

Modèle hydrodynamique LOGAR Limites d'utilisation

Donneur d'ordre : Agence régionale pour l'environnement, les mesures et la protection de la nature (*Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz*)
Hertzstr. 173
76187 Karlsruhe

Date de la commande : 28.01.2014

Numéro de commande : A546

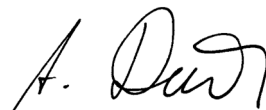
Numéro de rapport : A546-2

Auteurs : Dr.-Ing. Ulrich Lang
Dipl.-Ing. Armin Durach M.Sc.

Stuttgart, le 13 mai 2015



Dr. Ulrich Lang



Armin Durach

TABLE DES MATIERES

TABLE DES MATIERES.....	I
TABLE DES FIGURES.....	II
1 Introduction.....	1
2 Limites d'utilisation du modèle LOGAR	3
2.1 Influence de la discrétisation horizontale.....	3
2.2 Influence de la discrétisation verticale	4
2.3 Influence de la discrétisation temporelle.....	5
2.4 Système programme LUBW MODFLOW/MT3DMS	6
2.5 Etat de l'étalonnage et du paramétrage.....	7
2.6 Influence des crues du Rhin	8
2.7 Eaux de surface.....	8
2.8 Utilisations à la limite du modèle	9
2.9 Conditions dans la zone des prélèvements dans la nappe phréatique.....	9 10
2.10 Problématiques de transport	10
REFERENCES DOCUMENTAIRES.....	12

TABLE DES FIGURES

Figure 1 :	A gauche, panache de concentration calculé avec le modèle LOGAR à grande échelle, à droite avec le modèle local détaillé pour la partie nord de la zone LOGAR	4
Figure 2 :	Coupe verticale d'un modèle détaillé dans la zone LOGAR nord, tenant compte des horizons intermédiaires clastiques fins FH1/2, FH3, FH4/OZH et ZH3.....	5
Figure 3 :	Niveaux de nappe mesurés et calculés au voisinage du Rhin pendant la crue du premier semestre 1999 (trait noir : piézométrie calculée avec paramétrage initial LOGAR, ligne bleue : piézométrie calculée après étalonnage amélioré avec un pas de temps journalier.	6

1 Introduction

Le modèle LOGAR est un modèle de gestion à grande échelle des aquifères des alluvions quaternaires dans la vallée du Rhin supérieur entre Bâle et Karlsruhe. Le modèle hydrodynamique, aux différences finies, repose sur une discrétisation spatiale de 100x100 m. On distingue deux unités hydrogéologiques dans l'étendue couverte par le modèle LOGAR. L'unité hydrogéologique supérieure est supposée plus perméable dans sa partie des 20 m supérieurs que dans sa partie inférieure.

L'outil de simulation des écoulements et de transport est le programme de modélisation MODFLOW amélioré par le LUBW, associé au modèle de transport MT3DMS. Le modèle d'écoulement a été étalonné en régime transitoire dans le cadre de deux projets transfrontaliers (MoNit 2006, LOGAR 2012) entre 1986 et 2006. A cette occasion, les comportements d'écoulement déterminants pour la reproduction de la dynamique saisonnière et pluriannuelle du modèle ont été implémentés. La discrétisation temporelle a une périodicité mensuelle.

S'agissant des problématiques de transport, le modèle a été développé pour simuler le transport global de nitrates sur plusieurs décennies. A partir des taux de nitrates entrants annuels déterminés par STOFFBILANZ, le transport des nitrates dans la vallée du Rhin supérieur a été simulé à l'aide du modèle en tenant compte de l'écoulement instationnaire (régime transitoire). Le modèle permet d'obtenir une bonne représentation à grande échelle tant de la distribution réelle des nitrates que de l'évolution dans le temps des teneurs en nitrates. Pour les scénarios retenus, les prévisions pour les 50 prochaines années indiquent que la poursuite de la réduction des apports de nitrates permettra de réduire nettement les étendues caractérisées par des concentrations en nitrates les plus élevées.

Outre le transport de nitrates, le modèle a permis de simuler le transport de produits phytosanitaires, par exemple l'atrazine et de son métabolite la déséthylatrazine. Si le transport de nitrates dans les eaux souterraines est bien simulé, la simulation pour les produits phytosanitaires reste à améliorer compte tenu de la complexité des conditions de transfert et du manque relatif de données pour la détermination des apports à la nappe. Le transfert de produits phytosanitaires a été simulé à l'aide du modèle MACRO.

Au vu des objectifs et de l'utilisation du modèle LOGAR ainsi que de la dimension du modèle hydrodynamique, on dispose d'un outil global d'évaluation des écoulements à grande échelle dans la vallée du Rhin supérieur entre Bâle et Karlsruhe. Cet outil peut également être mis à contribution, dans le cadre de limitations techniques déterminées, pour analyser des problématiques locales ou développer des modélisations locales dans lesquelles par exemple des conditions aux limites et des

paramètres sont repris du modèle à grande échelle. Pour une utilisation de cette nature, il convient de bien veiller aux limites d'utilisation du modèle à grande échelle.

2 Limites d'utilisation du modèle LOGAR

L'utilisation des résultats du modèle LOGAR nécessite de prendre en compte les limites d'utilisation et recommandations indiquées ci-dessous :

2.1 *Influence de la discrétisation horizontale*

En principe, il est impossible de s'avancer, de se prononcer sur des résultats au-dessous de l'échelle de discrétisation, mailles carrées de côté 100 m. Le programme utilisé donne une valeur moyenne des hauteurs piézométriques pour l'ensemble de la maille. Les conditions locales d'écoulement, par exemple dans la zone de prélèvements ou d'eaux de surface ne peuvent pas être représentées. Compte tenu de la discrétisation, plusieurs conditions aux limites spécifiques peuvent être présentes dans une maille du modèle LOGAR. Il peut s'agir par exemple de prélèvements voisins ou de deux cours d'eau proches. En particulier, pour les cours d'eau, il faut noter que l'échange entre les eaux de surface et l'aquifère est déterminé par le coefficient d'échange. Pour les problématiques de petite échelle avec une discrétisation améliorée, cette valeur cumulée spécifique au programme ne peut être que partiellement reprise. Par contre les valeurs peuvent être utilisées comme référence pour un étalonnage amélioré.

Un exemple de réalisation de modèle local est celui de l'application à la partie nord du modèle LOGAR. Un modèle détaillé a été développé, avec une maille de 10 m x 10 m, pour une problématique de transport. La Figure 1 montre ainsi l'étendue d'un panache de concentration calculé avec le modèle à grande échelle et avec le modèle détaillé. Compte tenu surtout de la dispersion numérique, le panache calculé est nettement plus large dans le modèle à grande échelle que dans le modèle détaillé.

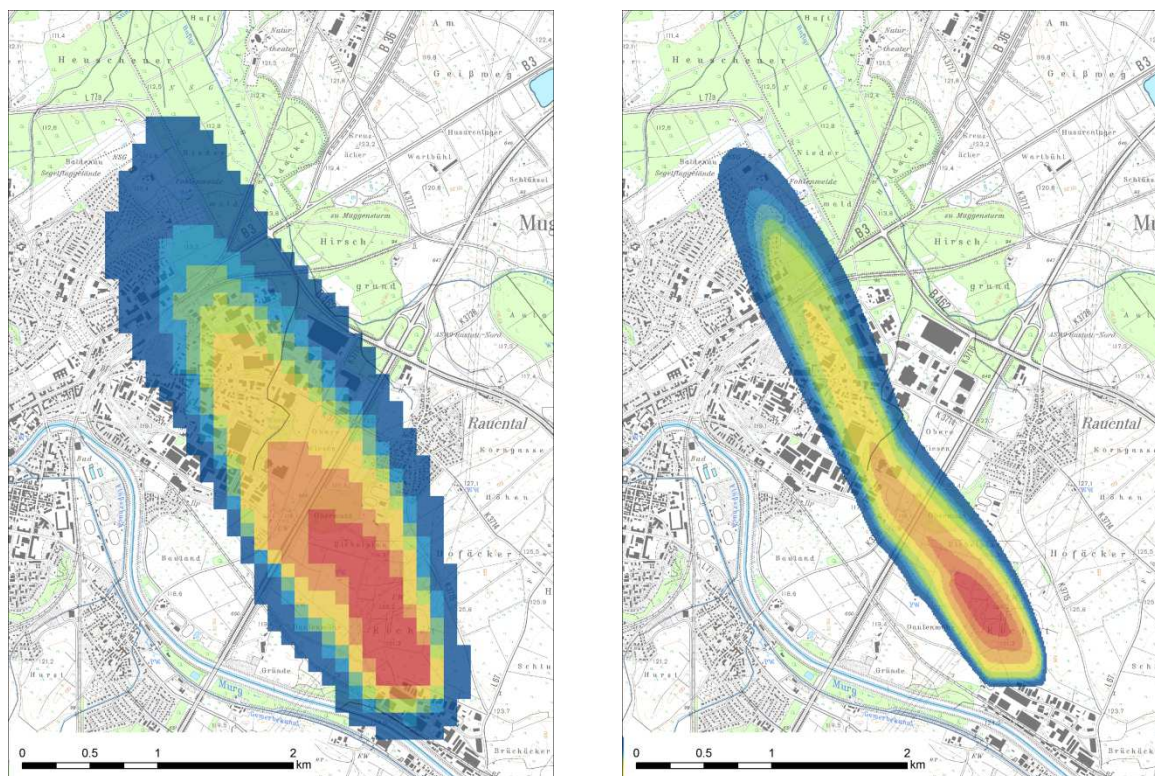


Figure 1 : A gauche, panache de concentration calculé avec le modèle LOGAR à grande échelle, à droite avec le modèle local détaillé pour la partie nord de la zone LOGAR

2.2 Influence de la discrétisation verticale

Dans le plan vertical, le modèle LOGAR est actuellement discrétisé en 10 couches. Selon le modèle conceptuel hydrogéologique à grande échelle, l'aquifère est divisé en couches, celles de la formation de Neuenburg et de Breisgau et de la formation de l'Ortenau supérieur et de la formation de l'Ortenau inférieur. Pour la formation de Neuenburg et la formation de l'Ortenau supérieur, on suppose en outre, pour simplifier, que les 20 m supérieurs présentent une perméabilité plus élevée. Les horizons locaux intermédiaires clastiques fins, en particulier dans la zone nord du modèle, ne sont pas considérés comme des couches de modélisation explicites. Pour les problématiques de petite échelle, l'effet hydraulique de ces horizons intermédiaires peut avoir une grande importance. Cela vaut en particulier pour les processus de transport pour lesquels le transport vertical au travers de ces horizons intermédiaires peut être déterminé. En particulier, pour les problématiques associées à la qualité attendue de l'eau des puits de prélèvement, l'effet hydraulique de ces horizons intermédiaires doit être pris en compte dans la visualisation détaillée. La Figure 2 donne un exemple de discrétisation verticale améliorée pour un modèle

détaillé dans la zone nord, dans laquelle les horizons intermédiaires clastiques fins ont également été pris en compte comme couche explicite.

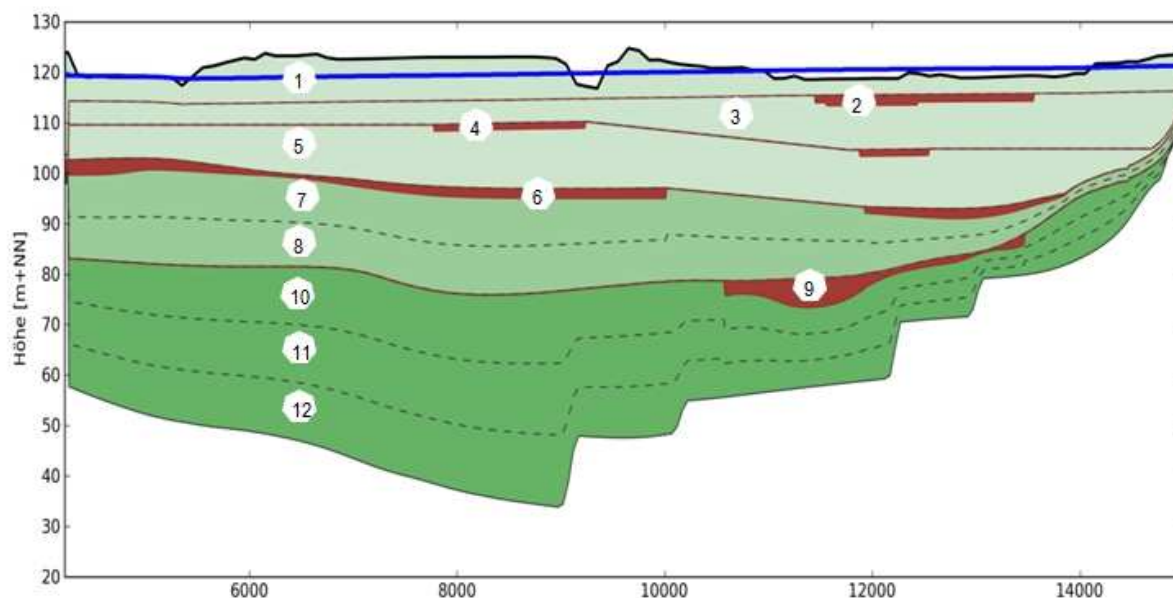


Figure 2 : Coupe verticale d'un modèle détaillé dans la zone LOGAR nord, tenant compte des horizons intermédiaires clastiques fins FH1/2, FH3, FH4/OZH et ZH3

2.3 Influence de la discrétisation temporelle

La discrétisation temporelle est mise en œuvre dans le modèle LOGAR avec un pas de temps mensuel. Cela signifie que toutes les conditions aux limites restent constantes à l'intérieur d'un mois donné et qu'une modification peut intervenir entre deux mois consécutifs. Cela signifie tout d'abord que les événements à court terme ne sont pas pris en compte dans le modèle et que les paramétrages qui se rapportent à des événements à court terme ne pouvaient pas être clairement pris en compte dans le cadre de l'étalonnage. Les données de recharge des nappes phréatiques et de niveau d'eau dans le Rhin étant relevées sur une base quotidienne, il est possible d'affiner le modèle temporellement. Toutefois, il faudra alors affiner l'étalonnage du modèle LOGAR pour le calcul de simulations à court terme. Ainsi, la Figure 3 présente une simulation affinée dans le temps du modèle LOGAR pour les données de la crue du Rhin de 1999. Un étalonnage affiné, en particulier du coefficient d'échange, permet alors d'obtenir une nette amélioration du calcul des variations à court terme de la nappe.

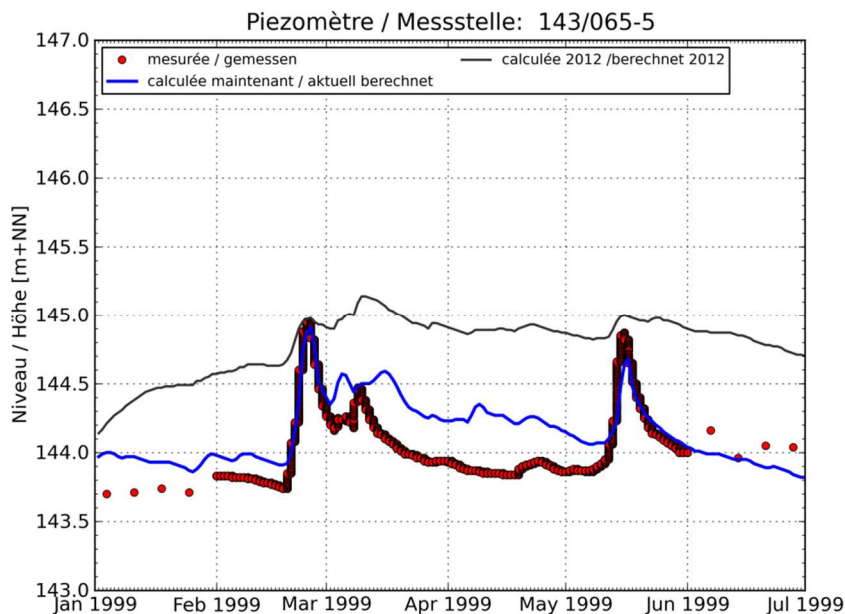


Figure 3 : Niveaux de nappe mesurés et calculés au voisinage du Rhin pendant la crue du premier semestre 1999 (trait noir : piézométrie calculée avec paramétrage initial LOGAR, ligne bleue : piézométrie calculée après étalonnage amélioré avec un pas de temps journalier).

2.4 Système programme LUBW MODFLOW/MT3DMS

Dans la mesure où le programme existant MODFLOW/MT3DMS du LUBW a été adapté pour des applications spéciales pour la vallée du Rhin supérieur, il convient de tenir compte, pour la reprise des données dans des modèles détaillés, que les packages suivants ne sont pas inclus dans le code standard.

ENT : Prélèvements différenciés en profondeur sur plusieurs unités hydrogéologiques, avec prise en compte des différences de transmissivité.

RAND : Apports de bordure en limites du Fossé

En outre, des modifications ou extensions ont été apportées à certains packages existants :

STR : Prise en compte de coefficients d'échange pour les infiltrations et les exfiltrations, séparation de la « conductance » (m^2/s) en longueur (m), largeur (m) et coefficient d'échange (1/s) par maille et prise en compte de la hauteur d'eau par section trapézoïdale dans l'équation de Strickler

RIV : prise en compte des coefficients d'échange pour l'infiltration et l'exfiltration et séparation de la « conductance » (m^2/s) en longueur (m), largeur (m) et coefficient d'échange (1/s) par maille « rivières ».

DIS : Définition de la date de départ et coordonnées géographiques du coin inférieur gauche de la modélisation.

HYD : la fonctionnalité HYDMOD a été nettement étendue pour l'édition de séries temporelles avec différents paramètres

Pour les packages supplémentaires et modifiés, il convient de se référer à la documentation de l'utilisateur du modèle LOGAR.

2.5 Etat de l'étalonnage et du paramétrage

Pour la réutilisation de données du modèle LOGAR ou l'évaluation de résultats de modélisation LOGAR, il faut tenir compte du fait que le paramétrage est issue d'un étalonnage à grande échelle, dans lequel la priorité a été mise sur la reproduction des écoulements à grande échelle. La répartition initiale de la perméabilité est issue également d'une évaluation hydrogéologique à grande échelle de la structure de perméabilité à l'ouest du Rhin, qui a été adaptée localement suite à l'étalonnage. Sur la rive gauche, les paramétrages ont été partiellement repris d'observations de modélisation existantes et modifiées dans le cadre de l'étalonnage à grande échelle. Cela signifie que les représentations à petite échelle ont toujours besoin d'un étalonnage local supplémentaire. L'objectif doit alors être que les structures données par le modèle à grande échelle soient autant que possible conservées et ne soient modifiées que dans les zones où leur ajustement s'avère insuffisant.

En particulier pour les coefficients d'échange des cours d'eau, il faut noter que ceux-ci ont été déterminés sommairement dans le cadre de l'étalonnage, soit localement, soit de façon homogène pour certains cours d'eau ou réseaux de cours d'eaux. Ici, des observations détaillées peuvent conduire à une adaptation ou un calage plus précis des coefficients d'échange. Il faut aussi noter que les coefficients d'échange dépendent d'une part du type de modèle utilisé et le cas échéant aussi de la discrétisation spatiale retenue.

La porosité efficace a de même été différenciée seulement de façon grossière. Il faut noter ici que des simulations en régime transitoire sont nécessaires pour la déterminer de façon plus détaillée. Dans les conditions d'écoulement à grande échelle et en régime permanent, seule la variabilité de la recharge a joué un rôle. L'influence des ondes de crues dans le Rhin n'a pas pu être utilisée dans cette

observation mensuelle afin de déterminer les effets de stockage de façon plus détaillée.

Pour les paramètres de transport évalués dans le cadre de l'étalonnage, il faut savoir qu'ils proviennent du transport à grande échelle des nitrates. Les hétérogénéités locales n'y ont joué qu'un rôle secondaire, c'est pourquoi des valeurs homogènes ont été retenues pour les porosités efficaces et les dispersivités. Pour les processus de transport locaux, les valeurs appliquées sont donc à vérifier à nouveau et à adapter à l'échelle de transport considérée.

2.6 Influence des crues du Rhin

Dans la mesure où le modèle existant est construit sur une base mensuelle, la reproduction des effets des ondes de crues dans le Rhin n'est en principe pas possible. Cela dit, à l'aide d'une résolution temporelle améliorée et d'un nouvel étalonnage, en particulier des coefficients d'échange du Rhin et des cours d'eau longeant le Rhin ainsi que des porosités efficaces (nappe libre), une adaptation du modèle pour la simulation des effets des crues peut être réalisée. Les niveaux d'eau du Rhin ont été simulés à l'aide d'un modèle unidimensionnel de calcul de la ligne d'eau du Rhin pour différentes conditions de débit. A partir de cette considération, les courbes niveau / débit ont été déterminées pour chaque maille de 100 m concernée le long du fleuve. Cette modélisation ne peut cependant décrire les conditions que de façon approximative puisque le pilotage des barrages peut en particulier conduire à des conditions hydrauliques différentes de celles qui avaient été admises dans le cadre de la simulation.

En cas de crue, le Rhin quitte son lit moyen, des surfaces inondées apparaissent. Celles-ci entraînent un échange supplémentaire avec la nappe phréatique. Ces surfaces inondées sont prises en compte de façon simplifiée dans la modélisation en ce sens que, perpendiculairement au Rhin, un coefficient d'échange leur est appliqué en fonction du niveau des eaux du Rhin.

2.7 Les eaux de surface

A côté du Rhin, le chevelu des cours d'eau dans la vallée du Rhin est pris en compte par l'intermédiaire de coefficients d'échange nappe/rivière. L'échange entre la nappe phréatique et le cours d'eau est décrit dans le modèle de base par une approche « streamflow ». La hauteur dans les cours d'eau est calculée avec l'équation de Strickler sur la base d'une hauteur normale de débit. Le débit des cours d'eau est déterminé de façon itérative par une approche de bilan pour chaque maille « cours d'eau » avec le modèle hydrodynamique. Cette approche présente cependant

l'avantage que les hauteurs d'eaux en régime transitoire dans les cours d'eaux sont déterminées par le modèle hydrodynamique. Les niveaux d'eau calculés dépendent cependant de la qualité des données disponibles. Comme à l'intérieur d'une maille, une hauteur d'écoulement normale est utilisée, le niveau d'eau dépend principalement de l'inclinaison du radier du cours d'eau. Pour la plus grande partie des cours d'eau, le fond du cours d'eau et donc son inclinaison dérive d'un modèle numérique de terrain avec l'hypothèse d'une profondeur de 1 à 2 m par rapport au terrain naturel. L'utilisation du modèle numérique de terrain peut amener à des inclinaisons du fond du cours d'eau comparativement plus faibles, qui avec l'hypothèse d'un écoulement normal conduisent à un niveau d'eau comparativement élevé, limité à son tour à la hauteur maximale du terrain naturel. Dans les zones où des données existent du côté allemand du fait d'études liées à la production de cartes de risques de crues, ces données ont été partiellement intégrées. Il est clair que des travaux supplémentaires sont ici nécessaires.

2.8 Utilisations en limites du modèle

Le modèle a été défini en limites du fossé de telle sorte que la zone présentant des gradients de hauteur piézométrique très abrupts et une altitude élevée de la base de l'aquifère ne se trouve pas dans la zone du modèle. Ceci était nécessaire pour des raisons numériques, dans la mesure où ces zones concernent des mailles du modèle essentiellement sèches, qui auraient conduit à des instabilités de la solution. Cela signifie que le modèle LOGAR n'intègre que la partie de l'aquifère quaternaire suffisamment remplie d'eau dans la vallée du Rhin supérieur. L'apport supplémentaire au-delà des limites du modèle a été pris en considération dans le modèle hydrodynamique à l'aide des bassins hydrographiques adjacents et de la recharge des nappes qui s'y trouvent. Dans la mesure où d'importantes quantités de substances issues des zones d'agriculture intensive situées dans la zone de piémont pénètrent dans les formations aquifères quaternaires de la vallée du Rhin supérieur à travers les limites du modèle, il faut tenir compte du fait que les interprétations aux limites de la zone d'emprise du modèle ne sont pas totalement fiables. De plus, c'est dans les zones de bordure du modèle que les niveaux piézométriques les plus élevés sont présents alors que la densité de données des points de mesure y est considérablement moindre. Cela signifie que dans ces zones, la qualité d'ajustement est moindre que dans la partie centrale de la vallée du Rhin.

2.9 Conditions dans la zone de prélèvements dans la nappe phréatique

Dans le modèle se trouvent de très nombreux points de prélèvement dans la nappe phréatique qui représentent une part significative du bilan global. Les données de prélèvement sont hétérogènes en termes de qualité des données et en particulier en

termes de résolution temporelle. Pour les prélèvements, le plus souvent, seuls les cumuls annuels sont disponibles. Seuls quelques points de captage destinés à l'AEP disposent de données mensuelles. Parfois on ne dispose que du cumul des prélèvements pour un champ captant. Dans ce cas, les prélèvements sont répartis sur les puits, dans la mesure où il n'existe pas de données par puits. La position des crépines des points de prélèvements ne sont pas toujours connues. Dans ces cas, l'hypothèse retenue était que les prélèvements étaient faits dans la partie supérieure de l'aquifère.

En dehors de l'hétérogénéité des données, il faut noter que la discrétisation horizontale est de 100m x100m. Ainsi les écoulements locaux et en particulier les abaissements de la nappe dans de petites zones de faibles prélèvements ne peuvent pas être reproduits par le modèle. De même, l'écoulement pour des puits proches l'un de l'autre ne peut pas être modélisé. Lorsque plusieurs points de prélèvement se trouvent dans une même maille du modèle, seule la somme des prélèvements sera prise en compte dans le calcul de l'écoulement (=prélèvement unique situé au centre de la maille). Cela signifie que les questions relatives à la qualité de l'eau ne peuvent être résolues que de façon globale pour les puits situés dans une même maille du modèle.

2.10 Problématiques de transport

A côté de la simulation de transport à grande échelle des nitrates et des produits phytosanitaires choisis, il est également possible d'utiliser le modèle LOGAR à d'autres matières contenues dans l'eau ou pour les températures de la nappe phréatique. Pour la reprise de paramètres issus de la simulation du transport de nitrates, il convient de tenir compte des facteurs suivants :

Dispersivité : dans la mesure où les apports de nitrates proviennent de surfaces agricoles étendues dans la vallée du Rhin supérieur, il n'y a pas de formation d'un front abrupt dans la distribution des nitrates. Il n'en est pas de même notamment pour les apports ponctuels de polluants. La dispersivité homogène utilisée pour la modélisation des nitrates, de 50 m dans le sens de l'écoulement et de 5 m dans le sens transversal à l'écoulement principal, est une valeur indicative grossière qui ne dérive pas de façon explicite de la modélisation des nitrates, dans la mesure où le coefficient de dispersion n'a qu'une influence faible sur le résultat de simulation pour la problématique des nitrates. Pour l'observation d'autres substances ou pollutions ponctuelles, la dispersivité doit être déterminée localement à l'aide d'un étalonnage ou par les résultats de tests de traceurs. Il faut noter que le modèle numérique contient aussi une dispersion numérique. Il faut donc vérifier, en fonction de la

discrétisation, quelle est la part de la dispersion numérique avec la simulation de transport.

Porosité : La porosité déterminée dans le domaine LOGAR se situe de façon homogène à 25%. Cette valeur est déterminée à l'aide d'une simulation à grande échelle des apports de Tritium issus des essais nucléaires de surface. Comme l'apport de Tritium est surfacique, chaque pourcentage d'espace libre dans la formation aquifère est recensé. On peut en déduire que c'est aussi le cas pour le transport de nitrates et de produits phytosanitaires. Dans le cas de pollutions locales, il se peut que ces substances soient transportées par des chemins d'écoulement préférentiels (preferential flow). Du point de vue de la technique de modélisation, cela peut être représenté en tenant compte d'une moindre porosité. Le test de traceurs dans la région de Karlsruhe a montré que le pourcentage de vides peut être nettement inférieur à 25%. La porosité serait alors déterminée comme inférieure à 10%. Il faut aussi en déduire que la porosité n'est pas répartie de façon homogène sur l'ensemble de la zone LOGAR. Pour les observations locales, il convient d'en tenir compte.

Dégradation et sorption : la dégradation et la sorption sont des paramètres spécifiques à la substance qui ne peuvent pas être déduits de la simulation des nitrates ou de la simulation de l'atrazine ou de la déséthylatrazine pour être appliqués à d'autres substances.

Dans la mesure où le modèle LOGAR a été développé dans le cadre d'observations à grande échelle de nitrates, il est intéressant d'actualiser le modèle par des connaissances plus approfondies, en particulier pour les problématiques locales. De ce fait, une actualisation régulière adaptée du modèle LOGAR est à prévoir, qui permettra également de mettre à jour les simulations relatives aux nitrates. Pour l'utilisation de données du modèle LOGAR pour des problématiques locales, il convient de veiller à ce qu'elles correspondent à l'état actualisé.

REFERENCES DOCUMENTAIRES

MONIT (2006): INTERREG III A-Projekt MoNit „Modélisation de la pollution des eaux souterraines par les nitrates dans la vallée du Rhin supérieur“, Karlsruhe, 2006.

LOGAR (2012): Liaison Opérationnelle pour la Gestion de l’Aquifère Rhénan. Programme Interreg IV Oberrhein. Région Alsace, Strasbourg, 2012.