



Année de programmation 2013 – Thème « Pollutions Diffuses » – Action 50

Guide pour la délimitation et la cartographie de la vulnérabilité intrinsèque d'Aires d'Alimentation de Captages à transferts mixtes

Rapport final

Clotaire CATALOGNE (Irstea)
Nadia CARLUER (Irstea)
Guy LE HENAFF (Irstea)
Jean-François VERNOUX (BRGM)

Février 2014

Document élaboré dans le cadre de la convention ONEMA-Irstea

- **AUTEURS**

Clotaire CATALOGNE, Ingénieur d'étude (Irstea), clotaire.catalogne@irstea.fr

Nadia CARLUER, Ingénieur Chercheur (Irstea), nadia.carluer@irstea.fr

- **CORRESPONDANTS**

Onema : Claire BILLY, Chargée de mission "Qualité de l'eau et territoires ruraux" (ONEMA), claire.billy@onema.fr

- **AUTRES CONTRIBUTEURS**

Guy LE HENAFF, Ingénieur agronome (Irstea), guy.le-henaff@irstea.fr

Jean-François Vernoux, Hydrogéologue (BRGM), jf.vernoux@brgm.fr

Droits d'usage : accès libre

Niveau géographique : national

Couverture géographique : nationale

Niveau de lecture : professionnels, experts



GUIDE POUR LA DÉLIMITATION ET LA CARTOGRAPHIE DE LA VULNÉRABILITÉ INTRINSÈQUE D'AIRES D'ALIMENTATION DE CAPTAGES À TRANSFERTS MIXTES

- **RÉSUMÉ**

Ce guide a pour vocation d'améliorer les méthodologies existantes pour la mise en œuvre des études de délimitation et de cartographie de la vulnérabilité intrinsèque dans le cas de captages à mode d'alimentation mixte, *i.e.* faisant à la fois intervenir des transferts souterrains et superficiels. Barrez et al. (2013a) préconisent à ce sujet de s'appuyer sur les méthodes de références développées ces dernières années par le BRGM pour les captages d'eau souterraines et par Irstea pour les captages d'eau de surface.

Le présent guide se donne donc pour objectif de fournir les éléments opérationnels permettant l'application conjointe des deux méthodes précitées dans le cas d'AAC à transferts mixtes.

Il aborde en premier lieu la phase de délimitation de l'AAC, au cours de laquelle l'identification des modes de circulation de l'eau et des éventuelles connexions entre eaux souterraines et superficielles doit permettre de déterminer si les transferts peuvent être qualifiés de mixtes. De là, le guide rappelle la démarche générale puis les outils permettant d'identifier correctement les contours de l'AAC en tenant compte de l'ensemble des types de transferts mis en jeu.

Dans un second temps, il présente l'étape consistant à cartographier la vulnérabilité de l'AAC pour chaque type de transfert. Après un rappel sur le principe de chacune des deux méthodes de référence préexistantes et des recommandations pratiques pour leur bonne utilisation, une solution est proposée pour permettre leur articulation. Suivant principalement les orientations données par la méthode du BRGM, cette réflexion permet de formuler un ensemble de suggestions méthodologiques qui visent avant tout à assurer une cohérence entre les différents types de transferts considérés.

- **MOTS CLÉS (THÉMATIQUE ET GÉOGRAPHIQUE) :** Pollutions Diffuses, Aire d'Alimentation de Captage, Délimitation, Vulnérabilité, Transferts Mixtes



Guide pour la délimitation et
la cartographie de la vulnérabilité intrinsèque
d'Aires d'Alimentation de Captages à transferts
mixtes
Document final
Catalogne et al. (2014)



**GUIDE FOR DELINEATION AND CARTOGRAPHY OF VULNERABILITY FOR DRINKING WATER CATCHMENTS AREA,
WHERE BOTH UNDERGROUND AND SUPERFICIAL WATER FLOWS OCCUR**

- **ABSTRACT**

This guide is dedicated to the improvement of methods for delineation of drinking water catchment area (DWCA) and the diagnosis of its vulnerability in case of mixed water transfers, i.e. bringing in at the same time underground and superficial transfers. To this end, Barrez et al. (2013a) recommended to lean on the reference methods developed these last years by the BRGM for groundwaters catchments and by Irstea for surface water catchments.

This work's objective is to provide an operational approach allowing the joint application of these methods in case of mixed transfers.

First, it deals with the delineation of the DWCA by characterising the different water circulations modes and connections between ground- and superficial waters. Then, the guide reminds the users about the technical tools allowing to identify correctly the DWCA.

Secondly, it presents a method to cartography vulnerability for each transfer process by coupling the two reference methods. Following the main principles of the BRGM method, this reflection allows to formulate a set of methodological suggestions which aim to ensure consistency between all kinds of transfer.

- **KEY WORDS (THEMATIC AND GEOGRAPHICAL AREA) :** non point source pollution, drinking water catchments area, Delineation, vulnerability diagnosis, mixed water transfers

- **SYNTHÈSE POUR L'ACTION OPÉRATIONNELLE**

Dès l'année 2000, la Directive Cadre sur l'Eau (DCE) a posé des objectifs ambitieux en matière de reconquête de la qualité des ressources en eaux (qu'elles soient destinées à l'alimentation en eau potable ou non). Dans le cadre de cette directive, les états membres de l'Union Européenne doivent notamment agir pour protéger leurs captages d'eau potable dans le but de réduire les traitements appliqués à l'eau prélevée et plus généralement lutter contre la détérioration de la qualité de la ressource (*i.e.* atteinte du « bon état écologique » d'ici 2015).

La DCE, transposée en droit français par la loi sur l'eau et les milieux aquatiques (LEMA, n°2006-1772, article 21) et le décret du 14 mai 2007 (n°2007-882) est venue renforcer les outils réglementaires déjà existants (*i.e.* périmètres de protection rendus obligatoires par la loi sur l'eau du 3 janvier 1992) pour une meilleure prise en compte des problématiques de pollutions diffuses. Ces textes désignent notamment l'Aire d'Alimentation du Captage comme territoire d'action. Le Grenelle de l'environnement a ensuite confirmé l'importance de cette orientation. La mise en œuvre des conclusions du Grenelle (article 27 de la loi n°2009-967 du 3 août 2009) prévoyait en effet d'assurer dès 2012 la protection d'un peu plus de 500 captages parmi les plus menacés par les pollutions diffuses (une partie des études est encore en cours). D'ici 2015, la démarche devra par ailleurs être étendue à environ 2500 captages désignés comme prioritaires par les SDAGEs.

Pour opérer la protection de ces captages vis-à-vis des pollutions diffuses, il convient de définir et de mettre en œuvre des programmes d'action adaptés. La démarche d'élaboration du plan d'action prévoit plusieurs étapes successives et complémentaires qui incluent un certain nombre d'études préalables visant à :

- identifier les contours de l'Aire d'Alimentation du Captage (AAC)
- cartographier la vulnérabilité propre au milieu, en fonction des modes de transferts identifiés et indépendamment des pressions exercées (on parle alors de vulnérabilité intrinsèque) ;
- identifier les pressions exercées par les activités potentiellement polluantes sur le territoire et analyser le contexte socio-économique dans lequel elles interviennent.

Ces éléments de diagnostic sont ensuite confrontés pour localiser les zones les plus pertinentes pour la mise en œuvre d'un programme d'action efficace et durable au regard des enjeux de protection de la ressource comme au regard des enjeux socio-économiques. Cette dernière étape doit également s'accompagner de mesures de suivi à court et moyen termes pour évaluer l'efficacité du programme d'action engagé et, si besoin, faire évoluer celui-ci.

Pour répondre aux besoins des porteurs de projet et maîtres d'œuvres, les deux premières étapes ont notamment donné lieu à la rédaction de deux guides méthodologiques pour la délimitation et le diagnostic de vulnérabilité de l'AAC, l'un pour les eaux souterraines (Vernoux et al, 2007a) et l'autre pour les eaux de surface (Le Hénaff et Gauroy, 2011). Un guide complémentaire a alors été conçu pour faciliter l'identification des types de transferts en présence sur l'AAC et ainsi aider au choix de la méthode à utiliser (Barrez et al., 2013a). Suite à ce travail, il a été fait le constat que, dans de nombreux cas, l'alimentation du captage fait intervenir des modes de transfert mixtes, par infiltration et transferts superficiels. Lorsque le cas se présente, Barrez et al. (2013a) préconisent alors d'appliquer conjointement les deux méthodes précitées de manière à bien caractériser et localiser les zones les plus vulnérables par types de transferts et ainsi permettre de mieux cibler le type d'action à mettre en œuvre.

Dans la continuité des travaux précédents, cette nouvelle action s'est attachée à élaborer une approche permettant d'articuler les deux méthodes de référence de manière à couvrir les besoins méthodologiques en matière de délimitation et de diagnostic de vulnérabilité d'AAC à transferts mixtes. Il est ainsi tout d'abord proposé de faire le point sur :

- l'identification des types de transferts en présence lors de la phase de délimitation de l'AAC pour déterminer dans quel cas les transferts peuvent être qualifiés de mixtes ;
- la démarche et les outils mobilisables pour la délimitation d'une AAC à transferts mixtes en restructurant les diverses préconisations des guides existants ;

Viennent ensuite un rappel sur le principe des méthodes de référence pour la cartographie de la vulnérabilité aux transferts souterrains et superficiels ainsi qu'un rappel sur les bonnes pratiques et les données mobilisables pour la réalisation de ces études. La réflexion menée autour de l'application conjointe des méthodes de cartographie de la vulnérabilité dans le cas d'une AAC à transferts mixtes permet ensuite de formuler un ensemble de propositions méthodologiques, qui doivent permettre d'assurer une certaine cohérence dans l'évaluation des risques associés à chaque type de transfert.

Pour ce faire, **il est proposé d'articuler les deux approches en ayant recours à trame méthodologique commune qui doit permettre de traiter conjointement la vulnérabilité aux différents types de transferts, notamment concernant la façon d'interpréter puis de combiner les différents critères de vulnérabilité.** Étant donné que l'approche proposée par Irstea ne donne pas d'indications à ce sujet, les choix méthodologiques s'appuieront pour l'essentiel sur les solutions retenues par le BRGM (qui reste presque inchangée). L'influence de l'ensemble des critères de vulnérabilité suggérés par chacune des deux méthodes est transcrite sous forme de scores (codés entre 0 et 4) en partant, pour commencer, d'un critère commun pour définir la partition entre transferts souterrains et transferts superficiels (l'Indice de Développement et de Persistance des Réseaux). Suite à cette première étape, la méthodologie proposée par le BRGM pour les transferts souterrains peut-être poursuivie telle quelle. Pour les transferts superficiels, quatre étapes hiérarchisées sont suggérées pour refléter les mécanismes d'écoulement dans le sol et déterminer successivement les vulnérabilités associées au ruissellement hortonien, au drainage agricole et aux écoulements hypodermiques, puis au ruissellement par saturation. Chaque score de vulnérabilité est alors déduit des précédents à partir d'un score intermédiaire en adoptant un principe de complémentarité permettant d'assurer la cohérence entre les différents types de transferts décrits (cf. Figure 9 pour un aperçu synthétique de la méthode).

Même si la démarche proposée constitue un premier pas vers la réalisation de diagnostics de vulnérabilité d'AAC à transferts mixtes, le choix de passer par l'articulation des méthodes existantes, développées indépendamment pour les transferts souterrains et les transferts superficiels, induit un certain nombre de contraintes méthodologiques qui, si elles ont été traitées de manière à construire une démarche la plus logique et cohérente possible, s'accompagnent de quelques défauts conceptuels ne permettant pas de parvenir à un résultat pleinement satisfaisant. On notera en particulier que :

- Le choix du paramètre IDPR pour la partition entre transferts souterrains et superficiels n'est pas compatible avec l'approche proposée par le BRGM dans le cas des milieux karstiques ;
- La divergence entre les approches pour les transferts souterrains et superficiels au-delà de la première étape pourra dans certains cas (*a priori* rares) conduire à obtenir un cumul des scores de vulnérabilité dépassant la valeur maximale de 4 ;
- Le recours à des scores codés entre 0 et 4 laisse peu de souplesse quant aux combinaisons possibles. Il en résulte que la gradation logique ou attendue de la vulnérabilité en fonction de l'évolution d'un critère donné n'est ainsi pas toujours possible ;

Un certain nombre d'améliorations ou d'ajouts pourraient être apportés pour résoudre les différents défauts identifiés mais cela nécessiterait une refonte plus approfondie des méthodes existantes, sortant du cadre de ce guide. En revanche, la réflexion menée à ce sujet nous a poussés à proposer une nouvelle approche, autonome (ne se référant plus aux méthodes existantes) et apportant quelques améliorations notoires,

notamment vis-à-vis de la prise en compte des incertitudes inhérentes à la démarche et plus généralement vis-à-vis des concepts méthodologiques mobilisés. Cette nouvelle méthode fera l'objet d'un nouveau rapport au cours de l'année 2014 mais elle demande encore à être validée.

Pour en savoir plus :

<http://captages.onema.fr/>

Barrez F., Wibaux V., Le Henaff G., Vernoux J.F., Carluier N., Catalogne C. (2013a). Aide quant à l'optimisation des actions pour protéger un captage : méthodologie de choix d'actions pertinentes en fonction des typologies de transfert sur une AAC. Rapport Irstea/BRGM-ONEMA, 29 pp.

Le Henaff G., Gauroy C. (2011). Délimitation des aires d'alimentation de captages en eaux de surface et caractérisation de leur vulnérabilité vis-à-vis des pollutions agricoles diffuses par les pesticides – Guide méthodologique. Rapport Irstea-MEEDDM/MAAF, 55 pp.

Vernoux J.F., Wuilleumier A., Dörfliger N. (2007a). Délimitation des bassins d'alimentation des captages et de leur vulnérabilité vis-à-vis des pollutions diffuses – Guide méthodologique. Rapport BRGM-AESN, 72 pp.

Sommaire

INTRODUCTION	10
<i>Contexte général</i>	10
<i>Rappel concernant la démarche de protection des captages</i>	10
<i>État des lieux des outils de délimitation de l'AAC et de diagnostic de vulnérabilité intrinsèque</i>	11
<i>Objectifs du guide</i>	11
1. DÉLIMITATION D'UNE AAC À TRANSFERTS MIXTES	13
1.1. Définition et identification d'une AAC à transferts mixtes	13
1.2. Concepts de bassin versant topographique, de bassin d'alimentation d'un aquifère et délimitation d'une aire d'alimentation de captage	17
1.3. Outils pour aider à la délimitation d'une AAC à transferts mixtes	22
2. CARTOGRAPHIE DE LA VULNÉRABILITÉ D'UNE AAC A TRANSFERTS MIXTES	26
2.1. Rappel du principe des méthodes de cartographie de la vulnérabilité	27
2.1.1. <i>Méthode relative à la vulnérabilité vis-à-vis des transferts souterrains</i>	27
2.1.2. <i>Méthode relative à la vulnérabilité vis-à-vis des transferts superficiels</i>	29
2.2. Rappel des bonnes pratiques en matière de cartographie de la vulnérabilité et données mobilisables	31
2.2.1. <i>Format de restitution cartographique</i>	31
2.2.2. <i>Données mobilisables</i>	32
2.3. Application conjointe des méthodes d'évaluation de la vulnérabilité sur une AAC à transferts mixtes	33
2.3.1. <i>Méthodologie proposée</i>	33
2.3.2. <i>Exemple</i>	39
2.3.3. <i>Avantages, limites et perspectives</i>	39
2.3.4. <i>Interprétation des résultats pour la mise en place d'actions de protection</i>	41
CONCLUSION ET PERSPECTIVES	44
GLOSSAIRE	46
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	50
LISTE DES ILLUSTRATIONS	52
LISTE DES TABLEAUX	52
ANNEXES	53
ANNEXE I : AIDE-MÉMOIRE POUR LA CARACTÉRISATION DU TYPE D'AQUIFÈRE	53
ANNEXE II : TRIANGLE DES TEXTURES	53
ANNEXE III : AIDE-MÉMOIRE POUR L'APPLICATION DE LA MÉTHODE DE CARTOGRAPHIE DE LA VULNÉRABILITÉ AUX TRANSFERTS SOUTERRAINS	54
ANNEXE IV : DONNÉES MOBILISABLES	55

INTRODUCTION

Contexte général

L'alimentation en eau potable des citoyens est un enjeu de santé publique majeur. Pour assurer la production d'une eau potable de qualité et dans la mesure où elle permet d'éviter le recours aux mesures curatives souvent coûteuses, la protection de la ressource contre les divers types de contaminations (pesticides et nitrates mais aussi bactériologie, hydrocarbures, métaux lourds...) doit être une priorité.

Dès l'année 2000, la Directive Cadre sur l'Eau (DCE) a ainsi posé des objectifs ambitieux en matière de reconquête de la qualité des ressources en eaux (qu'elles soient destinées à l'alimentation en eau potable ou non). Dans le cadre de cette directive, les états membres de l'Union Européenne doivent notamment agir pour protéger leurs captages d'eau potable dans le but de réduire les traitements appliqués à l'eau prélevée et plus généralement lutter contre la détérioration de la qualité de la ressource (*i.e.* atteinte du « bon état écologique » d'ici 2015).

En France, la loi sur l'eau et les milieux aquatiques (LEMA, n°2006-1772, article 21) et le décret du 14 mai 2007 (n°2007-882) ont renforcé les outils réglementaires déjà existants (*i.e.* périmètres de protection rendus obligatoires par la loi sur l'eau du 3 janvier 1992) pour une meilleure prise en compte des problématiques de pollutions diffuses. Ces textes désignent notamment l'Aire d'Alimentation du Captage comme territoire d'action. Le Grenelle de l'environnement a ensuite confirmé l'importance de cette orientation. La mise en œuvre des conclusions du Grenelle (article 27 de la loi n°2009-967 du 3 août 2009) prévoyait en effet d'assurer dès 2012 la protection d'un peu plus de 500 captages parmi les plus menacés par les pollutions diffuses (une partie des études est encore en cours). D'ici 2015, la démarche devra par ailleurs être étendue à environ 2500 captages désignés comme prioritaires par les SDAGEs.

Qu'est-ce qu'une Aire d'Alimentation de Captage ?

La notion d'Aire d'Alimentation d'un Captage apparaît pour la première fois en 2006 dans les textes réglementaires relatifs à la gestion des problématiques de protection des captages vis-à-vis des pollutions diffuses (loi sur l'eau et les milieux aquatiques du 30 décembre 2006, n°2006-1772, article 21). Elle désigne l'ensemble des surfaces contribuant à l'alimentation du captage ou, autrement dit, l'ensemble des surfaces où toute goutte d'eau tombée au sol est susceptible de parvenir jusqu'au captage, quel que soit le mode de transfert mis en jeu. En vertu de cette définition, l'AAC doit a minima inclure les différents niveaux de périmètres de protection, principalement prévus pour prévenir les pollution d'origine ponctuelle ou accidentelle dans le voisinage plus ou moins immédiat du captage. Elle se substitue par ailleurs à la notion équivalente de bassin d'alimentation de captage (BAC) qui était d'usage plus courant dans le vocabulaire hydrogéologique.

Rappel concernant la démarche de protection des captages

La démarche de protection des captages vis-à-vis des pollutions diffuses comprend plusieurs phases successives et complémentaires qui incluent un certain nombre d'études préalables visant à :

- caractériser l'état initial de la ressource (nature de la contamination) ;
- identifier les contours de l'Aire d'Alimentation du Captage (AAC) ;
- cartographier la vulnérabilité propre au milieu, en fonction des modes de transferts identifiés et indépendamment des pressions exercées (on parle alors de vulnérabilité intrinsèque) ;
- identifier les pressions exercées par les activités potentiellement polluantes sur le territoire et analyser le contexte socio-économique dans lequel elles interviennent.

Ces éléments de diagnostic sont ensuite confrontés pour localiser les zones les plus pertinentes pour la mise en œuvre d'un programme d'action efficace et durable au regard des enjeux de protection de la ressource

comme au regard des enjeux socio-économiques. Cette dernière étape doit également s'accompagner de mesures de suivi à court et moyen termes pour évaluer l'efficacité du programme d'action engagé et, si besoin, faire évoluer celui-ci.

Le présent guide a pour objet l'étape de délimitation de l'AAC et celle visant à réaliser un diagnostic de la vulnérabilité intrinsèque. Il sera utilement complété par les diverses ressources documentaires relatives aux autres volets de la démarche (voir en particulier le guide du MEDDE paru en 2013 ; le reste de la documentation est disponible en téléchargement sur le site www.captages.onema.fr).

État des lieux des outils de délimitation de l'AAC et de diagnostic de vulnérabilité intrinsèque

Un certain nombre d'outils méthodologiques a été développé pour répondre aux besoins d'ordres technique et décisionnel relatifs aux différents aspects de la démarche de protection des captages évoquée précédemment. Parmi ces outils, ceux relatifs à la délimitation et au diagnostic de vulnérabilité de l'AAC ont fait l'objet d'assez nombreuses investigations. Ainsi, un guide dédié à l'identification des contours de l'Aire d'Alimentation et la cartographie de la vulnérabilité propre au « milieu physique » (également dénommée vulnérabilité intrinsèque) a été proposé dès 2007 pour les captages d'eaux souterraines faisant essentiellement intervenir des transferts par infiltration (Vernoux *et al.*, 2007). Un guide équivalent est paru en 2012 pour traiter plus spécifiquement le cas des captages d'eaux de surface, majoritairement alimentés *via* des transferts superficiels (*i.e.* ruissellement, écoulements hypodermiques dans le sol, drainage agricole et dérive atmosphérique ; Le Henaff et Gauroy, 2012)¹. Un guide complémentaire a alors été conçu pour faciliter l'identification des types de transferts en présence sur l'AAC et ainsi aider au choix de la méthode à utiliser (Barrez *et al.*, 2013a). Suite à ce travail, il a été fait le constat que, **dans de nombreux cas, l'alimentation du captage fait intervenir des modes de transfert mixtes, par infiltration et transferts superficiels**. Or, aucune des deux méthodes précitées ne permet à elle seule de traiter ce type de cas. Ce manque est notamment pointé dans le rapport relatif aux retours d'expérience de la méthode relative aux captages d'eau souterraine (Vernoux *et al.*, 2011). Lorsque le cas se présente, Barrez *et al.* (2013a) préconisent alors d'appliquer conjointement les deux méthodes de manière à bien caractériser et localiser les zones les plus vulnérables par type de transferts et ainsi permettre de mieux cibler le type d'action à mettre en œuvre. Il s'agit ici de préciser comment procéder.

Objectifs du guide

Le présent guide se donne pour objectif de fournir les éléments opérationnels permettant l'application conjointe des deux méthodes précitées pour la délimitation et l'évaluation de la vulnérabilité intrinsèque par types de transfert dans le cas d'AAC à transferts mixtes. Ainsi, il sera tout d'abord proposé de faire le point sur :

- l'identification des types de transferts en présence lors de la phase de délimitation de l'AAC pour déterminer dans quel cas les transferts peuvent être qualifiés de mixtes ;
- la démarche et les outils mobilisables pour la délimitation d'une AAC à transferts mixtes ;

Viennent ensuite un rappel sur le principe des méthodes de référence pour la cartographie de la vulnérabilité aux transferts souterrains et superficiels ainsi qu'un rappel sur les bonnes pratiques et les données mobilisables pour la réalisation de ces études. La réflexion menée autour de l'application conjointe des méthodes de cartographie de la vulnérabilité dans le cas d'une AAC à transferts mixtes permet ensuite de formuler un ensemble de propositions méthodologiques, qui doivent permettre d'assurer une certaine cohérence dans l'évaluation des risques associés à chaque type de transfert.

En conclusion seront rappelées les limites de la démarche proposée et les pistes d'amélioration possibles, notamment vis-à-vis de la description des mécanismes de transferts et de l'incertitude qui s'y

¹ Il convient d'attirer ici l'attention sur le fait que la dénomination de ces deux méthodes est souvent rattachée, par raccourci de pensée, au type de ressource prélevée (ou au mode de captation) alors qu'elles se réfèrent en réalité aux types de transfert dominants qui interviennent dans l'alimentation du captage.

rattache. On signalera que ces éléments nous ont poussé à envisager la conception d'une méthode alternative, en reposant clairement les objectifs et concepts méthodologiques les plus pertinents au regard de la problématique. Cette méthode sera exposée de manière détaillée dans un guide indépendant.

1. DÉLIMITATION D'UNE AAC À TRANSFERTS MIXTES

La délimitation précise d'une Aire d'Alimentation de Captage (AAC) constitue un premier jalon indispensable de la démarche de protection. Elle permet de bien cibler le territoire sur lequel porter les actions et favorise la sensibilisation des acteurs, en particulier les agriculteurs lorsque l'AAC comporte une part non négligeable de Surface Agricole Utile (SAU). Il s'agit alors de mener des études à caractère hydrologique et hydrogéologique pour caractériser, dans toute leur complexité, les chemins de l'eau intervenant sur l'AAC. Ceci inclut la prise en compte des possibles interactions entre eaux de surface et eaux souterraines mais aussi les éventuels aménagements anthropiques susceptibles de transférer de l'eau entre bassins sans connexion hydraulique naturelle (canaux et fossés, réseaux de collecte des eaux pluviales...).

1.1. Définition et identification d'une AAC à transferts mixtes

Par définition et quelle que soit l'origine de l'eau prélevée (source, drain, forage, puits, prise d'eau en lac ou en rivière), une AAC à transferts mixtes correspond à une aire d'alimentation sur laquelle des transferts souterrains et des transferts superficiels sont susceptibles de coexister, que ce soit dans l'espace (juxtaposition spatiale de plusieurs modes de transferts à l'échelle de l'AAC) ou dans le temps (alternance voire concomitance des modes de transferts au droit d'une même parcelle), de manière permanente ou temporaire. Les modes de transfert considérés sont synthétisés dans le Tableau 1.

Transferts superficiels <i>(Traités dans le guide Irstea de 2012)</i>	Ruissellement (diffus ou concentré)	Ruissellement hortonien (par dépassement de la capacité d'infiltration du sol)
		Ruissellement sur surface saturée
	Ecoulements latéraux de sub-surface	Ecoulements hypodermiques dans le sol Drainage agricole
	Dérive atmosphérique	
Transferts souterrains <i>(Traités dans le guide BRGM de 2007)</i>	Infiltration vers les nappes	Diffuse
		Concentrée (pertes et engouffrement)
	Drainance et échanges latéraux entres aquifères	

Tableau 1 : Synthèse des différents modes de transfert pouvant intervenir sur une AAC à transferts mixtes

De fait, les situations recouvertes par la notion d'AAC à transferts mixtes s'avèrent très variées. Une des situations les plus fréquemment rencontrées sera par exemple le cas de captages en nappe d'accompagnement où l'eau prélevée, bien que souterraine, fait généralement intervenir une part importante d'eau d'origine superficielle, issue d'échanges avec les cours d'eau, et, en comparaison, assez peu d'eau infiltrée au droit de la formation alluviale elle-même. Le risque de contamination relèvera alors pour beaucoup des éventuels transferts de substances vers les cours d'eau, parfois bien à l'amont du captage.

L'influence du milieu sur les mécanismes de transfert

Les différents types de transfert rencontrés sur une AAC résultent de mécanismes plus ou moins complexes de répartition de l'eau reçue au sol vers les ressources superficielles ou souterraines (Figure 1). Ces mécanismes font intervenir des propriétés du milieu telles que :

- la perméabilité du sol et sa sensibilité au phénomène de battance à l'origine d'un refus d'infiltration et d'un ruissellement plus ou moins important selon l'intensité des pluies (ruissellement dit hortonien) ;
- la perméabilité du substratum autorisant ou non une infiltration vers les aquifères sous-jacents ou à l'inverse un stockage de l'eau par le sol pouvant aller jusqu'à la saturation et conduire au ruissellement de toute l'eau excédentaire reçue en surface ;
- les contrastes de perméabilité entre les différents horizons du sol ou à l'interface sol-substratum susceptibles de favoriser les écoulements latéraux à faible profondeur dans le sol (écoulements dits hypodermiques) ;
- la topographie qui, selon la pente, pourra aussi bien accentuer le ruissellement de surface que les écoulements hypodermiques ou à l'inverse favoriser l'infiltration ou conduire à l'engorgement des sols ;
- la présence des dispositifs de drainage agricole qui limitera le risque de saturation des sols en exportant rapidement l'eau en surplus vers le réseau hydrographique.

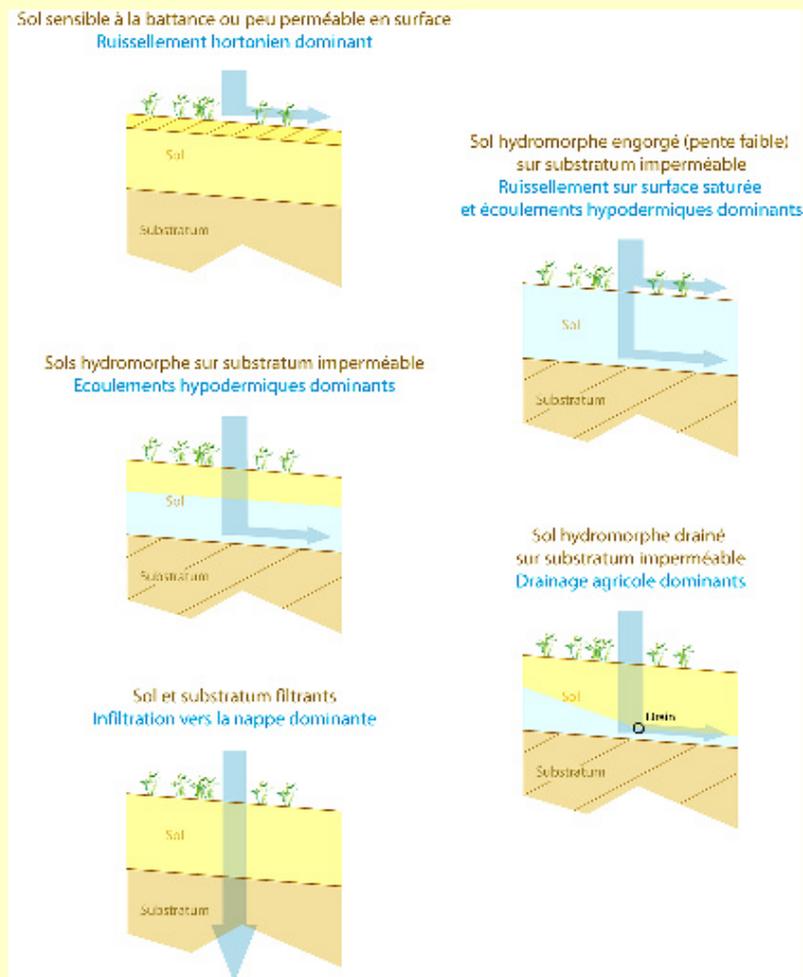


Figure 1 : Schéma simplifié de quelques mécanismes de transfert selon les caractéristiques du milieu

Parallèlement le climat intervient dans le bilan hydrique, c'est-à-dire l'eau excédentaire qui rejoindra les nappes ou les cours d'eau, avec un risque de transfert plus ou moins accentué à l'échelle saisonnière selon la pluviométrie locale, la reprise évapotranspiratoire et l'état de saturation du sol en lien avec ses capacités de stockage (réserve utile). **Il est essentiel de connaître les caractéristiques précitées pour pouvoir déterminer quels types de transferts sont susceptibles de se produire sur l'AAC.**

Une vision relativement exhaustive des situations relevant d'une AAC à transferts mixtes est donnée par Barrez *et al.* (2013a) au travers d'un inventaire descriptif des connexions possibles entre eaux de surface et eaux souterraines. Cette typologie a permis de proposer une série d'arbres de décision permettant d'identifier les cas de figure correspondant à une AAC à transferts mixtes, selon le type de ressource prélevée et le(s) type(s) d'aquifère(s) rencontré(s). **On retiendra simplement qu'une AAC peut être qualifiée d'AAC à transferts mixtes lorsque :**

- **Pour une ressource prélevée en surface (prise d'eau en rivière ou pompage dans un plan d'eau), il est possible de mettre en évidence l'existence d'apports souterrains diffus (échanges nappe-rivière) ou concentrés (source(s) en versant) vers le cours d'eau ou le plan d'eau exploité et donc que des transferts par infiltration sont survenus sur l'AAC en plus des écoulements de surface ;**
- **Pour une ressource prélevée souterraine (source, drain, puits ou forage), il est possible de mettre en évidence l'existence d'apports superficiels diffus (échanges rivière-nappe, réinfiltration) ou concentrés (pertes en rivière, engouffrements) vers l'aquifère exploité et donc que des transferts superficiels sont survenus sur l'AAC en plus des transferts par infiltration ;**

L'identification des différentes composantes (souterraines et superficielles) participant à l'alimentation du captage ne sera en revanche pas toujours évidente. Elle peut-être explicite lorsque les échanges s'effectuent de manière concentrée depuis ou vers la surface (bétoire constituant un point de concentration et d'infiltration préférentielle du ruissellement vers un aquifère, source se déversant dans le réseau hydrographique) ou beaucoup plus difficile à observer dans le cas d'échanges souterrains entre aquifères, de relations nappes-rivières, ou de réinfiltration d'un ruissellement diffus. Outre la caractérisation des propriétés du milieu et de leur influence vis-à-vis des types de transfert (*cf.* encart précédent), elle pourra s'appuyer sur un certain nombre d'outils visant à caractériser ou confirmer plus ou moins directement l'existence de mélanges d'eau de diverses origines. Parmi ces outils on pourra citer :

a) l'apport des données hydrologiques :

- les chroniques de débits disponibles le long du réseau hydrographique au droit des stations hydrométriques peuvent être analysées de manière à déterminer l'existence et la proportion d'apports d'origine souterraine (*e.g.* calcul du Base Flow Index, Institute of Hydrology, 1980) ;
- des campagnes de jaugeages sur un même tronçon de cours d'eau peuvent être mises en œuvre pour obtenir un profil en long et localiser les zones d'apport ou de perte depuis/vers le milieu souterrain (voir par exemple Lejeune *et al.*, 2003) ;

b) l'apport des données de piézométrie pour déterminer l'existence et le sens des échanges nappes-rivière ou plus généralement les directions d'écoulement au sein d'un aquifère (identification de différents exutoires).

c) l'apport des données d'essai par pompage dont l'interprétation peut donner des informations (notamment la distance) sur les limites d'alimentation d'un aquifère, que ces dernières soient souterraines ou superficielles (Chapuis, 1999).

d) l'apport des données physico-chimique de l'eau : de nombreux paramètres physico-chimiques de l'eau (éléments majeurs, isotopes, conductivité électrique, température...) peuvent être utilisés comme traceurs naturels pour déterminer l'existence d'un mélange entre des eaux d'origines différentes. Des éléments en ce sens sont présentés en détail par Barrez *et al.* (2013b).

e) l'apport des données de traçage artificiel qui constitue sans doute le moyen le plus efficace pour identifier tous les types de connexions par suivi du traceur dans les différents compartiments susceptibles de contribuer à l'alimentation d'un captage (Schudel *et al.*, 2002).

La circulation des eaux jusqu'au captage au travers des différents compartiments souterrains et superficiels pourra évidemment inclure plusieurs connexions successives d'amont en aval (comme montré en exemple sur la Figure 2) et donc des apports vers la ressource prélevée que l'on qualifiera d'indirects. **Ces**

connexions sont par ailleurs susceptibles d'évoluer dans le temps (inversion des échanges nappes-rivières en hautes et basses eaux, sources de trop plein en milieu karstique...) et de ne contribuer à l'alimentation du captage que de manière temporaire, parfois peu fréquemment ou sur de très courtes durées.

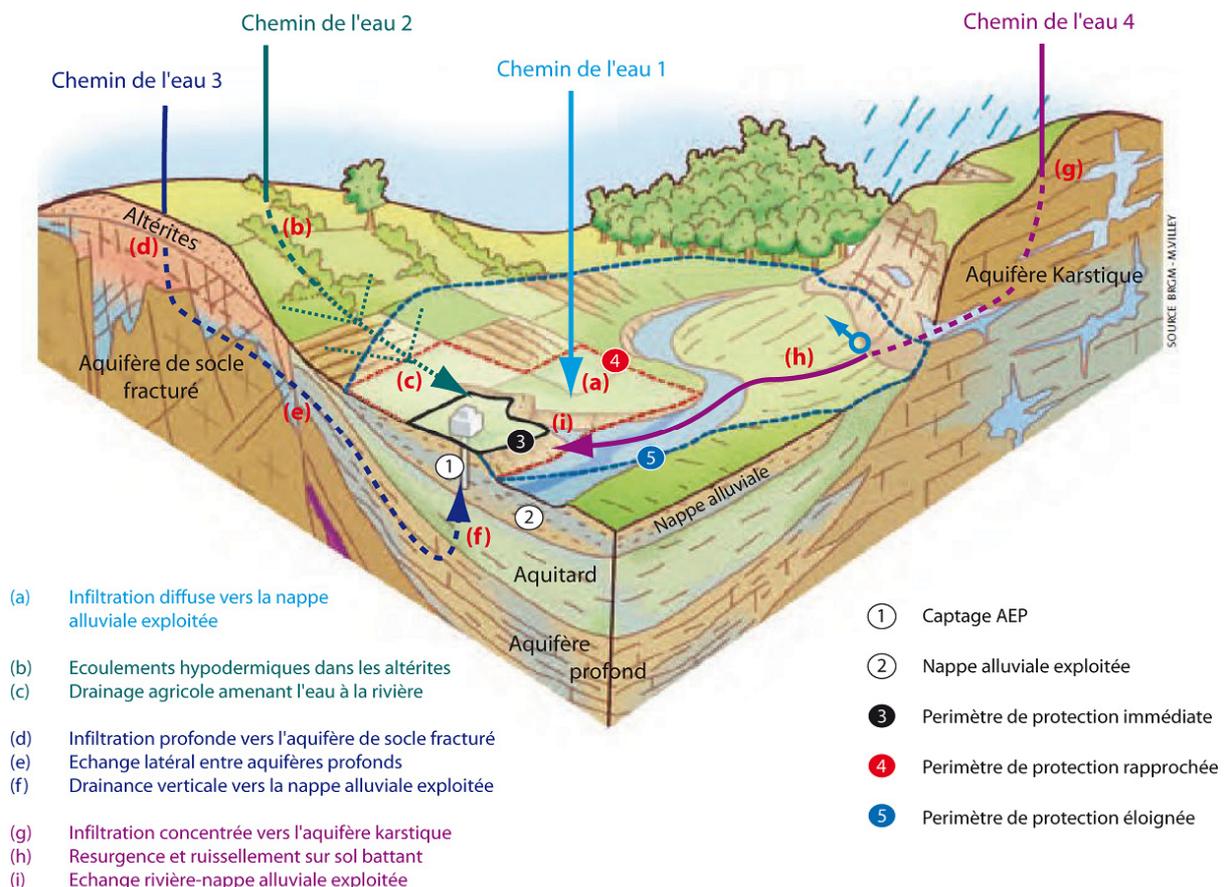


Figure 2 : Illustration de différents chemins de l'eau atteignant un même captage

De fait, une difficulté consiste probablement à déterminer dans quelle mesure les possibles connexions (permanentes ou temporaires) entre eaux de surface et eaux souterraines s'avèrent suffisamment significatives pour justifier l'appellation d'AAC à transferts mixtes. La question est en effet complexe car une faible proportion de flux d'eau de surface vers un captage d'eau souterraine peut par exemple représenter l'essentiel du flux de contaminant. En l'absence d'informations précises à ce sujet (réseau de contrôle de la qualité de l'eau suffisamment dense), **on préférera donc ne pas exclure les zones considérées comme faiblement contributives en termes de flux d'eau de manière à n'omettre aucune source potentielle de contamination dans la délimitation de l'AAC. Au besoin, on ciblera ensuite plus finement les études de vulnérabilité sur les secteurs identifiés comme sensibles au regard des pressions exercées (cf. section 2.2.1).**

Une autre conséquence de l'évolution temporelle des zones contribuant à l'alimentation des captages en fonction des conditions hydrologiques est le possible recouvrement d'AAC distinctes, par exemple en cas d'inversion saisonnière des échanges entre aquifères ou plus simplement en fonction des fluctuations des lignes de crête piézométrique qui déterminent les bassins d'alimentation respectifs de deux captages prélevant les eaux d'un même aquifère.

1.2. Concepts de bassin versant topographique, de bassin d'alimentation d'un aquifère et délimitation d'une aire d'alimentation de captage

On rappelle ici quelques notions utiles à la bonne identification des surfaces contribuant à l'alimentation d'un captage. Ces notions sont illustrées sur la Figure 3 et détaillées dans les paragraphes suivants.

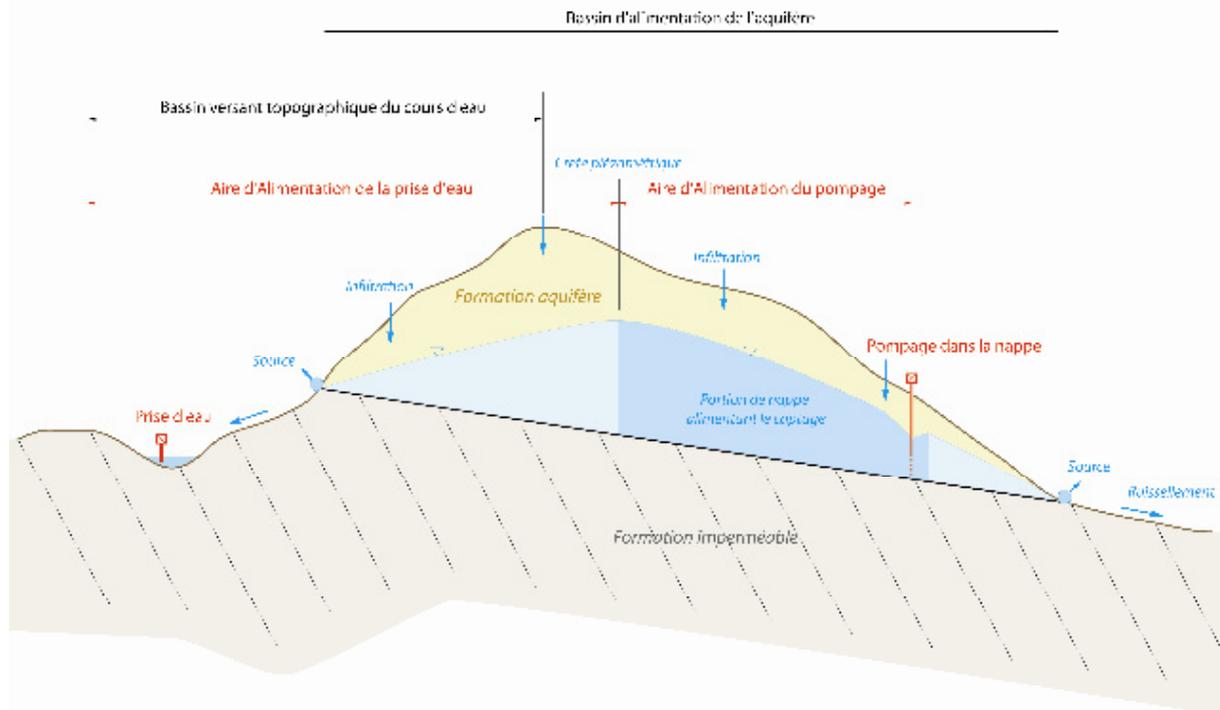


Figure 3 : Illustration des notions de bassin versant topographique et de bassin d'alimentation d'un aquifère

Lorsque la ressource est prélevée en surface, la notion de bassin versant topographique constituera sans doute le meilleur point de départ pour la délimitation de l'AAC. Les limites correspondantes étant strictement superposables aux lignes de crête, elles sont faciles à déduire du relief, par traitement d'un MNT ou à partir de cartes topographiques. Ainsi, dans le guide Irstea de 2012, l'identification des contours du bassin versant topographique était considérée comme suffisante pour délimiter l'Aire d'Alimentation d'un Captage d'eaux de surface. Dans le cas où, sur une partie du bassin, les eaux reçues en surface sont susceptibles de s'infiltrer vers un aquifère, l'étendue de l'AAC pourra en revanche être réduite si tout ou partie de cette eau est exportée vers un autre système, hors des limites du bassin versant topographique ; elle sera inchangée si l'eau est restituée dans le même bassin versant. A l'inverse, lorsque des apports souterrains interviennent depuis un autre bassin *via* un aquifère connecté à la ressource prélevée, l'étendue de l'AAC devra inclure, au-delà du bassin topographique, toutes les zones correspondant au bassin d'alimentation de cet aquifère (cette dernière notion est explicitée plus en détail ci-dessous dans le cas d'un captage d'eaux souterraines). Enfin, il sera important de ne pas omettre les aménagements anthropiques tels que les fossés et canaux mais aussi les réseaux d'assainissement pluviaux susceptibles de faire parvenir (ou détourner) de l'eau depuis (ou vers) un bassin sans connexion hydraulique naturelle.

Dans le cas d'une ressource souterraine, la délimitation de l'AAC pourra prendre pour point de départ l'étendue de la formation aquifère dans laquelle s'effectue le prélèvement (que l'on identifiera sur la base de cartes, relevés géophysiques et structuraux, coupes de forages et coupes géologiques). Dans le cas d'un prélèvement par pompage, cette étendue sera d'abord ramenée (par projection en surface) à celle de la portion de nappe alimentant le captage (PNAC, Figure 3) telle que définie dans le guide BRGM de 2007, c'est-à-dire le volume d'aquifère situé en amont hydraulique du captage dont l'eau est susceptible de parvenir

jusqu'au point de prélèvement (celle-ci pouvant évoluer en fonction du régime de pompage et des conditions hydrologiques, cf. section 1.3).

De là, l'identification du bassin d'alimentation de l'aquifère (ou de la PNAC) correspondra à l'ensemble des surfaces où intervient une infiltration directe vers l'aquifère. Ainsi, il pourra simplement correspondre à la projection en surface de l'extension de la formation aquifère (ou de la PNAC) si celle-ci affleure dans son intégralité sous la couverture pédologique (cas d'une formation alluviale superficielle), ou être plus restreinte en cas de passage sous une couverture imperméable. Un cas plus complexe correspondra aux formations aquifères possédant plusieurs exutoires (incluant d'autres pompages). **La limite amont du bassin d'alimentation du point de prélèvement sera alors calquée sur la ligne de crête piézométrique délimitant les différentes directions d'écoulement. Encore une fois, cette limite est susceptible de fluctuer dans le temps et il convient en toute rigueur de tenir compte de son extension maximale pour délimiter l'AAC. D'autre part, un recouvrement partiel des bassins d'alimentation de deux exutoires distincts n'est par ailleurs pas exclu.** A ces limites s'ajouteront ensuite les éventuelles zones contributives par apports indirects, qu'ils soient souterrains (apports latéraux ou par drainance depuis un autre aquifère dont on déterminera là encore le bassin d'alimentation) ou superficiels (apports depuis un cours d'eau ou par réinfiltration d'un ruissellement diffus dont on déterminera le bassin versant amont à partir du point où se fait l'apport), naturels ou artificiels (bassin d'infiltration, irrigation à partir d'une ressource d'eau de surface, forage mal étanchéifié...).

Les organigrammes présentés sur les Figures 4 et 5 résument de manière très simplifiée les éléments à prendre en compte pour déterminer l'étendue d'une AAC selon que le point de départ est le bassin versant topographique pour un captage d'eaux superficielles ou l'extension de la formation aquifère pour un captage d'eaux souterraines.

Pour résumer, la démarche de délimitation d'une AAC à transferts mixtes consistera essentiellement à bien identifier les différents compartiments contribuant à alimenter le captage puis à déterminer successivement et de proche en proche les limites de chacun d'entre eux selon les éléments exposés ci-dessus, en partant du point de prélèvement pour remonter vers l'amont du système (on rejoint par là le principe de sectorisation proposé par Barrez *et al.* 2013, Figure 6).

Cette étape de caractérisation des chemins de l'eau (*i.e.* de la topologie des écoulements de l'amont vers l'aval) s'avère particulièrement importante puisque, outre l'étape de délimitation de l'AAC proprement dite, elle sera également nécessaire à la bonne interprétation des cartes de vulnérabilité. Pour cela, il sera notamment important de bien distinguer les zones de l'AAC où :

- seuls des transferts souterrains rejoignent la ressource prélevée,
- seuls des transferts superficiels rejoignent la ressource prélevée,
- les deux types de transferts coexistent et rejoignent la ressource prélevée.

De fait, il est essentiel de retenir que si l'un des deux premiers cas se présente, les cartes de vulnérabilité par type de transfert n'auront pas nécessairement la même emprise et pourront ne pas couvrir la totalité de l'AAC. D'autre part, il est également impératif d'accompagner la délimitation de l'AAC par une description des relations topologiques et des interfaces entre compartiments : qui communique avec qui ? dans quel sens ? où, quand et comment ? Ce n'est qu'à l'aide de ces informations, couplées aux cartes de vulnérabilité qu'il sera possible de bien choisir et de positionner au mieux certaines des actions de protection (cf. section 2.3.4).

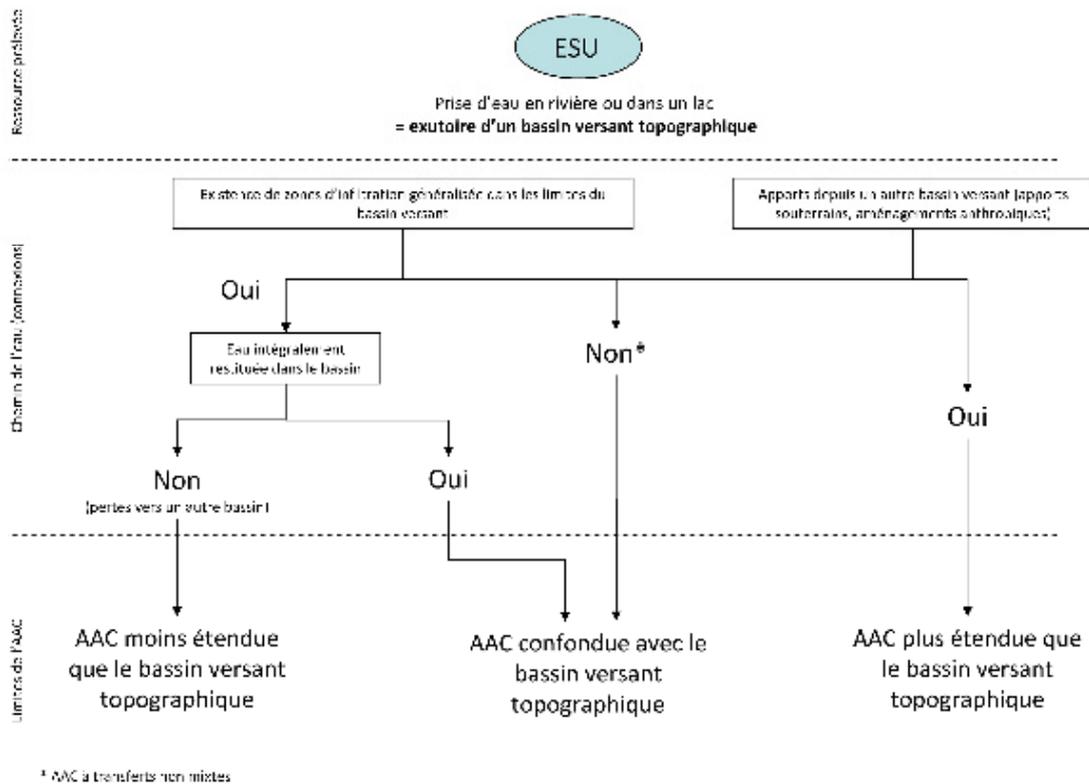


Figure 4 : Organigramme synthétisant les éléments à prendre en compte pour la délimitation d'une AAC lorsque la ressource est prélevée en surface

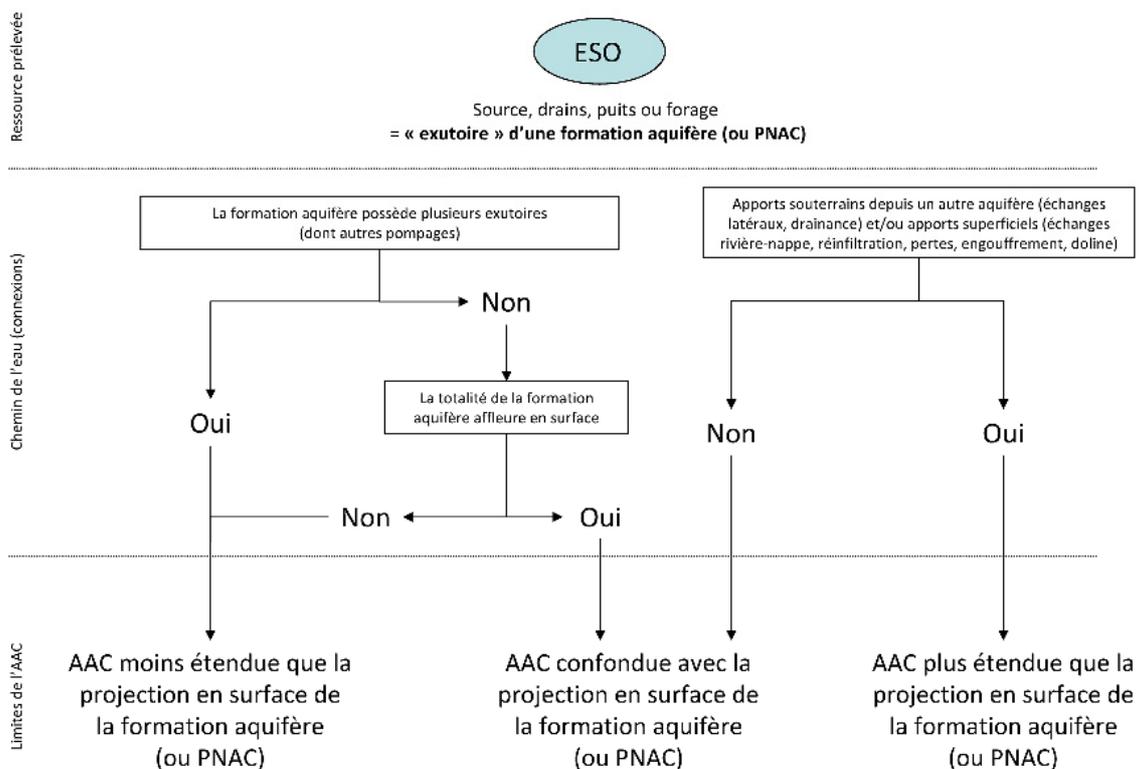


Figure 5 : Organigramme synthétisant les éléments à prendre en compte pour la délimitation d'une AAC lorsque la ressource prélevée est souterraine

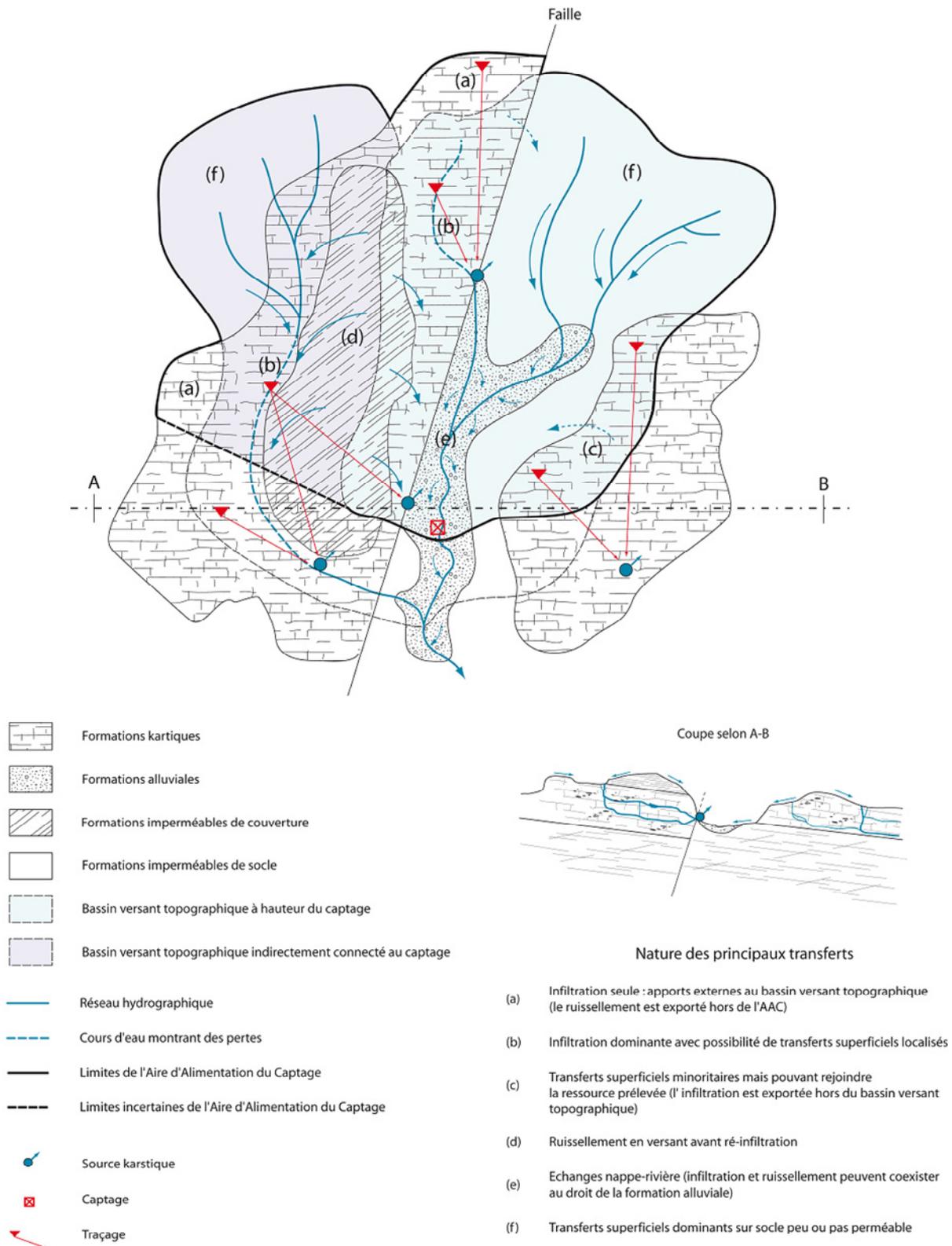


Figure 6 : Exemple d'Aire d'Alimentation de Captage complexe faisant intervenir des compartiments à transferts mixtes stricto sensu, à transferts souterrains seuls ou transferts superficiels seuls. Ici le captage s'effectue en nappe alluviale alimentée par échanges nappe-rivière (e) et par des apports d'origine karstique (sources). L'AAC inclut donc le bassin versant topographique du cours d'eau et les bassins d'alimentation des aquifères karstiques. Ces derniers sont eux-mêmes alimentés en partie par de l'infiltration directe (b) intervenant parfois au-delà des limites topographiques (a) et de la réinfiltration d'écoulements superficiels (d). D'autres zones de l'AAC ne contribuent en revanche à l'alimentation du captage que partiellement via des apports superficiels, les eaux d'infiltration étant exportées hors du bassin versant topographique (c).

Une difficulté posée ici par l'identification des chemins de l'eau reste sans doute le rôle que joue la couverture pédologique dans la possibilité ou non d'infiltration de l'eau de reçue en surface vers les aquifères. En effet dans certains contextes, et malgré la présence de formations géologiques perméables en profondeur, le sol s'oppose presque complétement à l'infiltration. C'est le cas par exemple des sols argileux ou argilo-limoneux battants surmontant les formations aquifères crayeuses du Bassin Parisien. Dans l'idéal, la nature plus ou moins perméable du sol devrait donc être prise en compte à une échelle relativement fine parmi les critères précédents. Cependant les propriétés du sol et leur influence sur les mécanismes de transfert d'eau peuvent s'avérer complexes à caractériser (sensibilité à la battance, ruptures et contrastes de perméabilité) tandis que les données en la matière restent souvent grossières, quand elles ne sont pas simplement absentes. Cette connaissance sera néanmoins requise pour l'établissement de cartes de vulnérabilité fiables (cf. section 2) ; **ainsi la phase de délimitation de l'AAC doit aussi amener les opérateurs à s'interroger sur le recueil de données pédologiques complémentaires qui permettront de préciser par la suite les possibilités de transfert dans les secteurs où subsiste un doute.** Par défaut, il sera proposé d'inclure les secteurs en question dans l'AAC, ils apparaîtront alors comme faiblement vulnérables vis-à-vis de l'infiltration si le sol assure effectivement une protection efficace de l'aquifère.

De fait, un travail de délimitation exhaustif et objectif peut conduire, en première approche, à délimiter un territoire particulièrement vaste (par exemple dans le cas d'échanges entre la nappe captée et un grand système fluvial) qui pourra rendre complexe la suite de la démarche et notamment :

- **les diagnostics de vulnérabilité et de pression de par la superficie à couvrir et l'important besoin en données qui en résulte ;**
- **la gouvernance et la mise en œuvre du projet de par le nombre important d'acteurs concernés ;**
- **la sensibilisation des acteurs sur des territoires très éloignés du captage ;**
- **la définition d'un plan d'action réaliste.**

Pour contourner ces difficultés, le choix d'exclure de l'AAC certaines zones considérées comme peu contributives ou trop éloignées du captage pour avoir un impact sur la qualité de l'eau est délicat et doit s'appuyer sur des éléments de preuves irréfutables tels que des suivis de qualité de l'eau. Dans le cas où ces informations manquent, il sera recommandé de retenir la configuration la plus « pessimiste » mais d'identifier en contrepartie les secteurs les plus sensibles au regard des pressions exercées pour ensuite affiner les études de vulnérabilité (cf. section 2.2.1).

Vitesse de transfert et atténuation des risques

La question de l'éloignement au captage renvoie aussi à la problématique des vitesses et temps de transfert qui, selon le type de substance incriminé dans la contamination de la ressource, peut ou non constituer un facteur d'atténuation des risques. En effet, dans le cas de substances non conservatives, tels que les pesticides à faible durée de demi-vie, il est attendu que la dégradation dans le milieu soit d'autant plus avancée que le temps de transfert augmente et/ou que les flux d'eau rencontrent des zones favorables à cette dégradation (zones humides par exemple). Ce type de raisonnement ne relève alors plus totalement de la vulnérabilité intrinsèque proprement dite mais rejoint les notions de vulnérabilité spécifique et/ou de vulnérabilité opérationnelle (cf. encart en section 2) qui peuvent s'avérer complexes à déterminer (voir notamment Surdyk N., Vernoux J.F. (2011) concernant la vulnérabilité spécifique vis-à-vis des produits phytosanitaires) et ne seront pas abordées dans ce document.

1.3. Outils pour aider à la délimitation d'une AAC à transferts mixtes

Si l'identification d'un bassin versant topographique et des limites d'affleurement d'une formation aquifère s'avère relativement aisée à partir de cartes topographiques (ou d'un MNT) et géologiques, des investigations complémentaires peuvent s'avérer nécessaires pour bien préciser l'extension de l'Aire d'Alimentation d'un Captage, notamment dans le cas d'un prélèvement d'eaux souterraines par pompage.

En effet, dans ce dernier cas, le pompage ne sollicite généralement qu'une partie de l'aquifère (dite portion de nappe alimentant le captage ou PNAC) en générant une zone d'appel dans les limites de laquelle l'ensemble des écoulements (lignes de courant) convergent vers le point de prélèvement (Figure 7). Son extension latérale comme son extension à l'aval dépendent pour partie du régime de pompage mais surtout des caractéristiques hydrodynamiques de l'aquifère. A l'amont, elle sera limitée soit par une limite à flux nul (limite imperméable) soit par une limite de réalimentation (autre système aquifère ou cours d'eau) soit par une crête piézométrique au-delà de laquelle les écoulements s'effectuent vers un autre exutoire.

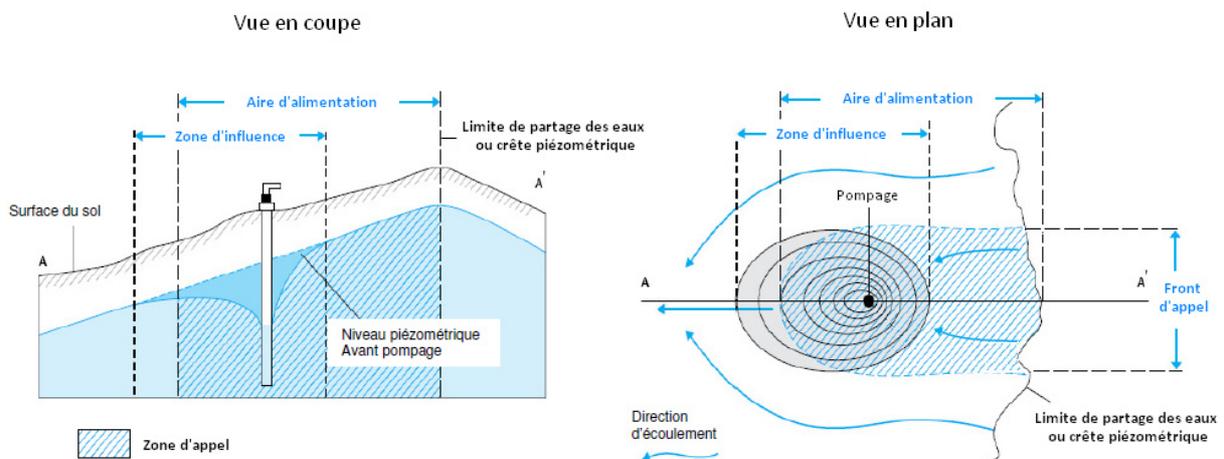


Figure 7 : Illustration des notions de zone d'influence et de zone d'appel d'un pompage en aquifère libre

La détermination de l'enveloppe de cette zone d'appel peut s'appuyer sur plusieurs méthodes (méthodes analytiques ou modélisation numérique, pour plus de détail on se reportera à Vernoux *et al.*, 2007a et 2007b) qui nécessitent *a minima* de connaître le débit pompé et la transmissivité de la formation aquifère au voisinage du pompage, et donc la réalisation d'essais de perméabilité par pompage ou injection. Néanmoins, ces méthodes restent essentiellement valables pour les aquifères continus poreux, homogènes et isotropes ; elles le seront beaucoup moins dans le cas d'aquifères discontinus, fissurés ou karstiques, pour lesquels d'autres méthodes devront être envisagées.

A défaut de connaissances précises des propriétés hydrodynamiques de l'aquifère pour l'application des techniques précitées, une information plus accessible pourra être obtenue à partir de relevés piézométriques qui permettront éventuellement de dresser une carte de la surface de l'aquifère exploité (si la densité spatiale de mesures piézométriques le permet) ou au moins de déterminer grossièrement les principales directions d'écoulement. Il sera ainsi possible d'identifier les limites de partage des eaux (en cas d'exutoires multiples) et la limite amont de la zone d'alimentation du captage. **Il sera recommandé de réaliser ces relevés en hautes eaux mais aussi en basses eaux pour déterminer par exemple si l'aquifère bénéficie d'une réalimentation saisonnière par un cours d'eau ou un autre système aquifère (dont il faudra par conséquent inclure le bassin versant ou le bassin d'alimentation dans les limites de l'AAC) suite à une inversion des échanges. On précisera toutefois que l'usage des données de piézométrie conduit généralement à une délimitation plus grossière (et souvent plus étendue) que celle obtenues par les méthodes de modélisation hydrodynamique.**

Rappel sur la typologie des formations aquifères :

Comme évoqué, les outils à mobiliser pour la délimitation du bassin d'alimentation d'un aquifère ou d'un captage et, par la suite, les méthodes de diagnostic de la vulnérabilité, doivent s'adapter au type de formation aquifère rencontré. A cet effet, le guide BRGM de 2007 (auquel on se référera pour plus de détails) distingue trois types de formations : les aquifères continus poreux, les aquifères discontinus fissurés et les aquifères discontinus karstiques. Il s'agit ici de rappeler brièvement leurs principales caractéristiques et les moyens de les différencier.

Les aquifères continus poreux correspondent généralement à des formations constituées de matériaux peu ou pas consolidés tels que les sables et graviers de granulométrie variable (formations alluviales et colluviales mais aussi grès et conglomérats peu cimentés, arènes granitiques voire scories volcaniques). L'interconnexion des pores permet la circulation de l'eau, généralement assez lente, de manière homogène et quelle que soit la direction d'écoulement (milieu dit isotrope).

Les aquifères discontinus, qu'ils soient fissurés ou karstiques, correspondent généralement à des formations géologiques cohérentes (roches cristallines d'origines plutonique, volcanique ou métamorphique, calcaires et formations sédimentaires consolidées) où la porosité matricielle de la roche est réduite, peu ou pas fonctionnelle (peu d'interconnexion des vides) mais où l'eau circulera en revanche préférentiellement via des discontinuités structurales ou morphologiques (fissures et failles, drains karstiques, joints stratigraphiques) plus ou moins bien réparties dans le volume de roche. Ainsi certains milieux fissurés peuvent être parfois considérés comme continus lorsque le réseau de discontinuités, dense, présente une certaine homogénéité spatiale. Ceci est beaucoup moins vrai dans le cas de milieux karstiques (formations sensibles à la dissolution : calcaires, dolomies, craie voire évaporites) pour lesquels des vides de grande dimension organisés spatialement en réseaux (drains karstiques) se surimposent à la porosité matricielle et la porosité de fissure. Ces différents types de milieux, particulièrement hétérogènes, se caractérisent souvent par une assez forte réactivité et des circulations rapides (caractère transmissif de l'aquifère) auxquelles peut s'ajouter une composante lente liée à la restitution de l'eau contenue dans les volumes de roches circonscrits par les discontinuités principales (caractère capacitif de l'aquifère).

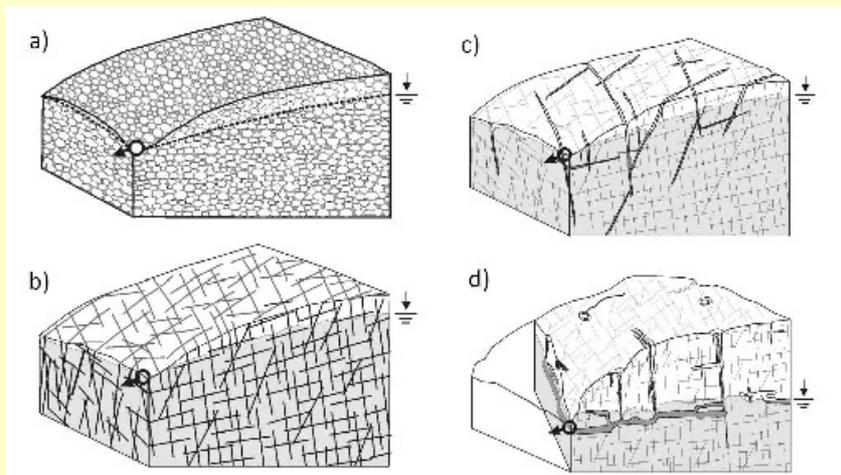


Figure 8 : Représentation schématique de quatre milieux aquifères caractérisés par une hétérogénéité croissante : a) milieu poreux continu, b) milieu discontinu fissuré homogène, c) milieu discontinu fissuré hétérogène, d) milieu discontinu karstique (Extrait de Pochon et Zwahlen, 2003).

Outre la lithologie et les relevés structuraux et géomorphologiques qui restent probablement les critères les plus explicites pour déterminer le type d'aquifère rencontré, la distinction entre milieux continus et discontinus est également possible au regard du fonctionnement hydrodynamique que l'on pourra décrire à l'aide de caractéristiques variées telles que les vitesses de fluctuation du niveau piézométrique, de température et de conductivité, le temps de séjour, la diffusivité, la perméabilité moyenne (cf. annexe I)...

Comme déjà mentionné, les approches précédentes se révéleront peu pertinentes ou inapplicables dans le cas d'aquifères discontinus, qu'ils soient karstiques ou fissurés. Les outils à privilégier seront alors les relevés structuraux, géophysiques et géomorphologiques destinés, dans un premier temps, à identifier la géométrie (pendage, direction) des voies préférentielles d'écoulement susceptibles d'être connectées au captage (fissures, failles, stratigraphie, points d'engouffrement et drains karstiques...). Dans l'idéal, les possibilités de connexion et la fonctionnalité hydraulique des discontinuités, devront ensuite être confirmées à l'aide de traceurs artificiels (rhodamine, fluorescéine...), injectés en surface au niveau de zones d'infiltration préférentielles voire directement au droit de piézomètres ou de cavités karstiques accessibles. Encore une fois, des expériences de traçage réalisées dans des conditions hydrologiques contrastées (en hautes et basses eaux) pourront s'avérer nécessaires en cas d'inversion supposée des échanges avec d'autres masses d'eau. Ces traçages pourront par ailleurs permettre d'évaluer les vitesses apparentes de circulation de l'eau et, dans les milieux relativement homogènes, quantifier certaines propriétés hydrodynamiques de l'aquifère (Schudel *et al.*, 2002).

Outre les traceurs artificiels, certaines substances présentes dans le milieu, d'origine naturelle ou humaine, pourront également aider à identifier des zones contributives si elles en constituent une signature hydrochimique particulière et différenciable (par exemple un produit phytosanitaire caractéristique d'un type de culture ; Barrez *et al.*, 2013b).

Enfin, en complément et quel que soit le type de ressource prélevée (prise d'eau en rivière, source captée ou pompage), la réalisation d'un bilan « entrée/sortie » (ou bilan hydrologique) pourra permettre de vérifier de manière approchée si l'extension de l'AAC délimitée s'avère cohérente avec les débits prélevés². Il s'agira alors de comparer sur une période donnée, à l'échelle annuelle voire pluriannuelle pour s'affranchir au maximum des variations de stock, les flux en sortie ($V =$ somme des débits mesurés à l'exutoire ou des débits pompés sur la période considérée, en m^3) avec les flux en entrée donnés par le volume de précipitation (P en m^3) reçu par l'AAC après soustraction de la reprise évapotranspiratoire sur la même période (ETR en m^3). **Un rapport $V / (P-ETR)$ significativement supérieur à 1 (par rapport aux incertitudes sur l'estimation des différents termes du bilan) indiquera alors sans conteste que l'AAC délimitée est trop réduite par rapport aux flux observés en sortie et que des contributions non encore identifiées interviennent dans l'alimentation du captage.** A l'inverse, un rapport $V / (P-ETR)$ significativement inférieur à 1 pourra témoigner de l'existence de pertes vers un autre système. Pour autant, la délimitation de l'AAC ne sera pas systématiquement remise en cause dans ce cas de figure ; une partie de l'eau reçue sur une surface donnée de l'AAC pouvant très bien contribuer à alimenter le captage et l'autre partie être exportée en dehors de l'aire d'alimentation. On précisera que les conclusions tirées d'un tel bilan doivent toutefois être prises avec précaution en raison des nombreuses incertitudes (calcul et spatialisation des pluies et évapotranspirations, mesure du débit à l'exutoire ou au pompage...) et hypothèses associées (absence de stockage/déstockage sur la période choisie).

La méthode du bilan hydrologique, vu comme un modèle entrée/sortie très simplifié, ouvre également d'autres possibilités pour éventuellement déterminer les contributions respectives de différents compartiments. A titre d'exemple, considérons le cas d'un captage en nappe d'accompagnement alluviale dont la PNAC a été déterminée avec précision. On pourra commencer par établir un tel bilan sur la portion d'aquifère susceptible de participer directement à l'alimentation du captage par infiltration. Bien entendu, le résultat sera sans doute assez éloigné de l'équilibre ($V - (P-ETR) > 0$) et la différence représentera dans ce cas le volume (ou la part) des apports d'origine superficielle provenant des échanges avec le cours d'eau, sous réserve qu'il n'existe pas d'autres contributions (par exemple un ruissellement de versant donnant lieu à une alimentation latérale de l'aquifère qui, s'il est avéré, pourra lui aussi être inclus dans le bilan et sa contribution

² L'utilisation du bilan hydrologique comme moyen de validation *a posteriori* de la surface de l'AAC est préférée ici à l'approche consistant à déterminer *a priori* la surface minimale de l'AAC ($S_{min} = V / (p-etr)$ avec S en m^2 , V en m^3 et $(p-etr)$ en m) qui est parfois proposée. En effet, dans ce cas la détermination des termes d'entrée p et etr peut s'avérer particulièrement arbitraire et imprécise puisque l'emprise de l'AAC et la possible variabilité spatiale du climat qui en résulte ne sont pas connues par nature. Par ailleurs, le résultat peut aussi induire en erreur s'il n'est pas expressément rappelé qu'il s'agit d'une **approximation de la surface minimale de l'AAC** qui peut différer fortement de la surface réelle et conduire à négliger des surfaces qui ne contribuent que partiellement à l'alimentation du captage.

relative quantifiée). On signalera que cette approche par bilan, quoique très simpliste, rejoint certaines méthodes plus élaborées qui sont parfois employées pour caractériser la vulnérabilité à partir de l'identification des zones contribuant le plus à l'alimentation du captage (voir par exemple Bussard (2005) pour les captages d'eau souterraine). **Comme toute approche de modélisation, cette caractérisation quantitative de la vulnérabilité peut cependant s'avérer difficile à mettre en œuvre ou trop imprécise en l'absence de données adéquates, c'est pourquoi des approches plus qualitatives ou « expertes » lui sont souvent préférées pour caractériser la vulnérabilité ; c'est ce second type de méthode dont il sera question dans les prochains paragraphes.**

2. CARTOGRAPHIE DE LA VULNÉRABILITÉ D'UNE AAC A TRANSFERTS MIXTES

Suite à l'identification des contours de l'AAC, la seconde étape de diagnostic consiste à déterminer le niveau de risque associé à chaque type de transfert dans le périmètre circonscrit. Ce risque relève ici de la vulnérabilité intrinsèque, propre au milieu, indépendamment du type de contaminant (du ressort de la vulnérabilité spécifique, cf. encart ci-dessous) et des pressions exercées sur le territoire. Cependant ces dernières pourront être prises en compte pour éventuellement cibler et affiner les études de vulnérabilité sur des secteurs à enjeu fort ou lorsque la superficie de l'AAC s'avère trop importante (cf. section 2.2.1).

Dans le cas d'une AAC à transferts mixtes, l'évaluation de la vulnérabilité doit s'intéresser à l'ensemble des types de transfert cités en section 1.1 et donc produire autant de cartes pour permettre un choix optimal des actions de protection à mettre en place. Pour ce faire, il est proposé dans ce guide de faire appel aux deux méthodes développées par le BRGM pour les transferts par infiltration vers les eaux souterraines (dont le principe est rappelé en section 2.1.1) et par Irstea pour les transferts superficiels vers les eaux de surface (dont le principe est rappelé en section 2.1.2). Des éléments permettant leur articulation pour l'obtention de résultats cohérents puis leur interprétation sont proposés en sections 2.3 et 2.3.4.

Vulnérabilité intrinsèque, spécifique ou opérationnelle ?

La notion de vulnérabilité désigne ici la susceptibilité pour une ressource d'être atteint par un polluant. Il est toutefois nécessaire de bien distinguer :

- *la **vulnérabilité intrinsèque** liée aux seules caractéristiques du milieu (sol, topographie, climat...) au regard des transferts d'eau, prise comme vecteur des contaminants ;*
- *la **vulnérabilité spécifique** qui prend en compte les caractéristiques du milieu (conditions redox, pH, activité biologique) au regard de chaque type de contaminant et de ses propriétés (aptitude à l'adsorption sur les composés du sol, vitesse de dégradation dans le milieu...) ;*
- *la **vulnérabilité « opérationnelle »** qui en plus des éléments précédents tient compte des pratiques culturelles, par nature évolutives, susceptibles d'amplifier ou d'atténuer les risques de transfert (type de végétation ou de culture, présence d'élément paysagé de type zone tampon, travail du sol...).*

Si les deux méthodes présentées dans ce guide se donnent pour objectif de ne traiter que la vulnérabilité intrinsèque et donc de fournir une base de travail a priori valable pour l'ensemble des catégories de contaminants (nitrates, phosphore, pesticides), il n'en demeure pas moins que la nature des contaminants et leur comportement dans l'environnement jouent un rôle très important dans le risque effectif de contamination de la ressource prélevée. Cependant, en raison de la complexité et la diversité des mécanismes de rétention ou de dégradation dans le milieu (notamment en ce qui concerne les produits phytosanitaires et leurs métabolites), les approches visant à caractériser la vulnérabilité spécifique font aujourd'hui encore l'objet d'investigations (voir notamment Surdyk et Vernoux, 2011) et ne seront donc pas traitées ici.

*La question de la **vulnérabilité opérationnelle** rejoindra plutôt le diagnostic des pressions et pourra être intégrée à ce dernier en déterminant si des dispositifs physiques de protection (zones tampons) ou des pratiques culturelles adaptées sont déjà en place sur les zones les plus vulnérables aux transferts (comme suggéré par le memento du MEDDE relatif au DTPA).*

2.1. Rappel du principe des méthodes de cartographie de la vulnérabilité

Le principe des méthodes de cartographie de la vulnérabilité pour les différents types de transferts est rappelé ici. Ces méthodes proposent de s'appuyer sur différents critères jugés pertinents pour décrire les mécanismes de transferts d'eau, depuis la surface du sol jusqu'à la ressource prélevée, et caractériser la vulnérabilité du milieu qui en résulte. On retrouve ainsi des caractéristiques relatives :

- aux propriétés du sol (perméabilité, épaisseur, texture, sensibilité à la battance...),
- au climat (précipitations efficaces, saisonnalité...),
- à la topographie (pente, distance au cours d'eau),
- aux propriétés de l'aquifère (perméabilité, degré de karstification...)
- ou encore à la présence de dispositifs de drainage agricole.

Les méthodes présentées interprètent l'influence de ces critères en termes de risque de voir se produire tel type de transfert et ne prétendent pas fournir une évaluation objective et absolue des flux, qui devrait faire appel à des outils de modélisation beaucoup plus complexes.

On remarquera dès à présent que les approches diffèrent sensiblement selon que l'on s'intéresse aux transferts par infiltration vers les eaux souterraines (méthode développée par le BRGM) ou aux transferts de surface ou de sub-surface vers les eaux superficielles (méthode développée par Irstea), notamment au vu de la place laissée ou non à l'expertise et de la formalisation plus ou moins imposée du cadre méthodologique (interprétation et croisement des critères de vulnérabilité). Cette question est délicate dans la mesure où il semble utile de donner un cadre méthodologique suffisamment uniforme pour permettre une comparaison des résultats obtenus d'une AAC à l'autre et assurer *a minima* une certaine cohérence dans le cas d'AAC juxtaposées. Le rôle de l'expertise est aussi sujet à caution dans la mesure où l'existence des inévitables tensions autour de la problématique peut amener à des procédures de contestation des résultats (risque de contre-expertise). En contrepartie, une approche trop rigide ou trop « généraliste » peut entraîner un risque de ne pas voir ressortir suffisamment les contrastes de vulnérabilité sur certains territoires pour permettre un positionnement optimal des actions de protection (par exemple en cas de faible variabilité spatiale des critères de vulnérabilité). Elle peut également se trouver en défaut dans des contextes particuliers que seule l'expertise saura identifier. **Le recours à l'expertise apparaît donc comme un élément à part entière de la démarche mais devra être dûment justifié et s'appuyer sur une parfaite connaissance locale des processus de transfert en jeu.**

2.1.1. Méthode relative à la vulnérabilité vis-à-vis des transferts souterrains

S'inspirant de travaux préexistants, cette méthode (Vernoux *et al.*, 2007) se propose de combiner, au travers d'une somme pondérée, différents critères de vulnérabilité relatifs aux propriétés du milieu, définis selon le type d'aquifère (*cf.* encart présenté en section 1.3) :

$$V = \sum_{j=1}^n (W_j \cdot R_j)$$

où V est l'indice de vulnérabilité au droit de l'unité géographique considérée, R sont les $j[1,n]$ critères de vulnérabilité retenus et W sont les facteurs de pondération attribués aux $j[1,n]$ critères de vulnérabilité (la somme des facteurs de pondération est égale à 1).

La formule retenue dans le cas de milieu continu est donnée en exemple ci-dessous :

$$V = 0.1 P + 0.25 S + 0.3 IDPR + 0.2 H + 0.15 K$$

avec P la pluie efficace, S un critère de vulnérabilité relatif à la nature et l'épaisseur du sol, $IDPR$ un critère relatif aux possibilités d'infiltration profonde vers la nappe, H est l'épaisseur de zone non saturée et K la perméabilité de l'aquifère.

Chaque critère considéré prend la forme d'un score, codé de 0 à 4 en fonction de caractéristiques du milieu connues au droit de chaque unité cartographique (nature du sol, pluies efficaces, possibilités d'infiltration, épaisseur de la zone non saturée, perméabilité de l'aquifère...) et pour lesquelles ont été définies autant de classes allant de valeurs jugées comme présentant peu ou pas de risque (codées 0) à des valeurs synonymes de forte vulnérabilité (codées 4). Les tableaux 2 et 3 en montrent un exemple pour les cinq critères pris en compte dans le cas d'une formation aquifère continue.

Score de vulnérabilité	Pluies efficaces (P en mm)	Possibilité d'infiltration (IDPR*, sans unité)	Epaisseur de la zone non saturée (H en m)	Perméabilité de l'aquifère (K en m/s)
0	< 50	1600 à 2000	> 50	< 10 ⁻⁷
1	50 à 100	1200 à 1600	20 à 50	10 ⁻⁷ à 10 ⁻⁵
2	100 à 200	800 à 1200	5 à 20	10 ⁻⁵ à 10 ⁻⁴
3	200 à 300	400 à 800	2 à 5	10 ⁻⁴ à 10 ⁻³
4	> 300	0 à 400	< 2	> 10 ⁻³

*Indice de Développement et de Persistance des Réseaux

Tableau 2 : Grille permettant de déterminer le score de vulnérabilité pour chacun des critères pris en compte (hors sol) dans le cas d'une formation aquifère continue

Texture dominante*	Pierrosité (% de cailloux)	Epaisseur			
		> 100 cm (1)	20 à 100 cm (2)	0 à 20 cm (3)	Nulle (4)
Argile	< 15 %	1	2	3	4
	15 à 60 %	1	2	3	4
	> 60 %	2	3	4	4
Limon	< 15 %	1	2	3	4
	15 à 60 %	2	3	4	4
	> 60 %	3	3	4	4
Sable	< 15 %	2	3	4	4
	15 à 60 %	3	3	4	4
	> 60 %	3	3	4	4

* Déterminée à l'aide du triangle des textures présenté en annexe II

Tableau 3 : Tableau à deux entrées permettant de déterminer le score de vulnérabilité associé au sol en fonction de sa nature et de son épaisseur (critère S)

Les valeurs de pondération *W* affectées aux différents critères sont définies selon l'importance relative que l'on accorde à ces derniers vis-à-vis de la vulnérabilité d'ensemble. Dans le cas présent, les facteurs de pondération les plus élevés correspondent aux critères les plus déterminants dans l'évaluation de la vulnérabilité aux transferts par infiltration : l'IDPR (Indice de Développement et de Persistance des Réseaux ; Mardhel, 2006) « qui permet de rendre compte de manière indirecte de la capacité des formations géologiques à laisser infiltrer l'eau » et la protection assurée en surface par le sol (paramètre *S*), autrement dit la capacité du milieu à empêcher l'eau d'atteindre l'aquifère.

Finalement la vulnérabilité vis-à-vis des transferts souterrains, donnée par *V*, est retranscrite en classe de risque selon la grille donnée dans le Tableau 4 ; c'est le résultat cartographié.

Valeur de V	Classe de vulnérabilité	
0 à 0.8	0	Très faible
0.8 à 1.6	1	Faible
1.6 à 2.4	2	Moyenne
2.4 à 3.2	3	Elevée
3.2 à 4	4	Très élevée

Tableau 4 : Grille permettant de déterminer le score et la classe de vulnérabilité finale en fonction de la valeur de *V*

Le tableau donné en annexe III résume plus largement l'ensemble des éléments à considérer pour les trois grands types d'aquifère distingués par la méthode. Pour plus de détail sur le mode de détermination de l'ensemble des critères on se reportera aux rapports correspondants (Vernoux *et al.*, 2007a, Vernoux *et al.*, à paraître), notamment en ce qui concerne la prise en compte des discontinuités en milieu fissuré et du degré de karstification en milieu karstique. **Les différentes déclinaisons de la méthode pourront évidemment être utilisées conjointement si des aquifères de nature différente se côtoient sur l'AAC étudiée.**

Depuis sa publication en 2007, cette méthode a déjà fait l'objet de nombreuses applications pour l'étude de vulnérabilité d'AAC en contextes variés, notamment d'AAC classées « Grenelle » (la méthode est en effet la plus souvent citée dans les CCTP). Un rapport a été consacré à l'analyse de quelques retours d'expérience (Vernoux *et al.*, 2011). Celui-ci pointe notamment les limites et difficultés liées à la disponibilité des données mais aussi des disparités dans la mise en œuvre de la méthode, pouvant conduire à des incohérences pour des AAC pourtant voisines. Des manques sont également signalés : au regard du rôle joué par la couverture pédologique (considéré comme insuffisamment détaillé pour refléter correctement les mécanismes de transfert dans le sol) ou lorsque des transferts superficiels interviennent dans l'alimentation du captage (cas des AAC à transferts mixtes). Ces manques ont dans certains cas amené les chargés d'étude à proposer eux-mêmes des adaptations, pas toujours bien explicitées et parfois inappropriées.

2.1.2. Méthode relative à la vulnérabilité vis-à-vis des transferts superficiels

Cette méthode (Le Henaff et Gauroy, 2012b) se propose avant tout de bien orienter le choix des critères de vulnérabilité (et des données associées) au regard des différents processus de transferts superficiels :

- transferts de surface (ruissellements diffus hortonien et par saturation),
- transferts de sub-surface dans le sol (écoulements hypodermiques et drainage agricole)
- et dérive atmosphérique³.

³ Les éléments proposés par cette méthode en matière de vulnérabilité opérationnelle (prise en compte des éléments paysagés) ne seront pas traités dans le cadre du présent guide.

L'objectif est alors d'aboutir à une carte de vulnérabilité pour chaque type de transfert superficiel. Cette différenciation, qui n'est pas toujours faite, est pourtant essentielle pour permettre à terme un choix optimal des actions à mettre en place sur l'AAC.

Parmi les facteurs de vulnérabilité pris en compte, il est en particulier mis l'accent sur le fonctionnement hydrique des sols et, plus secondairement, sur les caractéristiques climatiques et la topographie. Parmi les critères de risque, il est également pris en compte des éléments dits aggravants tels la proximité des zones potentiellement émettrices par rapport au cours d'eau, considérant que l'éloignement au cours d'eau « tend à rallonger le temps de transfert et augmente donc la probabilité de dégradation, d'adsorption et/ou de dilution des contaminants ». Ce critère s'avère notamment essentiel dans l'évaluation des risques de transferts par dérive atmosphérique, bien que dans ce cas l'existence de dispositifs de protection (zones tampons rivulaires faisant écran à la dérive, zone non traitée en bordure de parcelle) puisse être considéré comme nettement plus déterminant dans le risque de contamination des eaux de surface (on se réfèrera alors préférentiellement à la vulnérabilité opérationnelle pour caractériser le risque lié à la dérive atmosphérique).

Les différents critères pris en compte dans la détermination de la vulnérabilité pour chacun des types de transfert précités sont résumés dans le Tableau 5.

Type de transfert	Critères relatifs au sol	Critères relatifs au climat	Critères relatifs à la topographie et la topologie		Critères relatifs au drainage
Ruissellement hortonien	Sensibilité à la battance	Cumul pluviométrique et intensités pluvieuses		Densité du réseau hydrographique (incluant les fossés et autres aménagements concentrant les écoulements)	
Ruissellement sur surface saturée	Hydromorphie	Bilan hydrique saisonnier (P – ETP)			
Écoulements hypodermiques	Présence de ruptures de perméabilité	Bilan hydrique (P – ETP)	Pente		
Drainage agricole					% de surface drainée
Dérive atmosphérique	Distance au cours d'eau (la vulnérabilité sera maximale sur un buffer de 5 à 10 mètres autour du chevelu hydrographique et nulle ou très faible ailleurs)				

Tableau 5 : Critères pris en compte pour la détermination de la vulnérabilité selon le type de transfert superficiel

La méthode ne donne en revanche pas ou très peu d'indications quantitatives sur le lien entre la valeur que prend chaque critère et le niveau de risque associé, non plus que sur la façon de combiner ou hiérarchiser l'information issue des différents critères pour finalement déterminer la vulnérabilité attribuée à chaque mode de transfert. Ces éléments sont donc laissés à l'appréciation des chargés d'étude et offrent une large place à l'expertise. Ainsi, la méthode prône avant tout une démarche de terrain, proche de celle des diagnostics proposés par le CORPEN (CORPEN, 1999), mais difficile à mettre en pratique de manière systématique à l'échelle d'une grande AAC et risquant de se révéler très hétérogène selon les opérateurs.

Les cas d'application de cette méthode restent encore rares eu égard à sa parution relativement récente. Ainsi, seule une étude de vulnérabilité ayant eu recours à l'approche proposée par Irstea est aujourd'hui finalisée. Elle concerne un vaste bassin d'environ 1 800 km² où les transferts s'effectuent préférentiellement de

manière superficielle, comme tend à le démontrer l'IDPR qui prend des valeurs relativement élevées, associées à un contexte ruisselant. Dans cette étude, les transferts par ruissellement sur surface saturée et écoulements hypodermiques n'ont pas été traités ; ceci en raison d'un manque de données sur l'hydromorphie et les ruptures de perméabilité dans le sol ou à l'interface sol/substratum. Par ailleurs le climat a été considéré comme homogène sur le secteur bien que celui-ci présente des contrastes d'altitude assez marqués.

Dans cette étude, les différents critères de vulnérabilité employés (essentiellement définis au regard des données disponibles, parfois manquantes sur certains secteurs) ont été discrétisés en 4 ou 5 classes sur la base de décisions d'expert puis transcrits sous forme de scores (à l'image de la méthode proposée par le BRGM dans le cas des transferts souterrains), parfois croisés entre eux à l'aide de tableaux à deux entrées (par exemple le score relatif à la battance et le score relatif à l'IDPR pour la détermination de la vulnérabilité au ruissellement hortonien). Si cette approche s'avère sans doute la plus simple à mettre en œuvre à l'aide d'outils SIG, il n'en demeure pas moins qu'elle reste ici peu argumentée (choix de la discrétisation en score et de la combinatoire) et très rudimentaire du point de vue de la description des mécanismes de transfert. Enfin, des données pourtant disponibles (pente, réserve utile) auraient sans doute pu être valorisées pour affiner certains résultats voire apporter, en première approche, quelques éléments de réponse dans le cas des transferts non traités dans l'étude (par exemple le risque d'hydromorphie, accru dans le cas de pentes faibles ou nulles et de sols à faible réserve utile). Ainsi, le manque de prescriptions fournies dans la méthode Irstea n'orientent peut-être pas suffisamment les chargés d'étude vers les bons raisonnements. Ces derniers se voient alors contraints de proposer des solutions fragmentaires voire inadaptées.

2.2. Rappel des bonnes pratiques en matière de cartographie de la vulnérabilité et données mobilisables

2.2.1. Format de restitution cartographique

Si les besoins en matière de données et de rendu cartographique devraient idéalement être prévus pour restituer le plus fidèlement possible les variations spatiales de vulnérabilité par types de transfert, il ne peut être question de travailler avec la même précision pour l'ensemble des AAC. En effet, les emprises concernées peuvent s'avérer très hétérogènes avec des superficies allant de quelques hectares ou km² à plus de 2 000 km² si l'on s'en tient aux captages retenus comme prioritaire dans le cadre du Grenelle de l'Environnement. **En pratique, il sera donc recommandé d'adapter l'échelle de restitution à la dimension de l'AAC.** Pour ce faire le guide Irstea de 2012 proposait de se donner pour ordre de grandeur une restitution des résultats au format A4, comme reporté dans le Tableau 6.

	Surface de l'AAC	Echelle de restitution sur un format A4	Résolution optimale des données
Très petites Aires	Quelques km ²	1/5 000°	50 m
Petites Aires	< 30 km ²	1/25 000°	250 m
Aires moyennes	30 à 100 km ²	1/50 000°	500 m
Grandes Aires	100 à 500 km ²	1/100 000°	1 km
Très grandes Aires	500 à plus de 2000 km ²	1/250 000°	2,5 km

Tableau 6 : Echelle de restitution des résultats et résolution optimale des données en fonction des dimensions de l'AAC

On remarquera que ces recommandations fournissent indirectement une indication sur la résolution attendue des données nécessaires à la bonne mise en œuvre des méthodes d'évaluation de la vulnérabilité. En pratique, la précision de tout ou partie des données disponibles pourra néanmoins s'avérer insuffisante (cf. section 2.2.2 relative aux données mobilisables), tant au regard de l'échelle de restitution souhaitée qu'au regard de la variabilité spatiale des processus de transfert. Une trop forte disparité entre la résolution attendue et la résolution des données disponibles (dont on fera un inventaire préalable au moment de la rédaction du CCTP) devra inciter les opérateurs à entreprendre une phase d'acquisition de données complémentaires, sauf s'il apparaît de manière certaine et évidente que la donnée recherchée présente une certaine uniformité spatiale (cas qui sera par exemple assez fréquent pour les caractéristiques climatiques pour les petites et très petites AAC et en l'absence de relief).

Une autre conséquence se trouve être que l'interprétation des résultats en terme de positionnement des actions sera bien entendu beaucoup plus approximative pour les Aires d'Alimentation les plus vastes (grandes et très grandes Aires). **Dans ce cas de figure, il sera préférable de se ramener à une échelle plus détaillée en ciblant des secteurs particuliers (les zones dites « contributives » du guide Irstea), soit sur la base des secteurs identifiés comme sensibles lors du diagnostic des pressions (si celui-ci existe déjà) soit, plus simplement, sur la base d'un examen préalable de l'occupation du sol, en différenciant par exemple les zones boisées, peu ou pas génératrices de pollutions, des zones cultivées.** Au sein de celles-ci, on pourra encore distinguer les types de cultures les plus fortement consommateurs d'intrants, par exemple les cultures pérennes par opposition aux prairies permanentes. L'échelle de restitution pourra ainsi être plus fine sur les secteurs ciblés (pour lesquels un effort d'acquisition de données sera par ailleurs nécessaire) et plus grossière sur le reste de l'AAC⁴. Sur le même principe, l'approche méthodologique pourra également être adaptée selon les cas : approche experte associée à un diagnostic de terrain exhaustif pour les petites et très petites AAC ou approche plus grossière pour les plus grandes aires d'alimentation mais pouvant nécessiter un déplacement sur quelques secteurs représentatifs, préalablement identifiés, qui permettront en quelques jours de dégrossir le travail en réalisant une typologie des situations de transferts hydriques à risque ou non.

Enfin, un paramètre important du rendu cartographique repose sur le type d'objets spatiaux manipulés et la définition des unités cartographiques. En effet, l'usage de Systèmes d'Information Géographique (SIG), incontournables pour l'application efficace des méthodes présentées ici (visualisation, superposition et combinaison de l'information spatiale), permet d'envisager plusieurs solutions. **Comme souvent, le choix le plus simple en termes de manipulation des données sera sans doute un travail au format « raster », en discrétisant l'AAC en mailles élémentaires (régulières ou non) sur la base de la résolution choisie. Cependant un rendu au format vectoriel à l'échelle de la parcelle (ou de tout autre polygone correspondant à une réalité physique, agricole ou administrative), pourra parfois paraître plus adapté pour l'interprétation opérationnelle des résultats.** Cette dernière solution demandera en contrepartie une réflexion sur les traitements à réaliser pour assurer le transfert adéquat des données vers chaque polygone considéré (*i.e.* opérations d'agrégation, de désagrégation, d'intersection...). **Une approche mixte pourra enfin être envisagée si la cartographie nécessite la représentation d'éléments ponctuels ou linéaires (par exemple des points d'infiltration préférentielle) en plus d'une information surfacique.**

2.2.2. Données mobilisables

Les guides dans lesquels sont exposées chacune des deux méthodes présentées précédemment fournissent de précieux renseignements sur les bases de données mobilisables pour réaliser les diagnostics de vulnérabilité (mais aussi la phase de délimitation). L'annexe IV en propose une synthèse réactualisée pour des données généralement disponibles à l'échelle nationale, spatialisées ou non. Bien entendu, la plupart de ces données demanderont une étape de critique préalable et parfois des prétraitements plus ou moins complexes

⁴ Attention, il n'est pas question de s'affranchir ici de cartographier la vulnérabilité sur l'ensemble de l'AAC dans la mesure où il reste important de disposer d'une information *a minima* pour identifier les zones où les pratiques actuelles doivent être préservées afin d'éviter l'apparition de nouveaux problèmes.

avant d'être employées (par exemple : spatialisation et calcul des statistiques climatiques à partir des données brutes, traitement du MNT pour le calcul des pentes, calcul d'un indice de battance à partir des données de texture du sol...).

La disponibilité des données est souvent le principal facteur limitant dans le cadre des études de délimitation et de cartographie de vulnérabilité d'une AAC. Dans le cas où certaines données fondamentales seraient manquantes ou trop grossières pour être exploitées (données de pédologies notamment), le CCTP devra impérativement mentionner les besoins en la matière et imposer la mise à disposition des données ainsi acquises pour une éventuelle capitalisation ultérieure. Le maître d'œuvre devra en contrepartie chiffrer les délais et financements nécessaires à l'acquisition de nouvelles données, étape qui peut s'avérer particulièrement consommatrice de temps et coûteuse.

Bien entendu, on précisera enfin que la compilation des études hydrologiques et hydrogéologiques existantes, locales voire régionales (*i.e.* études relevant de contextes similaires), paraît être une étape indispensable, en particulier lorsque le captage à déjà fait l'objet d'une procédure de Déclaration d'Utilité Publique (DUP) dans le cadre de la délimitation de ses périmètres de protection (il sera notamment important de veiller à vérifier la cohérence entre les limites des périmètres de protection avec celles de l'AAC). Ces études apporteront en effet un ensemble de connaissances préalables sur le captage et son environnement et permettront alors d'identifier assez rapidement les compléments requis pour mener à bien les études de délimitation et de vulnérabilité de l'AAC.

2.3. Application conjointe des méthodes d'évaluation de la vulnérabilité sur une AAC à transferts mixtes

2.3.1. Méthodologie proposée

Les éléments présentés ici doivent permettre d'assurer la bonne coordination entre l'application des méthodes présentées précédemment pour la cartographie de la vulnérabilité d'AAC à transferts mixtes, pour lesquelles l'alimentation du captage résulte à la fois de transferts souterrains et superficiels.

Il est ainsi proposé d'articuler les deux approches en se basant sur une trame méthodologique commune qui doit permettre de traiter conjointement la vulnérabilité aux différents types de transferts au droit de chaque unité cartographique (maille ou parcelle de travail, cf. section 2.2.1), notamment pour ce qui concerne la façon d'interpréter puis de combiner les différents critères de vulnérabilité. Étant donné que l'approche proposée par Irstea ne donne pas d'indication à ce sujet, les choix méthodologiques s'appuieront pour l'essentiel sur l'approche retenue par le BRGM (qui restera inchangée). Il s'agit alors de transcrire l'influence de l'ensemble des critères de vulnérabilité suggérés par chacune des deux méthodes sous la forme de scores (codés entre 0 et 4⁵) en partant, pour commencer, d'un critère commun pour définir la partition entre transferts souterrains et transferts superficiels (au sens large).

Pour ce faire, le critère relatif à la capacité d'infiltration vers les nappes basé sur l'IDPR peut être considéré comme un bon indicateur, intégrant à une échelle relativement large l'ensemble des processus de partage entre transferts souterrains et transferts superficiels. Il est donc proposé de traduire ce critère sous forme de scores **en considérant ici simplement que les vulnérabilités pour les deux types de transferts sont complémentaires : quand l'une est forte, l'autre est nécessairement faible (Tableau 7).** Ce principe de « complémentarité », proche de la notion de bilan, sera conservé tout au long de la démarche de manière à assurer la cohérence entre les vulnérabilités associées aux différents types de transfert considérés à l'échelle de chaque unité cartographique.

⁵ Attention, on rappellera que ces scores reflètent des niveaux de vulnérabilité qualitatifs (très faible, faible, moyen, fort et très fort). Un score égal à 0 pour un type de transfert donné ne signifie pas qu'il ne se produit pas mais seulement que la vulnérabilité qui lui est associée est négligeable.

IDPR (sans unité)	Score de vulnérabilité à l'infiltration (Critère I)	Score de vulnérabilité aux transferts superficiels (Critère I')
1600 à 2000	0	4
1200 à 1600	1	3
800 à 1200	2	2
400 à 800	3	1
0 à 400	4	0

Tableau 7 : Grille permettant de déterminer le score de vulnérabilité pour les transferts superficiels (Critère I') et par infiltration (critère I) à partir de l'IDPR

Suite à cette étape initiale (étape 0), la méthode BRGM peut être poursuivie telle quelle (cf. annexe III) pour déterminer la vulnérabilité aux transferts souterrains jusqu'au captage ou jusqu'à l'exutoire d'un aquifère connecté à la ressource prélevée. Comme préconisé par la méthode Irstea, il reste en revanche à faire la distinction entre les différents types de transferts superficiels, importante du point de vue du choix des actions (cf. section 2.3.4). Pour réaliser cette distinction, il est proposé de s'appuyer ici sur plusieurs étapes successives visant à refléter les mécanismes de transferts hydriques dominants dans le sol, depuis la surface jusqu'au substratum.

La première de ces étapes correspondra à l'interception par la surface qui répartit l'eau reçue au sol entre une part de ruissellement par dépassement de la capacité d'infiltration (ou ruissellement hortonien) et une part d'infiltration dans le sol, disponible pour les autres types de transferts superficiels ou sub-superficiels.

En l'absence de dispositifs de drainage agricole, la part d'eau susceptible de franchir la surface du sol pourra ensuite se répartir entre une part d'écoulement en sub-surface (écoulement dit hypodermique) selon les possibilités d'évacuation latérale des flux et une part de stockage pouvant aller jusqu'à la saturation complète du profil avec pour conséquence l'apparition d'un risque de ruissellement de toute l'eau reçue en excédent (ruissellement sur surface saturée). La présence de dispositifs fonctionnels de drainage agricole, le plus souvent associés à des contextes où l'eau s'accumule dans le profil de sol, sur substratum peu ou pas perméable, pourra néanmoins limiter fortement (voire annuler) le risque de saturation ; En présence de tels dispositifs, les risques d'écoulement hypodermiques et de ruissellement sur surface saturée seront donc annulés au profit du risque de transfert par drainage.

Le schéma ci-dessous (Figure 9) illustre le raisonnement proposé. Si l'on s'en tient à cette structure conceptuelle relativement simple, la répartition des risques entre les différents types de transferts superficiels ne fait intervenir que quatre étapes successives. A chacune d'entre elles va correspondre un ou plusieurs critère(s) physique(s) propre(s) au milieu, permettant de déterminer autant de scores de vulnérabilité. **Ces critères, inspirés de ce que l'on trouve le plus fréquemment dans la littérature, ont été envisagés au regard des mécanismes à expliquer mais aussi et surtout en fonction des données mobilisables et de leur interprétation.** Ainsi, comme dans la plupart des approches de ce type, les solutions proposées se concentrent sur les déterminants physiques considérés comme prédominants dans l'explication des mécanismes décrits. Ces solutions pourraient évidemment être affinées pour accéder à un plus haut niveau de complexité et de réalisme. Il ne faut toutefois pas perdre de vue que ce degré de sophistication supplémentaire complexifie d'autant la démarche (poussé à l'extrême une description correcte des processus se doit de faire appel à un modèle) et doit être mis en perspective des moyens – techniques et financiers – à mettre en œuvre pour recueillir les données nécessaires (alors que la disponibilité des données de bases, notamment pédologiques, s'avèrent déjà bien souvent limitante).

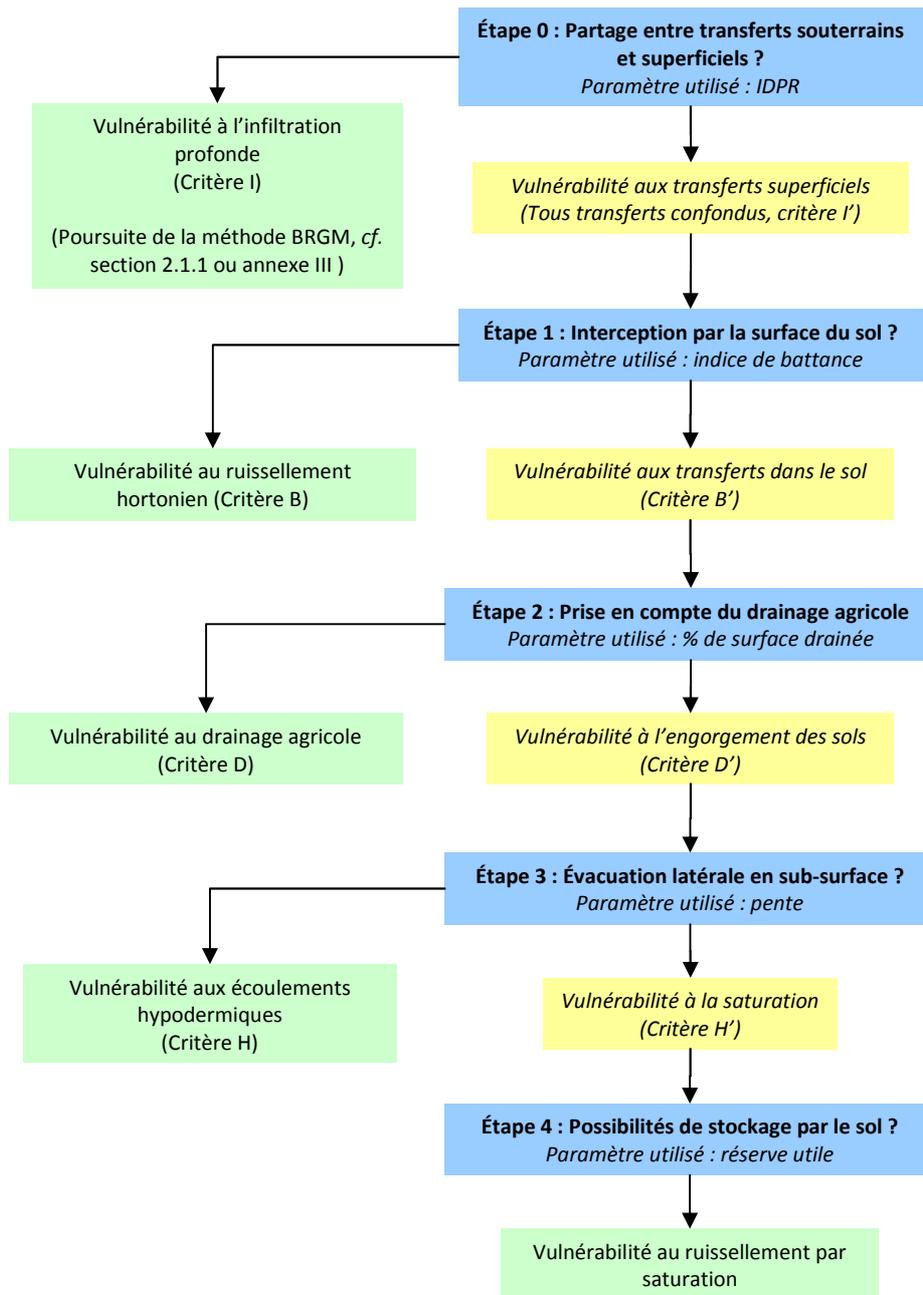


Figure 9 : Schéma de principe de la méthodologie proposée avec les notations utilisées par la suite

En pratique, l'application de la méthodologie proposée demandera donc de déterminer un ensemble de 10 scores pour chaque unité cartographique (ou plutôt 5 scores et leurs complémentaires). L'opération pourra être effectuée assez simplement à l'aide d'outils SIG en traitant chaque couche de donnée relative au milieu par une série de règles de décision conditionnelles (par exemple : si $1200 < IDPR < 1600$ alors $I = 1$ et $I' = 4 - I = 3$) selon les éléments reportés dans les différents tableaux présentés ci-après.

▪ **Étape 1 : Vulnérabilité au ruissellement hortonien**

Comme exposé précédemment, la première étape du raisonnement proposé vise à déterminer le risque associé au ruissellement hortonien. Suivant les préconisations de la méthode Irstea à ce sujet, le critère de vulnérabilité retenu se réfère à la battance, traduite ici au travers de l'indice proposé par l'INRA à partir des données de texture du sol (Rémy et Marin-Laflèche, 1974). Le couplage avec le score de vulnérabilité aux transferts superficiels issu de l'étape 0 permet de proposer un jeu de scores tel que reporté dans le Tableau 8, en conservant toujours le principe de complémentarité.

Critère I' (déduit de l'étape 0)	Score de vulnérabilité au ruissellement hortonien (Critère B)			Score « résiduel » de vulnérabilité aux transferts dans le sol (Critère B')		
	< 1,4	de 1.4 à 1.8	> 1,8	< 1,4	de 1.4 à 1.8	> 1,8
0	0	0	0	0	0	0
1	0	1	1	1	0	0
2	0	1	2	2	1	0
3	0	2	3	3	1	0
4	0	2	4	4	2	0

Tableau 8 : Grille permettant de déterminer le score de vulnérabilité associé au ruissellement hortonien (critère B) et la vulnérabilité « résiduelle » pour les transferts dans le sol (critère B') à partir de l'indice de battance

On signalera que, dans un souci d'exhaustivité, l'ensemble des combinaisons possibles est donné. Certaines d'entre elles apparaissent néanmoins comme peu réalistes (les scores en question ont été reportés en grisé), attendu par exemple qu'une parcelle très sensible à la battance (indice supérieur à 1.8) n'autorise qu'une très faible infiltration dans le sol et au-delà vers les nappes. Autrement dit, il semble qu'il y est donc contradiction entre un faible critère I' et un fort indice de battance. Si de telles combinaisons sont rencontrées en pratique, il sera nécessaire de s'interroger sur les processus en jeu.

A ce sujet, on notera que l'interprétation de l'effet de la battance en terme de « production de ruissellement » reste délicate et incertaine (il n'existe vraisemblablement pas de référence à ce sujet), en particulier lorsque l'indice prend une valeur moyenne et parce des périodes de fermeture et de réouverture peuvent se succéder ou encore en raison de la protection du sol plus ou moins efficace assurée par le couvert végétal qui évolue constamment au cours de l'année (le couvert végétal atténue en effet l'intensité des impacts des gouttes de pluie à l'origine de la déstructuration des mottes de terre). Ces limites pourront éventuellement amener l'opérateur à moduler les scores proposés en fonction des pratiques culturales en lien avec la couverture et le travail du sol au cours des saisons. La présence d'une couverture hivernale des sols (type CIPAN ou résidus de culture) ou la pratique du labour pourront par exemple limiter la vulnérabilité au ruissellement hortonien. Ces éléments relèvent en revanche de la vulnérabilité opérationnelle car tenant compte d'éléments n'étant plus strictement relatifs au milieu.

▪ **Étape 2 : Vulnérabilité aux transferts par drainage agricole**

A partir du score de vulnérabilité « résiduel » issu de l'étape précédente (critère B'), il est proposé de déterminer le risque associé aux transferts hydriques par drainage agricole. En effet, dans les contextes sensibles à la saturation des sols (mais aussi dans le cas de remontée temporaire de nappes peu profondes), l'assainissement de certaines terres agricoles a conduit à installer des dispositifs de drainage enterrés permettant de limiter la remontée de l'eau dans le sol pour laisser respirer les racines des végétaux cultivés. La donnée de présence/absence et de localisation des dispositifs de drainage n'est cependant pas toujours disponible ou facile à acquérir, sauf à réaliser une enquête de terrain systématique et exhaustive, ce qui semble difficilement réalisable à l'échelle de grandes AAC (> 50 km²). Dans les bases de données existantes (e.g. Recensement Général Agricole), elle se présente souvent sous la forme d'un pourcentage de surface drainée à l'échelle de différentes unités administratives (généralement cantonale voire communale) ce qui ne permet pas de déterminer directement si il y a présence ou absence de tels dispositifs à l'échelle d'une parcelle ou d'une maille donnée mais simplement de raisonner au travers d'une probabilité qu'elle soit drainée. Le Tableau 9 propose un ensemble de scores de vulnérabilité selon le pourcentage de surface drainée et le risque résiduel issu de l'étape précédente ; les déclinaisons 0 % et 100 % de surface drainée correspondent aux modalités absence/présence de drains si cette information est connue et spatialisée.

Critère B' (déduit de l'étape 1)	Score de vulnérabilité au drainage (Critère D)					Score « résiduel » de vulnérabilité à l'engorgement des sols (Critère D')				
	0 %	< 33 %	33 à 66 %	> 66 %	100 %	0 %	< 33 %	33 à 66 %	> 66 %	100 %
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0
2	0	1	1	2	2	2	1	1	0	0
3	0	1	2	3	3	3	2	1	0	0
4	0	1	2	3	4	4	3	2	1	0

Tableau 9 : Grille permettant de déterminer le score de vulnérabilité associé au drainage (critère D) et la vulnérabilité « résiduelle » d'engorgement des sols (critère D') à partir du pourcentage de surface drainée

On remarquera ici que la présence de dispositifs de drainage étant par nature associée à des secteurs à forts risques d'engorgement, le recours aux scores donnés pour des valeurs du critère B' inférieures à 3 (combinaisons reportées en grisé) s'avèrera probablement peu fréquent et demandera à vérifier la validité des étapes précédentes.

▪ **Étape 3 : Vulnérabilité aux écoulements hypodermiques**

Pour cette troisième étape, on proposera de croiser le risque d'engorgement des sols (en présence de dispositifs de drainage ou non) issu de l'étape précédente (critère D') pour finalement déterminer, en fonction de la pente de chaque parcelle ou maille de travail, les possibilités d'évacuation latérale des flux sous la forme d'écoulements hypodermiques (pentes fortes) par rapport au risque de saturation complète du profil (pentes faibles).

Le risque attribué au transfert par écoulement hypodermique en fonction de la pente seule reste néanmoins délicat à déterminer car il fait intervenir un ensemble de processus difficile à appréhender à l'aide des données généralement disponibles (présences de ruptures de perméabilité, conditions aux limites et possibilité d'évacuation des flux). Les scores reportés dans le Tableau 10 restent donc purement indicatifs et devront être éventuellement corrigés en fonction de connaissances locales sur les processus en jeu :

Critère D' (déduit de l'étape 2)	Score de vulnérabilité aux écoulements hypodermiques (Critère H)				Score « résiduel » de vulnérabilité à la saturation des sols (Critère H')			
	< 1 %	de 1 à 5 %	de 5 à 10 %	> 10 %	< 1 %	de 1 à 5 %	de 5 à 10 %	> 10 %
0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	1	1	1	1	0	0
2	0	1	1	2	2	1	1	0
3	0	1	2	3	3	2	1	0
4	0	2	3	4	4	2	1	0

Tableau 10 : Grille permettant de déterminer le score de vulnérabilité associé aux écoulements hypodermiques (critère H) et la vulnérabilité « résiduelle » de saturation des sols (critère H') à partir de la pente

▪ **Étape 4 : Vulnérabilité au ruissellement par saturation**

Pour finir, il est proposé de caractériser la vulnérabilité au ruissellement par saturation en tenant compte de la capacité de stockage du sol avant saturation complète du profil de sol. Pour ce faire, le score « résiduel » issu de l'étape précédente (critère H') va être modulé par un critère relatif à la réserve utile (RU) déduit de la texture (Figure 10) et de l'épaisseur de sol. Le score final sera bien entendu borné ici à 0.

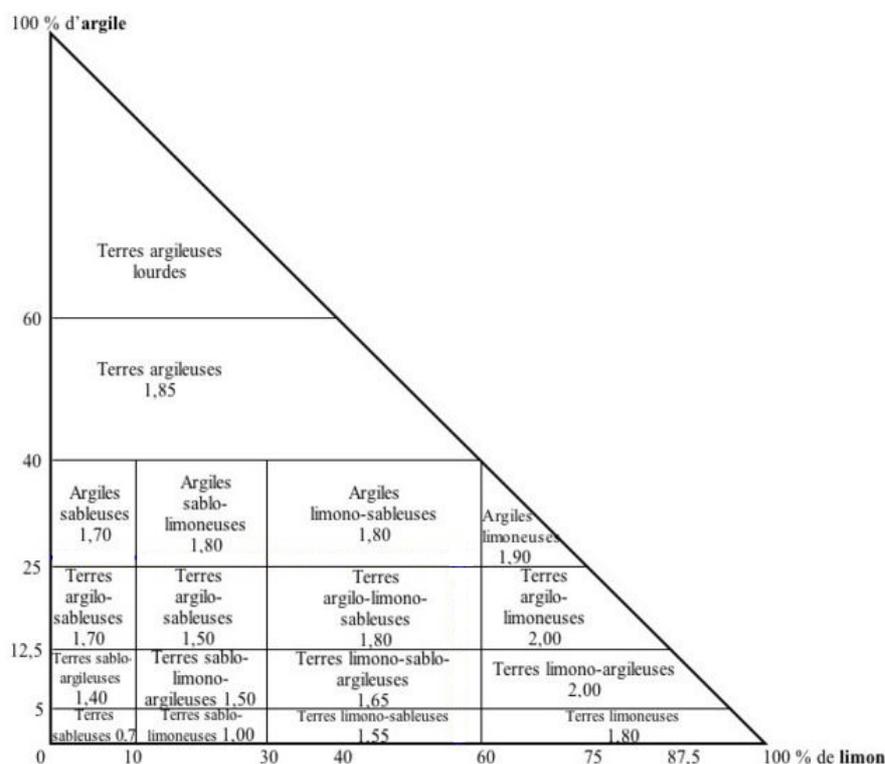


Figure 10 : Triangle textural pour aider à la détermination de la réserve utile d'un sol (exprimée en mm/cm de sol). D'après Jamagne et al. (1977).

RU (mm)	Score de vulnérabilité au ruissellement par saturation
RU < 20	H'-0
20 < RU < 50	H'-1
50 < RU < 100	H'-2
100 < RU < 150	H'-3
RU > 150	H'-4

Tableau 11 : Grille permettant de déterminer le score de vulnérabilité associé au ruissellement par saturation à partir de la réserve utile

2.3.2. Exemple

Le Tableau 12 propose un exemple synthétique d'évaluation de la vulnérabilité pour chaque type de transfert au droit d'une unité cartographique suivant la méthodologie proposée précédemment. Les caractéristiques du milieu sont prises arbitrairement ; elles correspondent à un sol peu profond et non battant sur substratum peu perméable avec présence « partielle » de dispositifs de drainage (ici 33 % de la surface du canton est drainée) et une pente plutôt faible. Chaque score de vulnérabilité est déterminé successivement à l'aide des différents tableaux présentés dans la section 2.3.1 (les scores en italique correspondent aux scores intermédiaires ou « résiduels » réemployés à l'étape suivante).

Étape	Caractéristiques du milieu		Score de vulnérabilité		Vulnérabilité par type de transfert
0	IDPR	Entre 1200 et 1600	$I = 1$	$I' = 3$	Transferts par infiltration = 1 (poursuite de la méthode BRGM)
1	Indice de battance	< 1.4	$B = 0$	$B' = 3$	Transferts par ruissellement hortonien = 0
2	% de surface drainée	< 33 %	$D = 1$	$D' = 2$	Transferts par drainage = 1
3	Pente	Entre 1 et 5 %	$H = 1$	$H' = 1$	Transferts par écoulements hypodermiques = 1
4	Réserve utile	Entre 20 et 50 mm	$H' - 1 = 0$		Transferts par ruissellement par saturation = 0

Tableau 12 : Exemple d'évaluation de la vulnérabilité pour chaque type de transfert au droit d'une unité cartographique en fonction de caractéristiques du milieu représentatives d'un cas complexe de répartition des risques de transfert

Cet exemple permet d'illustrer un cas complexe de répartition du risque entre les différents types de transfert qui s'avèrent tous représentés de manière assez équilibrée. Il en résulte une vulnérabilité faible à très faible pour tous les transferts pris séparément mais qui reste globalement forte (somme des score = 3), si l'ensemble des transferts considérés rejoignent finalement la ressource prélevée. **On rappellera cependant qu'il n'est donné ici qu'un premier niveau d'information au droit de chaque unité cartographique et que des critères supplémentaires pourraient encore être pris en compte pour préciser le niveau de vulnérabilité final au captage (caractéristiques climatiques et accessibilité au milieu récepteur puis au captage). C'est notamment ce que propose la méthode BRGM via la prise en compte de critères relatifs aux pluies efficaces, à l'épaisseur de zone non saturée, à la perméabilité de l'aquifère...**

2.3.3. Avantages, limites et perspectives

Compte tenu de ce qui précède, il apparaît que le raisonnement proposé vient principalement combler certaines des lacunes laissées par la méthode Irstea en matière d'interprétation et de combinaison des critères de vulnérabilité. A cet égard, la méthodologie présentée ici ne peut se substituer entièrement à l'approche experte défendue par Le Henaff et Gauroy (2011), qui aura toujours plus de pertinence pour la réalisation d'un diagnostic adapté à la complexité et aux spécificités de chaque territoire. Elle est en revanche un moyen de parvenir à dégrossir le problème pour orienter le diagnostic de terrain sur les petites AAC et s'avérera d'usage plus opérationnel sur les AAC de grande dimension pour lesquelles une approche experte n'est pas généralisable.

Si elle ne peut tenir compte de la multiplicité des spécificités locales et des cas particuliers rencontrés en réalité, la trame méthodologique proposée doit toutefois pouvoir s'adapter à la plupart des situations en

redéfinissant si besoins les classes de scores associés aux différents critères de vulnérabilité, voire les critères eux-mêmes. Le choix de procéder par étapes successives, incluant un certain nombre de scores de vulnérabilité « intermédiaires » ou « résiduels » doit en revanche être conservé. Il vise en effet à refléter les principaux mécanismes d'écoulement dans le sol, depuis la surface jusqu'au substratum et permet de déduire les vulnérabilités à chaque type de transferts les uns par rapports aux autres. Il s'écarte en cela de l'approche proposée par le BRGM (qui repose sur une combinaison linéaire des différents critères de vulnérabilité) et doit permettre d'assurer un début de cohérence entre les résultats fournis pour les différents types de transferts. Néanmoins la trame méthodologique retenue repose sur une vision très simplifiée et encore imparfaite des mécanismes en question et comporte à cet égard un certain nombre de défauts conceptuels. On signalera notamment que :

- Le choix du paramètre IDPR pour la partition entre transferts souterrains et superficiels (Etape 0) n'est pas compatible avec l'approche proposée par le BRGM dans le cas des milieux karstiques ;
- La divergence entre les approches pour les transferts souterrains et superficiels au-delà de l'étape 0 pourra dans certains cas (*a priori* rares) conduire à obtenir un cumul des scores de vulnérabilité dépassant la valeur maximale de 4 ;
- Le recours à des scores codés entre 0 et 4 laisse peu de souplesse quant aux combinaisons possibles. Il en résulte que la gradation logique ou attendue de la vulnérabilité en fonction de l'évolution d'un critère donné n'est ainsi pas toujours possible (cela apparaît typiquement dans le cas du score de vulnérabilité associé au pourcentage de surface drainée, Tableau 9) ;
- De nombreuses sources d'incertitude se cumulent, que ce soit en raison de la méconnaissance ou de l'approximation faite sur les processus en jeu et la décision d'expert qui en résulte ou bien de l'imprécision des données qui seront employées par rapport à la variabilité spatiale naturelle des critères de vulnérabilité.

Si ces défauts ne sont pas rédhibitoires en ce que la démarche proposée apporte tout de même des solutions plus cohérentes qu'une application indépendante des méthodes BRGM et Irstea, ils doivent inciter à la prudence. A ce titre, une phase de validation doit être envisagée en réalisant une ou plusieurs campagnes de terrain destinées à vérifier par l'observation que les résultats fournis s'avèrent correspondre à la perception que l'on a du fonctionnement du système étudié. Ces campagnes seront de préférence réalisées lors de périodes pluvieuses de manière à observer/confirmer *a minima* la présence de zones vulnérables au ruissellement (soit directement, soit par les indices d'érosion), de zones vulnérables à la saturation (indices d'hydromorphie), de zones présentant des écoulements de sub-surface (observation des pieds de talus, des berges de cours d'eau et fossés) ou encore la fonctionnalité des dispositifs de drainage agricole.

Enfin, en l'état, si la méthode proposée permet de déterminer la vulnérabilité intrinsèque associée aux transferts hydriques au droit de chaque entité spatiale de l'AAC, aucun élément en lien avec l'accessibilité au milieu puis au captage n'a encore été pris en compte. Idéalement, il conviendrait en effet de tenir compte des phénomènes de « transport » du contaminant jusqu'au captage. L'hypothèse est alors faite que tout ce qui tend à rallonger le temps de transfert, augmente la probabilité de dégradation, d'adsorption, de dilution et/ou de dispersion des contaminants. Étant donné la complexité des processus en jeu, qui nécessitent de tenir compte de facteurs en lien avec les vulnérabilités spécifique (comportement et devenir des substances dans le milieu) et opérationnelle (présence d'éléments paysagés en mesure d'intercepter et ralentir les flux d'eau chargés de contaminants avant leur accès à la ressource), cette caractérisation s'avère particulièrement ardue, en particulier dans le cas de transferts mixtes⁶.

De même, une caractérisation plus fine de la vulnérabilité selon la saison serait également à envisager. Il est en effet attendu que les risques de transfert ne soient pas constants au cours de l'année avec, en première approche, une saison hivernale propice aux écoulements et une saison estivale pour laquelle le bilan hydrique,

⁶ Pour les transferts superficiels, des critères simplificateurs tels que la distance hydraulique entre les parcelles émettrices et le réseau (ou le captage), pour tenir compte du potentiel de dégradation, ou encore le pourcentage de surface de l'AAC drainée par chaque unité cartographique pour tenir compte du potentiel de dilution sont parfois employés.

généralement déficitaire, limite fortement la possibilité de voir des transferts se produire. La dimension saisonnière intervient également dans l'évolution de l'état de surface du sol et de la végétation selon le stade de développement des cultures et le travail du sol. Quoique s'éloignant de la vulnérabilité intrinsèque au sens strict, ces éléments peuvent avoir un impact non négligeable sur les processus de transfert et il conviendrait d'en tenir compte pour mieux caractériser ceux-ci et affiner la prise de décision.

2.3.4. Interprétation des résultats pour la mise en place d'actions de protection

Le diagnostic de vulnérabilité d'une AAC à transferts mixtes permet de produire six cartes distinctes : une carte pour chaque type de transfert mentionné en début de section 1.1. Ces cartes restituent le niveau de vulnérabilité sous la forme de scores codés de 0 (vulnérabilité très faible) à 4 (vulnérabilité très forte) que l'on représentera classiquement à l'aide d'une échelle de couleurs (allant par exemple du vert au rouge). On rappellera que les cartes pour les transferts souterrains et superficiels n'auront pas nécessairement la même emprise selon que, pour certains secteurs, l'étude de délimitation a permis de déterminer si seule l'une des deux composantes participe à l'alimentation du captage (cf. Figure 6 donnée en exemple en section 1.2). Pour ne pas induire d'erreur d'interprétation on recommandera tout de même de restituer les résultats pour l'ensemble des transferts sur l'intégralité de l'AAC en représentant par exemple en grisé les zones où le ou les transferts en question n'interviennent pas dans l'alimentation du captage.

Quoique pouvant être perçue comme difficile à interpréter, la diversité de cartes produites se justifie par l'importance de bien distinguer les différents types de transferts, notamment superficiels, pour un choix optimal des actions de protection à envisager⁷. En effet, certains types d'actions pourront être privilégiés (ou exclus) selon le mode de transfert que l'on souhaite maîtriser. En cas d'infiltration prépondérante, les efforts se porteront par exemple vers une évolution des pratiques culturales (réduction des intrants, modification de l'assolement ou des systèmes de culture, substitution de produit...) tandis que dans les secteurs sensibles au ruissellement, le recours à des aménagements tels que les zones tampons constituera une solution intéressante⁸. Un inventaire détaillé des actions de protection possibles selon le type de transfert considéré (mais aussi la substance ciblée) est proposé par Barrez *et al.* (2013a). Les tableaux 13 et 14 en donnent une synthèse.

Pour aider à cette interprétation, la réalisation d'une cartographie intermédiaire permettant de représenter le mode de transfert prédominant (score de vulnérabilité ≥ 3) au droit de chaque unité cartographique pourra s'avérer utile. On prévoira cependant une classe supplémentaire pour les cas où plusieurs transferts coexistent de manière équilibrée (aucun score de vulnérabilité ≥ 3 comme dans l'exemple présenté en section 2.3.2).

Les secteurs sur lesquels on portera les actions correspondront évidemment aux zones présentant la vulnérabilité la plus forte par type de transfert, que l'on confrontera aux secteurs sur lesquels s'exercent les pressions, identifiées lors du diagnostic territorial multi-pressions (DTMP). Autrement dit, le positionnement des actions devra cibler en priorité les zones où les deux facteurs de risque se conjuguent. Il sera également nécessaire d'identifier les zones les plus vulnérables où les pratiques actuelles doivent être préservées pour éviter l'apparition de nouveaux problèmes. Une difficulté survient cependant lorsque plusieurs types de transferts coexistent de manière équilibrée, sans que l'un ou l'autre ne prédomine. Le risque, faible ou moyen (scores entre 0 et 2) pour chaque transfert pris individuellement, n'en sera pas moins élevé globalement si l'ensemble des transferts en question rejoignent finalement la ressource prélevée. Dans ce cas de figure, les actions visant à raisonner ou réduire le recours aux intrants seront privilégiées.

⁷ Hors considérations de faisabilité d'ordre socio-économique ou technique.

⁸ On remarquera à ce sujet que les actions destinées à la maîtrise des transferts concernent pour l'essentiel le ruissellement et favorisent en contrepartie l'infiltration dans le sol, voire l'infiltration profonde. Si l'eau, potentiellement contaminée, rejoint malgré tout la ressource prélevée, ce type d'action restera souvent bénéfique en favorisant une circulation plus lente, susceptible de permettre une meilleure rétention/dégradation des contaminants. C'est notamment le cas des zones tampons qui, en plus de leur action sur la réinfiltration du ruissellement, ont aussi et surtout un rôle de rétention et d'épuration.

Objectif	Action		Mode(s) de transfert ciblé(s)*
Limiter la dispersion des contaminants	Mise en place ou maintien de Zones Tampons (ZT)	Dispositifs enherbés ou boisés (dont ripisylve), talus, haies	Ruissellement diffus, dérive atmosphérique
		Zones tampons humides (bassins de lagunage, mares, étangs, retenues collinaires, bassins d'orage – OR2)	Drainage, ruissellement concentré
	Végétalisation des voies d'écoulement préférentielles : enherbement des talwegs, chemins enherbés, fossés végétalisés, enherbement inter-rangs en cas de cultures pérennes (vigne, arboriculture)...		Ruissellement diffus et concentré
	Travail du sol	Orientation du travail du sol et des semis selon les courbes de niveau	Ruissellement diffus
		Augmenter la rugosité du sol : TCS (techniques culturales simplifiées), reprise de labour motteuse, binage ou hersage	Ruissellement diffus
		Décompactation (élimination de la semelle de labour) ou sous-solage	Ecoulements de sub-surface
	Élimination des courts-circuits (dérayures, rigoles, traces de circulation d'engins, préférer les accès aux parcelles par l'amont, restriction de l'accès du bétail aux cours d'eau)		Ruissellement concentré
	Adaptation de la taille et de la forme des parcelles (fragmentation des parcelles couplée à la mise en place d'éléments paysagés type Z.Tampons)		Ruissellement diffus et concentré
Aménagement d'ouvrages dispersifs (fascines, haies,...)		Ruissellement concentré	
Adaptation du matériel de pulvérisation (buses et dispositifs anti-dérive)		Dérive atmosphérique	

Tableau 13 : Exemples d'actions permettant de limiter la dispersion des contaminants selon les transferts identifiés sur l'aire d'alimentation de captage (*La distinction introduite ici entre ruissellement diffus et ruissellement concentré est importante. En effet, dans bien des cas, il sera plus difficile d'agir sur un écoulement concentré, susceptible de parvenir rapidement au cours d'eau sans rencontrer de zones favorables à la dégradation ou la rétention des contaminants)

Objectif	Action	Mode(s) de transfert ciblé(s)
Raisonner et réduire le recours aux intrants	Modification de l'assolement et des choix variétaux pour la mise en place de cultures moins exigeantes en intrants	Tous (y compris en présence d'infiltration)
	Mise en place de rotations culturales adaptées incluant des Cultures Intermédiaires Pièges à Nitrates (CIPAN)	
	Amélioration des techniques d'application des produits phytosanitaires et d'épandage des engrais : fractionnement et réduction des doses, gestion des périodes d'application en fonction des risques saisonniers de transfert...	
	Choix de substances phytosanitaires adaptées aux risques identifiés (durée de demi-vie, mobilité, toxicité)	
	Passage à l'Agriculture Biologique	
	Passage à la production intégrée ou à l'agro-foresterie	
	Passage au désherbage alternatif (mécanique ou thermique), notamment en Zones Non Agricoles (ZNA)	
	Acquisitions foncières et échanges de parcelles pour la modification durable de l'occupation des sols dans les secteurs les plus vulnérables : boisement, remise en herbe, jachères...	

Tableau 14 : Exemples d'actions de limitation d'emploi des intrants

Enfin, un dernier critère intervenant dans le choix et le positionnement des actions correspondra à la topologie des écoulements dont il a été rappelé en section 1.2 qu'une description soignée doit être réalisée au moment de la délimitation de l'AAC. En effet, dans certaines situations, il est nécessaire de s'interroger sur l'opportunité de privilégier certaines actions permettant d'intervenir au plus près des sources de contamination avant que la maîtrise du risque de transfert vers la ressource exploitée ne soit plus possible. Ce sera typiquement le cas des zones karstiques où les dolines peuvent constituer des points de concentration et d'infiltration préférentielle du ruissellement ou l'exutoire d'émissaires de drainage. La possibilité d'implanter des zones tampons en amont des zones d'infiltration préférentielle (bandes enherbées ou boisées en secteur ruisselant, zones tampons humides artificielles en secteurs drainées...) sera alors étudiée et mise en regard des actions visant la réduction ou le raisonnement des intrants (les deux solutions n'étant pas exclusives) et des contraintes techniques ou socio-économiques afférentes. Ce type de raisonnement sera plus généralement adopté dans toutes les situations faisant intervenir une interface entre transferts superficiels et transferts souterrains (échanges rivière-nappe, ré-infiltration diffuse ou concentrée d'un ruissellement) et devra passer par un diagnostic des éléments du paysage visant à déterminer si des dispositifs physiques de protection sont déjà en place (et efficaces) dans les secteurs ciblés (*cf.* notion de vulnérabilité opérationnelle exposée en section 2). A ce sujet on pourra s'appuyer sur les recommandations fournies par Gril *et al.* (2010). Cette démarche sous-entend toutefois d'avoir recours à un diagnostic de terrain détaillé qui ne peut être raisonnablement mené sur l'ensemble d'un territoire, au-delà d'une certaine dimension. On s'attachera donc à mettre en œuvre ce type de diagnostic sur les secteurs identifiés comme les plus vulnérables.

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Ce guide présente les éléments opérationnels nécessaires à la bonne conduite des premières étapes de diagnostic intervenant dans la démarche de protection des captages dont l'alimentation fait à la fois intervenir des transferts souterrains et superficiels (AAC à transferts mixtes).

Ces étapes concernent en premier lieu la phase de délimitation de l'AAC au cours de laquelle l'identification des modes de circulation de l'eau et des éventuelles connexions entre eaux souterraines et superficielles doit permettre de déterminer si les transferts peuvent être qualifiés de mixtes. De là, le guide rappelle la démarche générale puis les outils permettant d'identifier correctement les contours de l'AAC, soit en partant des contours du bassin versant topographique lorsque la ressource prélevée est superficielle, soit en partant de la définition du bassin d'alimentation de l'aquifère (ou de la PNAC) lorsque la ressource prélevée est souterraine.

Dans un second temps, il est question de l'étape consistant à cartographier la vulnérabilité de l'AAC pour chaque type de transfert. Suivant les recommandations de Barrez *et al.* (2013a), il est proposé d'appliquer de manière conjointe les méthodes de référence développées par le BRGM pour la vulnérabilité aux transferts souterrains et par Irstea pour la vulnérabilité aux transferts superficiels. Après un rappel sur le principe de chacune de ces deux méthodes et des considérations pratiques pour leur bonne utilisation, une réflexion est engagée pour permettre leur articulation. Suivant principalement les orientations données par la méthode du BRGM, cette réflexion a permis de formuler une trame méthodologique reposant sur une interprétation des caractéristiques du milieu sous la forme de scores de vulnérabilité et venant principalement combler les lacunes laissées par la méthode Irstea à ce sujet.

Même si la démarche proposée constitue un premier pas vers la réalisation de diagnostics de vulnérabilité d'AAC à transferts mixtes, le choix de passer par l'articulation des méthodes existantes, a induit un certain nombre de contraintes méthodologiques qui, si elles ont été traitées de manière à construire une démarche la plus logique et consistante possible, s'accompagnent de quelques défauts conceptuels ne permettant pas de parvenir à une solution pleinement satisfaisante.

Un certain nombre d'améliorations ou d'ajouts pourraient être apportés pour résoudre les différents défauts identifiés mais ils nécessiteraient une refonte plus approfondie des méthodes existantes, sortant du cadre de ce guide. En revanche, la réflexion menée à ce sujet nous a poussé à proposer une nouvelle approche, autonome (ne se référant plus aux méthodes existantes) et apportant quelques améliorations notoires, notamment vis-à-vis de la prise en compte des incertitudes inhérente à la démarche et plus généralement vis-à-vis des concepts méthodologiques mobilisés.

Cette méthode doit permettre d'atteindre les mêmes objectifs (une carte de vulnérabilité par type de transfert) avec des besoins en données comparables. Ainsi, si l'approche consistant à évaluer la vulnérabilité à partir de caractéristiques physique propres au milieu a été conservée, la méthode s'écarte des solutions traditionnelles dans sa manière de croiser les différents facteurs de vulnérabilité. A l'image de ce qui a été ébauché dans le présent guide, elle fait notamment appel à la notion de bilan (ou principe de complémentarité entre transferts) et de « hiérarchie verticale » des écoulements pour décrire les principaux mécanismes de transferts et de répartition de l'eau dans le sol, depuis la surface jusqu'au substratum puis vers les nappes. La démarche retenue assure alors *de facto* la cohérence entre les différents modes de transfert. L'influence du climat vis-à-vis de la vulnérabilité est ensuite introduite comme un critère d'abattement des risques, en fonction notamment du volume de précipitations tombé au sol durant la saison considérée. Autrement dit, il s'agit d'identifier dans un second temps les zones et les périodes les plus « contributives » ou « productives » en terme de flux potentiels par type de transferts. Il pourra alors être proposé d'appliquer cette nouvelle méthode sur plusieurs périodes de l'année, idéalement par trimestre (que l'on pourra faire correspondre aux

principales périodes de traitements) et éventuellement de comparer les risques selon les contrastes saisonniers pour mieux définir certains types d'actions à mener (optimisation théorique des périodes de traitements).

Enfin, l'une des avancées majeures de la méthode proposée est la possibilité d'introduire une incertitude et de cartographier celle-ci, parallèlement à la vulnérabilité proprement dite. Cette incertitude intervient à deux niveaux pour i) atténuer le poids donné au jugement d'expert sur l'interprétation des caractéristiques du milieu au regard des mécanismes de transfert mais aussi ii) permettre de tenir compte de l'incertitude liée aux données que ce soit en termes de précision, de résolution ou de disponibilité (ainsi l'absence d'une partie des données nécessaires n'empêche pas l'application de la méthode mais se reflète dans la fiabilité des résultats). Cette étape demande cependant d'inclure dans la chaîne de traitement des outils statistiques simples mais non pris en charge par les outils SIG habituellement utilisés pour ce type d'étude. Des éléments logiciels externalisés sous R sont donc employés pour ce faire.

Aire d'Alimentation de Captage : Terme officiel apparaissant dans la loi sur l'eau et les milieux aquatiques ([LEMA](#), n°2006-1772, article 21) pour désigner l'ensemble des surfaces contribuant à l'alimentation du captage ou, autrement dit, l'ensemble des surfaces où toute goutte d'eau tombée au sol est susceptible de parvenir jusqu'au captage, que ce soit par infiltration ou par ruissellement.

AEP : Alimentation en Eau Potable

Aquifère : formation géologique constituée de roches perméables, continue (milieux poreux) ou discontinue (milieux fissurés ou karstiques), susceptible de contenir de façon temporaire ou permanente de l'eau mobilisable. Un aquifère est donc un réservoir (le contenant) et non la nappe d'eau elle-même.

Bassin versant : ensemble des surfaces collectant les eaux de pluies susceptibles de parvenir à un même exutoire naturel (source, point du réseau hydrographique). Le bassin versant est qualifié de topographique lorsque ses limites sont strictement superposables aux lignes de crêtes et peuvent être déduites à partir du relief seul. Le bassin versant est dit hydrogéologique lorsque l'alimentation de l'exutoire fait intervenir des apports souterrains provenant d'un autre bassin versant topographique. Le bassin versant réel intègre finalement d'éventuels apports artificiels d'origine humaine (canaux, fossés...).

Battance : caractère d'un sol tendant à se désagréger sous l'action des gouttes de pluie et à former une croûte de surface s'opposant à l'infiltration.

BRGM : Bureau de Recherche Géologique et Minière

Bétoire : zone ponctuelle d'engouffrement des eaux de ruissellement vers le milieu souterrain.

Conductivité électrique : indicateur indirect de la concentration de l'eau en ions solubles (les « sels minéraux ») en rapport avec les milieux qu'elle traverse et son temps de séjour.

Contexte Agro-pédo-climatique : ensembles des caractéristiques et interactions entre sol, climat et occupation des sols (notamment agricole) à l'origine de l'individualisation de zones géographiques particulières proches de la notion de terroir.

Culture Intermédiaire Piège à Nitrate (CIPAN) : culture temporaire de végétaux à croissance rapide destinées à protéger les parcelles entre deux cultures dédiées à la production et consommer le surplus potentiel de nitrates résultant des engrais apportés aux cultures précédentes.

DCE : Directive européenne 2000/60/CE, dite « Directive Cadre sur l'Eau »

Degré de karstification : indice employé pour décrire le degré de développement des morphologies karstique (superficielles et souterraines) dans les formations géologiques sensibles à la dissolution. Étant donné que ces morphologies (doline, lapiaz, cavités et conduits karstiques...) constituent des voies préférentielles d'écoulement, le degré de karstification correspond à un indicateur indirect de la vitesse de circulation des eaux à travers un milieu karstique.

Doline : dépression caractéristique des milieux karstiques constituant généralement un point d'infiltration direct et préférentiel des eaux ruisselant en surface vers le milieu souterrain.

Écoulements hypodermiques : écoulement latéral à faible profondeur dans le sol, à la faveur d'un contraste de perméabilité (horizon argileux, semelle de labour, substratum peu ou pas perméable) s'opposant à une infiltration profonde de l'eau.

Essai de perméabilité : techniques consistant à déterminer sur le terrain la perméabilité d'un aquifère (ou d'un sol) par injection ou pompage d'eau.

Évapotranspiration : somme des flux de vapeur d'eau provenant d'une part de l'évaporation de l'eau des sols, des eaux de surface et de la végétation mouillée, d'autre part de la transpiration des végétaux. Elle dépend de paramètres météorologiques (rayonnement, vent, température, ...), de caractéristiques du sol (humidité, albedo, ...) et de la végétation. Elle est mesurée en hauteur d'eau rapportée à une durée, par exemple en mm/jour.

Hydrogéologie : science comprise dans les sciences de la Terre qui a pour objet l'étude des eaux souterraines. L'hydrogéologie réunit la connaissance des conditions géologiques et hydrologiques et des lois physiques qui régissent l'origine, la présence, les mouvements et les propriétés des eaux souterraines, ainsi que les applications de ces connaissances aux actions humaines sur les eaux souterraines, notamment à leur prospection, à leur captage et à leur protection.

Hydrologie : science qui a pour objet l'étude des propriétés physiques, chimiques et biologiques des eaux continentales de surface et souterraines, en particulier du point de vue de leur formation, de leur déplacement, de leur répartition dans le temps et l'espace et de leur interaction avec l'environnement inerte et vivant.

IFT (Indice de fréquence de Traitement) : indicateur d'intensité d'utilisation de produits phytosanitaires. Il correspond au nombre de doses homologuées appliquées à l'hectare entre deux récoltes.

Irstea : Institut national de Recherche en Sciences et Technologie pour l'Environnement et l'Agriculture (anciennement Cemagref)

Isotope : élément chimique possédant un même numéro atomique (même nombre de protons) mais des masses atomiques différentes (nombre différent de neutrons). Ces isotopes peuvent être stables ou radioactifs. Le ratio entre les quantités de l'isotope stable et de l'isotope radioactif dans l'eau peut être utilisé pour dater celle-ci (exemple du C14 pour le plus connu). Les différences de masses entre isotopes peuvent quant à elles permettre d'expliquer l'origine d'une eau (exemple : la teneur d'une eau de pluie en O18 par rapport à O15 diminue avec l'altitude).

Karst : milieu naturel constitué de formations géologiques sensibles à la dissolution (principalement les calcaires), souvent aquifère, et caractérisés par des morphologies superficielle et souterraines particulières à l'origine d'un fonctionnement hydrologique généralement complexe.

LEMA : Loi sur l'Eau et les Milieux Aquatiques

Ligne de partage des eaux : limite de divergence des eaux liée à la topographie ou, autrement dit, limite de part et d'autre de laquelle les eaux s'écoulent vers l'un ou l'autre de deux bassins versants topographique juxtaposés.

Limon : particule sédimentaire dont les grains sont qualifiés de silts, de taille intermédiaire entre les argiles et les sables.

Masse d'eau : découpage élémentaire des milieux aquatiques destinée à être l'unité d'évaluation de la directive cadre sur l'eau 2000/60/CE vis-à-vis de la notion de bon état écologique. Une masse d'eau de surface est une partie distincte et significative des eaux de surface, telles qu'un lac, un réservoir, un tronçon de rivière, de fleuve ou de canal, une eau de transition ou une portion d'eaux côtières. Pour les cours d'eau, la délimitation des masses d'eau est basée principalement sur la taille du cours d'eau et la notion d'hydro-éco-région. Une masse d'eau souterraine est un volume distinct d'eau souterraine se rattachant à un ou plusieurs aquifères.

Modélisation hydrodynamique : méthodes mathématiques et numériques consistant à modéliser les propriétés d'un aquifère (géométrie, paramètres hydrodynamiques) pour simuler et étudier de manière fine les écoulements souterrains.

Nappe captive : volume d'eau souterraine surmontée et isolée de la surface par une formation géologique peu ou pas perméable et soumise à une pression supérieure à la pression atmosphérique. Les nappes captives sont souvent profondes, voire très profondes (1000 m et plus).

Nappe libre : volume d'eau souterraine dont la surface est libre c'est-à-dire à l'équilibre avec la pression atmosphérique. Par opposition aux nappes captives, la surface d'une nappe libre fluctue donc sans contrainte. Ces nappes sont souvent peu profondes.

Occupation des sols : désigne les différents types de couverture de la surface terrestre qu'ils soient naturels ou d'origine humaine (zones artificialisées, espaces agricoles, forêts ou landes, zones humides...).

ONEMA : Office National de l'Eau et des Milieux Aquatiques

Paramètres d'oxydo-réduction : paramètres physico-chimiques d'une eau susceptibles d'expliquer certains processus chimiques et biologiques dans le milieu aquatique, par exemple le phénomène de dénitrification.

Perméabilité : terme utilisé ici pour désigner l'aptitude d'un sol ou d'une roche à se laisser traverser par l'eau.

Pesticide (ou produit phytosanitaire) : produit destiné à lutter contre les organismes jugés nuisibles pour les

cultures (insecticides, herbicides, fongicides) ou encore exercer une action sur les processus biologique des végétaux ciblés (régulateurs de croissance...).

Piézométrie : mesure de la hauteur du niveau d'eau d'une nappe souterraine, quelle soit libre ou captive.

Porosité : terme utilisé ici pour désigner le volume total des interstices d'un sol ou d'une roche pouvant être occupé par l'eau et/ou l'air.

PPC (Périmètres de Protection de Captages) : dispositif rendu obligatoire par la loi sur l'eau du 3 janvier 1992 (article L-1321-2 du code de la santé public) pour les prélèvements excédant 100 m³/jour et destiné à circonscrire et hiérarchiser des zones (PPI, PPR, PPE) pour l'application de mesure de protection d'un captage destiné à l'alimentation en eau potable, principalement contre les pollutions ponctuelles et accidentelles. Ils sont rendus officiels par Déclaration d'Utilité Publique (DUP).

PPE (Périmètre de Protection Éloignée) : facultatif mais encouragé, ce périmètre est créé pour proposer des recommandations si certaines activités non comprise dans le PPR sont susceptibles d'être à l'origine de pollutions importantes. Ce périmètre peut correspondre à l'Aire d'Alimentation du captage.

PPI (Périmètre de Protection Immédiate) : obligatoire (sauf dérogation), ce périmètre sous maîtrise foncière du gestionnaire du captage doit être clôturé et enherbé. Toutes les activités y sont interdites hormis celles relatives à l'exploitation et à l'entretien de l'ouvrage de prélèvement et au périmètre lui-même. Son objectif est d'empêcher la détérioration des ouvrages et d'éviter le déversement de substances polluantes à proximité immédiate du captage.

PPR (Périmètre de Protection Rapprochée) : obligatoire (sauf dérogation), ce périmètre peut atteindre une superficie de quelques hectares sur laquelle toute activité susceptible de provoquer une pollution (déchetteries, carrières, industries...) est interdite ou soumise à prescription particulière.

Précipitations efficaces : différence entre le volume de pluie reçu à la surface du sol et l'évapotranspiration réelle. L'eau des précipitations efficaces est répartie, à la surface du sol, entre le ruissellement et l'infiltration (recharge utile).

Pédologie : science qui a pour objet l'étude des sols, de leur formation et de leur évolution, notamment en contexte agricole.

Recharge utile : volume d'eau de pluie parvenant jusqu'à la zone saturée par infiltration après reprise évapotranspiratoire, traversée du sol et de la zone non saturée.

Rupture de perméabilité : interface entre deux couches de sol (horizons) ou de roche de perméabilité différente et s'opposant à l'écoulement vertical de l'eau.

Réseau hydrographique : ensemble hiérarchisé et structuré des cours d'eau qui assurent le drainage superficiel, permanent ou temporaire, d'un bassin versant ou d'une région donnée.

SAU (Surface Agricole Utile) : ensemble des surfaces couvertes par les grandes cultures, les prairies, les cultures permanentes (vignes, vergers), les jachères ou les jardins. La surface agricole utile ne comprend pas les sols artificialisés (bâtiments et voirie), les landes et friches non productives, les peupleraies en plein, les taillis, bois et forêts d'exploitation.

Semelle de labour : couche de sol plus compacte liée au passage de l'outil de labour et pouvant être à l'origine d'une rupture de perméabilité s'opposant à l'infiltration de l'eau.

Texture : terme utilisé ici pour désigner la part relative de sable, limon, et argile qui constituent un sol.

Traçage artificiel : technique consistant à injecter une substance chimique colorée pour suivre les voies d'écoulement de l'eau et parfois quantifier la vitesse de cet écoulement.

Turbidité : caractère d'une eau trouble due à la présence de particules en suspension.

Vulnérabilité : terme utilisé ici pour désigner le risque pour une ressource d'être atteint par un polluant. Il est important de distinguer la vulnérabilité intrinsèque liée aux caractéristiques du milieu (sol, climat, type d'aquifère...) au regard des transferts d'eau de la vulnérabilité spécifique liée à propriétés du milieu au regard du type de contaminant et de ses propriétés (aptitude à l'adsorption sur les composés du sol, vitesse de dégradation dans le milieu...) ou encore de la vulnérabilité opérationnelle qui tient compte des éléments évolutifs (type de végétation ou de culture, présence d'élément paysagé de type zone tampon, travail du sol...).

Zone non saturée : zone du sous-sol non complètement saturée en eau (coexistence de l'eau et de l'air dans les interstices de la roche) au-dessus de la surface d'une nappe libre et où les écoulements se font de manière verticale.

Zone saturée : zone du sous-sol dans laquelle l'eau occupe complètement les interstices de la roche (aquifère) et est susceptible de se déplacer latéralement sous l'effet de la gravité et des gradients de pression.

ZSCE (Zone Soumise à Contrainte Environnementale) : dispositif réglementaire issu de l'article 21 de la loi sur l'eau et les milieux aquatiques du 30 décembre 2006 destiné à mettre en œuvre des programmes d'action pour la protection de zones à enjeux environnementaux, notamment en milieu aquatique (aires d'alimentation de captages, zones humides, zones sensibles à l'érosion des sols).

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Barrez F., Wibaux V., Le Henaff G., Vernoux J.F., Carluier N., Catalogne C. (2013a). Aide quant à l'optimisation des actions pour protéger un captage : méthodologie de choix d'actions pertinentes en fonction des typologies de transfert sur une AAC. Rapport Irstea/BRGM-ONEMA, 29 pp.
- Barrez F., Wibaux V., Le Henaff G., Vernoux J.F., Carluier N., Catalogne C. (2013b). Aide quant à l'optimisation des actions de protection des captages : apports du diagnostic hydrochimique à la connaissance des Aires d'Alimentation de Captage. Rapport Irstea/BRGM-ONEMA, 48 pp.
- Bussard T. (2005). Méthodologie de dimensionnement des zones de protection des captages d'eau souterraine contre les polluants chimiques persistants. Thèse de l'EPFL, 162 pp.
- Chapuis R.P. (1999). Guide sur les essais de pompage et leurs interprétations. Environnement Québec, 158 pp.
- CORPEN (1999). Désherbage - Eléments de raisonnement pour une maîtrise des adventices limitant les risques de pollution des eaux par les produits phytosanitaires. 149 pp.
- Gril J-J., Le Henaff G., Faidix C. (2010). Mise en place de zones tampons et évaluation de l'efficacité des zones tampons existantes destinées à limiter les transferts hydriques de pesticides. Guide de diagnostic à l'échelle du petit bassin versant. Rapport Irstea-MAAF, 42 pp.
- Institut of Hydrology (1980). Low-flow studies. Report No. 1, Wallingford, Oxon UK.
- Le Henaff G., Gauroy C. (2012a). Délimitation des aires d'alimentation de captages en eaux de surface et caractérisation de leur vulnérabilité vis-à-vis des pollutions agricoles diffuses par les pesticides – Note bibliographique. Rapport Irstea-MEEDDM/MAAF, 65 pp.
- Le Henaff G., Gauroy C. (2012b). Délimitation des aires d'alimentation de captages en eaux de surface et caractérisation de leur vulnérabilité vis-à-vis des pollutions agricoles diffuses par les pesticides – Guide méthodologique. Rapport Irstea-MEEDDM/MAAF, 55 pp.
- Lejeune O., Devos A., Marre A. (2003). Spatialisation des débits d'étiage de la Blaise (Marne-France). Université de Reims, programme de recherche PIREN-Seine, 15 pp.
- Jamagne M., Betremieux R., Begon J.C., Mori A., (1977). Quelques données sur la variabilité dans le milieu naturel de la réserve en eau des sols. Bull. techn. infor., 324-325, pp. 627-641.
- Mardhel V. (2006) - Carte de vulnérabilité intrinsèque simplifiée des eaux souterraines de la région Aquitaine. Rapport BRGM, 105 pp.
- Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie (2013). Guide méthodologique : Protection d'aire d'alimentation de captage en eau potable contre les pollutions liées à l'utilisation de fertilisants et de pesticides. 103 pp. http://agriculture.gouv.fr/IMG/pdf/201306_Guide_Methodo_aires_de_captage_cle07e7c1.pdf
- Pochon A., Zwahlen F. (2003) - Délimitation des zones de protection des eaux souterraines en milieu fissuré – Guide pratique. L'environnement pratique. Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage, Office fédéral des eaux et de la géologie, Berne, 83 pp.
- Rémy J-C., Marin-Lafèche A. (1974). L'analyse de terre : réalisation d'un programme d'interprétation automatique. Annales Agronomiques, Vol.25(4), pp. 607-632.
- Schudel B., Biaggi D., Dervev T., Kozel R., Müller I., Ross J.H., Schindler U. (2002). Utilisation des traceurs artificiels en hydrogéologie – Guide pratique. Rapport. OFEG, 87 pp.

- Surdyk N., Vernoux J.F. (2011). Approche simplifiée de la vulnérabilité spécifique des eaux souterraines vis-à-vis des produits phytosanitaires. Rapport BRGM-ONEMA, 59 pp.
- Vernoux J.F., Barrez F., Wuilleumier A. (2011). Analyse des études de délimitation et de vulnérabilité des aires d'alimentation des captages d'eau souterraine « Grenelle ». Rapport BRGM-ONEMA, 118 pp.
- Vernoux J.F., Wuilleumier A., Dörfliger N. (2007a). Délimitation des bassins d'alimentation des captages et de leur vulnérabilité vis-à-vis des pollutions diffuses – Guide méthodologique. Rapport BRGM-AESN, 72 pp.
- Vernoux J.F., Wuilleumier A., Dörfliger N. (2007b). Méthodologie de délimitation des bassins d'alimentation des captages et de leur vulnérabilité vis-à-vis des pollutions diffuses – Rapport intermédiaire : synthèse bibliographique et analyse des études réalisées sur le bassin Seine-Normandie. Rapport BRGM-AESN, 293 pp.
- Vernoux J.F., Wuilleumier A., Perrin J. (à paraître) - Délimitation des aires d'alimentation de captage et cartographie de leur vulnérabilité vis-à-vis des pollutions diffuses. Version révisée du guide méthodologique, rapport BRGM/RP-63311-FR

LISTE DES ILLUSTRATIONS

Figure 2 : Illustration de différents chemins de l'eau atteignant un même captage.....	16
Figure 3 : Illustration des notions de bassin versant topographique et de bassin d'alimentation d'un aquifère.....	17
Figure 4 : Organigramme synthétisant les éléments à prendre en compte pour la délimitation d'une AAC lorsque la ressource est prélevée en surface.....	19
Figure 5 : Organigramme synthétisant les éléments à prendre en compte pour la délimitation d'une AAC lorsque la ressource prélevée est souterraine.....	19
Figure 6 : Exemple d'Aire d'Alimentation de Captage complexe faisant intervenir des compartiments à transferts mixtes stricto sensu, à transferts souterrains seuls ou transferts superficiels seuls. Ici le captage s'effectue en nappe alluviale alimentée par échanges nappe-rivière (e) et par des apports d'origine karstique (sources). L'AAC inclut donc le bassin versant topographique du cours d'eau et les bassins d'alimentation des aquifères karstiques. Ces derniers sont eux-mêmes alimentés en partie par de l'infiltration directe (b) intervenant parfois au-delà des limites topographiques (a) et de la réinfiltration d'écoulements superficiels (d). D'autres zones de l'AAC ne contribuent en revanche à l'alimentation du captage que partiellement via des apports superficiels, les eaux d'infiltration étant exportées hors du bassin versant topographique (c).	20
Figure 7 : Illustration des notions de zone d'influence et de zone d'appel d'un pompage en aquifère libre	22
Figure 9 : Schéma de principe de la méthodologie proposée avec les notations utilisées par la suite	35
Figure 10 : Triangle textural pour aider à la détermination de la réserve utile d'un sol (exprimée en mm/cm de sol). D'après Jamagne et al. (1977).....	38

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Synthèse des différents modes de transfert pouvant intervenir sur une AAC à transferts mixtes	13
Tableau 2 : Grille permettant de déterminer le score de vulnérabilité pour chacun des critères pris en compte (hors sol) dans le cas d'une formation aquifère continue.....	28
Tableau 3 : Tableau à deux entrées permettant de déterminer le score de vulnérabilité associé au sol en fonction de sa nature et de son épaisseur (critère S).....	28
Tableau 4 : Grille permettant de déterminer le score et la classe de vulnérabilité finale en fonction de la valeur de V.....	29
Tableau 5 : Critères pris en compte pour la détermination de la vulnérabilité selon le type de transfert superficiel.....	30
Tableau 6 : Echelle de restitution des résultats et résolution optimale des données en fonction des dimensions de l'AAC.....	31
Tableau 7 : Grille permettant de déterminer le score de vulnérabilité pour les transferts superficiels (Critère I') et par infiltration (critère I) à partir de l'IDPR.....	34
Tableau 8 : Grille permettant de déterminer le score de vulnérabilité associé au ruissellement hortonien (critère B) et la vulnérabilité « résiduelle » pour les transferts dans le sol (critère B') à partir de l'indice de battance	36
Tableau 9 : Grille permettant de déterminer le score de vulnérabilité associé au drainage (critère D) et la vulnérabilité « résiduelle » d'engorgement des sols (critère D') à partir du pourcentage de surface drainée	37
Tableau 10 : Grille permettant de déterminer le score de vulnérabilité associé aux écoulements hypodermiques (critère H) et la vulnérabilité « résiduelle » de saturation des sols (critère H') à partir de la pente.....	37
Tableau 11 : Grille permettant de déterminer le score de vulnérabilité associé au ruissellement par saturation à partir de la réserve utile.....	38
Tableau 12 : Exemple d'évaluation de la vulnérabilité pour chaque type de transfert au droit d'une unité cartographique en fonction de caractéristiques du milieu représentatives d'un cas complexe de répartition des risques de transfert.....	39
Tableau 13 : Exemples d'actions permettant de limiter la dispersion des contaminants selon les transferts identifiés sur l'aire d'alimentation de captage (*La distinction introduite ici entre ruissellement diffus et ruissellement concentré est importante. En effet, dans bien des cas, il sera plus difficile d'agir sur un écoulement concentré, susceptible de parvenir rapidement au cours d'eau sans rencontrer de zones favorables à la dégradation ou la rétention des contaminants).....	42
Tableau 14 : Exemples d'actions de limitation d'emploi des intrants.....	42

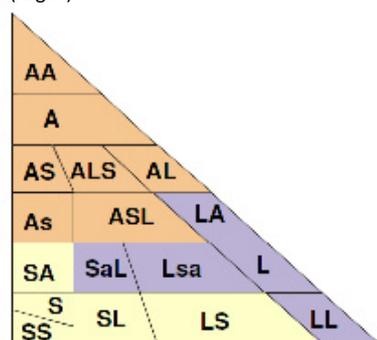
ANNEXE I : AIDE-MÉMOIRE POUR LA CARACTÉRISATION DU TYPE D'AQUIFÈRE

Type d'aquifère	Continu	Discontinu	
		Fissuré	Karstique
Débit de production	Moyen à élevé (30 à 200 m ³ /h)	Faible (< 5 m ³ /h)	Parfois très élevé (> 1000 m ³ /h)
Fluctuation des débits aux sources (ou réactivité face à un épisode pluvieux)	Faible	Forte	Très forte
Température, conductivité et hydrochimie	Stable	Variation importantes à très importantes au cours d'un cycle hydrologique	
Turbidité	Rare	Possible après de fortes pluies	Fréquente après de fortes pluies
Surface piézométrique	Uniforme	Irrégulière	
Fluctuation du niveau piézométrique	Faible (cycle annuel voire pluriannuel, sauf en présence d'échanges nappe-rivière)	Faible à moyenne (cycle annuel)	Rapide (mise en charge à l'échelle de l'épisode pluvieux)
Perméabilité	Variable mais généralement inférieure à 0.1 m/s	Forte à proximité des fissures	Très forte à proximité des drains
Porosité	Comprise entre 5 et 30 %	Porosité matricielle faible à très faible (< 5 %), porosité de fissure et/ou karstique variable et hétérogène	
Diffusivité	Forte	Assez faible	Faible
Temps de séjour	Important	Moyen à faible	Faible à très faible

Adapté de Vernoux et al. (2007)

ANNEXE II : TRIANGLE DES TEXTURES

100 % (Argile)



100 % (Sable)

100 % (Limon)

Texture :

- AA : d'argile
- A : argileuse
- As : d'argile sableuse
- ALS : d'argile limon-sableuse
- AL : d'argile limoneuse
- AS : argilo-sableuse
- ASL : limono-argilo-sableuse
- LA : de limon argileux
- SaL : de sable argilo-limoneux
- Lsa : de limon sablo-argileux
- L : limoneuse
- LL : de limon
- S : sableuse
- LS : de limon sableux
- SS : de sable
- SA : de sable argileux
- SL : de sable limoneux

Texture dominante :

- Argile
- Limon
- Sable

ANNEXE III : AIDE-MÉMOIRE POUR L'APPLICATION DE LA MÉTHODE DE CARTOGRAPHIE DE LA VULNÉRABILITÉ AUX TRANSFERTS SOUTERRAINS

Type de formation aquifère	Continu		Discontinu				
			Fissuré		Karstique		
Forme de la somme pondérée	$V = 0.25 S + 0.2 H + 0.3 I + 0.15 K + 0.1 P$ (adaptée de la méthode DRASTIC)		$V = + 0.2 S + 0.3 I + 0.5 D$ (adaptée de la méthode DISCO)		$V = 0.1 P + 0.5 I + 0.1 K + 0.3 R$ (adaptée de la méthode PAPRIKA)		
Catégorie de critère	Critère	Données nécessaires	Critère	Données nécessaires	Critère	Données nécessaires	
Nature du sol et formations superficielles	S	Epaisseur, texture, pierrosité du sol (+ présence d'un horizon géologique protecteur)	S	Epaisseur, texture, pierrosité du sol (+ présence d'un horizon géologique protecteur)	P*	S	Epaisseur, texture, pierrosité du sol (+ présence d'un horizon géologique protecteur)
Zone non saturée ou Epikarst	H	Epaisseur de la zone non saturée				E	Présence/absence d'un épikarst et retard à l'infiltration qui en résulte
Capacité d'infiltration vers l'aquifère	I	Carte de l'IDPR	I	Carte de l'IDPR	I	Présence de zones d'infiltration préférentielles fonctionnelles (pertes, dolines, engouffrement, lapiaz) et pente.	
Perméabilité de l'aquifère au sens large (vitesse de transit de l'eau)	K	Mesure de perméabilité (essais par pompage)	D	Degré de fonctionnalité du réseau de discontinuités jusqu'au captage (traçages, relevés géomorphologiques)	K	Degré de karstification (degré de développement et fonctionnalité du réseau karstique)	
					R	Nature de la roche (marne, marno-calcaire, calcaire franc)	
Pluies efficaces	P	Pluie, ETP en mm/an et réserve utile					

* P = valeur maximale donnée par S ou E

Adapté de Vernoux *et al.* 2007a

ANNEXE IV : DONNÉES MOBILISABLES

Nature de la donnée		Echelle / résolution	Origine de la donnée	Remarques et informations complémentaires
Topographie	BD ALTI (MNT)	De 50 à 1 000 mètres	IGN	<p>Permet le calcul de divers indices relatifs à la topographie dont la pente, la densité de drainage, l'identification des bassins versants topographiques...</p> <p>Données payantes (en deçà de 250 mètres de résolution) : http://professionnels.ign.fr/bdalti</p> <p>Consultable en ligne sur : http://www.geoportail.gouv.fr/accueil</p> <p>Données payantes : http://professionnels.ign.fr/scan25</p>
	Thème ALTI de la BD TOPO (MNT)	25 mètres		
	Cartes topographiques papier ou 'Scan25'	1/25 000		

Nature de la donnée		Echelle / résolution	Origine de la donnée	Remarques et informations complémentaires
Occupation des sols	Corine Land Cover	1/100 000	IFEN	<p>Consultable en ligne : http://sd1878-2.sivit.org/</p> <p>Données publiques (téléchargeables) : http://www.stats.environnement.developpement-durable.gouv.fr/clc/CORINE_Land_Cover_-_Saisie_Demande.jsp</p>
	Recensement Général Agricole (RGA 2000 et 2010)	Canton	Ministère de l'Agriculture	<p>Statistiques agricoles par canton incluant les types de culture</p> <p>http://agreste.agriculture.gouv.fr/enquetes/recensement-agricole/</p> <p>Données payantes</p>

Nature de la donnée		Echelle / résolution	Origine de la donnée	Remarques et informations complémentaires
Pédologie	Base de Données Géographiques des Sols de France (BDGSF)	1/1 000 000	INRA	Description par Unité Cartographique des Sols (texture, fonctionnement hydrique, charge en cailloux...) http://www.gissol.fr/programme/bdgsf/bdgsf.php Données payantes
	Référentiel Régional Pédologique (RRP)	1/250 000	INRA (IGCS)	Base de données descriptive des sols (texture, hydromorphie, épaisseur...) Couverture nationale incomplète http://www.gissol.fr/programme/igcs/rrp.php Données payantes
	Base de données d'analyse de terre (BDAT)	Canton	INRA	Statistiques à l'échelle cantonale (texture, paramètres physico-chimiques...) http://www.gissol.fr/programme/bdat/bdat.php Consultable en ligne sur : http://bdat.gissol.fr/geosol/index.php
	Cartes et études pédologiques diverses	1/100 000 1/50 000 1/25 000 1/10 000	INRA, Chambres d'Agriculture...	Couverture nationale très lacunaire Données payantes
Drainage	Superficies drainées par canton issues du Recensement Général Agricole (RGA 2000 et 2010)	Canton	Ministère de l'Agriculture	Données parfois sous secret statistique (lorsque moins de trois exploitations déclarent avoir des surfaces drainées) http://agreste.agriculture.gouv.fr/enquetes/recensement-agricole/ Données payantes

Nature de la donnée		Echelle / résolution	Origine de la donnée	Remarques et informations complémentaires
Géologie et hydrogéologie	Cartes géologiques papier ou vectorisées (et notices associées)	1/50 000	BRGM	Consultable en ligne sur : http://infoterre.brgm.fr/ Données payantes
	IDPR	1/50 000		Consultable en ligne sur : http://infoterre.brgm.fr/ Données publiques (sur demande auprès du BRGM)
	Base de Données du Référentiel Hydrogéologique Français (BDRHF)	1/50 000		Description et délimitation des formations aquifères http://www.sandre.eaufrance.fr/Referentiel-hydrogeologique-BD-RHF Consultable en ligne sur : http://infoterre.brgm.fr/ Sera remplacée prochainement par la BD LISA
	Atlas Hydrogéologiques	Département		Description et délimitation des formations aquifères. Cartes piézométriques... Données publiques (mises à disposition en DREAL)
	Base de données du Sous-Sol (BSS)	Ponctuelle		Données géologiques et hydrogéologiques variées (coupes de forage, essais de perméabilité...) Consultable en ligne sur : http://infoterre.brgm.fr/
	Base de données des cavités souterraines	Ponctuelle	BRGM	Inventaire des cavités souterraines naturelles ou d'origine anthropique permettant notamment de localiser les points d'infiltration préférentielle Données publiques consultables en ligne sur : http://www.bdcavite.net/
	Banque de données sur les eaux souterraines (ADES)	Ponctuelle	BRGM, DREAL, Agences de l'eau...	Données de suivi qualitatif et quantitatif des eaux souterraines Consultable en ligne sur : http://www.ades.eaufrance.fr/

Nature de la donnée		Echelle / résolution	Origine de la donnée	Remarques et informations complémentaires
Climat	AURELHY	1 km	Météo-France	Statistiques spatialisées de pluies et températures sur la période 1971-2000 Données payantes (sur demande auprès de Météo-France)
	SAFRAN	8 km		Données spatialisées de pluies et températures journalières Données utilisées en entrée de la chaîne ISBA-MODCOU pour l'estimation de la recharge des nappes. Données payantes (sur demande auprès de Météo-France)
	SHYREG	1 km		Statistiques spatialisées d'Intensité-Durée-Fréquence des pluies Données payantes : http://publitheque.meteo.fr/okapi/accueil/okapiWebPubli/index.jsp
	Précipitations, température...	Ponctuelle		Données de pluies et températures aux stations de mesure Données payantes : http://publitheque.meteo.fr/okapi/accueil/okapiWebPubli/index.jsp



Irstea

1, rue Pierre Gilles de Gennes
CS 10030
92761 Antony
01 40 96 61 21
www.irstea.fr



Onema

Hall C – Le Nadar
5, square Félix Nadar
94300 Vincennes
01 45 14 36 00
www.onema.fr