

Etude exploratoire relative à la datation des eaux souterraines
en Région wallonne à l'aide du Tritium.
Application aux nappes de Hesbaye, du Pays de Herve,
Hoyoux-Néblon et du Tournaisis

Hydrogéologie et Géologie de l'environnement
Secteur GEO³ - Département ArGEnCo
Université de Liège

Philippe ORBAN
Jordi BATLLE AGUILAR
Alain DASSARGUES
Serge BROUYERE

Novembre 2006

Contenu

1	Introduction	2
2	Utilisation des isotopes en hydrogéologie.....	2
3	Campagnes d'échantillonnage.....	3
3.1	Echantillonnage des eaux souterraines.....	7
3.1.1	Echantillonnage dans les nappes des craies du Pays de Herve, des calcaires du Néblon et du Tournaisis	7
3.1.2	Echantillonnage dans la nappe aquifère de Hesbaye	7
3.2	Echantillonnage des eaux de surface.....	7
4	Analyses isotopiques	12
4.1	Méthode d'analyse	12
4.2	Résultats	12
4.2.1	Echantillons prélevés dans les nappes des craies du Pays de Herve, des calcaires du Néblon et du Tournaisis	12
4.2.2	Echantillons prélevés dans la nappe aquifère de Hesbaye	12
4.2.3	Echantillons prélevés dans les eaux de surface du bassin du Geer	17
5	Interprétation	17
5.1	Modèles mathématiques	17
5.2	Application aux données isotopiques collectées	20
5.2.1	Application aux données isotopiques collectées dans les nappes des craies du Pays de Herve, des calcaires du Néblon et du Tournaisis.....	20
5.2.2	Application aux données isotopiques collectées dans la nappe aquifère de Hesbaye.....	20
5.2.3	Commentaires.....	21
6	Conclusions et perspectives	25
7	Références	25

1 Introduction

Dans le cadre du projet européen FP6 – IP AquaTerra, l'équipe d'Hydrogéologie et Géologie de l'Environnement de l'Université de Liège (HGULg) a réalisé une analyse de tendances des concentrations en nitrate dans les aquifères de la Hesbaye liégeoise, du Hoyoux-Néblon, du Pays de Herve et de la plaine alluviale de la Meuse. Dans l'aquifère de Hesbaye, l'analyse montre que la tendance est principalement à la hausse, spécialement dans la partie Sud de l'aquifère où les concentrations en nitrates augmentent en moyenne de 1 mg/l par an depuis 1960. Dans la partie Nord de l'aquifère, les nitrates ne sont pas encore détectés ou à de très faibles concentrations.

Différents auteurs (notamment Broers 2004; Koh *et al.* 2006) ont mis en évidence l'importance de l'âge de l'eau dans la problématique des contaminations diffuses. La distribution spatiale des âges de l'eau souterraine est un facteur clé déterminant la distribution des solutés en milieu souterrain. D'une part, il est vain de vouloir comparer des eaux d'âges différents, d'autre part, il est intéressant de corrélérer l'absence de contaminants et l'âge de l'eau dans certaines zones de l'aquifère, notamment de déterminer si l'absence de nitrates est due au fait que l'eau est infiltrée avant 1960, période antérieure à l'augmentation des épandages de fertilisants azotés ou si cela est dû à d'autres phénomènes comme la dénitrification.

L'estimation de l'âge de l'eau est un problème étudié depuis de nombreuses années par les hydrogéologues au moyen de traceurs naturels, dont le tritium. HGULg, grâce à un cofinancement de la direction des Eaux souterraines de la Direction Générale des Ressources Naturelles et de l'Environnement (DGRNE), a réalisé une campagne d'analyses isotopiques du tritium dans les nappes de Hesbaye, du Pays de Herve, du Hoyoux-Néblon et du Tournaisis (cette dernière ajoutée à l'étude suite à la demande de la DGRNE), dans le but premier d'évaluer les potentialités de cette technique pour les aquifères de la région wallonne. Après un bref rappel théorique concernant l'utilisation des isotopes en hydrogéologie, la description des campagnes d'échantillonnage est présentée. Le lecteur trouvera ensuite les résultats des analyses tritium et éléments majeurs réalisées sur les échantillons prélevés. Une interprétation de ceux-ci à l'aide d'un modèle mathématique du type fonction de transfert est ensuite proposée.

2 Utilisation des isotopes en hydrogéologie

Durant les cinquante dernières années, l'intérêt des isotopes en hydrogéologie a été démontré au travers de nombreuses études en relation avec la caractérisation, l'utilisation, la gestion et la protection des ressources en eau (Schlosser *et al.* 1988; Olive *et al.* 1996; Szabo *et al.* 1996; Katz *et al.* 2004; Cook *et al.* 2005). Les techniques de datation des eaux souterraines basées sur les radio-isotopes permettent d'estimer le temps de séjour moyen des eaux d'un aquifère et l'âge moyen de l'eau.

Le tritium ^3H , isotope radioactif de l'hydrogène, a une période, ou demi-vie, de $12,43 \pm 0,05$ ans et sa teneur s'exprime généralement en unité tritium ou UT laquelle correspond à un atome de ^3H pour 10^{18} atomes d'hydrogène soit 0,118 Bq/l.

Produit naturellement par réactions de protons et neutrons avec l'azote et l'oxygène dans la haute atmosphère, les concentrations atmosphériques en tritium étaient constantes et très basses (de l'ordre de 5-10 UT) avant les essais thermonucléaires aériens. Suite à ces essais, les teneurs en tritium ont augmenté pour atteindre un pic d'environ 6000 UT dans l'hémisphère Nord pendant les mois d'été de 1962 et 1963. Depuis la fin des essais aériens, les concentrations décroissent exponentiellement pour tendre vers un palier de 10 à 20 UT à la

fin des années 90 (*Figure 2.1*). Les hautes concentrations en tritium des années 60 offrent l'opportunité de dater les eaux souterraines jeunes, c'est à dire d'âge inférieur à une quarantaine d'années.

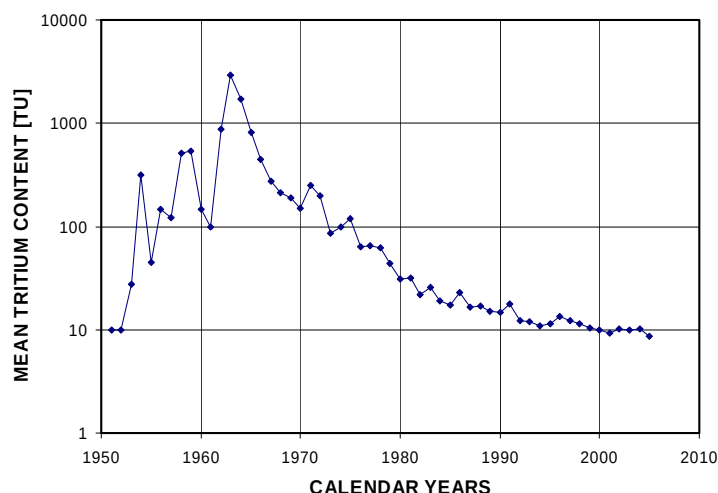


Figure 2-1 Concentrations moyennes en tritium dans les précipitations calculées sur base des données mesurées aux stations d'Ottawa, Vienne et Groningen

3 Campagnes d'échantillonnage

Dans le cadre du projet européen Aquaterra, HGULg étudie l'évolution temporelle de la contamination par les nitrates de la nappe de Hesbaye. De nombreux auteurs ayant montré l'importance de l'âge de l'eau dans la compréhension des contaminations diffuses, HGULg a effectué une campagne d'analyse tritium dans la nappe aquifère de Hesbaye. A la demande de la DGRNE qui cofinance cette campagne, des échantillons ont également été prélevés dans les aquifères des craies du Crétacé du Pays de Herve, des calcaires du bassin du Néblon et dans les calcaires du Tournaisis. Les échantillons ont soit été remis à HGULg par l'administration de la Région wallonne (Tableau 3.1) soit prélevés directement par HGULg (Tableau 3.2). En chaque point d'échantillonnage, deux échantillons ont été prélevés, un pour l'analyse tritium, l'autre pour l'analyse des éléments majeurs.

Deux campagnes d'échantillonnage ont été réalisées. La première, réalisée de février à mai 2005, a permis le prélèvement de 43 échantillons dans les nappes aquifères de Hesbaye, du Pays de Herve, du Hoyoux-Néblon et du Tournaisis (Mouscron). Le *Tableau 3.3* présente quelques caractéristiques (géologie, profondeur du puits, position des crépines...) de chacun des points de prélèvement d'eau souterraine. La profondeur des puits et la position des crépines ne sont connus que pour quelques points de prélèvement alors que cette information se révèle souvent être de première importance lors de la préparation de la campagne ou lors de l'interprétation des résultats. Il est en effet démontré, notamment pour les aquifères crayeux, que d'importantes variations verticales de la chimie des eaux souterraines existent (Barrez 2006).

A l'occasion de la deuxième campagne d'échantillonnage en novembre 2005, dix échantillons ont été prélevés dans les eaux de surface du bassin du Geer, en période de basses-eaux.

La *Figure 3.1* présente la localisation générale des points de prélèvement. Les *Figures 3.2 à 3.4* permettent de positionner les points de prélèvements dans chacun des bassins.

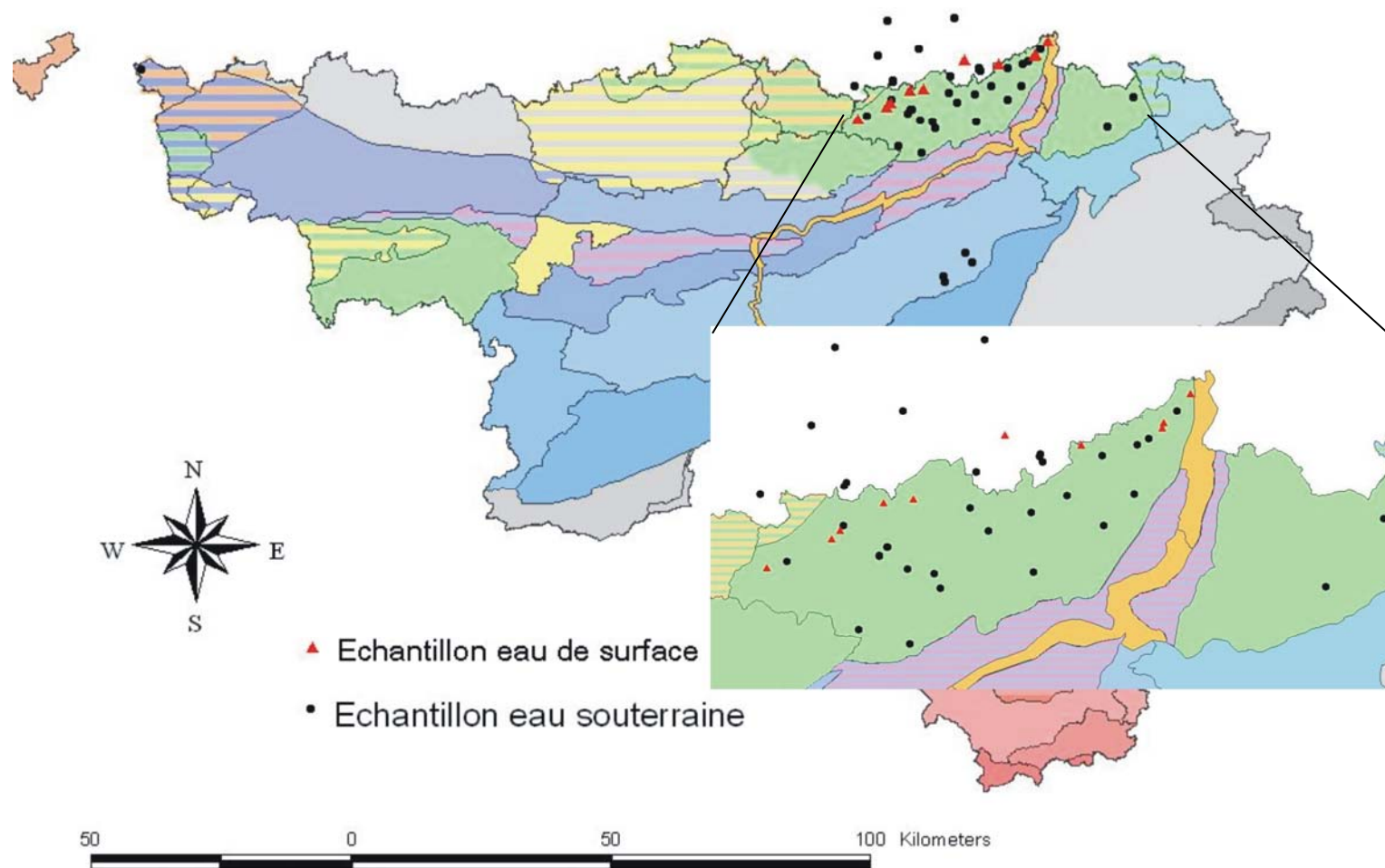


Figure 3-1 Localisation des points d'échantillonnage dans les différentes masses d'eau souterraine de la Région wallonne. Les points de prélèvements au Nord du bassin du Geer sont localisés dans la partie captive de l'aquifère qui se prolonge en Région Flamande sous les terrains sablo-argileux du Tertiaire.

Tableau 3-1 Points de prélèvement des eaux souterraines, échantillons fournis par la DGRNE

<i>Num.échant.</i>	<i>Nom</i>	<i>Responsable gestion</i>	<i>Masse eau souterraine</i>	<i>Date prélèvement</i>	<i>Responsable prélèvement</i>	<i>X Lambert</i>	<i>Y Lambert</i>
1	Mouscron	IEG Mouscron	Mouscron	07.02.2005	IEG Mouscron	67500	160250
2	HOM6	DGRNE	Pays Herve	12.04.2005	ISSeP	258280	154920
3	CHAI-20	DGRNE	Pays Herve	12.04.2005	ISSeP	253290	149130
23	SGB-1	DGRNE	Hesbaye	20.04.2005	ISSeP	215676	152525
24	SGB-2	DGRNE	Hesbaye	20.04.2005	ISSeP	215693	152505
25	SGB-3	DGRNE	Hesbaye	20.04.2005	ISSeP	215682	152488
26	JEN083	Particulier	Hesbaye	20.05.2005	ISSeP	219700	150220
27	PC-Bovenistier	HGULg	Hesbaye	21.04.2005	ISSeP	215035	151758
28	PzCS-Bovenistier	HGULg	Hesbaye	21.04.2005	ISSeP		
29	Zone Fret 1	DGRNE	Hesbaye	12.04.2005	ISSeP	228209	150354
30	Zone Fret 1	DGRNE	Hesbaye	28.07.2004	ISSeP	228209	150354
31	Tous Saint	DGRNE	Hesbaye	11.04.2005	ISSeP	236869	157018
32	Tous Saint	DGRNE	Hesbaye	28.07.2004	ISSeP	236869	157018
33	P4 + P5	DGRNE	Hesbaye	11.04.2005	ISSeP	207085	151241
34	P4 + P5	DGRNE	Hesbaye	28.07.2004	ISSeP	207085	151241
35	Rondoval	DGRNE	Hesbaye	11.04.2005	ISSeP	222820	155850
36	Rondoval	DGRNE	Hesbaye	28.07.2004	ISSeP	222820	155850
37	CHS 077	DGRNE	Hesbaye	11.04.2005	ISSeP	213205	145462
38	CHS 077	DGRNE	Hesbaye	27.07.2004	ISSeP	213205	145462
39	LIM 001	DGRNE	Hesbaye	11.04.2005	ISSeP	217425	150599
40	LIM 001	DGRNE	Hesbaye	27.07.2004	ISSeP	217425	150599
41	Abbaye LIE-17	DGRNE	Hesbaye	11.04.2005	ISSeP	234267	154343
42	Abbaye LIE-17	DGRNE	Hesbaye	28.07.2004	ISSeP	234267	154343

Tableau 3-2 Points de prélèvement des eaux souterraines, prélèvements par HGULg

<i>Num.échant.</i>	<i>Nom</i>	<i>Responsable gestion</i>	<i>Masse eau souterraine</i>	<i>Date prélèvement</i>	<i>X Lambert</i>	<i>Y Lambert</i>
4	Galerie Principale	CILE	Néblon	18.05.2005	227277	123253
5	Galerie Communale	CILE	Néblon	18.05.2005	227362	123089
6	Galerie Tinkou	CILE	Néblon	18.05.2005	227251	122931
7	P-1	DGRNE	Néblon	23.05.2005	226154	124882
8	P-18	DGRNE	Néblon	23.05.2005	222000	119200
9	Font Saint Martin	DGRNE	Néblon	23.05.2005	221790	120310
10	Zepperen 2	VMW	Hesbaye	23.03.2005	211202	169649
11	Vliermaal 1	VMW	Hesbaye	23.03.2005	224003	170309
12	Alst-bij-Simt-Truiden	VMW	Hesbaye	23.03.2005	209151	162910
13	Voort 3	VMW	Hesbaye	23.03.2005	217041	164235
14	Montenaken K. Vorsen 2	VMW	Hesbaye	23.03.2005	204774	157044
15	Bovelingen 1	VMW	Hesbaye	23.03.2005	212171	158046
16	Bovelingen 3	VMW	Hesbaye	15.04.2005	212009	157775
17	Lauw	VMW	Hesbaye	23.03.2005	223292	159011
18	Diets Heur 2	VMW	Hesbaye	23.03.2005	228765	160293
19	Diets Heur 6	VMW	Hesbaye	24.03.2005	228804	160462
20	Diets Heur 7	VMW	Hesbaye	15.04.2005	228981	159840
21	Bassenge	VMW-SWDE	Hesbaye	23.03.2005	238130	161810
22	Roclenge	VMW-SWDE	Hesbaye	23.03.2005	237128	161269
43	P1-Eben.Mael	SWDE	Hesbaye	18.03.2005	240525	164225
44	Pz1-Bas-Slins	SWDE	Hesbaye	18.03.2005	234127	160360
45	Rues Station 39	Particulier	Hesbaye	21.03.2005	217605	144151
46	Pêcherie Waremmé	Particulier	Hesbaye	21.03.2005	211930	154310
47	Galerie Xendremal	CILE	Hesbaye	07.04.2005	228024	155432
48	Galerie Juprelle	CILE	Hesbaye	07.04.2005	231125	156925
49	Galerie Kemexhe	CILE	Hesbaye	07.04.2005	224375	153875
50	Galerie Jeneffe	CILE	Hesbaye	07.04.2005	220260	149000

3.1 Echantillonnage des eaux souterraines

3.1.1 Echantillonnage dans les nappes des craies du Pays de Herve, des calcaires du Néblon et du Tournaisis

A la demande de l'administration de la Région wallonne, divers échantillons ont été prélevés dans les nappes des craies du Pays de Herve, des calcaires du Néblon et du Tournaisis. Les points de prélèvement ont été choisis par l'administration :

- o un échantillon (échantillon n° 1) a été prélevé dans la nappe des calcaires du Tournaisis ;
- o deux échantillons (échantillons n° 2 à 3) ont été prélevés dans la nappe des craies du Pays de Herve (Figure 3.2);
- o six échantillons (échantillons n° 4 à 9) ont été prélevés dans la nappe des calcaires du Néblon (Figure 3.3).

3.1.2 Echantillonnage dans la nappe aquifère de Hesbaye

Entre février et mai 2005, 34 échantillons (échantillons n° 10 à 50 sauf 29, 31, 33, 35, 37, 39, 41) ont été prélevés tant dans les parties libre que captive de la nappe aquifère de Hesbaye (Figure 3.4). Les points de prélèvements au Nord du bassin du Geer sont localisés dans la partie captive de l'aquifère qui se prolonge en Région Flamande sous les terrains sablo-argileux du Tertiaire. Les points d'échantillonnage ont été choisis, parmi l'ensemble des points répertoriés dans la banque de donnée de la DGRNE, sur base des critères suivants :

- o distribution spatiale des points de prélèvements
- o profondeur de prélèvement (profondeur du puits, position des crépines) ;
- o existence de données nitrates
- o accessibilité et possibilité de prélèvements ;
- o souhaits exprimés par la DGRNE.

Sept échantillons prélevés par l'ISSeP en 2004 ont été remis par la DGRNE (échantillons n°29, 31, 33, 35, 37, 39, 41). Ces échantillons proviennent de puits échantillonnés lors de la campagne 2005.

3.2 Echantillonnage des eaux de surface

Le 7 novembre 2005, 10 échantillons ont été prélevés dans le Geer et dans des sources directement à proximité de la rivière (*Tableau 3.4*). A cette date, le Geer était toujours en régime de récession. Les eaux s'écoulant dans la rivière provenaient donc principalement de l'aquifère des craies. Les points d'échantillonnage ont été choisis en fonction de l'accessibilité des sites de prélèvements et de manière à couvrir l'ensemble de la rivière (Figure 3.4).

Tableau 3-3 Points de prélèvement des eaux de surface

<i>Num. échant.</i>	<i>Nom (Localité)</i>	<i>Type de prélèvement</i>	<i>Responsable prélèvement</i>	<i>X Lambert</i>	<i>Y Lambert</i>
51	Abolens	Source	HGULg	205410	150770
52	Petit-Axhe	Rivière	HGULg	210930	153200
53	Longchamps	Fontaine	HGULg	211690	153960
54	Oleye	Rivière	HGULg	215390	156310
55	Grandville	Source	HGULg	217940	156650
56	Koninsksem	Rivière	HGULg	225770	162130
57	Oborne	Rivière	HGULg	232370	161280
58	Wonck Grand Surdan	Rivière	HGULg	239260	162730
59	Wonck (Geer)	Rivière	HGULg	239400	163200
60	Laumont	Rivière	HGULg	241720	165730

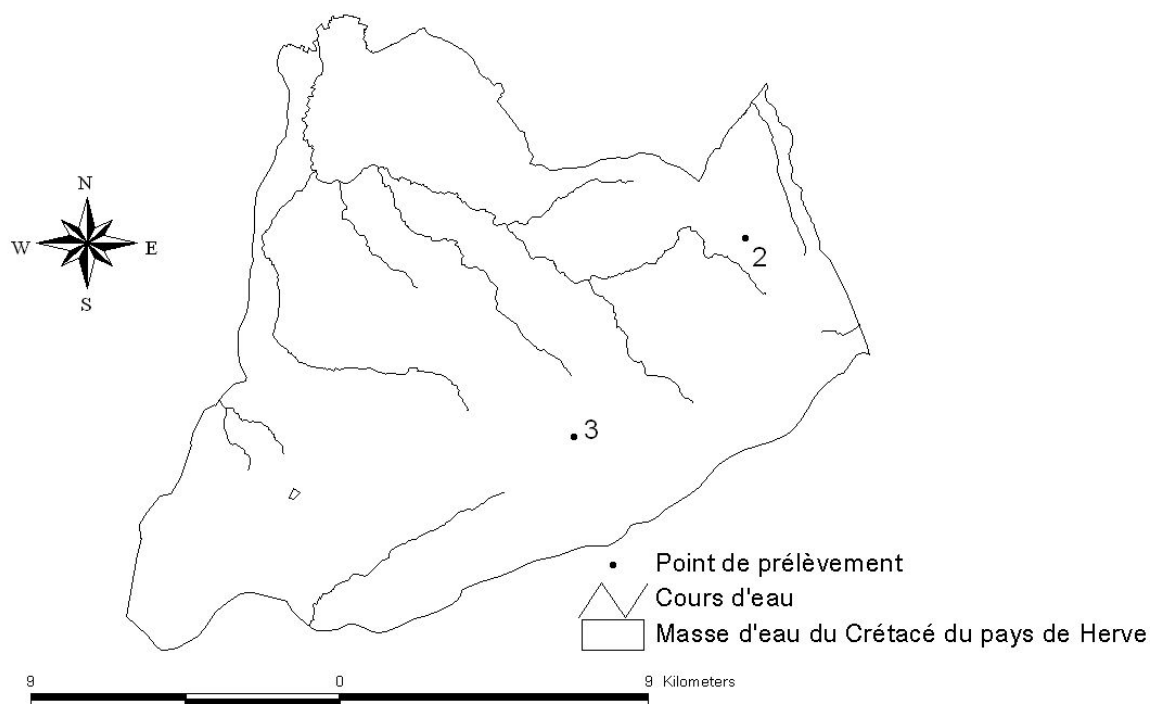


Figure 3-2 Localisation et numéro des échantillons prélevés dans la masse d'eau souterraine du Crétacé du Pays de Herve

Tableau 3-4 Caractéristiques des points de prélèvement d'eau souterraine

<i>Num. échant.</i>	<i>Nom</i>	<i>Type</i>	<i>Profondeur (m)</i>	<i>Sommet crépines (m)</i>	<i>Base crépines (m)</i>	<i>Aquifer</i>	<i>Géologie</i>	<i>Débit pompage (m³·an⁻¹)</i>	<i>Remarques</i>
1	Mouscron	Puits pompage	155.0	115.0	155.0	Libre	Calcaire	--	--
2	HOM-6	Piézomètre	54.5	--	--	Libre	Craie	--	--
3	CHAI-20	Piézomètre	30.0	--	--	Libre		--	--
4	Galerie Principale	Galerie	--	--	--	Libre	Calcaire	--	--
5	Galerie Communale	Galerie	--	--	--	Libre	Calcaire	--	--
6	Galerie Tinkou	Galerie	--	--	--	Libre	Calcaire	--	--
7	P-1	Piézomètre	52.5	49.0	51.5	Libre	Calcaire	--	--
8	P-18	Piézomètre	53.0	--	--	Libre	Calcaire	--	--
9	Font Saint Martin	Source	--	--	--	Libre	Calcaire	--	--
10	Zepperen 2	Puits pompage	117.1	--	--	Captif	Craie	640225	Moyenne 2004 – 2005
11	Vliermaal 1	Puits pompage	94.2	--	--	Captif	Craie	353161	Moyenne 2004 – 2005
12	Alst-bij-Simt-Truiden	Puits pompage	102.4	--	--	Captif	Craie	110755	Moyenne 2004 – 2005
13	Voort 3	Piézomètre	54.5	16.6	53.6	Captif	Craie		
14	Montenaken Klein Vorsen 2	Puits pompage	77.9	43.5	77.0	Captif	Craie	279617	Moyenne 2004 – 2005
15	Bovelingen 1	Puits pompage	92.5	18.6	52.0	Captif	Craie	550765	Moyenne 2004 – 2005
16	Bovelingen 3	Piézomètre	95.0	14.0	18.0	Captif	Craie	--	--
17	Lauw	Puits pompage	33.5	13.0	31.5	Libre	Craie	348539	Moyenne 2004 – 2005
18	Diets Heur 2	Puits pompage	66.5	32.5	68.5	Libre	Craie	216295	Moyenne 2004 – 2005
19	Diets Heur 6	Piézomètre	15.3	10.3	15.3	Libre	Craie	--	--
20	Diets Heur 7	Piézomètre	46.1	41.1	46.1	Libre	Craie	--	--
21	Bassenge	Puits pompage	8.45	--	--	Libre	Craie	303711	Moyenne 2004 – 2005
22	Roclenge	Puits pompage	30.0	15.0	29.0	Libre	Craie	696549	Moyenne 2004 – 2005

<i>Num. échant.</i>	<i>Nom</i>	<i>Type</i>	<i>Profondeur (m)</i>	<i>Sommet crépines (m)</i>	<i>Base crépines (m)</i>	<i>Aquifer</i>	<i>Géologie</i>	<i>Débit pompage (m³·an⁻¹)</i>	<i>Remarques</i>
23	SGB-1	Piézomètre	44.4	30.0	40.0	Libre	Craie	--	--
24	SGB-2	Piézomètre	16.0	9.0	16.0	Libre	Craie	--	--
25	SGB-3	Piézomètre	26.0	16.0	26.0	Libre	Craie	--	--
26	JEN083	Puits particulier	28.2	--	--	Libre	Craie	--	--
27	PC-Bovenistier	Piézomètre	49.0	--	--	Libre	Craie	--	--
28	PzCS-Bovenistier	Piézomètre	34.2	--	--	Libre	Craie	--	--
29 – 30	Zone Fret 1	Piézomètre	48.0	--	--	Libre	Craie	--	--
31 – 32	Tous Saint	Puits particulier	40.0	--	--	Libre	Craie	--	--
33 – 34	P4 + P5	Puits particulier	--	--	--	Libre	Craie	--	--
35 – 36	Rondoal	Puits particulier	--	--	--	Libre	Craie	--	--
37 – 38	CHS 077	Puits particulier	24.6	--	--	Libre	Craie	--	--
39 – 40	LIM 001	Puits particulier	28.3	--	--	Libre	Craie	--	--
41 – 42	Abbaye LIE-17	Puits particulier	36.0	--	--	Libre	Craie	--	--
43	P1-Eben.Mael	Puits pompage	--	--	--	Libre	Craie	--	--
44	Pz1-Bas-Slins	Piézomètre	44.5	20.5	43.3	Libre	Craie	--	--
45	Rue de la Station 39	Puits particulier	10.0	--	--	Libre	Craie	--	--
46	Pêcherie Waremme	Puits artésien	25.0	--	--	Semi- captif	Craie	--	--
47	Galerie Xendremal	Galerie	--	--	--	Libre	Craie	--	--
48	Galerie Juprelle	Galerie	--	--	--	Libre	Craie	--	--
49	Galerie Kemexhe	Galerie	--	--	--	Libre	Craie	--	--
50	Galerie Jeneffe	Galerie	--	--	--	Libre	Craie	--	--

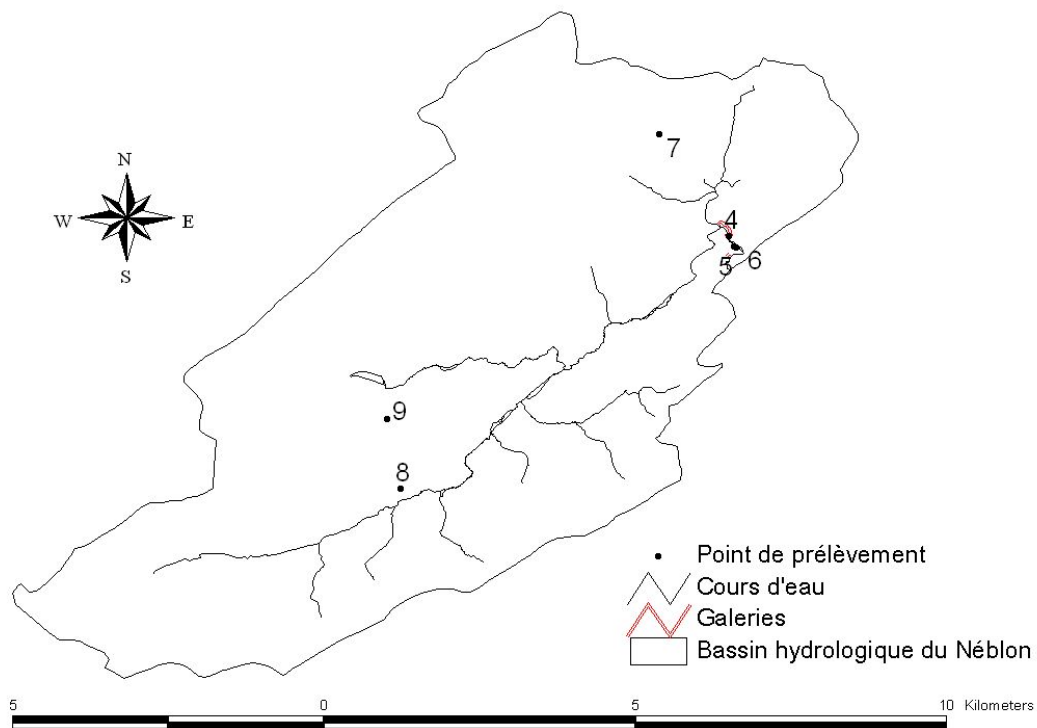


Figure 3-3 Localisation et numéro des échantillons prélevés dans le bassin du Néblon

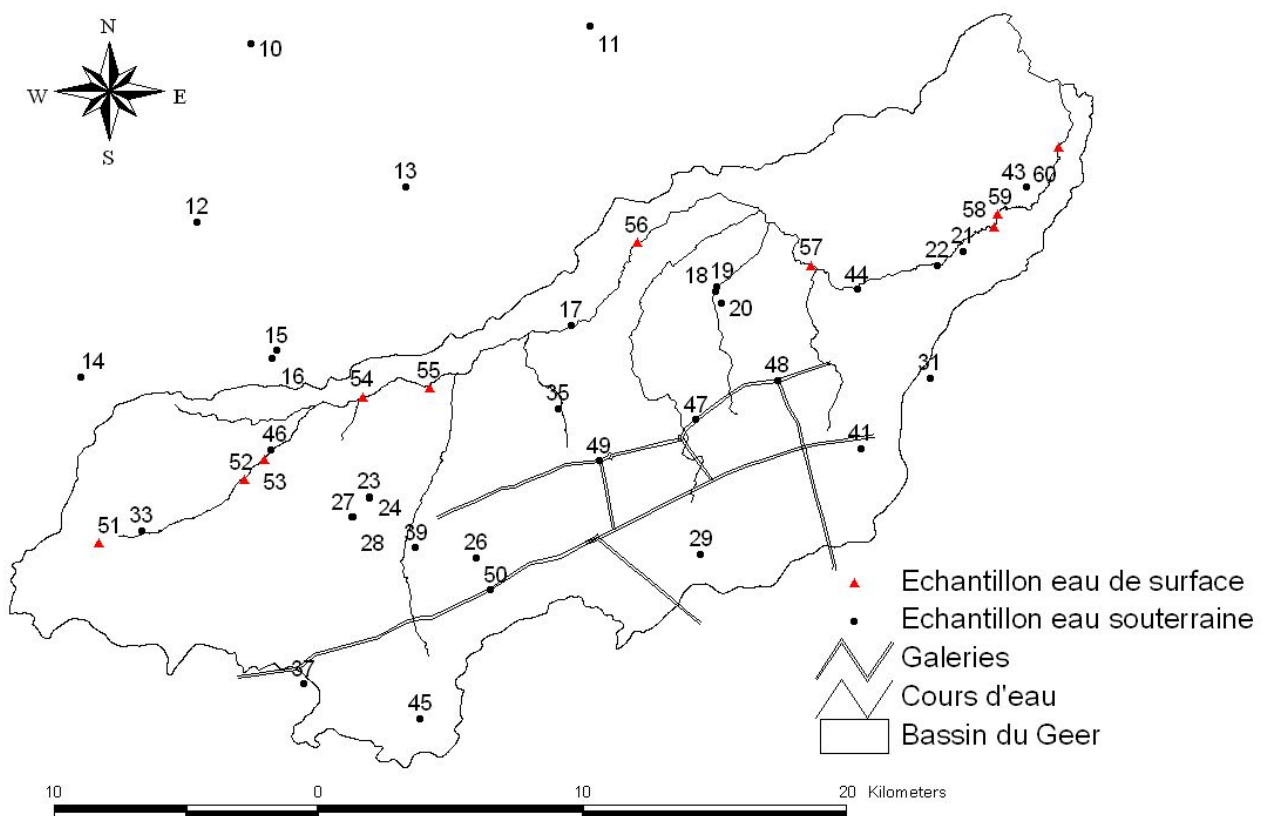


Figure 3-4 Localisation et numéro des échantillons prélevés dans l'aquifère de Hesbaye

4 Analyses isotopiques

4.1 Méthode d'analyse

Les échantillons prélevés pour l'analyse tritium ont été envoyés au laboratoire d'isotopie environnementale (Prof P. Maloszewski, Dr W. Stichler) du GSF-Institute of Groundwater Ecology à Munich (Allemagne) pour analyse de leur contenu en tritium. Les concentrations en tritium sont déterminées en mesurant le rayonnement beta émis lors la dégradation du tritium en hélium. Comme il est compliqué de déterminer des activités spécifiques absolues, les mesures sont comparées à celles effectuées dans les mêmes conditions sur un échantillon de référence. Comme le contenu en tritium de l'eau analysée est relativement faible, la mesure doit être effectuée pendant plusieurs mois (environ trois).

Les éléments majeurs ont été analysés soit dans le laboratoire de chimie de l'ISSeP pour les échantillons prélevés par l'ISSeP soit dans le laboratoire de chimie des eaux de HGULg pour les échantillons prélevés par HGULg.

4.2 Résultats

4.2.1 Echantillons prélevés dans les nappes des craies du Pays de Herve, des calcaires du Néblon et du Tournaisis

Les concentrations en tritium mesurées dans les échantillons prélevés dans l'aquifère des craies du Pays de Herve (Tableau 4.2) et dans l'aquifère des calcaires du Néblon (Tableau 4.3) sont semblables, comprises entre 7.3 et 10.9 UT. Ces concentrations sont caractéristiques d'une eau qui s'est infiltrée après les années 60. Les concentrations en nitrates comprises entre 15.27 et 79 mg/l semblent confirmer que l'eau s'est bien infiltrée après les années 1960. De telles concentrations sont en effet vraisemblablement liées aux épandages agricoles de fertilisants azotés qui ont fortement augmentés après les années 60.

Par contre, la concentration en tritium (3.4 UT) mesurée dans l'échantillon prélevé dans les calcaires du Tournaisis (Tableau 4.4) est plutôt caractéristique d'un mélange entre une eau ancienne (c-à-d qui s'est infiltrée avant les essais nucléaires aériens) et une eau jeune (c à d qui s'est infiltrée après les années 1960).

4.2.2 Echantillons prélevés dans la nappe aquifère de Hesbaye

Les concentrations en tritium mesurées dans les échantillons prélevés dans l'aquifère des craies de Hesbaye sont variables, comprises entre la limite de détection et 14.7 UT (Tableau 4.1). Des eaux d'âges différents coexistent donc au sein de cet aquifère. La distribution spatiale des concentrations en tritium permet toutefois de distinguer globalement trois zones (Figure 4.1) :

- Une zone située au Nord du bassin du Geer pour laquelle les concentrations en tritium sont proches de l'unité. Ces concentrations sont caractéristiques d'une eau qui s'est infiltrée avant les années 60.
- Une zone située dans la partie Sud-Ouest de l'aquifère dans laquelle les concentrations en tritium sont élevées (entre 5 et 14 UT). Ces concentrations sont caractéristiques d'une eau qui s'est infiltrée après les essais nucléaires aériens des années 60.
- Une zone située dans l'Est et au Nord-Est du bassin du Geer dans laquelle les concentrations sont comprises entre 2 et 6 UT. Ces concentrations sont caractéristiques d'un mélange entre des eaux infiltrées avant et après les années 60.

Tableau 4-1 Résultats des analyses isotopiques et éléments majeurs des échantillons prélevés dans la masse d’eau souterraine de Hesbaye

Num. échant.	Nom	³ H (TU)	±2σ	Sp. Cond. (μS·cm ⁻¹) terrain	Température (°C) terrain	Sp. Cond (μS·cm ⁻¹) laboratoire	pH	Dureté totale (°f)	Ca ²⁺ (ppm)	Mg ²⁺ (ppm)	Na ⁺ (ppm)	K ⁺ (ppm)	Cl ⁻ (ppm)	SO ₄ ²⁺ (ppm)	NO ₃ ⁻ (ppm)	F ⁻ (ppm)	H ₂ PO ₄ ⁻ (ppm)	HCO ₃ ⁻ (ppm)
10	Zepperen 2	<1.1	--	711.0	13.19	708.0	7.40	36.7	115.0	19.3	15.9	5.3	10.8	43.5	0.0	0.2	0.0	420.7
11	Vliermaal 1	<0.8	--	634.0	12.44	643.0	7.41	33.7	106.7	17.2	12.2	4.9	10.3	20.1	0.0	0.2	0.0	397.6
12	Alst-bij-Simt-Truiden	1.0	0.9	708.0	11.71	717.0	7.40	38.6	123.7	18.7	8.9	4.4	16.8	21.6	0.0	0.0	0.0	437.7
13	Voort 3	1.4	0.9	703.0	12.03	712.0	7.53	37.3	120.8	17.3	11.4	1.5	28.4	54.3	1.6	0.0	0.0	358.3
14	Montenaken Klein Vorsen 2	7.3	2.0	824.0	11.81	829.0	7.45	42.4	138.0	19.4	13.9	1.8	39.3	62.4	27.2	0.0	0.0	391.3
15	Bovelingen 1	7.9	1.9	833.0	10.91	843.0	7.48	45.0	149.2	19.0	10.9	1.9	30.6	115.1	0.0	0.0	0.0	386.4
16	Bovelingen 3	10.1	2.3	875.0	11.25	874.0	7.37	46.4	165.4	12.5	11.0	5.6	44.4	112.7	0.0	0.0	0.0	374.6
17	Lauw	8.1	2.0	873.0	10.86	868.0	7.73	44.2	143.4	20.6	20.0	7.0	54.9	52.9	47.7	0.0	0.0	364.8
18	Diets Heur 2	3.3	2.9	699.0	11.06	706.0	7.41	37.0	120.6	16.8	10.4	1.1	36.4	36.2	21.1	0.0	0.0	338.0
19	Diets Heur 6	9.8	2.0	766.0	10.82	766.0	7.44	40.3	131.2	18.4	8.4	1.3	40.1	57.0	25.2	0.0	0.0	346.4
20	Diets Heur 7	0.8	2.0	642.0	11.69	656.0	7.23	33.8	110.4	15.0	9.7	1.4	29.2	23.1	22.9	0.0	0.0	331.0
21	Bassenge	4.4	1.9	707.0	11.67	621.0	7.34	30.9	104.7	11.7	12.4	2.3	26.7	29.6	22.2	0.0	0.0	296.8
22	Roclenge	2.5	1.8	671.0	11.94	683.0	7.48	34.9	118.0	13.1	11.6	2.2	25.7	26.1	20.6	0.0	0.0	357.3
23	SGB-1	10.0	1.3	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	52.0	--	--	--
24	SGB-2	9.3	1.2	800.0	10.70	--	6.98	--	--	--	--	--	--	--	55.0	--	--	--
25	SGB-3	7.5	1.2	698.0	10.80	--	7.12	--	--	--	--	--	--	--	34.0	--	--	--
26	JEN083	13.1	1.4	1043.0	11.00	--	6.90	--	--	--	--	--	--	--	99.0	--	--	--
27	PC-Bovenistier	8.8	1.2	746.0	11.30	--	7.10	--	--	--	--	--	--	--	39.0	--	--	--
28	PzCS-Bovenistier	11.1	1.4	837.0	11.00	--	7.07	--	--	--	--	--	--	--	45.0	--	--	--
29	Zone Fret 1	7.8	2.0	752.0	10.30	--	7.01	44.0	155.0	12.6	10.9	1.7	41.0	69.0	30.0	0.1	0.2	--
30	Zone Fret 1	5.7	2.5	743.0	10.30	--	7.08	40.8	171.0	15.2	11.1	3.5	41.0	62.0	29.0	0.1	2.2	--
31	Tous Saint	2.9	2.0	738.0	12.70	--	7.01	46.4	154.0	11.6	10.0	0.9	48.0	38.0	25.0	0.1	0.2	--
32	Tous Saint	4.6	2.2	777.0	13.60	--	6.88	45.88	153.0	11.7	11.1	<1.0	48.0	39.0	24.0	0.1	0.2	--
33	P4 + P5	5.9	2.0	751.0	10.20	--	7.10	44.7	143.0	18.0	14.7	3.1	45.0	74.0	11.1	0.2	0.1	--
34	P4 + P5	6.3	2.1	750.0	11.60	--	7.03	45.4	139.0	18.2	10.8	2.3	43.0	64.0	10.7	0.1	0.0	--
35	Rondoval	9.7	2.1	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	73.0	--	--	--
36	Rondoval	11.2	2.4	942.0	12.60	--	6.99	50.2	162.0	18.1	29.0	8.4	60.0	63.0	71.0	0.1	0.1	--
37	CHS 077	14.9	2.5	800.0	10.80	--	7.07	44.2	166.0	13.4	20.0	0.8	42.0	77.0	47.0	0.1	0.2	--
38	CHS 077	14.0	2.5	793.0	10.70	--	7.06	42.8	152.0	12.9	22.0	<1.0	38.0	74.0	42.0	0.1	0.2	--
39	LIM 001	10.2	2.4	711.0	10.70	--	6.99	41.4	140.0	13.0	12.3	0.8	42.0	41.0	31.0	0.2	0.2	--
40	LIM 001	13.4	2.4	763.0	10.80	--	7.02	42.9	146.0	13.7	16.0	<1.0	42.0	49.0	36.0	0.2	0.7	--
41	Abbaye LIE-17	10.8	2.4	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	50.0	--	--	--
42	Abbaye LIE-17	10.9	2.7	790.0	16.20	--	7.59	42.57	150.0	12.5	13.3	2.7	45	79	52.0	0.1	0.1	--
43	P1-Eben.Mael	6.0	1.2	771.0	10.95	753.0	7.72	38.1	125.0	16.7	14.9	1.7	39.2	45.7	28.1	0.3	0.0	341.8
44	Pz1-Bas-Slins	1.7	1.2	715.0	11.12	731.0	7.59	36.9	127.2	12.5	16.0	1.59	33.6	24.9	26.3	0.0	0.0	367.8
45	Rue de la Station 39	9.4	1.2	1063.0	11.83	1075.0	7.79	46.6	167.9	11.5	41.8	14.7	53.6	110.4	91.4	0.0	0.0	375.4
46	Pêcherie Waremme	3.5	0.9	715.0	11.11	730.0	7.66	36.7	121.6	15.4	11.8	3.1	36.3	26.9	26.8	0.0	0.0	360.2
47	Galerie Xendremal	7.1	2.0	806.0	11.42	822.0	7.51	40.6	137.9	15.2	11.6	2.0	51.1	52.4	42.5	0.0	0.0	335.3
48	Galerie Juprelle	5.8	2.0	803.0	11.02	805.0	7.62	39.9	132.1	16.9	14.1	2.3	50.5	48.2	36.9	0.0	0.0	339.8
49	Galerie Kemexhe	10.2	2.3	893.0	10.79	891.0	7.40	43.9	145.1	18.7	22.4	2.2	63.7	62.1	46.2	0.0	0.0	356.2
50	Galerie Jeneffe	14.7	2.2	855.0	10.88	866.0	7.94	0.9	3.6	<=0.01	206.8	0.3	51.7	67.0	42.2	0.0	0.0	328.4

Tableau 4-2 Résultats des analyses isotopiques et éléments majeurs des échantillons prélevés dans la masse d’eau souterraine du Pays de Herve

<i>Num. échant.</i>	<i>Nom</i>	³ <i>H (TU)</i>	$\pm 2\sigma$	<i>Sp. Cond. (μS·cm⁻¹) terrain</i>	<i>Température (°C) terrain</i>	<i>Sp. Cond (μS·cm⁻¹) laboratoire</i>	<i>pH</i>	<i>Dureté totale (°f)</i>	<i>Ca²⁺(ppm)</i>	<i>Mg²⁺(ppm)</i>	<i>Na⁺(ppm)</i>	<i>K⁺(ppm)</i>	<i>Cl⁻(ppm)</i>	<i>SO₄²⁺(ppm)</i>	<i>NO₃⁻(ppm)</i>	<i>F⁻(ppm)</i>	<i>H₂PO₄⁻(ppm)</i>	<i>HCO₃⁻(ppm)</i>
2	HOM6	7.9	2.1	565.0	10.20	--	7.92	33.4	130.0	1.7	9.1	1.2	37.0	20.0	31.0	0.1	0.2	--
3	CHAI-20	10.9	2.4	865.0	8.90	--	7.38	43.5	168.0	2.9	36.0	15.8	79.0	50.0	58.0	0.1	0.8	--

Tableau 4-3 Résultats des analyses isotopiques et éléments majeurs des échantillons prélevés dans la masse d’eau souterraine du Hoyoux-Néblon

<i>Num. échant.</i>	<i>Nom</i>	³ <i>H (TU)</i>	$\pm 2\sigma$	<i>Sp. Cond. (μS·cm⁻¹) terrain</i>	<i>Température (°C) terrain</i>	<i>Sp. Cond (μS·cm⁻¹) laboratoire</i>	<i>pH</i>	<i>Dureté totale (°f)</i>	<i>Ca²⁺(ppm)</i>	<i>Mg²⁺(ppm)</i>	<i>Na⁺(ppm)</i>	<i>K⁺(ppm)</i>	<i>Cl⁻(ppm)</i>	<i>SO₄²⁺(ppm)</i>	<i>NO₃⁻(ppm)</i>	<i>F⁻(ppm)</i>	<i>H₂PO₄⁻(ppm)</i>	<i>HCO₃⁻(ppm)</i>
4	Galerie Principale	7.3	2.0	--	--	684.0	7.35	35.4	112.9	17.5	6.9	0.9	21.9	32.1	27.0	0.0	.0.	349.0
5	Galerie Communale	9.1	2.0	--	--	686.0	7.4	36.3	116.7	17.4	8.2	1.3	20.3	32.8	22.6	0.0	0.0	358.7
6	Galerie Tinkou	10.1	2.0	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
7	P-1	8.5	1.1	749	11.46	798.0	7.22	44.3	116.6	37.0	6.9	0.6	15.3	22.8	52.2	0.0	0.0	439.3
8	P-18	10.0	1.2	680	10.60	658.0	7.48	35.3	104.0	22.6	6.7	1.3	20.1	29.5	24.2	0.0	10.7	345.1
9	Font Saint Martin	8.1	1.3	658	11.03	627.0	7.45	33.5	99.0	21.3	6.6	0.6	16.4	27.7	21.5	0.0	0.0	333.0

Tableau 4-4 Résultats des analyses isotopiques et éléments majeurs de l’échantillon prélevé dans la masse d’eau souterraine du Tournaisis (Mouscron)

<i>Num. échant.</i>	<i>Nom</i>	³ <i>H (TU)</i>	$\pm 2\sigma$	<i>Sp. Cond. (μS·cm⁻¹) terrain</i>	<i>Température (°C) terrain</i>	<i>Sp. Cond (μS·cm⁻¹) laboratoire</i>	<i>pH</i>	<i>Dureté totale</i>	<i>Ca²⁺(ppm)</i>	<i>Mg²⁺(ppm)</i>	<i>Na⁺(ppm)</i>	<i>K⁺(ppm)</i>	<i>Cl⁻(ppm)</i>	<i>SO₄²⁺(ppm)</i>	<i>NO₃⁻(ppm)</i>	<i>F⁻(ppm)</i>	<i>H₂PO₄⁻(ppm)</i>	<i>HCO₃⁻(ppm)</i>
1	Mouscron	3.4	1.9	--	--	760.0	7.68	31.9	68.8	35.8	47.1	17.0	28.4	64.2	0.0	1.3	0.0	388.0

Tableau 4-5 Résultats des analyses isotopiques et éléments majeurs des échantillons prélevés dans la rivière le Geer

<i>Num. échant.</i>	<i>Nom</i>	³ <i>H (TU)</i>	$\pm 2\sigma$	<i>Sp. Cond. (μS·cm⁻¹) terrain</i>	<i>Température (°C) terrain</i>	<i>Sp. Cond (μS·cm⁻¹) laboratoire</i>	<i>pH</i>	<i>Dureté totale (°f)</i>	<i>Ca²⁺(ppm)</i>	<i>Mg²⁺(ppm)</i>	<i>Na⁺(ppm)</i>	<i>K⁺(ppm)</i>	<i>Cl⁻(ppm)</i>	<i>SO₄²⁺(ppm)</i>	<i>NO₃⁻(ppm)</i>	<i>F⁻(ppm)</i>	<i>H₂PO₄⁻(ppm)</i>	<i>HCO₃⁻(ppm)</i>
51	Abolens	8.7	2.0	859.0	10.4	696.5	7.63	31.9	97.6	18.2	19.3	3.9	50.8	66.1	33.7	0.55	<=0.2	236.6
52	Petit-Axhe	8.8	1.9	1380.0	11.3	1376.0	7.90	46.5	156.3	18.3	99.7	32.2	197.9	51.0	26.7	<=0.2	2.30	438.6
53	Longchamps	9.8	2.0	980.0	11.2	800.0	7.70	39.1	129.1	16.6	16.5	3.9	48.3	47.4	46.6	<=0.2	<=0.2	333.4
54	Oleye	6.0	1.3	940.0	11.6	684.0	7.71	29.2	92.6	14.8	24.3	4.2	58.4	71.9	47.6	<=0.2	<=0.2	188.0
55	Grandville	7.6	1.3	950.0	11.5	944.0	8.27	40.2	133.1	16.9	39.9	15.0	89.8	50.5	38.4	<=0.2	0.51	348.7
56	Koninsksem	7.6	1.1	1030.0	12.0	983.0	7.97	41.8	140.6	16.4	42.6	14.5	88.3	51.9	34.4	<=0.2	1.50	380.1
57	Oborne	7.2	1.3	960.0	11.9	913.0	7.85	36.3	120.8	14.9	47.7	13.7	89.0	45.7	41.6	0.16	2.50	326.6
58	Wonck Grand Surdan	6.8	1.1	875.0	11.4	934.5	8.00	41.1	138.3	15.9	36.4	11.9	76.8	48.0	34.4	<=0.2	0.87	374.9
59	Wonck (Geer)	6.8	1.1	920.0	11.4	943.5	8.04	41.5	139.6	16.0	37.1	12.7	79.8	49.4	36.0	<=0.2	0.79	374.5
60	Laumont	7.1	1.1	920.0	11.4	943.5	8.12	41.0	138.1	15.8	39.7	12.9	82.4	50.1	29.4	<=0.2	0.80	379.6

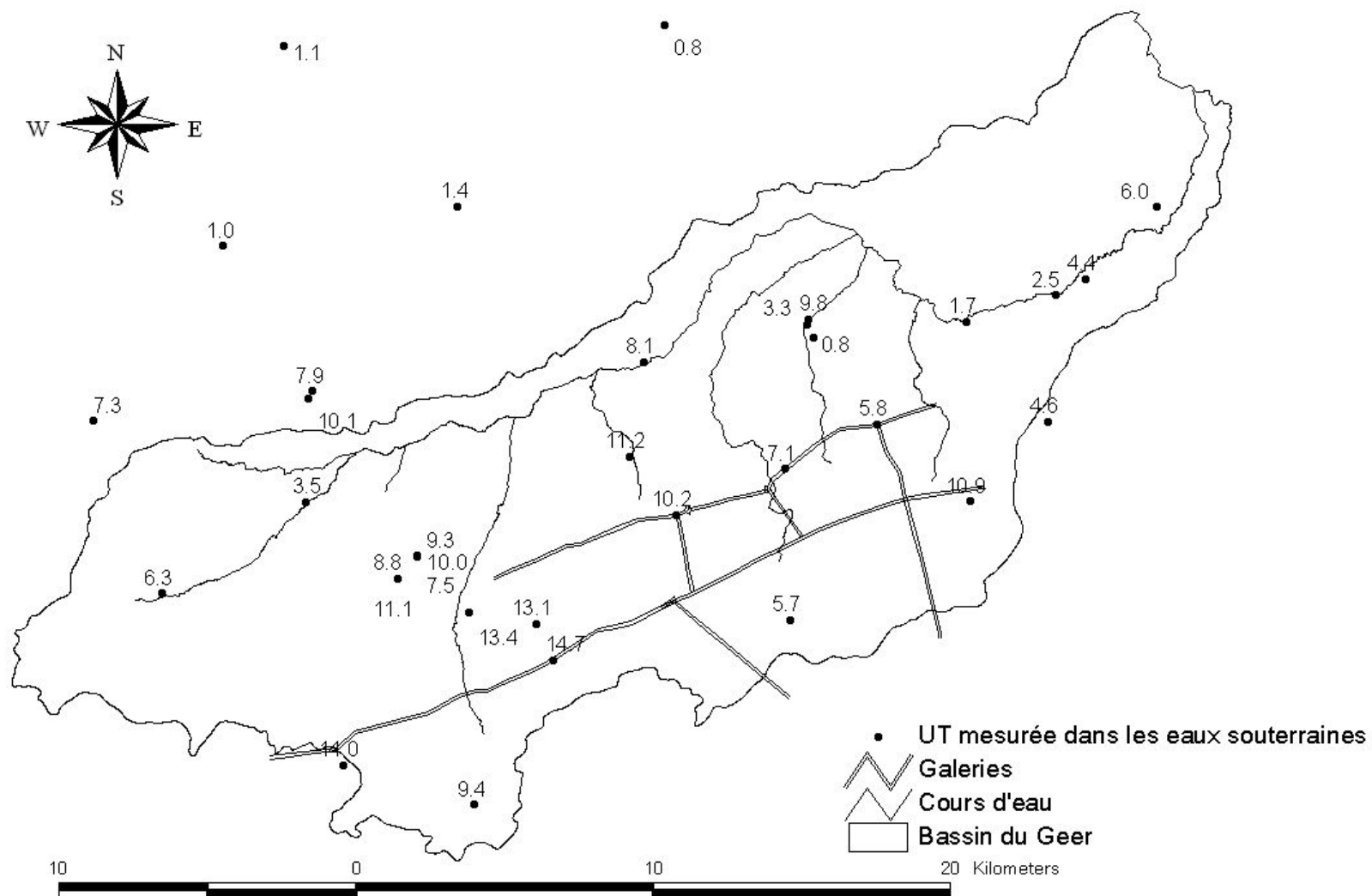


Figure 4-1 Unités Tritium mesurées dans les échantillons d'eau souterraine prélevés dans l'aquifère de Hesbaye

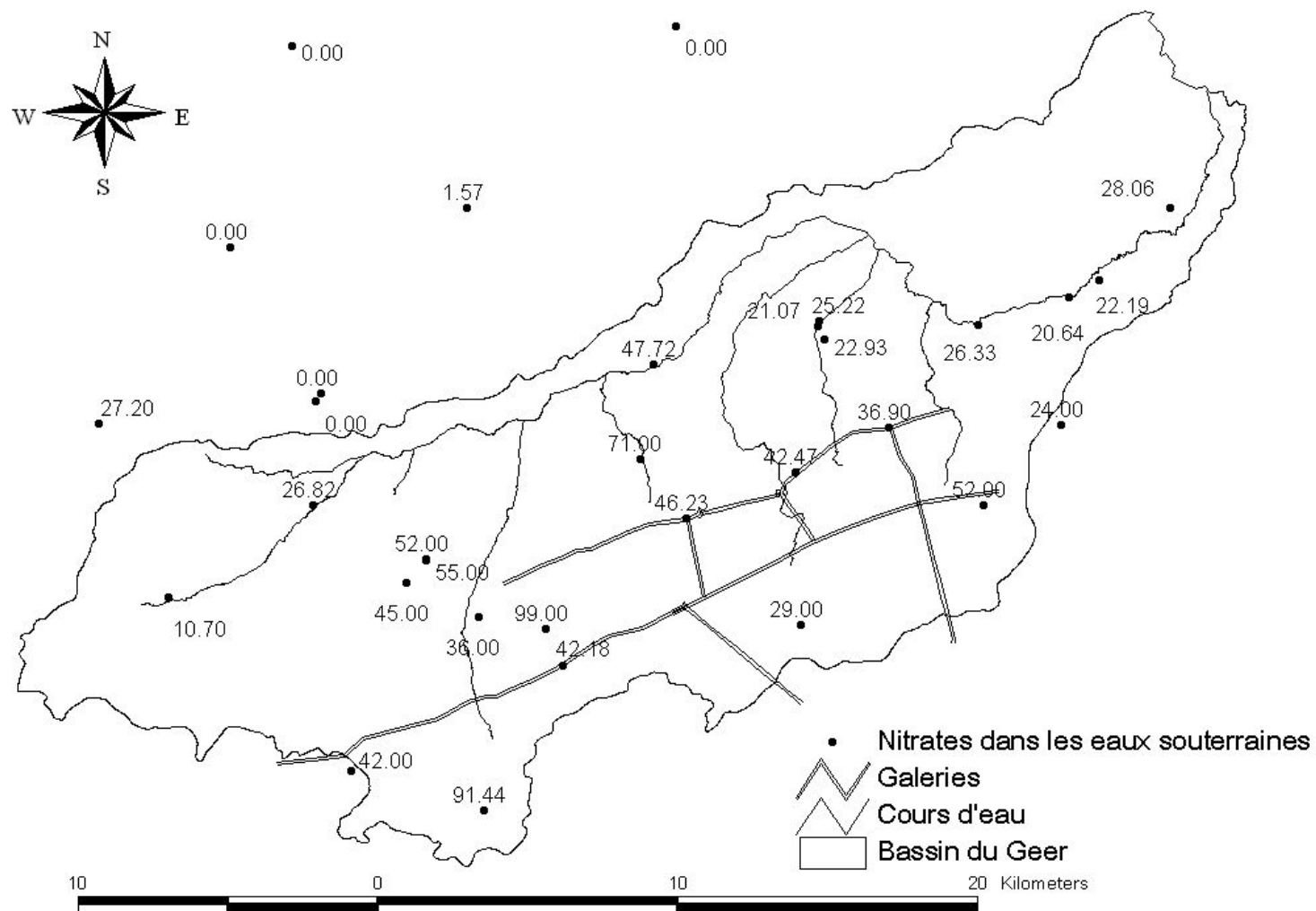


Figure 4-2 Concentrations en nitrate mesurées dans les échantillons d'eau souterraine prélevés dans l'aquifère de Hesbaye

Ces trois zones se retrouvent également dans la distribution spatiale des concentrations en nitrates (Figure 4.2).

- Dans la zone située au Nord du bassin du Geer, les concentrations en nitrates sont nulles ou très faibles. Ces eaux ne seraient pas contaminées car elles se sont infiltrées avant l'augmentation des épandages de fertilisants azotés.
- Dans la zone située dans la partie Sud-Ouest de l'aquifère, les concentrations en nitrates sont comprises entre 30 et 90 mg/l. Ces valeurs élevées sont indicatrices d'une contamination récente par les activités agricoles.
- Dans la zone située dans l'Est du bassin du Geer, les concentrations en nitrates sont proches de 25 mg/l.

Les échantillons 15 et 16 prélevés dans la partie captive de l'aquifère ont la particularité d'avoir des concentrations en tritium (respectivement 7.9 et 10.1 UT) caractéristiques d'une eau jeune mais des concentrations en nitrates nulles.

La zone située au Nord du bassin du Geer correspond à la partie captive de l'aquifère des craies de Hesbaye. Les eaux qui y sont présentes sont des eaux anciennes non contaminées. La zone située dans la partie Sud-Ouest de l'aquifère correspond à la zone de recharge de l'aquifère. On y trouve des eaux jeunes, fortement contaminées. La zone située à l'Est et au Nord-Est du bassin du Geer est la zone de décharge des eaux souterraines. Les eaux présentent des caractéristiques d'un mélange entre une eau ancienne et une eau jeune.

4.2.3 Échantillons prélevés dans les eaux de surface du bassin du Geer

Les concentrations en tritium dans les échantillons prélevés dans les eaux de surface du bassin du Geer sont comprises entre 6.0 et 9.8 UT (Tableau 4.5). Ces concentrations sont caractéristiques d'une eau jeune. La rivière draine probablement les eaux souterraines les plus superficielles et donc les plus jeunes. Le Geer n'est pas le seul exutoire du bassin, de l'eau souterraine quitte en effet le bassin au travers de la frontière Nord.

5 Interprétation

5.1 Modèles mathématiques

Les modèles les plus communément utilisés pour l'interprétation des données isotopiques peuvent être classés en trois catégories :

- les modèles « boîtes noires » basés sur des approches linéaires et sur des fonctions de transfert ;
- les modèles compartimentés qui sont en général constitués de modèles boîtes noires connectés en série ou spatialement distribués ;
- les modèles basés sur une formulation de l'équation d'advection-dispersion et leurs solutions analytiques ou numériques.

Dans le cas du tritium, ces modèles sont principalement utilisés afin d'estimer le temps de transfert moyen de l'eau entre la zone de recharge et le point de mesure.

Les premières interprétations réalisées par l'équipe du GSF sont basées sur des modèles boîtes noires. Avec ces modèles, il « suffit » de connaître la fonction d'entrée du système et un enregistrement de la concentration au point d'observation (Maloszewski and Zuber 1982; Maloszewski and Zuber 1996). Par contre le système aquifère est supposé isolé, suffisamment homogène, à l'équilibre, ayant une zone de recharge bien définie et des exutoires bien définis

ce qui limite leur utilisation. La relation entre les fonctions d'entrée et de sortie de l'aquifère est décrite par :

$$C_{out}(t) = \int_0^{\infty} C_{in}(t-\tau) g(\tau) \exp(-\lambda\tau) d\tau \quad (1)$$

où λ est la constante de dégradation du traceur radioactif et $g(\tau)$ est une fonction de distribution des temps de transfert dans l'aquifère.

Dans la plupart des cas, les fonctions de distribution ont un ou deux paramètres inconnus. Ces paramètres sont déterminés en résolvant le problème inverse c à d en ajustant les paramètres jusqu'à obtenir des concentrations calculées proches des concentrations mesurées.

Les modèles boîtes noires les plus fréquemment utilisés sont :

- Le modèle « piston flow »

$$g(\tau) = \delta(\tau - T) \quad (2)$$

où T est le temps de séjour moyen de l'eau dans le milieu souterrain.

Ce modèle suppose que toutes les molécules d'eau se déplacent à la même vitesse par un mécanisme d'advection pure introduisant simplement un délai correspondant au temps de transit dans l'aquifère. Le modèle « piston flow » est, par exemple, applicable, en négligeant la dispersion, dans le cas d'un aquifère captif avec zone de recharge limitée dans l'espace situé loin des points de captage (Fig. 5.1).

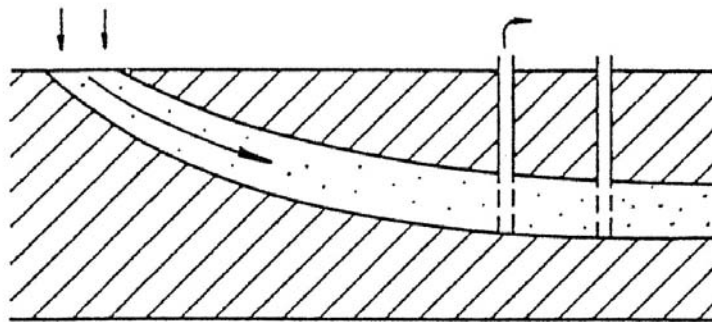


Figure 5-1 Situation dans laquelle le modèle « piston flow » est applicable (modifié de Maloszewski and Zuber 1982)

- Le modèle exponentiel ou modèle de mixage parfait

$$g(\tau) = \frac{1}{T} \exp\left(-\frac{\tau}{T}\right) \quad (3)$$

Les eaux entrant dans l'aquifère sont totalement mélangées avec les eaux de l'aquifère. La concentration à la sortie du système est égale à la concentration moyenne au sein du système. Ce modèle est applicable, par exemple, quand l'échantillonnage induit un mélange d'eau ayant des temps de transferts très variables (Fig. 5.2).

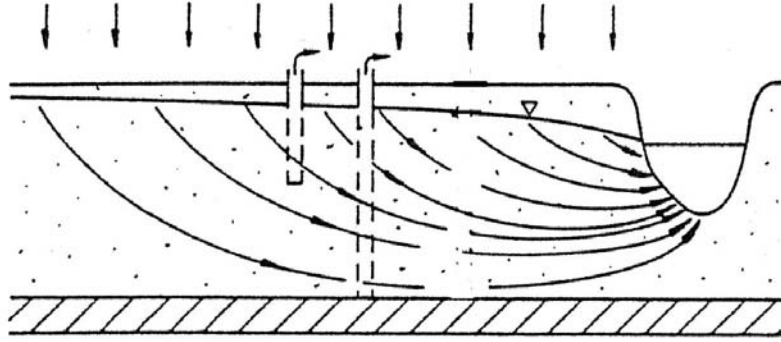


Figure 5-2 Situation dans laquelle le modèle exponentiel est applicable (modifié de Maloszewski and Zuber 1982)

o Le modèle combiné « exponentiel-piston flow »

Ce modèle comporte un paramètre appelé efficacité de mélange (mixing efficiency) qui permet une continuité depuis le modèle « piston flow » (correspondant à une efficacité de mélange nulle) jusqu'au modèle exponentiel (mixage parfait). Ce modèle est notamment applicable pour des aquifères libres avec une épaisse zone non saturée (Fig 5.3). Le modèle « piston flow » permet alors de représenter l'écoulement dans la partie non saturée de l'aquifère et le modèle exponentiel celui dans la zone saturée.

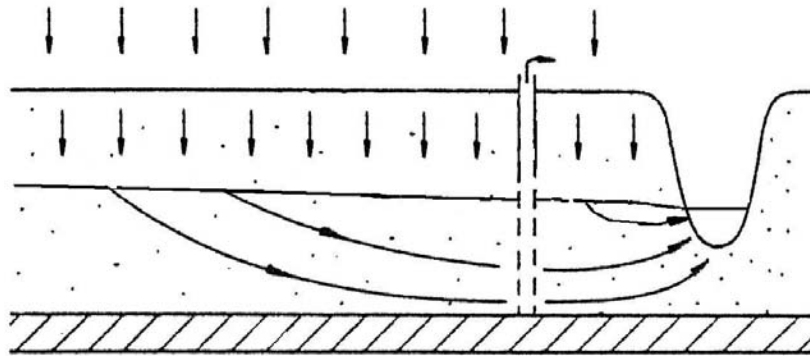


Figure 5-3 Situation dans laquelle le modèle combiné « exponentiel-piston flow » est applicable (modifié de Maloszewski and Zuber 1982).

o Le modèle dispersion

$$g(\tau) = \frac{1}{\sqrt{4\pi P_D \tau/T}} \frac{1}{\tau} \exp\left(-\frac{(1-\tau/T)^2}{4P_D \tau/T}\right) \quad (4)$$

où P_D est le paramètre de dispersion reflétant l'importance du processus de dispersion par rapport au processus d'advection. Ce paramètre est l'inverse du nombre de Peclet (P_e).

Ce modèle relie les concentrations à l'entrée et la sortie du réservoir par une fonction de transfert reposant sur une solution analytique 1D de l'équation d'advection-dispersion. Ce modèle est applicable dans les cas où les phénomènes de dispersion ne peuvent plus être négligés par rapport à l'advection.

Maloszewski (1994) a montré que, pour les milieux à double porosité le modèle dispersion est utilisable à condition d'utiliser un temps de transfert moyen apparent équivalent à :

$$T^* = \left(\frac{n_m + n_{im}}{n_m} \right) \cdot T = RT \quad (5)$$

où T^* est le temps de séjour moyen apparent des eaux et R est le facteur de retard résultant de la diffusion du traceur vers l'eau immobile

5.2 Application aux données isotopiques collectées

L'équipe du GSF a modélisé les données isotopiques collectées à l'aide du logiciel FLOWPC développé par Maloszewski et publié par l'IAEA (IAEA 2002) pour l'interprétation des données de traceurs environnementaux. Ce logiciel reprend diverses solutions analytiques dont les fonctions de transfert présentées ci-dessus. Connaissant les concentrations en tritium dans l'eau qui s'infiltre dans l'aquifère et les concentrations observées aux différents points de mesures et pour un type de modèle choisi par l'utilisateur, il est possible de calculer, par une procédure d'inversion, les paramètres définissant ce modèle. Afin de quantifier les flux d'infiltration, HGULg a fourni au GSF des données météo collectées dans le cadre du projet AquaTerra.

5.2.1 Application aux données isotopiques collectées dans les nappes des craies du Pays de Herve, des calcaires du Néblon et du Tournaisis

Ne disposant que de peu d'informations sur le comportement hydrodynamique de ces aquifères, une interprétation a été effectuée à l'aide du modèle dispersion en fixant la valeur du paramètre P_D (Equation 4) à 0.1, valeur communément acceptée dans la littérature. Les temps de transfert moyens, calculés à l'aide du logiciel FLOWPC sont présentés dans le tableau 5.1 à 5.3 pour les données collectées respectivement dans les nappes des calcaires du Tournaisis, des craies du Pays de Herve et des calcaires du Néblon.

Une deuxième interprétation a été réalisée pour les données collectées dans la nappe des craies du Pays de Herve à l'aide du modèle combiné piston-flow (Tableau 5.2).

5.2.2 Application aux données isotopiques collectées dans la nappe aquifère de Hesbaye

Comme la craie est un milieu à double porosité, une première interprétation a été menée à l'aide du modèle dispersion (voir §5.1). La valeur du paramètre P_D (Equation 4) a été fixée à 0.1, valeur communément acceptée dans la littérature. Les temps de transfert moyens, calculés à l'aide du logiciel FLOWPC sont présentés dans le tableau 5.4. Comme mentionné au §5.1, pour les milieux à double porosité, le temps de transfert moyen calculé à l'aide du modèle dispersion est un temps de transfert apparent du traceur. En considérant que la porosité de fissure est de l'ordre de 1% et la porosité de matrice de l'ordre de 40% (Brouyère *et al.* 2004), l'équation 5 permet de calculer un facteur de retard du traceur égal à 40 et donc de corriger le temps de transfert moyen estimé à l'aide du modèle dispersion. Ce temps de transfert de l'eau serait donc 40 fois inférieur au temps de transfert apparent du traceur. Les temps de transfert moyen pour l'eau mobile seraient donc compris entre 2 et 5 ans. Des temps de transfert si courts sont irréalistes sachant que rien qu'à travers la zone non saturée, on estime la vitesse de migration verticale à environ 1m/an. L'épaisseur de la zone non saturée pouvant atteindre plusieurs dizaines de mètres, le temps de transfert dans cette zone est déjà plus grand que l'estimation des temps de transfert calculés par GSF. Pour essayer de corriger cela, le modèle combiné « exponentiel-piston flow » a été appliqué aux données car il est probablement un peu plus représentatif des conditions hydrogéologiques du bassin du Geer. Dans ce cas, le modèle Piston flow est utilisé pour représenter la zone non saturée tandis que le modèle exponentiel est utilisé pour la zone saturée. Les temps de transfert moyens calculés à l'aide de ce modèle combiné sont également présentés dans le tableau 5.4. Les temps de transfert moyens calculés à l'aide du modèle Piston flow (T_{PF}) sont de l'ordre de la dizaine d'année. Ce temps de transfert correspond au transfert dans la zone non saturée de l'aquifère. L'épaisseur

de la zone non saturée variant spatialement, il est difficile de se rendre compte si ces temps de transfert sont réalistes.

5.2.3 Commentaires

Les résultats de l'interprétation présentés sont à relativiser. Une meilleure interprétation des temps de transfert pourrait être obtenue si nous disposions des résultats de plusieurs campagnes d'échantillonnage effectuées avec un pas de temps de une à deux années. En effet, le processus d'inversion serait mieux contraint. De plus, de nombreux auteurs (notamment Zoellmann *et al.* 2001; Koh *et al.* 2006) ont mis en évidence la difficulté d'interpréter des données isotopiques dans des milieux complexes (Zone non saturée d'épaisseur variable, milieux à double porosité...) à l'aide de modèles analytiques simplifiés. Ils proposent notamment comme alternative d'utiliser des modèles numériques spatialement distribués simulant les écoulements et le transport de soluté. Un tel modèle est actuellement en cours de développement pour le bassin du Geer dans le cadre du projet Aquaterra.

Tableau 5-1 Valeurs des paramètres obtenus lors de l'application du modèle dispersion aux résultats des analyses isotopiques collectées dans les calcaires du Tournaisis

Num. échant.	Nom	Type	Aquifer	Modèle dispersion	Modèle combiné exponentiel – piston flow			
				T^* (ans)	T (ans)	η	T_{PF} (ans)	T_{EM} (ans)
1	Mouscron	Puits pompage	Libre	140	--	--	--	--

Tableau 5-2 Valeurs des paramètres obtenus lors de l'application du modèle dispersion et du modèle combiné exponentiel-piston flow aux résultats des analyses isotopiques collectées dans les craies du Pays de Herve

Num. échant.	Nom	Type	Aquifer	Modèle dispersion	Modèle combiné exponentiel – piston flow			
				T^* (ans)	T (ans)	η	T_{PF} (ans)	T_{EM} (ans)
2	HOM-6	Piézomètre	Libre	104	126	1.09	10	116
3	CHAI-20	Piézomètre	Libre	88	84	1.14	10	74

Tableau 5-3 Valeurs des paramètres obtenus lors de l'application du modèle dispersion aux résultats des analyses isotopiques collectées dans les calcaires du Néblon

Num. échant.	Nom	Type	Aquifer	Modèle dispersion	Modèle combiné exponentiel – piston flow			
				T^* (ans)	T (ans)	η	T_{PF} (ans)	T_{EM} (ans)
4	Galerie Principale	Galerie	Libre	108	--	--	--	--
5	Galerie Communale	Galerie	Libre	97	--	--	--	--
6	Galerie Tinkou	Galerie	Libre	90	--	--	--	--
7	P-1	Piézomètre	Libre	100	--	--	--	--
8	P-18	Piézomètre	Libre	92	--	--	--	--
9	Font Saint Martin	Source	Libre	102	121	1.09	10	111

Tableau 5-4 Valeurs des paramètres obtenus lors de l'application du modèle dispersion et du modèle combiné exponentiel-piston flow aux résultats des analyses isotopiques collectées dans l'aquifère de Hesbaye.

Num. échant.	Nom	Type	Aquifer	Modèle dispersion	Modèle combiné exponentiel – piston flow			
				T^* (ans)	T (ans)	η	T_{PF} (ans)	T_{EM} (ans)
1	Mouscron	Puits pompage	Libre	140	--	--	--	--
2	HOM-6	Piézomètre	Libre	104	126	1.09	10	116
3	CHAI-20	Piézomètre	Libre	88	84	1.14	10	74
4	Galerie Principale	Galerie	Libre	108	--	--	--	--
5	Galerie Communale	Galerie	Libre	97	--	--	--	--
6	Galerie Tinkou	Galerie	Libre	90	--	--	--	--
7	P-1	Piézomètre	Libre	100	--	--	--	--
8	P-18	Piézomètre	Libre	92	--	--	--	--
9	Font Saint Martin	Source	Libre	102	121	1.09	10	111
10	Zepperen 2	Puits pompage	Captif	>200	--	--	--	--
11	Vliermaal 1	Puits pompage	Captif	>200	--	--	--	--
12	Alst-bij-Simt-Truiden	Puits pompage	Captif	200	--	--	--	--
13	Voort 3	Piézomètre	Captif	180	--	--	--	--
14	Montenaken Klein Vorsen 2	Puits pompage	Captif	108	--	--	--	--
15	Bovelingen 1	Puits pompage	Captif	104	--	--	--	--
16	Bovelingen 3	Piézomètre	Captif	90	--	--	--	--
17	Lauw	Puits pompage	Libre	102	121	1.09	10	111
18	Diets Heur 2	Puits pompage	Libre	141	--	--	--	--
19	Diets Heur 6	Piézomètre	Libre	94	96	1.12	10	86
20	Diets Heur 7	Piézomètre	Libre	200	--	--	--	--
21	Bassenge	Puits pompage	Libre	130	240	1.02	4.5	235
22	Roclenge	Puits pompage	Libre	154	--	--	--	--
23	SGB-1	Piézomètre	Libre	92	--	--	--	--
24	SGB-2	Piézomètre	Libre	96	101	1.10	9.2	92
25	SGB-3	Piézomètre	Libre	106	133	1.08	9.8	123
26	JEN083	Puits particulier	Libre	78	64	1.20	10.6	53
27	PC-Bovenistier	Piézomètre	Libre	98	110	1.10	10.0	100
28	PzCS-Bovenistier	Piézomètre	Libre	87	88	1.10	7.2	81
29	Zone Fret 1	Piézomètre	Libre	105	128	1.08	10	118

30	Zone Fret 1	Piézomètre	Libre	118	185	1.06	10	175
31	Tous Saint	Puits particulier	Libre	147	370	1.03	10	360
32	Tous Saint	Puits particulier	Libre	129	232	1.05	10	222
33	P4 + P5	Puits particulier	Libre	116	175	1.06	10	165
34	P4 + P5	Puits particulier	Libre	114	163	1.07	10	153
35	Rondoal	Puits particulier	Libre	95	97	1.12	10	87
36	Rondoal	Puits particulier	Libre	86	80	1.15	10	70
37	CHS 077	Puits particulier	Libre	70	48	1.27	10	38
38	CHS 077	Puits particulier	Libre	74	31	1.03	10	21
39	LIM 001	Puits particulier	Libre	88	90	1.12	10	80
40	LIM 001	Puits particulier	Libre	76	56	1.23	10	46
41	Abbaye LIE-17	Puits particulier	Libre	88	84	1.14	10	74
42	Abbaye LIE-17	Puits particulier	Libre	88	84	1.14	10	74
43	P1-Eben.Mael	Puits pompage	Libre	126	180	1.12	19	161
44	Pz1-Bas-Slins	Piézomètre	Libre	170	213	1.10	19	194
45	Rue de la Station 39	Puits particulier	Libre	95	95	1.05	5	95
46	Pêcherie Waremmé	Puits artésien	Semi-captif	140	--	--	--	--
47	Galerie Xendremal	Galerie	Libre	110	--	--	--	--
48	Galerie Juprelle	Galerie	Libre	117	--	--	--	--
49	Galerie Kemexhe	Galerie	Libre	88	--	--	--	--
50	Galerie Jeneffe	Galerie	Libre	71	--	--	--	--

6 Conclusions et perspectives

Cette première campagne tritium réalisée à l'échelle des masses d'eau a mis en évidence, pour le bassin du Geer, l'intérêt d'étudier l'âge de l'eau afin de mieux comprendre la distribution spatiale des contaminants diffus. Il apparaît également, pour les 3 autres masses dans lesquelles des échantillons ont été prélevés, que l'étude du tritium seule ne permet pas d'avancée significative dans la compréhension du fonctionnement d'un aquifère. Il apparaît également clairement que la détermination des temps de séjours moyens à l'aide des modèles mathématiques nécessite l'acquisition de plus d'un échantillon par point de mesure afin de mieux contraindre les modèles.

Dans les travaux futurs, il pourrait être intéressant de combiner les analyses du tritium avec celle de son produit de dégradation l'hélium. En effet, connaissant les concentrations en tritium et en ^3He tritiogénique, il est possible de déterminer directement l'âge de l'eau. De plus, l'analyse de ^3He pourrait également permettre de distinguer les temps de transfert dans la zone saturée et non saturée. En effet, l' ^3He produit dans la zone non saturée est sous forme gazeuse et migre très rapidement. Il faut toutefois signaler que d'autres sources que le tritium peuvent causer la présence de ^3He . D'autre part, l'hélium est un gaz et les opérations d'échantillonnage doivent être adaptées.

D'autres traceurs environnementaux comme les chlorofluorocarbures (CFC) et l'hexafluorure de soufre (SF_6), peuvent également être analysés en complément du tritium. Les fonctions d'entrée de ces différents traceurs ne sont pas semblables et leur comportement dans la nappe peut différer ce qui permet d'obtenir des informations complémentaires.

7 Références

Barrez, F. (2006). Essais de caractérisation hydrochimique verticale de la nappe de la Craie dans le secteur minier Carvin-Douai-Hénin-Beaumont. Laboratoire de Mécanique de Lille. Lille, Université de Lille I.

Broers, H. P. (2004). "The spatial distribution of groundwater age for different geohydrological situations in the Netherlands: implications for groundwater quality monitoring at the regional scale." Journal of Hydrology **299**: 84-106.

Brouyère, S., A. Dassargues and V. Hallet (2004). "Migration of contaminants through the unsaturated zone overlying the Hesbaye chalky aquifer in Belgium: a field investigation." Journal of Contaminant Hydrology **72**(1-4): 135-164.

Cook, P. G., A. J. Love, N. I. Robinson and C. T. Simmons (2005). "Groundwater ages in fractured rock aquifers." Journal of Hydrology **308**: 284-301.

IAEA (2002). Use of isotopes for analyses of flow and transport dynamics in groundwater systems, IAEA-UIAGS.

Katz, B. G., A. R. Chelette and T. R. Pratt (2004). "Use of chemical and isotopic tracers to assess nitrate contamination and groundwater age, Woodville Karst Plain, USA." Journal of Hydrology **289**: 36-61.

Koh, D.-C., L. N. Plummer, D. K. Solomon, E. Busenberg, Y.-J. Kim and H.-W. Chang (2006). "Application of environmental tracers to mixing, evolution, and nitrate contamination of ground water in Jeju Island, Korea." Journal of Hydrology **327**: 258-275.

Maloszewski, P. and A. Zuber (1982). "Determining the turnover time of groundwater systems with the aid of environmental tracers." Journal of Hydrology **57**: 207-231.

Maloszewski, P. and A. Zuber (1996). Lumped parameter models for the interpretation of environmental tracer data. in : Manual on mathematical models in isotope hydrology. Vienna, IAEA: 9-58.

Olive, P., P. Hubert and S. Ravailleau (1996). "Estimation pratique de "l'age" des eaux souterraines en Europe par le tritium." Revue des sciences de l'eau **4**: 523-533.

Schlosser, P., M. Stute, H. Dörr, C. Sonntag and K. O. Münnich (1988). "Tritium/³He dating of shallow groundwater." Earth and Planetary Science Letters **89**: 353-362.

Szabo, Z., D. E. Rice, L. N. Plummer, E. Busenberg, S. Drenkard and P. Schlosser (1996). "Age dating of shallow groundwater with chlorofluorocarbons, tritium/helium 3, and flow path analysis, southern New Jersey coastal plain." Water Resources Research **32**(4): 1023-1038.

Zoellmann, K., W. Kinzelbach and C. Fulda (2001). "Environmental tracer transport (³H and SF₆) in the saturated and unsaturated zones and its use in nitrate pollution management." Journal of Hydrology **240**: 187-205.