

LES SOURCES DE LA VILLE DE LUXEMBOURG : UNE RESSOURCE EN EAU POTABLE A PRÉSERVER. 1. ASPECTS QUANTITATIFS ET PHYSICO-CHIMIQUES

LAURENT GOURDOL¹, GERARD ZIMMER², NICO PUNDEL²,
LUCIEN HOFFMANN¹, LAURENT PFISTER¹

¹Centre de Recherche Public - Gabriel Lippmann, Département Environnement et
Agro-Biotechnologies, 41, rue du Brill, L-4422 Belvaux,
Grand-Duché de Luxembourg, e-mail : gourdol@lippmann.lu

²Ville de Luxembourg, Service des Eaux, 338, rue de Rollingergrund,
L-2442 Luxembourg, Grand-Duché de Luxembourg

Résumé: A la source de toutes les activités humaines, les eaux souterraines représentent un enjeu majeur pour l'avenir. Essentielles pour l'eau potable, l'irrigation agricole, les activités industrielles ou le thermalisme, elles doivent être protégées. En vue de leur préservation, la mise en place d'un suivi quantitatif et qualitatif est une première étape incontournable pour mieux les comprendre et par la suite mieux les gérer. Le Grès de Luxembourg constitue de par son extension et ses propriétés, une unité hydrogéologique particulière : il forme un aquifère d'importance nationale, largement exploité pour l'alimentation en eau potable de la population luxembourgeoise. Cette ressource stratégique en eau souterraine, bien que moins exposée que les eaux superficielles aux diverses pollutions anthropiques en provenance de la surface, et moins sensible à la variabilité des apports pluviométriques, ne doit pas être considérée comme exempte de toute menace : une notion de double vulnérabilité, quantitative et qualitative, lui est associée. Cet article illustre ce fait par le cas d'étude des captages d'eau potable exploités par la Ville de Luxembourg.

Mots-clés: sources, eau potable, vulnérabilité, aquifère, Grès de Luxembourg.

Abstract: Being a major element in human activities, groundwater bodies are a major issue in the mean futures. Being essential for drinking water, irrigation, industrial activities or thermalism, groundwater needs protection. In this respect, the implementation of a quantitative and qualitative survey is an essential first step towards a better comprehension and management of groundwater bodies. Because of its extension and properties, Luxembourg Sandstone forms a particular hydrogeological unit : it is an aquifer of national interest, intensively used for the production of drinking water. This strategic groundwater resource, even though it is less exposed to anthropogenic pollutions than surface waters and less sensitive to the variability of rainfall, must not be considered as being free from quantitative and qualitative vulnerability. This article illustrates the case study of the drinking water supply system of the city of Luxembourg.

Keywords: springs, drinking water, vulnerability, aquifer, Luxembourg sandstone

INTRODUCTION

L'aquifère du Grès de Luxembourg constitue la première source d'approvisionnement en eau potable de la Ville de Luxembourg. Débitant quelques dizaines de milliers de mètres cubes d'eau par jour, les sources du réseau d'alimentation en eau potable de la Ville de Luxembourg qui drainent cet aquifère sont aujourd'hui doublement

menacées. Les eaux des sources sont en effet contaminées par divers types de pollutions aux origines diverses. La variabilité des apports pluviométriques est aussi une menace, elle pèse sur la pérennité d'un débit suffisant des sources.

Afin de mieux gérer les aléas qui guettent l'aquifère du Grès de Luxembourg, la Ville de Luxembourg a cherché à mettre en place un dispositif de veille et de gestion à la fois qualitative et quantitative des eaux du Grès de Luxembourg. Le CRP - Gabriel Lippmann, dont les infrastructures du département Environnement et Agro-Biotechnologies (EVA) sont adaptées à la résolution de ce type de problématique environnementale, s'est vu confier cette mission.

L'approche suivie dans cette étude s'est articulée autour de deux axes majeurs. L'évaluation de l'état actuel de la ressource est passée par un encodage et un contrôle de plausibilité systématique des données historiques. Ainsi, les données débitométriques, tout comme les résultats des analyses physico-chimiques et bactériologiques réalisées depuis la fin des années 1970 ont été saisis sur support informatique. Un programme de suivi très rapproché a été mis en place depuis novembre 2004 jusqu'en décembre 2005. Toutes les semaines, les 71 sources du réseau d'approvisionnement de la Ville de Luxembourg ont fait l'objet de mesures de débit et de prélèvements d'échantillons d'eau permettant ainsi la constitution de chroniques débitométriques à raison de trois mesures par mois et, physico-chimiques et microbiologiques au pas de temps mensuel (le volet « Microbiologie » ne sera pas traité dans cet article).

Après une description du Grès de Luxembourg et de ses propriétés hydrodynamiques associées et du contexte d'émergence des sources de la Ville de Luxembourg, le présent article s'attache à présenter les principaux résultats obtenus par l'analyse des données historiques recueillies et acquises dans le cadre de cette étude. Trois aspects sont abordés et sont exposés en trois parties distinctes à savoir : quantité, qualité et vulnérabilité des sources de la Ville de Luxembourg.

L'intérêt de cette étude ne réside pas dans la nouveauté des méthodes employées, toutes sont exploitées en routine. Cependant, il nous a paru intéressant de rappeler par cet exposé que, bien que les ressources en eau souterraine soient moins exposées que les eaux superficielles aux diverses pollutions anthropiques en provenance de la surface et moins sensibles à la variabilité des apports pluviométriques, une notion de double vulnérabilité, quantitative et qualitative, leur est indubitablement associée. Afin de préserver ces ressources, la mise en place d'un suivi quantitatif et qualitatif est une première étape incontournable pour mieux les comprendre et par la suite mieux les gérer.

Le Grès de Luxembourg : un réservoir d'eau souterraine

Le Grès de Luxembourg est une formation sableuse intercalée dans le faciès marneux et calcaireux normal du Lias (faciès lorrain) et n'occupe pas partout le même niveau stratigraphique. Sur l'ensemble du territoire luxembourgeois, il couvre les étages de

l'Hettangien supérieur et une partie du Sinémurien inférieur (LUCIUS 1948).

Le Grès de Luxembourg se présente lithologiquement comme un grès formé de grains de quartz (silice SiO_2) agglomérés par un ciment calcaireux (carbonate de calcium CaCO_3). Sa composition chimique moyenne est d'environ 65% de SiO_2 et 35% de CaCO_3 . La part respective de ces deux composants varie entre deux pôles (COLBACH 2005) : grès faiblement cimentés (10-20% de CaCO_3 , 90-80% de SiO_2) et grès fortement cimentés (30-60% de CaCO_3 , 70-40% de SiO_2). Le Grès de Luxembourg contient également un peu de fer hydraté ou sulfureux accessoire (LUCIUS 1948). Il est de couleur gris-bleu à l'état non altéré, couleur attribuée aux cristaux de fer sulfureux (pyrite FeS_2) finement disséminés dans la matrice rocheuse. Exposé à l'érosion, il y a altération de la pyrite et la couleur de la roche varie de gris-jaune jusqu'à rougeâtre (LUCIUS 1948).

Le Grès de Luxembourg est très fissuré. Il est divisé par des plans de stratification dus à de minces intercalations de marnes ou même à un changement brusque dans la composition lithologique (absence ou diminution du ciment calcaireux ; LUCIUS 1948). Dans le plan vertical il est divisé par un système de fractures qui se coupent sous des angles assez variables. Les fractures de ce réseau ont des directions principales NO et NE, et peuvent être divisées en deux catégories (COLBACH 2005). Verticalement discontinues, relativement courtes, souvent limitées à un seul banc, avec un espacement décamétrique, la densité de fractures de 1^{ère} catégorie augmente avec la teneur en ciment calcaireux. Cette catégorie de fractures est liée aux faciès alternant des niveaux lithologiquement résistants (forte teneur en ciment calcaire) avec des niveaux plus sableux (faible teneur en ciment calcaire), car cette rigidité contradictoire entraîne une intense fracturation des niveaux résistants. Les fractures de la 2^{ème} catégorie sont quant à elles des zones fracturées recoupant la formation entière avec un espacement de plusieurs mètres. Ces zones peuvent être formées à partir d'une érosion intensive ayant connecté plusieurs fractures fermées, mais aussi par une seule fracture ouverte principale de largeur maximum métrique.

Sous l'action de l'eau d'infiltration, avec le concours de l'acide carbonique, le ciment calcaireux du grès peut se dissoudre et le grès se change alors en sable meuble. Cette action à l'origine des sols sableux surmontant le Grès de Luxembourg se produit aussi en profondeur et cause l'élargissement des fractures du grès. Le sable résultant s'accumule en profondeur, entraîné par les eaux d'infiltration et par gravité.

Ainsi, de par sa nature lithologique et sa fracturation, le Grès de Luxembourg constitue un bon réservoir aquifère : sa fonction capacitive (stockage de l'eau) est assurée essentiellement par les pores du grès (porosité interstitielle) et sa fonction dynamique (transfert de l'eau) est quant à elle assurée principalement par le réseau de fractures et les zones fracturées. Le Grès de Luxembourg a une perméabilité essentiellement subhorizontale (circulation de l'eau au niveau des stratifications), mais une perméabilité verticale existe à la faveur des fractures. Les niveaux les plus perméables sont en fait les faciès alternant des niveaux lithologiquement résistants

(grès fortement cimentés) avec des niveaux plus sableux (grès faiblement cimentés), car l'intense fracturation des niveaux résistants ajoute à la perméabilité de milieu poreux une perméabilité de fissures (LEBAUT 2001). Les vitesses de circulation peuvent être localement élevées dans les fissures agrandies des roches consolidées (l'intense fracturation de ces formations et l'altération qui résulte de la circulation de l'eau augmentent à la fois la porosité et la perméabilité), servant de drains souterrains à l'ensemble, mais globalement, le rendement de l'aquifère est contrôlé par la perméabilité des bancs les plus sableux (LEBAUT 2001). On notera aussi que les sols sableux surmontant le Grès de Luxembourg et le sable accumulé dans les fissures du grès en profondeur, résultant tous deux de la dissolution du ciment calcaire, sont considérés comme un « filtre » de premier choix (LUCIUS 1940).

Compte-tenu de la forte dualité lithologique des assises considérées (couches plutôt sableuses et bancs consolidés, fracturation plus ou moins importante), il est difficile de définir l'aquifère du Grès de Luxembourg par des caractéristiques hydrodynamiques globales. Toutes les valeurs indiquées ci-après permettent de fixer quelques ordres de grandeur, mais il est évident que dans la réalité de terrain elles montrent une très grande variabilité.

La porosité du grès est étroitement liée à la teneur en ciment calcaire : elle peut varier de 5% (grès fortement cimenté) à 35% (grès faiblement cimenté). La porosité efficace moyenne de l'aquifère du Grès de Luxembourg est de l'ordre de 10% (9% liés aux pores et 1% aux volumes des fractures) et sa perméabilité moyenne d'environ 5.10^{-5} m/s. Les vitesses d'écoulement sont variables en fonction du degré de fracturation : de moins de 1 m/h pour les zones saines à parfois plus de 100 m/h pour les zones intensément fracturées (HÖTZL *et al.* 1993, GRONEMEIER 1976a,b, VON HOYER 1971, COLBACH 2005).

Le secteur d'étude : contexte hydrogéologique et émergence des sources de la Ville de Luxembourg

71 captages font partie du réseau d'alimentation en eau potable de la Ville de Luxembourg, tous drainent des eaux provenant de l'aquifère du Grès de Luxembourg et sont situés à moins de 10 kilomètres de la commune. Ils peuvent être regroupés en 6 secteurs principaux hydrogéologiquement distincts, chacun trouvant une réponse dans la lithologie et la tectonique de notre zone d'étude. Comme nous le montre la Figure 1, il s'agit des secteurs des sources de Kopstal en rive droite et rive gauche de la Mamer, Siweburen et Millebach, Glasburen et Dommeldange, Birelergrund et du captage de Pulvermuhl.

Comme l'ensemble du Gutland, notre zone d'étude présente à l'affleurement des couches d'âge mésozoïque qui plongent vers le SO en raison du pendage général vers le centre du bassin parisien. Au SO de la ligne Mamer/Bonnevoie, le Grès de Luxembourg est sous couverture des formations mésozoïques plus récentes en

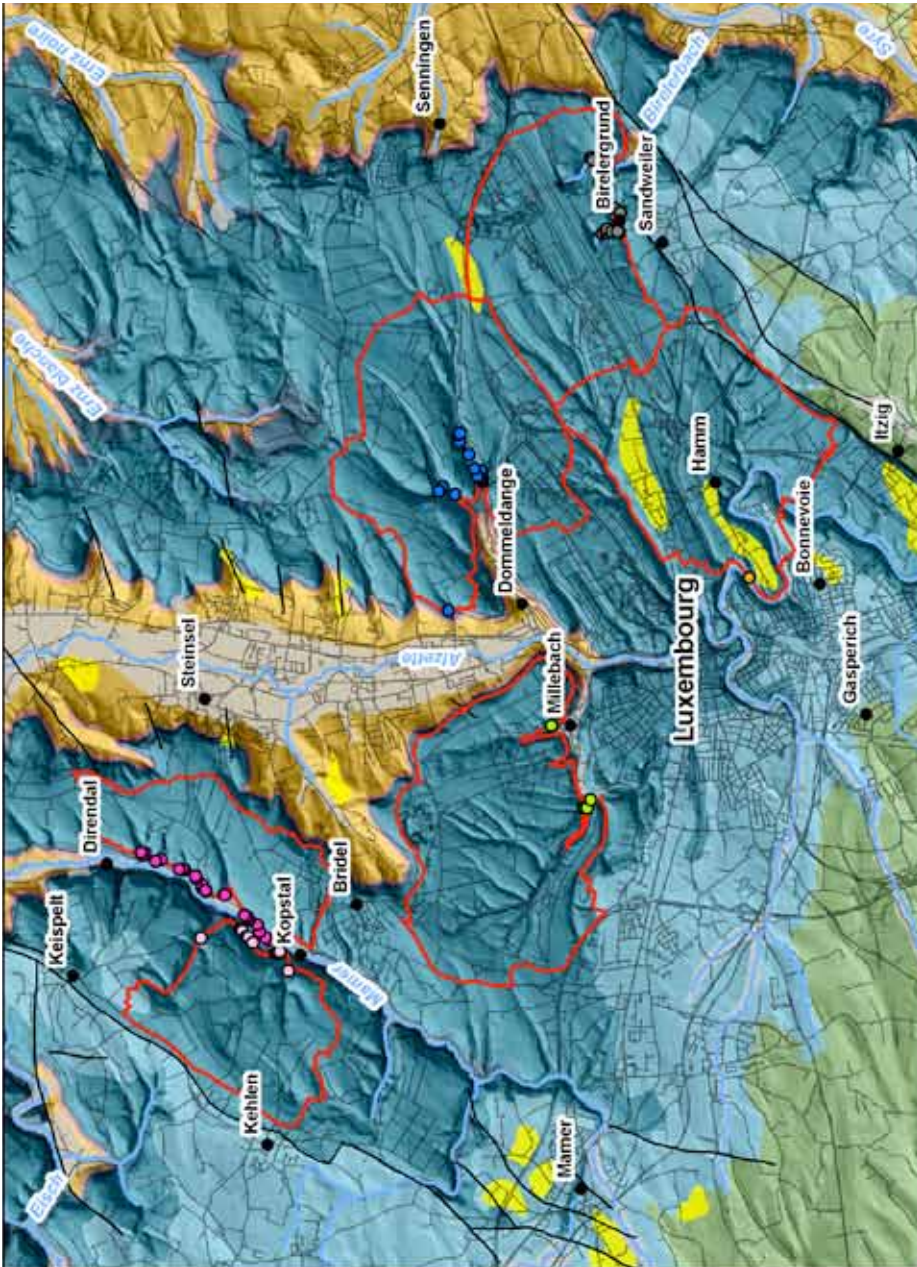
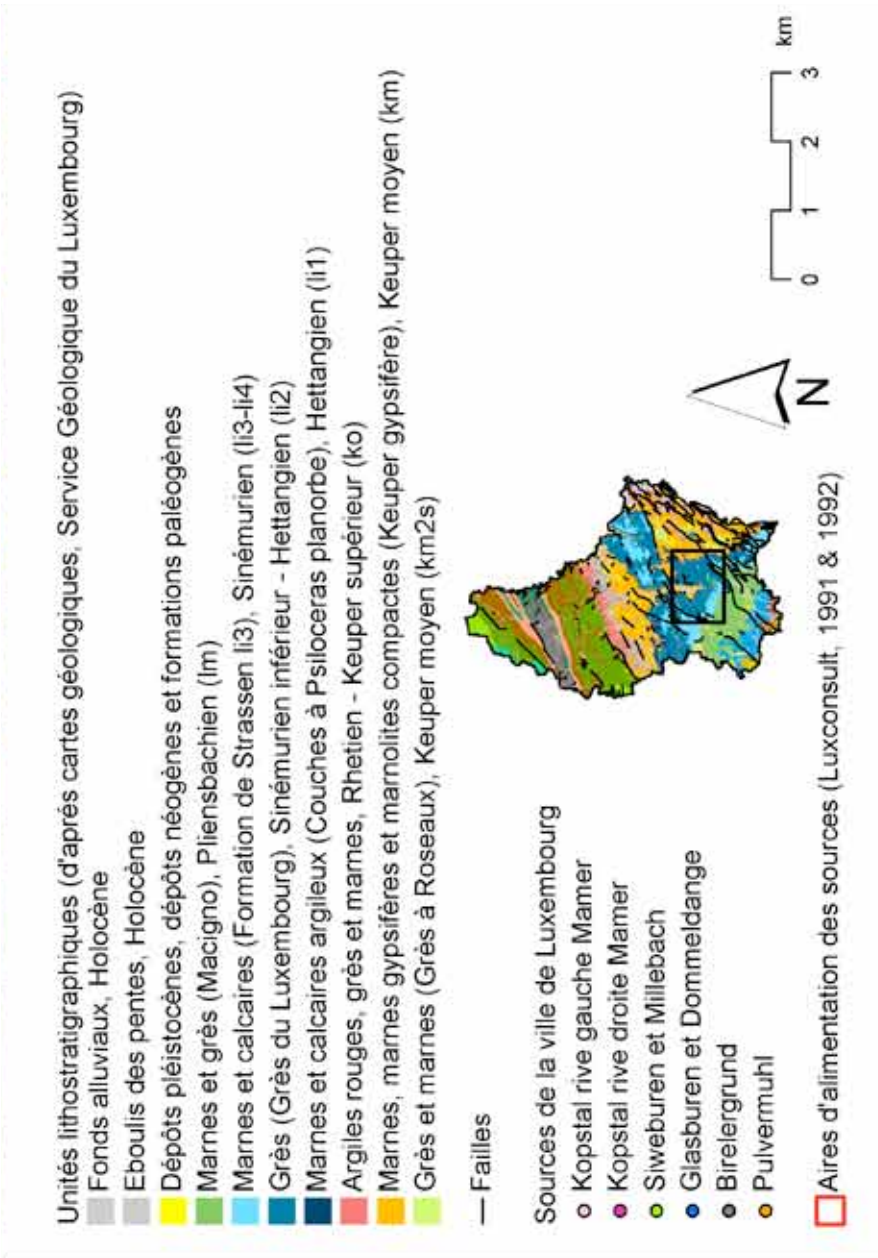


Fig. 1. Contexte hydrogéologique et émergence des sources de la Ville de Luxembourg.



Comme l'ensemble du Gutland, notre zone d'étude présente à l'affleurement des couches d'âge mésozoïque qui plongent vers le SO en raison du pendage général vers le centre du bassin parisien. Au SO de la ligne Mamer/Bonnevoie, le Grès de Luxembourg est sous couverture des formations mésozoïques plus récentes en majorité imperméables (li3, li4, lm) ; au NE de cette même ligne, il se retrouve à l'affleurement. Dans cette dernière zone, les vallées les plus profondes (Eisch, Mamer, Alzette, deux Ernzy, Syre, Birelerbach...) entaillent le Grès de Luxembourg jusqu'à sa base, mettant à jour les couches mésozoïques sous-jacentes plus anciennes et imperméables (li1 à km).

Le Grès de Luxembourg se retrouve ainsi en position perchée sur des formations imperméables au NE de la ligne Mamer/Bonnevoie. C'est dans ce secteur que la nappe du Grès de Luxembourg est alimentée par les précipitations. Ces eaux météoriques, après s'être infiltrées verticalement par gravité depuis la surface affleurante du grès, sont arrêtées dans leur descente par la première couche imperméable sous-jacente qui constitue le mur de l'aquifère (couche à *Psiloceras planorbe*, li1) et cheminent sur celle-ci en fonction de sa topographie. Une partie de ces eaux infiltrées s'écoule globalement vers le SO en raison du pendage général, alimentant la partie captive de la nappe (mise en captivité vers le SO de ligne Mamer/Bonnevoie) ; l'autre partie quitte le réservoir gréseux, drainée par les nombreuses sources émergeant au niveau de la ligne de contact entre le Grès et son mur à la faveur d'une tectonique locale favorable (LUCIUS 1949).

En effet la tectonique joue un rôle d'une importance fondamentale dans la localisation des sources du Grès de Luxembourg. Rappelons que les lignes de failles sont, surtout si elles mettent en contact un bloc aquifère et un bloc imperméable, des secteurs de sources préférentiels, sans oublier l'effet de basculement des couches résultant souvent du jeu d'une faille. De même les axes synclinaux sont des zones de concentration des eaux.

Notre secteur n'est dans l'ensemble que peu perturbé par la tectonique cassante. Deux failles normales majeures peuvent être soulevées. De direction SSO-NNE, elles passent pour la première par Keispelt et Kehlen et pour la seconde par Itzig et Sandweiler. Celles-ci délimitent un compartiment central affaissé entre deux compartiments restés plus hauts (coins NO et SE). C'est dans le compartiment central soulevé que se situent les captages de la Ville de Luxembourg. Les autres failles affectant notre secteur d'étude, en raison de leur faible extension et rejet, n'ont qu'une importance mineure. Par contre il faut insister sur la tectonique plissante hydrogéologiquement plus importante dans le cas des sources de la Ville de Luxembourg (LUCIUS 1940) :

⇒ Les sources du secteur de Kopstal résultent d'un synclinal axé dans la vallée supérieure de la Mamer. Ce dernier est bordé à l'Ouest par la faille SSO-NNE Keispelt/Kehlen et à l'Est par un relèvement des couches géologiques au niveau du secteur Bridel - Steinsel. Cette structure forme une cuvette dont le fond correspond au

synclinal précédemment cité, c'est-à-dire dans la vallée de la Mamer entre Mamer et Direndal, en passant par Kopstal. C'est au pied des deux pentes de cette vallée que les sources de Kopstal émergent, alimentées pour les sources en rive droite de la Mamer par les plateaux de l'Est, et pour les sources en rive gauche par les plateaux de l'Ouest.

⇒ Une inflexion bien marquée à Senningen et se prolongeant dans la direction E-O en direction de Dommeldange et Millebach crée une structure favorable (concentration des eaux souterraines dans cet axe synclinal) pour les sources des secteurs Glasburen/Dommeldange et Millebach/Siweburen.

⇒ Une autre ondulation synclinale s'amorce à Gasperich et passe par Bonnevoie, Hamm et Birelergrund. Dans la partie occidentale de l'inflexion, la ligne de contact de la base imperméable avec le grès porteur de la nappe aquifère n'affleure pas, mais des forages de fort débit démontrent l'abondance d'eau souterraine. C'est le cas du captage de Pulvermuhl (le captage Pulvermuhl n'est en effet pas une source mais correspond à un puit exploité par pompage). Dans la partie orientale, les vallées entaillées du Birelerbach permettent l'apparition des sources du secteur Birelergrund.

En raison d'une maigre densité de points d'observations piézométriques, les observations précises manquent pour permettre le tracé des lignes d'écoulement de la nappe du Grès de Luxembourg et donc pour déterminer avec précision les aires d'alimentations des sources du Grès de Luxembourg. Toutefois, le bureau d'études Luxconsult, en collaboration avec le Service Géologique et le Commissariat Général à la protection du Sol et des Eaux, a mené une approche de détermination de ces aires d'alimentation par bilan hydrologique en considérant une infiltration d'environ 30 % des eaux météoriques vers l'aquifère avec prise en compte des contextes géologique, tectonique et topographique (cf. Fig. 1 ; LUXCONSULT 1991 & 1992). Ces aires d'alimentation, bien qu'approximatives, semblent être une bonne représentation de la réalité.

Sensibilité de la ressource en eau souterraine à la variabilité des apports pluviométriques

L'alimentation du réservoir aquifère du Grès de Luxembourg est assurée par l'infiltration d'eau météorique. Une analyse des conditions climatiques est nécessaire pour rendre compte des évolutions de l'alimentation de l'aquifère et ainsi de celles observées au niveau des débits des sources.

En effet, les apports au système aquifère résultent de la balance hydrique mettant en jeu d'une part les précipitations brutes et d'autre part les prélèvements par évaporation physique et transpiration des végétaux. Le résultat positif de ce bilan, appelé pluie efficace, représente l'eau effectivement utile à l'écoulement libre soit directement, par écoulement rapide superficiel, soit indirectement, en transitant par les aquifères. Dans le cas des aires d'alimentation de l'aquifère du Grès de Luxembourg, considérer que les pluies efficaces s'infiltreront entièrement vers l'aquifère (c'est-à-dire négliger l'écoulement rapide superficiel) est une bonne approximation, les pentes

y étant majoritairement faibles (zone de plateau), les sols très perméables (fraction sableuse très importante) et le substratum gréseux perméable (porosité efficace et fracturation relativement élevées).

Une estimation de la recharge aquifère a ainsi été calculée par bilan hydrique. Le concept de ce dernier est le suivant : les précipitations arrivant sur la surface du sol transitent par le réservoir sol. Celui-ci stocke et redistribue l'eau en fonction de son état d'imbibition (R = réserve d'eau stockée) et de la demande climatique en eau (évapotranspiration potentielle = ETP) vers l'atmosphère, par évaporation physique ou transpiration par les végétaux, et sous forme d'infiltration à travers les couches plus profondes du sol jusqu'à la nappe d'eau souterraine. Le réservoir sol est caractérisé par une valeur seuil maximum au-delà de laquelle il ne peut plus contenir d'eau : c'est lorsque cette limite est dépassée et que la demande climatique est assurée que les eaux issues des précipitations s'infiltreront vers la nappe.

Pour ce calcul, les éléments suivants ont été retenus :

⇒ Station climatique de référence : Le régime climatique de notre secteur d'étude est relativement homogène, sa caractérisation à partir d'un seul poste de mesure fournit en première approche une image globale convenable. Deux conditions nous ont guidés dans le choix d'une station de référence. Il fallait une station qui soit à la fois en activité depuis suffisamment longtemps pour disposer de chroniques de mesures suffisamment longues, et localisée sur une zone du plateau du Grès de Luxembourg à une altitude moyenne, représentative d'un comportement global. La station météorologique du Findel répondait à ces conditions et a donc été retenue. Située sur le plateau du Grès de Luxembourg (altitude 376 m) à hauteur de l'aéroport, elle est en activité depuis la fin des années 1940 et dispose donc de chroniques au pas de temps journalier longues de plus de 50 ans.

⇒ R_{max} : La réserve maximum du sol a été fixée à 100 mm, valeur moyenne habituellement utilisée.

⇒ ETP : Sur la base de corrélations statistiques entre des variables complexes à mesurer et des variables couramment mesurées, comme la température par exemple, de nombreux chercheurs proposent des formules empiriques de l'ETP. De toutes ces formulations empiriques qui nécessitent plus ou moins de variables, il a été choisi celle de HAMON (HAMON 1961) qui permet l'estimation de l'ETP au pas de temps journalier par la simple mesure de la température moyenne journalière :

$$ETP_{Hamon} = \frac{2,1 \times DJ^2 \times e^{\left(\frac{17,23 \times T}{237,3 + T}\right)}}{273,3 + T}$$

avec :

DJ = durée du jour (provient d'une table, constante d'une année sur l'autre, exprimée en heures/jour)

T = température moyenne journalière de l'air (°C).

La recharge aquifère ainsi estimée est illustrée en Figure 2. Une analyse fréquentielle des pluies efficaces par la méthode des quintiles y a été ajoutée : les cumuls des précipitations efficaces mensuels et annuels des 50 dernières années (1956-2005) ont été classés dans un ordre croissant puis partagé en 5 « quintiles » de 10 relevés annuels chacun. Cette analyse nous a permis de juger la variabilité climatique régnant sur les aires d'alimentation du Grès de Luxembourg en terme de recharge aquifère. Des situations de recharge aquifère très faibles, faibles, normales, fortes et très fortes ont pu être définies.

Les faits les plus importants qui ressortent de cette analyse sont caractéristiques des climats tempérés.

En moyenne, les précipitations efficaces suivent un cycle intra-annuel avec des valeurs maximales pendant la saison hivernale et minimale durant les mois d'été. Ce sont donc essentiellement les pluies de novembre à mars qui contribuent au renouvellement de la ressource en eau souterraine.

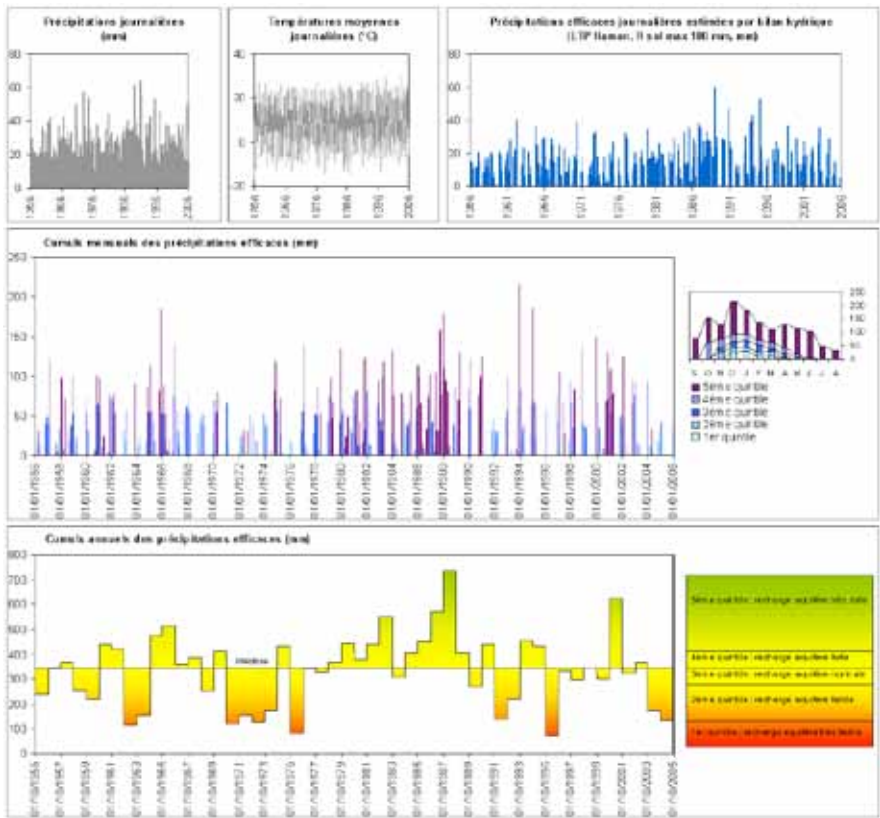


Fig. 2. Estimation de la recharge aquifère à Findel.

Bien que la différence des hauteurs de pluie efficaces soit bien marquée entre les saisons, les variations interannuelles des hauteurs pluviométriques efficaces pour une même période de l'année sont souvent extrêmes et entraînent des cumuls de pluies efficaces annuelles, donc des situations de recharge aquifère, très différentes d'une année à l'autre.

Dans ce contexte de forte variabilité climatique, un hiver « sec » (s'il n'y a pour ainsi dire pas ou peu de recharge aquifère) peut potentiellement engendrer une période de « sécheresse de nappe ». Cependant, certaines ressources sont plus sensibles que d'autres à la variabilité des apports pluviométriques. En effet, toutes les nappes n'ont pas la même sensibilité à la sécheresse, certaines baissent rapidement alors que d'autres mettent plusieurs années avant que le déficit ne devienne critique. Dans certaines régions, le manque d'eau peut-être catastrophique alors que dans d'autres, les nappes à forte inertie et forte capacité garantissent une bonne disponibilité en eau. Qu'en est-il pour l'aquifère du Grès de Luxembourg ?

Afin d'évaluer la vulnérabilité à la variabilité des apports pluviométriques des portions aquifères drainées par les sources de la Ville de Luxembourg, une étude du régime des sources a été entreprise. En effet, le régime des sources, c'est-à-dire de variation de leur débit, est très lié aux régimes des variations de niveau des nappes d'eau souterraine dont les sources sont les exutoires. « Réponse » de tout un aquifère, ou d'une partie d'aquifère, à ses variations de réserve, le régime d'une source a une signification plus globale que le régime d'une nappe en un point donné.

A partir des mesures ponctuelles de débits effectuées par les services techniques de la commune à une fréquence mensuelle sur la période 1997-2004 et par le CRP – Gabriel Lippmann à raison de trois mesures par mois pendant la période 2004-2005, il a été reconstruit par interpolation linéaire entre chaque débit calculé disponible une chronique journalière par source (Le captage Pulvermuhl, qui n'est pas une source, n'a pas été traité). Afin d'avoir une vision spatialisée par zone d'alimentation, les chroniques journalières des sources ont été cumulées par secteur. Une chronique globale, cumul débitmétrique de l'ensemble des sources, a aussi été calculée. Celles-ci sont présentées en Figure 3.

Pour illustrer la notion de sensibilité de la ressource à la variabilité des apports pluviométriques, il a été ajouté à cette figure les moyennes mobiles annuelles de chaque chronique et les cumuls mensuels et annuels des précipitations efficaces estimées à la station météorologique Findel.

La comparaison des chroniques débitmétriques avec leur moyenne mobile annuelle permet de juger de la stabilité quantitative saisonnière de la ressource en eau souterraine. Avec des écarts moyens et maximums par rapport à leur moyenne mobile inférieurs respectivement à 5 et 18%, les débits des sources des secteurs Kopstal rive gauche Mamer, Kopstal rive droite Mamer et Siweburen/Millebach permettent de

fournir des volumes d’eau relativement constants à l’échelle annuelle. La constance des volumes d’eau fournis par le secteur Glasburen/Dommeldange est moins nette avec des écarts moyen et maximum respectivement de 7 et 32%. Le secteur Birelergrund est quant à lui le moins stable. En effet, ce dernier est assujéti chaque année à une sécheresse estivale aquifère prononcée, comme nous le montre la forte corrélation entre le débit que ce secteur fournit et les précipitations efficaces mensuelles. Les écarts moyen et maximum par rapport à sa moyenne mobile sont respectivement de 12 et 46%.

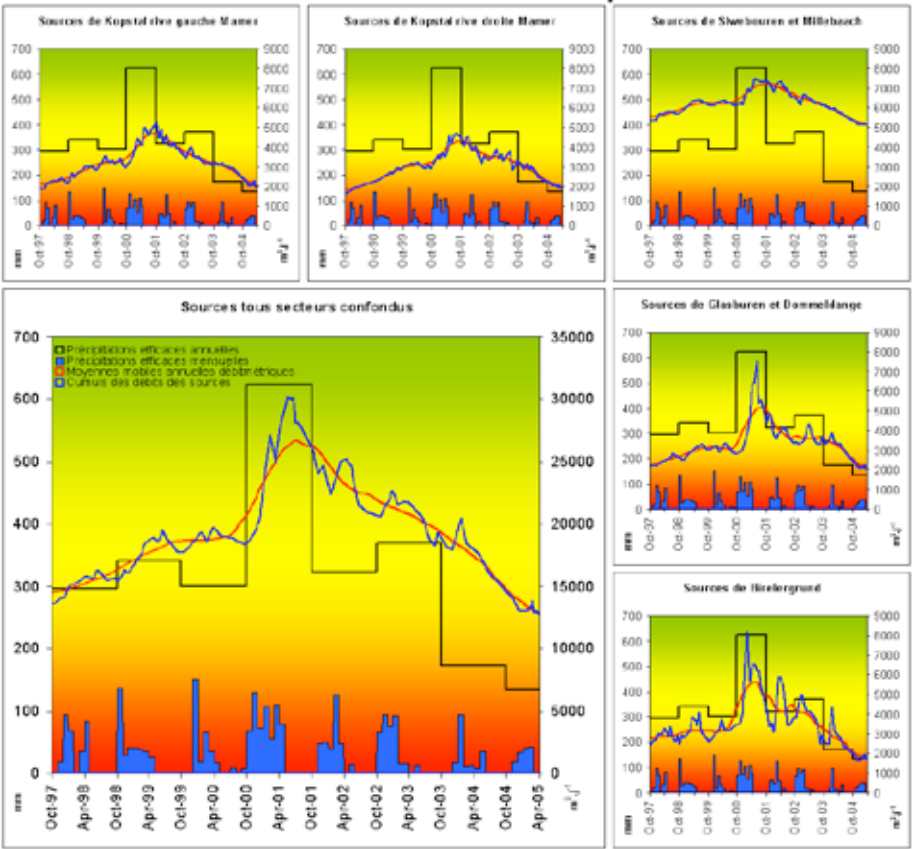


Fig. 3. « Débits des sources de la Ville de Luxembourg » VS « Précipitations efficaces estimées à Findel ».

Dans son ensemble la ressource aquifère exploitée par la commune de Luxembourg s'avère être suffisamment capacitive pour palier au déficit estival de précipitations efficaces (sources tous secteurs confondus, écarts moyen et maximum respectivement de 4 et 13%). Elle permet ainsi de fournir des volumes d'eau potable relativement stables d'un mois sur l'autre. Cependant, l'analyse couplée Précipitations efficaces annuelles / Débit nous permet de constater que l'effet « mémoire » de l'aquifère du Grès de Luxembourg reste tout de même limité. En effet, lors de sécheresses successives, les portions aquifères sollicitées ne garantissent pas une bonne disponibilité en eau à l'échelle interannuelle. La situation actuelle extrêmement basse, résultant des hivers 2004, 2005 et 2006 relativement secs, en est un exemple incontestable.

Dans ce contexte, la ressource en eaux souterraines de la Ville de Luxembourg peut être qualifiée comme relativement « sensible à la variabilité des apports pluviométriques ».

Signature géochimique et incidence des activités humaines

Les eaux souterraines acquièrent leurs caractéristiques qualitatives à la traversée des différents compartiments du cycle de l'eau : atmosphère, sol, zone non saturée, aquifère noyé. La qualité des eaux souterraines est le résultat d'une acquisition naturelle de minéralisation (signature géochimique de l'aquifère) à laquelle se surajoutent divers apports anthropiques (pollution). Dans le cas d'une détérioration anthropique trop importante, l'eau ne sera plus considérée comme potable pour la consommation humaine. Pour vérifier si les caractéristiques qualitatives des eaux de captages de la Ville de Luxembourg sont « normales » pour des eaux souterraines provenant d'un réservoir de type « Grès à ciment calcaire » et conformes aux normes et indices de potabilité en vigueur au Luxembourg (règlement grand-ducal du 7 octobre 2002), une campagne de prélèvement a été réalisée à raison d'un échantillon d'eau par captage et par mois durant la période 2004-2005. Les 17 paramètres suivants ont été analysés : pH, conductivité, dureté totale, alcalinité, anions et cations majeurs (calcium Ca^{2+} , magnésium Mg^{2+} , sodium Na^+ , potassium K^+ , hydrogénocarbonates HCO_3^- , sulfates SO_4^{2-} , chlorures Cl^-), composés azotés (nitrates NO_3^- , nitrites NO_2^- , ammonium NH_4^+), composés phosphorés (orthophosphates PO_4^{3-}), composés siliceux (SiO_2). Les résultats d'analyses sont présentés en partie haute de la Figure 4, paramètre par paramètre, par leurs valeurs maximum, médiane, minimum et percentiles 5, 25, 75 et 95%.

A la vue de ces derniers, les eaux exploitées par la Ville de Luxembourg apparaissent comme globalement de bonne qualité. Les conductivités (à 20 °C), comprises entre 300 et 900 $\mu\text{S}/\text{cm}$, indiquent une minéralisation « moyenne accentuée » à « importante ». Fortement influencée par la dissolution du ciment calcaire du Grès de Luxembourg (carbonate de calcium CaCO_3), les ions dominants sont logiquement le calcium Ca^{2+} et les hydrogénocarbonates HCO_3^- (teneurs médianes respectivement de 112 et 245 mg/l), les pH sont supérieurs à 7, l'alcalinité et la dureté totale de l'eau

sont élevées et le faciès hydrochimique de toutes les eaux captées est « bicarbonaté – calcique » (cf. Fig. 4, diagramme de Piper réalisé à partir des concentrations médianes des ions majeurs des eaux de chaque captage). Les teneurs en sulfates varient globalement dans la gamme 40-60 mg/l, résultant certainement de l'oxydation des cristaux de pyrite (FeS_2) finement disséminés dans le grès. Des concentrations plus élevées sont tout de même observées (teneur maximum de 129 mg/l). Les teneurs en chlorures et sodium évoluent globalement dans les gammes 10-30 et 5-15 mg/l. Des concentrations plus élevées sont là aussi observées (valeurs maximums en chlorures et sodium de 102 et 52 mg/l). Certaines d'entre elles peuvent être attribuées au salage hivernal des routes (augmentations des teneurs pendant cette période pour certains captages). Les teneurs en potassium et magnésium sont faibles, respectivement de l'ordre de 1 et 2 mg/l. Les teneurs en silice sont de l'ordre de 7 mg/l. Avec des concentrations inférieures à 0.2 mg/l, aucune pollution par l'ammonium, les nitrites ou les orthophosphates n'est détectée (rejets domestiques, fuites de réseaux d'eaux usées, fumier/purin/lisier, engrais minéraux phosphatés et ammoniacaux, sites à forte contamination organique par exemple décharges d'ordures ménagères, certains rejets industriels...).

Tous les paramètres précédemment cités sont conformes à la signature géochimique attendue pour le Grès de Luxembourg et/ou répondent aux exigences du règlement grand-ducal du 7 octobre 2002 ($6.5 < \text{pH} < 9.5$, conductivité à $20^\circ\text{C} < 2500 \mu\text{S/cm}$, $\text{SO}_4^{2-} < 200 \text{ mg/l}$, $\text{NH}_4^+ < 0.5 \text{ mg/l}$, $\text{NO}_2^- < 0.5 \text{ mg/l}$, $\text{Na}^+ < 200 \text{ mg/l}$, $\text{Cl}^- < 250 \text{ mg/l}$). En revanche, les concentrations observées en nitrates méritent une plus grande attention.

Les nitrates dérivent du processus d'oxydation de l'azote organique, ammoniacal, des nitrites et des engrais chimiques. Les nitrates ne sont pas directement nuisibles pour l'organisme, c'est leur réduction en nitrite qui peut engendrer une toxicité. C'est notamment le cas pour les nourrissons où la formation de méthémoglobine provoque une cyanose. Le règlement grand-ducal exige une teneur maximale en nitrates de 50 mg/l pour les eaux destinées à la consommation humaine. Naturellement les nitrates sont présents à des taux bien plus faibles que la valeur paramétrique indiquée dans la norme. En effet, des teneurs plus hautes que 10 mg/l proviennent d'une influence anthropique (sauf cas très particulier) et indiquent généralement un travail du sol par une agriculture intensive. Une application d'engrais inadéquate, déphasée par rapport au besoin des plantes ou excessive, un réseau d'eaux usées non étanche, du jus de compost, des apports élevés d'oxydes d'azote et d'ammoniac à partir de l'air ou la fumure excessive de jardins, peuvent aussi entraîner une hausse des concentrations de nitrates dans les eaux souterraines. D'autres valeurs indicatrices sont couramment employées : la valeur guide de 25 mg/l indique une concentration considérée comme normale pour une eau destinée à la consommation humaine ; certains organismes utilisent fréquemment une autre valeur, dite valeur d'alerte, qui est fixée à 40 mg/l.

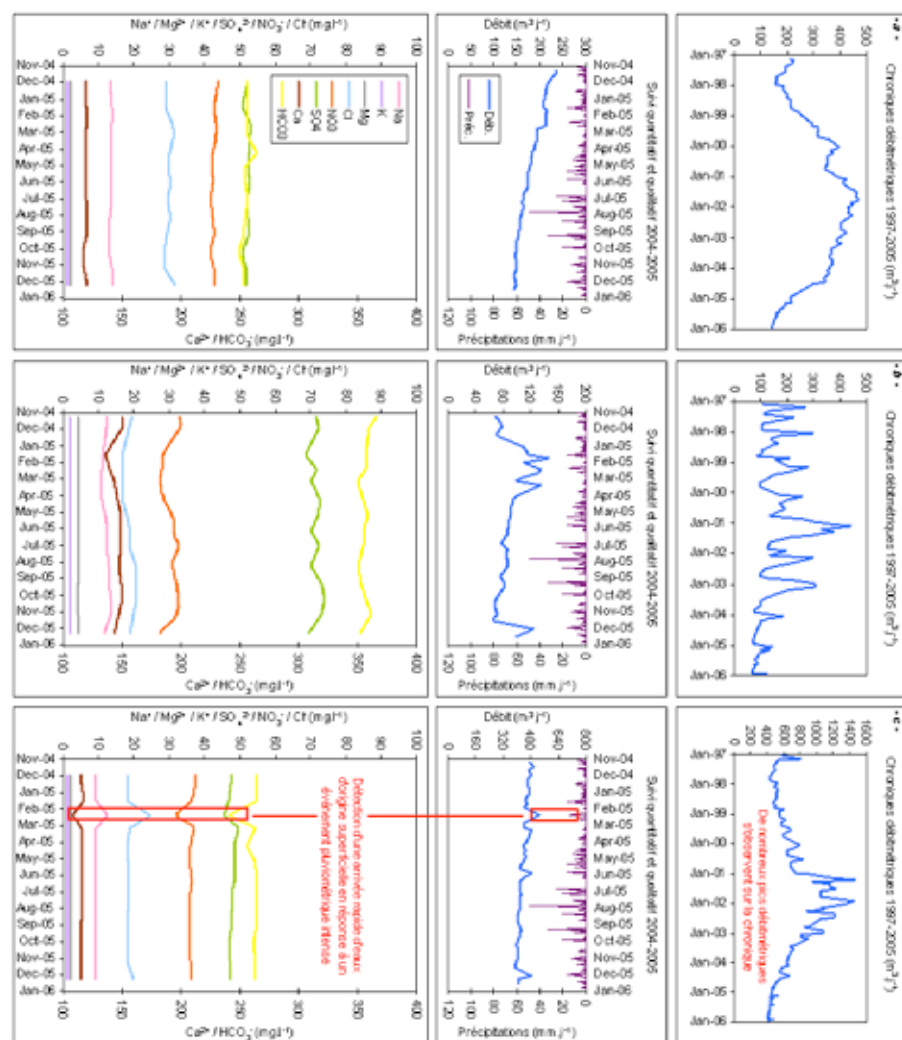


Fig. 6. Différents comportements hydrodynamiques et hydrochimiques observés.

Avec une teneur médiane de 32 mg/l et plus de 60% des analyses supérieures à 25 mg/l, l'état qualitatif 2004-2005 de la ressource en eaux souterraines de la Ville de Luxembourg peut être qualifiée de médiocre vis à vis du paramètre « Nitrates ». 44% des sources ont même dépassé au moins une fois au cours de cette période le seuil d'alerte de 40 mg/l et 11% le seuil de potabilité de 50 mg/l. Nous rappelons ici que les résultats concernent les captages eux-mêmes et en aucun cas l'eau distribuée au robinet du consommateur. En effet, certains captages avec des teneurs élevées en nitrates sont en production mais des dilutions avec l'eau de captages moins contaminés ou avec l'eau d'origine superficielle en provenance du SEBES (Syndicat des Eaux du Barrage d'Esch-sur-Sûre) permettent de rester sous les seuils critiques.

Les résultats des analyses relatifs aux nitrates sont illustrés, pour chaque source, par leurs valeurs médiane et maximale observées, en Figure 5. Les teneurs en nitrates sont variables d'un secteur aquifère à l'autre et des variations inter-secteur sont aussi notables. Ces différences sont en intime relation avec la surface occupée par les « Terres cultivées » de chacune des portions aquifères sollicitées. Pour confirmer ces doutes ainsi dessinés, une analyse couplée « Teneur en nitrates / Occupation agricole du sol » a été entreprise. Il ressort de celle-ci une corrélation nette entre la moyenne des concentrations médianes des sources d'un secteur aquifère considéré et le rapport surfacique qu'occupent les terres cultivées de ce même secteur par rapport à la surface totale de son aire d'alimentation. L'origine agricole de la pollution est confirmée.

Afin de préserver la qualité actuelle des eaux des sources de la Ville de Luxembourg et de l'améliorer dans le cas des secteurs les plus touchés, des mesures doivent être prises. Les possibilités de prévention de la pollution par les nitrates résident notamment dans une meilleure maîtrise de la fertilisation avec réadaptation de certaines techniques agricoles et dans la mise en place effective des périmètres de protection.

Vulnérabilité de la ressource aux pollutions anthropiques en provenance de la surface

L'écoulement des eaux souterraines entre leur zone d'infiltration et leur zone d'exutoire s'effectue par gravité. La vitesse d'écoulement des nappes d'eaux souterraines est déterminée par la perméabilité et la porosité du réservoir. On distingue généralement trois grands types d'aquifères en fonction des attributs physiques de ces derniers : les milieux poreux, les aquifères fissurés et les aquifères karstiques. Le transfert d'un même volume d'eau sur une distance de 1 km varie énormément en fonction de ces types de réservoirs aquifères et de leurs propriétés hydrodynamiques associées : d'une année ou plus en milieu poreux, de quelques mois en milieu fissuré à quelques jours voire quelques heures en milieu karstique.

L'aquifère du Grès de Luxembourg est un système aquifère assez complexe car composite de ces trois grands types de réservoirs. En effet, le Grès de Luxembourg est

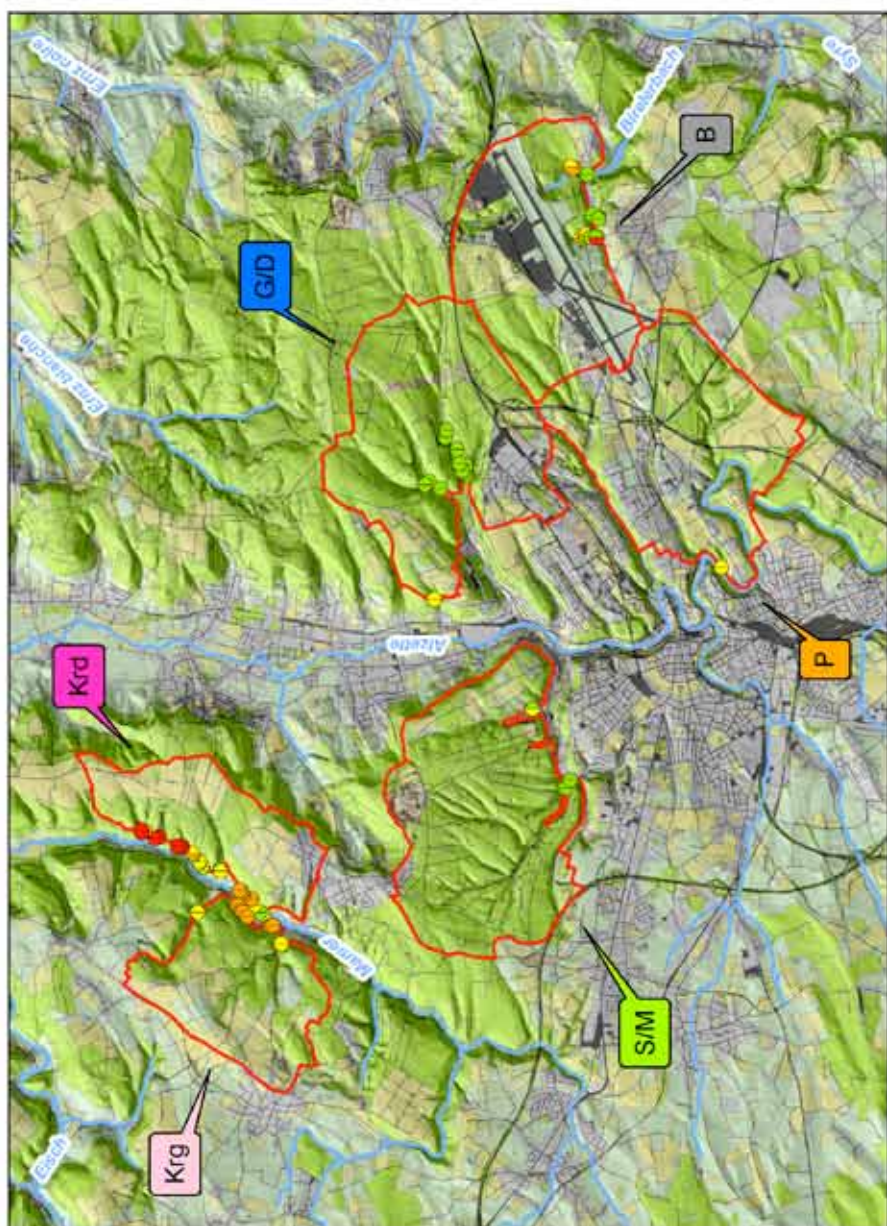
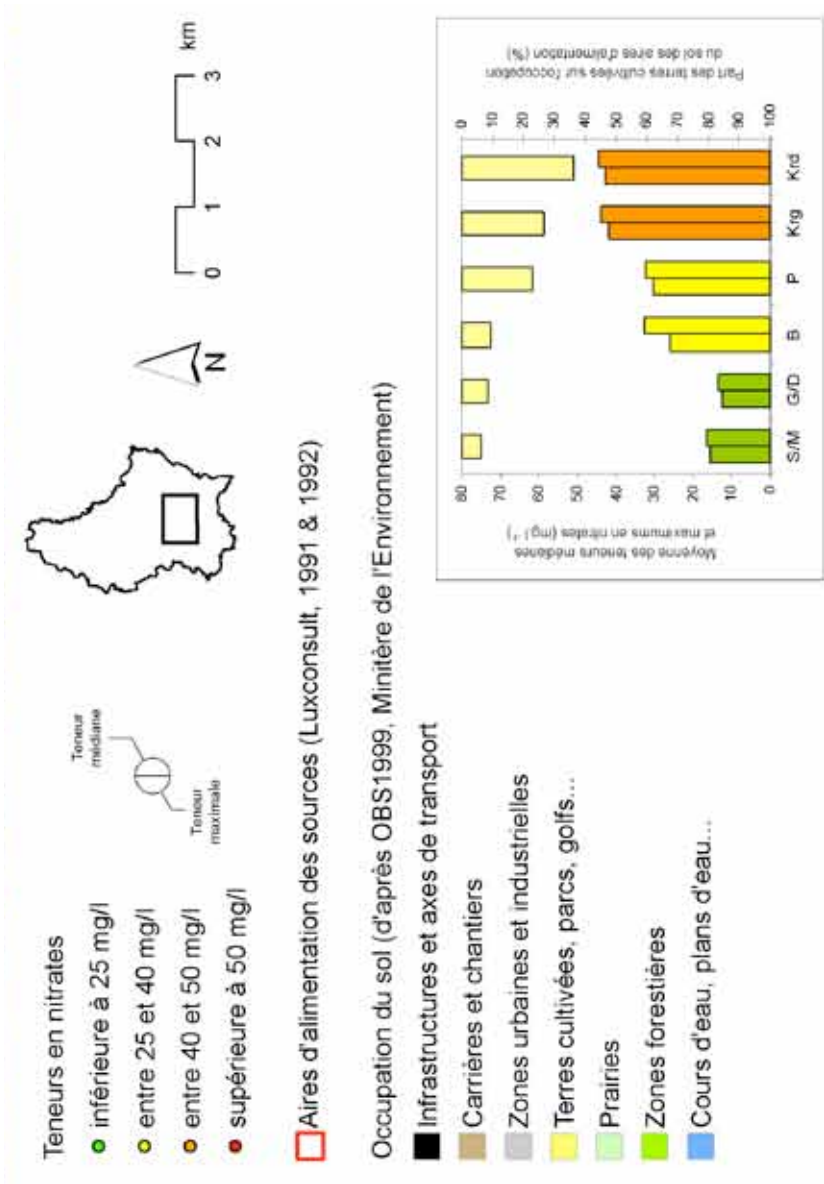


Fig. 5. « Teneurs en nitrates observées lors du suivi 2004-2005 » VS « Occupation agricole du sol ».



déterminée par la perméabilité et la porosité du réservoir. On distingue généralement trois grands types d'aquifères en fonction des attributs physiques de ces derniers : les milieux poreux, les aquifères fissurés et les aquifères karstiques. Le transfert d'un même volume d'eau sur une distance de 1 km varie énormément en fonction de ces types de réservoirs aquifères et de leurs propriétés hydrodynamiques associées : d'une année ou plus en milieu poreux, de quelques mois en milieu fissuré à quelques jours voire quelques heures en milieu karstique.

L'aquifère du Grès de Luxembourg est un système aquifère assez complexe car composite de ces trois grands types de réservoirs. En effet, le Grès de Luxembourg est composé à la fois de niveaux sableux peu cimentés et de bancs plus indurés. Les premiers peuvent être associés à un milieu de type poreux, les deuxièmes, qui présentent un degré de cimentation plus élevé (de sorte que tous les espaces originaux sont remplis) et qui sont plus fracturés, sont à rapprocher d'un comportement de type fissural. De plus, l'eau provenant de l'infiltration qui est chargée d'une certaine acidité corrode le ciment calcaire des grès. Un véritable réseau hydraulique souterrain peut ainsi se développer après dissolution du calcaire (karstification des grès). Ainsi, les vitesses de circulation de l'eau souterraine sont très variables d'une portion aquifère à l'autre. Les sources de la Ville de Luxembourg peuvent par conséquent réagir de façon très différente aux apports pluviométriques en fonction de la nature des compartiments aquifères qu'elles drainent. La variabilité de leur vulnérabilité à une contamination en provenance de la surface, qui est en intime relation avec ces différents comportements hydrodynamiques, est-elle aussi importante. En effet, la vulnérabilité d'une source dépend de la facilité et de la rapidité suivant lesquelles des matières polluantes d'origine superficielle peuvent atteindre le lieu de son captage et dégrader la qualité des eaux qu'elle draine. Cette vulnérabilité dépend aussi de la difficulté et de la lenteur de la régénération des qualités de l'eau souterraine. Ces deux critères responsables de la vulnérabilité d'une source sont en grande partie dépendants des vitesses de l'eau depuis la surface jusqu'au lieu de captage.

L'aquifère du Grès de Luxembourg peut être considéré comme un appareil « récepteur/émetteur » de flux d'eau qui reçoit des apports (eaux d'infiltrations issues des pluies efficaces) et subit des fuites (drainage de l'aquifère localisé aux niveaux de sources ou de lignes d'émergences plus diffuses, drainage profond). La dissymétrie entre les régimes des flux d'apport et d'émission aux limites d'un aquifère résulte essentiellement du pouvoir régulateur de l'aquifère qui lui permet de transformer les flux entrants discontinus et irréguliers en flux sortants continus et plus réguliers. Cette fonction régulatrice dépend de plusieurs paramètres caractéristiques du réservoir aquifère (porosité efficace, fracturation, épaisseur zone non saturée...). Comme mentionné précédemment, les aires impliquées dans l'alimentation des sources de la Ville de Luxembourg sont soumises à des conditions climatiques similaires et donc à des « signaux » d'entrée d'eau d'infiltrations analogues. Des différences ou similitudes

observées entre les évolutions débitométriques des sources de la Ville de Luxembourg sont donc à relier respectivement à des propriétés de stockage et de transfert (fonction régulatrice) différentes ou similaires des portions aquifères impliquées.

L'analyse des chroniques débitométriques historiques nous a montré que les portions aquifères sollicitées par les sources de la Ville de Luxembourg se comportent comme un milieu de type principalement poreux, les fluctuations observées y étant majoritairement très régulières (cf. Fig. 3). Les vitesses de circulation peuvent être localement élevées dans les fissures agrandies, servant de drains souterrains à l'ensemble, mais globalement, l'hydrodynamique de l'aquifère est contrôlée par la perméabilité des bancs sableux.

Deux formes typiques d'évolution extrêmes sont observées. La première est caractérisée par des courbes de débit de variabilité saisonnière très marquée, de fortes amplitudes annuelles et de variabilité pluriannuelle faible (Régime de variation annuel). Les sources dont les chroniques reflètent ce comportement sont alimentées par des portions d'aquifère réagissant rapidement aux apports pluviométriques mais dont les capacités de stockage sont limitées. Ce comportement peut s'expliquer par une perméabilité importante du grès et/ou une profondeur de la nappe relativement faible par rapport à la surface du sol. La deuxième se caractérise par des courbes débitométriques de variations saisonnières très atténuées et de variations pluriannuelles très amples (Régime de variation pluriannuel). Les sources dont le débit suit ce type d'évolution sont alimentées par des portions aquifères dont la constitution mais aussi la restitution des réserves d'eau sont beaucoup plus lentes. Ce comportement va dans le sens d'un caractère global de l'aquifère moins perméable et/ou une profondeur de la nappe assez profonde par rapport à la surface du sol.

A ces deux comportements de type poreux se surimposent parfois des fluctuations débitométriques soudaines lors des périodes de fortes précipitations. Ces «pics débitométriques» peuvent suggérer soit une transmission rapide des eaux d'infiltration depuis la surface du sol vers le captage soit un phénomène d'effet piston et dans ce cas les pics de débit correspondraient non pas à des arrivées rapides d'eaux superficielles mais à un transfert de pression. L'origine de ce phénomène peut être vérifiée par une analyse couplée débit/physico-chimie, les eaux superficielles ayant une signature physico-chimique différente. Ce dernier cas démontre la présence de connexions rapides entre le bassin d'alimentation et le captage (écoulements rapides le long de fractures et/ou contribution d'apports liés à des infiltrations dans les environs immédiats du captage).

Les 3 comportements mentionnés ci-dessus, illustrés par la Figure 6, sont d'une importance double, dans le sens où ils révèlent des informations primordiales relatives à la capacité de constitution et de restitution des réserves en eau et de l'éventuel danger que peut constituer un transfert plus ou moins rapide d'éventuels polluants depuis la surface vers les sources captées. Chacun d'eux peut être associé à un type de vulnérabilité.

Les sources à régime de variation débitmétrique interannuel prédominant sont alimentées par des portions aquifères dont la constitution mais aussi la restitution des réserves d'eau sont assez lentes. Dans ce cas la stabilité des caractéristiques physico-chimiques est assez élevée et les transferts de pollution potentielle depuis la surface sont relativement lents et atténués par phénomène de dilution. En revanche, l'effacement de l'impact après arrêt d'un flux polluant considéré est relativement lent. En Figure 6a sont présentées les dynamiques débitmétrique et physico-chimique d'une source représentative de ce groupe.

Les sources à régime de variation débitmétrique annuel prédominant sont alimentées par des portions d'aquifère réagissant rapidement aux apports pluviométriques mais dont les capacités de stockage sont limitées. Dans ce cas, l'alimentation rapide de la nappe provoque des variations assez amples des paramètres physico-chimiques et peut engendrer dans le cas d'une pollution potentielle un transfert depuis la surface relativement rapide et des concentrations fortes. Cependant la vidange relativement rapide de la nappe va dans le sens d'un effacement de l'impact après arrêt d'un flux polluant considéré relativement rapide. En Figure 6b sont présentées les dynamiques débitmétrique et physico-chimique d'une source représentative de ce groupe.

La présence de connexions rapides entre le bassin d'alimentation et le captage est détectée lors des périodes de fortes précipitations par analyse couplée débit/physico-chimie, les entrées d'eaux d'origine superficielle ayant une signature physico-chimique différente. Dans ce cas, une partie des eaux ne séjourne pas assez longtemps dans l'aquifère pour être suffisamment filtrée et épurée naturellement avant d'être captée (contamination bactérienne, problème de turbidité, autres polluants non dégradés et non dilués). En Figure 6c sont présentées les dynamiques débitmétrique et physico-chimique d'une source représentative de ce groupe.

La démarche d'association d'un comportement hydrodynamique et hydrochimique observé à une classe de vulnérabilité n'a pas encore été menée à son terme à l'heure actuelle pour l'ensemble des sources de la Ville de Luxembourg et ceci pour plusieurs raisons : données débitmétriques historiques parfois douteuses, de nombreux comportements composites des trois comportements extrêmes existent et empêchent une classification simpliste de la vulnérabilité des sources, durée d'observation insuffisante et fréquence d'échantillonnage faible pour observer des entrées ponctuelles d'eaux d'origine superficielle.... D'autres investigations sont encore nécessaires.

CONCLUSION

Les travaux effectués ont permis de réaliser un premier état des lieux quantitatif et qualitatif des eaux du Grès de Luxembourg captées par la Ville de Luxembourg et alimentant la commune en eau potable. L'interprétation de ces résultats a permis de conclure à d'importants enseignements.

Les débits des différentes sources suivies ne réagissent pas de la même façon aux apports pluviométriques. Ces différences comportementales sont d'une importance double, dans le sens où elles révèlent des informations importantes relatives à la capacité de constitution et de restitution des réserves en eau d'une part, et de l'éventuel danger que peut constituer un transfert plus ou moins rapide d'éventuels polluants depuis la surface vers les sources captées d'autre part.

D'un point de vue quantitatif, le tarissement de nombreuses sources, observé depuis quelques années, s'est poursuivi au cours de l'année 2004-2005. Cette réaction à un déficit pluviométrique chronique depuis 2003 se fait ressentir sur l'ensemble des sources et indique que la ressource en eaux souterraine de la Ville de Luxembourg peut dans son ensemble être caractérisée comme « sensible à la variabilité des apports pluviométriques ».

Pour ce qui est de la qualité chimique des eaux des sources, les analyses ont permis de mettre en évidence quelques points sensibles, inhérents surtout à une teneur en nitrates trop élevée. Les résultats de cette étude ont confirmé la relation logique attendue « Forte occupation agricole du sol / Forte teneur en nitrates ». Les autres paramètres chimiques analysés n'ont jamais dépassé les normes de potabilité en vigueur au Luxembourg et ne donnent pas lieu à inquiétude.

Dans la continuité de cette étude, des travaux complémentaires au suivi quantitatif et qualitatif détaillé dans cet article sont actuellement en cours. Afin de doter la Ville de Luxembourg d'un système d'évaluation de l'évolution quantitative des sources, un modèle débitmétrique de simulation/prévision est en cours de développement. De plus, dans le souci d'une meilleure compréhension de la pollution « Nitrates », une étude de l'impact agricole sur ce paramètre a été entreprise avec la mise en place de sites de suivi en plein champ. On notera aussi l'intégration d'un volet « Pesticides » dans le suivi qualitatif des sources de la ville de Luxembourg du fait de la forte pression des activités agricoles soulevée.

RÉFÉRENCES

COLBACH R. (2005). Overview of the geology of the Luxembourg sandstone(s). *Ferrantia* **44**: 155-160.

GRONEMEIER K.U. (1976a). Qualitativer und quantitativer Nachweis von Umwelteinflüssen auf das Grundwasser im Luxemburger Sandstein. *Z. dt. geol. Ges.* **127**: 11-35.

GRONEMEIER K.U. (1976b). Das Grundwasser im Luxemburger Sandstein : Geologie, Wasserhaushalt und Umweltbelastung am Beispiel von drei Grosstestflächen. Doktorat der Naturwissenschaft, Johannes Gutenberg-Universität Mainz.

HAMON W.R. (1961). Estimating potential evapotranspiration. Proceedings of the American Society of Civil Engineers. J. Hydraulic Division **87**, no. HY3: 107-120.

HÖTZL H., WAGNER J.F. & SCHNATMEYER C. (1993). Ausweisung der Quellschutzgebiete des « Syndicat des Eaux du Sud ».

LEBAUT S. (2001). L'apport de l'analyse et de la modélisation hydrologique de bassins versants dans la connaissance du fonctionnement d'un aquifère : les grès d'Ardenne-Luxembourg. Revue du centre géographique de l'Université de Metz, Mosella **XXVI**: 1-271.

LUCIUS M. (1940). Les nappes aquifères du Secondaire du Gutland. Publication du Service de la carte géologique de Luxembourg.

LUCIUS M. (1948). Das Gutland, Erläuterungen zur geologischen Spezialkarte Luxemburgs. Publication du service géologique du Luxembourg, volume VI.

LUCIUS M. (1949). Les nappes d'eau souterraines du Luxembourg et leur utilisation rationnelle. Revue technique luxembourgeoise **4**: 227-237.

LUXCONSULT (1991 & 1992). Festlegung der Grundwasserschutzzonen für die Trinkwasserquellen der Gemeinde Luxemburg. Rapports pour le Ministère de l'Environnement et le Commissariat général à la protection du sol et des eaux.

VON HOYER M. (1971). Hydrogeologische und hydrochemische Untersuchungen im Luxemburger Sandstein. Publication du service géologique du Luxembourg **XXI**: 1-61.