

## Evaluation de l'état des masses d'eau souterraines en domaine de socle

### Assessment of groundwater body status in hard rock regions

Gabion D. <sup>(1)</sup>, Baran N., Bourguin B., Gourcy L., Gutierrez A., Lopez B., Mardhel V., Pinson S., Stollsteiner P., Surdyk N., Thiéry D., Wuilleumier A. <sup>(2)</sup>, GEOHYD <sup>(3)</sup>

(1) Agence de l'Eau Loire-Bretagne - Direction de l'évaluation et de la Planification

(2) Bureau de Recherche Géologique et Minière (BRGM)

(3) Bureau d'étude GEOHYD

[damien.gabion@eau-loire-bretagne.fr](mailto:damien.gabion@eau-loire-bretagne.fr), [p.nom@brgm.fr](mailto:p.nom@brgm.fr), [p.nom@geo-hyd.com](mailto:p.nom@geo-hyd.com)

L'évaluation de l'état des masses d'eau souterraines résulte des prescriptions nationales et européennes basées sur les éléments de cadrage apportés par la Directive Cadre sur l'Eau (Directive n° 2000/60/CE du 23/10/2000 établissant un cadre pour une politique communautaire dans le domaine de l'eau) et par la directive 2006/118/CE du 12 décembre 2006 sur la protection des eaux souterraines contre la pollution et la détérioration, communément appelée « directive fille eaux souterraines ».

La Directive Cadre sur l'Eau fixe des objectifs et des méthodes pour atteindre le bon état des eaux souterraines d'ici 2015. L'évaluation de l'état des masses d'eau souterraine repose, entre autre, sur la prise en compte de paramètres chimiques incluant notamment des notions de représentativité du réseau de surveillance des masses d'eau, d'évaluation des tendances à la hausse des concentrations en substances polluantes et de relations entre les eaux de surface et les eaux souterraines.

Dans ce cadre, l'agence de l'eau Loire-Bretagne s'appuie sur des approches méthodologiques développées en partenariat avec le BRGM et des bureaux d'études afin d'améliorer l'évaluation de l'état des eaux souterraines en domaine de socle.

#### I. UTILISATION DES DONNEES « COURS D'EAU » DANS L'EVALUATION DE L'ETAT CHIMIQUE DES EAUX SOUTERRAINES EN DOMAINE DE SOCLE (BRETAGNE)

Afin de dresser une image cohérente et complète de l'état chimique des eaux souterraines, un programme de surveillance est établi en application de l'article R. 212-22 du code de l'environnement. La question de la représentativité spatiale des réseaux de surveillance des eaux souterraines et des méthodes à employer pour construire un réseau représentatif est souvent abordée depuis la mise en place de ces réseaux.

Les aquifères du socle caractérisés par leur petite taille peuvent rendre difficile le choix d'ouvrage représentatif de la masse d'eau. Dans ce cadre, GeoHyd a réalisé (GEOHYD, 2009) pour le compte de l'agence de l'eau Loire-Bretagne, une étude sur la possibilité d'une interrelation entre les mesures observées dans les eaux souterraines et les eaux de surface et la faisabilité d'intégration des stations « cours d'eau » dans l'analyse de l'état qualitatif des masses d'eau souterraine de socle.

Une étude statistique descriptive ainsi qu'une comparaison des moyennes et classes d'état chimique ont été opérées sur la base des teneurs en nitrate observées sur l'ensemble des masses d'eau cours d'eau et souterraine pour l'année 2003, année de référence de part des étiages longs et sévères. Les résultats montrent que les bilans comparatifs effectués sur le paramètre nitrate ne permettent de pas de conclure à un synchronisme global entre « eau de surface » et « eau souterraine ». D'une part chaque masse d'eau peut offrir son propre temps de réaction aux phénomènes de percolation / infiltration et d'autre part une station de mesure de la qualité des eaux de surface ne peut être représentative de la masse d'eau souterraine dans son ensemble. Cependant une étude locale peut être menée sur chaque station de mesure de la qualité des eaux de surface pour savoir de quelle station de mesure des eaux souterraines elle se rapproche le plus. Ceci suppose d'étudier les chroniques sur le moyen - long terme et ce sur l'ensemble du cycle hydrologique (hautes eaux / basses eaux).

Dans le cas des aquifères de socle en Bretagne, un classement des stations de mesure de la qualité des eaux souterraine a été réalisé selon une Classification Ascendante Hiérarchique (CAH) sur la base de trois paramètres : la moyenne des teneurs en nitrates, la moyenne maximum enregistrée sur le panel de pesticides et le taux de détection maximum observé sur un phytosanitaire. Les données ont été standardisées pour limiter les effets de taille. Cette Classification Ascendante Hiérarchique a permis de déterminer six classes de stations de mesure différentes (Tableau 1) avec pour chacune, une typologie particulière :

Classes CAH	Moyenne des teneurs en nitrates	Moyenne max phyto	Taux de détection maximum (phyto)
1	Faible (-0,865)	Faible (-0,442)	-0,786
2	Forte (1,706)	Forte (3,352)	1,696
3	Significative (0,702)	Significative haute (1,887)	1,488
4	Forte (1,79)	Faible (-0,345)	-0,309
5	Moyenne (0,26)	Faible (-0,339)	-0,152
6	Significative (0,496)	Significative basse (-0,017)	1,285

Tableau 1 - Barycentre et typologie des classes issues de la CAH

La spatialisation du résultat de la CAH a ensuite été réalisée après un découpage du territoire par la méthode des diagrammes de Voronoï. La représentativité (%) des classes CAH a pu être définie pour les polygones de chaque masse d'eau souterraine. L'analyse des classes CAH et des stations du réseau de contrôle de surveillance (RCS) a été réalisée en Bretagne pour toutes les masses d'eau de socle selon le guide lecture suivant (Tableau 2) :

Analyse des classes CAH et des stations du réseau de contrôle de surveillance	
Oui	Il y a une station du RCS pour la classe de la masse d'eau
Pas de RCS mais station CE	Il n'y a pas de station RCS mais une station cours d'eau représentative de la classe de la masse d'eau
Pas de RCS mais station CE	Il n'y a pas de stations RCS mais une station cours d'eau pour une classe non représentative de la masse d'eau
Pas de RCS	Il n'y a pas de stations RCS pour la classe de la masse d'eau mais cette classe n'est pas représentative de la masse d'eau
Pas de RCS ni de station CE	Il n'y a pas stations RCS ni de station « cours d'eau » pour une classe représentative de la masse d'eau
Représentativité des classes CAH sur la masse d'eau	
0%	Classe non présente sur la masse d'eau
<25%	classe non représentative de la masse d'eau
25% <v< 50%	classe peu représentative de la masse d'eau
50% <v< 70%	classe moyennement représentative de la masse d'eau
>75%	classe représentative de la masse d'eau

Tableau 2 : méthodologie d'analyse des stations du réseau de surveillance (RCS) et des classes CAH représentatives des masses d'eau souterraine de socle en Bretagne

Par exemple, l'analyse des classes CAH et des stations du RCS sur la masse d'eau « bassin versant du Léon FRGG001 » (Tableau 3) montre qu'une station cours d'eau pourrait être utilisée pour caractériser un secteur sur lequel il n'y a pas de station du RCS des eaux souterraines.

Code masse d'eau	Présence d'une station RCS par classe						Part de la superficie de chaque classe CAH sur la masse d'eau					
	Classe 1	Classe 2	Classe 3	Classe 4	Classe 5	Classe 6	Classe 1	Classe 2	Classe 3	Classe 4	Classe 5	Classe 6
FRGG001	pas de RCS	pas de RCS mais station CE	Oui	Oui		Oui	0,07	0,47	0,08	0,27	0	0,11

Tableau 3 : Analyse des classes CAH et des stations de mesures (masse d'eau du bassin versant du Léon - FRGG001)

En Bretagne, sur 24 masses d'eau souterraines en domaine de socle, 20 présentent un manque de stations représentatives de la masse d'eau. L'intégration des stations qualité « cours d'eau » permettrait de combler une absence de représentativité des stations du RCS des eaux souterraines de 14 masses d'eau.

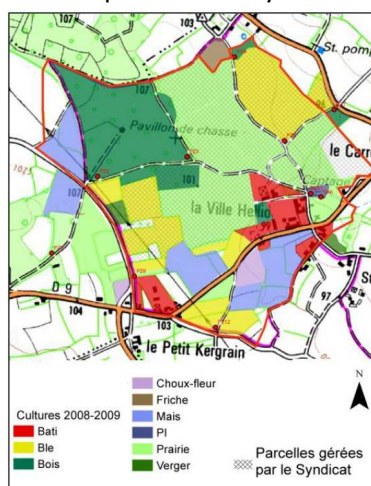
## II. SIMULATION DE L'EVOLUTION LOCALE DES CONCENTRATIONS EN NITRATES

L'état des lieux réalisé en 2013 à l'échelle du bassin Loire-Bretagne indique que 27 % des masses d'eau souterraines présentent un risque de non atteinte du bon état chimique en 2021 principalement du fait de fortes teneurs en nitrates. Dans ce contexte, le BRGM et l'agence de l'eau Loire-Bretagne se sont associés afin d'améliorer la connaissance de la contamination des eaux souterraines.

Dans certains secteurs où les pratiques agricoles ont été profondément modifiées, l'amélioration significative de la qualité des eaux souterraines n'est pas toujours perceptible sur de courtes périodes. L'existence d'un stock de nitrates au sein de la zone non saturée liée à des pratiques anciennes est l'un des principaux facteurs responsables de l'inertie du système. Ainsi, prévoir l'évolution future de la concentration des nitrates à partir des chroniques de concentrations elles-mêmes est parfois difficile (Baran et al, 2011).

À l'échelle du bassin versant, les modèles globaux intégrant des données agro-climatiques sont une bonne alternative aux modèles déterministes maillés car leur mise en œuvre est plus aisée. Le modèle BICHE (Bilan CHimique des Eaux; Thiéry, 1990), développé au BRGM, est un exemple de modèle global permettant de simuler les flux d'eau et de nitrates d'une nappe à l'échelle du bassin versant à partir de chroniques de pluie, d'ETP, de données agronomiques et de chroniques de calage (concentrations et débits ou niveaux de nappe).

Le bassin d'alimentation du captage de la Ville Hellio (Plourhan, Côtes-d'Armor ; Carte 1), secteur représentatif d'une zone de socle sur le bassin Loire-Bretagne, a fait l'objet d'une modélisation des concentrations en nitrates dans la nappe (1985-2009) à partir de l'analyse de l'occupation des sols, des pratiques agricoles actuelles et passées et des paramètres hydroclimatiques.



Carte 1 : Occupation du sol en 2008-2009 sur le bassin d'alimentation du captage de la Ville Hellio (arène argileuse du Briovérien) - BRGM/RP-60280-FR.

La modélisation a été effectuée suivant 3 grandes étapes : collecte des données, initialisation/calage et utilisation du modèle à des fins prédictives. Le pas de temps utilisé est mensuel. Le modèle a été calé avec succès tant sur les aspects hydrodynamiques (niveau et débit de la nappe) que sur la qualité des eaux (Baran et al, 2013).

Le modèle a montré un réel intérêt dans la simulation de scénarii. Ceux-ci permettent d'alerter la collectivité sur l'évolution prévisible des concentrations en nitrates si aucune mesure n'est prise ou de montrer l'impact de changements de pratiques culturales envisagés sur l'évolution de la qualité des eaux (Figure 1)

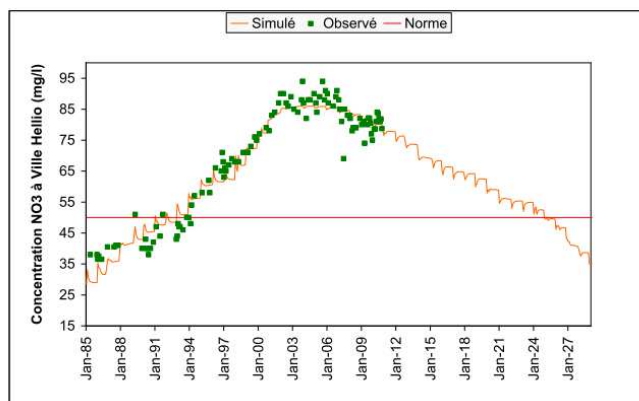


Figure 1 : Comparaison des concentrations en nitrates mesurées et simulées entre 1985 et 2027, selon le scénario «continuité» (répétition des cycles climatiques passés et stabilisation des pratiques culturales actuelles)

### III. CONTRIBUTION DES EAUX SOUTERRAINES AUX ECOULEMENTS DES MASSES D'EAU DE SURFACE DU BASSIN LOIRE-BRETAGNE : APPLICATION AU DOMAINE DE SOCLE

Un des objectifs fixés par la "directive fille eaux souterraines" et repris à l'article 6 de l'arrêté du 17 décembre 2008 est de déterminer si un transfert de polluants des eaux souterraines vers les eaux de surface est susceptible d'altérer leur état chimique et/ou écologique et représenterait ainsi une entrave aux objectifs environnementaux de la DCE. Pour mener cette analyse, l'agence de l'eau Loire-Bretagne s'appuie sur les travaux relatifs à l'évaluation de la contribution moyenne des eaux souterraines aux écoulements de surface à l'échelle du bassin, réalisés par le BRGM. Les éléments ci-dessous sont tirés du poster « Contribution des eaux souterraines aux écoulements des masses d'eau de surface du Bassin Loire-Bretagne : application au socle » réalisé par Pinson S. et al (2015) dans le cadre de ce colloque.

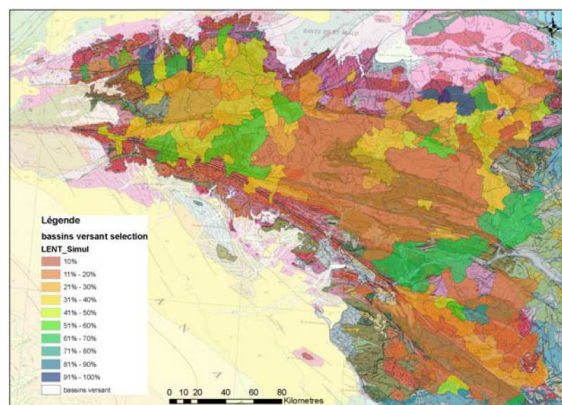
Les relations entre les deux réservoirs que constituent d'une part les aquifères et d'autre part les eaux de surface sont complexes, décalées dans le temps et complémentaires (prise directe (karst), autorégulation et amplification des phénomènes extrêmes (inondations)). En raison même de cette complémentarité, il est apparu nécessaire de quantifier la contribution moyenne des eaux souterraines aux eaux de surface, en réalisant une étude pilote, qui s'appuie sur une combinaison de méthodes innovantes (IDPR : Indice de développement et de persistance des réseaux, et des modélisations GARDENIA / TEMPO) relatives à la compréhension des mécanismes qui sont à l'origine des relations nappes-rivières.

Ce projet a été mené en plusieurs étapes : une approche qualitative accompagnée de la définition d'une typologie, une approche quantitative adaptée au contexte spécifique du bassin versant, une classification typologique des bassins versants et une évaluation du comportement des eaux souterraines dans leur contribution au débit et à la qualité des cours d'eau, avec un test sur le paramètre « nitrates ».

L'approche qualitative a permis d'aboutir à une classification des bassins versants, selon 10 grands types, avec une différenciation du Massif armoricain (trois zones), une distinction très nette de comportements entre le Massif armoricain et le Massif central et une meilleure appréhension des zones de transition entre

le sédimentaire et le socle. Pour la partie quantitative, des bassins versants répartis sur le domaine de socle ont été modélisés grâce aux logiciels TEMPO et GARDENIA du BRGM. Cette approche a permis d'estimer un pourcentage de "lent simulé" qui correspond à la contribution moyenne des eaux souterraines au débit de la rivière. Ces données issues des modélisations ont été ensuite croisées avec les données qualitatives afin de rechercher des corrélations. Pour le domaine de socle, une relation entre le QMNA5 (valeur du débit mensuel d'étiage ayant la probabilité 1/5), le débit moyen et le lent simulé a été mise en évidence.

Cette relation a ainsi permis de calculer le pourcentage de contribution moyenne des eaux souterraines aux débits des rivières sur l'ensemble des bassins versants non modélisés, mais possédant une station de jaugeage, et ainsi de couvrir une grande partie du socle appartenant au bassin Loire-Bretagne (Carte 2).



Carte 2 – Contribution moyenne des eaux souterraines aux débits des cours d'eau – massif armoricain – BRGMRP/57608

#### IV. ÉVALUATION DES TENDANCES D'ÉVOLUTION DES CONCENTRATIONS EN POLLUANTS DANS LES EAUX SOUTERRAINES

L'inversion de toute tendance à la hausse, significative et durable, de la concentration de tout polluant dans les eaux souterraines résultant de l'impact de l'activité humaine (tendances à la hausse) est un des objectifs environnementaux de la directive cadre sur l'eau (DCE). Les États Membres doivent mettre en place les mesures nécessaires pour répondre à cet objectif, spécifique aux eaux souterraines.

L'arrêté du 17 décembre 2008 modifié est venu préciser l'article R. 212-21-1 du code de l'environnement et compléter la transposition de la DCE et de sa directive fille sur les eaux souterraines. Il stipule notamment que ces exercices d'identification doivent être réalisés au moins tous les six ans (article 8) et que pour les masses d'eau sur lesquelles une tendance à la hausse est mise en évidence, le point de départ de la mise en œuvre de mesures visant à inverser une tendance à la hausse significative et durable doit être défini (article 9).

Le BRGM a développé dans le cadre d'une convention ONEMA-BRGM, un outil statistique d'identification des tendances, programmé sous le logiciel HYPE (Lopez B, 2011). L'outil de caractérisation des séries temporelles et d'identification des tendances d'évolution des contaminants dans les eaux souterraines permet de traiter une ou plusieurs chroniques de qualité.

Plusieurs modules permettent d'extraire les principales caractéristiques des chroniques (moyenne, écart-type, fréquence de quantification, etc.) et d'appliquer des tests statistiques de tendance et de rupture sur des chroniques.

Des fiches "Tendance d'évolution des concentrations en nitrates dans les eaux souterraines par masse d'eau" sont proposées (Figure 2) et comportent une carte avec le résultat du test statistique Mann-Kendall aux points de la masse d'eau (code couleur en fonction de la pente), le résultat de la méthode "généralisation" selon la DCE, le test statistique Kendall régional à l'échelle de la masse d'eau souterraine et un indice de confiance de l'évaluation (probabilité d'erreur dans la définition de la pente).



Par exemple, la masse d'eau du bassin versant du Léon (FRGG001) comprend 15 points « qualité » avec une tendance d'évolution des teneurs en nitrates à la baisse. Par ailleurs, le test statistique Kendall régional identifie une tendance globale à la baisse de 2,39 mg/L de nitrates par an et qu'il y a 19% de chance d'avoir, pour un même point de la masse d'eau, une baisse des teneurs en nitrates entre deux analyses (Figure 2).

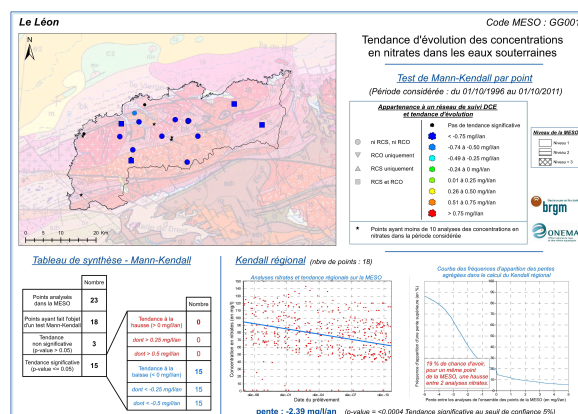


Figure 2 : Fiche « tendance d'évolution des concentrations en nitrates » pour la masse d'eau du bassin versant du Léon

### Références bibliographiques :

BARAN N., GOURCY L., LOPEZ B., BOURGINE B., MARDHEL V. (2009)- Transfert des nitrates vers les eaux souterraines à l'échelle du bassin Loire-Bretagne – Phase 1: temps de transfert, tendances et typologie des aquifères. Rapport BRGM/RP-56884-FR

BARAN N., BOURGINE B., GOURCY L., GUTIERREZ A., LOPEZ B., MARDHEL V., PINSON. S, STOLLSTEINER P., SURDYK N., THIÉRY D., WUILLEUMIER A. avec la collaboration de J-P. JEGOU, F. KOCH et B. MOUGIN (2013) - Simulation de l'évolution des concentrations en nitrates dans la nappe à l'échelle du bassin d'alimentation du captage de la Ville Hellio (Plourhan, Côtes-d'Armor) – Panneau réalisé dans le cadre des RENCONTRES-ATELIERS du Creseb du 14 juin 2013

BARAN N., GUTIERREZ A., LOPEZ B., SURDYK N., GOURCY L. (2011) - Transfert de nitrates à l'échelle du bassin d'alimentation de captages d'eau souterraine du bassin Loire-Bretagne: modélisation et datation. Rapport final BRGM/RP-60280-FR.

GEOHYD (2009)- Calcul statistique de la qualité des masses d'eau souterraine du bassin Loire-Bretagne

GUTIERREZ A., SURDYK N., LOPEZ B., BARAN N., THIÉRY D. (2012) - Quelques exemples de simulation de l'évolution des concentrations de nitrates dans la nappe à l'échelle du bassin d'alimentation des captages. Poster présenté à INTERSOL 2012.27-30 mars 2012, Paris.

LOPEZ B. avec la participation de BLUM A. et BARAN N. (Avril 2011) - Evaluation des tendances d'évolution des concentrations en polluants dans les eaux souterraines. Guide méthodologique - BRGM/RP-59931-FR

PINSON. S, ALLIER D, STOLLSTEINER P, MARDHEL .V, WUILLEUMIER. A, (2015) - Contribution des eaux souterraines aux écoulements des masses d'eau de surface du Bassin Loire-Bretagne : application au socle – Poster réalisé dans le cadre du colloque international CFH-AIH à La Roche-Sur-Yon du 11 au 13 juin 2015

PINSON. S, ALLIER D, STOLLSTEINER P, MARDHEL .V, WUILLEUMIER. A, (2010) - Etude de la contribution des eaux souterraines aux écoulements totaux des Masses d'eau de surface sur le bassin Loire-Bretagne Rapport final. Rapport BRGM RP-57608-FR, 164 p, 135 illustrations, 3 annexes

SURDYK N., GUTIERREZ A., LOPEZ B., BARAN N., THIÉRY D. (2012) - BICHE: un outil d'application simple de simulation de concentrations en nitrates dans les nappes à l'échelle du bassin versant. Communication à INTERSOL 2012. 27-30 mars 2012, Paris.

Vingtièmes journées techniques du Comité Français d'Hydrogéologie  
de l'Association Internationale des Hydrogéologues.

**« Aquifères de socle : le point sur les concepts et les applications opérationnelles » La Roche-sur-Yon, juin 2015**

---

THIERY D. (1990) – Modélisation des transferts de nitrates dans un bassin versant – Validation du modèle BICHE (Bilan Chimique des Eaux) et analyse de sensibilité. Rapport BRGM/RR-30976-FR