

LE TRAÇAGE : UN OUTIL POUR L'ÉTABLISSEMENT DES ZONES DE SURVEILLANCE DES CAPTAGES EN TERRAIN KARSTIQUE. LE CAS DE HASTIÈRE (PROVINCE DE NAMUR, BELGIQUE)

Georges MICHEL, Philippe MEUS, Georges THYS et Camille EK

Résumé

A la demande du Service des Eaux souterraines de la Région wallonne et pour le compte de celle-ci, la Commission wallonne d'Etude et de Protection des Sites souterrains (CWEPSS) a organisé un traçage d'eaux souterraines en région karstique à Hastière (Province de Namur). La CWEPSS a effectué l'étude et le travail avec la collaboration de la Société Geologica de Gembloux pour le traçage et celle de l'Université de Liège pour divers paramètres connexes (analyses des eaux, mesures de débit, spectrofluorimétrie, etc.).

Il y a à Hastière plusieurs résurgences d'eaux karstiques provenant d'un vaste synclinal calcaire complexe; deux captages y prélèvent des eaux pour les besoins de la population. Des traceurs fluorescents ont été injectés dans trois points d'engouffrement naturel des eaux. Trois traceurs différents ont été utilisés simultanément (un dans chaque point de perte) et recherchés dans 9 lieux de résurgence potentielle. En une seule campagne d'un mois, l'alimentation de 9 points a ainsi pu être contrôlée. En dépit d'un régime de basses eaux lors de l'expérience, certains écoulements souterrains ont parcouru plus de 3,5 km en 8 jours. Ceci montre l'importance de la surveillance de l'alimentation des captages en zone karstique.

Le captage communal d' Anthée s'est révélé propre, non contaminé. La zone de surveillance y afférente a été définie et on a distingué et délimité une sous-zone de surveillance prioritaire dans la formation qui alimente directement le captage. Le captage du camping privé s'est avéré alimenté à la fois par une perte qui reçoit les rejets d'une station d'épuration et par un cours d'eau recevant des eaux d'égout. Ceci explique la pollution observée à ce captage et montre l'urgence d'un traitement des eaux. D'autres constatations faites à la même occasion montrent l'utilité de cette technique de traçage pour la détection des sources de pollution et la définition des zones de surveillance.

Mots-clés

karst, eaux souterraines, traçage, captage, zone de protection, calcaire carbonifère, synclinorium de Dinant, Hastière

Abstract

In response to the request of the Groundwater Service of the Walloon Region, the Commission Wallonne d'Etude et de Protection des Sites Souterrains (CWEPSS) has carried out underground water tracing in the karstic area of Hastière (Province of Namur, Belgium). The CWEPSS has carried on the task with the cooperation of Geologica SA, Gembloux, for the tracing tests and the collaboration of the Université de Liège for several related parameters (stream gauging, water analyzes, spectrofluorimetry, etc.). At Hastière, several karstic Springs resurge from a large and complex limestone syncline; two water supply stations pump water from this syncline for local use. Fluorescent tracers have been injected into three swallowholes. Three different tracers have been used simultaneously - one in each injection site. They have been traced downstream in 9 potential points of reappearance. In a single one-month field-campaign, the origin of 9 streams has been questioned. Despite the low-water levels during this period, some underground streams have covered more than 3,5 km in 8 days. This shows how important is to permanently watch water supplies in karstic areas.

The water intake of the Municipality at Anthée proved to be clean, unpolluted. The authors could define the watch-zone and delineate a priority watch sub-zone in the geological formation supplying directly the intake. A private camping intake appeared to be supplied by a sinkhole collecting water from a water purifying station and by another sinking stream swallowing sewage water, hence a high pollution and an important sanitary problem. These findings, among others, show how us « the water tracing technique is in detecting sources and in defining watch and protection zones.

Key Words

karst, groundwater, tracing, water supply, protection zone, carboniferous limestone, synclinorium of Dinant, Hastière

INTRODUCTION

Le Ministère de la Région wallonne (Service des Eaux souterraines) a chargé la Commission wallonne d'Etude et de Protection des Sites souterrains (CWEPSS) de définir une méthodologie d'approche pour l'établissement des zones de surveillance des captages situés en terrain calcaire.

Basée en partie sur des traçages, cette méthode a été appliquée de manière expérimentale à Hastière (Province de Namur). Cette première campagne prospective avait pour but d'établir la faisabilité et l'intérêt d'une campagne plus systématique de reconnaissance et d'étude des circulations des eaux souterraines karstiques en Région wallonne.

La CWEPSS a fait appel à la société Geologica pour l'assister dans la réalisation, sur le plan scientifique, des traçages et pour prendre en charge les aspects hydrogéologiques de cette étude. La CWEPSS a également bénéficié de la collaboration du Département de Géographie physique et de Géologie du Quaternaire de l'Université de Liège.

Le site de Hastière avait été choisi en raison de la présence de captages dont les eaux alimentent une popula-

tion importante. Ces captages se situent à l'extrémité de deux vallons karstiques, celui du Féron et celui de Tahaux, qui constituent les axes de drainage principaux d'un vaste massif synclinal calcaire. (Photo 1, Fig. 1).

La détermination, dans la zone d'alimentation de ces captages, des points d'enfouissement et des axes karstiques avait pour but de délimiter des zones de plus grande vulnérabilité à surveiller en priorité. Ces zones permettent de définir les mesures particulières à prendre par la commune pour mieux protéger son capital hydrique.

La délimitation des zones de surveillance a été déduite d'un ensemble de relevés réalisés sur le terrain. Ceux-ci ont permis d'appréhender l'hétérogénéité de l'aquifère karstique, de rassembler des informations sur les circulations dans le sous-sol calcaire et de déterminer l'origine de certaines anomalies dans les eaux souterraines. Ils ont consisté en :

- un multitraçage réalisé à partir de trois points de perte naturels. La surveillance et l'échantillonnage d'un ensemble de sources où les traceurs étaient susceptibles de réapparaître avaient pour but de mettre en évidence les relations hydrogéologiques de type « perte-résurgence »;
- des analyses de la qualité des eaux. La présence de polluants constitue un traçage « naturel » entre des si-

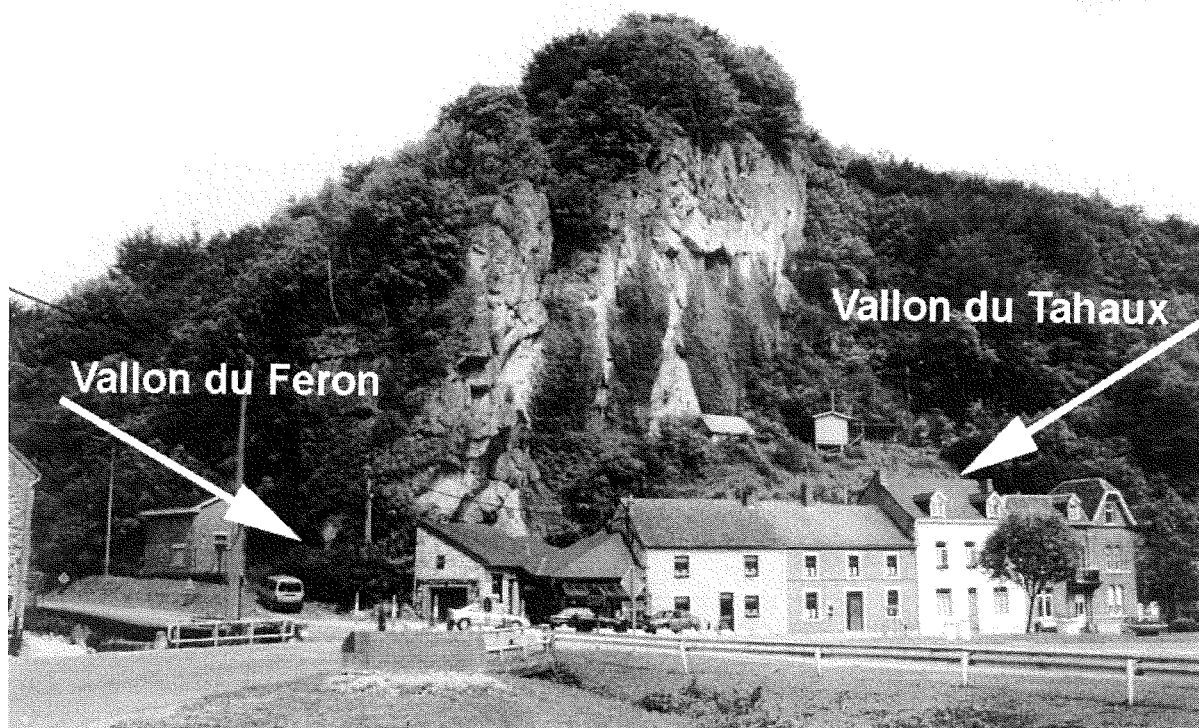


Photo 1. Carrefour de Hastière, vu de l'aval vers l'amont

L'éperon rocheux marque la limite entre les deux vallons étudiés qui confluent à hauteur du carrefour. Cet éperon est dans les calcaires tournaisiens qui constituent ici la bordure sud du synclinal d'Anthée.

tes pollués en amont et des résurgences. Des substances qui ne sont pas fréquemment mesurées (pesticides, hydrocarbures, métaux lourds,...) ont pu être recherchées, mettant en lumière certaines anomalies dans la qualité des eaux du bassin hydrogéologique. Ces résultats devraient inciter à des campagnes d'analyses plus systématiques;

un inventaire complet et actualisé des sites karstiques du bassin étudié, basé sur l'Atlas du Karst wallon. La localisation des sites karstiques est essentielle dans l'étude des aquifères calcaires; il s'agit de points d'infiltration privilégiés dont la prise en compte permettrait d'éviter qu'une pollution affecte directement la nappe souterraine et, par extension, les captages qu'elle alimente (Thys et al., 1999);

- un relevé des sources de pollutions dans le bassin d'alimentation des captages. Pour les sources de pollutions préoccupantes, l'accent a été mis sur l'urgence et la nécessité d'une réhabilitation pour garantir l'intégrité du patrimoine hydrique de ce synclinal calcaire.

Les informations rassemblées par ces différentes méthodes nous ont amenés à subdiviser la zone de surveillance en trois sous-zones à risques de contamination bien différents. Les mesures à prendre y sont par conséquent également différentes.

I. CONTEXTE GÉOLOGIQUE ET HYDROGÉOLOGIQUE

A. Structure géologique et conséquence hydrogéologique

La région de Hastière est constituée d'un massif plissé où alternent les affleurements de Calcaire Carbonifère et les formations schisto-gréseuses du Famennien, les calcaires occupant généralement les vallons, les crêtes (appelées tiges) étant constituées par des grès et siltites du Famennien (Dupon et Murlon, 1883).

Ces tiges gréseuses (plateaux d'Inzémont au sud et d'Onhaye-Anthée au nord) sont en position anticlinale. Du point de vue hydrogéologique, leur situation en crête réduit les possibilités d'un écoulement et d'une alimentation souterraine depuis les bassins voisins (Flavion et Hermeton) au profit du bassin calcaire du Féron (Fig. 2 et Fig. 5).

Le synclinal calcaire concentre les eaux de ruissellement des anticlinaux famenniens peu perméables et constitue un réservoir aquifère isolé et allongé selon l'axe de son pli majeur. Cet aquifère est très vulnérable aux pollutions de surface en raison de sa perméabilité importante et du réseau karstique qui s'y est développé et qui draine les eaux sans filtration (Delcambre et Pingeot, 1993). Le bassin hydrogéologique étudié correspond au bassin hydrographique du Féron (défini suivant les lignes de crête), à l'exception d'une aire au nord d'Anthée, où il

est localement plus étendu de quelques centaines de mètres vers le nord, en raison de l'infiltration dans les bancs calcaires inclinés vers le sud, des eaux du bassin hydrographique voisin (Fig. 3).

B. Les vallons du Tahaux et du Féron

Pour l'essentiel, deux vallons entaillent le synclinal calcaire, l'un parallèlement aux couches (vallon du Féron) et l'autre transversalement (vallon du Tahaux, lui-même affluent du Féron).

Avant traçage, la difficulté de distinguer l'appartenance des différentes émergences à l'un ou l'autre des deux bassins rendait illusoire toute étude de la nappe calcaire et de ses ressources en eau.

1. Vallon du Féron

D'orientation ouest-est, les eaux de ce vallon s'écoulent donc parallèlement aux directions des couches géologiques.

Dans sa partie amont, le vallon est constitué par une vallée sèche (dans les calcaires de Waulsort). Quelques rares écoulements temporaires rapidement absorbés par des pertes peuvent y être observés.

Les anciennes cartes indiquent que la perte terminale du vallon se confondait dans le passé avec le chantoire de Miavoie (Fig. 4; code MIAV). Les travaux de drainage et d'assèchement en aval du château de Miavoie ne permettent plus à ces eaux de conserver un parcours en surface jusqu'à Miavoie.

Le ruisseau du Féron à proprement parler prend sa source sur les crêtes schisteuses d'Inzémont et ne rejoint la vallée karstique que quelques dizaines de mètres en amont du captage communal. A son arrivée sur les calcaires, le Féron se perd progressivement sous terre. En période de basses eaux, le vallon est à sec en aval du site des grottes du Pont d'Arcole.

Le seul exutoire important et permanent du vallon du Féron est une émergence qui jaillit sous le carrefour des routes d'Onhaye et d'Anthée [FERO]; par ailleurs, sous le carrefour, plusieurs venues d'eaux secondaires de provenance inconnue ont pu être observées. Seuls les résultats du traçage et les mesures de conductivité allaient permettre d'éclaircir l'origine de l'ensemble des venues d'eaux et leur appartenance à l'un des deux vallons étudiés. Le site naturel ayant été modifié par les aménagements du carrefour (travaux du MET en 1973), il était difficile de déterminer la provenance des diverses venues d'eaux dont la plupart se trouvent canalisées.

2. Vallon du Tahaux

Ce vallon recoupe transversalement les couches géologiques, traversant successivement du nord vers le sud les deux synclinaux ainsi que la faille d'Onhaye.

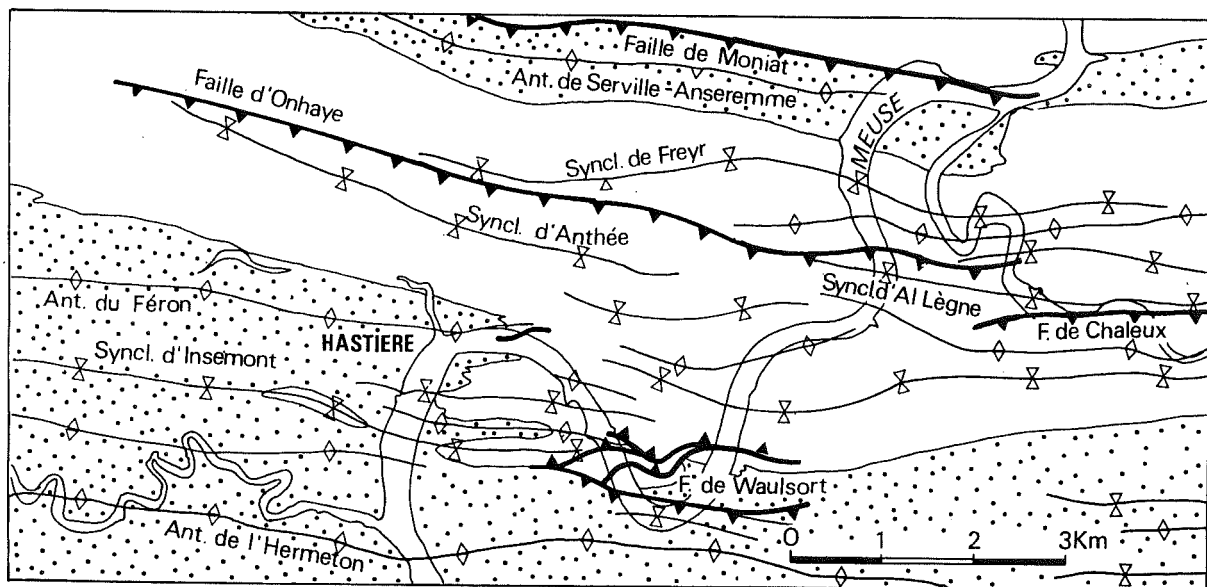


Figure 1. Structure géologique de la région de Hastière

La structure est complexe. Plis et failles sont nombreux. Les axes synclinaux et anticlinaux sont représentés. Les failles sont indiquées en traits gras. Le Famennien (gréseux) est représenté en grisé. En blanc, les calcaires et dolomies du Dinantien. D'après la carte géologique de Wallonie 53/7-8, Hastière-Dinant, par Delcambre et Pinget, 1993.

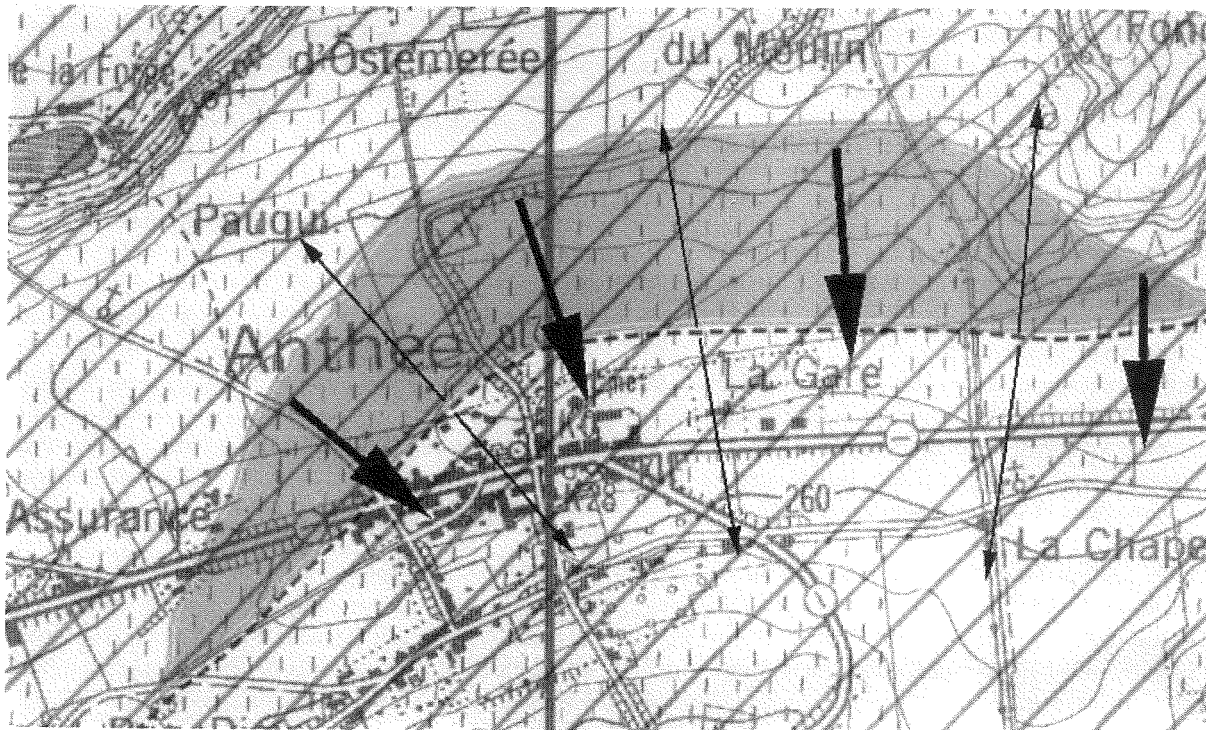


Figure 2. La ligne de crête.

À Anthée (traits interrompus), la ligne de crête sépare un bassin-versant septentrional d'un bassin-versant méridional (celui du Féron). Les flèches fines représentent le ruissellement superficiel. Cependant le pendage des bancs (vers le sud) est tel que les eaux s'infiltrant dans la partie supérieure du versant septentrional s'écoulent vers le sud (flèches épaisses) le long des joints de stratification et alimentent le bassin du Féron.

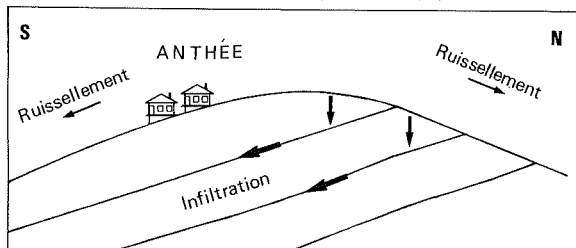


Figure 3. Coupe Nord Sud à Anthée

La coupe montre comment les eaux, ruisselant dans le haut du versant du bassin septentrional, s'écoulent après infiltration suivant les joints des bancs vers le sud (bassin du Féron).

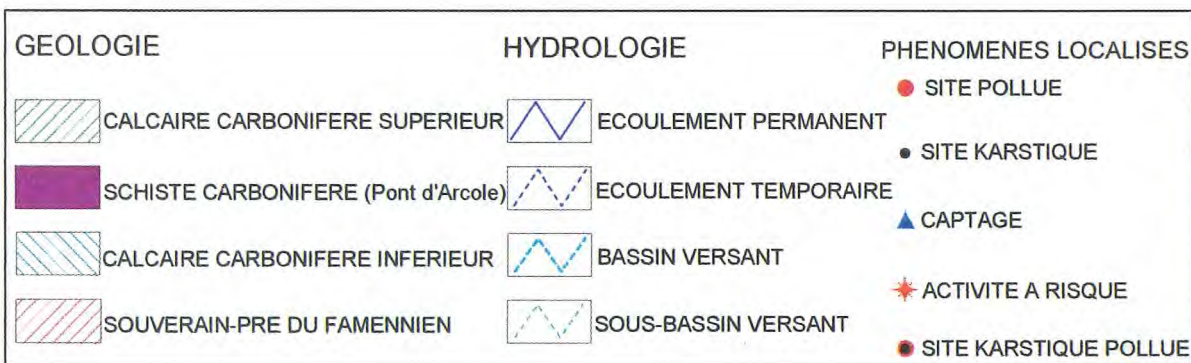
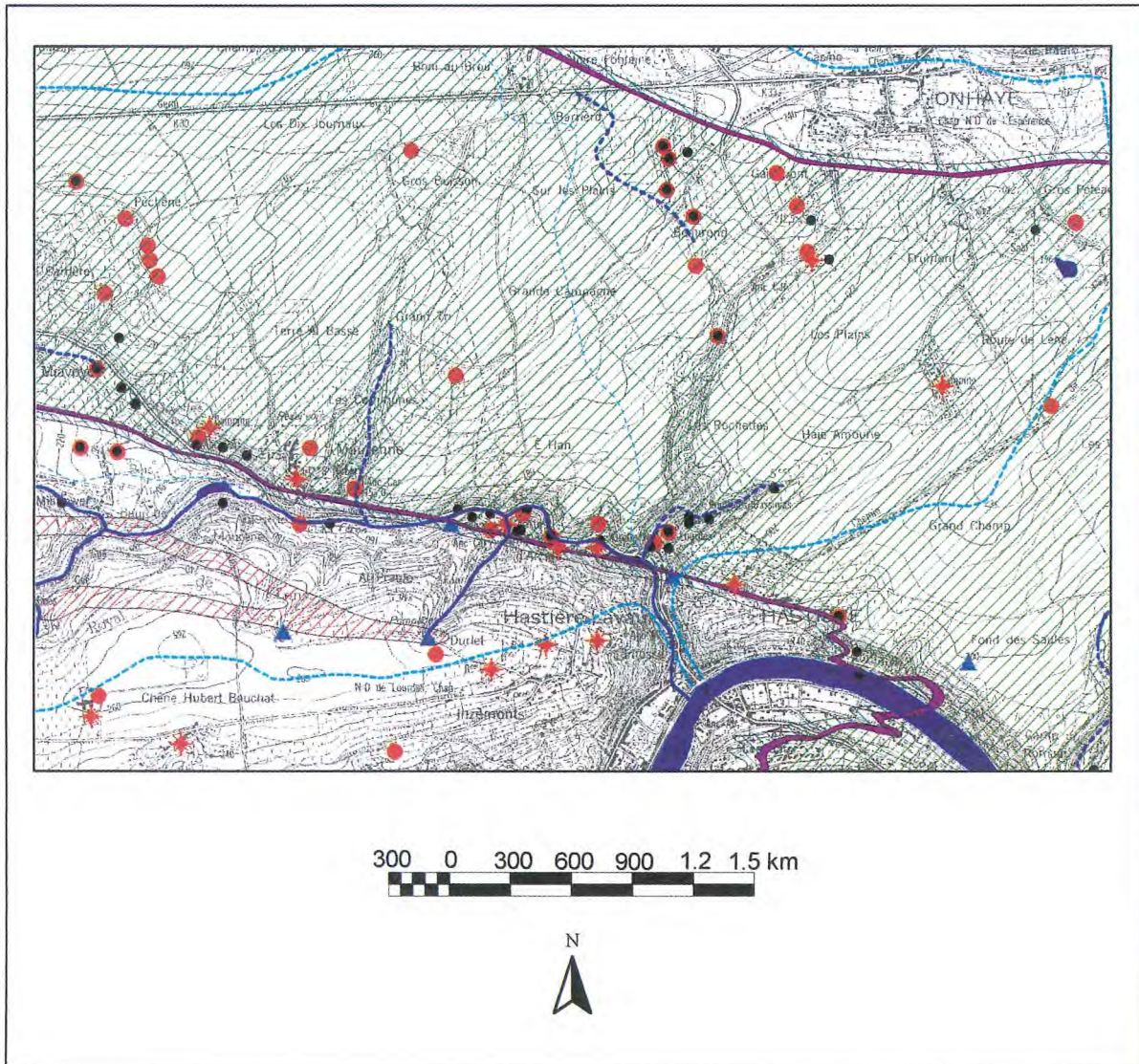


Figure 4. Géologie et hydrologie des vallons du Féron et du Tahaux

En vert, le Calcaire Carbonifère. Liseré mauve : la mince bande de schistes du Pont d'Arcole (Tournaisien). Le Famennien supérieur, gréseux, est en blanc (sauf la formation de Souverain-Pré, calcaire nodulaire et grès calcaire en hachures oranges). Ecoulement en bleu, lignes de crête en mauve. Les limites géologiques ont été tracées d'après la nouvelle carte géologique de Hastière - Dinant (op. cit.). Dessin de la carte : Annick Jaspard-Herbillion.

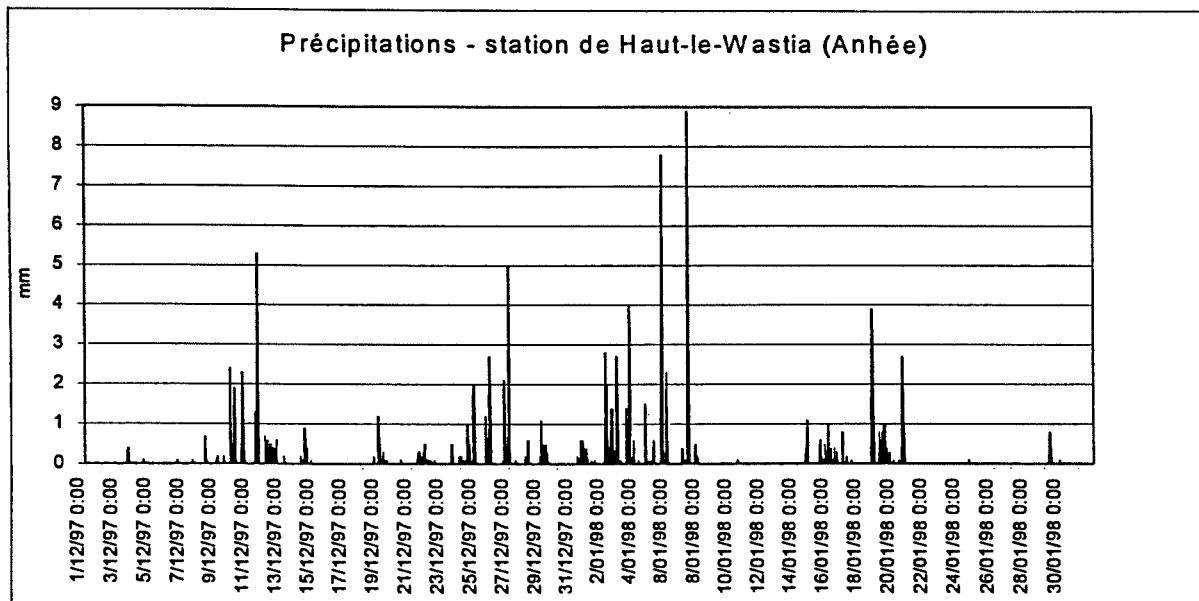


Figure 5. Précipitations horaires à la station météo de Haut-le-Wastia (Anthée, en décembre 1997 et janvier 1998)

Sur le plateau, le vallon sec débute au chantoire de Frumont, à côté duquel a été construite la station d'épuration de l'INASEP. Ce chantoire, autrefois actif, a vu ses eaux reprises dans le collecteur des eaux usées d'Onhaye. En période de très fortes pluies ou de fonte des neiges, lorsque toutes les eaux d'Onhaye ne peuvent être drainées vers le collecteur, la perte est temporairement alimentée par les eaux de ruissellement de la prairie située en amont (Liégeois, 1996).

L'exutoire principal du vallon est une émergence permanente située à l'extrême aval [TAHO], à 100 mètres du carrefour, et fonctionnant comme le débordement de la nappe des calcaires au contact avec les calcschistes de la formation de Maurenne (Van Den Broeck et al., 1910).

3. Comparaison entre les deux vallons

Il convient de signaler d'emblée une différence fondamentale entre les exutoires des deux systèmes précédents :

- l'exutoire du Féron est une source apparemment très variable, témoignant d'un système très karstifié, avec peu de réserves en amont;
- l'exutoire du Tahaux est une source stable du point de vue de son débit et de sa chimie, indiquant la présence d'une grande réserve aquifère, même si, de toute évidence, un ou plusieurs drains karstiques importants y aboutissent.

L'écoulement du Féron depuis Miavoye se fait parallèlement aux couches géologiques, dans une zone où celles-ci sont redressées (pendage compris entre 81° et 90°),

alors qu'entre la station d'épuration d'Onhaye et la résurgence du Tahaux, les formations sont traversées perpendiculairement.

C. Précipitations et mesures de débits

I. Evolution des conditions météorologiques durant le traçage

Pour tenir compte de la variation des conditions hydrologiques dans l'interprétation du traçage, nous avons considéré la répartition des précipitations durant les deux mois de l'étude.

Les valeurs de pluie horaires proviennent de la station météorologique de Haut-le-Wastia (Anthée), située à 10 km du carrefour Hastière-Anthée et nous ont été aimablement fournies par l'ASBL PAMESEB.

Quatre périodes pluvieuses apparaissent plus particulièrement :

- 10 - 13 décembre 1997 - [33 mm];
- 24 - 29 décembre 1997 - [36 mm];
- 2 - 8 janvier 1998 - [71 mm];
- 15 - 21 janvier 1998 - [34 mm].

2. Les mesures de débit

Dans le cadre de cette campagne, nous avons dû nous limiter à des mesures ponctuelles de débit, bien que des mesures en continu de niveaux d'eau auraient été utiles afin de tenir compte des variations de débit du système. Des crues assez importantes se sont, en effet, produites durant la période de restitution des traceurs, pendant les mois de décembre 1997 et de janvier 1998.

Les mesures ont eu lieu sous la direction du Professeur F. Petit le 9 décembre alors que le système se trouvait encore à l'étiage.

En ce qui concerne le débit de l'ensemble du système (mesuré en aval des deux résurgences principales), la moyenne entre les deux valeurs les plus fiables a été utilisée, à savoir $0,089 \text{ m}^3/\text{s}$.

Pour le débit du Tahaux, la moyenne des trois valeurs mesurées a été utilisée, soit $0,037 \text{ m}^3/\text{s}$.

Le débit à l'émergence du Féron s'obtient par la différence entre le débit de l'ensemble du système et le débit du Tahaux, soit $0,052 \text{ m}^3/\text{s}$.

Pour le calcul des bilans de traceurs ainsi que pour la modélisation du traçage, les variations de débit sont très importantes. Nous n'avons cependant pas eu la possibilité d'estimer ces variations et nous avons dû prendre l'hypothèse d'un débit constant qui était celui mesuré le 9 décembre.

Si cette approximation reste valable en dehors des périodes de crue, il n'en est pas du tout de même lors des pointes de crues observées.

II. LE TRAÇAGE

A. Le principe du traçage

Le principe du traçage est simple puisqu'il consiste à superposer à l'écoulement de l'eau celui d'un traceur que l'on peut ensuite identifier aisément à la sortie du système (Meus et Ek, 1999).

Lors de son passage sous terre, le traceur est affecté, d'une part, par les différences de trajets entre les filets d'eau et, d'autre part, par son comportement propre vis-à-vis de la roche et du solvant que l'on souhaite ainsi marquer (l'eau).

B. Intérêts du traçage

Le multitraçage tel qu'il a été réalisé à Hastière présentait deux intérêts principaux :

- celui de mettre en évidence indubitablement les liaisons entre certains points du bassin et les émergences situées en aval;
- celui de pouvoir utiliser les courbes de restitution ainsi obtenues, pour modéliser le transport au sein de l'aquifère et évaluer sa vulnérabilité vis-à-vis de certaines pollutions.

Ces deux informations, considérées simultanément, de-

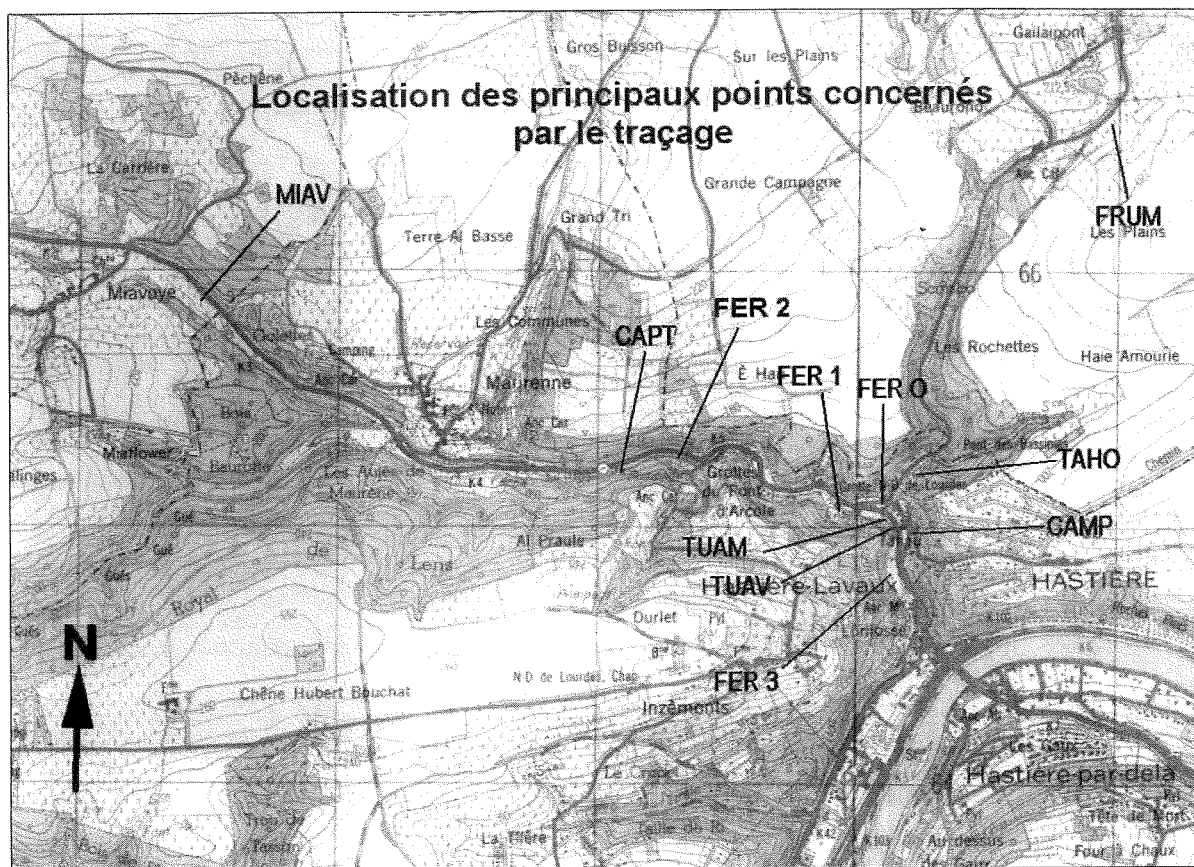


Figure 6. Carte de localisation des trois points d'injection (codes FER 2, FRUM et MIAV) et des différents sites potentiels de résurgence surveillés durant le traçage (codes CAMP, CAPT, FER 0-1-3, TAHO, TUAM et TUAV)

vraient alors permettre de délimiter de manière plus adéquate les zones de protection qu'il y a lieu d'instaurer autour des captages (Meus, 1995).

C. Application au cas de Hastière

Trois traceurs fluorescents distincts ont été utilisés simultanément afin de tester différents points du bassin tout en n'effectuant qu'une seule campagne de surveillance aux émergences (principe du multitraçage). Une dizaine de points de sortie, y compris les captages, ont ainsi été surveillés pendant une période d'environ un mois (Bonmariage et al., 1998).

Les traceurs utilisés ne présentaient par ailleurs aucune toxicité susceptible d'affecter les captages.

I. Choix des points d'injection

Nous avons choisi d'effectuer les injections dans des points de pertes naturels, afin de tracer des axes de circulation (fissures ou véritables « rivières souterraines ») présentant des vitesses importantes pour la propagation des eaux..., mais aussi des polluants.

Trois points d'injections ont été sélectionnés (points repris sur la figure 6) :

- le chantoire de Miavoye [MIAV] (sulforhodamine B) : situé en amont du vallon du Féron, ce chantoire absorbe les eaux provenant des prairies (par des drains) et les eaux usées du village. La doline terminale du chantoire a été aménagée en chambre de visite. Lors

Tableau 1. Description des points surveillés au cours du multitraçage (localisation indiquée sur la figure 6)

Sigle	Description des points de prélèvement
CAMP	Captage du camping Eden-Haute Meuse. Ce captage canalise une source à l'émergence située au carrefour. 2 pompes envoient l'eau dans une citerne au point haut du camping. L'eau ne s'écoule vers le captage et ses pompes que lorsque celles-ci fonctionnent une fois par jour pendant 4 heures.
CAPT	Captage communal de la route d'Anthée de type « source à l'émergence ». La pompe dans un bassin collecteur alimente un réservoir de mise sous pression dans lequel a également lieu la chloration.
FERO	Exutoire du Féron, situé au carrefour de Hastière. Venue d'eau sous pression située à la confluence du Féron et du Tahaux. Il s'agit de l'exsurgence principale du Féron souterrain. Avant les travaux du MET en 1973, celle-ci se situait entre deux maisons à 30 m du carrefour au pied des rochers.
TAHO	Exutoire principal du Tahaux. Cette belle résurgence en bord de route fournit un débit stable. Elle est probablement en relation avec les points de perte diffus situés en amont de la vallée de Tahaux.
TUAM & TUAV	Canalisations en aval du carrefour de Hastière. Ces canalisations en rive gauche du lit du ruisseau sont liées à l'aménagement du carrefour. Le traçage a permis de clarifier l'origine de ces eaux.
FER1	Source dans le lit du Féron (Chapelle). En amont de ce point, le Féron est régulièrement à sec. La résurgence se trouve à hauteur du cimetière dans une dépression.
FER3	Ruisseau de Féron à la sortie du bassin calcaire, en aval de l'ensemble des autres points étudiés. L'analyse des eaux en ce point devait retrouver la « signature » de l'ensemble des eaux des deux vallons étudiés. Les concentrations relatives en traceur ainsi que les mesures de conductivité ont permis d'évaluer l'apport relatif de chaque venue d'eau en ce point.
ARCO	Nappe d'eau au fond des grottes du Pont d'Arcole.
MEUS	Meuse à la résurgence Ste-Walhère. Cette sortie d'eau a été surveillée pendant le traçage. Comme elle se situe sous le niveau du fleuve et sa localisation étant imprécise, il nous a été impossible d'y faire des prélèvements. Seule une observation visuelle a pu être exercée.

Le traçage : un outil pour l'établissement des zones de surveillance des captages en terrain karstique. 41
Le cas de Hastière (Province de Namur, Belgique)

du traçage, une adduction d'eau supplémentaire a été réalisée pour « chasser » le traceur;
- le chantoire de Frumont [FRUM] (uranine) : situé sur le plateau d'Onhaye, ce chantoire n'est plus alimenté suite aux aménagements de la station d'épuration de l'INASEP. Pour les besoins du traçage, nous y avons

dévié les eaux épurées de la station (Photo 2);
- la perte du Féron (naphthionate de sodium), située entre le captage communal et les grottes touristiques du Pont d'Arcole; ce traçage a mesuré la vitesse des eaux souterraines dans la partie aval du réseau où se trouve vraisemblablement un karst noyé.



Photo 2. Chantoire (ponor) de Frumont

C'est dans cette dépression absorbante qu'a été injectée la fluorescéine, retrouvée notamment à la résurgence du Tahaux.



Photo 3. Résurgence du Tahaux

L'eau nettement verte indique une forte concentration en fluorescéine, injectée trois jours auparavant dans le chantoire du Frumont.

2. Les points de prélèvement

La campagne d'échantillonnage s'est étendue sur presque deux mois (du 05/12/97 au 21/01/98). Des blancs (échantillons témoins) ont été prélevés avant le traçage aux points surveillés, en vue de mesurer le bruit de fond de fluorescence présent dans l'eau.

De nombreux prélèvements ont été réalisés durant les premiers jours grâce aux spéléologues associés à cette activité ainsi qu'aux bénévoles sur place. De plus, deux échantillonneurs automatiques ont été utilisés. L'un était placé au captage communal [CAPT], l'autre à l'émergence du Tahaux [TAHO] (Photo 3). Au total, plus de 1.000 échantillons d'eau ont été prélevés durant cette campagne. Le tableau 1 reprend les points surveillés.

D. Résultats du traçage

Les traceurs fluorescents ont été analysés à l'aide d'un spectrofluorimètre à réseau PERKIN-ELMER LS50 (mis à notre disposition par le service de chimie macromoléculaire de l'ULg, dirigé par le Professeur Houssier). La technique utilisée est le balayage synchronisé des longueurs d'onde d'excitation et d'émission.

Le spectrofluorimètre permet de détecter et de doser le traceur à des concentrations largement inférieures au seuil de visibilité. La courbe de restitution du traceur est obtenue en reportant les concentrations des échantillons successifs au cours du temps.

1. Restitution de la sulforhodamine B injectée au chantoire de Miavoye

La sulforhodamine B est réapparue aux points d'eau suivants : FER0, TUAV, et FER3.

On en a aussi détecté quelques traces aux points d'eau suivants : CAMP et TUAM.

Les observations permettent d'affirmer que :

- l'émergence FER0 est bien l'exutoire principal du système du Féron;
- le captage communal CAPT n'est pas en communication avec le chantoire de Miavoye;
- la canalisation TUAV draine principalement des eaux en provenance de l'émergence FER0.

Le captage du camping a contenu de la sulforhodamine B entre le 17/12/97 et le 21/01/98. Cette restitution est difficile à expliquer, d'autant plus que la période de réapparition ne correspond pas à celle de l'émergence du Féron.

Malgré une karstification fort développée le long de l'axe du Féron, la sulforhodamine B a mis 8 jours pour atteindre l'exutoire principal [FER0]. Les vitesses obtenues (15 m/h) sont relativement faibles pour un écoulement karstique.

Cette lenteur peut s'expliquer par l'état de sécheresse

de la zone d'infiltration. Le traceur a dû progresser très lentement dans la partie amont de son trajet et a seulement été chassé par la crue survenue à partir du 10 décembre. La première arrivée, le 13/12/97, correspond à la fin de la période pluvieuse. Des pics secondaires de restitution peuvent être mis en relation avec les périodes pluvieuses suivantes.

Ce piégeage temporaire explique également l'étalement de la restitution, des traces étant encore détectées dans les derniers échantillons prélevés le 21/01/98.

2. Restitution de l'uranine injectée au chantoire de Frumont

L'uranine est réapparue principalement aux points d'eau suivants : TAHO, TUAM, CAMP et FER3. On en a aussi détecté quelques traces à FER1 (source dans le lit du Féron face à la chapelle).

Ces observations permettent d'affirmer que :

- l'émergence TAHO est bien l'exutoire principal du système du Tahaux;
- la canalisation TUAM draine une venue d'eau de même origine que la résurgence de Tahaux.

Les vitesses obtenues sont de 14 m/h. Comme pour l'autre vallon, ceci peut s'expliquer par un passage très lent au travers de la zone non saturée. Le chantoire de Frumont n'était plus actif depuis plusieurs années et l'apport d'eau supplémentaire durant une semaine depuis la station d'épuration n'a sans doute pas suffi à imbiber totalement les conduits de la zone d'infiltration sous la doline.

Enfin, les écoulements souterrains depuis Frumont sont perpendiculaires à la stratification et risquent d'être contrariés, lors de la traversée, par d'éventuels bancs schisteux ainsi que par la faille d'Onhaye.

Les précipitations ont eu une incidence nette sur la restitution du traceur, entraînant un lessivage progressif de l'uranine stockée dans la zone d'infiltration, responsable de l'étalement de la courbe de restitution. Toutefois, la présence de réserves d'eau importantes pourrait également jouer le rôle de « tampon » pour le traceur.

3. Restitution du naphthionate injecté dans la perte du Féron

Le naphthionate est réapparu principalement aux points d'eau suivants : FER3, FER0 et TUAV.

Quelques traces ont également été détectées à TUAM. Le but de cette injection n'était pas seulement de confirmer la relation entre la perte et l'exutoire du Féron, ce qui semblait évident, mais d'obtenir des informations précises sur les vitesses de transfert en aval du système du Féron, dans l'hypothèse de l'existence d'une zone noyée.

Les vitesses sont, en effet, ici beaucoup plus élevées (200

m/h pour la première arrivée) et la courbe de restitution beaucoup moins étalée. On n'observe pas de retard dû aux difficultés d'infiltration du traceur. La perte injectée présentait un débit continu important et l'écoulement a rapidement rejoint le drain karstique principal au niveau de la zone noyée. Ces vitesses élevées témoignent d'un fort degré de karstification et de l'absence de réserves d'eaux importantes le long du drain.

III. DÉLIMITATION DE LA ZONE DE SURVEILLANCE DU CAPTAGE COMMUNAL

Le traçage à partir de pertes naturelles du système karstique permet de mettre en évidence et de caractériser les axes privilégiés de drainage souterrain dont il faut tenir compte en région karstique pour délimiter les zones de surveillance des captages.

La précision dans la délimitation des aires d'alimentation des prises d'eaux et des sources dépend de la localisation de ces pertes par rapport aux limites du bassin versant. A Hastière, nous ne pouvions pas effectuer de traçage depuis les extrémités du bassin vu l'absence, dans cette zone, de points d'injection possibles. Il nous fallait donc délimiter la zone de surveillance à partir des relations (perte-résurgence) vérifiées par traçage en les extrapolant sur base des informations géologiques.

A. Tracé de la zone de surveillance globale

Par définition, la zone de surveillance couvre le bassin d'alimentation du captage. Contrairement aux zones de

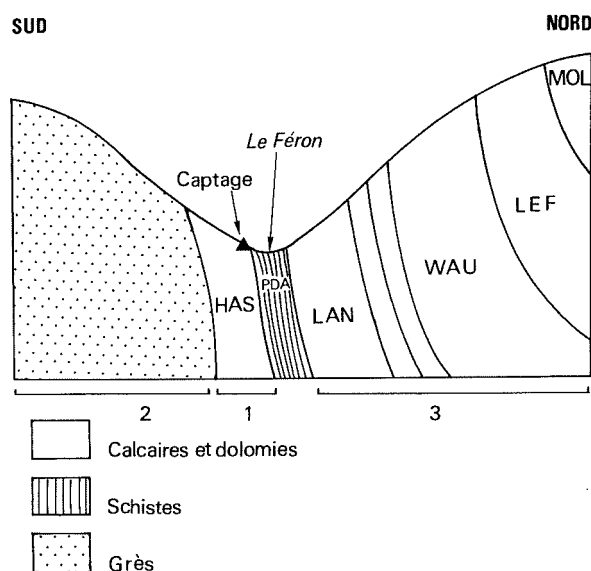


Figure 7. La bande de schistes du Pont d'Arcole [PDA] bloque les venues d'eau d'infiltration des calcaires tournaisiens et viséens de Landelies [LAN], de Waulsort [WAU], de Leffe [LEF] et de la Moline [MOL] vers le captage. Celui-ci draine essentiellement les eaux du calcaire tournaisien de Hastière [HAS] et des formations fameniennes. 1,2,3 : sous-zones de surveillance proposées; voir texte

prévention qui se basent essentiellement sur le transfert possible de polluants en zone saturée, la zone de surveillance permet également de tenir compte des risques de contamination indirecte liés aux ruissellements en surface ainsi qu'à l'infiltration à travers la zone non saturée.

La source à l'émergence qu'exploite le captage communal se situe juste à la limite des bancs calcaires redressés de la formation de Hastière. Ces bancs sont séparés des bancs de Calcaire Carbonifère supérieur (appartenant aux formations de Landelies, de Waulsort et de Neffe) qui forment le coeur du synclinal au nord, par la formation des schistes du Pont d'Arcole. Cette bande de schistes constitue, du moins dans les conditions du traçage (période d'étiage au moment de l'injection), une barrière pour les écoulements souterrains en provenance des calcaires situés au nord. Le captage draine donc essentiellement l'étroite bande calcaire allongée de la formation de Hastière. C'est le trop-plein de cette nappe calcaire qui émerge le long de la route d'Anthée à l'endroit où le captage a été implanté.

Les schistes sont une barrière pour les écoulements souterrains, mais non pour les eaux de surface. Dès lors, les écoulements de surface depuis le versant nord du vallon de Féron pourraient contaminer le captage. Pour cette raison, il ne faut pas exclure de la zone de surveillance du captage la partie nord du bassin versant du Féron.

Les eaux qui ruissellent depuis les formations schisto-gréseuses au sud et qui rejoignent le cours du Féron passent in fine en surface à proximité immédiate du captage. Si une infiltration avait lieu depuis le lit du ruisseau, le captage serait également susceptible de subir indirectement des contaminations.

La zone de surveillance doit, par conséquent, englober la totalité du bassin versant hydrographique du ruisseau du Féron à hauteur du captage.

B. Définition de sous-zones de surveillance suivant le risque de contamination

Vu les différentes voies possibles de contamination, nous proposons de distinguer trois sous-zones (Fig. 7) au sein de la zone de surveillance globale. La surveillance qui devrait y être assurée serait différente suivant le risque de contamination rencontré dans chacune d'elles.

Sous-zone 1 [Zone de surveillance prioritaire] : la bande de Calcaire Carbonifère inférieur (calcaire de Hastière), depuis le captage jusqu'à la limite du bassin versant en amont (à l'est de Morville). Il s'agit de l'impluvium de l'aquifère du calcaire de Hastière : les eaux peuvent s'infiltrer en tout point et rejoindre l'aquifère qui alimente le captage. Les pollutions dans cette zone, même si elles sont diffuses, sont néfastes pour la qualité du captage.

Sous-zone 2 [Zone de surveillance moyenne] : la bande de schistes située au sud de la sous-zone 1. Les eaux de ruissellement rejoignent des ruisseaux de surface qui, au contact du Calcaire Carbonifère supérieur, peuvent en partie s'infiltrer dans le sous-sol et rejoindre la nappe alimentant le captage. Un contrôle des eaux de surface à leur entrée sur le calcaire ainsi que le repérage des points de perte diffus dans le lit du ruisseau du Féron en amont du captage, sont les mesures principales à prendre.

Sous-zone 3 [Zone de surveillance étendue] : ensemble des calcaires au nord de la barrière des schistes du Pont d'Arcole. Le traçage réalisé en décembre 1997 a permis de démontrer qu'en période d'étiage, il n'y avait pas de circulation d'eau souterraine entre cette zone et l'aquifère qui alimente le captage. Une contamination indirecte reste toutefois possible par débordement souterrain de la nappe (à vérifier en période de crue) ou via les eaux de surface.

CONCLUSION

Le multitraçage réalisé à Hastière avait pour objectif d'étudier les circulations d'eaux souterraines de l'entité et de définir la provenance des eaux des différents exutoires du système hydrogéologique des vallons du Féron et du Tahaux. Les injections de traceurs ont été réalisées dans des chantoires afin d'étudier l'écoulement souterrain suivant les drains karstiques.

Cette étude a démontré qu'en région karstique, et malgré une période de basses eaux peu favorable aux écoulements rapides, des distances de plus de 3,5 km ont été franchies par l'écoulement souterrain en huit jours. De telles circulations impliquent une attention particulière pour la protection des eaux ainsi qu'un suivi de l'état des lieux des sites karstiques (Lemaire et Collette, 1994).

Concernant le captage communal de la route d'Anthée [CAPT]

- il n'y a pas de relation avec les circulations karstiques du vallon du Féron (absence de relation démontrée par traçage);
- le captage draine les calcaires de la formation de Hastière (Hastarien). Cette bande est étroite (150 m en moyenne), mais elle s'étire jusqu'à Morville et peut donc emmagasiner une partie des eaux de ruissellement du versant d'Inzémont;
- la présence d'une bande de schistes (schistes du Pont d'Arcole) ne permet pas aux eaux venant du vallon karstique du Féron de rejoindre l'aquifère alimentant le captage, du moins par la voie souterraine;
- le bassin d'alimentation (zone de surveillance) peut être divisé en 3 sous-zones en fonction du risque de contamination \pm directe.

Il est souhaitable, pour maintenir la qualité des eaux du

captage, que soit renforcée la surveillance en priorité au sud de la bande des schistes du Pont d'Arcole et, en particulier, au niveau des calcaires de la formation de Hastière.

Concernant le captage du camping Eden-Haute Meuse [CAMP]

Les traçages ont montré que ce captage était à la fois en relation avec le chantoire de Frumont (recevant les rejets de la station d'épuration d'Onhaye) et avec les égouts dont les eaux sont déversées dans le chantoire de Miavoie. Ces observations confirment et expliquent la mauvaise qualité de l'eau du captage mise en évidence par les analyses.

Il est urgent que ces eaux soient traitées correctement avant d'être distribuées et qu'un contrôle plus fréquent et rigoureux en soit assuré pour éviter les risques de contamination pour l'homme.

Concernant le comportement général de l'aquifère karstique à Hastière

Les traçages ont montré une différence de comportement entre le système du Féron et celui du Tahaux. Le système du Tahaux semble posséder de plus grandes réserves et, par conséquent aussi, une plus grande inertie que celui du Féron.

L'étude a été réalisée en période d'étiage. Afin de délimiter avec plus de précision la zone de surveillance et les zones de protection autour des captages, il serait recommandable de reproduire le même multitraçage en période de crue.

La présente étude démontre, en tout cas, que la technique du traçage permet de rassembler de très nombreuses informations sur les circulations d'eau souterraine et sur les aquifères qui alimentent les captages en zone karstique. Le recours à cette technique permet notamment de définir scientifiquement, au sein d'un bassin hydrographique, les zones en relation avec le captage en vue d'y concentrer les efforts de surveillance à même d'assurer le maintien de la qualité des eaux souterraines.

REMERCIEMENTS

Ce travail a reçu l'appui généreux et efficace de la Région wallonne, qui l'a commandé, et pour le compte de laquelle il a été réalisé; les communes de Hastière et Onhaye, sur le territoire desquelles il a été effectué, l'ont activement favorisé et ont collaboré à sa mise en oeuvre.

Nous devons une reconnaissance particulière, à la Région wallonne, à Madame Lemaire et à Messieurs Orban, Masset, et à la Direction des Eaux souterraines ainsi qu'à Monsieur Minguet, éco-conseiller de la commune de Hastière. Nous remercions aussi l'INASEP, et particulièrement Monsieur l'Ingénieur Bourlon et les agents techniques de l'Intercommunale, de même que Mes-

sieurs Henri et Cléda de l'Intercommunale des Eaux de la Molignée. Merci aussi à Monsieur Pêcheur, des Eaux et Forêts, pour son aide experte et efficace.

À l'Université de Liège, notre gratitude va en particulier au Professeur François Petit du Département de Géographie physique et à ses étudiants qui ont assuré les mesures de débit dans les cours d'eau, au Doyen Claude Houssier, qui nous a gracieusement prêté le spectrofluorimètre et à Mademoiselle Annick Jaspar-Herbillon, qui a réalisé la difficile cartographie numérique de nos travaux.

Une telle étude n'aurait évidemment pas été possible sans la participation et l'engagement ferme de toute une équipe sur le terrain. Merci donc à notre ami Roger Vandenvinne, aux équipes spéléo du SCALP, de l'ASAG et du CASHB et aux étudiants de la Faculté agronomique de Gembloux pour leur aide en campagne.

Nous devons à Jean Grimbérieux et à Adrien Laurant une relecture minutieuse qui a permis de supprimer nombre d'imprécisions et de fautes dans le texte original et de le rendre plus lisible.

Last but not least, notre reconnaissance à Rachel Featherstone pour avoir amélioré notre English Abstract.

BIBLIOGRAPHIE

- BONMARIAGE R., SPEELEERS O., VAN CAILLIE D. & VERRUE V., 1998. *La problématique de l'eau en région calcaire; cas particulier de la commune de Hastière*, Faculté universitaire des Sciences agronomiques - travail d'écologie, Gembloux, inédit, 96 p.
- DELGAMBRE B. & PINGOT J.L., 1993. *Carte géologique de Wallonie 53/7-8, Hastière-Dinant*, Ministère de la Région wallonne.
- DUPONT E. & MOURLON M., 1883. *Explication de la feuille de Dinant*, Bulletin du Musée Royal d'Histoire

Naturelle de Belgique, 2 p.

- LEMAIRE J.M. & COLLETTE P., 1994. *Prévention des risques de pollution. Rapport définitif du programme d'étude réalisé dans l'entité de Hastière*, Rapport de la Fondation Gouverneur René Close, 70 p., inédit.
- LIÉGEOIS J.P., 1996. *La Fontaine de Tahaux et la grotte de Tahaux*, Centre d'activités spéléologiques - Hornu - Borinage. *Vadose*, 4, 42 p.
- MEUS P., 1995. Quelques aspects de la mise en oeuvre et de l'interprétation des traçages pour la protection des eaux karstiques. *Atlas du Karst Wallon. Province de Hainaut, partie orientale*, Commission wallonne d'Etude et de Protection des Sites souterrains, 37-46.
- MEUS P. & EK C., 1999. Tracing technique as a contribution to karstology experiences, new directions, *Contribution del Estudio científico de las cavidades karsticas al conocimiento geológico*, Nerja, 425-440.
- THYS G., 1999. *Atlas du Karst Wallon, Haute Meuse. Province de Namur*, Commission wallonne d'Etude et de Protection des Sites souterrains, 542 p.
- VAN DEN BROECK E., MARTEL E. & RAHIR E., 1910. *Les Cavernes et les Rivières souterraines de la Belgique*, 2 tomes, 1592 +92+LXVI p., Bruxelles.

Adresses des auteurs :

Georges MICHEL et Georges THYS
CWEPESS
21, av. Rodin
B — 1050 Bruxelles

Philippe MEUS
GEOLOGICA SA
Parc scientifique de la Province de Namur
Rue Phocas Lejeune, 4
B — 5032 Gembloux

Camille EK
Département de Géographie physique
Université de Liège
Sart Tilman, B 11
B — 4000 Liège