graphe des fréquences cumulées de la dispersivité est également présenté (Figure 8) sans normation par rapport à la distance de traçage. Sans cette normation par la distance de traçage, un écart se marque entre les calcaires et les craies, avec des valeurs de dispersivité longitudinale plus importante pour les calcaires que pour les craies.

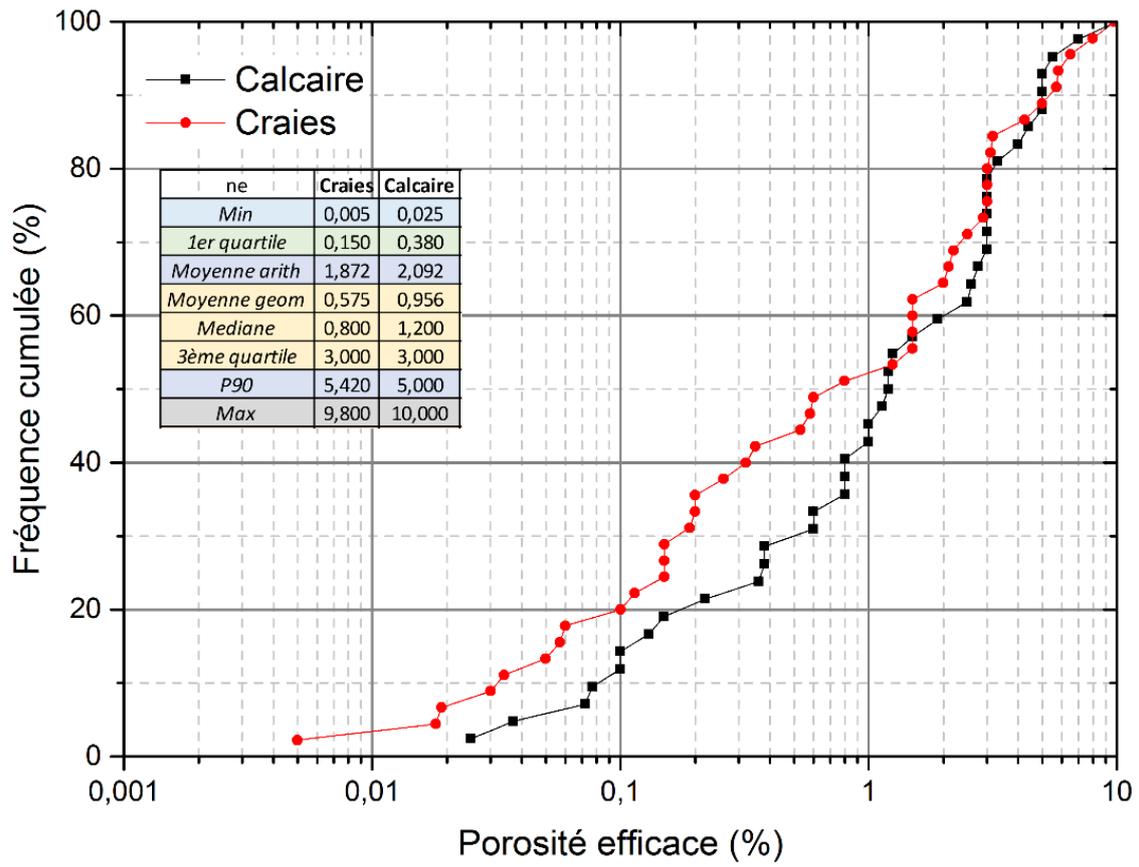


Figure 6 : Fréquence cumulée et grandeurs statistiques de porosité efficace pour les calcaires et les craies (classification sur base de la lithologie)

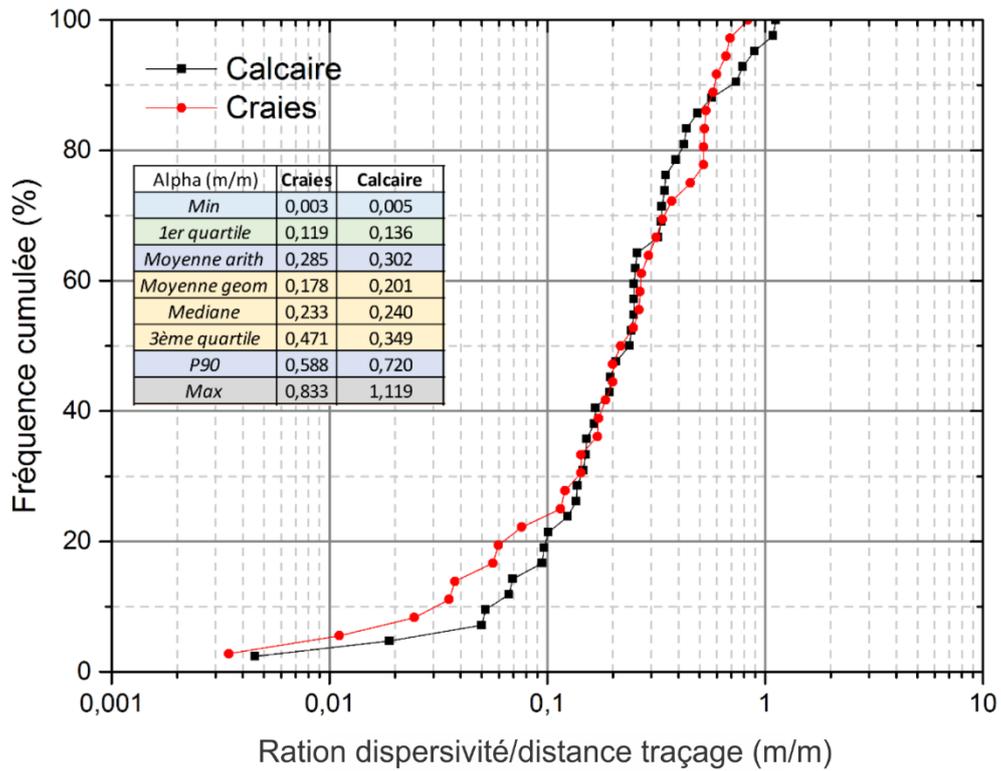


Figure 7 : Fréquence cumulée et grandeurs statistiques de dispersivité (divisée par la distance de traçage) pour les calcaires et les craies (classification sur base de la lithologie)

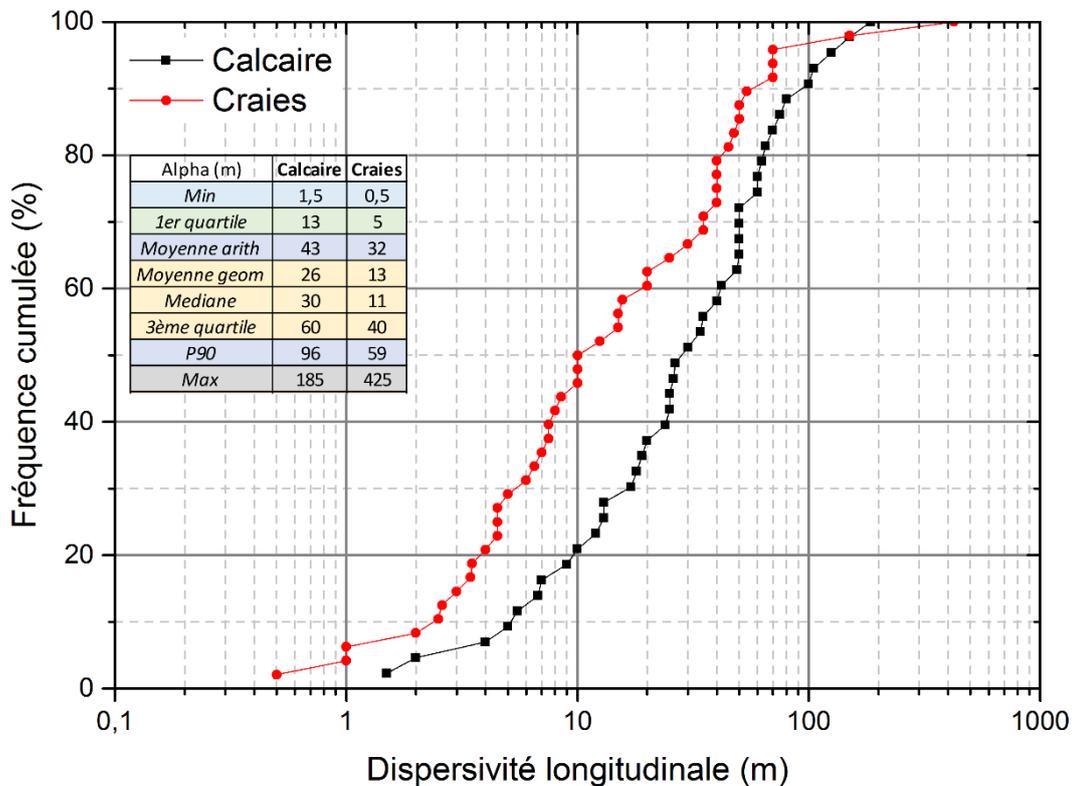


Figure 8 : Fréquence cumulée et grandeurs statistiques de dispersivité (sans normation par rapport à la distance de traçage) pour les calcaires et les craies (classification sur base de la lithologie)

Différenciation au sein des calcaires

Le jeu de données est assez important au niveau de certaines lithologies calcaires et le traitement statistique a pu être réalisé en les différenciant par zones géographiques. Les fréquences cumulées de conductivité hydraulique sont présentées à la Figure 3 tandis que les grandeurs statistiques sont présentées au Tableau 5-2. Les zones du bassin de la Gueule, de la Calestienne-Famenne ainsi que du Lias inférieur ne disposent toutefois pas de suffisamment de données pour faire l'objet d'un traitement statistique rigoureux. Une différenciation de conductivités hydrauliques se marque entre les différentes classes représentées. Les calcaires de Peruwelz (P75 : 8.90×10^{-4} m/s) et les calcaires de la Sambre (P75 : 5.62×10^{-4} m/s) présentent des valeurs de conductivités hydrauliques plus importantes que les calcaires du Condroz et de Meuse.

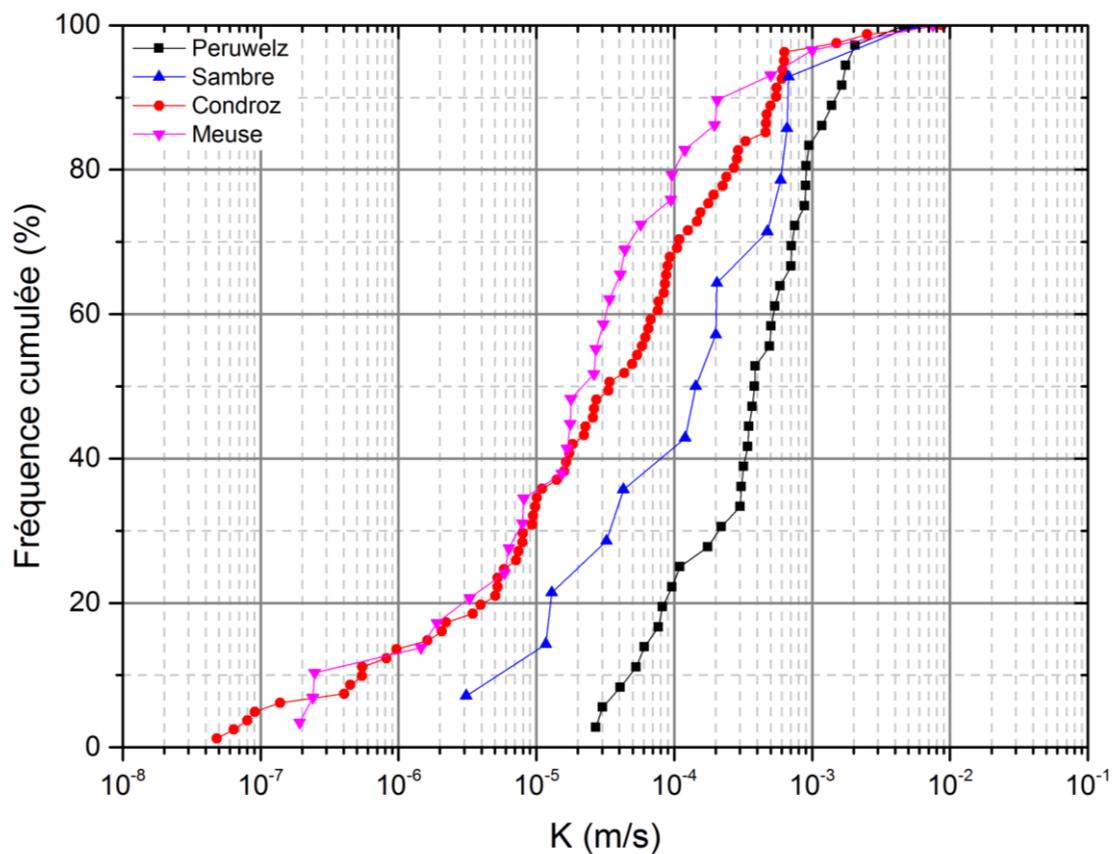


Figure 9 : Fréquence cumulée de la conductivité hydraulique (m/s) pour les différentes zones géographiques correspondant à des calcaires

Tableau 5-2 : Grandeurs statistiques calculées sur base de la différenciation sur base géographiques des points situés dans les calcaires (classé selon un ordre décroissant du 3^{ème} quartile)

K (m/s)	Lias	Peruwelz	Sambre	Condroz	Meuse	Calestienne-Famenne	Gueule
Nombre ouvrages	2	36	14	81	29	3	1
Min	$3,96 \times 10^{-3}$	$2,70 \times 10^{-5}$	$3,09 \times 10^{-6}$	$4,83 \times 10^{-8}$	$1,92 \times 10^{-7}$	$3,98 \times 10^{-6}$	$6,72 \times 10^{-6}$
1er quartile	$1,03 \times 10^{-2}$	$1,59 \times 10^{-4}$	$3,49 \times 10^{-5}$	$7,14 \times 10^{-6}$	$6,32 \times 10^{-6}$	$5,60 \times 10^{-6}$	$6,72 \times 10^{-6}$
Moyenne arith.	$1,67 \times 10^{-2}$	$6,75 \times 10^{-4}$	$6,18 \times 10^{-4}$	$2,75 \times 10^{-4}$	$3,47 \times 10^{-4}$	$8,80 \times 10^{-6}$	$6,72 \times 10^{-6}$
Moyenne géom.	$1,08 \times 10^{-2}$	$3,52 \times 10^{-4}$	$1,28 \times 10^{-4}$	$2,70 \times 10^{-5}$	$2,11 \times 10^{-5}$	$7,59 \times 10^{-6}$	$6,72 \times 10^{-6}$
Médiane	$1,67 \times 10^{-2}$	$3,86 \times 10^{-4}$	$1,72 \times 10^{-4}$	$3,39 \times 10^{-5}$	$2,61 \times 10^{-5}$	$7,22 \times 10^{-6}$	$6,72 \times 10^{-6}$
3ème quartile	$2,31 \times 10^{-2}$	$8,90 \times 10^{-4}$	$5,62 \times 10^{-4}$	$1,77 \times 10^{-4}$	$9,46 \times 10^{-5}$	$1,12 \times 10^{-5}$	$6,72 \times 10^{-6}$
P90	$2,69 \times 10^{-2}$	$1,52 \times 10^{-3}$	$6,69 \times 10^{-4}$	$5,50 \times 10^{-4}$	$2,64 \times 10^{-4}$	$1,36 \times 10^{-5}$	$6,72 \times 10^{-6}$
Max	$2,95 \times 10^{-2}$	$4,62 \times 10^{-3}$	$5,48 \times 10^{-3}$	$8,77 \times 10^{-3}$	$7,50 \times 10^{-3}$	$1,52 \times 10^{-5}$	$6,72 \times 10^{-6}$

Différenciation au sein des craies

Le même travail de séparation par zone géographique a été réalisé au niveau des craies (Figure 10 et Tableau 5-3). Une seule donnée étant disponible pour les craies de la Meuse, cette classe a été associée aux craies du Geer sous l'appellation craies de Hesbaye. Les craies du Pays de Herve (P75 : $3,35 \times 10^{-5}$ m/s) se différencient nettement du jeu de données et présentent des valeurs de conductivité hydraulique plus faible que les autres unités.

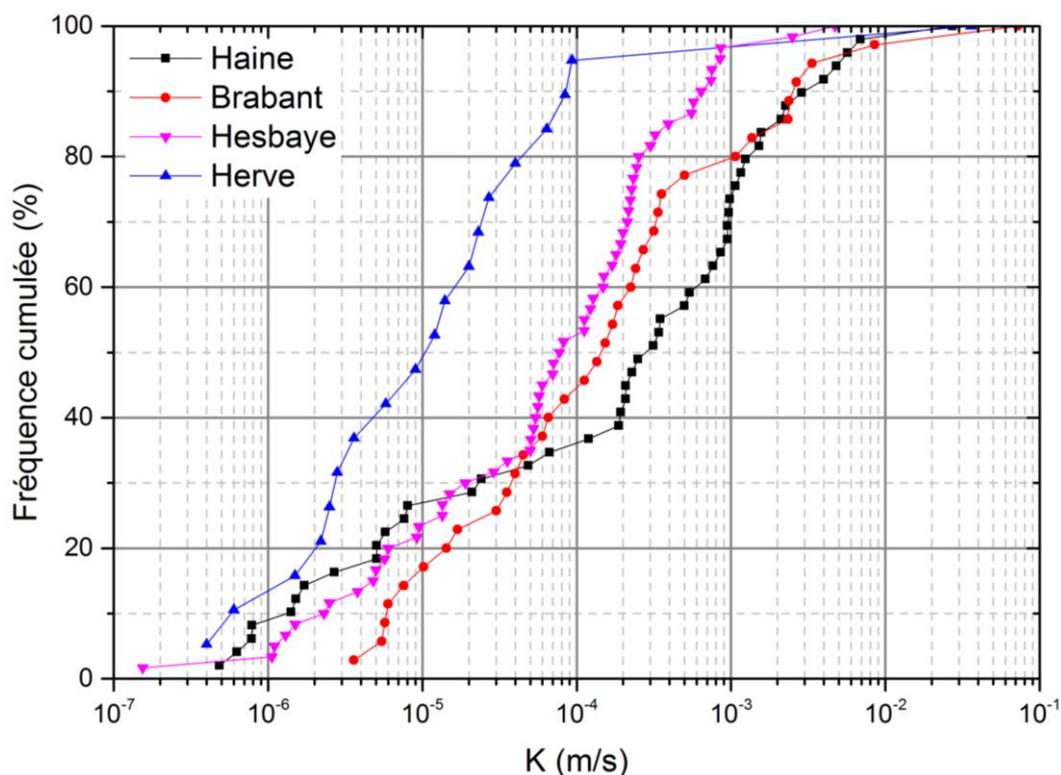


Figure 10 : Fréquence cumulée de la conductivité hydraulique (m/s) pour les différentes zones géographiques correspondant aux craies

Tableau 5-3: Grandeurs statistiques calculées sur base de la différenciation sur base géographiques des points situés dans les craies (classé selon un ordre décroissant du 3^{ème} quartile)

K (m/s)	Craies de la Haine	Craies du Brabant	Craies de Hesbaye	Craies du Pays de Herve
Nombre ouvrages	49	35	60	19
Min	$4,85 \times 10^{-7}$	$3,60 \times 10^{-6}$	$1,54 \times 10^{-7}$	$4,00 \times 10^{-7}$
1er quartile	$8,03 \times 10^{-6}$	$3,27 \times 10^{-5}$	$1,35 \times 10^{-5}$	$2,65 \times 10^{-6}$
Moyenne arith	$1,47 \times 10^{-3}$	$2,78 \times 10^{-3}$	$2,87 \times 10^{-4}$	$1,92 \times 10^{-3}$
Moyenne geom	$1,39 \times 10^{-4}$	$1,47 \times 10^{-4}$	$5,83 \times 10^{-5}$	$1,30 \times 10^{-5}$
Médiane	$3,14 \times 10^{-4}$	$1,53 \times 10^{-4}$	$7,97 \times 10^{-5}$	$1,20 \times 10^{-5}$
3ème quartile	$1,07 \times 10^{-3}$	$4,27 \times 10^{-4}$	$2,29 \times 10^{-4}$	$3,35 \times 10^{-5}$
P90	$3,10 \times 10^{-3}$	$2,55 \times 10^{-3}$	$6,51 \times 10^{-4}$	$8,58 \times 10^{-5}$
Max	$2,72 \times 10^{-2}$	$7,23 \times 10^{-2}$	$4,72 \times 10^{-3}$	$3,60 \times 10^{-2}$

5.2. Agrégation sur base de la classification actuelle du GRER

Le travail d'agrégation a également été effectué sur base de la classification actuellement utilisée dans le GRER (graphe des fréquences cumulées à la Figure 11, grandeurs statistiques au Tableau 5-4 et « boxplot » des valeurs à la Figure 12).

Du point de vue de la conductivité hydraulique, le jeu de données montre des résultats assez similaires à ceux de l'agrégation sur base de la lithologie. Les fréquences cumulées montrent clairement une différenciation de la « nappe alluviale » (P75 : 9.97×10^{-3} m/s) et la « nappe du Bruxellien » (P75 : 9.19×10^{-4} m/s) qui présentent les valeurs de conductivité hydraulique les plus importantes du jeu de données. A l'opposé, la « nappe des schistes et grès » (P75 : 4.42×10^{-5} m/s) présente les valeurs de conductivité hydraulique les plus faibles.

La même constatation sur la différence d'ordre de grandeur entre les valeurs minimales et maximales est observée (3 ordres de grandeur pour la nappe alluviale et du Bruxellien et 5 ou 6 ordres de grandeurs pour les autres nappes).

A titre de comparaison, les valeurs de conductivité hydraulique actuellement utilisées dans le GRER sont également reprises au Tableau 5-4. Ces valeurs ont été calculées sur base de la moyenne géométrique du jeu de données (SPAQuE 2005). Les moyennes géométriques issues du présent jeu de données sont globalement inférieures à celles issues du jeu de données utilisé par le groupe de travail SPAQuE, à l'exception de la catégorie « nappe alluviale » qui aboutit à un résultat similaire et la « nappe du Bruxellien » qui présente un résultat d'un ordre de grandeur supérieur.

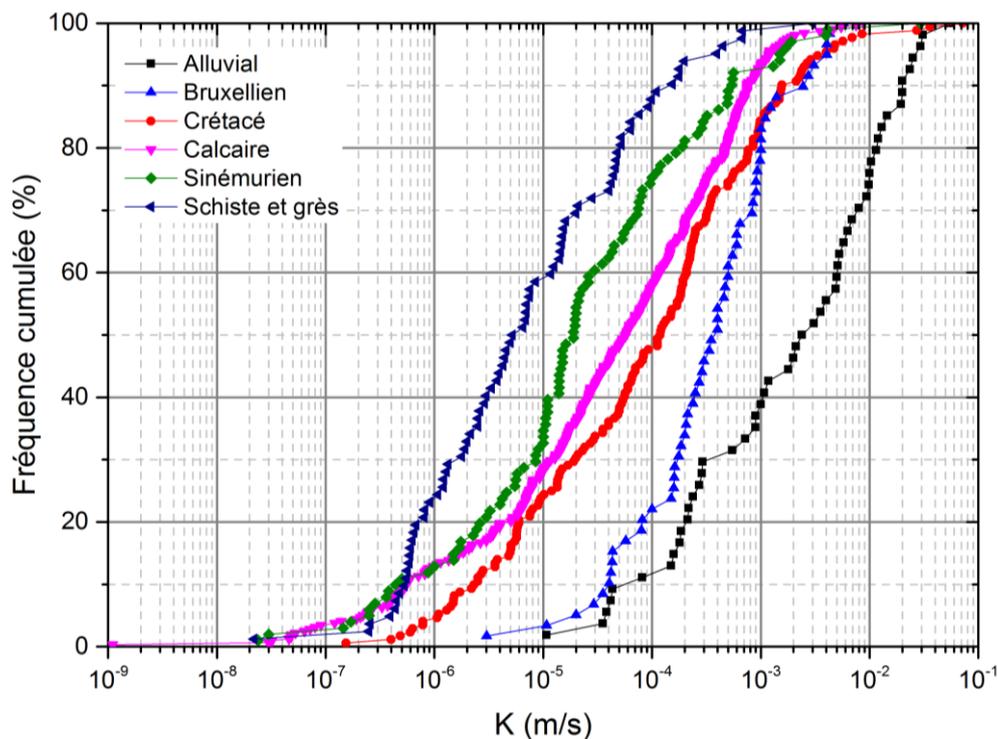


Figure 11 : Fréquence cumulée de la conductivité hydraulique (m/s) pour les différentes classifications reprises actuellement dans le GRER

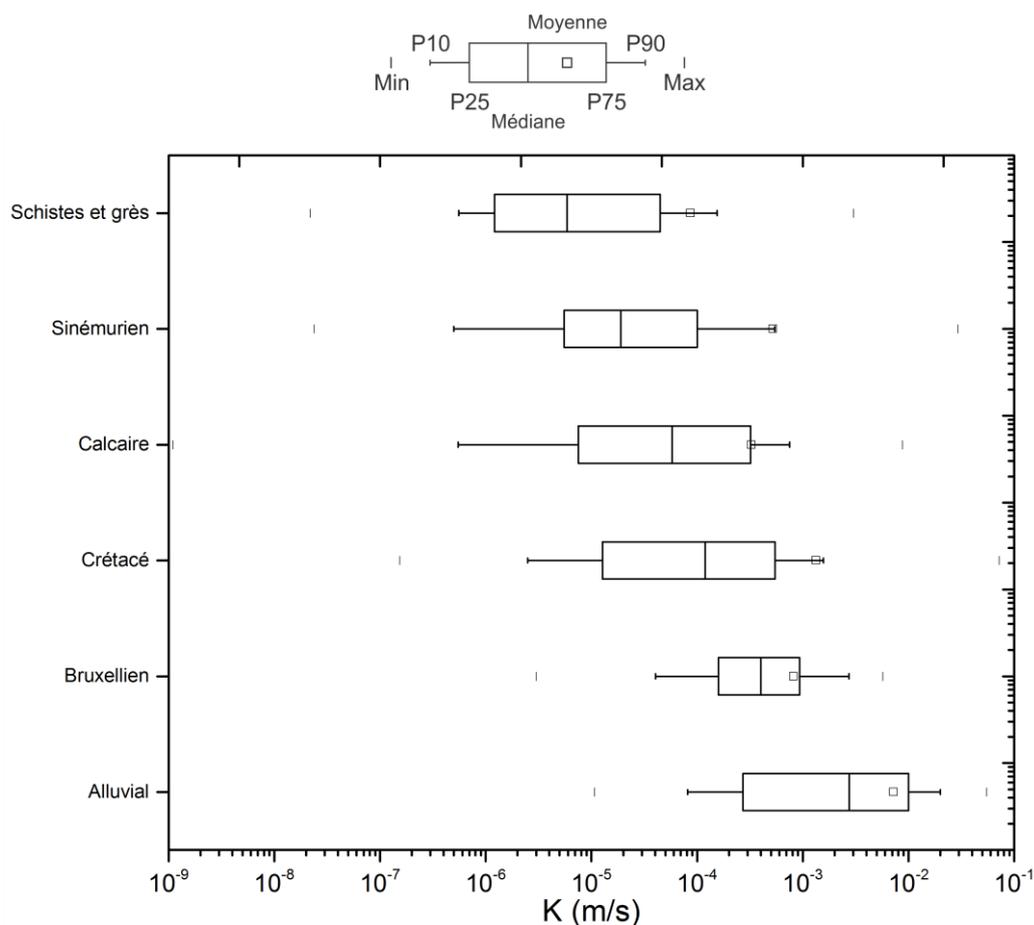


Figure 12 : Boxplot des valeurs de conductivités hydrauliques (m/s) pour les différentes classifications reprises actuellement dans le GRER

Tableau 5-4 : Grandeurs statistiques calculées sur base de la différenciation sur base de la classification actuelle du GRER (classé selon un ordre décroissant du 3^{ème} quartile) et valeurs utilisées actuellement dans le GRER

K (m/s)	Alluvial	Bruxellien	Crétacé	Calcaire	Sinémurien	Schistes et grès
Nombre ouvrages	54	59	172	318	101	82
Min	$1,07 \times 10^{-5}$	$3,01 \times 10^{-6}$	$1,54 \times 10^{-7}$	$1,10 \times 10^{-9}$	$2,40 \times 10^{-8}$	$2,20 \times 10^{-8}$
1er quartile	$2,76 \times 10^{-4}$	$1,59 \times 10^{-4}$	$1,31 \times 10^{-5}$	$7,61 \times 10^{-6}$	$5,50 \times 10^{-6}$	$1,21 \times 10^{-6}$
Moyenne arith	$7,21 \times 10^{-3}$	$8,19 \times 10^{-4}$	$1,34 \times 10^{-3}$	$3,27 \times 10^{-4}$	$5,21 \times 10^{-4}$	$8,68 \times 10^{-5}$
Moyenne geom	$1,74 \times 10^{-3}$	$3,22 \times 10^{-4}$	$8,46 \times 10^{-5}$	$3,79 \times 10^{-5}$	$2,11 \times 10^{-5}$	$7,12 \times 10^{-6}$
Médiane	$2,74 \times 10^{-3}$	$4,00 \times 10^{-4}$	$1,20 \times 10^{-4}$	$5,79 \times 10^{-5}$	$1,90 \times 10^{-5}$	$5,89 \times 10^{-6}$
3ème quartile	$9,97 \times 10^{-3}$	$9,19 \times 10^{-4}$	$5,43 \times 10^{-4}$	$3,20 \times 10^{-4}$	$1,00 \times 10^{-4}$	$4,42 \times 10^{-5}$
P90	$2,00 \times 10^{-2}$	$2,51 \times 10^{-3}$	$1,57 \times 10^{-3}$	$7,51 \times 10^{-4}$	$5,43 \times 10^{-4}$	$1,50 \times 10^{-4}$
Max	$5,50 \times 10^{-2}$	$5,74 \times 10^{-3}$	$7,23 \times 10^{-2}$	$8,77 \times 10^{-3}$	$2,95 \times 10^{-2}$	$3,02 \times 10^{-3}$
Groupe SPAQuE	$1,00 \times 10^{-3}$	$5,00 \times 10^{-5}$	$1,00 \times 10^{-4}$	$1,00 \times 10^{-4}$	$1,00 \times 10^{-4}$	$1,00 \times 10^{-5}$

Le même travail a été effectué en ce qui concerne la porosité efficace (Figure 13) et la dispersivité (Figure 14) pour la nappe des calcaires et des craies. Du point de vue de la porosité efficace, les valeurs varient à nouveau entre 0.1 et 5% et entre 0.1 et 0.7 m/m pour le ratio dispersivité/distance de traçage.

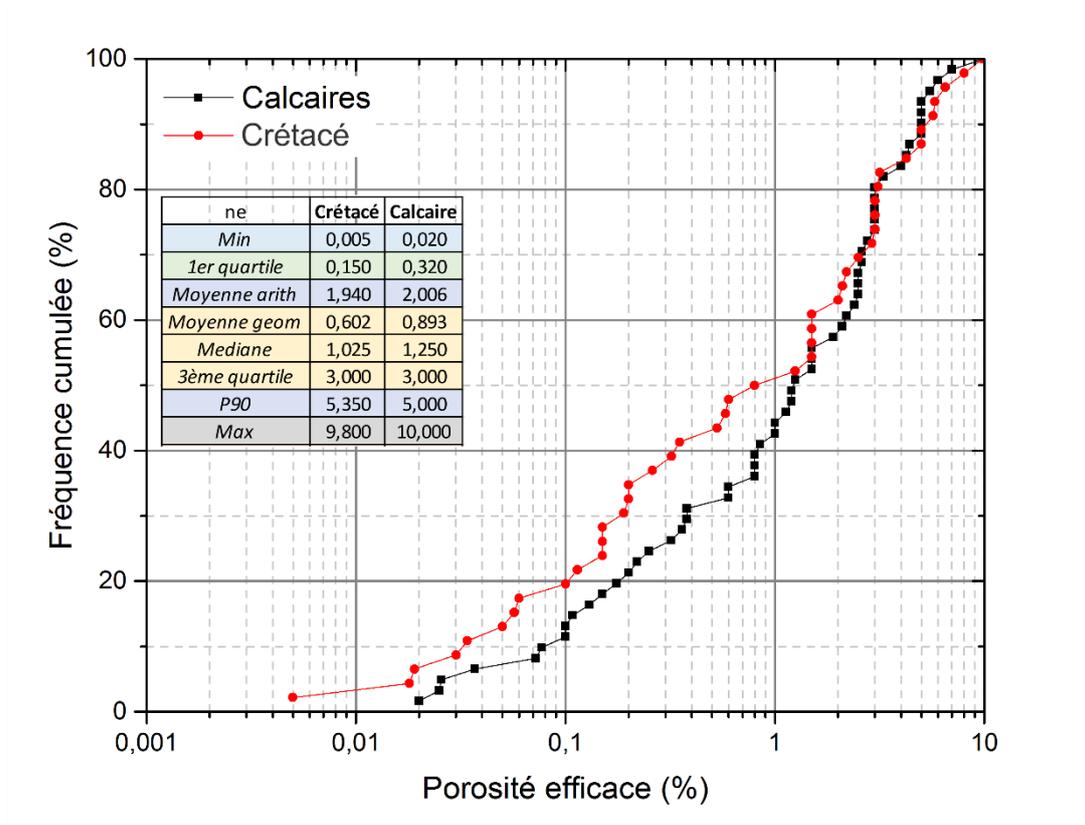


Figure 13 : Fréquence cumulée et grandeurs statistiques de porosité efficace pour les calcaires et les craies (classification sur base de la nappe)

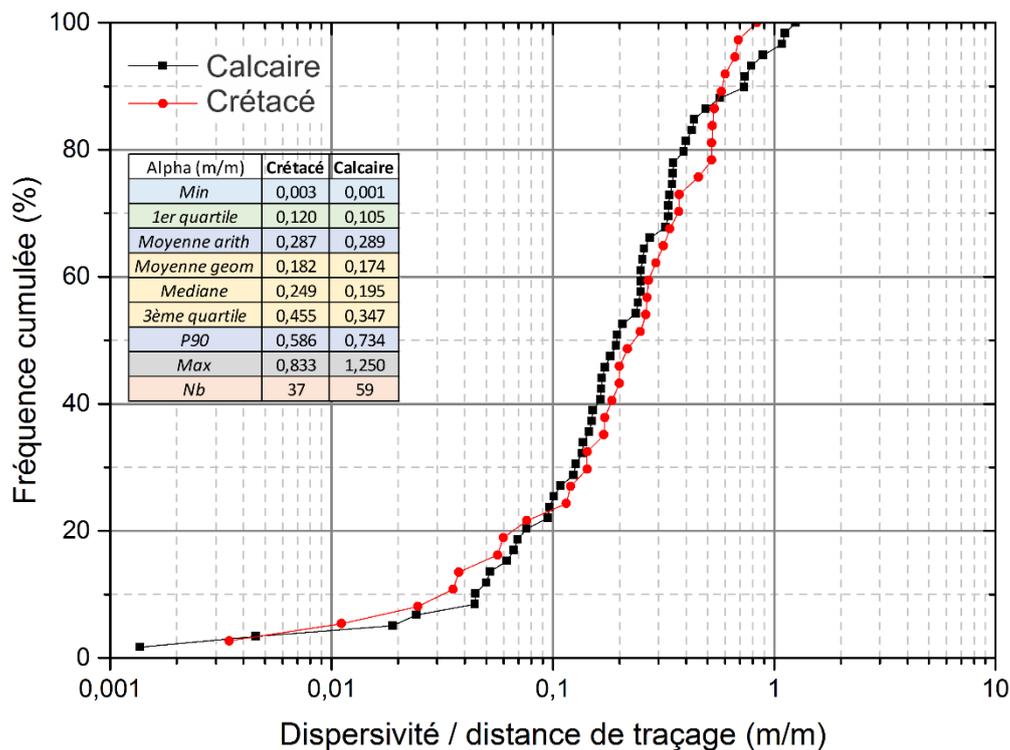


Figure 14 : Fréquence cumulée et grandeurs statistiques de dispersivité (divisée par la distance de traçage) pour les calcaires et les craies (classification sur base de la nappe)

5.3. Agrégation sur base de la classification EuroWaterNet

La classification EuroWaterNet présente un nombre de classes plus important que la classification du GRER. Cependant, à l'exception de 3 classes non représentées et des classes BE006 (Calcaire carbonifère du Tournaisis - 9 points) et BE014 (Aquifère du massif de la Vesdre – 6 points), les autres classes présentent un jeu de données important.

Le graphe des fréquences cumulées est présenté à la Figure 15 tandis que les grandeurs statistiques se trouvent dans le Tableau 5-5.

A nouveaux, les graviers de Meuse (P75 : 1.20×10^{-2} m/s) ainsi que les sables du Bruxellien (P75 : 9.97×10^{-4} m/s) se démarquent du jeu de données et présentent les valeurs de conductivités hydrauliques les plus importantes. A l'opposé, on retrouve le Massif de la Vesdre (P75 : 4.03×10^{-5} m/s) ainsi que le schisto-gréseux ardennais (P75 : 4.15×10^{-5} m/s).

A l'exception des classes non ou sous-représentées, cette classification semble être un compromis intéressant entre le degré de différenciation géographique des unités hydrogéologiques de Wallonie et la représentativité statistique des données collectées.

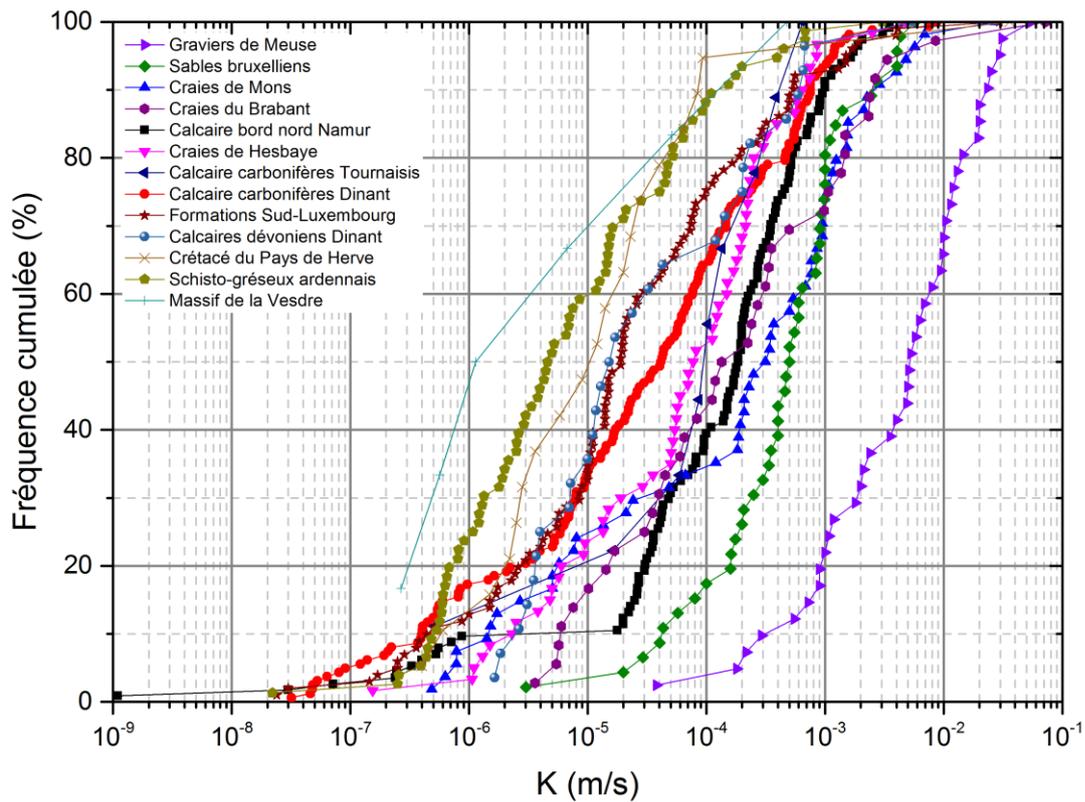


Figure 15 : Fréquence cumulée de la conductivité hydraulique (m/s) pour les différentes classifications reprises dans l'EuroWaterNet

Tableau 5-5 : Grandeurs statistiques calculées sur base de la différenciation sur base de la classification EuroWaterNet (classé selon un ordre décroissant du 3^{ème} quartile)

K (m/s)	BE007	BE008	BE003	BE005	BE001	BE006	BE002	BE004	BE012	BE009	BE010	BE014	BE015
	Gravier de Meuse	Craies du Brabant	Craies de Mons	Sables bruxelliens	Calcaire du bord nord du bassin de Namur	Calcaire carbonifère du Tournaisis	Calcaire carbonifère du bassin de Dinant	Craie de Hesbaye	Calcaire dévonien du bassin de Dinant	Formations jurassiques du Sud-Luxembourg	Massif schisto-gréseux de l'Ardenne	Aquifère du massif de la Vesdre	Crétacé du Pays de Herve
Nombre ouvrages	41	36	54	46	135	9	162	60	28	101	76	6	19
Min	$3,81 \times 10^{-5}$	$3,60 \times 10^{-6}$	$4,85 \times 10^{-7}$	$3,01 \times 10^{-6}$	$1,10 \times 10^{-9}$	$5,14 \times 10^{-7}$	$3,20 \times 10^{-8}$	$1,54 \times 10^{-7}$	$1,64 \times 10^{-6}$	$2,40 \times 10^{-8}$	$2,20 \times 10^{-8}$	$2,67 \times 10^{-7}$	$4,00 \times 10^{-7}$
1 ^{er} quartile	$1,18 \times 10^{-3}$	$3,40 \times 10^{-5}$	$1,55 \times 10^{-5}$	$2,02 \times 10^{-4}$	$2,40 \times 10^{-5}$	$5,94 \times 10^{-5}$	$6,00 \times 10^{-6}$	$1,35 \times 10^{-5}$	$6,25 \times 10^{-6}$	$5,50 \times 10^{-6}$	$1,18 \times 10^{-6}$	$7,10 \times 10^{-7}$	$2,65 \times 10^{-6}$
Moyenne arith	$9,37 \times 10^{-3}$	$2,81 \times 10^{-3}$	$1,39 \times 10^{-3}$	$9,46 \times 10^{-4}$	$3,54 \times 10^{-4}$	$1,89 \times 10^{-4}$	$3,11 \times 10^{-4}$	$2,87 \times 10^{-4}$	$3,21 \times 10^{-4}$	$5,21 \times 10^{-4}$	$8,99 \times 10^{-5}$	$8,96 \times 10^{-5}$	$1,92 \times 10^{-3}$
Moyenne geom	$3,97 \times 10^{-3}$	$1,73 \times 10^{-4}$	$1,48 \times 10^{-4}$	$4,15 \times 10^{-4}$	$6,94 \times 10^{-5}$	$6,98 \times 10^{-5}$	$2,69 \times 10^{-5}$	$5,83 \times 10^{-5}$	$3,16 \times 10^{-5}$	$2,11 \times 10^{-5}$	$6,71 \times 10^{-6}$	$5,53 \times 10^{-6}$	$1,30 \times 10^{-5}$
Médiane	$5,30 \times 10^{-3}$	$1,80 \times 10^{-4}$	$3,28 \times 10^{-4}$	$5,00 \times 10^{-4}$	$1,50 \times 10^{-4}$	$1,03 \times 10^{-4}$	$4,18 \times 10^{-5}$	$7,97 \times 10^{-5}$	$1,61 \times 10^{-5}$	$1,90 \times 10^{-5}$	$4,79 \times 10^{-6}$	$3,93 \times 10^{-6}$	$1,20 \times 10^{-5}$
3 ^{ème} quartile	$1,20 \times 10^{-2}$	$1,15 \times 10^{-3}$	$1,05 \times 10^{-3}$	$9,97 \times 10^{-4}$	$3,59 \times 10^{-4}$	$2,58 \times 10^{-4}$	$2,36 \times 10^{-4}$	$2,29 \times 10^{-4}$	$2,01 \times 10^{-4}$	$1,00 \times 10^{-4}$	$4,15 \times 10^{-5}$	$4,03 \times 10^{-5}$	$3,35 \times 10^{-5}$
P90	$2,35 \times 10^{-2}$	$2,52 \times 10^{-3}$	$2,69 \times 10^{-3}$	$2,59 \times 10^{-3}$	$9,06 \times 10^{-4}$	$4,40 \times 10^{-4}$	$7,50 \times 10^{-4}$	$6,51 \times 10^{-4}$	$6,12 \times 10^{-4}$	$5,43 \times 10^{-4}$	$1,32 \times 10^{-4}$	$2,64 \times 10^{-4}$	$8,58 \times 10^{-5}$
Max	$5,50 \times 10^{-2}$	$7,23 \times 10^{-2}$	$2,72 \times 10^{-2}$	$5,74 \times 10^{-3}$	$4,62 \times 10^{-3}$	$6,50 \times 10^{-4}$	$8,77 \times 10^{-3}$	$4,72 \times 10^{-3}$	$5,48 \times 10^{-3}$	$2,95 \times 10^{-2}$	$3,02 \times 10^{-3}$	$4,77 \times 10^{-4}$	$3,60 \times 10^{-2}$

5.4. Agrégation sur base de la classification des masses d'eau souterraine

Finalement, le travail d'agrégation a également été réalisé au niveau de la classification des masses d'eau souterraine (Figure 16 et Tableau 5-6). De nombreuses unités ne présentent soit pas de données soit un nombre très faible. Seules les 9 unités les plus représentées ont été traitées.

De manière analogue aux autres traitements, l'agrégation par masses d'eau souterraine présente une différenciation nette entre 2 unités et le reste du jeu de données. La masse d'eau RWM072 (alluvions et graviers de la Meuse Namur-Lanaye) présente les valeurs les plus importantes de conductivité hydraulique (P75 : 1.30×10^{-2} m/s) tandis que la masse d'eau RWM100 (Grès et schistes du massif ardennais) présente les valeurs les plus faibles.

Vu le nombre important de classes vides ou sous-représentées, la classification par masse d'eau souterraine ne semble pas être adéquate pour l'établissement des valeurs de référence.

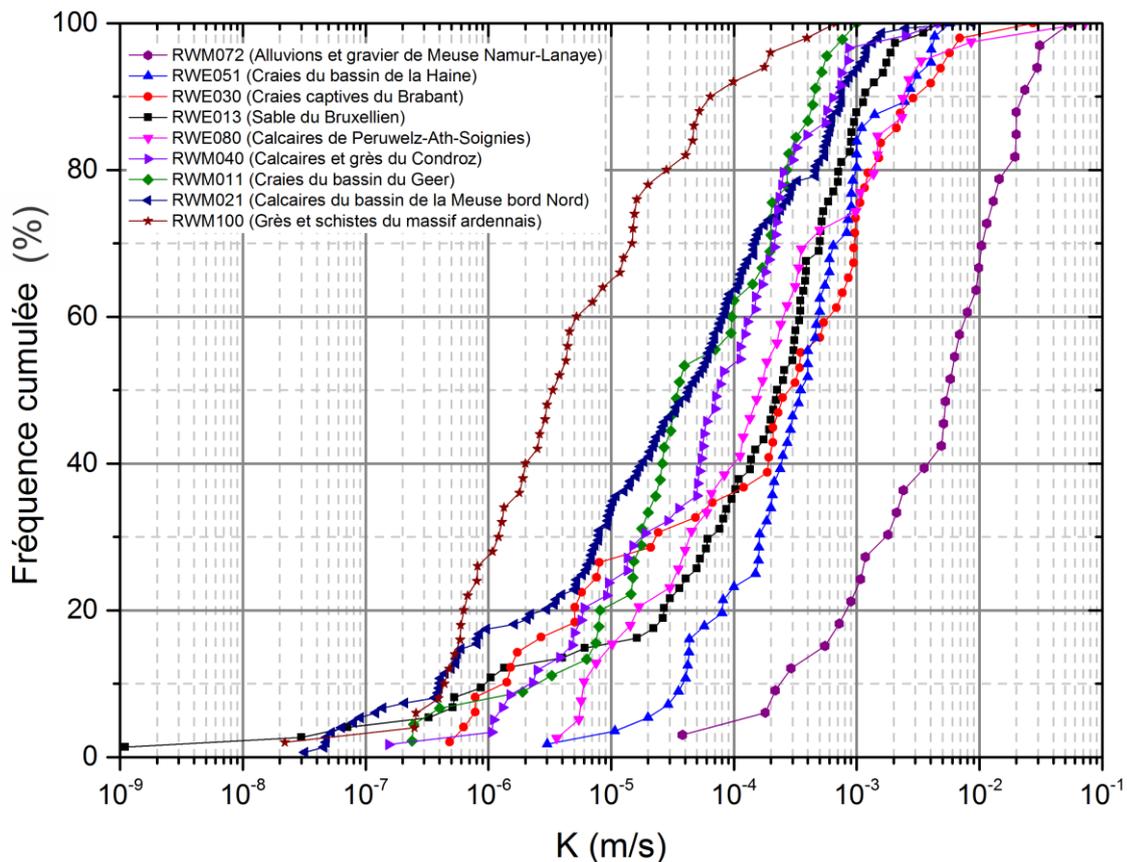


Figure 16 : Fréquence cumulée de la conductivité hydraulique (m/s) pour les différentes classifications des masses d'eau souterraines

Tableau 5-6 : Grandeurs statistiques calculées sur base de la différenciation sur base de la classification des masses d'eau souterraine (classé selon un ordre décroissant du 3^{ème} quartile)

K (m/s)	RWM072	RWE030	RWE080	RWE051	RWE013	RWM021	RWM040	RWM011	RWM100
	Alluvions et graviers de Meuse (Namur-Lanaye)	Craies du bassin de la Haine	Craies captives du Brabant	Sable du Bruxellien	Calcaires de Peruwelz-Ath-Soignies	Calcaires et grès du Condroz	Craies du bassin du Geer	Calcaires du bassin de la Meuse bord Nord	Grès et schistes du massif ardennais
Nombre ouvrages	33	49	39	56	15	149	59	45	50
Min	$3,81 \times 10^{-5}$	$4,85 \times 10^{-7}$	$3,60 \times 10^{-6}$	$3,01 \times 10^{-6}$	$1,10 \times 10^{-9}$	$3,20 \times 10^{-8}$	$1,54 \times 10^{-7}$	$2,39 \times 10^{-7}$	$2,20 \times 10^{-8}$
1er quartile	$1,18 \times 10^{-3}$	$8,03 \times 10^{-6}$	$3,77 \times 10^{-5}$	$1,56 \times 10^{-4}$	$5,08 \times 10^{-5}$	$6,29 \times 10^{-6}$	$1,35 \times 10^{-5}$	$1,53 \times 10^{-5}$	$8,84 \times 10^{-7}$
Moyenne arith	$9,83 \times 10^{-3}$	$1,47 \times 10^{-3}$	$2,60 \times 10^{-3}$	$8,20 \times 10^{-4}$	$4,97 \times 10^{-4}$	$2,82 \times 10^{-4}$	$2,88 \times 10^{-4}$	$1,59 \times 10^{-4}$	$4,00 \times 10^{-5}$
Moyenne geom	$3,90 \times 10^{-3}$	$1,39 \times 10^{-4}$	$1,73 \times 10^{-4}$	$3,11 \times 10^{-4}$	$1,02 \times 10^{-4}$	$2,76 \times 10^{-5}$	$5,70 \times 10^{-5}$	$4,35 \times 10^{-5}$	$4,65 \times 10^{-6}$
Médiane	$5,80 \times 10^{-3}$	$3,14 \times 10^{-4}$	$1,71 \times 10^{-4}$	$3,75 \times 10^{-4}$	$2,39 \times 10^{-4}$	$4,34 \times 10^{-5}$	$7,74 \times 10^{-5}$	$3,60 \times 10^{-5}$	$3,57 \times 10^{-6}$
3ème quartile	$1,30 \times 10^{-2}$	$1,07 \times 10^{-3}$	$1,03 \times 10^{-3}$	$9,05 \times 10^{-4}$	$5,75 \times 10^{-4}$	$2,50 \times 10^{-4}$	$2,30 \times 10^{-4}$	$2,05 \times 10^{-4}$	$1,60 \times 10^{-5}$
P90	$2,28 \times 10^{-2}$	$3,10 \times 10^{-3}$	$2,44 \times 10^{-3}$	$2,59 \times 10^{-3}$	$1,17 \times 10^{-3}$	$7,50 \times 10^{-4}$	$6,61 \times 10^{-4}$	$4,51 \times 10^{-4}$	$6,77 \times 10^{-5}$
Max	$5,50 \times 10^{-2}$	$2,72 \times 10^{-2}$	$7,23 \times 10^{-2}$	$5,74 \times 10^{-3}$	$4,62 \times 10^{-3}$	$8,77 \times 10^{-3}$	$4,72 \times 10^{-3}$	$1,00 \times 10^{-3}$	$6,78 \times 10^{-4}$

6. Valeurs de référence pour les paramètres hydrogéologiques

L'objectif final de la convention est de définir de nouvelles valeurs de référence pour les paramètres hydrogéologiques intervenant dans la partie C du GRER.

Chaque paramètre est spécifique au site. Etablir une valeur de référence est donc représentative à grand échelle mais ne l'est pas toujours au niveau du site local étudié. Les valeurs proposées dans ce chapitre sont donc fournies comme valeurs guides au niveau de l'utilisation des ESR et ce, afin de disposer d'une méthodologie relativement conservatoire et qui ne demande que peu d'investigation sur terrain. En cas de problème plus complexe, l'EDR permettra de fournir des valeurs de paramètres sur base d'investigations de terrain.

Au vu du jeu de données disponible et analysé, ces nouvelles valeurs de référence peuvent être calculées pour la conductivité hydraulique. Le nombre de données est insuffisant pour calculer des valeurs référence en ce qui concerne la porosité efficace (à l'exception des calcaires et des craies), la dispersivité longitudinale et l'infiltration. Des valeurs issues de la littérature sont donc proposées.

Du point de vue de l'agrégation des données, la classification sur base de la lithologie semble être la plus adéquate. Elle permet une distinction aisée des classes et couvre globalement tous les contextes hydrogéologiques. De plus, le faible nombre de classes permet d'une part de ne pas complexifier la méthodologie en place et d'autre part, d'avoir un nombre important de données pour chacune de ces classes.

6.1. Conductivité hydraulique (K)

Sur base des résultats, l'utilisation de la moyenne géométrique semble être le choix le plus judicieux pour établir les nouvelles valeurs de référence de conductivité hydraulique. En effet, la conductivité hydraulique intervient tant dans le module de lessivage que dans le module de dispersion. Dans le module de lessivage, une valeur de conductivité hydraulique faible est sécuritaire tandis qu'à l'inverse, dans le module de dispersion, une valeur de conductivité hydraulique élevée est sécuritaire. Le choix de la moyenne géométrique est donc adéquat et a été validé en cours de réunion du Comité d'Accompagnement (CA 4).

Deux unités font exception à ce choix, les argiles et les marnes. Pour ces deux unités, l'analyse statistique aboutit en effet des valeurs de conductivité hydraulique trop élevées par rapport aux valeurs généralement admises. Pour cette raison, des valeurs de référence issues de la littérature (Hornberger 2014, Brouyère 2001, Dassargues 2010, SPAQuE 2003) sont proposées. En plus de ces deux unités et vu le contexte des études simplifiées des risques, l'ajout d'une classe concernant les limons est également proposée. La valeur de conductivité hydraulique de référence est également issue de la littérature (Hornberger 2014, Brouyère 2001, Dassargues 2010, SPAQuE 2003).

Les valeurs de références pour la conductivité hydrauliques sont présentées au Tableau 6-1.

Tableau 6-1 : Valeur de référence pour la conductivité hydraulique (m/s) ; les cellules vertes correspondent aux valeurs issues de la présente convention tandis que les cellules rouges correspondent aux valeurs issues de la littérature (Hornberger 2014, Brouyère 2001, Dassargues 2010, SPAQuE 2003)

	Valeur de référence (m/s)
Gravier	4×10^{-3}
Sable	2×10^{-4}
Craie	$7,5 \times 10^{-5}$
Calcaire	$5,5 \times 10^{-5}$
Grès	$2,5 \times 10^{-5}$
Schisto-gréseux	7×10^{-6}
Argile	1×10^{-8}
Marne	1×10^{-8}
Limon	1×10^{-7}

A titre comparatif, les valeurs de conductivité hydraulique du groupe de travail SPAQuE actuellement utilisée dans la méthodologie GRER (basé sur la moyenne géométrique) sont présentées en parallèle aux résultats des agrégations par lithologie et selon les unités actuellement utilisées dans le GRER (Tableau 6-2).

Les moyennes géométriques du jeu de données de la convention présentent des résultats globalement inférieurs à ceux du groupe de travail SPAQuE à l'exception des graviers qui présentent des résultats similaires et des sables qui présentent des résultats d'un ordre de grandeur supérieur.

Tableau 6-2 : Comparaison des résultats des traitements statistiques entre les valeurs actuellement utilisées dans le GRER (Groupe SPAQuE) et les valeurs calculées dans le cadre de la convention pour l'agrégation par lithologie et l'actualisation des valeurs des classes actuelles du GRER

K (m/s)	Nappe	Alluvial /gravier	Bruxellien /sable	Crétacé /craie	Calcaire	Sinémurien /grès	Schistes et grès
Statistique	Groupe SPAQuE	1,00E-03	5,00E-05	1,00E-04	1,00E-04	1,00E-04	1,00E-05
Moyenne géométrique	Classe GRER	▲1,74E-03	▲3,22E-04	▼8,46E-05	▼3,79E-05	▼2,11E-05	▼7,12E-06
	Lithologie	▲3,97E-03	▲1,91E-04	▼7,53E-05	▼5,42E-05	▼2,34E-05	▼6,82E-06
Médiane	Classe GRER	▲2,74E-03	▲4,00E-04	▲1,20E-04	▼5,79E-05	▼1,90E-05	▼5,89E-06
	Lithologie	▲5,30E-03	▲2,72E-04	▼9,30E-05	▼7,32E-05	▼2,50E-05	▼4,51E-06
3ème quartile	Classe GRER	▲9,97E-03	▲9,19E-04	▲5,43E-04	▲3,20E-04	▼1,00E-04	▲4,42E-05
	Lithologie	▲1,20E-02	▲7,17E-04	▲3,92E-04	▲3,84E-04	▼7,29E-05	▲4,51E-05
P90	Classe GRER	▲2,00E-02	▲2,51E-03	▲1,57E-03	▲7,51E-04	▲5,43E-04	▲1,50E-04
	Lithologie	▲2,35E-02	▲1,34E-03	▲1,90E-03	▲8,25E-04	▲5,02E-04	▲1,79E-04

6.2. Porosité efficace de transport (n_e)

Le jeu de données actuel n'est pas, à ce stade, suffisamment développé que pour être traité de manière statistique pour l'ensemble des lithologies. Ce traitement pourra être effectué lorsque la base de données sera étoffée et qu'un nombre suffisant de porosité efficace aura été encodé pour obtenir des indicateurs statistiques représentatifs. Deux lithologies font exception à ce manque de données, il s'agit des calcaires et des craies. Comme discuté lors du CA 4, la moyenne géométrique semble également être le meilleur choix concernant l'établissement de valeur de référence pour la porosité efficace de transport de ces deux lithologies. Pour les autres classes, des valeurs issues de la littérature (Dassargues 2010) sont proposées. En plus des valeurs de référence, la gamme de variation de la porosité efficace est fournie à titre indicatif.

Tableau 6-3 : Gamme de variation et valeur de référence pour la porosité efficace de transport (%) par lithologie ; les cellules vertes correspondent au traitement statistique des valeurs encodées dans la base de données tandis que les cellules rouges correspondent aux valeurs issues de la littérature (Dassargues 2010)

Lithologie	Gamme de variation de la porosité efficace (%)	Valeur de référence de la porosité efficace (%)
Schistes	0.1 - 2	0.5
Grès	3 - 25	5
Graviers	5 - 25	5
Sables	5 - 25	5
Argile	0.1 - 3	0.5
Limon	0.1 - 3	0.5
Calcaire	0.1 - 14	0.5
Craies	0.5 - 15	1

6.3. Dispersivité longitudinale (α_L)

Le jeu de données actuel n'est pas, à ce stade, suffisamment développé que pour être traité de manière statistique pour l'ensemble des lithologies. Deux lithologies font exception à ce manque de données, il s'agit des calcaires et des craies. Au niveau de ces unités, les valeurs de dispersivité encodées paraissent élevées. Ces valeurs sont fréquemment déduites de calibration de solutions analytiques sur les courbes de restitution observées lors des essais de traçage et une tendance à la surestimation des valeurs de dispersivité est souvent observée. L'utilisation de ces valeurs ne semble donc pas être opportune.

Le calcul de la dispersivité longitudinale actuellement utilisé dans le GRER semble donc être la meilleure alternative. Elle est calculée comme suit (SPW 2008b, Equation 3) :

$$\alpha_L = 0.1 \times X_r \quad [3]$$

Avec X_r : distance séparant les piézomètres placés au droit de la source de pollution et en bordure du site pollué.

6.4. Infiltration (I)

Le jeu de données actuel n'est pas, à ce stade, suffisamment développé que pour être traité de manière statistique pour l'ensemble des lithologies. La majorité des études consultées calculent une infiltration sur base d'un facteur par rapport aux précipitations. Cette méthode n'étant pas physiquement basée, ces valeurs n'ont pas été retenues dans la base de données. En ce qui concerne les études qui ont calculé l'infiltration sur base d'un hydrologique complet, les résultats sont fort variables d'une année à l'autre.

Partant de ce constat, il est proposé de fixer à 250mm/an l'infiltration pour l'ensemble des lithologies à l'exception des argiles, des marnes et du schisto-gréseux. Une valeur de 150mm

est préconisée pour ces lithologies. Cette différenciation est proposée afin de refléter la proportion plus importante de ruissellement de ces lithologies.

Cependant ces valeurs sont basées sur des études de bassin et sont fortement dépendant des conditions locales. L'infiltration devra être quantifiée lors des étapes ultérieures des études de risque.

6.5. Gradient hydraulique

L'intervention du gradient hydraulique dans l'équation du facteur de dilution pose problème. Il est impossible de dégager une valeur de référence pour ce paramètre qui est indépendant d'un contexte géologique général car il dépend uniquement du contexte hydrogéologique local. Idéalement, cette valeur devrait être déterminée sur base de mesures piézométriques effectuées sur le site étudié ou sur base d'études locales.

Une valeur imposée de 0.25% est donc proposée par défaut pour le gradient hydraulique. Cette valeur peut être considérée dans le cadre de l'évaluation des risques de lessivage à défaut de mesure sur site. Pour l'évaluation des risques de dispersion, une mesure sur site du gradient piézométrique réel semble nécessaire tant ce paramètre a un impact prédominant sur les résultats.

7. Recommandations

Le présent paragraphe reprend les différentes recommandations identifiées pour une amélioration sur le plan méthodologique et à la lumière des retours d'expérience d'utilisation actuelle du GRER, de la partie C (Evaluation des risques pour les eaux souterraines) de celui-ci et de l'outil informatique qui lui est associé.

Dans un premier temps, plusieurs points de réflexions sont développés en vue d'une amélioration globale de la méthodologie mise en œuvre. Par la suite, différentes pistes d'améliorations ponctuelles du guide sont passées en revue.

7.1. Opportunité F-Leach

Lors des discussions menées en comité d'accompagnement, l'opportunité d'utiliser le logiciel F-LEACH en lieu et place de l'outil ESR actuellement utilisé a été évoquée.

F-LEACH est un logiciel développé par le VITO (Vlaamse Instelling Voor Technologisch Onderzoek) et distribué gratuitement (site web de l'OVAM).

Le logiciel est actuellement utilisé en Flandres et en Région de Bruxelles capitale dans le cadre de l'évaluation des risques pour les eaux souterraines. La méthodologie mise en œuvre permet une évaluation des risques de lessivage de polluants en zone non saturée et de « dispersion » des polluants dissous au sein de la nappe.

La méthodologie d'évaluation des risques de lessivage utilisée dans le logiciel F-Leach a été analysée en vue de vérifier la cohérence entre ce logiciel et le contexte hydrogéologique wallon.

Par ailleurs, le logiciel a été testé dans le cadre de la présente mission en vue de dégager les principaux constats positifs et négatifs exclusivement liés à son utilisation.

Méthodologie d'évaluation des risques de lessivage F-LEACH

Deux méthodologies distinctes sont mises en œuvre pour l'évaluation des risques de lessivage avec le logiciel F-Leach. En effet, en plus de la méthodologie de base, une méthodologie spécifique a été ajoutée pour le cas particulier des huiles minérales.

Pour tous les polluants à l'exception des huiles minérales, la méthodologie d'évaluation des risques de lessivage proposée dans le logiciel F-LEACH est construite en deux étapes successives.

Dans un premier temps, un ajustement des valeurs limites pour le risque de lessivage vers la nappe est réalisé. Les formules utilisées pour l'ajustement sont celles détaillées dans le guide méthodologique pour l'évaluation des risques de l'OVAM (Bepaling van risico's door uitloging en beschrijving evolutie van de bodemkwaliteit -Deel 1 - Opstellen methodiek.pdf).

Ces formules sont similaires à celles reprises dans la partie C du GRER (prise en compte d'un facteur de dilution, adsorption, ...).

Par la suite, dans le cas où les concentrations mesurées dans le sol sont supérieures aux valeurs limites ajustées, la seconde étape consiste en une modélisation analytique Source-Transfert-cible en vue d'évaluer, d'une part, l'évolution de la concentration en polluant à la cible et d'autre part, l'évolution de la qualité du sol lessivé. Le modèle de transport utilisé dans ce cas est basé sur le code CXTFIT (Toride et al., 1999) et permet de simuler le transport de polluant entre la source et le récepteur sous un flux d'eau constant. Le modèle calcule l'impact sur le récepteur et l'évolution de la qualité du sol en considérant la dispersion, l'adsorption et la biodégradation en zone non-saturée et saturée. La volatilisation en zone non-saturée peut également être prise en compte. Deux scénarios sont possibles.

Scénario 1 : la pollution en zone non saturée n'a pas encore d'impact sur la qualité des eaux souterraines. Dans ce cas, la cible considérée est l'eau souterraine au droit de la tache de pollution. F-LEACH permet alors de calculer l'évolution de la concentration dans l'eau souterraine au droit de la pollution ainsi que l'évolution de la qualité du sol non saturé.

Scénario 2 : la pollution est à la fois présente en zone non-saturée et dans l'eau souterraine. Dans ce cas, la cible considérée peut être située en aval hydrogéologique de la zone contaminée. F-Leach permet alors de calculer l'évolution de la concentration à la cible (lessivage + transport en zone saturée), l'évolution de la qualité du sol non-saturé et l'évolution du panache de polluant dans l'eau.

Pour les huiles minérales, un module spécifique distinct doit être utilisé. Ce module, constitué également de deux étapes successives, permet de prendre en considération la mobilité et la solubilité des différentes phases constituant le polluant, tenant compte du milieu et de la composition d'une éventuelle phase libre.

La première étape consiste à calculer la concentration en huiles minérales totales attendues dans les eaux souterraines sur base de la composition du polluant présent en zone non saturée et des interactions entre les différentes fractions constitutives du polluant. Compte tenu de la composition du polluant (définie par l'utilisateur), F-Leach permet de calculer la concentration attendue dans l'eau souterraine pour chaque fraction d'hydrocarbure.

Par la suite, si la concentration calculée d'une des fractions dans l'eau souterraine est supérieure à la valeur limite, la seconde étape consiste en une modélisation analytique Source-Transfert-Cible en vue d'évaluer, d'une part, l'évolution de la concentration en polluant à la cible et d'autre part, l'évolution de la qualité du sol lessivé pour chaque fraction, tenant compte des interactions éventuelles. Pour ce faire, les deux scénarios détaillés ci-dessus sont également possibles.

En guise de synthèse, la méthodologie mise en œuvre dans le cadre de l'utilisation du logiciel F-LEACH semble relativement comparable à celle mise en œuvre avec l'OUTIL-ESR (ajustement des valeurs limites + évaluation de la concentration à la cible et du temps de

lessivage). Cet outil semble donc adapté à la méthodologie à mettre en œuvre en Wallonie. Par ailleurs, la possibilité de définir une cible en aval hydrogéologique de la pollution (scénario 2) s'avère être un atout intéressant, notamment dans le cas de l'évaluation des risques de lessivage pour une nappe non-exploitable (cible en bordure aval du terrain).

Utilisation du logiciel F-LEACH

Dans le cadre d'une évaluation des risques pour les eaux souterraines pour un site standard, en comparaison à l'utilisation de l'outil-ESR, les principaux avantages et inconvénients sont repris ci-dessous.

Le programme F-LEACH propose un environnement esthétique travaillé et une démarche conviviale « step-by-step » permettant d'avancer de façon systématique dans l'évaluation des risques pour les eaux souterraines. Il permet d'évaluer, au moyen d'un outil unique, à la fois les risques de lessivage (zone non saturée) et les risques de « dispersion » (zone saturée) pour les métaux lourds, les hydrocarbures pétroliers et autres types de polluants. A l'instar de l'outil ESR, la partie lessivage prend en compte un facteur de redistribution massique, un facteur de partition sol-eau et un facteur de dilution dans la nappe pour la détermination des valeurs limites. Le logiciel permet également de considérer la biodégradation et l'évaporation de polluants dans le cadre du lessivage. A la fin du processus, les résultats sont donnés sous forme de graphique d'évolution de la concentration en polluant au droit de la cible. La génération d'un rapport à destination de l'administration est automatisée.

En contrepartie, le logiciel ne permet le traitement que d'un seul polluant à la fois. Le logiciel doit dès lors être exécuté successivement pour chaque tache et pour chaque polluant. Il n'est ainsi pas possible de traiter une pollution de façon intégrée dans son ensemble. La gestion d'une pollution plus complexe, composée de plusieurs taches et de plusieurs polluants, peut s'avérer particulièrement lourde et laborieuse. Par ailleurs, la modification des paramètres par défaut ne nécessite aucune justification et l'information sur le sens sécuritaire d'évolution des différents paramètres n'est pas donnée.

En guise de synthèse, la nécessité d'exécuter le logiciel pour chaque tache et chaque polluant peut rendre l'utilisation du programme F-LEACH plus lourde dans le cadre de sites complexes. Néanmoins, l'environnement convivial et la procédure par étape sont des points forts qu'il serait utile de considérer dans le cadre d'une évolution des outils mis à disposition.

7.2. Incohérence Nappe exploitable/Nappe non exploitable

Par retour d'expérience, il apparaît qu'une incohérence dans les résultats de l'ESR lessivage peut subvenir selon que l'on considère une nappe exploitable ou non.

En effet, la logique voudrait que les valeurs limites dans le cadre d'une nappe exploitable soit plus sévères que dans le cadre d'une nappe non-exploitable. Or, dans certains cas, le

reclassement d'une nappe non-exploitable en nappe exploitable peut induire une augmentation des valeurs limites VS_N et VI_N , supprimant potentiellement les risques de lessivage existant pour le premier scénario.

Pour rappel, dans le cadre d'une nappe exploitable, le critère par défaut à respecter est la VS_{nappe} dans la nappe au droit de la tache de pollution. La valeur limite à considérer en zone non saturée est la VS_N . Pour la nappe non-exploitable, en l'absence d'autre cible particulière, le critère de conformité à respecter est la VI_{nappe} en bordure aval de terrain. La valeur limite à considérer en zone non saturée est la CBR_N (voir figure Figure 7-1).

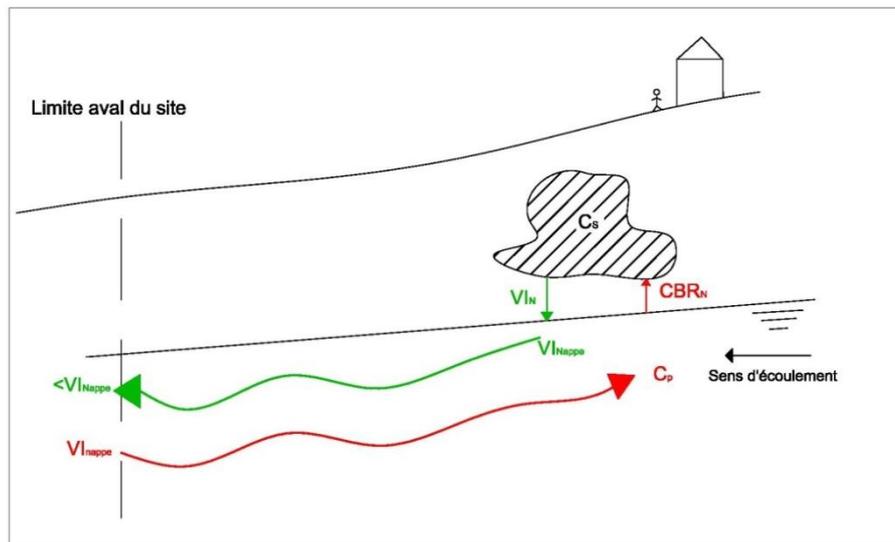


Figure 7-1 : Valeur limite en nappe non-exploitable

Dans la pratique, l'incohérence apparaît quand $CBR_N < VS_N$, c'est-à-dire lorsqu'on passe d'une situation d'une nappe non-exploitable avec une faible distance entre la source de pollution et la bordure aval du site à une situation de nappe exploitable avec un grand facteur de dilution.

Cette situation apparaît le plus souvent en présence de terrains alluviaux limoneux pouvant être assimilés à une nappe non exploitable ou à une nappe exploitable alluviale.

Cette incohérence devrait donc disparaître avec la nouvelle classification de nappe par lithologie distinguant les aquifères graveleux (à haut facteur de dilution) des aquifères limoneux (à faible facteur de dilution). La suppression d'un facteur de dilution pour les

nappes non exploitables (indépendant de la lithologie) devrait également supprimer ce type de problème.

7.3. Ajustement obligatoire VS_N et VI_N

Lors des discussions menées en comité d'accompagnement, l'opportunité de réinstaurer, dans le cadre de l'ESR-lessivage, une étape préliminaire de comparaison des concentrations mesurées dans le sol à des valeurs génériques (sans ajustement) a été évoquée.

Pour rappel, et comme renseigné en Annexe C-1 du GRER, la valeur limite VS_N s'obtient à partir du produit de la VS_{nappe} et d'un facteur d'atténuation global (FAG) fondé sur une approche simplifiée des principaux mécanismes d'atténuation en jeu.

Le schéma d'établissement des VS_N est repris en Figure 7-2 ci-dessous.

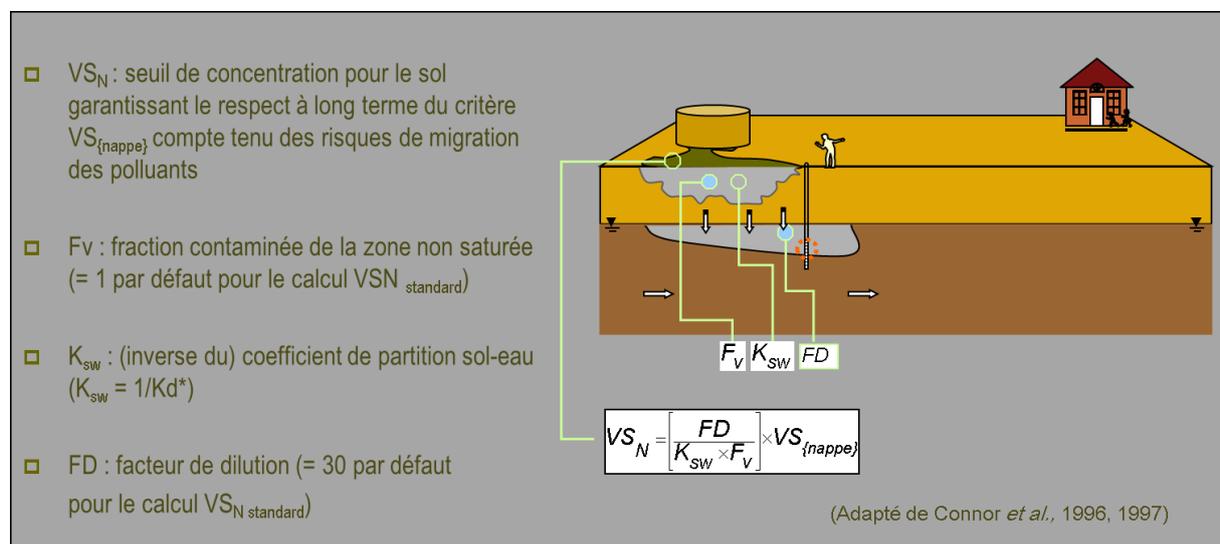


Figure 7-2 : Etablissement des VS_N

Le FAG prend en compte les processus d'adsorption/désorption des polluants, les caractéristiques spatiales de la zone contaminée ainsi que les propriétés du sol et de la nappe aquifère. Il comprend 3 facteurs distincts :

- Le facteur de redistribution massique F_v
- Le facteur de partition sol/eau K_{sw}
- Le facteur de dilution FD

La comparaison des concentrations mesurées dans le sol à des valeurs limites génériques en guise de première étape de l'ESR-lessivage nécessite que ces dernières soient impérativement sécuritaires. En effet, dans le cas contraire, le passage à l'étape suivante (ajustement des valeurs limites) pourraient conduire à une situation plus contraignante, générant ainsi une incohérence majeure dans le processus par étape successives actuellement adopté.

Les VS_N/VI_N génériques actuellement proposées dans la partie c du GRER pour les différents polluants normés ne sont pas toujours sécuritaires car calculées avec un facteur de dilution

fixé à 30 (moyenne géométrique des facteurs de dilution des différentes nappes) et sur base d'autres paramètres non sécuritaires, comme par exemple le taux de matière organique qui varie entre 0.3 et 1.6 % selon l'usage du terrain.

Le caractère sécuritaire absolument nécessaire dans la définition de nouvelles valeurs limites VS_N/VI_N génériques risque de rendre cette première étape comparative inutile (dépassement quasi systématique des VS_N/VI_N sécuritaires). Un ajustement minimum obligatoire de paramètres est donc justifié.

Dans la méthodologie actuelle, l'ajustement minimum nécessaire comprend la considération des paramètres de terrain suivants :

- Profondeur de la nappe
- MO
- pH du sol
- Type de nappe
- Profondeur de la pollution

Dans la mesure où tous ces paramètres ont dû être déterminés dans le cadre de la caractérisation de la pollution, cet ajustement ne constitue pas une surcharge de travail majeur à la réalisation de l'ESR-lessivage. Une simplification de l'encodage de ces paramètres dans l'Outil-ESR permettrait un allègement considérable de la procédure d'ajustement qui paraît actuellement trop lourde.

7.4. Proposition de nouveaux facteurs de dilution par défaut

Pour rappel, le facteur de dilution (FD) considéré dans le facteur d'atténuation global (FAG) détaillé ci-dessus permet de prendre en considération une dilution du lixiviat pollué dès son entrée dans la nappe et donc une diminution de la concentration en polluant dans l'eau souterraine. Le facteur de dilution est obtenu par la formule suivante :

$$FD = 1 + \frac{d_{zm} \cdot K \cdot \nabla H}{I \cdot L}$$

Avec :

- FD : Facteur de dilution [-]
- d_{zm} : épaisseur de mélange [m]
- K : conductivité hydraulique [m/an]
- ∇H : gradient hydraulique [-]
- I : infiltration efficace annuelle [m/an]
- L : Longueur de la zone contaminée parallèle au flux souterrain [m]

Le facteur de dilution dépend donc du contexte hydrogéologique local (aquifère, gradient piézométrique, épaisseur de mélange), de la pluviométrie (Infiltration efficace annuelle) et

de la pollution (longueur de la zone contaminée). Les différents paramètres présentent tous la même sensibilité.

Ainsi, une diminution du gradient hydraulique ou de la conductivité hydraulique de la nappe sous-jacente aura pour effet de diminuer le flux d'eau souterraine passant sous la pollution et donc d'amoinrir les phénomènes de dilution.

De la même manière, une augmentation de l'infiltration efficace ou de la longueur de la zone contaminée aura pour effet d'augmenter le flux d'eau polluée issue du lessivage et donc d'amoinrir également les phénomènes de dilution.

La méthodologie actuelle permet un ajustement des valeurs VS_N et VI_N par type de nappe, proposant un facteur de dilution par défaut selon le type de nappe à considérer.

Comme mentionné au paragraphe 6 ci-dessus, dans le cadre de la définition de valeurs par défauts pour les paramètres hydrogéologiques, la définition de classe basée sur la lithologie paraît plus appropriée. En effet, cette classification permet une distinction aisée des classes et couvre globalement tous les contextes hydrogéologiques. De plus, le faible nombre de classes permet d'avoir un nombre important de données pour chacune de celles-ci.

A titre comparatif, les facteurs de dilution calculés pour un site standard sur base de la classification actuelle par type de nappe et de la nouvelle classification par lithologie sont repris dans le tableau ci-dessous.

Tableau 7-1 : comparatif des facteurs de dilution

Classification actuelle		Nouvelle classification	
Type de nappe	FD actuel	FD nouveau	lithologie
Nappe alluviale	108	127	Gravier
Nappe du Crétacé de Hesbaye	12	12	Craies
Nappe du Bruxellien	72	7	Sables
Nappe Calcaire	33	3	Calcaires
Nappe du Sinémurien	24	2	Grès
Nappe des schistes et grès	13	1	Schisto-gréseux
Nappe non-exploitable	12	1	Argiles
		1	Marnes
		1	Limons

Les nouveaux facteurs de dilution ont été calculés pour une épaisseur de mélange fixée à 2m (valeur par défaut actuelle) et pour une longueur de zone contaminée parallèle au flux souterrain fixée à 20 m (arbitraire).

Les facteurs de dilution de la nappe alluviale et de la nappe du crétacé sont du même ordre de grandeur que les nouveaux facteurs de dilution des graviers et craies. En revanche les nouveaux facteurs de dilution des autres classes sont un ordre de grandeur inférieurs aux facteurs de dilution actuels. Ceci peut être expliqué notamment par la mise à jour des valeurs de conductivité hydraulique et par le gradient piézométrique par défaut utilisé (cf. paragraphe 6.5).

Cette diminution implique un ajustement plus sévère des valeurs limites V_{S_N}/V_{I_N} selon la nouvelle classification pour les classes concernées. A noter qu'un ajustement selon les mesures reste toujours possible et permet d'être plus cohérent avec la réalité du site, en particulier pour le gradient piézométrique et la longueur de la zone contaminée.

7.5. Autres pistes d'amélioration

Le présent paragraphe concerne quelques autres pistes à considérer dans le cadre d'une amélioration générale de la méthodologie d'évaluation simplifiée des risques pour les eaux souterraines. Ces différentes pistes concernent la méthodologie générale à mettre œuvre, les outils qui y sont associés ainsi que le contenu et la mise en forme du guide méthodologique à disposition des experts.

La **méthodologie ESR** est assez claire et facile à mettre en œuvre de façon générale. La démarche « étape par étape » permet d'optimiser au mieux la charge de travail à mettre en œuvre en fonction du degré de complexité de l'étude. Par ailleurs, le caractère sécuritaire semble globalement respecté. Toutefois, la possibilité de prendre en compte un facteur de biodégradation au stade d'une évaluation simplifiée des risques de dispersion dans les eaux souterraines ne semble peut-être pas des plus adaptées. En effet, les phénomènes de biodégradation de polluants sont assez complexes à caractériser tant ils dépendent de nombreux facteurs liés aux polluants et au milieu de propagation. La maîtrise de ces phénomènes au stade d'une ESR semble donc incertaine et le contrôle par l'administration compétente des paramètres peut s'avérer difficile. Considérer l'absence de biodégradation semblerait justifiée au stade de l'ESR dispersion.

Comme déjà évoqué précédemment, une remise en forme esthétique de **l'Outil-ESR** avec l'encodage de données et paramètres par étapes successives permettrait de rendre son utilisation plus simple et plus efficace. L'encodage des résultats d'analyse de sol et des eaux souterraines est assez laborieux et constitue de ce fait une source d'erreur relativement importante. La mise en place d'un module d'importation de données permettrait de réduire les risques d'erreur de retranscription de résultats. Par ailleurs, il n'est actuellement pas possible d'introduire directement des valeurs de coefficient de partition sol/eau (obtenues

par test de lixiviation en laboratoire) dans l'Outil-ESR. Ce dernier point pourrait être corrigé dans le cadre d'une mise à jour de l'outil.

L'outil Bioscreen utilisé pour l'évaluation de la « dispersion » de polluants dans l'eau souterraine s'avère assez pratique dans le cadre de pollution peu complexe (nombre limité de taches et de polluants). Son utilisation devient en revanche beaucoup plus lourde dans le cadre de terrains impactés par de nombreuses taches et de nombreux polluants distincts. La création d'un outil plus intégré comprenant les différentes équations de transport (identiques à celles du logiciel Bioscreen-AT) et les valeurs de paramètres utiles liés aux différents polluants normés (Koc) permettrait :

- Un encodage unique des paramètres intrinsèques du site
- De gérer les pollutions par tache (pour plusieurs contaminants simultanément).
- De générer un rapport automatique formaté de résultats par tache

Cet outil dispersion pourrait être intégré à l'outil ESR de manière à bénéficier de l'encodage des résultats d'analyse d'eau déjà réalisé.

En termes de **contenu et de mise en forme**, les améliorations potentielles du guide sont les suivantes :

- Compléter/préciser le principe d'additivité des taches à considérer pour le lessivage et la dispersion dans le cadre de pollution multiple
- Adapter le logigramme de dispersion pour être cohérent avec les outils utilisés (Bioscreen)
- Réorganiser les différentes annexes (détermination de paramètre spécifiques, méthodologie, ...) qui apparaissent actuellement dans un ordre aléatoire
- Réévaluer la pertinence de l'annexe C3-1 qui concerne davantage des opérations propres aux laboratoires d'analyse
- Ajouter en annexe C3-4 une mise en garde sur les valeurs d'infiltration efficace considérées dans les différents modèles numériques disponibles

8. Conclusions et perspectives

Au vu des valeurs utilisées actuellement dans le GRER, l'établissement de nouvelles valeurs de référence pour les paramètres hydrogéologiques s'avérerait nécessaire. La présente convention a été établie à cette fin.

Pour y parvenir, le travail s'est d'abord focalisé sur l'inventaire des sources de données disponibles et sur le choix des études les plus pertinentes à consulter. Ensuite, une base de données adaptée aux objectifs de la convention a été développée. Cette base de données a pris la forme d'une géodatabase (GDB) afin d'obtenir un compromis entre la composante géographique nécessaire à la spatialisation des études et la composante base de données nécessaire aux traitements ultérieurs. L'ensemble des études jugées pertinentes ont été consultées et encodées dans la base de données. Le choix des études s'est porté sur les études de caractérisation des masses d'eau souterraine ainsi que sur les études de zone de prévention. Finalement, différents traitements statistiques ont été appliqués sur le jeu de données. Plusieurs échelles d'agrégation ont été utilisées (sur base de la lithologie, de la classification actuellement utilisé dans le GRER, du réseau EuroWaterNet et des masses d'eau souterraine). Cette façon de procéder a été choisie afin de comparer les résultats et de proposer différentes alternatives à la classification actuellement utilisé dans le GRER.

Globalement, l'agrégation des données selon les différentes classifications tendent vers les mêmes résultats. La catégorie « nappe alluviale/gravier » et la catégorie « nappe du Bruxellien/sables » présentent systématiquement les valeurs de conductivités hydrauliques les plus importantes alors que la catégorie « massif ardennais/schiste et grès » présente les valeurs les plus faibles.

Pour ce qui est de la porosité efficace et de la dispersivité longitudinale, les données ne sont généralement pas suffisantes pour les traiter rigoureusement de manière statistique, à l'exception des calcaires et des craies pour lesquels les valeurs de porosité varient globalement entre 0.1 et 5% et les valeurs du ratio dispersivité longitudinale/distance de traçage entre 0.1 et 0.7 m/m. Ces valeurs sont fréquemment déduites de calibration de solutions analytiques sur les courbes de restitution observées lors des essais de traçage et une tendance à la surestimation des valeurs de dispersivité est souvent observée.

Le degré de raffinement géographique et donc l'augmentation nombre d'unité utilisé dans la classification EuroWaterNet et masses d'eau souterraine influence fortement le nombre de données disponibles. Du point de vue de l'agrégation des données, la classification sur base de la lithologie semble être la plus adéquate. Elle permet une distinction aisée des classes et couvrent globalement tous les contextes hydrogéologiques. De plus, le faible nombre de classes permet d'avoir un nombre important de données pour chacune de celles-ci.

Sur base des traitements statistiques effectués, les nouvelles valeurs de référence peuvent être choisies. L'utilisation de la valeur de moyenne géométrique semble être le choix le plus judicieux pour établir les nouvelles valeurs de référence de conductivité hydraulique à

l'exception des argiles et des marnes. Ces deux unités présentent en effet des valeurs de conductivité hydraulique trop élevées par rapport aux valeurs généralement admises. Des valeurs issues de la littérature sont donc proposées.

La moyenne géométrique semble également être le meilleur choix concernant la porosité efficace de transport au niveau des classes ayant un nombre de données suffisant (calcaires et craies). Des valeurs de porosité efficace de transport pour les autres classes issues de la littérature sont proposées.

Les valeurs de dispersivité obtenues lors de l'encodage de données sont fréquemment déduites de calibration de solutions analytiques sur les courbes de restitution observées lors des essais de traçage et une tendance à la surestimation des valeurs de dispersivité est souvent observée. L'utilisation de ces valeurs ne semble donc pas être opportune. Il est proposé de garder la formule actuellement utilisée dans le GRER pour le calcul de la dispersivité longitudinale.

En ce qui concerne l'infiltration, très peu d'études ont calculé des valeurs sur base d'une méthode physiquement basée. Elles n'ont donc pas été retenues lors de l'encodage des données. Une valeur de 250mm/an est proposée pour l'ensemble des lithologies à l'exception des argiles, des marnes et du schisto-gréseux pour lesquels une valeur de 150mm/an est préconisée pour refléter la proportion plus importante de ruissellement.

En ce qui concerne le gradient hydraulique, sa valeur devrait être déterminée sur base de mesures piézométriques effectuées sur le site étudié ou sur base d'études locales du fait de sa dépendance intrinsèque aux conditions hydrogéologiques. Cependant, cette méthodologie n'est pas applicable. Une valeur imposée de 0.25% est donc proposée par défaut pour le gradient hydraulique.

Compte tenu de l'importance des changements proposés au terme de la convention tant au niveau des valeurs représentatives des paramètres hydrogéologiques qu'au niveau du mode d'agrégation, l'implication induite par ces modifications sur l'étude simplifiée des risques, et plus particulièrement sur les résultats obtenus, devrait être évaluée.

La base de données développée dans le cadre du projet présente certainement un intérêt pour une réutilisation ultérieure à la convention. Sa structure et sa facilité d'encodage en font un outil facilement mis à jour. Son caractère géographique ouvre des perspectives du point de vue la consultation des données notamment pour obtenir des données d'études locales à proximité d'un nouveau site d'étude. Cette consultation de données permettrait de fournir des valeurs de gradient hydraulique sans pour autant devoir en calculer une valeur de référence aberrante à une échelle de travail régionale. De telles données présentent un intérêt pour différentes études hydrogéologiques où ces informations sont nécessaires sans pour autant avoir la possibilité d'effectuer des campagnes de mesure sur site.

9. Bibliographie

- Brouyère S., 2001, Etude et modélisation du transport et du piégeage des solutés en milieu souterrain variablement saturé, Thèse de doctorat, Université de Liège, Faculté des sciences appliquées.
- Dassargues A., 2010, Hydrogéologie, Notes de cours, Université de Liège, Non publié.
- Domenico P.A., 1987, An analytical model for multidimensional transport of a decaying contaminant species, *Journal of Hydrology*, 91, 49-58.
- Hornberger G. M., Wiberg P. L., Raffensperger J. P., & D'Odorico P., 2014, Elements of physical hydrology, JHU Press.
- Service Public de Wallonie, 2008a, Guide de Référence pour l'Etude de Risques, Partie C : Evaluation des risques pour les eaux souterraines.
- Service Public de Wallonie, 2008b, Guide de Référence pour l'Etude de Risques, Annexe C-1 : Rappel des conditions standard d'établissement des valeurs limites VS_N , VI_N , et VI_{nappe} (MCS standard) et présentation des valeurs.
- SPAQuE, 2003, Partie IV – Procédures de calcul des valeurs-seuils (VS_N) et valeurs d'intervention (VI_N) fondées sur la protection des eaux souterraines, Annexe 5 – Procédure de calcul des facteurs de dilution.
- SPAQuE, 2005, Etablissement d'une réglementation relative à l'assainissement des sols pollués en Région wallonne – Procédure de calcul des normes pour les eaux souterraines : valeur de référence ($VR_{\{nappe\}}$), valeur seuil ($VS_{\{nappe\}}$) et valeur d'intervention ($VI_{\{nappe\}}$) – Annexe 1 : Macro-nappes définies dans le cadre du réseau européen EUROWATERNET.

10. Annexes

10.1. Domaines de la géodatabase

Description des domaines (1/2)

Coded value domain
Type_rapport
Description Type de rapport
Field type Short integer
Split policy Default value
Merge policy Default value

Code	Description
0	Autres
1	Carte hydrogéologique
2	Rapport de bureau d'étude
3	Thèse de Doctorat
4	Rapport scientifique
5	Rapport technique

Coded value domain
Type_points
Description Origine du prélèvement
Field type Short integer
Split policy Default value
Merge policy Default value

Code	Description
0	Autres
1	Piezomètre
2	Puits

Coded value domain
Etendue
Description Etendue du projet
Field type Short integer
Split policy Default value
Merge policy Default value

Code	Description
0	Locale
1	Régionale

Coded value domain
Traçage
Description
Field type Short integer
Split policy Default value
Merge policy Default value

Code	Description
0	Non
1	Oui

Coded value domain
Densite
Description Densité de données
Field type Short integer
Split policy Default value
Merge policy Default value

Code	Description
0	Faible
1	Moyenne
2	Elevé

Coded value domain
Type_essai
Description Type d'essai
Field type Short integer
Split policy Default value
Merge policy Default value

Code	Description
0	Non précisé
1	Slug test
2	Essai de pompage
3	Autres

Description des domaines (2/2)

Coded value domain	
MESO	
Description	Masses d'eau
Field type	Short integer
Split policy	Default value
Merge policy	Default value
Code	Description
0	RWE013
1	RWE030
2	RWE031
3	RWE032
4	RWE051
5	RWE053
6	RWE060
7	RWE061
8	RWE080
9	RWE160
10	RWM011
11	RWM012
12	RWM021
13	RWM022
14	RWM023
15	RWM040
16	RWM041
17	RWM052
18	RWM071
19	RWM072
20	RWM073
21	RWM091
22	RWM092
23	RWM093
24	RWM094
25	RWM100
26	RWM102
27	RWM103
28	RWM141
29	RWM142
30	RWM151
31	RWR092
32	RWR101
33	XXXXXX
34	RWE017

Coded value domain	
GRER	
Description	Nappes GRER
Field type	Short integer
Split policy	Default value
Merge policy	Default value
Code	Description
0	Nappe alluviale
1	Nappe du Crétacé de Hesbaye
2	Nappe du Bruxellien
3	Nappe calcaire
4	Nappe du Sinémurien
5	Nappe des schistes et grès
6	Multiple
7	Autre
8	Nappe non exploitable

Coded value domain	
SPAQuE	
Description	Nappes SPAQuE
Field type	Short integer
Split policy	Default value
Merge policy	Default value
Code	Description
0	BE001
1	BE002
2	BE003
3	BE004
4	BE005
5	BE006
6	BE007
7	BE008
8	BE009
9	BE010
10	BE011
11	BE012
12	BE013
13	BE014
14	BE015
15	BE016
16	XXXXX

10.2. Synthèse des études consultées et encodées dans le cadre de la convention

Nom	Auteur	Année
Etat des masses d'eau souterraines du sud de la province de Luxembourg (MASSOSUDLUX)	ULg Arlon	2014
Rapport de synthèse Action Hesbaye	CRA, ULg-Gembloux et LGIH	1996
Etude et modélisation du transport et du piégeage de solutés en milieu variablement saturé	Serge Brouyère	2002
Conditionnement par des mesures de conductivités hydrauliques de hauteurs piézométriques et de résistivité électrique	Céline Rentier	2002
Caractérisation complémentaire des masses d'eau dont le bon état dépend d'interactions entre les eaux de surface et les eaux souterraines (ESO-ESU)	ULg	2016
Synclin'EAU	ULg	2009
Etude des ressources en eau du Crétacé de l'est du Pays de Herve	Huygens C.	1987
Contribution à l'étude de la vulnérabilité des nappes aquifères du Crétacé du Pays de Herve	Flamion B.	1995
Etude hydrogéologique de la Région de Porcheresse (Daverdisse)	SGB	1980
Projet concerté de valorisation des eaux d'exhaure	Aquale	2009
Etude calcaire carbonifère du bord nord du synclinorium de Namur	FPMS	2002
Mesures urgentes en vue de pallier les déficiences de la nappe calcaire carbonifère du Tournaisis	Electrabel	1992
Kon Tiki Gemmenich	LGIH	1995
Etude pour l'implantation de puits de pompage d'eau souterraine autour de la future carrière de Barry	FPMS	1993

(Tournai)		
GTH Station de traitement des eaux pour le calcaire carbonifère, infrastructure de production, de stockage et de transport d'eau potable	Intercommunale SIDEHO et SGB	1990
Etude de la contamination de la nappe aquifère de Hesbaye par les nitrates : hydrogéologie, hydrochimie et modélisation mathématique des processus d'écoulement et de transport en milieu saturé	Vincent Hallet	1998
Groundwater flow and contaminant transport in an alluvial aquifer : in-situ investigation and modelling of a brownfield with strong groundwater surface water interactions	Jordi Battle-Aguilar	2008
Tertre - Etude hydrogéologique	LGIH RECT932	1993
Etude des potentialités de l'aquifère du Crétacé du Brabant Phase 1 ; Etude hydrogéologique et hydrogéochimique des aquifères du Crétacé, du Dévonien et du socle de l'Est du bassin de la Dyle	ULB	2000
Contribution à l'étude de la genèse et de la protection des eaux minérales du massif de Stavelot	E. Laurent	1987
Détermination du coefficient intrinsèque de dispersion radiale du Crétacé de la Haine à Havré, fiabilité du modèle radial de dispersion basé sur ce coefficient	E. Laurent	1982
Evaluation des ressources en eau du bassin hydrographique de la Dyle dans la région de Louvain-la-Neuve	UCL	1977
Etude de la pollution des aquifères du bassin de Mons en aval du site carbochimique a Tertre	FPMS	2000
Etudes des ressources en eaux du Brabant Wallon	IBW	1987
Zone de prévention : Captage de Modave	Geolys	2012
Zone de prévention : Captage de Bas-Oha	Geolys	2012
Zone de prévention : Menil Favay	BCG	2005
Zone de prévention : Captage de Miavoye	Geolys	2005
Zone de prévention : Ostemeree P1	Geolys	2013
Zone de prévention : Puits du Moulin	Geolys	2014

Zone de prévention : Carrière d'Ecaussines	BCG	2009
Zone de prévention : Puits de Préhyr	BCG	2012
Zone de prévention : Ebly	Geolys	2011
Zone de prévention : Vivaque St Martin	Geolys	2014
Zone de prévention PP Inasep-Chataigner	Geolys	2014
Zone de prévention : Inasep-Etangs	Geolys	2014
Zone de prévention : Scy	SWDE	2006
Zone de prévention : Devant la Fange	Sher	2013
Zone de prévention : Rolibuchy	Sher	2014
Zone de prévention : Braunlauf	SGS	2014
Zone de prévention : Mon Antone	SGS	2014
Zone de prévention : Bruyères	SGS	2014
Zone de prévention : Regenber	SGS	2015
Zone de prévention : Vervaet	BCG	2014
Zone de prévention : Brassic	Umons	2015
Zone de prévention : Yvoir - Champale	SGS	2015
Zone de prévention : Hottleux	SGS	2015
Zone de prévention : Buzin	BCG	2015
Zone de prévention : Ancienne Barrière	Geolys	2015
Zone de prévention : Beauvechain et Nodebais	SWDE/SGS	2005
Zone de prévention : Ecluse Amay	SWDE	1997
Zone de prévention : Seilles	SWDE	1998
Zone de prévention : Tramaka	Tractebel	1998

Zone de prévention : carrière de Bioul	SWDE et Ecofox	1996
Zone de prévention : Pre de l'Oie	SWDE et ISSeP	1996
Zone de prévention : Aubange	SWDE et Ecofox	1999
Zone de prévention : Assesse	SWDE et ISSeP	1996
Zone de prévention : Udange	SWDE et LGIH	1997
Zone de prévention : Heuvel	SWDE et LGIH	1999
Zone de prévention : Eben-Emael	SWDE	1996
Zone de prévention - Beauraing Tamizon	SWDE	1996
Zone de prévention : Slins	SWDE et LGIH	1998
Zone de prévention : Obrechueil	SWDE et LGIH	1996
Zone de prévention : Hornu et Boussu	SWDE et Aquale	2004
Zone de prévention : Blaton Bernissart	SWDE et Serco	1999
Zone de prévention : Thynes et Lisogne	SWDE et Ecofox	1996
Zone de prévention : Fize le Marsal	SWDE	1999
Zone de prévention : Chievres	SWDE et Geologica	1998
Zone de prévention : Congo et Villers-Perwin	SWDE et LGIH	1997
Zone de prévention : Morialme	SWDE et Geologica	1997
Zone de prévention : Fosses-la-Ville	SWDE et autre	1999
Zone de prévention - Estinnes	SWDE et ISSeP	1997
Zone de prévention - Bossiere	SWDE et Ecofox	1996
Zone de prévention : Avin	SWDE	1997
Zone de prévention : Hastière	SWDE et Ecofox	1996
Zone de prévention : Saint-Vaast	SWDE et Ecofox	1999

Zone de prévention - Spiennes	SWDE et ISSeP	1996
Zone de prévention - Lens	SWDE et Tractebel	1996
Zone de prévention - Nivelles	SWDE et Geologica	1998
Zone de prévention - Baulers	SWDE	1997
Zone de prévention - Neufvilles	SWDE et Serco	1998
Zone de prévention - Solre-sur-Sambre	SWDE et Ecofox	1995
Zone de prévention - Chabotte	SWDE	1998
Zone de prévention - Jandrain	SWDE	1994
Zone de prévention - Crevecoeur	SWDE	1994
Zone de prévention - Bas-Oha	SWDE et Tractebel	1997
Zone de prévention - Andenne Fontaine	SWDE	1999
Zone de prévention - Montignies	SWDE et Tractebel	2001
Zone de prévention - Haze Mont	SWDE	1998
Zone de prévention - Erbaut	SWDE et Ecofox	2001
Zone de prévention - Erquennes	SWDE	2000
Zone de prévention - Houte-Houyoux	SWDE et LGIH	1999
Zone de prévention - Outils-Montignies	SWDE et SGS	2002
Zone de prévention - Le Roeulx	SWDE	1999
Zone de prévention - Le Roeulx	SWDE	1999
Zone de prévention - Perwez	Geolys	2015
Zone de prévention - Perwez	Geolys	2015
Zone de prévention - Fichermont	Geocom Belgium	2001
Zone de prévention - Ornoy	BCG	2009

Zone de prévention - 4 sapins	BCG	2009
Zone de prévention - 4 sapins	BCG	2009
Zone de prévention - Manil	BCG	2009
Zone de prévention - Limal	BCG	2009
Zone de prévention - Tri Coquiat	BCG	2006
Zone de prévention - Sauvagemont	BCG	2004
Zone de prévention - Ceroux	BCG	2001
Zone de prévention - Crupet	BCG	2006
Zone de prévention - Biesmerée	SWDE	1999
Zone de prévention - Momignies	SWDE et Ecofox	1999
Zone de prévention - Lierneux	SWDE et SGS	1999
Zone de prévention - Aiseau	Tractebel	2001
Zone de prévention - Havelange	BCG	2005
Zone de prévention - Viesville	ULB	1995
Zone de prévention - Arbre	SWDE et Ecofox	2003
Zone de prévention - Givry	SWDE et SGS	2002
Zone de prévention - Mont Saint Andre	SWDE	2003
Zone de prévention - Mont Saint Andre	SWDE	2003
Zone de prévention - Robertville et Sourbrodt	SWDE et Tractebel	2003
Zone de prévention - Gerpennes	SWDE et SGS	2003
Zone de prévention - Molembais	SWDE	2003
Zone de prévention - Remicourt	SWDE	2004
Zone de prévention - Baudour	SWDE	2002

Zone de prévention - Platinerie	SWDE et SGS	2001
Zone de prévention - Latour	SWDE	2004
Zone de prévention - Biron	SWDE	2003
Zone de prévention - Silenrieux	SWDE et Ecofox	1994
Zone de prévention - Rabauty	SWDE et Ecofox	2004
Zone de prévention - Jollan-Merlin	SWDE et Ecofox	2003
Zone de prévention - Vehir	SWDE et Ecofox	2005
Zone de prévention - Maffle	SWDE et SGS	2002
Zone de prévention - Yves Gomezee	SWDE et SGS	2002
Permis environnement - Les Hés	ULg Arlon	2015
Zone de prévention - Nidrum	SGS	2016
Zone de prévention - Waremme	SWDE	1996
Zone de prévention - Havelange	BCG	2005
Zone de prévention - Houmart	SWDE et Geolys	1999
Zone de prévention - Remicourt	SWDE	1998
Zone de prévention - Pecrot-La Motte	SWDE et Ecofox	2005
Zone de prévention - Bassenge	SWDE	2004
Zone de prévention - Triviere	SWDE et URS	2005
Zone de prévention - Saint-Pierre	SWDE	2007
Zone de prévention - Marche les Dames	SWDE	2001
Zone de prévention - Jandrain	SWDE	2008
Zone de prévention - Puits du Roy	BCG	2005
Zone de prévention - Finnevaux	BCG	2005

Zone de prévention - Les Awiches	Incitec	2005
Zone de prévention - Robechies	SWDE	2001
Zone de prévention - Lac de Bambois	BCG	2004
Zone de prévention - Rognee	BCG	2006
Zone de prévention - Puits de Grevy	Geolys	2007
Zone de prévention - Les Avins	Ecofox	2004
Zone de prévention - Butgenbach	SGS	2005
Zone de prévention - Kuchelscheid	SGS	2005
Zone de prévention - Hutte	SGS	2005
Zone de prévention - Domane	SGS	2005
Zone de prévention - Weywertz	SGS	2005
Zone de prévention - Wasserturm	SGS	2005
Zone de prévention - Elsenborn	SGS	2005
Zone de prévention - Hogne	BCG	2010
Zone de prévention - Blicquy	Sher	2011
Zone de prévention - UCL	ISSeP	2011
Zone de prévention - Lienne	BCG	2011
Zone de prévention - Achet	BCG	2005
Zone de prévention - Flawinne	SWDE	2007
Zone de prévention - Atert	ULg - Arlon	2005
Zone de prévention - Lorce	Geolys	2011
Zone de prévention - Chapelle	BCG	2007
Zone de prévention - Chevetogne	BCG	2006

Zone de prévention - Dolembreux	SWDE	2004
Zone de prévention - Rodt	SGS	2004
Groundwater and geochemical modelling of the unconfined Brussels aquifer, Belgium	L. Peeters	2010