

PARAMÈTRES HYDROLOGIQUES ET PHYSICO-CHIMIQUES DE SOURCES DU CRÉTACÉ DANS LE PAYS LE HERVE ET LA HESBAYE SÈCHE

Julien MOLS et François PETIT

Résumé

En Hesbaye sèche, dans le Pays de Dalhem et dans le nord-ouest du Pays de Herve, vingt-sept sources ont été suivies durant un an. Sept paramètres physico-chimiques : le débit, la température, la conductivité, le pH, la dureté totale, les nitrates et les phosphates ont été mesurés hebdomadairement pour 13 sources et trimestriellement pour les 14 autres. Ces sources sont situées dans le Crétacé du pays de Herve et de la Hesbaye sèche. Quelques sources situées sur le Houiller ont été suivies en guise de comparaison. Les données de hauteurs piézométriques mensuelles de 28 puits traditionnels et forages ont été collectées sur une période de six ans. Suite à l'analyse de la dynamique des paramètres physico-chimiques, nous avons tenté de classer les différents types de sources selon d'une part, la lithologie du bassin versant et, d'autre part, leur utilisation du sol. Grâce à l'analyse des débits, du coefficient de tarissement et de l'amplitude de température, nous avons aussi déterminé la profondeur relative de l'aquifère et la lame écoulée annuelle. Le comportement saisonnier de la concentration en nitrate a été mis en évidence, de même que le rôle de l'utilisation du sol dans ses concentrations moyennes. Une analyse de la réponse piézométrique des puits et forages face aux variations mensuelles des précipitations a été menée.

Mots-clés

Aquifère, source, piézométrie, nitrates

Abstract

In the dry "Hesbaye" and in the "Pays de Herve", twenty-seven springs were sampled throughout the course of one year. Seven physico-chemical features : discharge, temperature, conductivity, pH, total hardness, nitrates and phosphates were measured. This was done once a week for thirteen springs and four times a year for the other fourteen. These springs are located in the cretaceous rocks of the Pays de Herve and in the dry Hesbaye. Some springs in carboniferous sandstones and schists were also studied so that comparisons could be made. The monthly water levels of twenty-eight wells and boreholes were collected over a period of six years.

After analysing the behaviour of the physico-chemical features, a classification of the different types of springs was made according to the lithology and the landuse present in the catchments. Analysis of the discharge and the temperature range allowed a retention curve, the relative depth and the yearly groundwater discharge for most of the catchment to be established. The seasonal behaviour of the nitrate concentration was highlighted. A correlation between the mean concentration of nitrates and the landuse and lithology of the catchment was identified. The response of the piezometric levels of the different sinks and drillings was studied in relation to the monthly precipitation.

Keywords

Springs, nitrates, aquifer, piezometry

INTRODUCTION

À l'heure où l'eau devient un enjeu d'envergure, en terme de disponibilité et de qualité, il est intéressant de mieux connaître le comportement des aquifères, qui peut être appréhendé par l'étude de différents paramètres physico-chimiques des sources. Quatre études hydrologiques ont déjà été réalisées, en suivant une même méthodologie, dans des régions géographiques distinctes : le Condroz et l'Ardenne condruzienne (Closkin, 1991), l'Ardenne liégeoise (Araujo Bonatto, 1993), la haute Ardenne (Rosen, 1993) et le sud-ouest de l'Entre-Vesdre-et-Meuse (Brassine, 1995). Les résultats de ces études, regroupant une quarantaine de sources, ont fait l'objet d'une première synthèse (Petit *et al.*, 1999). Dans cette dernière, une ébauche de typologie régionale a été présentée selon le mode d'alimentation mais aussi la lithologie du bassin d'alimentation. Le présent travail vise à compléter cette synthèse grâce à l'analyse de vingt-sept sources situées dans l'Entre-Vesdre-et-Meuse et dans la partie orientale de la Hesbaye sèche.

Une campagne de mesures a été menée, pendant une année complète, afin de quantifier sept paramètres physico-chimiques de ces sources : le débit, la température, la conductivité, le pH, la dureté totale, les nitrates et les phosphates. D'autres informations, telles que la pluviométrie, ont été collectées à l'Institut Royal Mé-

téorologique. Par ailleurs, des enregistrements de hauteurs piézométriques et les notices descriptives des forages ont été aimablement mis à notre disposition par la Division des eaux souterraines (DGRNE de la Région wallonne).

I. SITES D'ÉTUDES

Nous avons prospecté la partie nord-ouest du Pays de Herve et le Pays de Dalhem, ce qui couvre schématiquement le bassin de la Berwinne et de ses affluents (Fig. 1). En Hesbaye sèche, c'est l'interfluve entre la Meuse et le Geer qui a été retenu, les émergences se localisant essentiellement dans la vallée du Grand Aaz. La vallée du Geer a malheureusement dû être abandonnée, car toutes les émergences prospectées y ont été aménagées, notamment en vue de captages.

La région d'étude comporte trois grandes unités géomorphologiques. Dans le Pays de Herve, le socle paléozoïque, composé essentiellement de Houiller, est recouvert en discordance par le Crétacé, lui-même recouvert par des placages oligocènes sur les plus hautes crêtes (Fig. 1). Un pendage de 1,4 %, orienté vers le nord-ouest, affecte la discordance entre le Houiller et le Crétacé. Le Houiller est composé de grès et schistes, le Crétacé est composé de smectite à la base (10 à 30 m), ensuite de craie à silex (15 à 40 m) et au sommet d'un conglomérat à silex (5 m). L'aquifère principal se situe

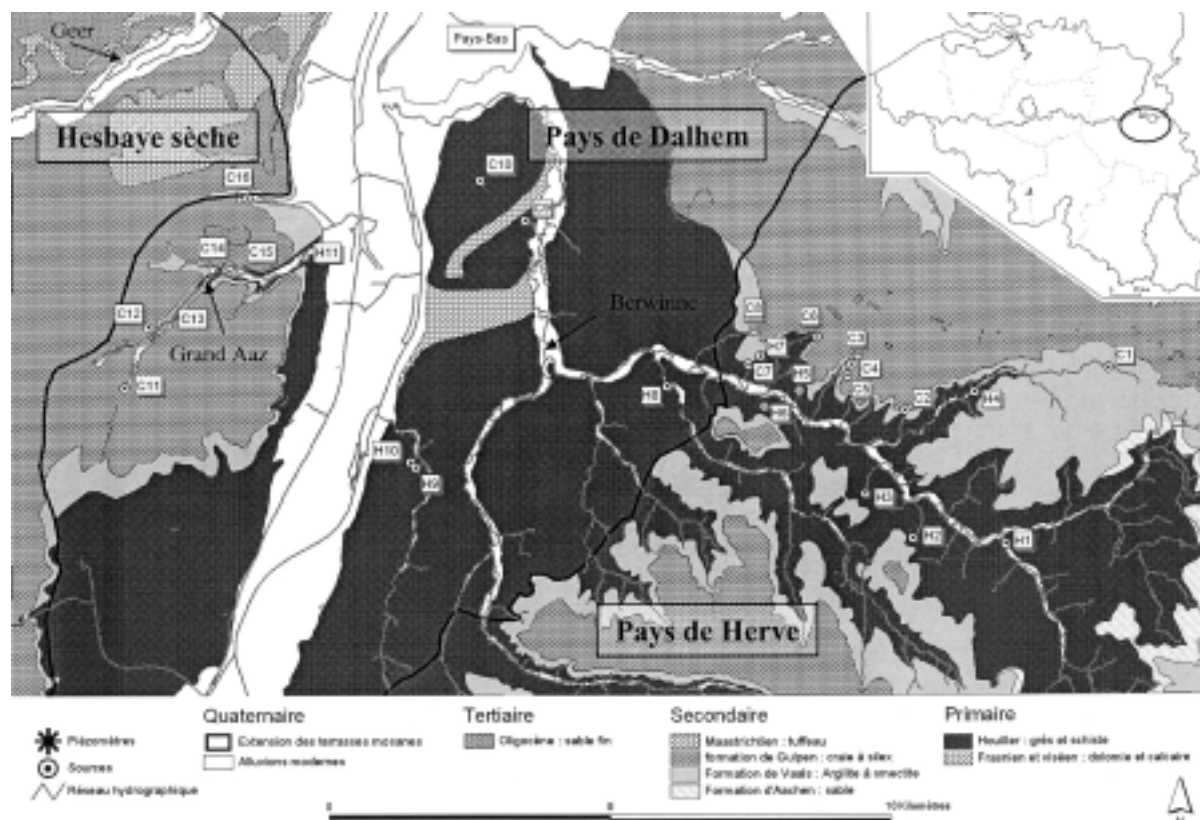


Figure 1. Les grandes unités géologiques et la localisation des sources, fond de carte : DGRNE, 2000, Carte géologique de Wallonie modifiée

dans les craies (formation de Gulpen) ; la formation de Vaals (smectite) sous-jacente joue ainsi le rôle de mur imperméable, de sorte que de nombreuses sources existent au contact entre la craie et la smectite, formant un niveau sourcier subcontinu situé à mi-pente des vallées. Il est fort probable que la présence de ce niveau sourcier ait permis, voire favorisé, la dispersion de l'habitat qui a caractérisé le Pays de Herve au XVII^e siècle lors de sa conversion vers l'herbage. On remarque, en effet, que sur les cartes de Ferraris, 1776, ce sont typiquement ces sites qui sont habités.

Le Pays de Dalhem se situe en contrebas du Pays de Herve et en est séparé par un talus d'une cinquantaine de mètres de dénivellation. Il s'agit de la zone des terrasses fluviales de la Meuse qui, pour la plupart, reposent directement sur le Houiller ; le Crétacé et les placages oligocènes ont presque entièrement disparu, car le Pays de Dalhem se situe dans sa grande majorité sous la discordance Crétacé-Houiller. Le Houiller donne aussi des nappes, mais plus superficielles que dans le Crétacé.

Dans la partie occidentale (à proximité de Visé), le Frasnien et le Viséen affleurent également, mais de façon très ponctuelle. L'affectation du sol du Pays de Dalhem se différencie de celle du Pays de Herve par l'abondance des cultures et des vergers et par un habitat groupé.

L'interfluve Meuse-Geer qui représente l'extrémité de la Hesbaye sèche comprend essentiellement de la craie de la formation de Gulpen sur laquelle repose le tuffeau maastrichtien. Tout ceci est partiellement recouvert par des dépôts oligocènes, mais ils sont encore peu présents par rapport à ce que l'on retrouve au nord du Geer. Vu le pendage des couches, le niveau sourcier associé au contact craie-smectite qui apparaissait à mi-versant dans le Pays de Herve, affleure maintenant dans le fond de la vallée de l'Aaz. Plus à l'ouest, ce niveau sourcier disparaît dans la vallée du Geer.

La couverture de loess est beaucoup plus épaisse en Hesbaye qu'au Pays de Herve. L'eau doit d'abord percoler à travers une couche de limon, éventuellement un cailloutis fluvial et par endroit du sable oligocène. Ce transit peut durer près de deux ans en Hesbaye (Gulinck, 1966). La Hesbaye sèche est typiquement vouée aux grandes cultures sarclées, mais, dans cette partie de la Hesbaye, la pression de l'habitat est forte.

II. MÉTHODOLOGIE

Au départ, une quarantaine de sources ont été prospectées pour arriver finalement à ne retenir que vingt-sept sources. Cette sélection s'est faite sur base des éléments suivants : toutes les assises géologiques devaient être représentées, de même que les principales affectations du sol au niveau des bassins versants. De plus, il fallait

pouvoir aménager l'émergence afin d'y mesurer le débit. Il était cependant difficile d'assurer un suivi hebdomadaire sur un nombre aussi élevé de sources. Nous en avons retenu treize pour établir ce suivi. Pour les autres, nous avons décidé d'effectuer un suivi trimestriel, ceci afin de cerner la représentativité des sources à suivi hebdomadaire.

Parmi les sources à suivi hebdomadaire, cinq se situent dans le Pays de Herve dont trois dans le Crétacé (C2, C3, C6) et deux dans le Houiller (H5, H6). Dans le Pays de Dalhem, une fontaine (C9) émerge d'un système stratigraphique complexe où la dolomie frasnienne est présente ; toujours dans le Pays de Dalhem, deux autres sources situées sur le Houiller (H8, H10) ont été retenues. Cinq sources sont présentes dans le Crétacé de la Hesbaye (C11, C12, C13, C14 et C16).

En ce qui concerne les sources à suivi trimestriel, deux se situent dans le Crétacé de Hesbaye, deux dans le Houiller du Pays de Dalhem et dix dans ces deux mêmes systèmes au Pays de Herve.

La superficie des bassins versants a été mesurée à partir des cartes topographiques au 1/10 000. Ces cartes ont également permis de connaître les différentes parts de l'utilisation du sol ; les cartes géologiques et pédologiques nous ont renseignés sur la lithologie et le développement des sols de chaque bassin.

Le débit a été mesuré soit par empotement, soit à l'aide d'un déversoir triangulaire avec ouverture à 90°. Le débit Q est alors calculé selon l'équation : $Q = 1,38 h^{2,5}$; h étant la hauteur de charge mesurée sur le déversoir. La précision est de 0,05 l/s. À partir des données de débit, nous avons calculé les coefficients de tarissement (α) selon la loi de Maillet qui exprime $Q_t = Q_0 e^{-\alpha t}$, où Q_0 vaut le débit exprimé en l/s au début du tarissement et Q_t à la fin ; t représente le temps du tarissement exprimé en jours. Le volume des réserves exprimé en mm a été calculé avant et après la période pluvieuse qui s'étend de janvier à mars 2001. Cette réserve (R_v) est l'intégration de tous les débits depuis Q_0 jusqu'au tarissement théorique et peut se calculer en faisant le rapport Q_0 / α , et en tenant compte de la superficie du bassin versant (Cosandey & Robinson, 2000).

La température de l'eau à l'émergence a été mesurée à l'aide d'un thermomètre « Hach conductivity and TDS meter modèle 44600 » dont la précision est de 0,1° C.

La conductivité a été mesurée dans un premier temps avec un conductivimètre « Hach conductivity and TDS meter modèle 44600 » et ensuite avec un conductivimètre « WTW Messgerät LF56 ». Le facteur de température a été pris en compte afin d'obtenir la conductivité à 25° C. La précision est de 1 %. Le pH a été mesuré grâce à un pHmètre de type « Hach One meter ». Cet appareil a été étalonné avant chaque campagne de mesure à l'aide de

deux solutions tampon de pH connu. La dureté totale et le magnésium sont mesurés par titrage avec une précision de 1 %. Le calcium représente la différence entre ces deux premiers. Les nitrates et les phosphates sont mesurés par colorimétrie à l'aide d'un appareil « Hach Drel 5 » dont la précision est de 2 % pour les nitrates et de 1 % pour les phosphates.

L'IRM nous a communiqué les précipitations journalières des stations suivantes : Visé, Thimister et Liège (Monsin), pour la période couvrant les neuf premiers mois de nos campagnes de mesures. Afin de disposer de données pour les trois derniers mois, un pluviomètre a été installé à Visé.

Les campagnes de mesure s'étalent de septembre 2000 à juillet 2001. L'année se caractérise par un automne doux et pluvieux. L'hiver connaît des précipitations normales avec un fléchissement en janvier. Le début du printemps fut froid et très pluvieux. La fin du printemps a été chaude et ensoleillée ainsi que le début de l'été.

À l'initiative de la Région wallonne, vingt-huit puits traditionnels à usage domestique et forages aménagés en piézomètre, répartis sur les crêtes principales du Pays de Herve, ont fait l'objet de campagnes de mesures mensuelles durant les années 1986 à 1992. Une nouvelle série de mesures a débuté en septembre 2000 sur quatorze d'entre eux. Les fluctuations des nappes ainsi mesurées ont été mises en relation avec certains paramètres hydroclimatologiques. Pour ce faire, nous avons consulté les bulletins mensuels de l'IRM, aux stations de Thimister, Visé et Liège (Monsin) couvrant la période 1986 à 1994.

III. RÉSULTATS

A. Différenciation des sources et caractéristiques des aquifères

L'analyse des sept paramètres a permis de distinguer tout d'abord plusieurs types de nappes alimentant respectivement des sources (tableau 1).

Les sources C2, C3, C9, C11, C13, C14, C16 dans le Crétacé et H8 dans le Houiller sont alimentées par *des nappes profondes* : elles se caractérisent par une faible variabilité des débits (source pérenne), une réponse des débits aux précipitations retardée et atténuée, un coefficient de tarissement faible ($\alpha \approx 0,005$), une hauteur des réserves élevée ($R > 50$ mm), une amplitude thermique faible (Δt inférieur à 3°), des conductivités et des duretés élevées en rapport avec la lithologie (450-550 mg/l sur la craie ; 250 mg/l dans le Houiller).

À l'opposé, les sources H5, H6, H10 dans le Houiller sont alimentées par *des nappes superficielles* : elles se caractérisent par une grande variabilité des débits (source intermittente), une réponse rapide et accusée des débits aux précipitations, un coefficient de tarissement élevé ($\alpha \approx 0,020$), de faibles réserves ($R < 25$ mm), une grande amplitude thermique (Δt supérieur à 5° C excepté à H10 où nous n'avons que $1,3^\circ$ C), des conductivités et duretés moyennes faibles par rapport à la lithologie (350 mg/l dans la craie, 100 mg/l dans le Houiller).

Quelques sources (C6, C12) semblent être alimentées par des nappes de type intermédiaire ; elles présentent les caractéristiques suivantes : réserve entre 25 et 50 mm, Δt entre 3 et 5° C, dureté entre 350 et 450 mg/l.

Les caractéristiques de certaines de ces sources méritent d'être épinglées. Situées dans le *Pays de Herve*, les sources C2, C3 et C6 émergent du même massif crayeux. La source C2 draine une partie profonde de la nappe tandis que les sources C3 et C6 drainent des parties de moins en moins profondes de cette nappe. Cette nappe est affectée par d'importants échanges entre les bassins, probablement dûs à la structure interne de la craie car le sommet de la craie est intensément karstifié (Barchy & Marion, 2000). Ces sources ont des conductivités et des duretés totales identiques et stables. Les eaux de ces trois sources proviennent de profondeurs relativement différentes, mais cela ne se marque pas par des différences de concentrations en ions. La variabilité du pH, de la conductivité et de la dureté va croissant de la source C2

Tableau 1. Caractéristiques des sources à suivi hebdomadaire

	Débit moyen (l/s)	Débit extrême (l/s)	superficie (ha)	Débit moyen (m ³ /j/ha)	Réserve (printemps 2001) (mm)	α (jour ⁻¹)	pH	Dureté totale mg/l	Conductivité μ s/cm	NO3 (mg/l)	Altitude (m)	T°	ΔT°	PO4 (mg/l)
C2	2,427	1,89 - 2,84	36	5,82	117	0,005	7,05	393	777	13	190	11,4	1,1	0,75
C3	0,397	0,29 - 0,64	10	3,43	60	0,008	7,00	387	778	21	197	11,0	4	0,60
C6	1,449	0,73 - 2,43	21,6	5,80	66	0,019	7,30	386	780	12	180	10,7	2,1	0,69
H5	0,501	0,022 - 3,543	11,1	3,90	24	0,029	6,59	225	529	33	160	11,5	5,8	0,47
H6			4,1				6,44	112	308	15	144	10,6	5	0,66
C9	1,097	0,76 - 1,29	19,5	4,86	76	0,007	7,10	587	1167	32	92	11,0	0,8	0,72
H8	0,321	0,17 - 0,47	17,5	1,59	36	0,006	6,79	402	896	43	120	10,6	0,7	0,69
H10			6,5				6,26	153	460	29	105	10,9	1,3	0,70
C11	0,190	0,22 - 0,176	12,3	1,33	155	0,001	6,88	471	1126	38	115	12,3	2,8	0,86
C12			7				7,39	433	873	15	105	11,3	7,6	0,83
C13			3,7				7,03	548	1286	7	100	11,0	3	0,84
C14	0,445	0,403 - 0,49	17,5	2,19	242	0,001	7,18	407	868	19	87	10,9	0,5	0,79
C16	0,487	0,15 - 0,89	22,8	1,85	84	0,004	7,03	500	984	14	82	10,9	5,2	0,92

à la source C6, tout en restant faible.

Toujours dans le Pays de Herve, les sources H5 et H6 sont issues de nappes superficielles, car la craie a été localement dégagée ; ces nappes sont différentes car elles se situent de part et d'autre de la Berwinne. La source H5 possède néanmoins une nappe plus profonde que la source H6, car cette dernière est intermittente, alors que H5 ne s'est pas tarie pendant la période d'observations. D'autre part, H6 possède une conductivité et une dureté plus faibles que H5, ce qui confirme son caractère plus superficiel.

Dans le Pays de Dalhem, la source C9 est alimentée par une nappe profonde située en partie dans les calcaires frasniens dolomités secondairement (Barchy & Marion, 2000), ce qui explique sa dureté et sa conductivité élevées, ainsi que la proportion relativement importante de Mg dans la dureté totale. La source H8 possède un bassin entièrement situé sur le Houiller, mais les conductivités et les duretés sont supérieures à celles des sources situées sur la craie du Pays de Herve (C2, C3 et C6), ceci en relation avec la grande profondeur de sa nappe qui permet à son eau de se charger en éléments dissous.

La source H10 est issue d'une nappe superficielle, étant donné les faibles duretés et conductivités qu'elle présente. Elle est affectée par des pollutions ponctuelles issues de décharges d'égouts provenant du lotissement présent dans son bassin.

Les sources hesbignonnes ont des duretés élevées (400-550 mg/l) par rapport à celles situées dans la craie du Pays de Herve. Elles sont alimentées par des nappes profondes ou intermédiaires. Il est intéressant de constater que la source C11 ne se recharge pas durant notre période d'observations : le débit décroît très lentement sur

toute la période, malgré la présence d'événements pluvieux qui ont provoqué une augmentation du débit dans toutes les autres sources. Ceci est probablement en liaison avec le fait que ce bassin est le plus urbanisé, et donc le plus imperméabilisé.

B. Analyse des productions

L'analyse des productions des aquifères reprises au tableau 1 montre des valeurs comprises entre 1 et 6 m³/j/ha. Les 3 sources présentes dans la craie du Pays de Herve (C2, C3 et C6) montrent des productions élevées entre 3,43 et 5,82 m³/j/ha. Les prélèvements à usage domestique dans cette nappe sont faibles ; d'après Gulinck (1966), ils ne dépassaient pas 0,65 m³/j/ha. Les deux sources sur le Houiller (H5 et H8) se distinguent par des productions et des réserves plus faibles. La source C9 qui développe son bassin en partie dans la dolomie frasnienne se rapproche plus des caractéristiques des sources du Crétacé du Pays de Herve. En Hesbaye sèche, de nombreux prélèvements sont opérés pour la distribution d'eau domestique et industrielle. Gulinck (1966) chiffrait ces prélèvements à 1,8 m³/j/ha alors que la production du Crétacé du bassin du Geer au milieu du XIX^e, avant ces prélèvements massifs était estimée à 5,3 m³/j/ha. Les faibles productions comprises entre 1,33 et 2,19 m³/j/ha des sources hesbignonnes (C11, C14 et C16) sont clairement affectées par l'exploitation importante de la nappe du Crétacé.

C. Diagramme dureté pH

Afin de mettre en évidence l'influence de la lithologie sur les eaux de source, C. Ek (1969, 1976) avait proposé des diagrammes dureté/pH. Ceci a été appliqué à une quarantaine de sources situées dans des lithologies très

Tableau 2. Caractéristiques des sources à suivi trimestriel

	Débit moyen (l/s)	superficie (ha)	pH	Dureté totale mg/l	Conductivité µs/cm	NO3 (mg/l)	Altitude (m)	T°	ΔT°	PO4 (mg/l)
C1		1,8	6,78	296	617	13	228	10,7	9,4	1,03
C4		5,7	7,02	373	807	18	195	10,9	6,3	0,98
C5	0,4105	10	6,89	357	768	16	185	10,7	8,3	0,82
C7		7,2	7,17	428	903	30	165	10,6	8,6	0,92
C8	0,6815	6,7	7,19	479	1037	39	165	11,2	1,1	0,75
H1	6,1675	38	6,68	182	425	16	175	10,5	4,6	0,44
H2		22	7,49	266	649	41	200	10,6	11	0,83
H3		5,4	6,42	160	448	29	189	10,5	8	0,87
H4		6,5	6,77	163	411	29	185	9,6	10,5	0,90
H7		4,3	6,61	233	605	11	166	11,2	4,7	0,52
C10		16,8	7,97	406	844	36	80	9,9	3,6	0,86
H9		0,55	6,57	166	466	27	105	11,1	2,2	0,54
C15		6,4	7,10	488	1012	11	83	11,0	3,6	0,78
H11	0,469	5	7,17	503	984	23	67	11,8	1	0,63

variées (Petit *et al.*, 1999). Un même type de diagramme a été élaboré pour les sources de la présente étude (Fig. 2, selon les valeurs reprises aux tableaux 1 et 2).

Les paramètres de ces sources sont des moyennes de 5 mesures prises en août 2000, novembre 2000, février 2001, mai 2001 et juillet 2001.

Il ressort de ce diagramme trois grands ensembles :

- tout d'abord, les sources sur Houiller, avec un pH acide (6,2 à 6,6) et une dureté assez moyenne (100 à 250 mg/l), ce qui se traduit par une conductivité oscillant entre 300 et 450 $\mu\text{s}/\text{cm}$;
- ensuite, les sources de la craie du Pays de Herve avec un pH proche de la neutralité (7 à 7,3), une dureté assez élevée (400 mg/l) et une conductivité atteignant 700 à 800 $\mu\text{s}/\text{cm}$;
- enfin, les sources de Hesbaye avec un pH assez voisin de l'ensemble précédent, mais avec une dureté et une conductivité plus élevées (respectivement 400 à 550 mg/l et 850 à 1300 $\mu\text{s}/\text{cm}$).

On observe, en outre, trois sources principalement sur la smectite (H2, H7 et C1) caractérisées par des nappes très superficielles. Leur pH et leur dureté (250 et 300 mg/l) se situent en position intermédiaire, entre les sources sur le Houiller et sur la craie ; leur conductivité s'élève à 600-650 $\mu\text{s}/\text{cm}$. Enfin, la source H11 émerge dans le Houiller, mais la plus grande partie de son bassin se situe dans le Crétacé.

D. Les nitrates et les phosphates

Différentes études ont synthétisé le comportement des nitrates dans des rivières et à l'émergence de sources. Ainsi l'évolution interannuelle des concentrations mensuelles en nitrates, suivie pendant près de vingt ans dans une rivière du Devon, laisse clairement apparaître un cycle saisonnier, avec un maximum en hiver et un minimum en été (Burt & Haycock, 1992). On note également que les maxima sont plus importants lorsqu'ils font suite à un été sec (par exemple 1976). Toutefois, si l'on suit l'évolution des nitrates à un pas de temps plus fin, on constate que ce cycle saisonnier est perturbé au cours d'épisodes individuels. Ainsi, Burt et Haycock (1992) montrent qu'il y a bien un accroissement de la concentration en nitrates lors de trois crues hivernales, mais cette augmentation se produit systématiquement au moment de la décrue, ce qui laisse croire que des eaux souterraines peu profondes sont capables d'apporter une contribution rapide à la rivière. L'évolution des nitrates a également été suivie à l'exutoire d'une source de ce même bassin hydrographique. Le régime annuel y est aussi évident que pour la rivière, mais avec un cycle saisonnier plus asymétrique et un brusque accroissement en automne lorsque les écoulements de subsurface redeviennent plus importants. On note également une grande différence entre les teneurs estivales en nitrates dans la source et dans la rivière, ce qui est lié à la présence de macrophytes fort actifs dans cette dernière, car

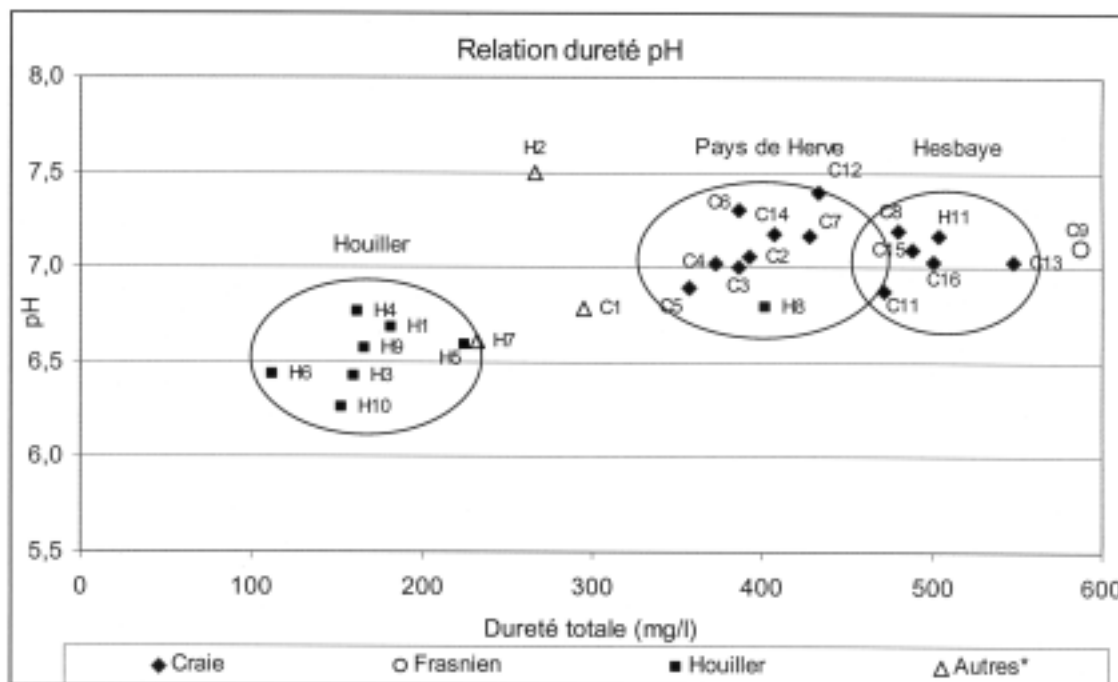


Figure 2. Relation entre la dureté et le pH moyen annuel des 27 sources

* Ces sources émergent sur la smectite avec une partie de leur bassin sur la craie, ce qui leur confère des caractéristiques intermédiaires.

ils peuvent piéger les nitrates. En hiver, les différences redeviennent peu importantes, du fait que cette végétation aquatique meurt.

Les variations spatiales des concentrations et des charges en nitrates présentées pour la Grande-Bretagne montrent que les concentrations en nitrates sont beaucoup plus élevées dans les Lowlands (bassin de Londres), car elles sont moins arrosées, le moindre écoulement suscitant une plus faible dilution, mais aussi parce que l'activité agricole est surtout orientée vers les cultures (Betton, 1990 in Burt & Haycock, 1992). On retrouve toutefois des concentrations assez élevées également dans d'autres régions orientées vers l'herbage, du fait de l'application de fertilisants aussi aux prairies. Toujours en Angleterre, cette étude a bien mis en évidence l'évolution des nitrates en relation avec la lithologie : les concentrations en nitrates sont très faibles (moins de 5 mg/l) à l'exutoire de sources drainant la craie par rapport à des lithologies telles que des argiles ou des calcaires jurassiques où ces concentrations peuvent atteindre 15 mg/l. Selon ces auteurs, cette différence est attribuée au fait que, dans les craies, la percolation de la pollution en nitrate au travers de la zone non saturée est beaucoup plus lente avant d'atteindre la nappe (Burt & Haycock, 1992). Toujours d'après ces auteurs, il n'est pas exclu que, à terme, on assiste à une augmentation importante des teneurs en nitrates à l'exutoire des émergences drainant la craie, lorsque ce " front " de progression aura atteint la partie saturée des nappes.

L'évolution des nitrates observée dans nos sources (tableau 3) correspond avec certaines observations reprises dans les différentes études évoquées ci-dessus. Ainsi, il se vérifie que les concentrations en nitrates sont in-

fluencées par l'utilisation du sol : elles sont faibles lorsque le bassin est boisé (seulement 15 mg/l à H6) et augmentent lorsque le bassin est en prairie, puis en culture et finalement urbanisé. La lithologie joue également un rôle non négligeable : on remarque une plus faible concentration dans la craie que dans le Houiller pour une même affectation de bassins. Les concentrations observées dans notre région (7 à 43 mg/l) restent largement inférieures à celles présentes (92 à 127mg/l) quelques kilomètres au nord dans le Mergelland, région herbagère développée sur la craie au Pays-Bas (Hendrix & Meinardi, 2004). Cela s'explique par une pression de l'habitat et des activités agricoles plus intense qu'en Belgique, d'une part, et par une moindre dilution liée à des précipitations moins abondantes aux Pays-Bas, d'autre part.

Le cycle annuel se résume à une forte augmentation en automne, suivie d'une diminution progressive jusqu'à la fin de l'été accompagnée d'un saut au printemps probablement suite aux amendements. L'influence de l'écoulement de subsurface qui est plus actif dans les nappes superficielles et qui, de ce fait, entraîne le lessivage des nitrates, a été aussi mise en évidence, ceci notamment en relation avec les épisodes pluviométriques importants qui génèrent cet écoulement. Les fortes variabilités des concentrations en nitrate sont associées aux nappes superficielles et les faibles variabilités, aux nappes profondes. Les émergences diffuses reflètent une plus grande variabilité, car un écoulement de surface peut se mêler à l'écoulement souterrain.

Les différentes variabilités des concentrations en phosphates ont permis de confirmer la classification de la profondeur des nappes.

Tableau 3. Concentration moyenne, maximum et minimum en nitrate et date de leur occurrence

Source	Affectation du sol	Lithologie	Concentration moyenne (mg/l)	minimum-maximum (mg/l)	date du maximum	date du minimum
C2	prairie	Craie	13	9 - 18	8/04/2001	17/12/2000
C3	prairie	Craie	21	15 - 31	4/06/2001	14/10/2000
C6	prairie	Craie	12	4 - 21	27/07/2000	14/10/2000
H5	prairie	Houiller	33	21 - 44	10/01/2001	27/07/2000
H6	bois	Houiller	15	3 - 22	17/12/2001	28/06/2001
H8	culture+prairie	Houiller + terrasse mosane	43	34 - 52	10/12/2000	30/09/2000
C9	verger+culture	Frasnien + terrasse mosane	32	22 - 40	8/04/2001	14/10/2000
H10	prairie+urbain	Houiller + terrasse mosane	29	15 - 38	4/03/2001	23/10/2000
C16	prairie+culture	Craie	14	8 - 18	6/07/2001	30/09/2000
C14	prairie+urbain	Craie	19	11 - 26	8/04/2001	14/10/2000
C13	prairie	Craie	7	2 - 17	30/09/2000	29/10/2000
C12	prairie	Craie	15	9 - 20	2/04/2001	30/09/2000
C11	urbain	Craie	38	23 - 47	10/01/2001	23/10/2000

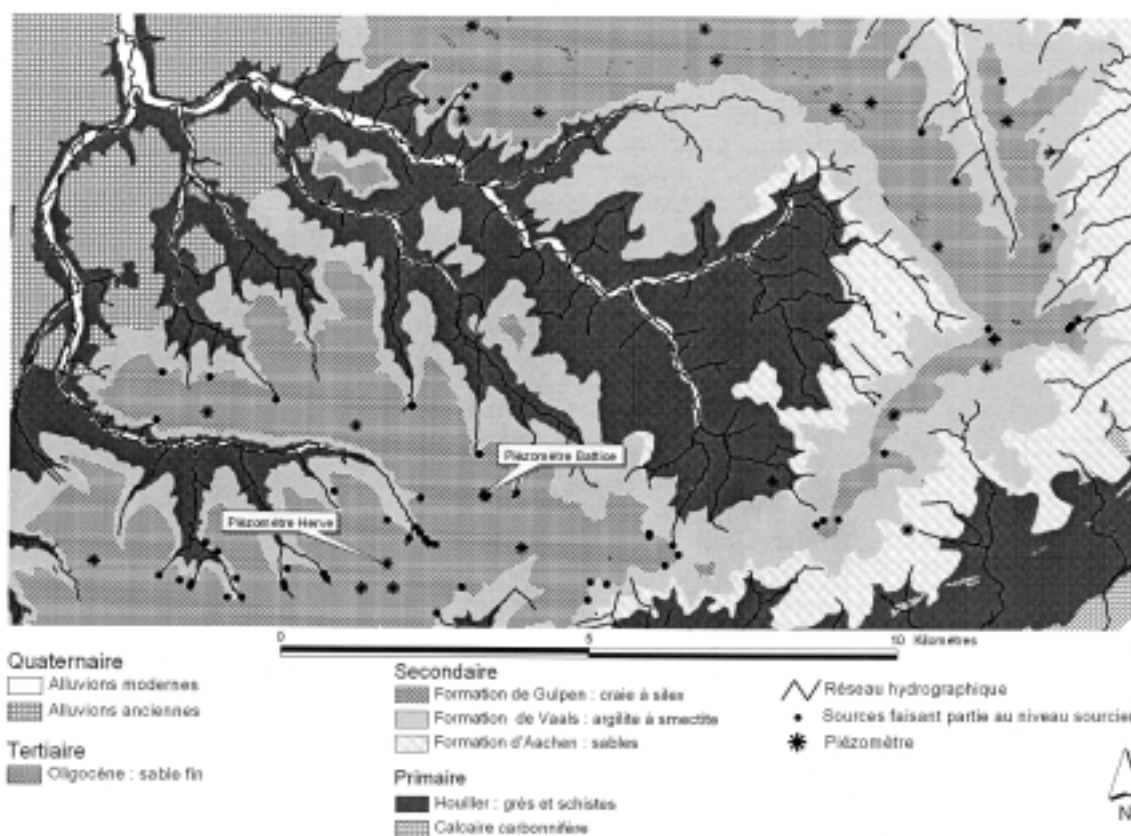


Figure 3. Niveau sourcier du bassin de la Berwinne et de la Gulp supérieure et localisation des piézomètres

E. Analyse de la piézométrie dans le Pays de Herve

Les mesures des vingt-huit puits et forages ont permis de confirmer la présence d'une nappe importante dans la craie, qui constitue le réservoir principal du bassin de la Berwinne, et d'autres nappes de moindre extension dans les formations de Vaals et d'Aachen.

Comme nous l'avons déjà mentionné, le mur imperméable que représente la formation de Vaals fait émerger une quantité significative de sources sur les versants du Pays de Herve. Près de soixante sources et fontaines ont été répertoriées au contact craie-smectite (Fig. 3). Plus d'une quarantaine se situent en aval du pendage nord-ouest de 1,4 %, et méritent de ce fait l'appellation de sources de déversement, tandis que dix-huit autres sont à "contre pendage" et peuvent être considérées comme des sources de trop-plein (Schoeller, 1962).

À l'est de la ligne Battice-Aubel, la stratigraphie du Crétacé se modifie quelque peu : la formation d'Aachen vient en effet s'intercaler entre le Houiller et la formation de Vaals qui est plus épaisse qu'à l'ouest et qui est composée ici d'une succession de couches imperméables et perméables. Les niveaux piézométriques nous indiquent que la nappe devrait se trouver dans la formation de Vaals, mais en réalité, l'eau provient principalement des sables d'Aachen qui contiennent une nappe

captive sous pression. D'autres forages, réalisés dans le cadre de la construction de la ligne de chemin de fer à grande vitesse longeant l'autoroute de Liège à Aix-la-Chapelle, révèlent aussi la présence d'une nappe dans les sables d'Aachen (Demoulin & Pissart, 1999).

Si l'on envisage la réponse des hauteurs piézométriques aux précipitations mensuelles, on constate tout d'abord que l'amplitude ne dépasse pas en général dix mètres. Par ailleurs, les niveaux piézométriques réagissent avec un certain retard aux événements pluvieux. Les réponses les plus marquées s'observent en hiver, car, à cette période de l'année, la pluie est plus efficace pour réapprovisionner la nappe, étant donné que l'évapotranspiration est fort réduite. En été, lorsque les valeurs d'évapotranspiration et de reconstitution du stock d'eau utile dépassent les quantités précipitées, le niveau piézométrique entame une décroissance exponentielle qui présente une allure similaire à celle des débits des cours d'eau en période de tarissement et qui, comme on l'a vu, peut s'exprimer par la loi de Maillet. Ce comportement peut être illustré sur les différentes nappes décrites ci-dessus.

La figure 4 illustre le suivi mensuel des cotes piézométriques de deux forages. Le forage de Battice qui se situe à 310 mètres d'altitude, montre une cote piézométrique moyenne à 280 mètres, soit 10 m au-dessus du

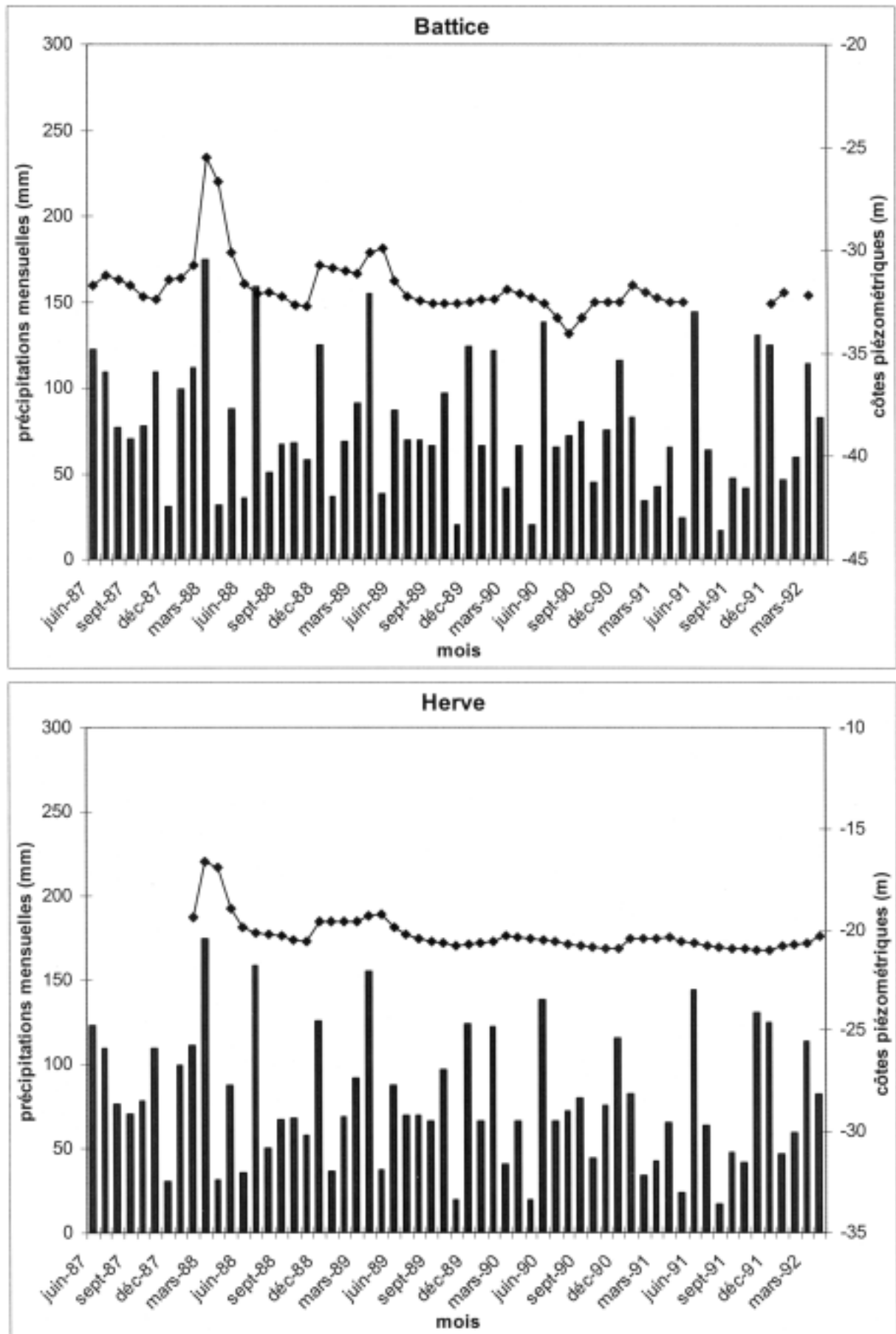


Figure 4. Cotes piézométriques et précipitations mensuelles de deux forages

contact craie-smectite, indiquant que cette nappe se situe dans la craie. Il en est de même pour le piézomètre de Herve. Le choix s'est porté sur ces deux forages, car ils se situent à proximité de la ligne de partage des eaux, ce qui permet de mieux refléter les variations du niveau des nappes, mais aussi parce que c'est là que les séries de mesures sont les plus complètes.

Quatre séries hivernales de mois fort pluvieux se sont présentées : 385 mm de janvier à mars 1988, 246 mm en mars-avril 1989, 122 mm en février 1990 et 198 mm en décembre 1990 et janvier 1991. Les piézomètres situés dans la nappe de la craie ont réagi fortement à l'évènement de 1988. La réaction se présente avec deux mois de retard par rapport au début de la période pluvieuse. De plus, quatre mois sont nécessaires au retour à la cote piézométrique initiale. Le piézomètre dans le socle primaire réagit peu à cet évènement. Les autres séries pluvieuses hivernales ont peu de répercussions sur ces hauteurs piézométriques. Mis à part les pics interprétés ci-dessus, il est intéressant de constater que le niveau de la nappe dans le Crétacé reste constant. La période sèche relevée en été et automne 1989 a en effet peu de répercussions sur ces deux piézomètres, ce qui conforte l'observation de faibles coefficients de tarissement observés sur les sources alimentées par la nappe de la craie. Ces observations laissent penser que la craie possède une grande réserve aquifère face à de longues périodes sèches.

CONCLUSION

La craie contient des nappes profondes qui alimentent des sources pérennes ; c'est le principal aquifère de la Hesbaye et du Pays de Herve. Lorsqu'il est dégagé de la couverture du Crétacé, le Houiller de la région étudiée contient en général des nappes plus superficielles alimentant des sources qui répondent rapidement et de manière accusée aux aléas pluviométriques.

La lithologie régit significativement le pH, la dureté et la conductivité des eaux phréatiques. Les sources sur la craie sont très dures dans la craie de Hesbaye, dures dans la craie du Pays de Herve avec des pH neutres. Dans le Houiller, les sources sont acides et peu minéralisées. La lithologie et l'utilisation du sol influencent aussi les concentrations moyennes en nitrates : elles sont plus élevées dans les sources superficielles du Houiller, d'une part, lorsque le bassin est couvert de cultures, d'autre part.

La partie occidentale du Pays de Herve est alimentée par une importante nappe développée dans les craies, et par des nappes plus superficielles développées notamment dans le Houiller. Les variations des paramètres hydrologiques et physico-chimiques rendent bien compte de ce double mode d'alimentation.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient C. Ek et A. Weisrock pour la relecture de cet article, F. Bellière (Division des eaux souterraines, DGRNE) pour avoir mis les données piézométriques à notre disposition, N. Lousberg (†) et J.-L. Génicot pour leur aide lors des analyses de laboratoire.

BIBLIOGRAPHIE

- ARAUJO BONATTO J., 1993. *Hydrologie des sources et transport solide dans le bassin de la Lembré*. Mémoire Maîtrise Géol. Terrain Superficiel, Univ. Liège, 133 p.
- BARCZY L. & MARION J.M., 2000. *Notice explicative de la carte géologique de Wallonie : feuille Dalhem-Herve*, Ministère de la Région wallonne, DGRNE, 71 p.
- BRASSINE B., 1995. *Variation des paramètres hydrologiques et physico-chimiques des sources se différenciant par la lithologie du bassin d'alimentation dans le sud-ouest du Pays de Herve*. Mém. Lic. Sc. Géog., Univ. de Liège, 142 p.
- BURT T.P. & HAYCOCK N.E., 1992. Catchment planning and the nitrate issue : a UK perspective. *Progress in physical geography*, 16, 379-404.
- CLOSKIN P., 1991. *Variation des paramètres hydrologiques et physico-chimiques des sources se différenciant par la lithologie du bassin d'alimentation (Condroz et Condroz ardennais au sud de Liège)*, Mém. Lic. Sci. Géog., Univ. Liège, 128 p.
- COSANDAY C. & ROBINSON M., 2000. *Hydrologie continentale*. A. Colin, Paris, 360 p.
- DEMOULIN A. & PISSART A., 1999. *Les glissements de terrains du Pays de Herve*. DGATLP, Namur, 146 p.
- EK C., 1969. *Facteurs, processus et morphologie karstique dans les calcaires paléozoïques de la Belgique*, Thèse Doctorat Sc. Géol. et Minéral., Univ. Liège, 476 p.
- EK C., 1976. Les phénomènes karstiques, *Géomorphologie de la Belgique*. Hommage au Prof. P. Macar (A. Pissart, Ed.), Laboratoire de Géographie Physique de l'Univ. Liège, 137-157.
- GULINCK M., 1966. *Hydrogéologie, notice explicative de l'atlas de Belgique*, Comité national de géographie, Institut géographique militaire, Bruxelles, 68 p.
- HENDRIX WPAM. & MEINARDI CR., 2004. Bronnen en bronbeken van Zuid-Limburg, kwaliteit van grondwater, bronwater en beekwater, *Rijksinstituut voor Volksgezondheid en milieu, Bilthoven*, 82 p.
- LALOUX M., DEJONGHE L., GHYSEL P. & HANCE L. 1996. *Notice explicative de la carte géologique de Wallonie : feuille Fléron-Verviers*, Ministère de la Région wallonne, DGRNE, 150 p.

- PETIT F., ARAUJO BONATTO J., BRASSINE B., CLOSKIN P., ROSEN E. & EK C., 1999. Paramètres hydrologiques et physico-chimiques de sources de haute Belgique : ébauche d'une typologie régionale. *Bulletin de la société géographique de Liège*, 37, 1999/2, p. 47-61.
- ROSEN E., 1993. *Variation et paramètres physico-chimiques des sources suivant les différentes assises géologiques dans la région Malmédy-Butgenbach*, Mém. Lic. Sc. Géogr., Univ. de Liège, 184 p.
- SCHOELLER H., 1962. *Les eaux souterraines*. Masson et Cie. Ed., Paris, 642 p.

Adresse des auteurs :

Julien MOLS
François PETIT
Laboratoire d'hydrographie et de Géomorphologie fluviale
Département de Géographie
Université de Liège
Allée du 6 août, 2
B-4000 Sart Tilman, Liège