Document public

Impact des eaux souterraines sur les eaux de surface : proposition d'évolution du test « eau de surface »

Rapport final

BRGM/RP-65797-FR
Mars 2016

ONEMA
Office national de l'eau et des milieux aquatiques

Géosciences pour une Terre durable
brgm

Document public

Impact des eaux souterraines sur les eaux de surface : proposition d'évolution du test « eau de surface »

Rapport final

BRGM/RP-65797-FR
Mars 2016

Étude réalisée dans le cadre de la convention ONEMA-BRGM 2013-2015

C. Auterives, S. Pinson

Vérificateur :	**Approbateur :**
Nom : Laurence GOURCY	Nom : Laurence CHERY
Fonction : CS	Fonction : Resp. unité EVE
Date : 04/04/2016	Date : 06/05/2016
Signature :	Signature :

Le système de management de la qualité et de l'environnement est certifié par AFNOR selon les normes ISO 9001 et ISO 14001.

ONEMA
Office national de l'eau et des milieux aquatiques

brgm
Géosciences pour une Terre durable

RESUME

L'évaluation de l'état des eaux souterraines est décrite dans la circulaire du 23 octobre 2012. Cette procédure comprend une évaluation de la qualité des eaux souterraines au point d'eau qui en cas de dépassement de normes ou de valeurs seuils sur un point représentatif de la masse d'eau déclenche l'enquête appropriée. Cette enquête comprend 5 tests dont le test « eau de surface ». L'objectif de ce test est d'évaluer si les eaux souterraines sont responsables d'un état moins que bon constaté ou à risque de non atteinte des objectifs environnementaux pour les masses d'eau de surface.

Ce travail fait suite à une première phase d'investigation et de réflexion sur l'ajustement des valeurs seuils des eaux souterraines aux valeurs des normes de qualité environnementale des eaux de surface (phase 1, BRGM/RP-63127-FR) dans le cas d'une dégradation constatée de l'état des eaux de surface.
Dans cette deuxième phase de travaux, l'objectif est d'identifier les difficultés de mise en application du test « eau de surface » lors du dernier rapportage communautaire (2016), de proposer des évolutions et d'identifier les verrous scientifiques et les pistes de recherche qui constituent encore des points bloquants pour pouvoir dire si oui ou non les eaux souterraines sont responsables de la dégradation d'un cours d'eau de surface.

L'application de ce test a révélé des disparités entre les différentes Agences de bassin (Loire-Bretagne, Rhin-Meuse, Seine-Normandie). Plusieurs difficultés ont été mises en évidence dans le déroulé du test et ont permis de proposer des évolutions du test ou des pistes de recherche à explorer :

- La question du lien eau de surface – eau souterraine est difficile lorsque les études locales font défaut et ont souvent conduit à répondre « ne sait pas » à cette question. Cette réponse possible a souvent conduit à arrêter la démarche, le test inachevé ne conduisait alors à aucune réponse sur la responsabilité des eaux souterraines dans une dégradation éventuelle des eaux de surface. Pour lever ce point bloquant, une réponse par défaut est proposée à savoir « la rivière draine la nappe ». Sans information contraire, le scénario de transfert d'eau du réservoir souterrain vers les eaux de surface est privilégié.

- Les causes de dégradation des cours d'eau sont la première étape de déroulé du test « eau de surface » et permettent de cibler les substances à rechercher dans les eaux souterraines.
    - Première difficulté si la substance ne fait pas partie du programme de surveillance des eaux souterraines, le test « eau de surface » ne peut aboutir. Il serait nécessaire d'identifier les substances dégradant les eaux de surface et ne faisant pas partie du programme de surveillance des eaux souterraines. A partir de cette liste, il serait nécessaire d'identifier celles pouvant transiter des eaux souterraines vers les eaux de surface. Pour ces dernières, une réflexion sur leur intégration dans les programmes de surveillance des eaux souterraines et la définition de valeurs seuils adaptées aux normes de qualité environnementales des eaux de surface serait nécessaire. Cette piste de réflexion pourrait être prise en compte dans le schéma de priorisation des substances à surveiller dans les eaux souterraines (Lopez, 2014) ;
    - Les causes de dégradation des eaux de surface permettent d'identifier les substances à rechercher dans les eaux souterraines et leur possible transfert

des eaux souterraines vers les eaux de surface. Dans le cas d'excès de concentration en molécules synthétiques (non naturelles), la problématique est simple, il s'agit de rechercher la présence de la même substance dans les eaux souterraines. Lorsque la cause de dégradation est l'eutrophisation du cours d'eau ou l'excès de nutriments, la question est plus complexe car il n'existe pas d'indicateurs des conditions d'eutrophisation. La complexité du cycle de l'azote et du phosphore et les réactions qui se déroulent au sein de la zone hyporhéique ne permettent pas un traitement simple de la question et impliquent nécessairement une étude locale détaillée qui n'est pas envisageable à l'échelle de l'ensemble des masses d'eau de surface et souterraine du territoire national. Des recherches sur des indicateurs globaux de l'origine des conditions d'eutrophisation seraient nécessaires.

- L'identification du lien eau de surface – eau souterraine pose plusieurs questions : Y-a-t-il un lien ? De quelle nature : les eaux de surface drainent les eaux souterraines ou l'inverse ? Quelle masse d'eau de surface interagit avec quelle masse d'eau souterraine ?
    - A l'échelle du territoire national, en dehors des études locales, il est difficile de répondre à ces questions. La proposition par défaut de considérer que les eaux de surface drainent les eaux souterraine aide dans la démarche mais ne répond pas à toutes les questions. Pour relier masse d'eau de surface et masse d'eau souterraine, de précédents travaux de recherche exploratoire cartographique de rapprochement entre référentiel hydrographique et hydrogéologique ont donné des résultats encourageants. Ils ont conduit à relier un piézomètre (représentatif d'une masse d'eau souterraine) à un cours d'eau (représentant une masse d'eau de surface) avec une probabilité de direction des échanges. Ces résultats compilés à l'échelle nationale sous la forme d'une base de données mériteraient d'être repris, validés et développés pour aller plus loin dans cette démarche. Le résultat final sous la forme d'une base de données reliant masse d'eau souterraine et masse d'eau de surface en indiquant la probabilité d'échanges et la direction des écoulements constituera un outil de diagnostic à l'échelle nationale de toutes les masses d'eau et contribuera à aider les Agences de l'eau pour le rapportage communautaire dans les cas où les études locales font défaut.
    - La recherche de marqueurs ou d'indicateurs de transfert des eaux souterraines vers les eaux de surface a été explorée à travers l'analyse de la présence de différentes substances notamment l'atrazine. L'atrazine est une substance interdite d'usage depuis suffisamment longtemps pour dire que sa présence dans les eaux de surface est d'origine souterraine. Les résultats obtenus à l'échelle du bassin Loire-Bretagne se sont révélés pertinents et encourageants. Des investigations complémentaires mériteraient d'être menées à l'échelle d'autres bassins et pour d'autres molécules également interdites depuis suffisamment longtemps pour ne pas remettre en cause leur origine souterraine dans les eaux de surface.

- L'importance de la dégradation repose sur la comparaison du bassin versant du cours d'eau dont l'état moins que bon incombe aux eaux souterraines avec la superficie de la masse d'eau souterraine concernée. Le test « eau de surface » ne déclasserait alors pas les petits rus mais préférentiellement les grands cours d'eau. Cette étape était peu discriminatoire compte tenu de la superficie des masses d'eau souterraine et de la taille des masses d'eau de surface, peu de cas où le test « eau de surface » déclassait la masse d'eau. Cette question est loin d'être résolue et demanderait une réflexion

spécifique pour ordonner les masses d'eau de surface et identifiée celle qui sont suffisamment importantes pour être à l'origine du déclassement d'une masse d'eau souterraine via le test « eau de surface » de l'enquête appropriée.

Mots-clés : eau souterraine, eau de surface, zone hyporhéique, Directive Cadre sur l'Eau, état chimique

Niveau géographique : national
Couverture géographique : France
Citations locales : masses d'eau souterraine et de surface
Niveau de lecture : Professionnels, experts

CORRESPONDANT ONEMA : STAUB Pierre-Francois

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

Auterives C., Pinson S. (2016) – Impact des eaux souterraines sur les eaux de surface : proposition d'évolution du test « eau de surface ». Rapport final. BRGM/RP-65797-FR. 44 p., 2 tableaux, 23 figures.

© BRGM, 2016, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Sommaire

1. Contexte et objectifs de l'action 13

1.1. CONTEXTE 13

1.2. OBJECTIFS 13

2. Le test « eau de surface » 15

2.1. LA PROCEDURE 15

2.2. REALISATION DU TEST PAR TROIS AGENCES DE L'EAU 17

2.2.1. Loire-Bretagne 17

2.2.2. Seine-Normandie 18

2.2.3. Rhin-Meuse 19

3. Proposition d'évolution du test « eau de surface » 21

3.1. ETAPE 1 : LES MASSES D'EAU DE SURFACE EN MAUVAIS ETAT 21

3.2. ETAPE 2 : LES RELATIONS EAUX DE SURFACE – EAUX SOUTERRAINES 26

3.2.1. Quelle masse d'eau de surface pour quelle masse d'eau souterraine ? . 27

3.2.2. Recherche d'indicateurs du lien eaux de surface – eaux souterraines à travers l'analyse des données qualité des eaux 29

3.3. ETAPE 3 : LA NATURE DU POLLUANT 36

3.4. ETAPE 4 : L'IMPORTANCE DE LA DEGRADATION 39

4. Conclusions 41

5. Bibliographie 43

Liste des tableaux

Tableau 1. Caractéristiques des masses d'eau sélectionnées en Seine-Normandie 30

Tableau 2 : Evaluation de la capacité de transfert à travers la zone hyporhéique des eaux souterraines vers les eaux de surface de quelques substances sélectionnées et VS/NQE (Cary et al., 2015) 38

Liste des figures

Figure 1. Extrait de la procédure d'évaluation de l'état chimique des masses d'eau souterraine (circulaire du 23 octobre 2012) 15

Figure 2. Logigramme du test « eau de surface » (circulaire du 23 octobre 2012)..... 16

Figure 3. Agrégation des éléments de qualité dans la classification de l'état écologique (Arrêté du 27 juillet 2015, annexe 2, page 20, https://www.legifrance.gouv.fr/jo_pdf.do?id=JORFTEXT000031107256)..... 22

Figure 4. NQE des polluants spécifiques ynthétiques identifiés pour l'évaluation de l'état écologique des cours d'eau (Arrêté du 27 juillet 2015, tableau 46, page 43, https://www.legifrance.gouv.fr/jo_pdf.do?id=JORFTEXT000031107256)..... 23

Figure 5. Schéma de la zone hyporhéique (Alley et al. 2002)..... 24

Figure 6. Cycle simplifié de l'orthophosphate (Canton, 2009)..... 25

Figure 7. Masses d'eau de surface (traits colorés), masses d'eau souterraine (surfaces grisées) et stations hydrologiques de suivi de la qualité des eaux de surface (cercles fuscias) sur le bassin Loire-Bretagne 28

Figure 8. Masses d'eau souterraine sélectionnées sur le bassin Seine-Normandie..... 31

Figure 9. Temps de résidence de l'eau dans différents réservoirs (L'eau, Ghislain de Marsily, Dominos Flammarion, 1995) 32

Figure 10. Pesticides les plus quantifiés dans les eaux souterraines en France métropolitaine en 2013 (http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/lessentiel/ar/246/0/pesticides-plus-rencontres-eaux-souterraines.html) 32

Figure 11. Nombre d'analyses mensuelles où a) l'atrazine est quantifiée (> limite de quantification) et b) la concentration en atrazine est supérieure où égale à la norme de 0,1 µg/L rapportés sur le nombre total d'analyses mensuelles sur la période 2007-2014 dans les stations de suivi de la qualité des eaux de surface 33

Figure 12. Localisation des stations hydrologiques de mesures des débits de la Loire 34

Figure 13. Débits moyens mensuels par mois des stations hydrologiques de la Loire sur la période 2007-2014, les stations sont numérotées de 1 à 34 de l'amont vers l'aval (cf. Figure 12)..... 35

Figure 14. Nombre total d'analyses mensuelles de l'atrazine sur les stations hydrologiques du bassin Loire-Bretagne sur la période 2007-2014..... 35

Figure 15. Niveau 1 des masses d'eau souterraine du bassin Loire-Bretagne qui seraient en interaction avec les eaux de surface d'après les analyses en atrazine dans les eaux de surface 36

Figure 16. Concentrations moyennes en chlorures (en mg/L) dans les eaux souterraines et de surface des masse d'eau a) FRHG001 et FRHG102, b) FRHG207 et FRHG005 46

Figure 17. Concentrations maximales en chlorures (en mg/L) dans les eaux souterraines et de surface des masse d'eau a) FRHG001 et FRHG102, b) FRHG207 et FRHG005 47

Figure 18. Concentrations moyennes en cuivre (en µg/L) dans les eaux souterraines et de surface des masse d'eau a) FRHG001 et FRHG102, b) FRHG207 et FRHG005 49

Figure 19. Concentrations maximales en cuivre (en µg/L) dans les eaux souterraines et de surface des masses d'eau a) FRHG001 et FRHG102, b) FRHG207 et FRHG005 50

Figure 20. Concentrations moyennes en cadmium (en µg/L) dans les eaux souterraines et de surface des masses d'eau a) FRHG001 et FRHG102, b) FRHG207 et FRHG005 52

Figure 21. Concentrations maximales en cadmium (en µg/L) dans les eaux souterraines et de surface des masses d'eau a) FRHG001 et FRHG102, b) FRHG207 et FRHG005 53

Figure 22. Concentrations moyennes en plomb (en µg/L) dans les eaux souterraines et de surface des masses d'eau a) FRHG001 et FRHG102, b) FRHG207 et FRHG005 55

Figure 23. Concentrations maximales en plomb (en µg/L) dans les eaux souterraines et de surface des masses d'eau a) FRHG001 et FRHG102, b) FRHG207 et FRHG005 56

1. Contexte et objectifs de l'action

1.1. CONTEXTE

Dans l'application de la Directive Cadre Eau, divers aspects concernent l'analyse qualitative des relations entre les eaux souterraines et les eaux de surfaces tels que i) l'évaluation de l'état chimique des eaux souterraines, ii) la définition des valeurs seuils, iii) l'estimation des pressions et impacts et iv) l'établissement des programmes de surveillance.

Le bon état d'une eau souterraine comme défini à l'article R. 212-12 du code de l'environnement nécessite, entre autres, d'évaluer si les concentrations en polluants dues aux activités humaines ne dépassent ni les normes définies par arrêté du Ministre chargé de l'environnement ni les valeurs seuils établies au niveau national ou des bassins et n'empêchent pas d'atteindre les objectifs fixés pour les eaux de surface alimentées par cette eau souterraine. Ainsi il est demandé de regarder pour quels éléments il existe un risque de dégradation du bon état des eaux de surface du fait d'un apport dominant d'éléments inorganiques ou organiques dissous dans les eaux souterraines en relation avec les eaux de surface.

Pour le prochain rapportage communautaire (2016), l'évaluation de l'état chimique des masses d'eau souterraine à partir des données issues du contrôle de surveillance et du contrôle opérationnel a été menée sur l'ensemble des masses d'eau souterraine par toutes les agences de l'eau. Pour certains paramètres et certaines masses d'eau, le dépassement des valeurs seuils a conduit à mener une enquête appropriée. Dans le déroulé de cette enquête, le test « eau de surface » a pour objectif d'évaluer si les eaux souterraines sont responsables d'un état moins que bon constaté ou à risque des masses d'eau de surface.

Cette démarche a révélé des difficultés de mise en application de la procédure telle qu'elle est décrite actuellement dans la circulaire du 23 octobre 2012 établissant les critères d'évaluation et les modalités de détermination de l'état des eaux souterraines (http://circulaire.legifrance.gouv.fr/pdf/2012/10/cir_35995.pdf).

1.2. OBJECTIFS

L'objectif de cette action est de :

- d'une part de faire un bilan des difficultés et des points bloquant la mise en application du test « eaux de surface », de voir ce qui a pu être fait concrètement dans les différentes Agences de l'eau ;
- et d'autres part, de proposer des améliorations ou des pistes d'investigations pour que le test « eau de surface » puisse être mené de manière homogène à l'échelle nationale et permette d'aboutir à une réponse sur le lien eaux de surface – eaux souterraines. Cette question est souvent restée en suspens par manque d'outils et de données pour y répondre. A l'heure actuelle, chaque Agence de l'eau a adapté le test en fonction des outils, des données et des moyens dont elle disposait ce qui conduit à une hétérogénéité des résultats à l'échelle nationale et rend difficile tout travail de synthèse.

Pour améliorer la mise en application du test « eau de surface » de l'enquête appropriée de la procédure d'évaluation de l'état chimique des masses d'eau souterraines, une première réflexion a été menée sur la comparaison des valeurs seuils (VS) des eaux souterraines et des normes de qualité environnementale (NQE) des eaux de surface où pour un même paramètre celles-ci peuvent être très différentes. Ces réflexions font l'objet d'un précédent rapport (Cary et al., 2015).

L’objectif spécifique de ce rapport consiste tout d’abord à faire un bilan de ce qui a été fait par les différentes Agences de l’eau pour le prochain rapportage (2016) et d’identifier les points bloquants et les difficultés rencontrées. A partir de ce bilan, chaque étape du test « eau de surface » est reprise et analysée. Des propositions sont alors faites pour simplifier la démarche et rendre plus applicable le test dans le but d’arriver à un diagnostic et non pas une absence de réponse par défaut de moyens, d’outils, de données. Certains points sont identifiés comme nécessitant des investigations complémentaires pour pouvoir proposer de nouveaux outils ou indicateurs adéquates.

2. Le test « eau de surface »

2.1. LA PROCEDURE

La procédure d'évaluation de l'état chimique des masses d'eau souterraine est détaillée dans la circulaire du 23 octobre 2012 relative à l'application de l'arrêté du 17 décembre 2008 établissant les critères d'évaluation et les modalités de détermination de l'état des eaux souterraines et des tendances significatives et durables de dégradation de l'état chimique des eaux souterraines (http://circulaire.legifrance.gouv.fr/pdf/2012/10/cir_35995.pdf).

L'évaluation de l'état des masses d'eau souterraine prévoit l'évaluation de deux critères pour un paramètre donné (Figure 1) :

- la moyenne des moyennes annuelles des concentrations (Mma) qui est comparée à une norme ou valeur seuil. En cas de dépassement le point d'eau est identifié comme en mauvais état ;
- la fréquence de dépassement d'une norme ou valeur seuil comparée au seuil de 20 %. En cas de dépassement le point d'eau est identifié en mauvais état.

Si un ou plusieurs points d'eau identifiés comme pertinents et représentatifs de la masse d'eau souterraine sont en mauvais état alors l'enquête appropriée est déclenchée. Cette enquête comporte 5 tests dont le test « eau de surface ».

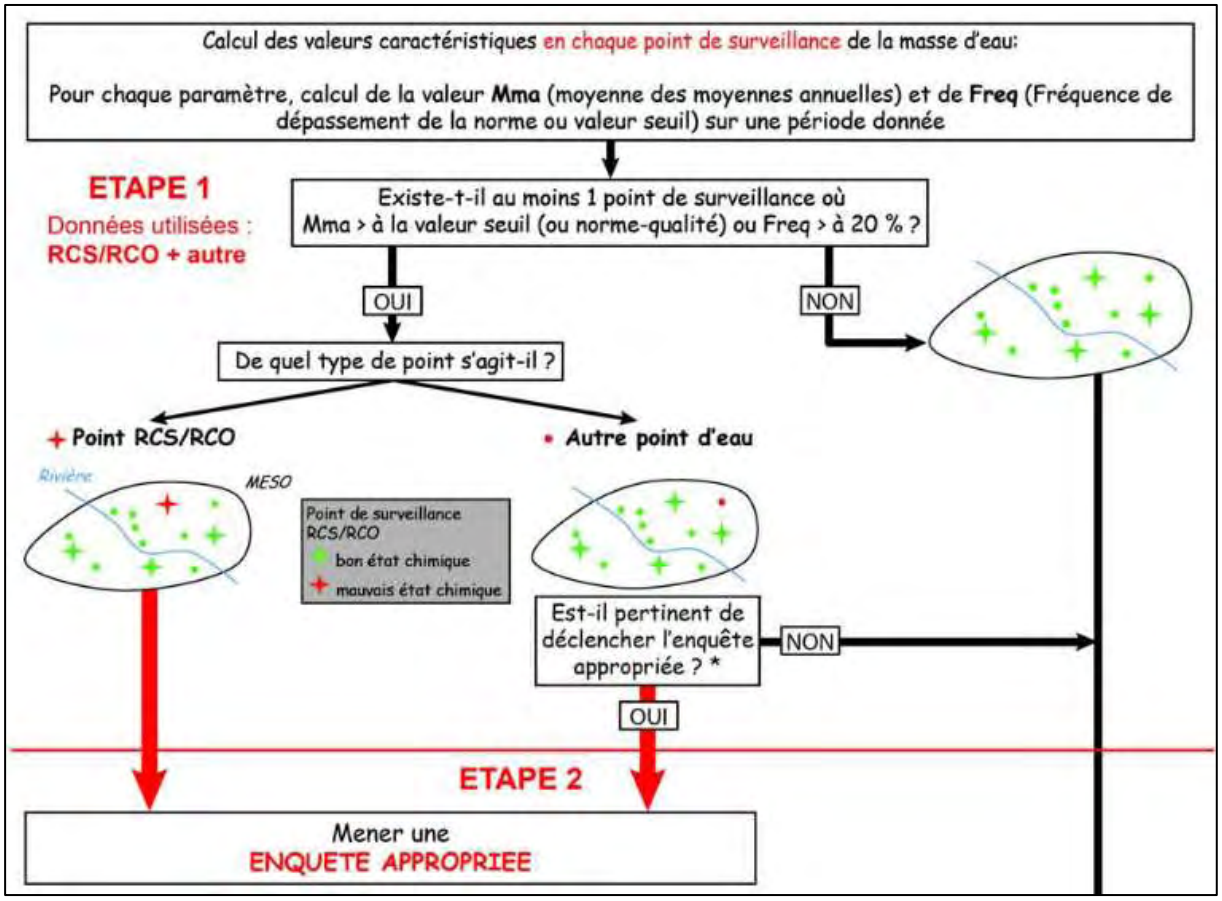


Figure 1. Extrait de la procédure d'évaluation de l'état chimique des masses d'eau souterraine (circulaire du 23 octobre 2012)

L'objectif du test « eau de surface » consiste à évaluer si la qualité des eaux souterraines peut venir dégrader celle des eaux de surface et pose la question de savoir si une substance peut cheminer des eaux souterraines vers les eaux de surface à travers la zone hyporhéique en quantité suffisante pour que les normes de qualité des eaux de surface ne soient plus respectées.

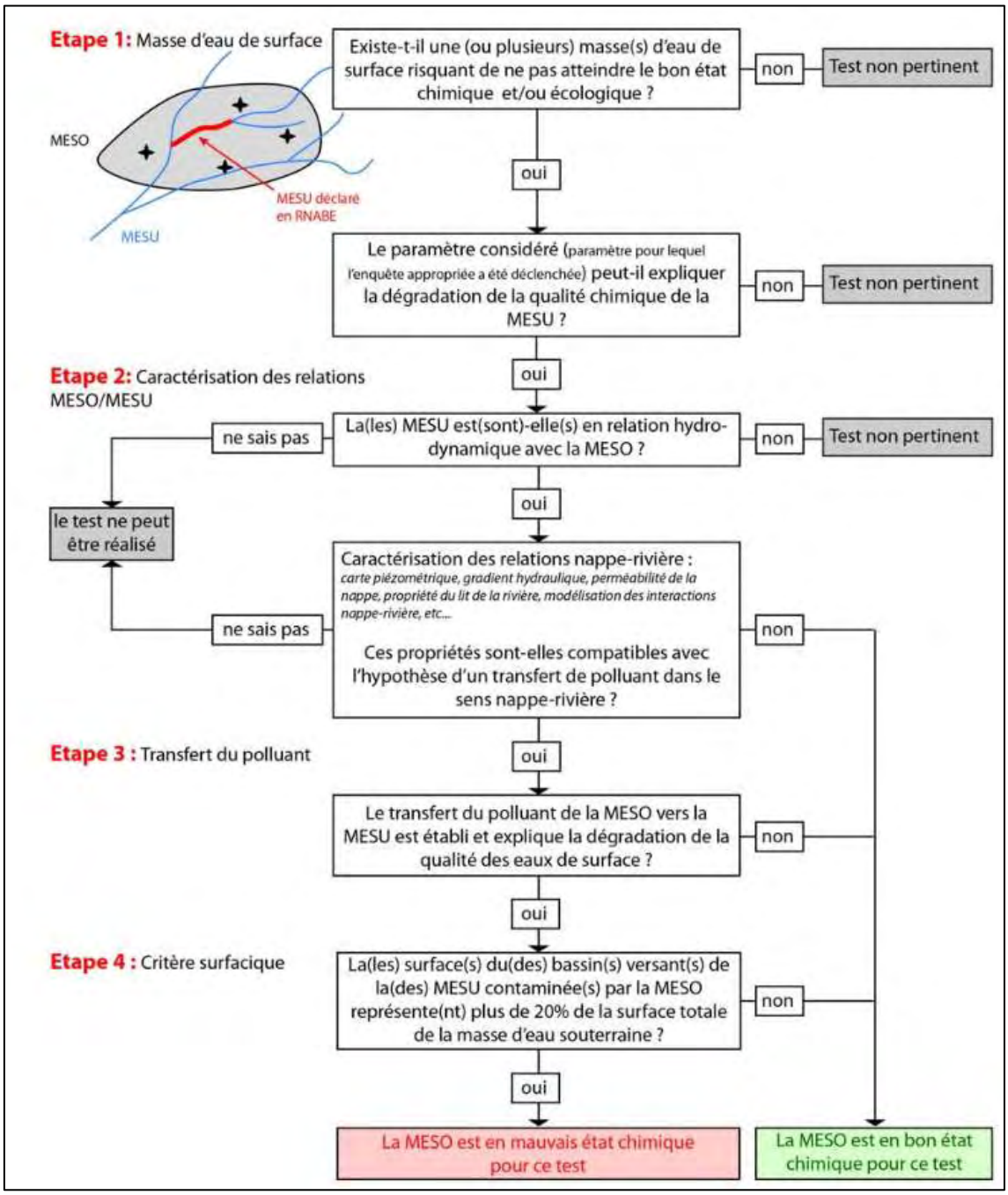


Figure 2. Logigramme du test « eau de surface » (circulaire du 23 octobre 2012)

Le test se décline en quatre étapes (Figure 2) :

- la première consiste à identifier les cours d'eau en mauvais état et repose sur la procédure d'évaluation de l'état des masses d'eau de surface ;
- la deuxième a pour objectif de caractériser les relations eaux de surface – eaux souterraines : à savoir si elles existent et si elles sont dans le sens eaux souterraines → eaux de surface pour permettre le transfert d'une substance ;

- alors que les 2 premières étapes sont communes quel que soit le paramètre, la troisième étape prend en compte le type de polluant ou la substance responsable du mauvais état de la (des) masse(s) d'eau de surface ainsi que les propriétés du polluant. L'objectif est d'identifier si oui ou non le polluant peut traverser la zone hyporhéique ;
- la quatrième étape concerne l'importance de la pollution, cette dégradation des eaux de surface ainsi constatée concerne-t-elle des petits cours d'eau ou des grands fleuves ?

2.2. REALISATION DU TEST PAR TROIS AGENCES DE L'EAU

Ce chapitre résume les travaux menés par trois Agences de l'eau sur la question du test « eau de surface » à partir de documents de synthèse listés ci-après que les Agences concernées nous ont transmis :

- Pour l'Agence de l'eau Loire-Bretagne : Note de travail sur l'évaluation de l'état des eaux souterraines, novembre 2015, D. Gabion.
- Pour l'Agence de l'eau Rhin-Meuse : Etat des lieux du district Rhin-Meuse – parties françaises, méthodes et procédures, novembre 2013.
- Pour l'Agence de l'eau Seine-Normandie : SDAGE 2016-2021, Document d'accompagnement n°7, La synthèse des méthodes et critères servant à l'élaboration des schémas directeurs d'aménagement et de gestion des eaux : Eaux souterraines.

2.2.1. Loire-Bretagne

Pour mener le test « eau de surface », l'agence de l'eau Loire-Bretagne a fait l'hypothèse que les masses d'eau souterraine de niveau 1 sont toujours susceptibles d'apporter un flux de polluant vers les eaux de surface, les étapes 2, 3 et 4 du test « eau de surface » n'ont pas été menées. Cette hypothèse est pertinente puisque naturellement en zone climatique tempérée les eaux de surface viennent drainer les eaux souterraines. Avec cette hypothèse, le risque est d'identifier des masses d'eau souterraine est mauvais état du fait d'une dégradation supposée des eaux de surface alors qu'elle ne le serait pas puisqu'il n'y aurait en fait pas de relations hydrodynamiques. Dans le cadre de la préservation et de la protection des écosystèmes, il est préférable d'identifier un problème qui finalement n'en est pas un que d'ignorer un problème de dégradation des eaux de surface par les eaux souterraines.

Ce test a été réalisé uniquement pour le paramètre nitrate tel que si une masse d'eau de surface était déclassée par le nitrate et que la masse d'eau souterraine était déclassée par le nitrate avec des teneurs localement supérieures à 80 mg/L alors la masse d'eau souterraine est déclassée pour ce test. Cinq masses d'eau sont concernées par cette analyse. Le seuil de 80 mg/L a le mérite de permettre une mise en application très simple sans sujet à discussion mais il est arbitraire et peut conduire à des erreurs de diagnostic. Le cycle de l'azote est complexe et les indicateurs clefs sont à l'heure actuelle manquant pour répondre simplement à cette question.

Avec cette approche, le test « eau de surface » ne vient déclasser uniquement que des masses d'eau déjà déclassées pour le nitrate. Ce test apparait redondant sur le diagnostic de l'état des eaux souterraines. La situation particulière où des dépassements de normes seraient constatés localement mais ne viendraient pas déclasser l'état général de la masse d'eau et où seul le test « eau de surface » viendrait déclasser l'état de la masse d'eau n'est pas rencontré pour ce paramètre. Ces cas particuliers seront d'autant plus rares si les VS eaux souterraines et NQE eaux de surface sont proches.

Ce test n'a été mené que sur le paramètre nitrate alors que le cycle de l'azote est complexe, d'autres éléments peuvent venir dégrader la qualité des eaux de surface (rapport Cary et al., 2015) et les apports par ruissellement sont très certainement loin d'être négligeables.

2.2.2. Seine-Normandie

L'Agence de l'eau Seine-Normandie rapporte que pour le volet « qualité » le test « eau de surface » est menée sur les masses d'eau cours d'eau en état moins que bon et sur les paramètres conditionnant cet état.

Au préalable, une évaluation de la dépendance des rivières par rapport aux apports hydriques des eaux souterraines a été réalisée à partir des études spécifiques sur les volumes prélevables disponibles sur certains bassins versants, de l'analyse des débits estivaux de la région Basse-Normandie et de la modélisation des échanges cours d'eau – masse d'eau souterraine sur la vaste zone centrale du bassin (Pryet, Labarthe et al. 2015). La part des eaux souterraines étant particulièrement importante en période d'étiage, la sensibilité des rivières est évaluée sur le mois où les apports souterrains sont les plus importants. Cette dépendance moyenne, évaluée sur la période 1994-2010, est considérée comme significative à partir de 25 % du débit estival de la masse d'eau cours d'eau issu des eaux souterraines. Ce seuil fixe la limite de contribution significative des eaux souterraines et ce quelle que soit la substance considérée. Ce seuil peut demander à être adapté en fonction des écarts de concentrations entre les eaux de surface et les eaux souterraines, écart entre valeur seuil et norme de qualité environnementale. Plus cet écart sera grand et plus le seuil de contribution significatif des eaux souterraines aux eaux de surface sera faible.

Pour chaque masse d'eau cours d'eau et pour chaque paramètre considéré, la probabilité de dégradation par les apports de polluants d'eau souterraine est estimée par expertise à partir :

- du degré de dépendance de la masse d'eau cours d'eau vis-à-vis des apports hydriques souterrains ;
- des flux massiques de polluant en provenance des eaux souterraines par rapport aux autres apports (rejet, lessivage, etc.) estimés par le modèle SENEQUE (Billen, Garnier et al. 1994) ;
- de la présence de points d'eau souterraine pollués dans le bassin versant du cours d'eau ;
- de l'existence de rejets domestiques ou industriels directs importants (pour les macropolluants) ;
- du fond géochimique pour les éléments pouvant être d'origine naturelle (ex : métaux, phosphates) ;
- de l'examen d'autres paramètres pouvant influencer les conditions de transfert à l'interface eau/sol (ex : faibles concentrations en oxygène, pH, etc.).

La méthode ainsi adoptée présente certaines limites et incertitudes dues :

- à une connaissance insuffisante de la dynamique des processus à l'interface sol (ou sédiment) / eau alors que plusieurs polluants peuvent être absorbés sur des particules ou sur la matière organique, ou au contraire être relargués ;
- à l'absence de données de surveillance, certaines molécules ne sont pas recherchées dans les eaux souterraines, certaines masses d'eau cours d'eau ne sont pas suivies, les performances analytiques des laboratoires ne sont pas toujours compatibles avec les normes de qualité environnementales ;
- à l'absence de modélisation explicite du devenir dans le cours d'eau de rejets directs des métaux et substances organiques d'origine anthropique et de la prise en compte

complète de la contribution de la (des) masse(s) d'eau amont dans le flux global de celle de l'aval réceptrice des flux.

Pour déclarer la masse d'eau non-conforme pour le test « eau de surface » la somme des surfaces des bassins versants des cours d'eau impactés et la surface de la masse d'eau souterraine sont comparées. Si le ratio excède 20% alors la masse d'eau souterraine est considérée non-conforme. Aucune difficulté particulière n'est relevée pour l'application de cette méthode. Il résulte de cette estimation que la qualité de 113 masses d'eau cours d'eau est potentiellement influencée par les apports d'eau souterraine, et 5 masses d'eau souterraine ressortent non conformes.

L'Agence de l'eau Seine-Normandie dispose de résultats de travaux antérieurs sur les échanges nappe – rivière qui contribuent à la réalisation de ce test. Toutefois, malgré ces travaux on ne peut s'affranchir du dire d'expert compte tenu de la complexité de la question.

2.2.3. Rhin-Meuse

Pour la mise en œuvre du test « eau de surface », l'Agence de l'eau Rhin-Meuse, en premier lieu, caractérise le sens des échanges entre eau de surface et eau souterraine.

Le modèle DECLIC (Francois, 1997), détermination des écoulements caractéristiques du linéaire des cours d'eau, développé par le Centre d'Etudes géographiques de l'université de Metz est utilisé par l'Agence de l'eau Rhin-Meuse. Il permet d'estimer les valeurs d'écoulement caractéristiques et débits dont les résultats sont mis en ligne sur le site de l'Agence de l'eau. La couche DECLIC a été croisée avec les masses d'eau de surface et les masses d'eau souterraine afin de déterminer les seuils envisagés. Cette couche ne couvrant pas toutes les masses d'eau de surface du bassin, l'analyse a été élargie et menée sur la couche des QMNA5 (débit mensuel minimal se produisant en moyenne une fois tous les 5 ans) calculée par le modèle PEGASE (Smitz et al. 1997) qui couvre quasiment toutes les masses d'eau de surface (simulation act09a) croisée avec les masses d'eau souterraine de niveau 1. Chaque tronçon de cours d'eau a ainsi été affecté à un couple « masse d'eau de surface – masse d'eau souterraine ». Chaque tronçon est alors caractérisé par rapport à son tronçon amont en termes de variation des débits spécifiques. Si l'on observe une diminution du débit par rapport au tronçon amont, il s'agit de pertes vers les eaux souterraines, à l'inverse, une augmentation du débit traduit un apport par les eaux souterraines. Un taux moyen d'échange est calculé pour chaque tronçon tel que :

$$\Delta\% = 1 - \frac{Q_{S(N-1)}}{Q_{S(N)}}$$

$\Delta\%$ taux d'échange du tronçon considéré
$Q_{S(N-1)}$ *débit spécifique du tronçon amont* $(m^3 s^{-1} km^{-1})$
$Q_{S(N)}$ *débit spécifique du tronçon considéré* $(m^3 s^{-1} km^{-1})$

L'analyse des différents centiles (P10, P25, P50, P75 et P90) détermine la tendance finale :

- de type « perte » : lorsque les échanges sont majoritairement des masses d'eau de surface vers les masses d'eau souterraine ;
- de type « apport » : lorsque les échanges sont majoritairement des masses d'eau souterraine vers les masses d'eau de surface ;
- de type « stagnation » : lorsque les échanges sont réguliers.

Cette approche est complétée par une expertise issue du catalogue des débits mensuels des étiages des bassins du Rhin et de la Meuse en France qui sert de référence (http://www.lorraine.developpement-durable.gouv.fr/debits-mensuels-d-etiage-et-modules-bassin-rhin-r1484.html). 139 couples « masses d'eau de surface – masses d'eau

souterraine » sont ainsi identifiés avec des relations eaux de surface – eau souterraine de type perte. Les situations où la rivière draine la nappe sont majoritaires dans le bassin.

Pour une détermination quantitative des échanges, les pistes retenues sont de travailler sur les coefficients de tarissement modaux ou les indices d'écoulement de base des bassins versants. Cependant dans l'état actuel des connaissances, la mise en œuvre du test n'a pas abouti.

L'Agence de l'eau Rhin-Meuse, à partir des outils disponibles, a développé une méthode de caractérisation des relations eaux de surface – eaux souterraines qui demande encore des investigations. Ces travaux alors achevés permettront de répondre, quel que soit le paramètre, aux étapes 1 et 2 du test « eau de surface ».

Compte tenu des investigations et des travaux menés, les Agences de l'eau aboutissent à des liens eaux de surface – eaux souterraine pour répondre aux étapes 1 et 2 du test « eau de surface ». A défaut, le postulat proposé est de considérer les eaux de surface comme drainant les eaux souterraines comme c'est généralement le cas dans les zones tempérées. Le risque dans cette hypothèse est de prendre en compte des relations eaux de surface – eaux souterraines qui n'existent pas mais évite d'ignorer des cas de transfert des eaux souterraines vers les eaux de surface qui pourraient venir en dégrader l'état.

3. Proposition d'évolution du test « eau de surface »

Ce chapitre a pour objectif de reprendre individuellement les différentes étapes du test « eau de surface », d'identifier les points bloquants et de proposer des pistes d'améliorations, des évolutions ou des outils permettant d'améliorer la faisabilité du test.

3.1. ETAPE 1 : LES MASSES D'EAU DE SURFACE EN MAUVAIS ETAT

L'étape 1 pose deux questions :

1) **Existe-t-il une ou plusieurs masses d'eau de surface risquant de ne pas atteindre le bon état chimique et/ou écologique ?**
2) **Si oui, le paramètre considéré peut-il expliquer la dégradation de la qualité chimique des eaux de surface ?**

La première question n'est pas suffisamment précise, elle fait référence aux masses d'eau de surface risquant de ne pas atteindre le bon état, or il s'agit des masses d'eau de surface à risque et des masses d'eau en état moins que bon.

Ensuite, sur quelle évaluation se baser ? La réponse la plus pertinente est l'évaluation de l'état des eaux de surface du rapportage pour lequel on rapporte l'état des eaux souterraines et des eaux de surface. Pour le rapportage communautaire (2016), l'évaluation des eaux de surface pour 2016 doit être utilisée pour mener le test « eau de surface » de l'enquête appropriée de l'évaluation de l'état chimique des eaux souterraines. Cela implique que l'évaluation de l'état des eaux de surface devra anticiper celle de l'évaluation de celui des eaux souterraines. A défaut, l'évaluation de l'état du précédent rapportage pourra être utilisée.

Dans la deuxième question intervient le type de paramètre et le lien entre le paramètre déclassant les eaux de surface et le paramètre ayant déclenché l'enquête appropriée pour les eaux souterraines. Lorsqu'il s'agit de molécules synthétiques qui n'existent pas dans le milieu naturel, il apparait évident qu'il s'agit de prendre en compte le même paramètre pour les eaux de surface et les eaux souterraines comme l'atrazine, le glyphosate, etc. La question est plus difficile lorsque les causes de dégradation des eaux de surface sont par exemple « un excès de nutriments », de quel(s) nutriment(s) s'agit-il ? « un enrichissement en matière organique » ou « une eutrophisation du cours d'eau » : quel(s) paramètre(s) doit-on prendre en compte ?

Récemment, la procédure d'évaluation de l'état des eaux de surface a évolué et quelque peu clarifié les causes de dégradation des eaux de surface. La démarche est décrite dans l'arrêté du 27 juillet 2015 modifiant l'arrêté du 25 janvier 2010 relatif aux méthodes et critères d'évaluation de l'état écologique, de l'état chimique et du potentiel écologique des eaux de surface pris en application des articles R. 212-10, R. 212-11 et R. 212-18 du code de l'environnement (https://www.legifrance.gouv.fr/jo_pdf.do?id=JORFTEXT000031107256). L'évaluation de l'état des eaux de surface se fait par :

- L'évaluation d'un état (ou potentiel) écologique et,
- l'évaluation d'un état chimique.

Pour l'évaluation de l'état écologique, sont pris en compte : la qualité biologique, la qualité physico-chimique et l'hydromorphologie. L'agrégation des éléments de qualité dans la classification de l'état écologique met en évidence que les conditions physico-chimiques ne peuvent à elles-seules conduire à un état médiocre ou mauvais (Figure 3). Elles peuvent être responsables d'un état moyen si le fonctionnement de l'écosystème n'est pas assuré ou si

les normes de qualité environnementales (NQE) ne sont pas respectées pour les polluants spécifiques.

L'état moyen est déclaré pour un excès de nutriments lorsque les concentrations en phosphates (PO_4^{3-}) excède 0,5 mg/L de phosphates (ou orthophosphates) (PO_4^{3-}), 0,2 mg/L en phosphore total, 0,5 mg/L d'ammonium (NH_4^+), 0,3 mg/L de nitrites (NO_2^-) et 50 mg/L de nitrates (NO_3^-).

La liste des polluants spécifiques non synthétiques de l'état écologique ne concerne plus que 4 paramètres depuis le 22 décembre 2015 (arrêté du 27 juillet 2015, https://www.legifrance.gouv.fr/jo_pdf.do?id=JORFTEXT000031107256), à savoir le zinc, l'arsenic, le cuivre et le chrome dont les NQE sont respectivement 7,8 mg/L, 0,83 mg/L, 1 mg/L et 3,4 mg/L. A cette liste s'ajoutent 27 substances spécifiques synthétiques (Figure 4) pour lesquelles une NQE est définie et s'applique en fonction du bassin. A titre d'exemple, la NQE du métazachlore de 0,019 µg/L ne s'applique qu'aux bassins métropolitains, cette NQE ne concerne pas les bassins d'outre-mer.

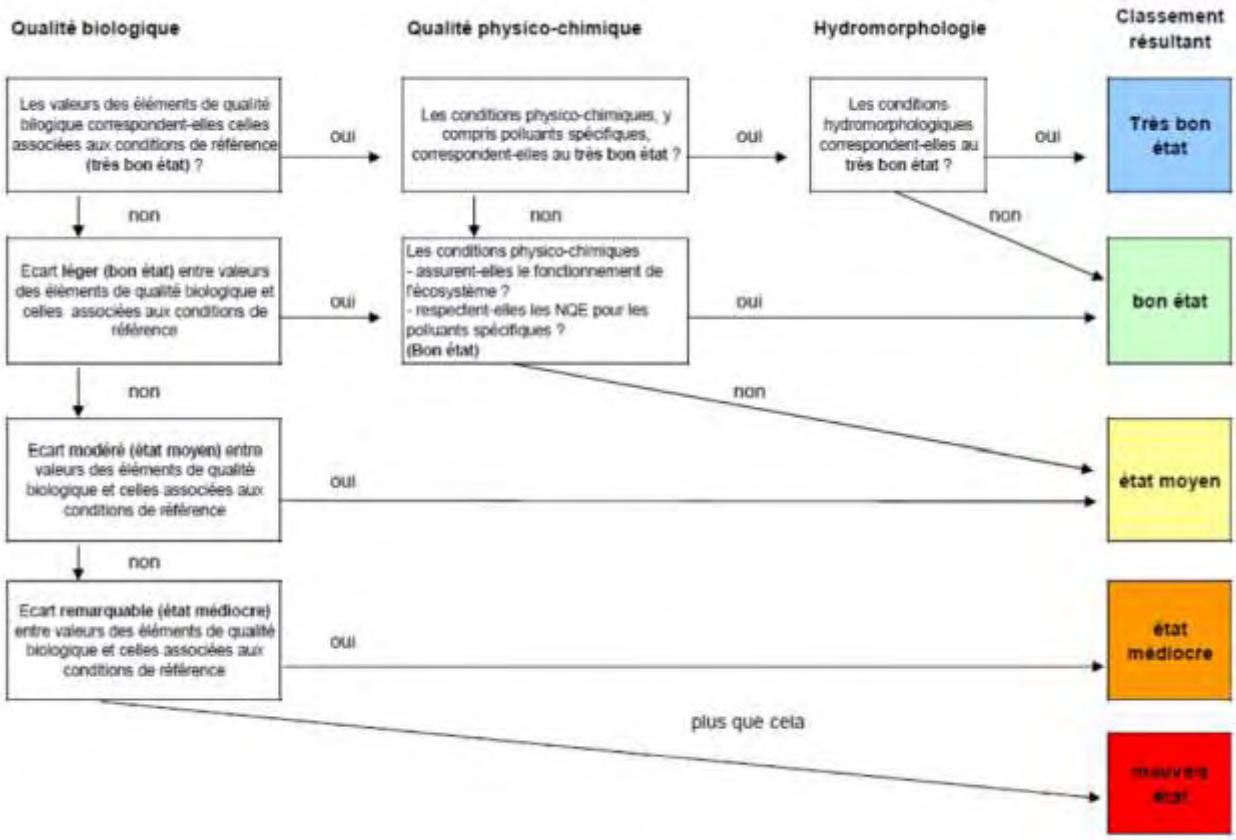


Figure 3. Agrégation des éléments de qualité dans la classification de l'état écologique (Arrêté du 27 juillet 2015, annexe 2, page 20, https://www.legifrance.gouv.fr/jo_pdf.do?id=JORFTEXT000031107256)

CODE Sandre	NOM SUBSTANCE	BASSINS POUR LESQUELS LA NORME S'APPLIQUE												NQE en moyenne annuelle – Eaux douces de surface (µg/L)
		Adour-Garonne	Artois-Picardie	Loire-Bretagne	Rhin-Meuse	Rhône-Méditerranée	Corse	Seine-Normandie	Guadeloupe	Guyane	Martinique	Mayotte	Réunion	
1136	Chlortoluron	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	0,1
1670	Métazachlore	X	X	X	X	X	X	X						0,019
1105	Aminotriazole	X	X	X	X	X	X	X						0,08
1882	Nicosulfuron	X		X	X	X	X	X						0,035
1667	Oxadiazon	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	0,09
1907	AMPA	X	X	X	X	X	X	X						452
1506	Glyphosate	X	X	X	X	X	X	X						28
1113	Bentazone	X												70
1212	2,4 MCPA	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	0,5
1814	Diflufenicanil		X	X	X	X	X	X						0,01
1359	Cyprodinil		X			X	X							0,026
1877	Imidaclopride		X					X						0,2
1206	Iprodione		X											0,35
1141	2,4 D		X	X	X			X	X	X	X	X	X	2,2
1951	Azoxystrobine		X											0,95
1278	Toluène			X										74
1847	Phosphate de tributyle		X			X	X							82
1584	Biphényle							X						3,3
5526	Boscalid			X				X						11,6
1796	Métaldéhyde			X				X						60,6
1694	Tebuconazole				X									1
1474	Chlorprophame		X			X	X	X						4
1780	Xylène							X						1
1209	Linuron								X	X	X	X	X	1
1713	Thiabendazole										X			1,2
1866	Chlordécone								X		X			5e-06
1234	Pendiméthaline					X	X							0,02

Figure 4. NQE des polluants spécifiques ynthétiques identifiés pour l'évaluation de l'état écologique des cours d'eau (Arrêté du 27 juillet 2015, tableau 46, page 43, https://www.legifrance.gouv.fr/jo_pdf.do?id=JORFTEXT000031107256)

Avant l'arrêté du 27 juillet 2015, les causes de déclassement des eaux de surface n'étaient pas aussi explicites avec des concentrations clairement définies, les causes de déclassement proposées étaient « excès en nutriments » ou « enrichis en matière organique », le lien avec une ou plusieurs substances (paramètres) spécifiques de l'état des

eaux souterraines n'était pas aisé. Une liste claire des substances facilite la tâche. Pour les polluants spécifiques, synthétiques ou non, seules les données du polluant en question seront prises en compte dans l'évaluation de l'état des eaux souterraines à travers le test « eau de surface ».

La difficulté porte sur les nutriments (nitrates, nitrites, ammonium et phosphates, phosphore total). La zone hyporhéique (Figure 5) constitue une zone de stockage des nutriments qui est le siège d'une activité métabolique importante (Datry et al., 2011). Les cycles biogéochimiques de l'azote et du phosphore sont des cycles complexes dont la forme de l'élément va dépendre des conditions du milieu et plus spécifiquement des conditions d'oxydoréduction. L'interface eau souterraine – eau de surface de la zone hyporhéique est souvent caractérisée par des conditions d'oxydoréduction variables affectant la mobilité des éléments (Cary et al., 2015 ; Vernoux et al., 2010). Cette zone d'interactions entre la nappe et les eaux de surface peut fluctuer dans le temps (entre les périodes de drainage et les périodes de recharge des nappes) et dans l'espace (entre les zones d'entrée d'eau superficielle dans les sédiments et de sortie d'eau souterraine). Certains éléments pourront s'accumuler dans les sédiments de la zone hyporhéique dans un sens d'écoulement de l'eau, puis être remobilisés lors de l'inversion du courant.

Figure 5. Schéma de la zone hyporhéique (Alley et al. 2002)

Malgré le nombre important de travaux décrivant la transformation des nitrates dans la zone hyporhéique il est encore très difficile de déterminer les conditions qui font que cette zone agit comme un puits ou une source d'azote pour le cours d'eau (Dent et Grimm, 2000). Jones et Holmes (1996) proposent un modèle conceptuel de fonctionnement où la fonction puits ou source va dépendre de la richesse en azote du cours d'eau : la zone hyporhéique des cours d'eau riches en azote serait un puits de nitrates consommés par dénitrification tandis que dans les cours d'eau limités en azote, les processus de nitrification seraient dominants et entraineraient une augmentation des nitrates dans les cours d'eau. Peyrard (2008) écrit que plusieurs travaux dans des cours d'eau limités en azote et les rares travaux menés dans les cours d'eau riches en nitrates s'accordent généralement bien avec cette hypothèse. Toutefois, il existe une infinité de possibilités entre ces deux cas « extrêmes ». L'importance relative de chacun de ces processus est déterminée par l'intensité des échanges avec l'eau de surface, la qualité des eaux de surface et souterraine (notamment

les concentrations en nitrates, ammonium et carbone organique dissous) qui se mélangent au niveau de la zone hyporhéique, les populations bactériennes, la température et les teneurs en oxygène (Duff et Triska, 2000 ; Iribar et al., 2008).

Le phosphore (P) est généralement le principal élément limitant la croissance primaire des organismes vivants autotrophes, tels que les algues ou certaines bactéries autotrophes, dans les eaux de surface. Une augmentation de sa concentration sous forme dissoute, seule forme assimilable par les organiques vivants, favorise donc le développement et la croissance des producteurs primaires, conduisant à des problèmes d'eutrophisation de ces écosystèmes. Le phosphore n'existe quasiment pas à l'état gazeux ce qui restreint son cycle aux échanges entre le biota, le milieu aquatique et le milieu continental. Le phosphore est peu biodisponible ce qui fait de lui un élément très dynamique, soumis à un recyclage intense (Figure 6). L'orthophosphate, couramment appelé phosphate, est la seule forme minérale biodisponible pour les autotrophes. Selon le pH, le phosphate se distribue dans les formes PO_4^{3-}, HPO_4^{2-}, $H_2PO_4^-$ ou H_3PO_4. L'essentiel des flux de phosphore entre les différents réservoirs se fait par voie hydrologique et essentiellement sous forme particulaire. C'est donc les particules en suspension (argile, oxydes, carbonates, matière organique) qui régissent les flux de phosphore (Canton, 2009).

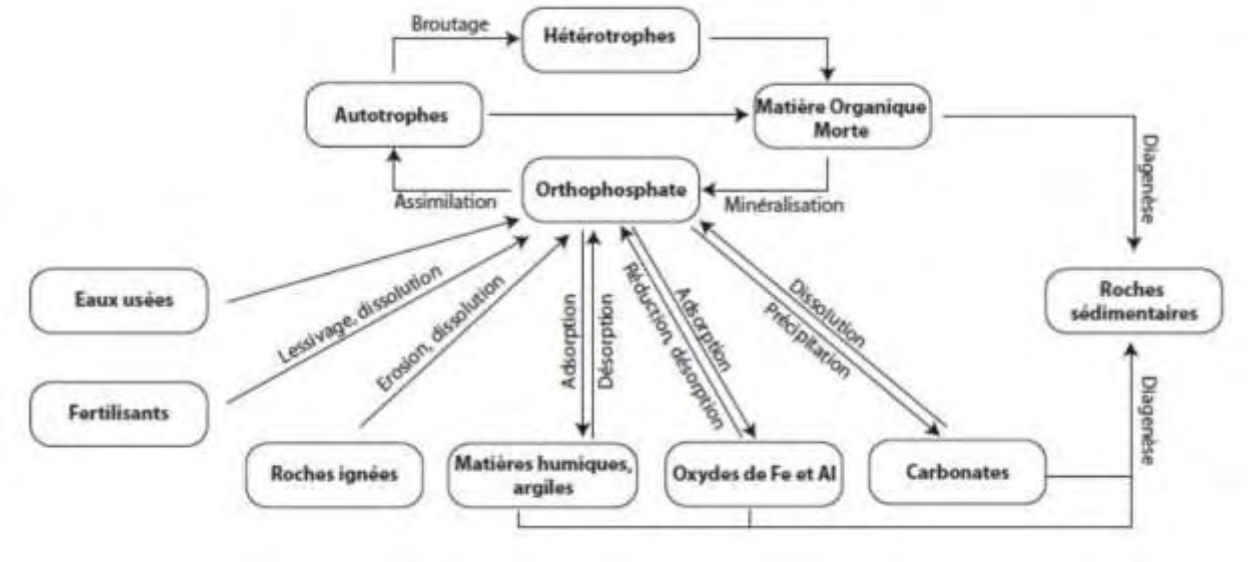


Figure 6. Cycle simplifié de l'orthophosphate (Canton, 2009)

Jusqu'à présent, la contribution des eaux souterraines à la régulation de la concentration en P des eaux de surface a été considérée comme négligeable. En effet, l'ion phosphate étant très réactif, l'hypothèse communément admise est que le transfert de P entre les eaux souterraines et les eaux de surface est faible. Or, plusieurs travaux récents ont montré que la contribution des eaux souterraines à la régulation de la concentration en P dans les eaux de surface peut être significative suivant la concentration en P dans les eaux souterraines et les conditions hydrogéologiques (Neal et al., 2008; Holman et al., 2008). En conséquence, il semble que le rôle des eaux souterraines puisse être important dans la mise en place des phénomènes d'eutrophisation. Pour appréhender correctement le rôle des eaux souterraines dans la régulation de la concentration en P dans les eaux de surface, il est nécessaire (i) de définir la nature et les mécanismes de transfert du P d'origine anthropique vers les eaux souterraines, (ii) de décrire quels sont les facteurs hydrogéologiques permettant le transfert de P des eaux souterraines vers les eaux de surface et (iii) la sensibilité des eaux de surface à un apport de P provenant des eaux souterraines.

La contamination des eaux de surface par le phosphore est une des premières causes de dégradation du bon état écologique de ces écosystèmes. Les travaux récents montrent que les eaux souterraines enrichies en phosphore sont susceptibles d'être une source de contamination majeure pour plusieurs systèmes hydrologiques (rivières, marais, lacs, etc.). Bien que les principaux critères de vulnérabilité des eaux de surface à une contamination en phosphore aient commencé à être identifiés au cours des dernières années, leur compréhension précise est toujours limitée. Plusieurs verrous scientifiques sont identifiés et ciblent les besoins d'investigations complémentaires sur la question :

- Difficulté de caractériser les différentes formes du phosphore présentes dans les eaux : les méthodes actuelles ne permettent pas de distinguer les formes dissoutes susceptibles d'impacter le bon état écologique des formes particulaires (sorbées sur des colloïdes) assimilables par les producteurs primaires ;
- Problème des limites de quantification variables en fonction des méthodes employées et trop élevées (définies à partir des seuils de potabilité) par rapport à la définition d'un bon état écologique des eaux de surface ;
- Absence de plan d'échantillonnage, ce qui ne permet pas d'appréhender la variabilité spatio-temporelle des concentrations en phosphore dans les eaux souterraines ni de distinguer les aquifères impactés par une source de contamination anthropique ;
- Quantification de l'intensité des mécanismes biogéochimiques en fonction des conditions hydrogéologiques qui régulent la mobilité et donc le transfert du phosphore particulaire des eaux souterraines vers les eaux de surface à travers la zone hyporhéique.

En conséquence, il n'est pas possible d'envisager ces approches autrement qu'à l'échelle locale. Dans le cas de dégradation des cours d'eau pour cause d'eutrophisation où les eaux souterraines contribuent à l'écoulement des eaux de surface, il est nécessaire d'envisager une étude à l'échelle locale, aucun indicateur ne permet à l'heure actuelle de répondre à la question plus simplement.

En conséquence, lorsque les causes de dégradation des eaux de surface concernent un problème d'eutrophisation des cours d'eau ou d'enrichissement en matière organique, les concentrations en nutriments (azote, phosphore) sont mises en causes. Dans ces conditions, il est préférable d'envisager une étude locale ou alors d'envisager des études complémentaires pour identifier des critères et des indicateurs spécifiques à cette problématique.

Pour le cas où la dégradation des masses d'eau de surface concerne le zinc, l'arsenic, le cuivre et le chrome ou l'une des 27 substances listées dans l'arrêté du 27 juillet 2015 (Figure 4, https://www.legifrance.gouv.fr/jo_pdf.do?id=JORFTEXT000031107256), le paramètre considéré pour les eaux de surface et les eaux souterraines est identique. Si l'état (ou le risque d'état) moins que bon des eaux de surface n'est pas dû au paramètre qui a déclenché l'enquête pour les eaux souterraines appropriée alors le test « eau de surface » n'est pas pertinent et n'a pas lieu d'être mené jusqu'au bout.

3.2. ETAPE 2 : LES RELATIONS EAUX DE SURFACE – EAUX SOUTERRAINES

L'étape 2 du test « eau de surface » de l'enquête appropriée concerne la caractérisation des relations nappe – rivière et pose deux questions :

1) **La ou les masses d'eau de surface sont-elles en relation hydrodynamique avec les eaux souterraines ? »**

2) **Si oui : « les propriétés et caractéristiques des relations nappe-rivière sont-elles compatibles avec l'hypothèse d'un transfert de polluant dans le sens nappe-rivière ? »**

Trois réponses étaient alors possibles :

- Oui, par défaut, les eaux souterraines sont drainées par le réseau hydrographique, alors on passe à l'étape 3.
- Non, les eaux souterraines ne sont pas en interaction avec les eaux de surface ou les circulations si elles existent ne se font pas dans le sens nappe → rivière, alors le test n'est pas pertinent, l'hypothèse d'un transfert de polluant est rejetée, la masse d'eau n'est alors pas déclassée par le test « eau de surface ».
- Ne sais pas, le test n'est pas réalisé et s'arrête il n'y avait tout simplement pas de réponse.

Les deux questions qui se suivent finalement ne posent qu'une seule et même question : **Le(s) MESU identifiée(s) drainent-elles les eaux souterraines ?** Pour plus de clarté, l'étape 2 pourrait se résumer à cette question.

La réponse « ne sait pas » était initialement prévue pour les cas où les éléments disponibles ne permettaient pas de répondre à la question. Cette situation s'est révélée très fréquente et a conduit de nombreuses fois à ne pas réaliser le test. De ce constat, il est proposé de supprimer cette possibilité de réponse et de ne conserver que les réponses :

- Oui, les eaux de surface drainent les eaux souterraines, on passe à l'étape 3. Les cas où la réponse « ne sais pas » a été choisie se retrouvent dans cette catégorie et permettent de continuer le test « eau de surface ».
- Non, les eaux de surface ne drainent pas les eaux souterraines, le test « eau de surface » n'a pas de pertinence. La masse d'eau ne sera pas déclassée par le test « eau de surface ».

Nombreuses méthodes (hydrologiques, hydrogéologiques, chimiques, écologiques, géophysiques, numériques, etc.) à partir de données très diverses (mesures de piézométrie, de débit, de niveau d'eau, de perméabilité, de concentrations en éléments majeurs et traces, de concentrations isotopiques, de température, d'inventaire faunistique, etc.) dans différents contextes d'eau de surface (cours d'eau, plan d'eau, zone humide) sont envisageables (Brugeron et Bessiere, 2014 ; Brugeron et al. 2016, résultats du projet NAPROM) pour caractériser les relations nappe – rivière mais leur échelle d'application locale les rend inappropriées lorsqu'il s'agit d'envisager la question à l'échelle nationale pour toutes les masses d'eau souterraine.

3.2.1. Quelle masse d'eau de surface pour quelle masse d'eau souterraine ?

Indirectement cette étape 2 du test « eau de surface », en plus d'interroger sur l'existence d'un lien, pose la question de quelle masse d'eau de surface draine quelle masse d'eau souterraine ? En effet, doit-on sélectionner toutes les masses d'eau de surface directement à l'aplomb de la masse d'eau souterraine ? Si oui qu'en est-il des masses d'eau de surface qui surplombent plusieurs masses d'eau souterraine. Une même masse d'eau de surface serait alors à relier à plusieurs masses d'eau souterraine. A titre d'exemple, la Figure 7 est un zoom sur le bassin Loire-Bretagne où les masses d'eau souterraine sont représentées en différentes nuances de gris et les masses d'eau de surface en couleur, chaque changement de couleur ou de nuance indique une masse d'eau différente. La masse d'eau de surface GR0227 en vert sur laquelle est centrée la figure s'écoule à l'aplomb de plusieurs masses d'eau souterraine : GG061, GG129 et GG130. Sachant que le bassin Loire-Bretagne compte 142 masses d'eau souterraine avec un niveau 1 et 1940 masses d'eau de surface, on se rend compte que le traitement des données à une échelle nationale voire de bassins est

difficile. Cette première proposition pour relier les masses d'eau de surface aux masses d'eau souterraine tient compte de l'emprise de la masse d'eau de surface. Cependant les données qualité des eaux de surface sont à rattacher à une station de mesure qui représente l'eau de surface là où elle est prélevée et pas forcément la qualité des eaux de surface sur toute la masse d'eau de surface. Le prélèvement représente l'intégration des eaux de la partie amont du cours d'eau et apparait peu différente des eaux situées juste en aval du point de prélèvement. Reprenons l'exemple de la station de mesure numéro 4025040 de la masse d'eau de surface GR0227 : Doit-on rattacher la station, et donc la masse d'eau de surface associée, à la masse d'eau de niveau 1 rencontrée à l'aplomb de cette station (ici GG061) ? ou alors aux 2 masses d'eau souterraine sur la parcours de la partie amont à la station de la masse d'eau GR0227 à savoir GG061 et GG130 ? La réponse probablement facile pour nombre de cas ne l'est pas ici et ne peut se satisfaire d'un croisement automatique géographique entre le référentiel des masses d'eau de surface, des stations de surveillance de la qualité des eaux de surface et des masses d'eau souterraine.

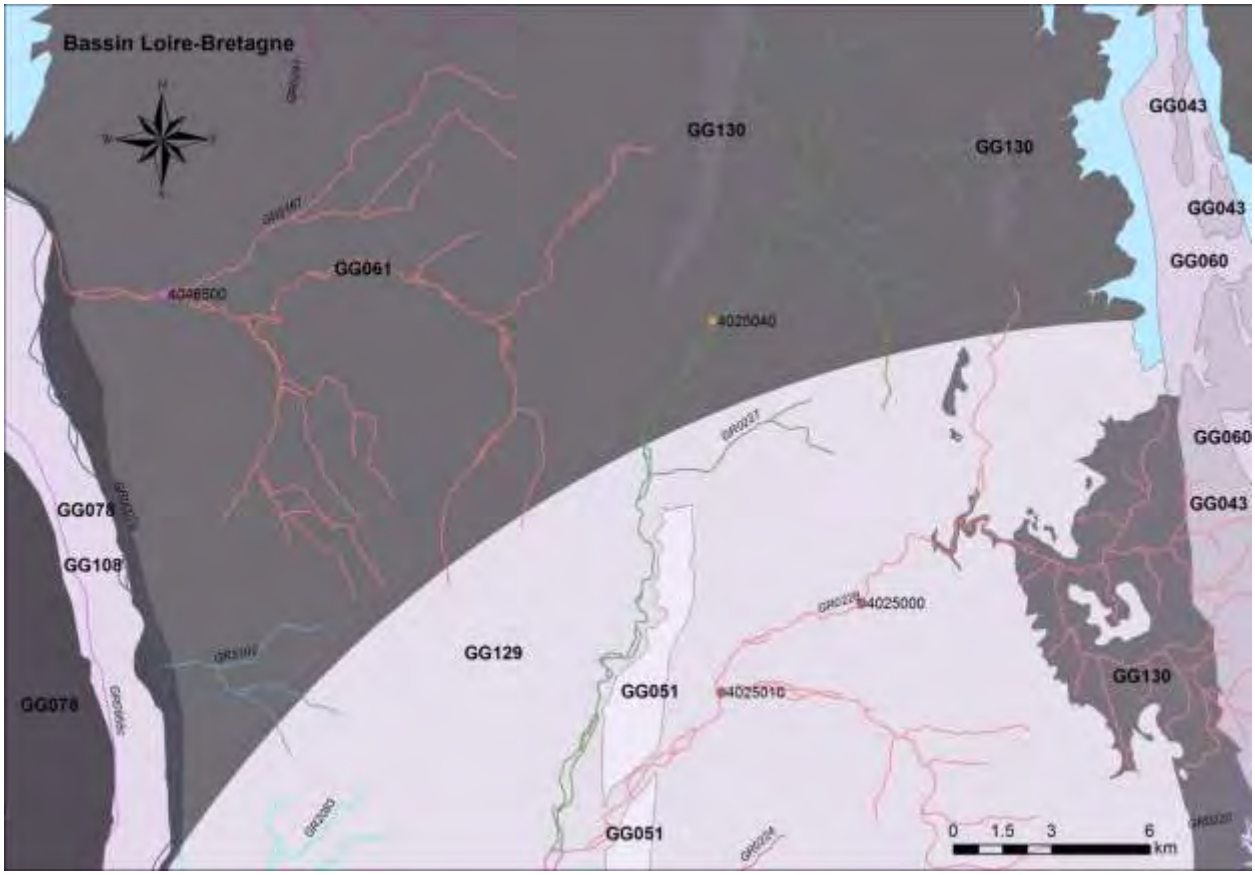


Figure 7. Masses d'eau de surface (traits colorés), masses d'eau souterraine (surfaces grisées) et stations hydrologiques de suivi de la qualité des eaux de surface (cercles fuscias) sur le bassin Loire-Bretagne

L'option de sélectionner toutes les masses d'eau souterraine (niveau 1) sur lequel s'écoule la masse d'eau de surface en question conduit à ne négliger aucune possibilité mais conduit à sélectionner des masses d'eau non pertinentes comme dans l'exemple pour la GG129 et accroitre le nombre de données à traiter. A l'échelle nationale, la charge de travail supplémentaire peut être significative et engager des moyens humains qui ne sont pas toujours disponibles. L'option de sélectionner uniquement la masse d'eau souterraine (niveau 1) à l'aplomb de la station de mesure de qualité des eaux de surface facilite la tâche, conduit à n'associer qu'une seule masse d'eau souterraine par station de mesure qualité et donc à limiter le nombre de masses d'eau souterraine par masse d'eau de surface.

A titre d'exemple sur le bassin Loire-Bretagne, pour rendre de compte des différences de volumétrie entre ces 2 approches très simples qui pourraient être mises en place à défaut d'autres outils disponibles dans les Agences :

- Option 1 : l'association géographique entre les masses d'eau de surface (emprise complète) et les masses d'eau souterraine conduit à 3 705 associations pouvant conduire jusqu'à 9 masses d'eau souterraine pour une seule et même masse d'eau de surface ;
- Option 2 : l'association géographique entre la station de surveillance qualité, la masse d'eau de surface qu'elle représente et la masse d'eau souterraine (niveau 1) située à l'aplomb de la station de mesure conduit à 1 seule masse d'eau souterraine par station de prélèvement soit 927 associations et 789 associations entre masses d'eau de surface et masse d'eau souterraine avec jusqu'à 6 masses d'eau souterraine pour une seule et même masse d'eau de surface.

L'option la plus pertinente si on doit ne faire qu'un traitement cartographique simpliste de la question serait d'associer la station de prélèvement à la partie amont de la masse d'eau de surface qu'elle représente et de faire le croisement géographique sur cet échantillonnage des masses d'eau de surface. Pour l'exemple proposée cela reviendrait à associer la masse d'eau de surface GR0227 aux masses d'eau souterraine GG130 et GG061. Pour un traitement efficace, les 2 options pourraient être gérer de manière automatique avec des outils SIG pour ensuite comparer les résultats. En cas de résultats identiques, le lien masse d'eau de surface – masse d'eau souterraine est validé, en cas de divergence, regarder au cas par cas pour valider le lien le plus pertinent. Les travaux en cours sur la réalisation du test « eau de surface » pour l'évaluation de l'état quantitatif des masses d'eau souterraines devront être pris en compte pour la réalisation de cette étape. Les travaux, non finalisés, n'ont pas pu être pris en compte dans ce rapport.

Pinson et al. (2010) ont mené des travaux sur la contribution des eaux souterraines aux écoulements totaux des masses d'eaux de surface sur le bassin Loire-Bretagne. Ils combinent approche qualitative (classification des bassins versants en 10 grands types) et quantitative (modélisation TEMPO et GARDENIA) pour estimer la contribution moyenne des eaux souterraines au débit des rivières.

Brugeron et al. (2012) ont exploré une approche cartographique du lien potentiel entre piézomètre et cours d'eau environnant. Leurs travaux ont conduit à l'identification de piézomètres représentatifs de relation nappe-rivière, à la détermination de la direction des écoulements souterrains, à l'identification du tronçon de cours d'eau le plus hypothétiquement relié à la nappe captée par le piézomètre en question et à la nature des échanges nappe-rivière. Ces premiers travaux sont encourageants et mériteraient d'être repris pour validation et pour aller plus loin dans la démarche en reliant ces résultats aux référentiels DCE des masses d'eau souterraine et des masses d'eau de surface.

3.2.2. Recherche d'indicateurs du lien eaux de surface – eaux souterraines à travers l'analyse des données qualité des eaux

Pour aborder la question du lien eau de surface – eau souterraine à l'échelle nationale, un traitement des données qualité des eaux est proposé en comparant la qualité des eaux de surface et la qualité des eaux souterraines pour un même paramètre. L'objectif de cette approche est d'identifier des marqueurs ou traceurs du lien eaux de surface – eaux souterraines.

Le travail précédent de réflexion sur les valeurs seuils et les normes de qualité environnementales a permis d'identifier des paramètres suivi à la fois dans les eaux souterraines et dans les eaux de surface pour lesquels la valeur seuil dépasse la NQE (Cary et al., 2015). Parmi eux, trois paramètres ont été sélectionnés : le cuivre, le cadmium et le

plomb. L'idée est de comparer les données des qualitomètres de suivi des eaux souterraines et des stations de suivi de la qualité des eaux de surface sur la base d'un traitement SIG et d'un traitement statistique des données. Le choix de ces trois paramètres repose 2 critères : il s'agit d'éléments déclassant les eaux souterraines du bassin Seine-Normandie et leur fréquence d'analyses est suffisante pour envisager une approche statistique. A ces 3 paramètres, sont ajoutés les chlorures, paramètre chimique conservatif pendant son transfert à travers la zone hyporhéique et l'atrazine, substance synthétique qui n'existe pas à l'état naturel et dont l'usage est interdit depuis 2003.

L'analyse statistique et cartographique de ces 5 paramètres : le cuivre, le cadmium, le plomb, les chlorures et l'atrazine a été menée sur le bassin Seine-Normandie pour les 4 premiers et sur le bassin Loire-Bretagne pour le dernier pour une raison de disponibilité des données. Sur le bassin Seine-Normandie, l'analyse n'a concerné que quelques masses d'eau souterraine sélectionnées sur plusieurs critères :

- Les masses d'eau souterraine ont été identifiées en mauvais état chimique lors du précédent rapportage ;
- Elles sont de type alluvial ou sédimentaire où l'on attend préférentiellement des relations nappe – rivière ;
- La bonne connaissance des écoulements souterrains, l'abondance de qualitomètres de suivi des eaux souterraines et de stations de suivi de la qualité des eaux de surface sont des critères de sélection supplémentaires (Tableau 1).

Sur le bassin Seine-Normandie, quatre masses d'eau souterraine ont ainsi été sélectionnées (Figure 8) : deux de type alluvial, FRHG001 les alluvions de la Seine moyenne et aval et FRHG005 les alluvions du Perthois, et deux de type sédimentaire, FRHG102 Tertiaire du Mantois et de l'Hurepoix et FRHG207 la craie de Champagne nord. Compte tenu que la problématique concerne le lien eaux de surface et eaux souterraines, seuls les niveaux 1 des masses d'eau souterraine sont pris en compte. Cela ne veut pas dire qu'il n'y a pas de lien entre les eaux de surface et les niveaux 2 des masses d'eau souterraine mais la quantité de données ne permet alors pas d'aborder la question d'un point de vue statistique. Elle doit être traitée à une échelle locale.

Masses d'eau souterraine			Superficie (km²)	Nombre de stations ESU	Nombre de qualitomètres ESO
Code	**Nom**	**Type**			
FRHG001	Alluvions de la Seine moyenne et aval	Alluvial	711	133	15
FRHG005	Alluvions du Perthois		507	91	19
FRHG102	Tertiaire du Mantois à l'Hurepoix	Domaine sédimentaire	2 322	236	147
FRHG207	Craie de Champagne nord		3 656	115	180

Tableau 1. Caractéristiques des masses d'eau sélectionnées en Seine-Normandie

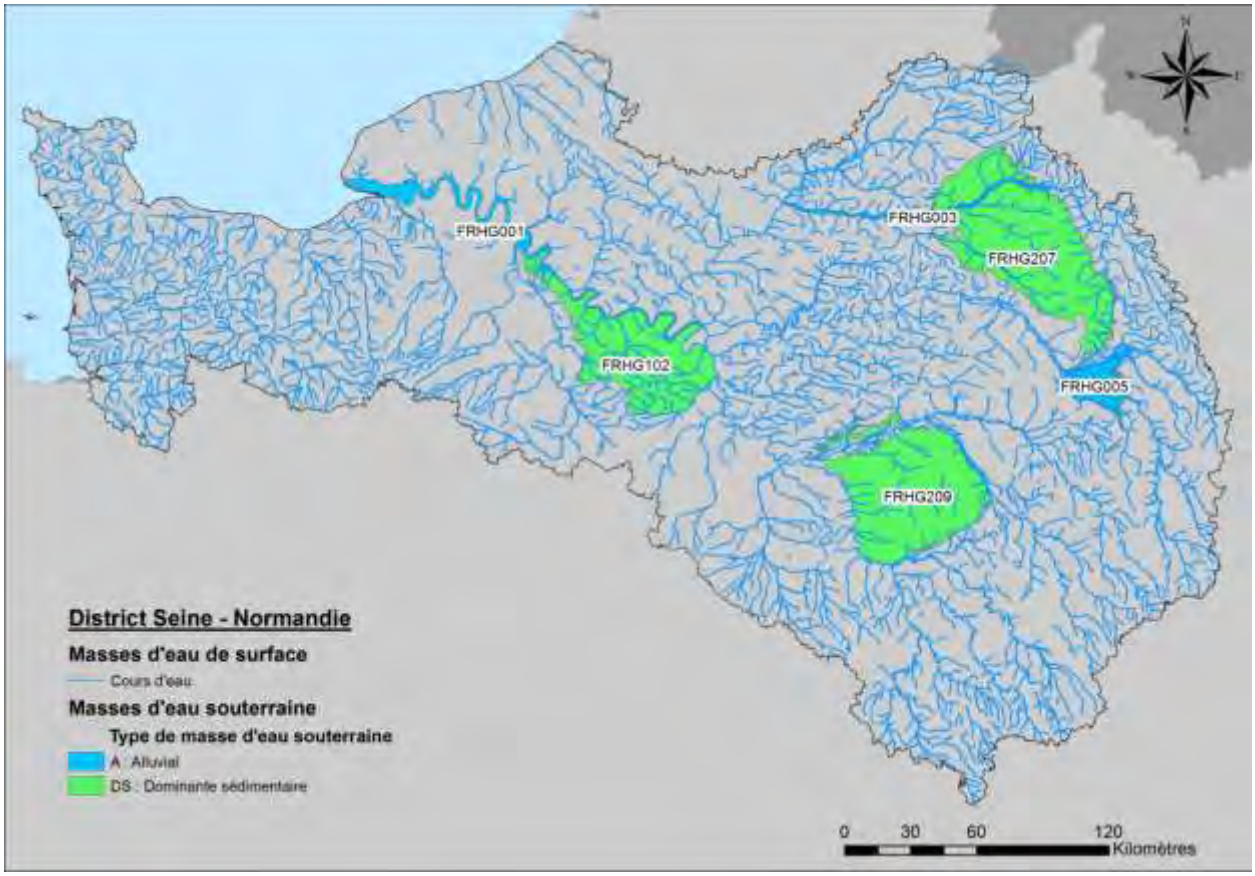


Figure 8. Masses d'eau souterraine sélectionnées sur le bassin Seine-Normandie

Les données utilisées de la période de référence 2007-2010 (Circulaire du 23 octobre 2012, http://circulaire.legifrance.gouv.fr/pdf/2012/10/cir_35995.pdf) sont pour les eaux souterraines des données extraites le 24 juillet 2013 de la banque de données Ades (http://www.ades.eaufrance.fr/) et pour les eaux de surface les données fournies par l'Agence de l'eau Seine-Normandie en juillet 2013.

L'analyse statistique des concentrations (maximales et moyennes) par point (qualitomètres eau souterraine et station de suivi de la qualité des eaux de surface) dans les deux réservoirs (eaux de surface et eaux souterraines) a pour objectif d'essayer d'établir un lien entre eaux de surface et eaux souterraines et d'éventuellement sectoriser ces relations à l'échelle de la masse d'eau souterraine.

Les chlorures, le cuivre, le cadmium et le plomb

L'analyse des cartes de concentrations moyennes et maximales en chlorures, cuivre, cadmium et plomb des points de surveillance qualité des eaux souterraines et des eaux de surface des masses d'eau souterraine FRHG005, FRHG207, FRHG001 et FRHG102 (annexe 1) ne met pas en évidence de pertinence à utiliser ces substances comme indicateur du lien eau souterraine – eau de surface.

L'atrazine

L'atrazine est une molécule synthétique qui n'existe pas dans le milieu naturel. Cette substance est un pesticide dont l'usage est interdit depuis 2003. Les temps de résidence sont relativement courts dans les eaux de surface que sont les rivières (Figure 9). Par conséquent, la source de pollution anthropique ainsi stoppée depuis plus de 10 ans, on

s'attend à ne plus retrouver de manière quantifiable cette substance dans les cours d'eau à moins qu'elle ne provienne d'un réservoir aux temps de résidence beaucoup plus longs comme les eaux souterraines.

temps de résidence de l'eau dans différents réservoirs	
réservoirs	temps moyen
Océans	2 500 ans
Eaux continentales	
Glaciers	1 600 à 9 700 ans
Eaux souterraines	1 400 ans
Mers intérieures	250 ans pour la mer Caspienne
Lacs	17 ans (grands lacs) 1 an (autres lacs)
sols	1 an
Rivières	16 jours
Atmosphère	8 jours
Biosphère (cellules vivantes)	quelques heures

Figure 9. Temps de résidence de l'eau dans différents réservoirs (L'eau, Ghislain de Marsily, Dominos Flammarion, 1995)

En effet, l'atrazine est encore largement présente dans les eaux souterraines, en 2013, c'était l'un des pesticides les plus rencontrés (Figure 10). L'idée proposée ici est d'utiliser l'atrazine, substance synthétique interdite depuis plus de 10 ans, comme traceur / marqueur du lien eau de surface – eau souterraine. L'objectif n'est pas de quantifier l'importance de la dégradation des eaux de surface par les eaux souterraines mais seulement d'indiquer un lien eau de surface – eau souterraine et plus spécifiquement le lien où les eaux souterraines contribueraient aux eaux de surface.

Figure 10. Pesticides les plus quantifiés dans les eaux souterraines en France métropolitaine en 2013 (http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/lessentiel/ar/246/0/pesticides-plus-rencontres-eaux-souterraines.html)

Cette analyse a été menée sur le bassin Loire-Bretagne à partir des données qualité des eaux souterraines de la banque de données Ades (http://www.ades.eaufrance.fr/). Les données de concentrations en atrazine sur la période 2007-2014 du bassin Loire-Bretagne ont été téléchargées en mars 2016. L'Agence de l'eau Loire-Bretagne a transmis les données qualité de suivi des eaux de surface sur la même période en janvier 2016.

L'analyse des données s'est faite de manière globale à l'échelle du bassin Loire-Bretagne sur la période 2007-2014 et année par année.

A partir de ces données, sont calculés (Figure 11) :

$$Ratio\ 1 = \frac{Nombre\ d'analyses\ mensuelles\ où\ [atrazine]>LQ}{Nombre\ total\ d'analyses\ mensuelles}$$

$$Ratio\ 2 = \frac{Nombre\ d'analyses\ mensuelles\ où\ [atrazine]\geq 0{,}1\ \mu g/L}{Nombre\ total\ d'analyses\ mensuelles}$$

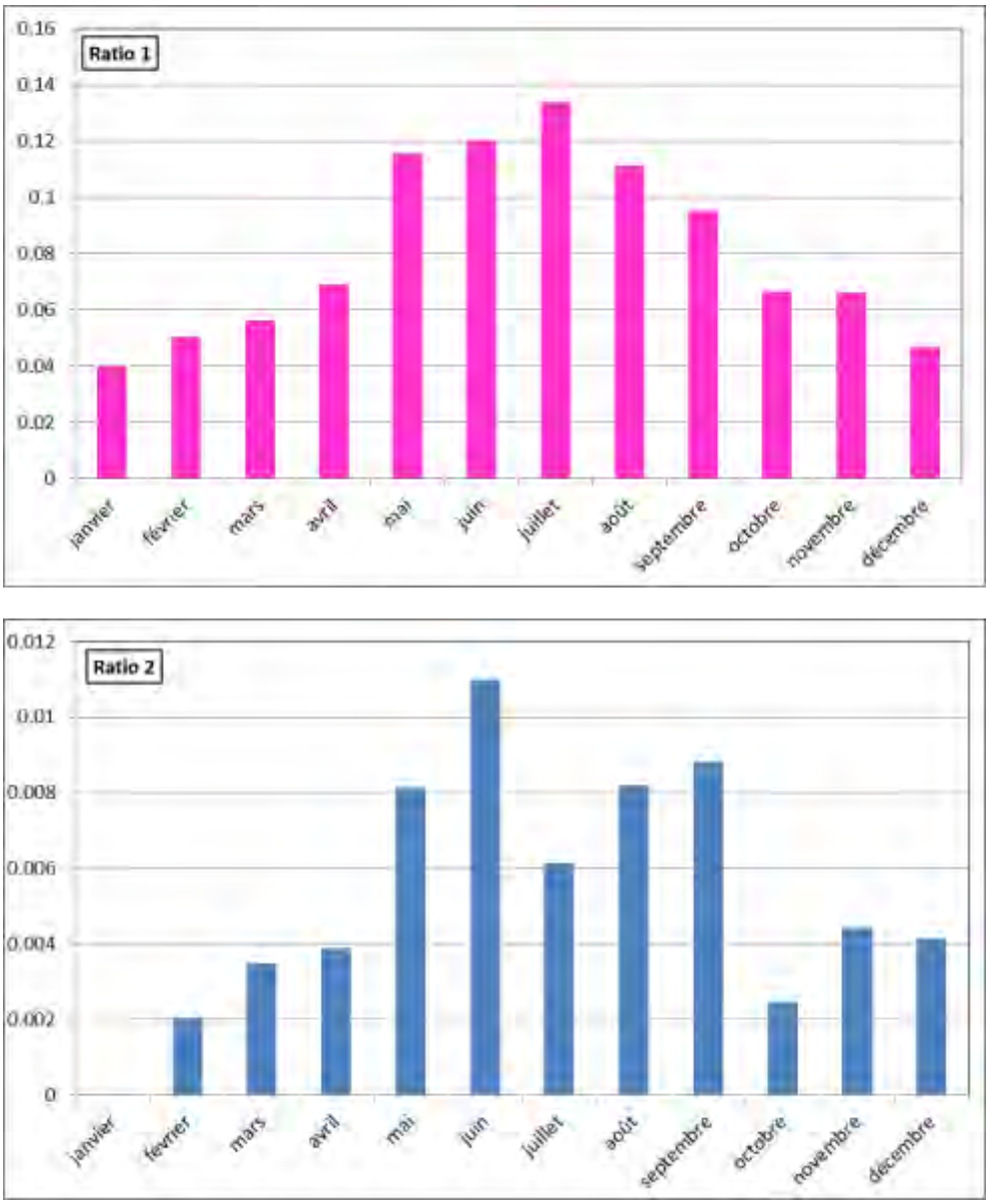


Figure 11. Nombre d'analyses mensuelles où a) l'atrazine est quantifiée (> limite de quantification) et b) la concentration en atrazine est supérieure où égale à la norme de 0,1 µg/L rapportés sur le nombre total d'analyses mensuelles sur la période 2007-2014 dans les stations de suivi de la qualité des eaux de surface

Ces données sont comparées aux débits moyens mensuels de la Loire sur la même période (2007-2014). Les données disponibles de mesures de débits moyens mensuels de la Loire, 34 stations numérotées de 1 (Usclades-et Rieutord) à 34 (Saint-Nazaire) de l'amont vers l'aval (Figure 12), sur la période 2007-2014 sont extraites de la banque Hydro

(www.hydro.eaufrance.fr/). Elles conduisent à calculer les débits moyens mensuels par mois sur la période 2007-2014 (Figure 13). Les débits les plus faibles sont enregistrés sur la période juillet – août – septembre quelle que soit la position amont-aval de la station sur le bassin de la Loire.

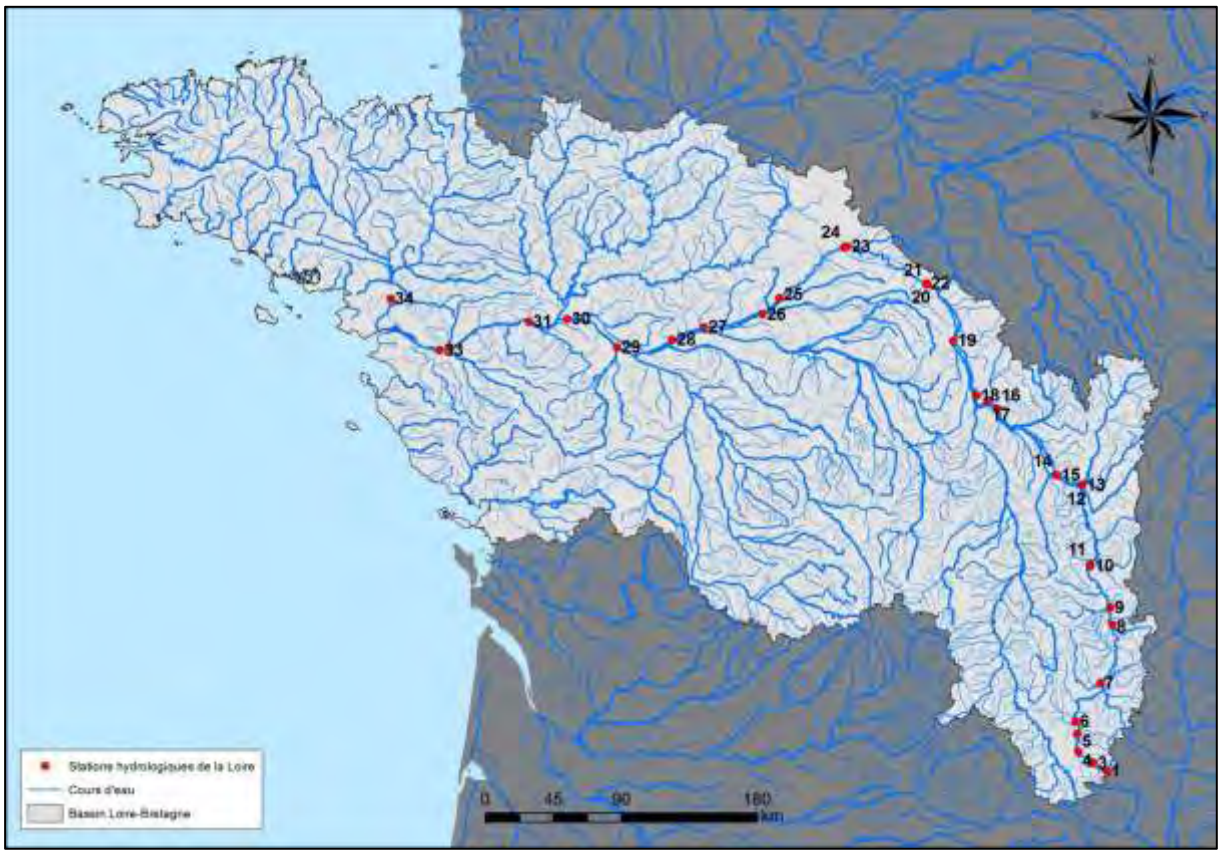
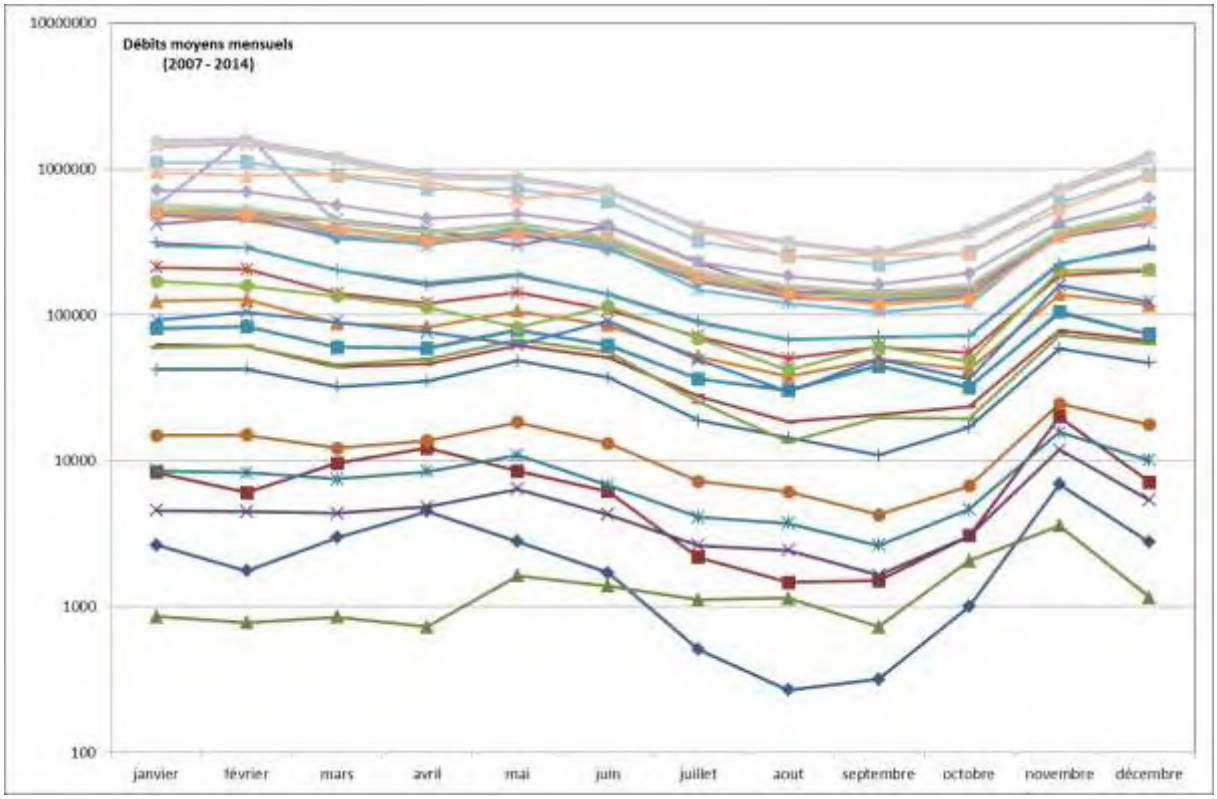


Figure 12. Localisation des stations hydrologiques de mesures des débits de la Loire



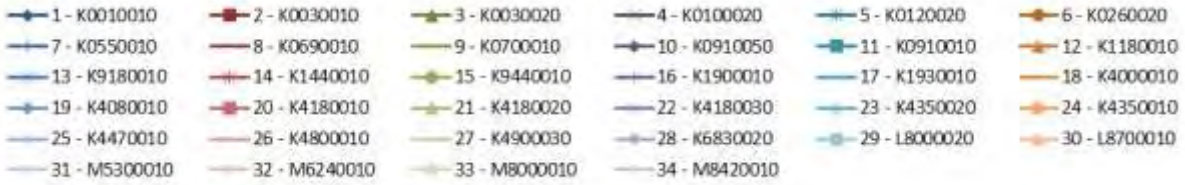


Figure 13. Débits moyens mensuels par mois des stations hydrologiques de la Loire sur la période 2007-2014, les stations sont numérotées de 1 à 34 de l'amont vers l'aval (cf. Figure 12)

L'atrazine est le plus souvent détecté sur la période de mai à août lorsque les débits des cours d'eau diminuent et que la part de la contribution des eaux souterraines est la plus significative. La fréquence de dépassement de la norme de 0,1 µg/L est plus élevée sur la même période (de mai à septembre) et corrobore nos conclusions sur la contribution des eaux souterraines en période de basses eaux et sur la possibilité d'utilisation de l'atrazine comme marqueur du lien eaux de surface – eaux souterraines. Le mois de juillet montre une fréquence de dépassement plus faible en comparaison avec juin, juillet et septembre. Cependant cette anomalie pourrait s'expliquer par un biais significatif d'échantillonnage. En effet, le nombre total d'analyses mensuelles du mois de juillet est significativement plus faible que les mois de juin, août ou septembre (Figure 14). Même en normalisant le nombre d'analyses par rapport au nombre d'analyses mensuelles, ce biais significatif semble impacter les résultats.

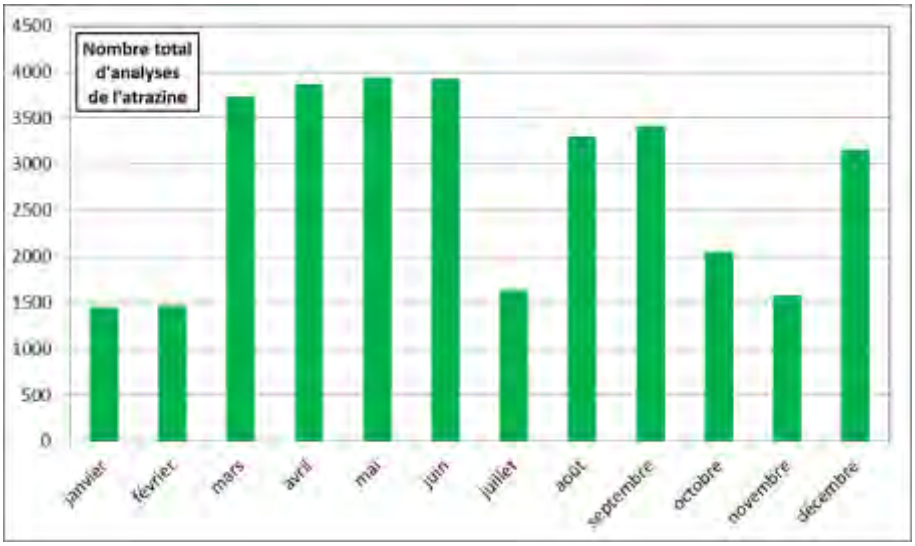


Figure 14. Nombre total d'analyses mensuelles de l'atrazine sur les stations hydrologiques du bassin Loire-Bretagne sur la période 2007-2014

L'atrazine apparait être un indicateur pertinent du lien eaux de surface – eaux souterraines et permettrait d'identifier les masses d'eau de surface alimentées par les eaux souterraines.

A titre d'exemple, sur le bassin Loire-Bretagne, si on ne sélectionne que les stations hydrologiques où la concentration maximum en atrazine est mesurée en mai, juin, juillet ou août : 301 stations hydrologiques sont alors sélectionnées, correspondant ainsi à 280 masses d'eau de surface sur bassin Loire-Bretagne. Par une simple correspondance géographique entre la station hydrologique et la masse d'eau souterraine de niveau 1 sous-jacente, 85 masses d'eau souterraine (sur les 578 qui comptent un niveau 1 sur le bassin Loire-Bretagne) sont alors identifiées comme contribuant à l'alimentation des eaux de surface et pour lesquelles dans le cas de dégradation des masses d'eau de surface associées il serait pertinent de mener le test « eau de surface » de l'enquête appropriée (Figure 15).

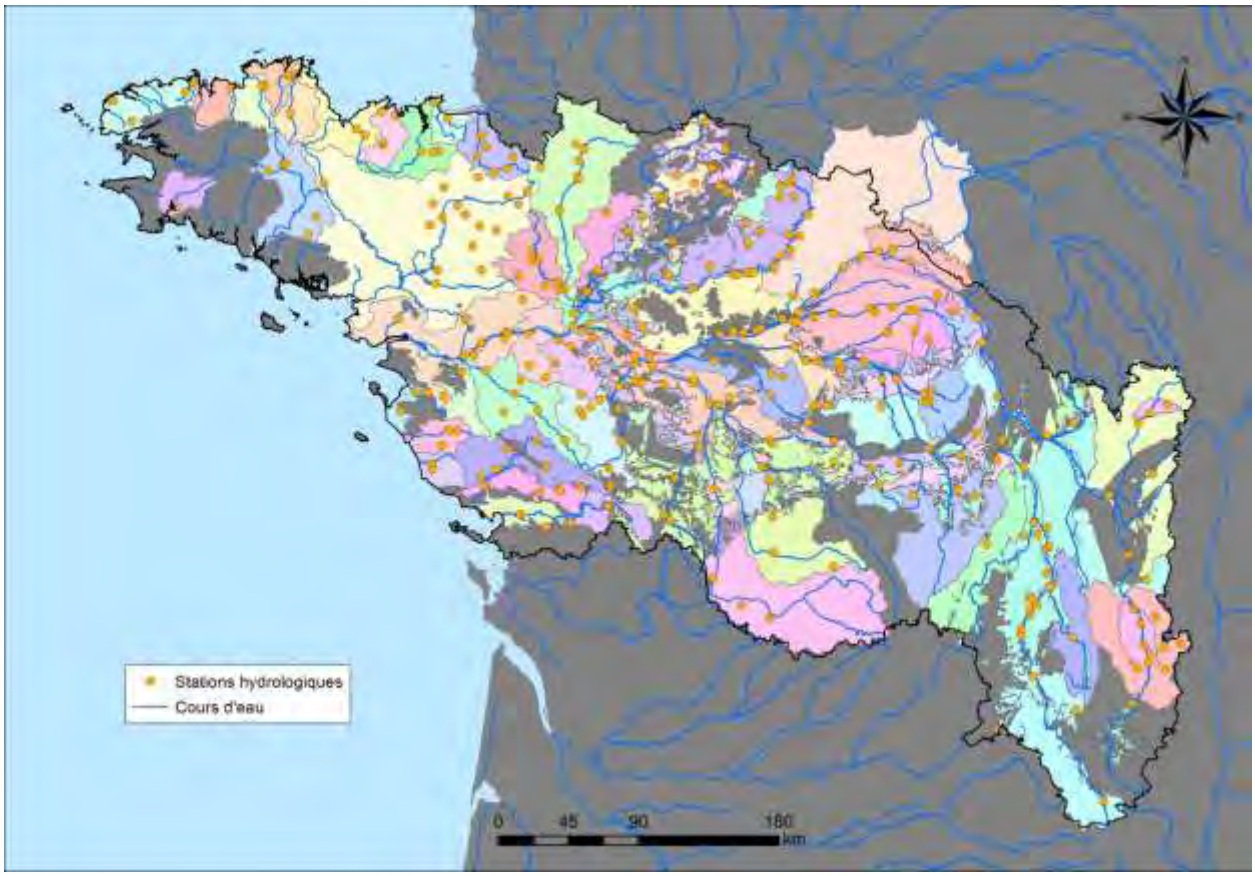


Figure 15. Niveau 1 des masses d'eau souterraine du bassin Loire-Bretagne qui seraient en interaction avec les eaux de surface d'après les analyses en atrazine dans les eaux de surface

L'analyse des concentrations en atrazine montre la pertinence d'utiliser les données qualité des eaux de surface comme indicateur d'un lien avec les eaux souterraines lorsque la molécule n'est plus en usage actuellement. Ces résultats encouragent les développements de cet axe de recherche en testant sur d'autres bassins, d'autres contextes hydrogéologiques, en prenant en compte le type de masse d'eau souterraine mais également d'autres molécules synthétiques interdites d'usages depuis suffisamment longtemps pour considérer qu'elles proviennent des eaux souterraines.

3.3. ETAPE 3 : LA NATURE DU POLLUANT

L'étape 3 interroge sur la nature du polluant et sa capacité à franchir la zone hyporhéique:

Le transfert du polluant de la masse d'eau souterraine vers la masse d'eau de surface est établi et explique la dégradation de la qualité des eaux de surface

Dans le cas d'une étude locale, il s'agit de prendre en compte les propriétés du milieu, les propriétés du polluant et de caractériser les processus de transfert et les processus biogéochimiques pouvant avoir lieu dans la zone hyporhéique pour pouvoir dire si le polluant peut transiter des eaux souterraines vers les eaux de surface et venir altérer l'état des eaux de surface.

La première phase de cette étude (Cary et al., 2015) a fait l'objet d'un rapport qui traite justement de cette question. Seules les substances qui font l'objet d'un suivi dans les eaux de surface peuvent être considérée lors de l'analyse du déclassement d'une masse d'eau de

surface. Il en est de même avec les eaux souterraines. Seules les substances communes aux programmes de surveillance des eaux de surface et des eaux souterraines ont donc fait l'objet d'une analyse. Ont alors été comparées les valeurs seuils (VS) des eaux souterraines aux normes de qualité environnementale (NQE) des eaux de surface pour une même substance. Le problème de dégradation des eaux de surface par les eaux souterraines ne peut se poser que lorsque la valeur seuil est supérieure à la NQE. Dans le cas contraire, les dépassement de la VS dans les eaux souterraines déclasseront la masse d'eau avant de s'interroger sur la possibilité d'une dégradation des eaux de surface par les eaux souterraines.

Ces travaux ont permis de sélectionner plusieurs substances pour lesquelles a été évaluée leur capacité à franchir la zone hyporhéique et venir rejoindre les eaux de surface. A titre d'exemple, le nickel est un élément mobile qui peut traverser cette zone hyporhéique alors que le transfert du mercure à travers la zone hyporhéique est très peu probable. Le tableau ci-après (Tableau 2) reprend les résultats des travaux de Cary et al. (2015) :

Famille	Paramètre	VS/(NQE ou limite de classe)	Possibilité de transfert vers les ESU
Métaux / métalloïdes et dérivés	**Zinc**	641	+
	Cuivre	2000	+
	Cadmium	20-62,5	-
	Chrome (total)	14,7	-
	Arsenic	12	+ / -
	Nickel	5	+
	Plomb	8,3	-
Nutriments **(en mg/L)**	**Nitrite**	1,67	+
Pesticides et métabolites de pesticides	**Aminotriazole**	1,25	+
	Métazachlore	5,26	+
	Diflufenicanil	10	+
	Endosulfan	20	-
	Chlordécone	20000	+
	Dieldrine	3	-
HAP	**Benzo(a)pyrène**	58,8	+
	Toluène	9,5	+
Alkylphénols, nonylphénols et autres phénols	**Pentachlorophénol**	22,5	+ / -

Tableau 2 : Evaluation de la capacité de transfert à travers la zone hyporhéique des eaux souterraines vers les eaux de surface de quelques substances sélectionnées et VS/NQE (Cary et al., 2015)

Sur la question de la nature du polluant et sa capacité à transférer via la zone hyporhéique des eaux souterraines vers les eaux de surface, les substances peuvent être classées en 3 catégories :

Les paramètres communs des programmes de surveillance des eaux de surface et des eaux souterraines :

- Pour lesquels la VS est supérieure à la NQE, pour ces substances les travaux de Cary et al. (2015) interrogent sur la possibilité d'abaisser les VS aux valeurs des NQE et proposent une synthèse bibliographique sur la capacité de transfert de ces substances des eaux souterraines vers les eaux de surface via la zone hyporhéique ;
- Pour lesquels la VS est inférieure ou égale à la NQE, pour ces substances a priori l'évaluation de l'état chimique des eaux souterraines conduira au déclassement de la masse d'eau souterraine et donc des actions pour restaurer l'état ou a minima un déclenchement de l'enquête appropriée lorsque la VS sera dépassée. Dans ces conditions, des besoins de connaisance sur la capacité de transfert des substances des eaux souterraines vers les eaux de surface peuvent apparaitre. La question est pour quelle substance ? Il s'agirait de faire un inventaire de ces substances (paramètres) auprès des Agences de l'eau à partir des résultats du rapportage communautaire 2016 sur l'évaluation des eaux de surface. Les premiers besoins sont la question de l'azote et du phosphore ou clairement des travaux de recherche sont nécessaires sur des cas d'études précis pour identifier des indicateurs ou des outils permettant de relier qualité des eaux souterraines et qualité des eaux de surface. La complexité du cycle de l'azote

et du phosphore ne permette pas de fournir une réponse simple à cette question.

- Les paramètres pour lesquels il n'y a pas de suivi qualité dans les eaux souterraines ou dans les eaux de surface. Des travaux pourraient être envisagés pour identifier les substances qui déclassent les eaux de surface mais qui ne font pas l'objet d'un suivi dans les eaux souterraines. Est ce que cela concerne de nombreuses substances ? Lesquelles ? Et est ce que ces substances peuvent avoir pour origine les eaux souterraines ? Si oui, il serait pertinent d'avoir une réflexion sur leur possible intégration dans les programmes de surveillance des eaux souterraines avec la définition de valeurs seuils adaptées à l'usage qu'il est fait des eaux souterraines et adaptées aux NQE qui définissent l'état des eaux de surface.

3.4. ETAPE 4 : L'IMPORTANCE DE LA DÉGRADATION

L'étape 4 du test porte sur l'importance de la dégradation engendrée sur les eaux de surface par les eaux souterraines :

La (les) surface(s) du (des) bassin(s) versant(s) de la (des) masse(s) d'eau de surface contaminée(s) par la masse d'eau souterraine représente(nt) plus de 20 % de la surface totale de la masse d'eau souterraine ?

La question revient à se demander si la masse d'eau souterraine dégrade une ou plusieurs masses d'eau de surface, s'il s'agit de petits rus ou de cours d'eau majeurs comme des grands fleuves. Le critère proposé était surfacique avec un seuil fixé arbitrairement à 20 % : si la surface du (des) bassin(s) versant(s) de la (des) masse(s) d'eau de surface dégradée(s) par les eaux souterraines correspond à plus de 20% de la surface totale de la masse d'eau souterraine alors cette dernière est déclassée par le test eaux de surface. Cependant la surface des bassins versants concernés comparée à la surface des masses d'eau souterraine le plus souvent de grande superficie n'a quasiment jamais conduit au déclassement de la masse d'eau souterraine sur la base du test « eaux de surface ». Des questions se posent quant au traitement des bassins versants dont l'emprise géographique concerne plusieurs masses d'eau souterraine.

Plusieurs pistes d'investigations pourraient être testées pour mesurer l'importance du cours d'eau par exemple par rapport au nombre de Strahler qui mesure la complexité de branchement du cours d'eau dans le réseau hydrographique global. Les cours d'eau entre la source et la première confluence correspondent à l'ordre 1 de Strahler, ce nombre peut atteindre 8 ou 10 pour la Loire et la Garonne en France. Les cours d'eau pourraient être ordonnés en termes de taille par rapport à leur débit. Plusieurs approches peuvent être envisagées : débit moyen annuel, part par rapport au cours d'eau dans lequel il se jette, part par rapport au fleuve exutoire final dans lequel il se jette, etc. A ce stade il est difficile de répondre simplement à la question. Il serait intéressant dans un premier temps de consulter les Agences de l'eau afin de voir comment elles ont mesuré l'importance des masses d'eau de surface, et de voir leurs besoins sur cette question pour éventuellement entamer des investigations complémentaires. Clairement le seuil de 20% de la surface de la masse d'eau souterraine n'apparait pas pertinent et mérite des investigations complémentaires pour identifier et calibrer un ou plusieurs autres indicateurs. Des liens avec les travaux effectués en 2016 sur le test ESO-ESU pour l'évaluation de l'état quantitatif des masses d'eau sont nécessaires.

4. Conclusions

La démarche d'évaluation de l'état chimique des eaux souterraines décrites dans la circulaire du 23 octobre 2012 (http://circulaire.legifrance.gouv.fr/pdf/2012/10/cir_35995.pdf) a été utilisée et appliquée dans le cadre du rapportage communautaire 2016. La question des relations eaux de surface – eaux souterraines se révèle difficile tout particulièrement à l'échelle de travail nationale qui concerne plus de 500 masses d'eau souterraine et près de 8 800 masses d'eau de surface sur le territoire métropolitain. Au cours de l'enquête appropriée, le test « eau de surface » pose la question de savoir si une masse d'eau souterraine peut être responsable de l'état moins que bon d'une masse d'eau de surface par transfert d'une substance via la zone hyporhéique des eaux souterraines vers les eaux de surface ? La réalisation du test « eau de surface » par différentes Agences de l'eau lors du dernier rapportage communautaire s'est révélée difficile et a conduit à une mise en application disparate d'un bassin à l'autre. Dans de nombreux cas, le test n'a pas été mené faute d'informations ou de données suffisantes.
L'objectif de ce travail est d'identifier les points bloquants dans la mise en application de ce test et de proposer des pistes d'évolution du test ou des pistes de recherche dans le but d'aider les Agences de l'eau et de fournir des outils pour répondre à la question de la possible dégradation des eaux de surface par les eaux souterraines :

La question des liens hydrodynamiques entre eau souterraine et eau de surface :

- La première étape du test pose la question « y-a-t-il un lien ? ». En plus de la réponse oui/non, il est possible de répondre « ne sait pas » ce qui a le plus souvent conduit à ne pas mener le test. Cette réponse possible s'est révélée être un point bloquant. Pour y remédier, une réponse par défaut est proposée pour mener le test jusqu'au bout quel que soit l'état de connaissance des échanges nappe – rivière. A défaut d'information contraire avérée, il s'agit d'envisager le scénario où les eaux souterraines transfèrent vers les eaux de surface, la rivière draine la nappe et permet l'éventuel transfert d'une pollution des eaux souterraine vers les eaux de surface.
- Ensuite dans le cas où les eaux de surface drainent les eaux souterraines, la question devient : quelle masse d'eau de surface draine quelle masse d'eau souterraine ? De précédents travaux de rapprochement des référentiels hydrographique et hydrogéologique proposaient une approche cartographique exploratoire pour relier piézomètre (représentatif d'une masse d'eau souterraine) et cours d'eau (masse d'eau de surface) en indiquant le sens probable des échanges. Ces résultats mériteraient d'être repris pour validation et approfondis. Les résultats de ces travaux sous la forme d'une base de données faisant le lien entre masse d'eau de surface – masse d'eau souterraine – probabilité d'échange et direction des écoulements serait un outil très utile pour mener le test « eau de surface » tout particulièrement dans les cas où les études locales ou les informations sur la question font défaut.
- Sur la question du lien, la recherche d'indicateurs de transfert des eaux souterraines vers les eaux de surface s'est révélée pertinente via la recherche de la présence d'atrazine dans les eaux de surface. Interdite d'usage depuis suffisamment longtemps (depuis 2003), sa présence dans les eaux de surface s'explique par une origine souterraine. La démarche initiée sur une seule molécule, l'atrazine, et sur un seul bassin, Loire-Bretagne, s'est révélée encourageante et mériterait d'être déployée sur d'autres bassins et pour d'autres molécules (molécules industrielles, perchlorates, etc) pour que l'origine souterraine ne soit pas remise en cause.

La question des paramètres déclassant les eaux de surface :

- Pour savoir quelle substance chercher dans les eaux souterraines, le test « eau de surface » préconise de regarder les causes de dégradation des eaux de surface.

Lorsqu'il s'agit d'une molécule synthétique (non naturelle), le lien est évident. Lorsque les causes de dégradation sont « excès de nutriments » ou « eutrophisation du cours d'eau », la question est plus difficile : azote ? phosphore ? sous quelle forme ? Quelle substance faut-il rechercher dans les eaux souterraines ? La complexité des cycles de l'azote et du phosphore dans la problématique des relations nappe – rivière montre clairement qu'une simple comparaison des concentrations n'aboutit à aucun résultat pertinent, les besoins d'indicateurs globaux spécifiques à la problématique de l'eutrophisation et de l'excès de nutriments sont évidents.

La question de l'importance de la dégradation des eaux de surface :

- Une fois le lien établi entre une substance contenue dans les eaux souterraines et sa présence dans les eaux de surface, la dernière question du test porte sur l'importance de la dégradation : du petit ru au grand fleuve. Comment évaluer l'importance de cette dégradation. La comparaison de la taille du bassin versant de la masse d'eau de surface avec celle de la surface de la masse d'eau souterraine s'est révélée ne pas être une approche pertinente. Des pistes de réflexions complémentaires sont à envisager pour aborder cette question restée en suspens.

5. Bibliographie

Alley WM., Healy RW., LaBaugh JW., Reilly TE. (2002) Flow and Storage in Groundwater Systems, *Science* 296(5575) : 1985-1990, DOI : 10.1126/science.1067123.

Billen G., Garnier J., Hanset P. (1994). Modelling phytoplankton development in whole drainage networks: the RIVERSTRAHLER Model applied to the Seine river system. Phytoplankton in Turbid Environments: Rivers and Shallow Lakes. J.-P. Descy, C. Reynolds and J. Padisák, Springer Netherlands. 100: 119-137.

Brugeron A, Allier D, Klinka T (2012) – Approche exploratoire des liens entre référentiels hydrogéologique et hydrographique. Rapport BRGM/RP-61047-FR.

Brugeron A., Bessiere H., avec la collaboration de **P. Stollsteiner** et **D. Allier** (2014) – Approche exploratoire des liens entre référentiels hydrogéologique et hydrographique (Année 2) : Réflexions sur l'organisation et la mise à disposition des données. Rapport final BRGM/RP-63643-FR. 82 p., 43 ill., 2 ann.

Brugeron A., Auterives C., Renaud C. (2016) – Approche exploratoire des liens entre référentiel hydrogéologique et hydrographique. Etat de l'art sur les méthodes de caractérisation des échanges « eau souterraine / eau de surface » et réflexions sur l'organisation de la donnée Rapport final. BRGM/RP-65541-FR, 108 p., 48 ill., 3 tabl.

Canton M (2009) Dynamique des éléments biogènes dans le continuum fluvio-estuairien de la zone hydrologique d'influence du bassin d'Arcachon. PhD thesis, Université de Bordeaux 1, http://ori-oai.u-bordeaux1.fr/pdf/2009/CANTON_MATHIEU_2009.pdf.

Cary L. Surdyk N., Auterives C. (2015) - Etablissement de la liste des paramètres chimiques pertinents pour la prise en compte des impacts des eaux souterraines sur les eaux de surface. Rapport final. BRGM/RP-63127-FR. 47 p., 8 tableaux, 6 figures, 2 annexes.

Datry T, Dole-Olivier MJ, Marmonnier P, Claret C, Perrin JF, Lafont M, Breil P (2008) La zone hyporhéique, une composante à ne pas négliger dans l'état des lieux et la restauration des cours d'eau. *Ingénieries – EAT*, 3-18, <hal-00602672>, https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00602672/document.

Dent LC, Grimm NB (1998) Spatial heterogeneity of stream water nutrient concentrations over successional time. *Ecology* 80(7): 2283-2298.

Duff JH, Triska FJ (2000) Nitrogen biogeochemistry and surface-subsurface exchange in streams *in* Jones JB et Mulholland PJ (Eds). *Streams and Ground Waters.* Academic Press: 197-220.

Francois D (1997). Cartographie des écoulements caractéristiques. Etude méthodologique. Application aux bassins de la Meuse et de la Moselle françaises. 1ère phase: Etude méthodologique. A. d. l. e. R. Meuse.

Holman IP, Howden NJK, Whelan MJ, Bellamy PH, Rivas-Casado M, Willby NJ (2008) An improved understanding of phosphorus origin, fate and transport within groundwater and the significance for associated receptors. SNIFFER project WFD85 Final report 139 pp.

Iribar A, Sanchez-Pérez JM, Lyautey E, Garabetian F (2008) Differentiated free-living and sediment-attached bacterial community structure inside and outside denitrifcation hotspots in the river-groundwater interface. *Hydrobiologia* 598(1): 109-121.

Jones JB, Holmes RM (1996) Surface-subsurface interactions in stream ecosystem. *Trends in Ecology & Evolution* 11(6) : 239-242.

Neal C, Jarvie HP, Love A, Neal M, Wickham H, Harman S (2008) Water quality along a river continuum subject to point and diffuse source. J. Hydrology 350, 154-165.

Peyrard D (2008) Un modèle hydrobiogéochimique pour décrire les échanges entre l'eua de surface et la zone hyporhéique de gandes plaines alluviales. PhD thesis. Université de Toulouse III, Paul Sabatier. 277 p., http://thesesups.ups-tlse.fr/549/1/Peyrard_Dimitri.pdf.

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

Pryet A., Labarthe B., Saleh F., Akopian M., and N. Flipo (2015) "Reporting of Stream-Aquifer Flow Distribution at the Regional Scale with a Distributed Process-Based Model." Water Resources Management 29(1): 139-159.

Smitz J., Everbecq E., Deliège JF., Descy JP, Wollast R., Vanderboght JP (1997) "PEGASE, une méthodologie et un outil de simulation prévisionnelle pour la gestion de la qualité des eaux de surface." *Tribunes de l'eau* 588(4): 73-82.

Vernoux JF, Lions J, Petelet-Giraud E, Seguin JJ, Stollsteiner P (2010) Synthèse bibliographique sur les relations entre eau souterraine, eau de surface et écosystèmes en lien avec la DCE. Rapport BRGM/RP-57044-FR. 232 p.

Annexe 1

Recherche d'indicateurs du lien eau de souterraine – eau de surface

Cartographies des concentrations moyennes et maximales en cuivre, chlorures, cadmium et plomb des points de surveillance qualité des eaux souterraines et des eaux de surface des masses d'eau FRHG005, FRHG207, FRHG001 et FRHG102

Les chlorures

La distribution des concentrations en chlorures par point (station qualité eau de surface et qualitomètre eau souterraine) montre des concentrations plus importantes des eaux de surface dans la partie amont et dans la partie aval de la masse d'eau FRHG001 des alluvions de la Seine moyenne (entre 50 et 250 mg/L) ainsi que sur quelques qualitomètres de manière très localisée dans les eaux souterraine le long de la Seine (Figure 16). En aval, la proximité de la mer (la Manche) influence les teneurs en chlorures qui ont tendance à être plus élevées dans la partie aval du bassin de la Seine conséquence de deux effets : la remontée d'eau marine dans l'estuaire de la Seine et des précipitations plus chargées en chlorures qu'à l'intérieur des terres. En amont, les concentrations en chlorures plus élevées (Figure 9b, Figure 17b) concernent les deux masses FRHG207 et FRHG005 et sont dues très probablement à l'utilisation d'engrais dans cette région plus agricole.

Clairement les concentrations les plus fortes (valeurs moyennes et maximales (Figure 16, Figure 17) dans les eaux souterraines ne coïncident pas avec les valeurs les plus fortes enregistrées dans les eaux de surface. L'absence de correspondance géographique ne permet pas de mettre en évidence l'existence d'un éventuel lien entre eau de surface et eau souterraine. A cette échelle de travail, il est difficile d'aller plus loin dans l'interprétation des données et l'éventualité d'un lien eau de surface – eau souterraine. On remarque également que sur la masse d'eau FRHG102, les stations de suivi des eaux de surface, à l'exception du couloir alluvionnaire de la Seine, sont relativement éloignées de qualitomètres de surveillance des eaux souterraines. Le manque de « correspondance » géographique entre stations de suivi des eaux de surface et des eaux souterraines ne facilitent pas une éventuelle approche cartographique comme celle présentée ici.

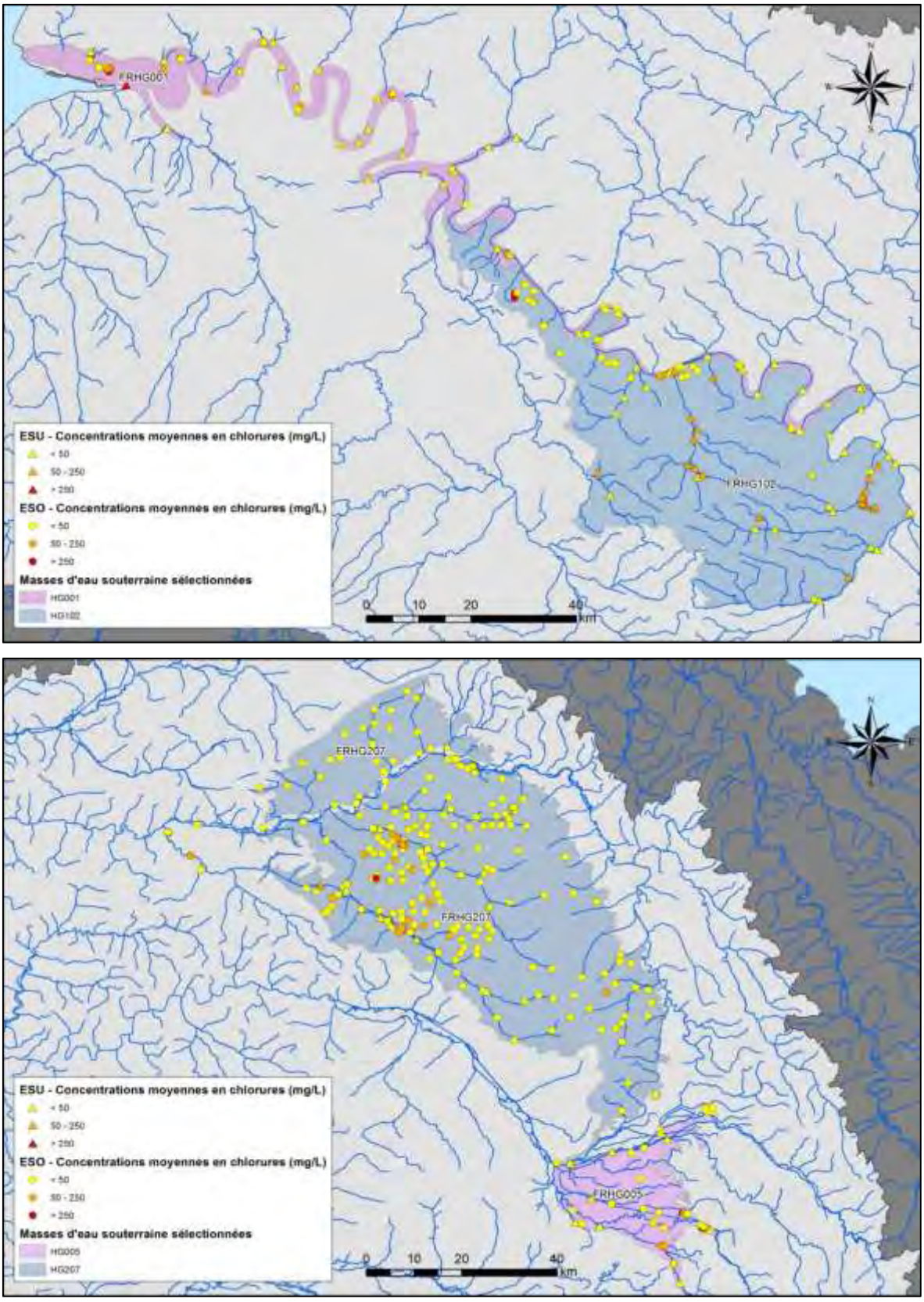


Figure 16. Concentrations moyennes en chlorures (en mg/L) dans les eaux souterraines et de surface des masse d'eau a) FRHG001 et FRHG102, b) FRHG207 et FRHG005

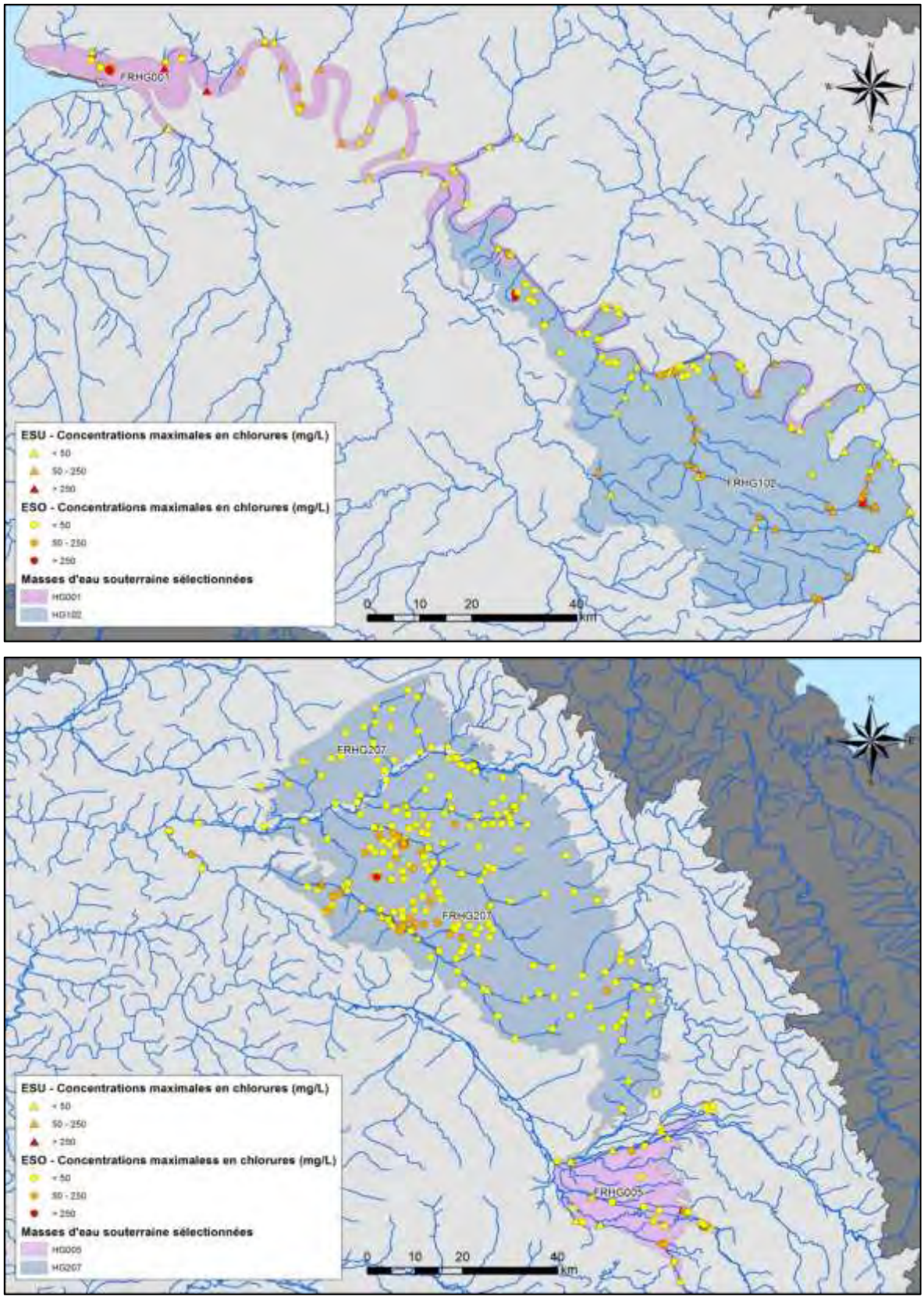


Figure 17. Concentrations maximales en chlorures (en mg/L) dans les eaux souterraines et de surface des masse d'eau a) FRHG001 et FRHG102, b) FRHG207 et FRHG005

Le cuivre

Pour le cuivre, ainsi que les 2 autres éléments identifiés (cadmium et plomb), l'analyse statistique cartographique des concentrations au point de surveillance, se base sur 3 classes de concentrations dont les bornes sont établies sur les valeurs de la NQE-MA (norme de qualité environnementale, moyenne annuelle) de la manière suivante :

- Classe 1 : < NQE-MA
- Classe 2 : entre NQE-MA et 2 fois la valeur de NQE-MA
- Classe 3 : > 2 X NQE-MA

Pour le cuivre, la valeur seuil est de 2 000 µg/L alors que la NQE-MA fixée à 1 µg/L depuis le 22 décembre 2015 est très largement inférieure (arrêté du 27 juillet 2015 modifiant l'arrêté du 25 janvier 2010, https://www.legifrance.gouv.fr/jo_pdf.do?id=JORFTEXT000031107256).

Les caractéristiques chimiques du cuivre (notamment forte sorption et précipitation) n'autorisent généralement pas l'existence de fortes concentrations dans les eaux souterraines à l'état naturel (< 1 µg/L) selon le guide technique de la qualité naturelle des eaux souterraines - BRGM 2006. Néanmoins pour des pH plus acides inférieurs à 4, essentiellement dans les zones minières, les carbonates de cuivre peuvent se dissoudre, ce qui génère des concentrations en cuivre plus élevées dans les eaux souterraines. Certaines fortes teneurs sont directement liées à l'activité humaine comme l'épandage de lisiers porcins.

Le traitement statistique des analyses de cuivre montre des valeurs moyennes et maximales supérieures à la NQE-MA sur presque l'ensemble des eaux des deux masses d'eau souterraines de type alluvial (FRHG102 et FRHG001) qui apparaissent plus sensibles (Figure 18a, Figure 19a). La différence entre valeur seuil et NQE est importante (VS/NQE = 2 000) et ainsi un grand nombre d'analyses donnent des valeurs supérieures à la NQE-MA dans les eaux souterraines. Le faible échantillonnage des cours d'eau (11 stations de suivi des eaux de surface sur la masse d'eau FRHG207) montre une qualité des cours d'eau disparate vis-à-vis du cuivre (< NQE, entre NQE et 2 X NQE, > 2 X NQE). Soixante-sept qualitomètres échantillonnent la masse d'eau FRHG207 et toutes les valeurs moyennes dépassent la NQE-MA (= 1 µg/L) et 65 d'entre elles dépassent 2 µg/L (=2 X NQE-MA). Selon ces critères et ces bornes, la masse d'eau souterraine apparait de qualité homogène dépassant en tout point la NQE-MA. Or l'état des eaux de surface est plus nuancé. L'hypothèse qui peut être formulée est que l'éventuel lien nappe – rivière est variable dans l'espace, la contribution des eaux souterraines aux eaux de surface varie en fonction des cours d'eau. Il peut y avoir un lien eau de surface – eau souterraine variable dans l'espace, ce qui expliquerait les données qualité des eaux de surface en cuivre mais ces données sont insuffisantes pour conclure sur une simple analyse cartographique.

Dans les eaux de surface, la plupart des moyennes calculées sont supérieures à la norme. La valeur NQE-MA de 1 µg/L est très souvent dépassée dans les eaux souterraines, bien que le cuivre ne transférerait pas aisément à travers la zone hyporhéique (Cary et al., 2015), la différence entre valeur seuil et NQE-MA pourrait expliquer ce déclassement des eaux souterraines du fait de la possible dégradation de l'état des eaux de surface. Néanmoins l'établissement du lien eaux de surface – eaux souterraines via une interprétation aux points de données qualité des eaux n'est pas évident.

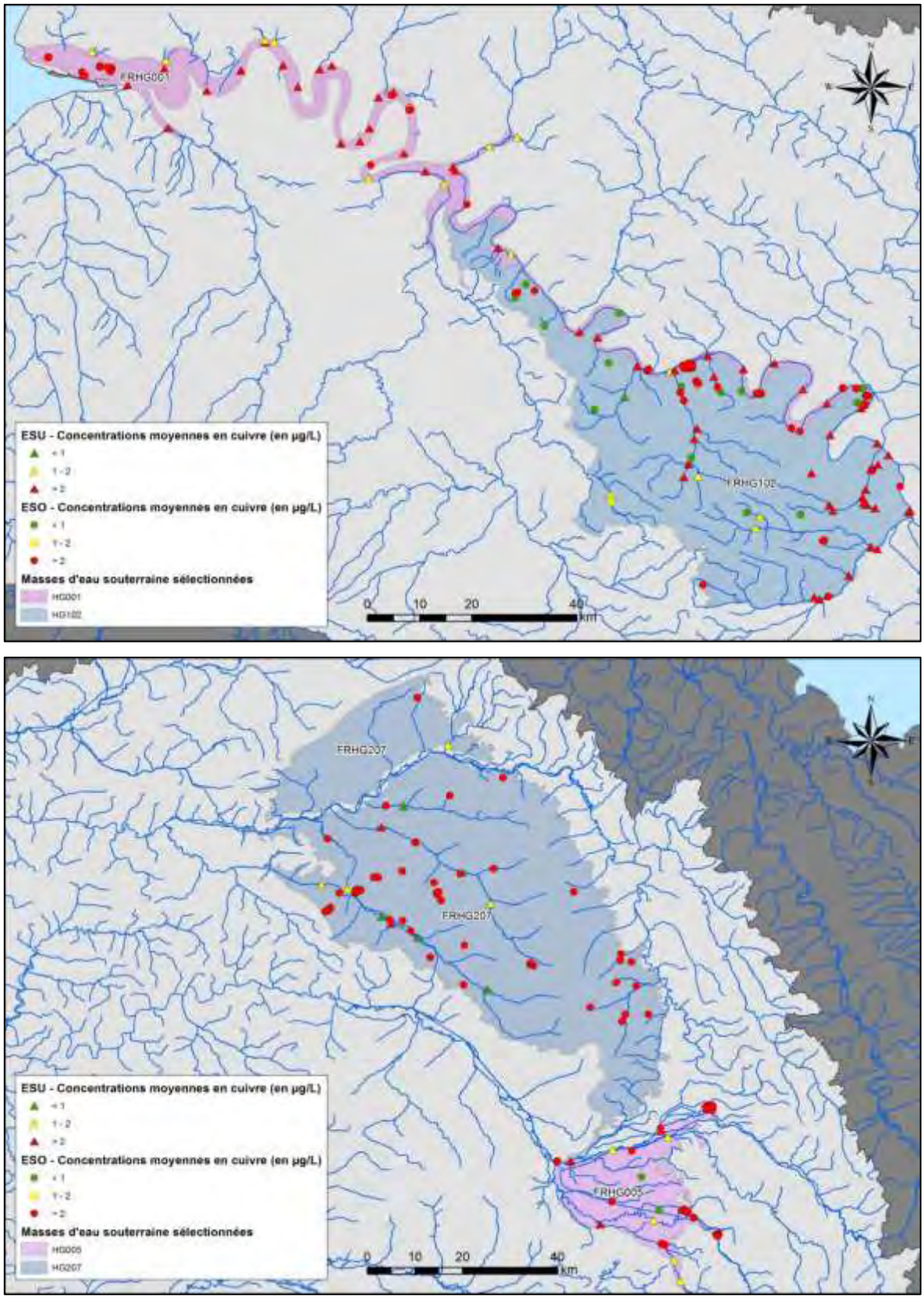


Figure 18. Concentrations moyennes en cuivre (en µg/L) dans les eaux souterraines et de surface des masse d'eau a) FRHG001 et FRHG102, b) FRHG207 et FRHG005

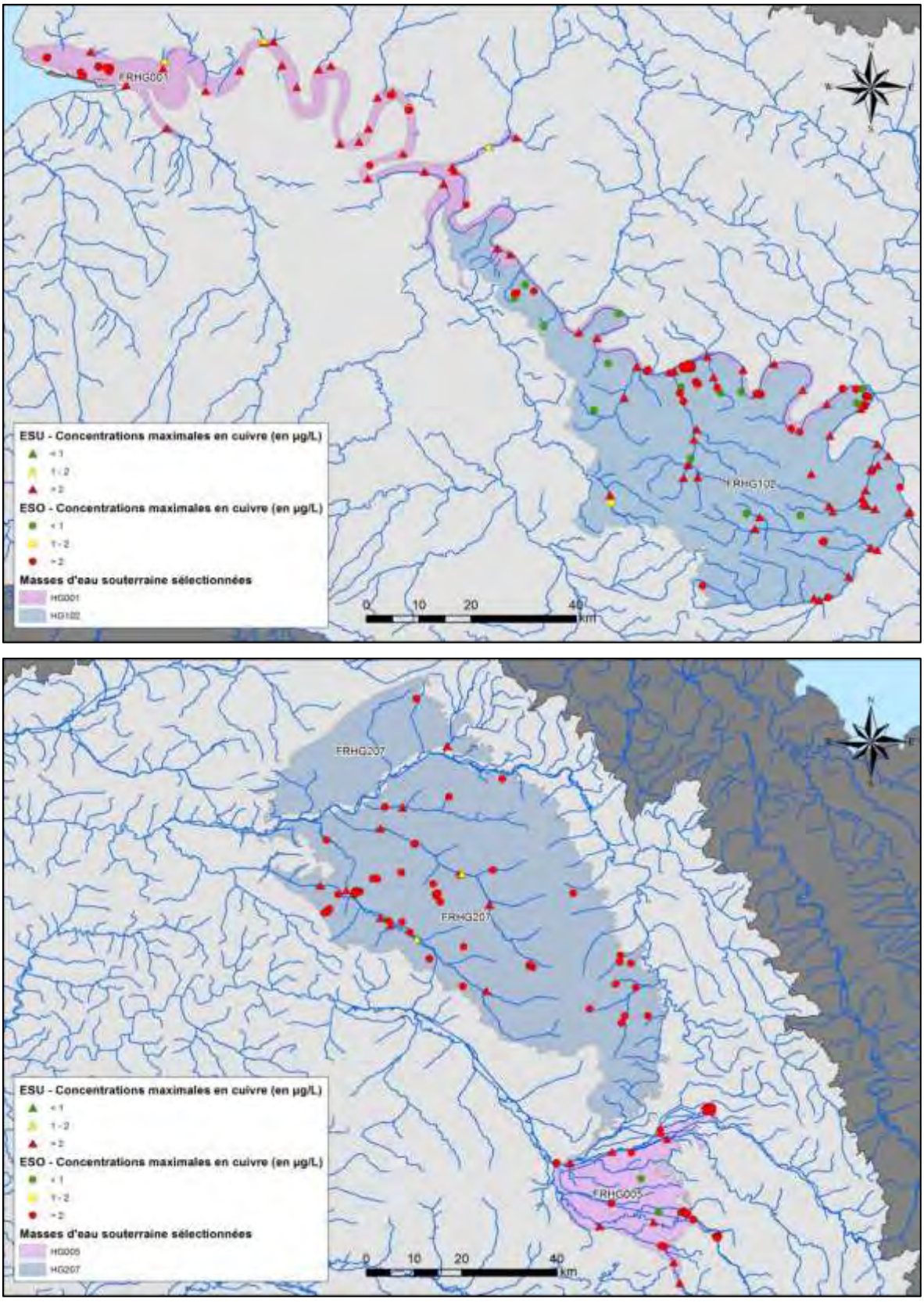


Figure 19. Concentrations maximales en cuivre (en µg/L) dans les eaux souterraines et de surface des masses d'eau a) FRHG001 et FRHG102, b) FRHG207 et FRHG005

Le cadmium

Pour le cadmium la NQE-MA est de 0,08 à 0,25 µg/L suivant les classes de dureté de l'eau ((arrêté du 27 juillet 2015 modifiant l'arrêté du 25 janvier 2010, https://www.legifrance.gouv.fr/jo_pdf.do?id=JORFTEXT000031107256). La valeur la plus restrictive est sélectionnée et fixe les bornes des classes de la représentation cartographique à 0,08 et 0,16 µg/L sachant que la valeur seuil des eaux souterraines pour le cadmium est de 5 µg/L.

Les concentrations dans les eaux de surface sont élevées (supérieures à deux fois la NQE-MA) dans les masses d'eau FRHG102 et FRHG001 de type alluvial. Ces concentrations sont liées aux activités industrielles présentes tout le long de la vallée de la Seine. Dans les eaux souterraines, la moyenne des concentrations en cadmium dépasse souvent la NQE-MA. La majorité des points de mesure, que ce soit dans les eaux de surface ou les eaux souterraines, témoignent de concentrations supérieures à 2 X NQE-MA. Aucun secteur ou particularité ne se distingue. L'analyse cartographique ne montre aucune pertinence à utiliser cet élément comme marqueur du lien eaux de surface – eaux souterraines.

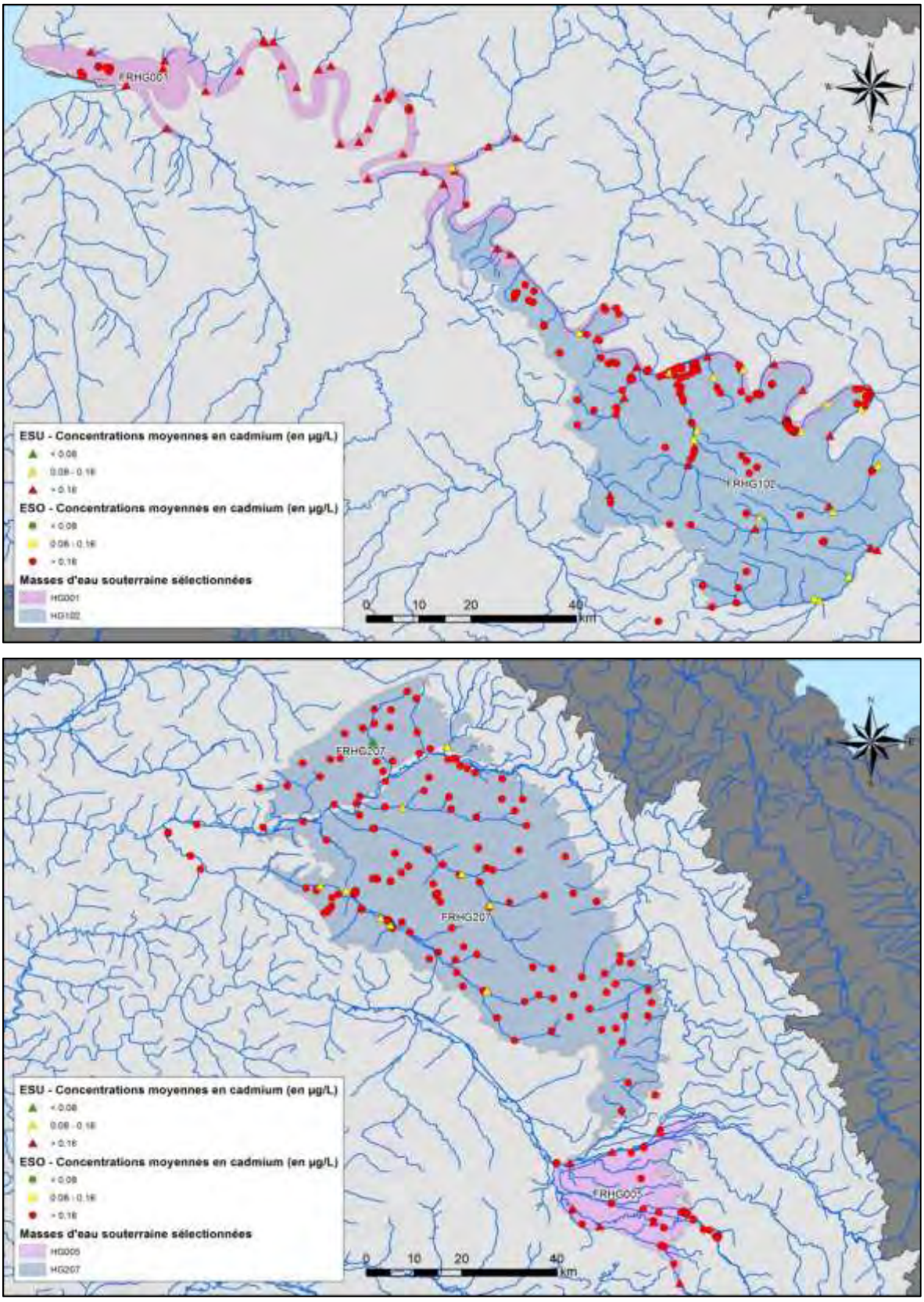


Figure 20. Concentrations moyennes en cadmium (en µg/L) dans les eaux souterraines et de surface des masses d'eau a) FRHG001 et FRHG102, b) FRHG207 et FRHG005

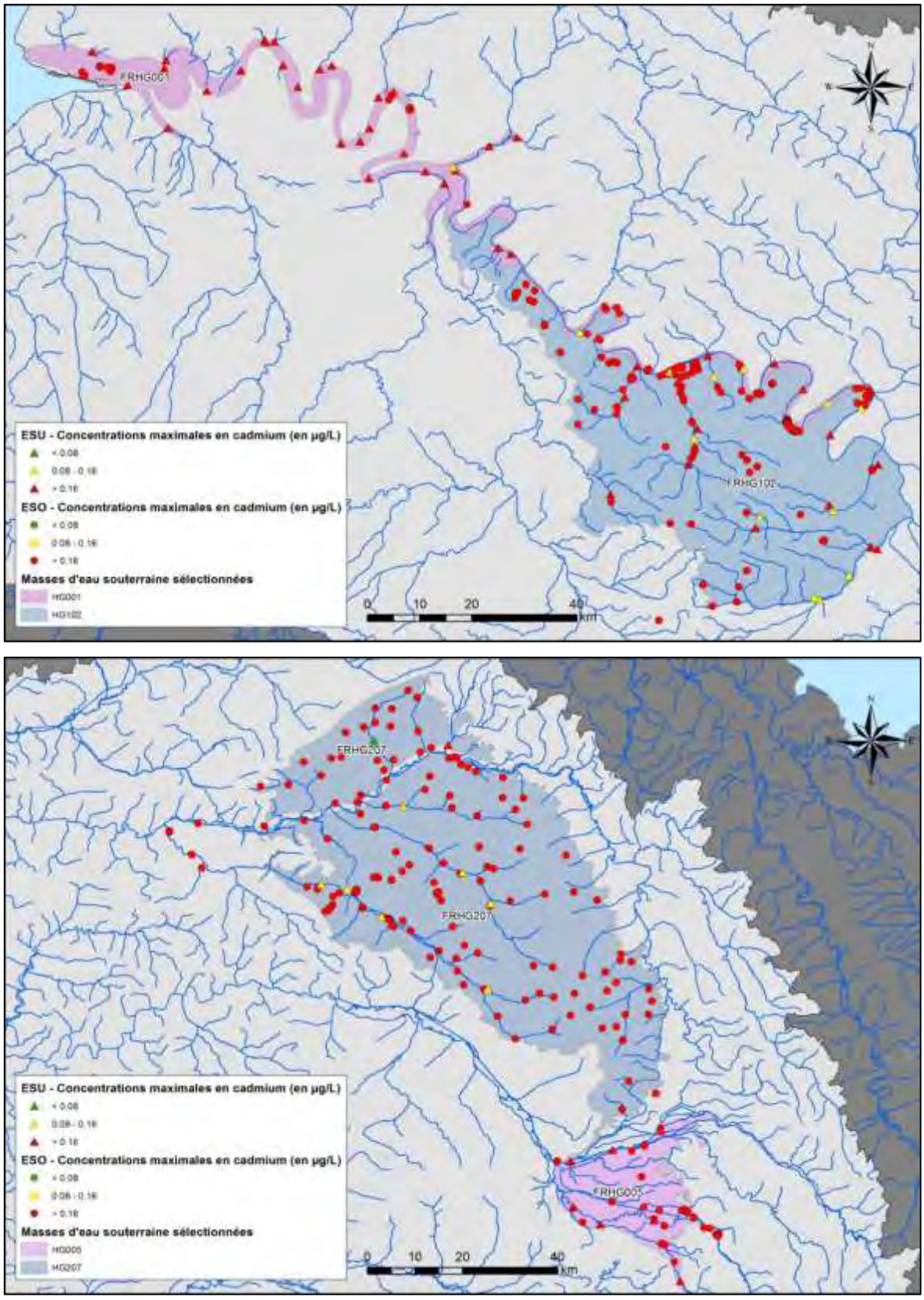


Figure 21. Concentrations maximales en cadmium (en µg/L) dans les eaux souterraines et de surface des masses d'eau a) FRHG001 et FRHG102, b) FRHG207 et FRHG005

Le plomb

La valeur seuil du plomb dans les eaux souterraines est de 10 µg/L et la norme de qualité environnementale NQE-MA pour les eaux de surface est de 1,2 µg/L (arrêté du 27 juillet 2015 modifiant l'arrêté du 25 janvier 2010, https://www.legifrance.gouv.fr/jo_pdf.do?id=JORFTEXT000031107256). Les bornes des classes utilisées pour le traitement SIG sont alors 1,2 et 2,4 µg/L (Figure 22, Figure 23).

L'écart entre valeur seuil et NQE pour le plomb est moins marqué que pour le cadmium ou le cuivre. On observe une certaine cohérence entre les concentrations moyennes et maximales observées dans les eaux souterraines et les eaux de surface. Les concentrations moyennes en plomb (Figure 22a) sont plus élevées tout au long de la zone alluvionnaire de la Seine ainsi que sur les bordures de la masse d'eau FRHG005 (Figure 22b) en lien avec les activités industrielles. Les dépassements en valeur moyenne de 2 fois la NQE-MA dans les eaux souterraines coïncident avec des valeurs moyennes plus importantes également dans les eaux de surface et pourraient suggérer l'existence d'un lien et d'un impact mais difficile de dire si l'impact se fait des eaux souterraines vers les eaux de surface ou l'inverse. On constate que en dehors de la zone alluvionnaire de la Seine, la masse d'eau FRHG102 montre des concentrations moyennes inférieures à la NQE-MA dans les eaux souterraines alors que des valeurs moyennes supérieures à la NQE-MA sont enregistrées dans les eaux de surface. De plus, le plomb dans le milieu naturel, est un élément peu soluble, souvent étroitement lié à des complexes carbonatés et phosphatés et adsorbé sur les phases porteuses comme les oxydes de fer dans les sols. Les apports anthropiques les plus importants dans les eaux proviennent des rejets sidérurgiques et des aérosols marins. Les conditions ne sont pas favorables à son transfert des eaux souterraines vers les eaux de surface. Les concentrations maximales enregistrées dans les eaux de surface montrent elles-aussi une correspondance géographique entre eaux de surface et eaux souterraines ce qui laisse à penser qu'un lien eau de surface – eau souterraine existe mais il est difficile d'aller plus loin sur cette question et d'établir dans quel direction l'influence de la pollution anthropique se fait : des eaux de surface vers les eaux souterraines ou des eaux souterraines vers les eaux de surface ?

La comparaison des données qualité eaux de surface – eaux souterraines lorsque la différence de VS et NQE est importante est encourageante et mériterait d'être approfondie sur d'autres types de masses d'eau dans d'autres contextes géologiques. La question reste difficile puisqu'on pourrait conclure à un lien mais sans savoir dans quelle direction se feraient les échanges.

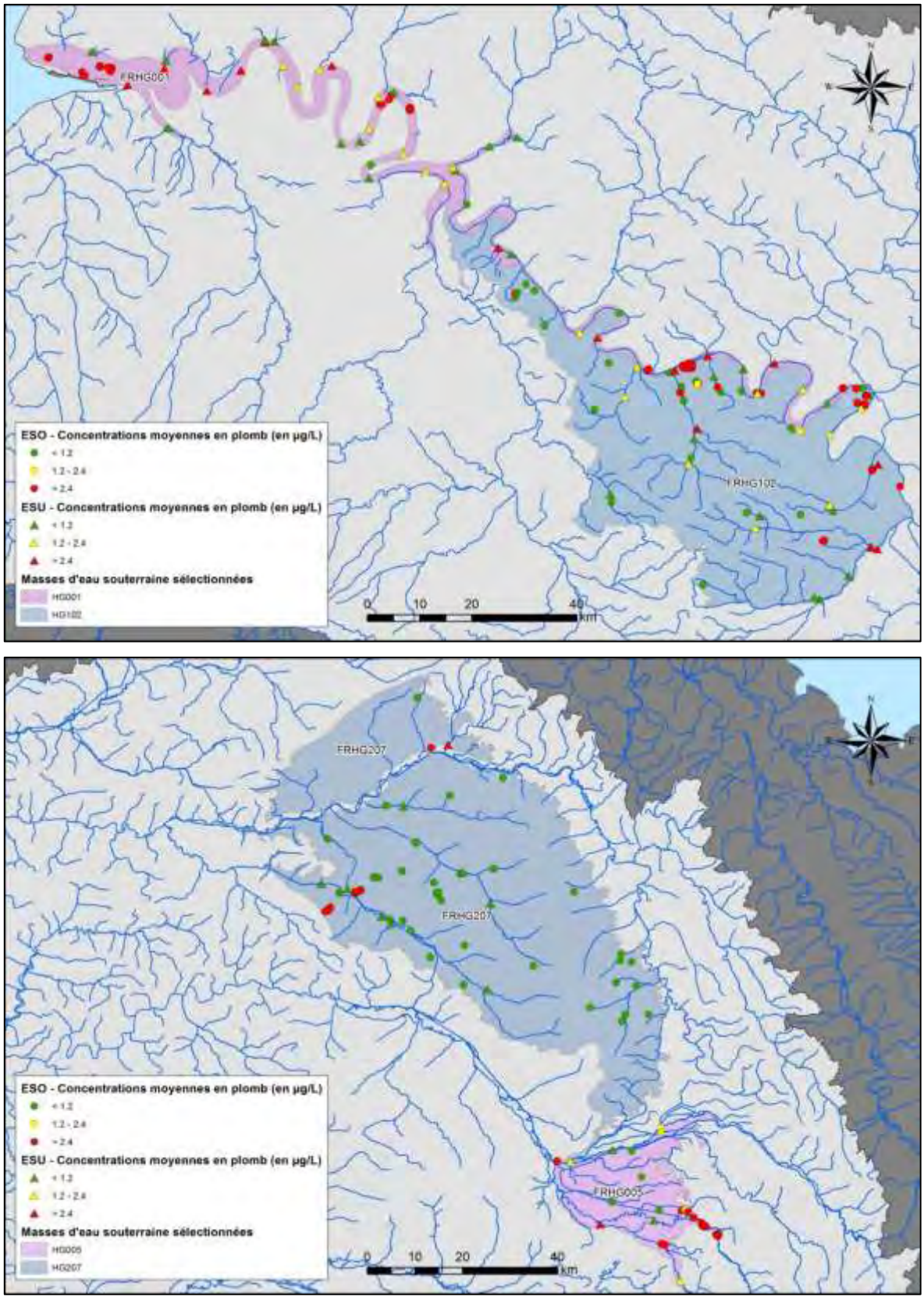


Figure 22. Concentrations moyennes en plomb (en µg/L) dans les eaux souterraines et de surface des masses d'eau a) FRHG001 et FRHG102, b) FRHG207 et FRHG005

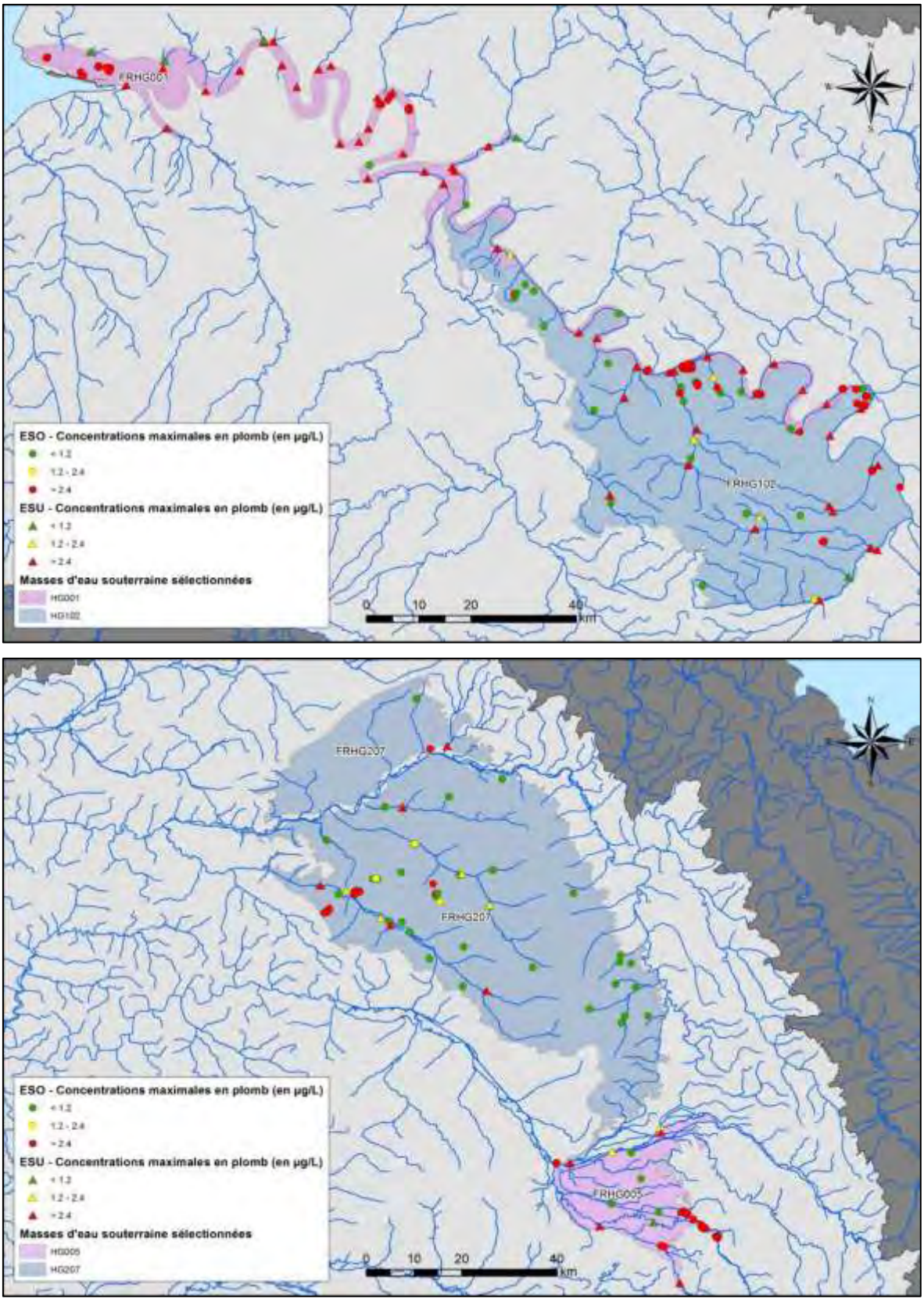


Figure 23. Concentrations maximales en plomb (en µg/L) dans les eaux souterraines et de surface des masses d'eau a) FRHG001 et FRHG102, b) FRHG207 et FRHG005

Centre scientifique et technique
Direction Eau, Environnement et Ecotechnologies
3, avenue Claude-Guillemin
BP 36009 – 45060 Orléans Cedex 2 – France – Tél. : 02 38 64 34 34
www.brgm.fr