LIAISON OPERATIONELLE POUR LA GESTION DE L'AQUIFERE RHENAN
LÄNDERÜBERGREIFENDE ORGANISATION FÜR GRUNDWASSERSCHUTZ AM RHEIN

# Rapport

## Modèle hydrodynamique LOGAR

## Actualisation des données nitrates pour 2000 et 2009 ainsi que de nouvelles simulations des nitrates à compter de 2015

**Netzwerkpartner:**

**Assoziierte Partner:**

INGENIEURGESELLSCHAFT PROF. KOBUS UND PARTNER GMBH

Heßbrühlstr. 21
70565 Stuttgart
Telefon (0711) 237 19 36 00
Telefax (0711) 237 19 36 01

# Modèle hydrodynamique LOGAR
# Actualisation des données nitrates pour 2000 et 2009 ainsi que de nouvelles simulations des nitrates à compter de 2015

| | |
|---|---|
| Auftraggeber: | Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz<br>Hertzstr. 173<br>D - 76187 Karlsruhe |
| Auftragsdatum: | 27.01.2016 |
| Auftragsnummer: | A603 |
| Berichtsnummer: | A603-1 |
| Bearbeitung: | Dr.-Ing. Ulrich Lang<br>Dipl.-Ing. Armin Durach M.Sc. |

Stuttgart, 29.04.2016

Dr. Ulrich Lang

Armin Durach

## SOMMAIRE

TABLE DES ILLUSTRATIONS ..... II
1 Introduction ..... 1
1.1 Objectifs ..... 1
1.2 Méthode ..... 1
2 Simulation du transport des nitrates jusqu‘en 2014 ..... 3
2.1 Paramétrage du modèle, conditions initiales et aux limites ..... 3
2.2 Résultats ..... 3
3 Scénarios de simulation de la pollution par les nitrates jusqu’en 2050 ..... 12
3.1 Présentation des scénarios ..... 12
3.2 Résultats ..... 13
4 Résumé ..... 22
BIBLIOGRAPHIE ..... 24

## TABLE DES ILLUSTRATIONS

Figure 2.1: Evolution de la masse de nitrates stockée dans l'aquifère ..... 3

Figure 2.2: Répartition des teneurs en nitrates calculées pour 2009 (profondeur de nappe 0 – 40 m)..... 5

Figure 2.3: Comparaison des teneurs en nitrates calculées pour l'année 2009 (profondeur de nappe 0 – 40 m): simulation 2012 – simulation actualisée ..... 6

Figure 2.4: Carte des teneurs en nitrates obtenue par interpolation des valeurs mesurées (profondeur de nappe 0 – 40 m) pour l'année 2009 (inventaire 2009) ..... 7

Figure 2.5: Comparaison entre les résultats de la simulation et de l'inventaire pour l'année 2009. Classe de concentration inventaire - simulation ..... 8

Figure 2.6: Répartition calculée des teneurs en nitrates pour l'année 2014 ((profondeur de nappe 0 – 40 m)..... 9

Figure 2.7: Variation des surfaces de dépassement de seuil des teneurs en nitrates de 10 mg/l, 25 mg/l et 50 mg/l ..... 10

Figure 2.8: Evolution de la concentration moyenne en nitrates dans la nappe à une profondeur de 0-40 m. ..... 11

Figure 3.1: chronogramme de la masse de nitrates stockée dans la nappe pour les différents scénarios ..... 14

Figure 3.2: Scénario 0: Lessivage de nitrates en 2009 avec CIPAN (moutarde, conditions moyennes) : répartition calculée des teneurs en nitrates en 2050 (zone de profondeur 0 – 40 m) ..... 15

Figure 3.3: Scénario 1: Fertilisation réduite pour le maïs grain : Répartition calculée des teneurs en nitrates en 2050 (zone de profondeur 0 – 40 m) ..... 16

Figure 3.4: Scénario 2: CIPAN moutarde en conditions optimales : Répartition calculée des teneurs en nitrates en 2050 (zone de profondeur 0 – 40 m)..... 17

Figure 3.5: Scénario 3: sans CIPAN : Répartition calculée des teneurs en nitrates en 2050 (zone de profondeur 0 – 40 m) ..... 18

Figure 3.6: Répartition calculée des teneurs en nitrates en 2050 (zone de profondeur 0 – 40 m)) Scénario 2 (gauche) et Scénario 3 (droite). Les écarts révèlent la potentialité maximale des CIPAM sur la base des assolements en 2009 ..... 19

Figure 3.7: Evolution des surfaces de dépassement des teneurs en nitrates de 10 mg/l pour les différents scénarios. ..... 20

Figure 3.8: Evolution des surfaces de dépassement des teneurs en nitrates de 25 mg/l pour les différents scénarios. ..... 21

Figure 3.9: Evolution des surfaces de dépassement des teneurs en nitrates de 50 mg/l pour les différents scénarios. ..... 21

# 1 Introduction

## *1.1 Objectifs*

Dans le cadre du projet INTERREG IV LOGAR – Liaison Opérationnelle pour la Gestion de l'Aquifère Rhénan, les eaux de la nappe phréatique transfrontalière du Rhin Supérieur ont été analysées et des mesures pour le maintien et l'amélioration de la qualité des eaux souterraines ont été identifiées. Les nitrates constituent un facteur important pour évaluer la qualité des eaux souterraines en raison de leur utilisation passée et actuelle, parfois intensive sur les nombreuses surfaces agricoles du fossé rhénan.

La pollution des eaux souterraines par les nitrates a déjà été examinée activement dans le cadre du projet MoNit - Modélisation de la pollution des eaux souterraines par les Nitrates dans le Rhin supérieur. Le projet LOGAR a permis de faire une première mise à jour des résultats de MoNit à partir de 2012 mais également de s'intéresser à la pollution des eaux souterraines par les produits phytosanitaires.

En raison d'une meilleure compréhension de phénomène de lessivage des nitrates, le LTZ a pu fournir de nouvelles répartitions des quantités de nitrates qui ont migré vers la nappe au cours des années 2000 et 2009. Ces deux nouvelles distributions ont permis de reproduire les volumes annuels de nitrates lessivés et ensuite à mettre à jour le modèle de transport sur la période ultérieure à1991.

De nouveaux scenarii de lessivage des nitrates seront simulés pour la période de 2015 à 2050 à l'aide du modèle de transport de nitrates. Ces modélisations permettront d'évaluer les impacts prévisibles de mesures de gestion des eaux sur les concentrations en nitrates dans les eaux souterraines.

## *1.2 Méthode*

Le modèle numérique hydrodynamique et de transport des eaux souterraines entre Bâle et Karlsruhe issu de MoNit et LOGAR est présenté dans LUBW [2006] et Région Alsace [2012].

La période entre 1950 et fin de 2014 a été choisie pour la mise à jour de la simulation de transport du nitrate. Il a été admis que la pollution anthropique des eaux souterraines par les nitrates était négligeable avant 1950 et que par conséquent des conditions de régime permanent ont prévalu jusqu'en 1950. Les concentrations initiales pour 1950 ont été déterminées dans le cadre d'une simulation préalable avec un apport permanent de nitrates au niveau de 1950. La modélisation en régime transitoire a démarré sur cette base et s'est poursuivie jusqu'en 2014.

Du fait que le modèle de transport des nitrates considère uniquement la zone saturée

de l'aquifère, les temps de transfert à travers la zone non saturée doit également être prise en compte. Cela conduit à un retard de l'entrée des nitrates dans la nappe. Ce retard a été évalué pour chaque maille en fonction de l'épaisseur de la zone non saturée, de la recharge des nappes par précipitation et en tenant compte du matériau constitutif de la zone non saturée (sable ou lœss → teneurs en eau variables). On a supposé que la teneur en eau du sable est de 5 % et estimé celle des couches modérément perméables comme le lœss à 20 % [RICHERT, J. 2004].

Le modèle de bilan STOFFBILANZ [LOGAR 2016] a permis de déterminer dans le cadre de LOGAR le lessivage des nitrates du sol pour les années 1980, 1990, 2000 et 2009. Les années 2000 et 2009 ont été réactualisées entre temps. Les nouvelles données mettent en évidence des modifications des taux de lessivage des nitrates vers la nappe notamment dans le secteur de la Hardt au Sud de l'Alsace. Elles sont documentées dans LTZ & ARAA [2016]. Les valeurs retenues pour les périodes de 10 années intermédiaires entre les années inventoriées citées plus haut ont été estimées par interpolation temporelle linéaire à compter de l'année en tenant compte des temps de transfert dans la zone non saturée.

# 2 Simulation du transport des nitrates jusqu‘en 2014

## *2.1 Paramétrage du modèle, conditions initiales et aux limites*

Le transport des nitrates jusqu’en 2014 a fait l’objet d’une nouvelle simulation en considérant les données de lessivage actualisées pour 2000 et 2009. Une interpolation linéaire entre la répartition initiale en 1990 et les nouvelles distributions pour 2000 et 2009 a permis d’estimer les valeurs annuelles du lessivage sur toute la période. Les années postérieures à 2009 se voient attribuer les valeurs de 2009. La prise en charge par le modèle de transport tient compte des temps de transfert dans la zone non saturée d’une durée moyenne de 2 ans avec une variabilité sur la zone d’emprise du modèle comprise entre 0 et 30 ans.

Le paramétrage, les conditions initiales et toutes les autres conditions aux limites sont demeurés inchangés et ont été documentés par la Région Alsace [2012].

## *2.2 Résultats*

Le transport des nitrates dans la nappe phréatique du Rhin supérieur entre 1950 et 2014 a été simulé sur la base du modèle hydrodynamique calé et des données actualisées du lessivage. La figure 2.1 montre l’évolution de la masse de nitrates contenue dans l’aquifère lors de la période considérée et par rapport au calcul initial.

La masse de nitrates stockée dans l’aquifère est quasiment inchangée par rapport au calcul de l’année 2012. La simulation actualisée présente une masse globale légèrement supérieure dans l’aquifère.

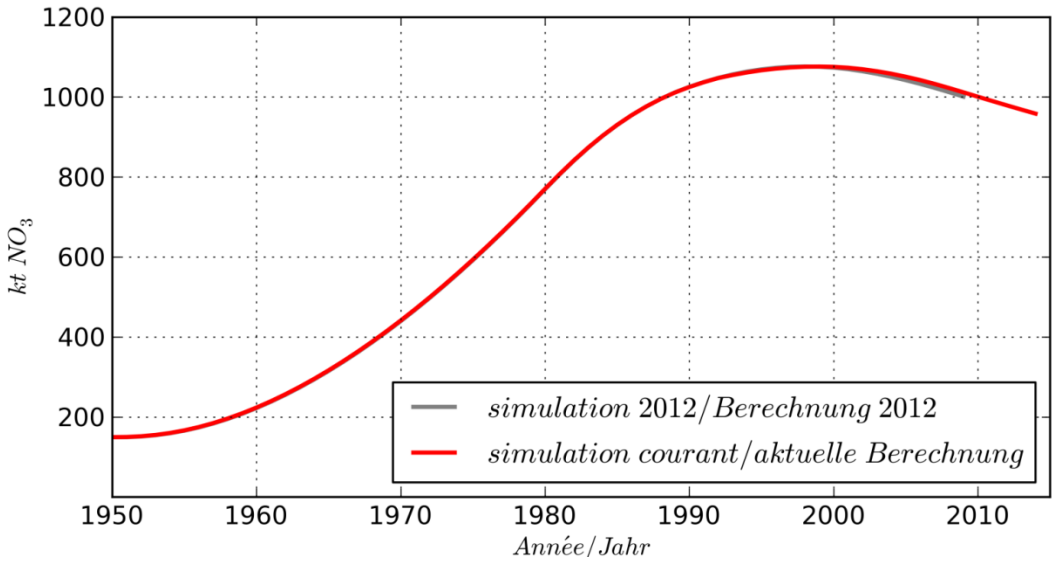


*Figure 2.1: Evolution de la masse de nitrates stockée dans l‘aquifère*

La figure 2.2 montre la répartition des concentrations de nitrates calculées pour 2009. Il s'agit des teneurs calculées pour des profondeurs de 0-40 m. La répartition des concentrations est très proche de la variante calculé en 2012. Les différences entre les deux simulations ont été calculées afin de préciser le décalage entre les résultats. Les différences sont présentées dans la figure 2.3 . Lorsque le calcul actuel fait état de concentrations plus élevées que dans le cas de la variante de 2012, les zones concernées sont en rouge et en orange ; dans la cas de concentration plus faibles dans le calcul actuel, elles sont affichées en bleu. Des dissemblances liées aux nouvelles valeurs du lessivage apparaissent principalement dans le sud de l'Alsace.

La carte de la concentration en nitrates issue des données de l'inventaire est présentée en figure 2.4. La comparaison avec la répartition calculée démontre, que les structures dégagées par le modèle sont cohérentes avec la mesure, ce qui avait d'ailleurs déjà été le cas avec la variante de 2012.

La comparaison directe entre les résultats de l'inventaire (fig. 2.4) et le résultat de la simulation (fig. 2.2) est illustrée par la figure 2.5. Y sont représentées les différences entre les deux jeux de données. La figure met en lumière, si la classe de concentration en nitrates calculée correspond à la classe issue de la mesure et dans le cas contraire, indique le nombre de classes d'ecart entre les deux répartitions. La classification correspond aux classes de concentrations adoptées lors de la représentation des teneurs en nitrates (cf. fig. 2.2 et fig. 2.4). Cette comparaison montre qu'il n'y a aucun écart sur une grande partie de la zone d'emprise du modèle (44 % de la superficie du modèle) ou au plus une classe d'écart (90 % de la superficie totale, zone grisée). Ces valeurs n'ont pas changé par rapport au calcul de 2012.

La figure 2.6 montre la répartition calculée de la concentration en nitrates pour l'année 2014. Les concentrations calculées sont en baisse par rapport au calcul pour l'année 2009. Les zones avec des teneurs supérieures à 25 mg/l sont plus petites, les secteurs avec des concentrations inférieures à 10 mg/l s'étendent.

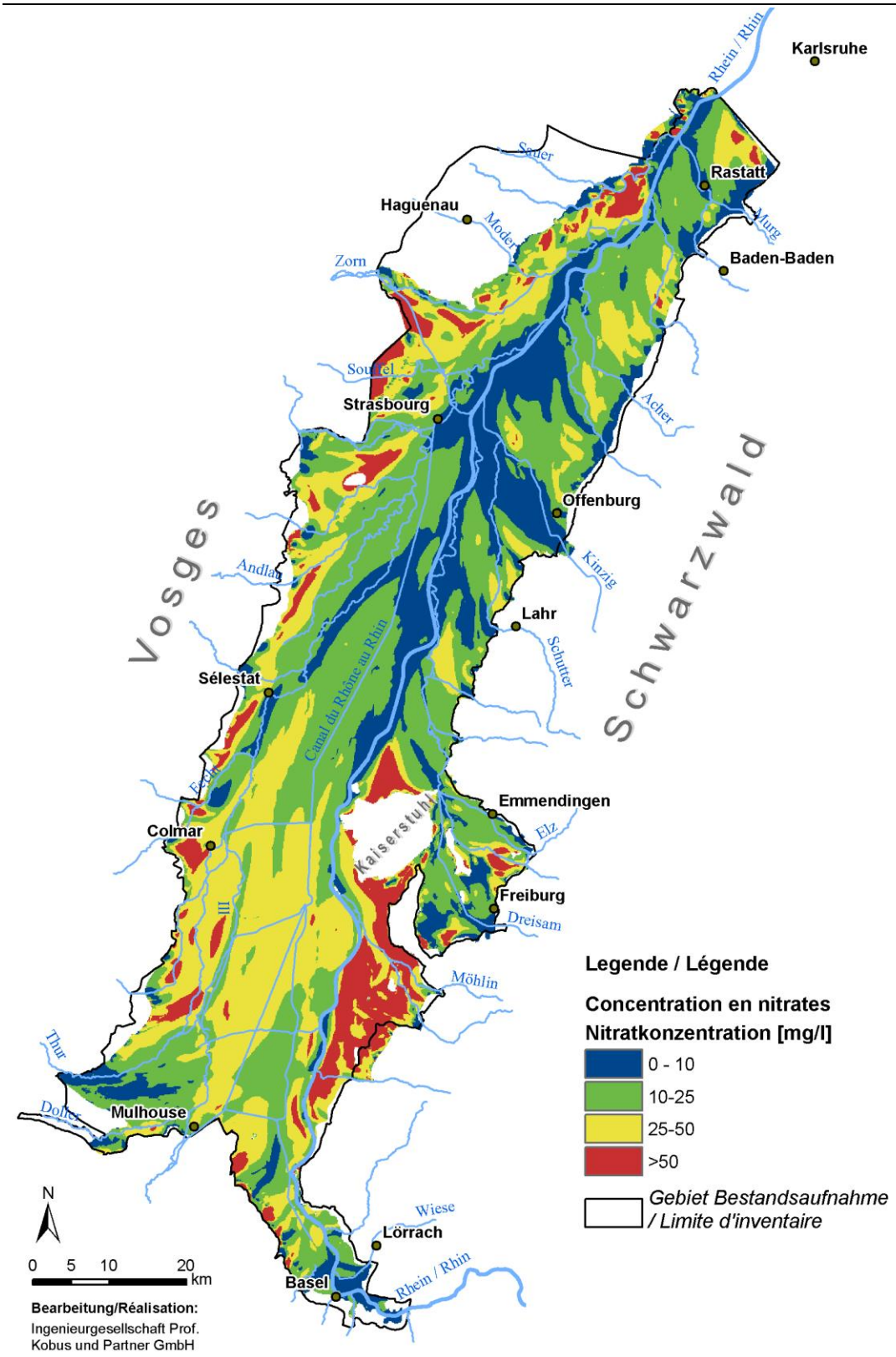


*Figure 2.2: Répartition des teneurs en nitrates calculées pour 2009 (profondeur de nappe 0 – 40 m)*

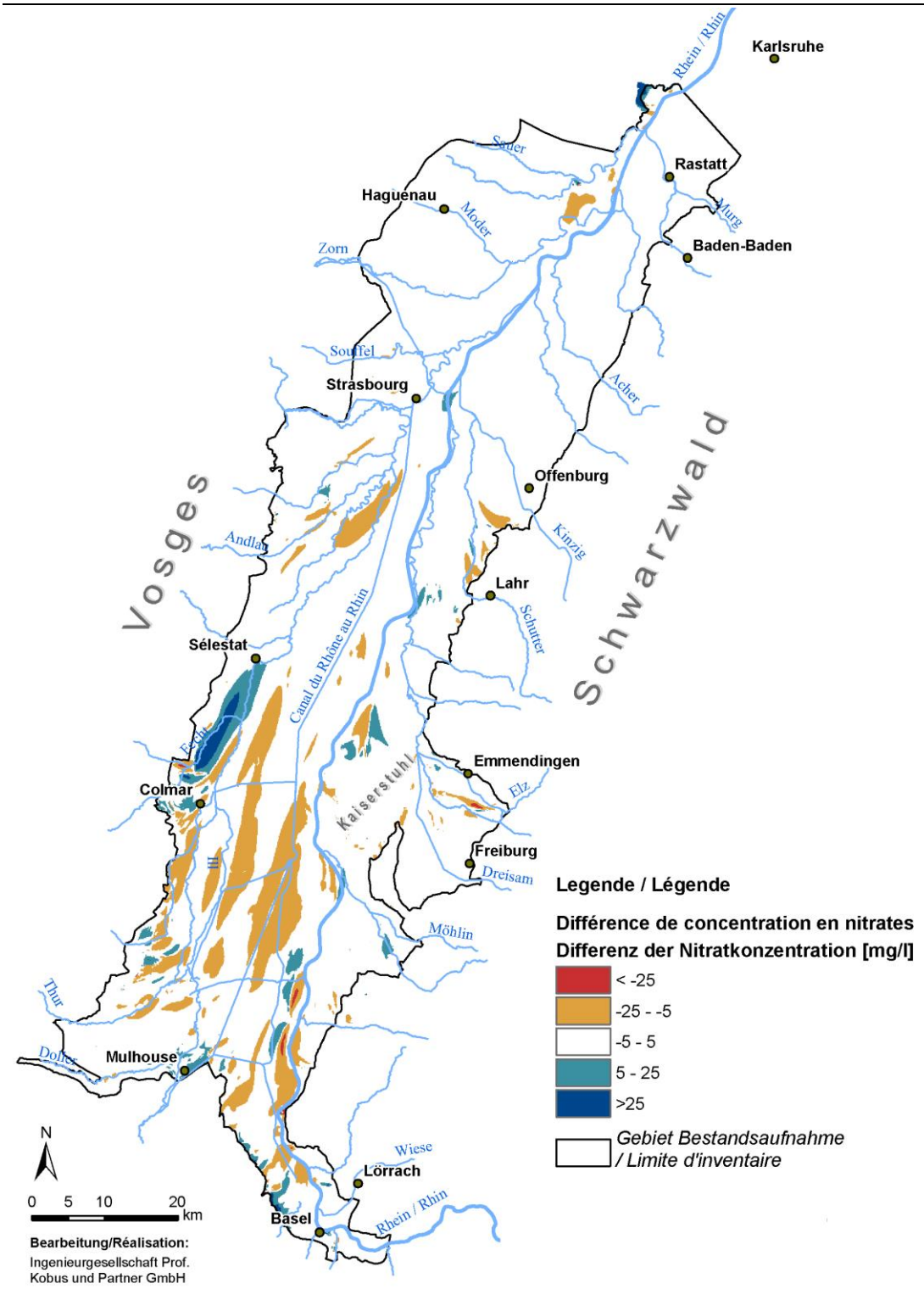


*Figure 2.3: Comparaison des teneurs en nitrates calculées pour l'année 2009 (profondeur de nappe 0 – 40 m): simulation 2012 – simulation actualisée*

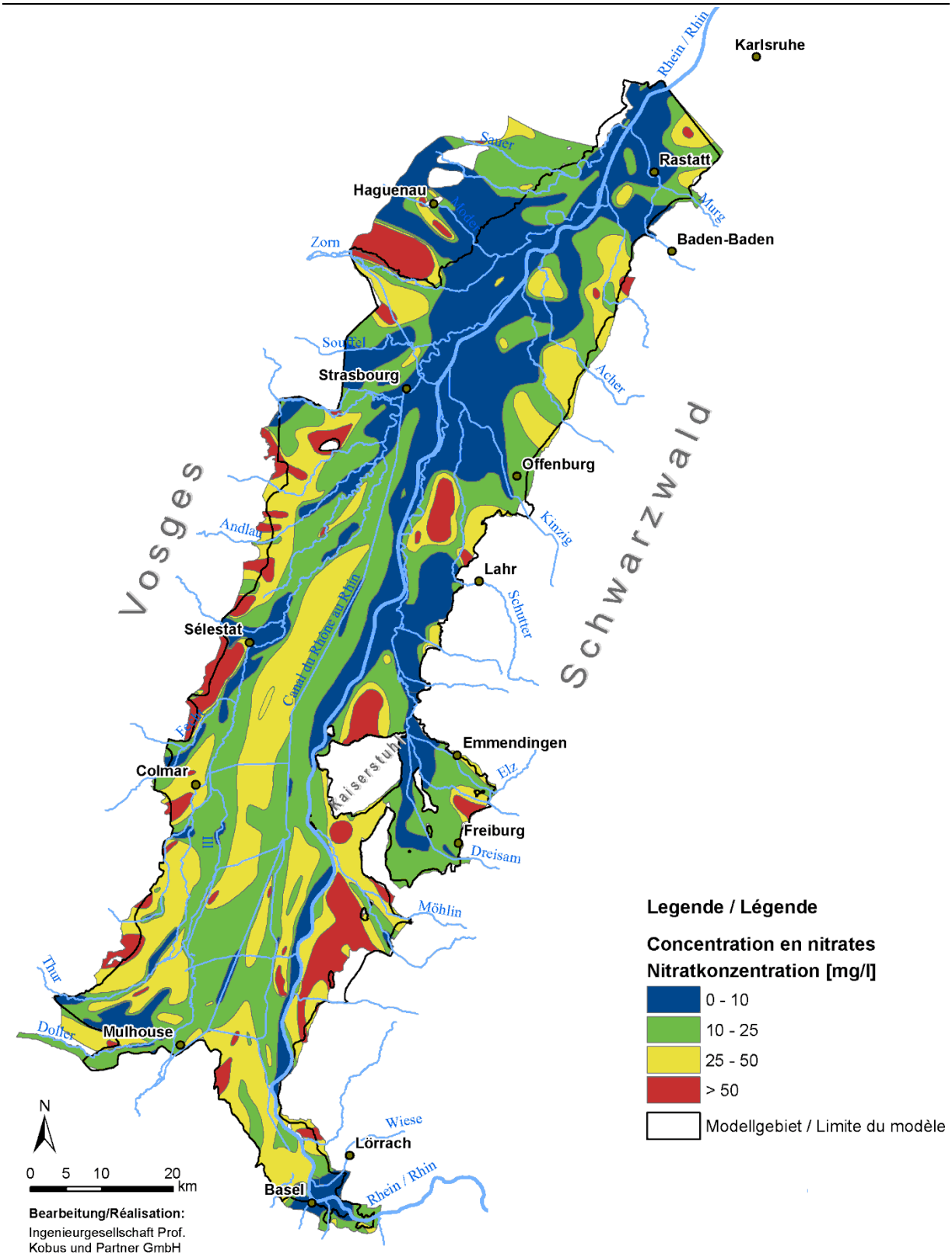


*Figure 2.4: Carte des teneurs en nitrates obtenue par interpolation des valeurs mesurées (profondeur de nappe 0 – 40 m) pour l'année 2009 (inventaire 2009)*

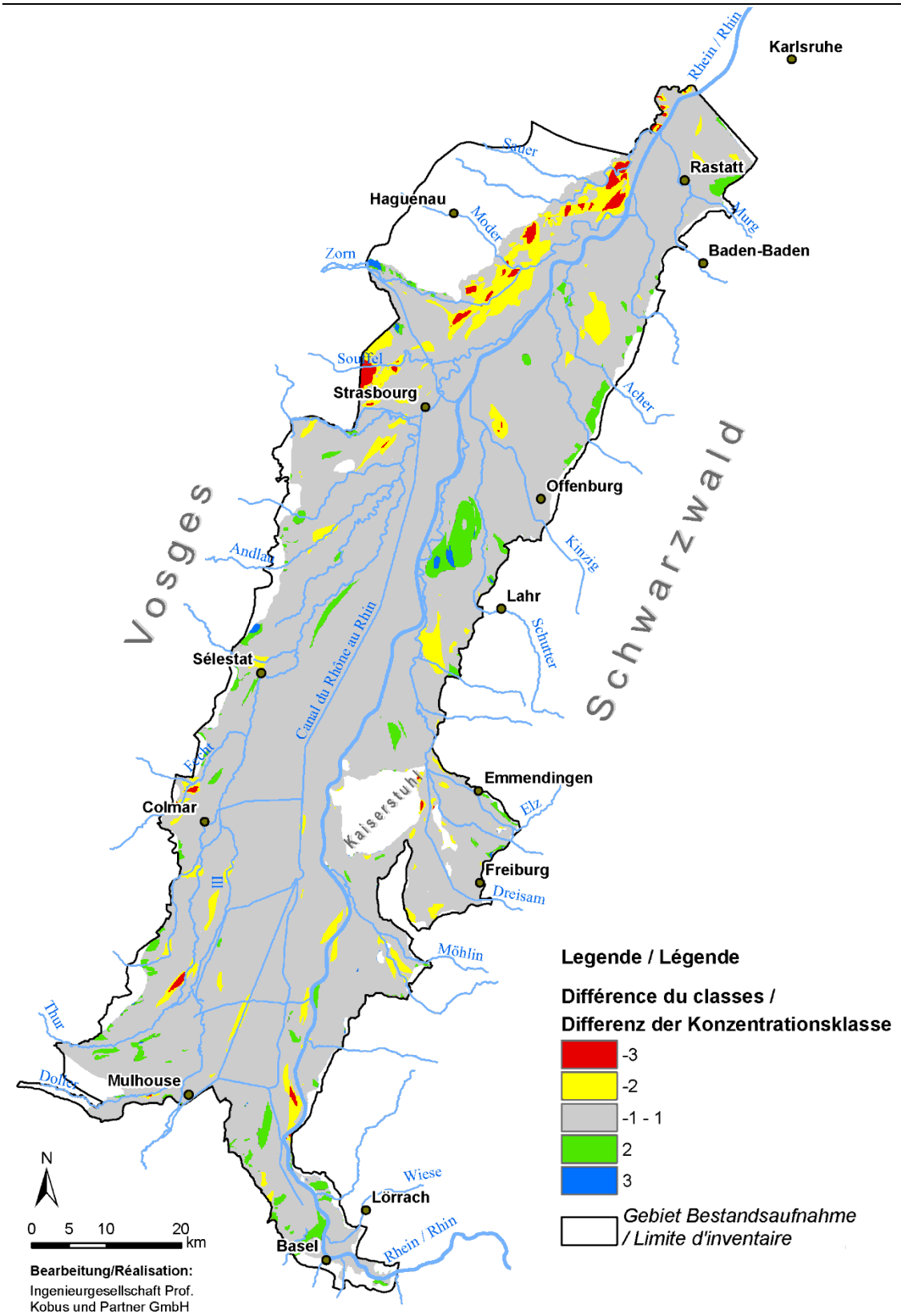


*Figure 2.5: Comparaison entre les résultats de la simulation et de l'inventaire pour l'année 2009. Classe de concentration inventaire - simulation*

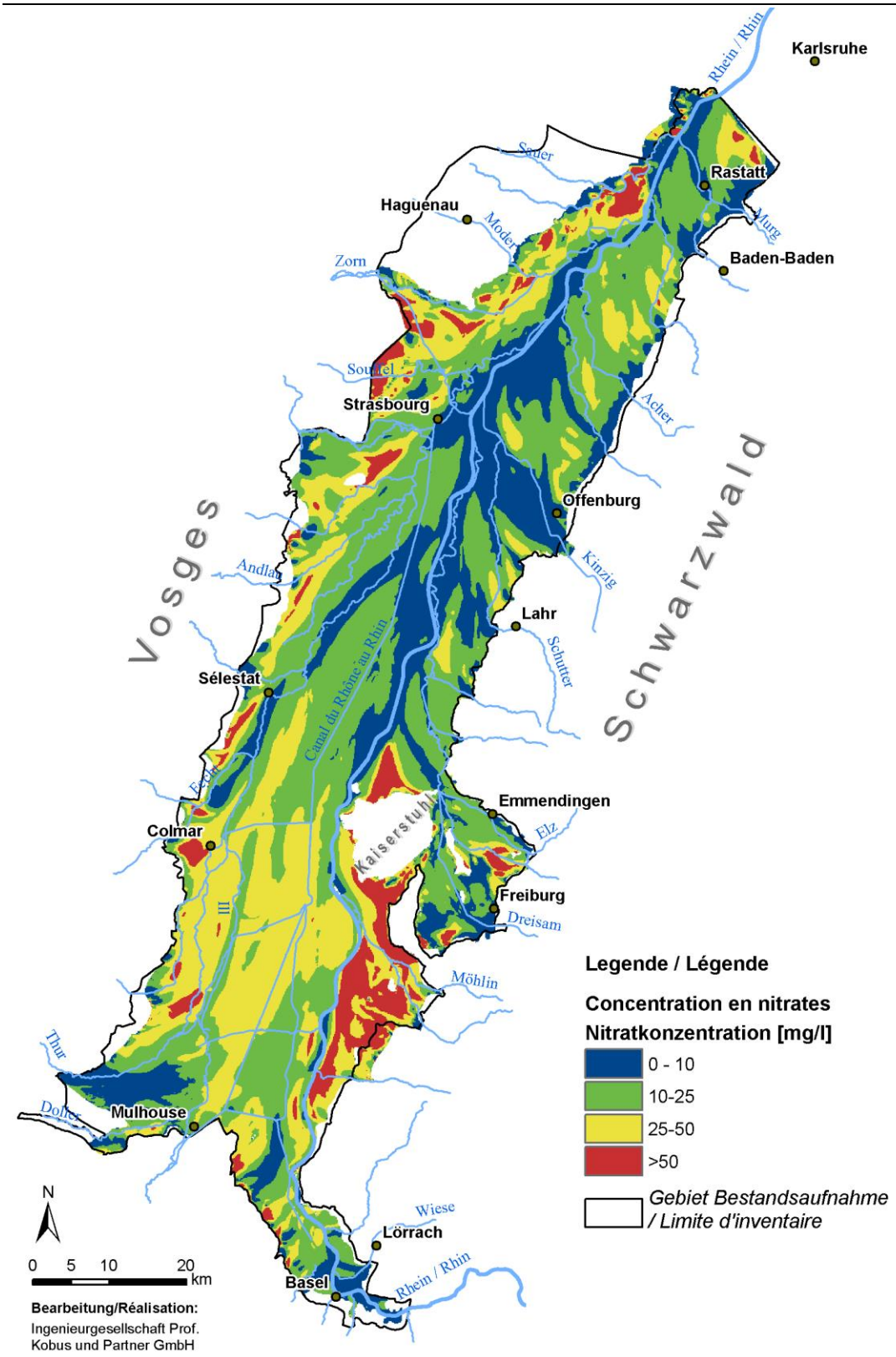


*Figure 2.6: Répartition calculée des teneurs en nitrates pour l'année 2014 ((profondeur de nappe 0 – 40 m)*

La variation des concentrations en nitrates est illustrée par la figure 2.7. L'évolution de la taille des zones au sein du périmètre du modèle avec des concentrations supérieures à 10, 25 ou 50 mg/l a été représentée. Les résultats diffèrent considérablement des calculs de l'année 2012. Toutes les classes ont en commun une emprise maximale dans les années 1990 avec depuis lors une diminution continue des surfaces de dépassement de seuil.

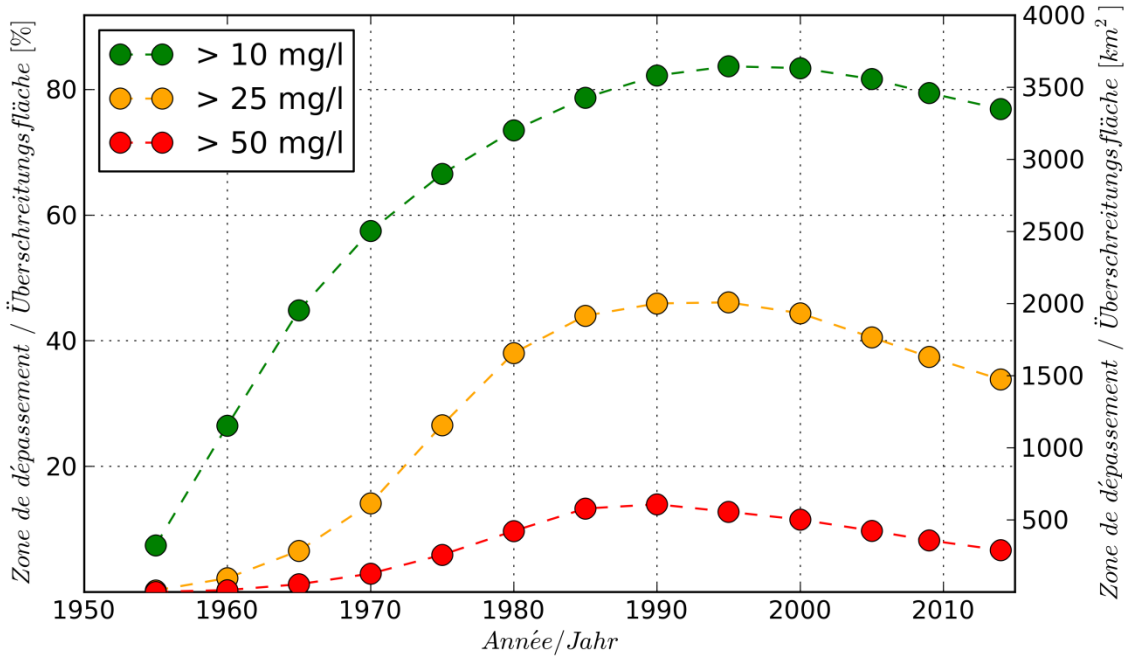


*Figure 2.7: Variation des surfaces de dépassement de seuil des teneurs en nitrates de 10 mg/l, 25 mg/l et 50 mg/l*

Pour vérifier la qualité d'ajustement du modèle des eaux souterraines, l'évolution des concentrations moyennes calculées dans la zone de profondeur de la nappe de 0-40 m a été déterminée puis comparée avec les valeurs moyennes mesurées issues des inventaires 1997, 2003 et 2009 (voir figure 2.8). L'amélioration observée de l'ajustement avec l'inventaire 2009 est nette par rapport aux simulations réalisées en 2012. Après actualisation, la concentration moyenne calculée correspond quasiment à la mesure.

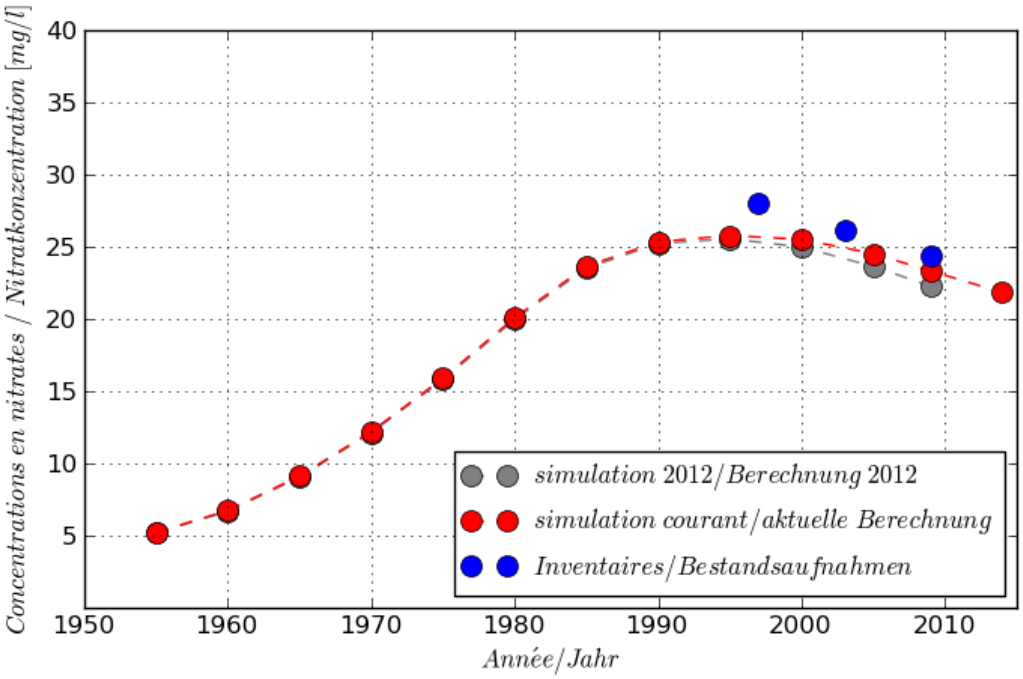


*Figure 2.8: Evolution de la concentration moyenne en nitrates dans la nappe à une profondeur de 0-40 m.*

# 3 Scénarios de simulation de la pollution par les nitrates jusqu'en 2050

## *3.1 Présentation des scénarios*

Le Comité de pilotage transfrontalier a décidé de simuler l'évolution des teneurs en nitrates jusqu'en 2050 après application de mesures dans le domaine de la fertilisation et des cultures intermédiaires (CIPAN). Le modèle STOFFBILANZ a été utilisé pour la simulation régionale des teneurs en nitrates dans les cas de figure suivants :

- Réduction de 20% de la fertilisation du maïs grain avec prise en compte des diminutions de rendements

Implantation de cultures intermédiaires après la culture de céréales, de pommes de terre et de maïs ensilage avec les variantes suivantes :

- CIPAN moutarde implantée dans des conditions de développement défavorables
- CIPAN moutarde implantée dans des conditions optimales
- Semences de CIPAN mélangées avec légumineuses (bon développement)
- Semences de CIPAN mélangées sans légumineuses (bon développement)
- Sans CIPAN

Les conditions du développement optimal sont réunies dans le cas d'un ensemencement précoce de la CIPAN ainsi que de conditions météorologiques favorables à la fixation d'azote. L'enfouissement tardif des résidus de CIPAN au printemps permet par ailleurs de minimiser les risques de lessivage.

Les simulations avec STOFFBILANZ ont mis en évidences des écarts assez faibles entre les 4 variantes de CIPAN. Seule la variante la plus efficace, CIPAN moutarde dans des conditions optimales (Best case) a été mis en œuvre dans le cadre de la modélisation hydrodynamique. La variante sans CIPAN (Worst case) a servi de comparaison. Les différences mettent en évidence la contribution maximale envisageable des CIPAN dans le fossé rhénan (sur la base des assolements en 2009) dans des conditions optimales (scénarios 2 et 3). Le scénario 0 prend en compte la CIPAN moutarde en développement moyen. Le modèle STOFFBILANZ a permis de mettre en évidence, que la CIPAN moutarde implantée dans des conditions optimales (scénario 2) permettait de piéger davantage d'azote que dans des conditions de développement moyennes (scénario 0) ; le lessivage d'azote est réduit de 2,9 kg N/ha sur la partie française et de 2,6 kg N/ha sur la partie allemande.

Les scénarios suivants d'évolution des teneurs en nitrates dans la nappe ont été retenus :
Scénario 0: stabilisation des apports en nitrates au niveau de 2009
Scénario 1: réduction de 20% des parcelles cultivées en maïs grain
Scénario 2: Best case (= CIPAN moutarde en conditions optimales)
Scénario 3: Worst case (= pas de CIPAN)

### *3.2 Résultats*

Le modèle STOFFBILANZ a permis de déterminer le transfert de nitrates du sol pour chaque scénario. Les quantités minimales sur toute la zone d'emprise du modèle ont été calculées dans le cadre du scénario 1, les scénarios 0, 2 et 3 présentent des situations comparables même si le scénario 3 affiche les volumes de nitrates les plus importants ; la raison en est que la mise en culture des CIPAN (moutarde en développement moyen) était déjà pratiquée en 2009.
La répartition des teneurs en nitrates calculée pour la fin de 2014 est utilisée pour tous les scénarios comme concentration initiale. A partir de l'année 2015 et pour tous les scénarios, les transferts de nitrates du sol vers la nappe sont simulés par le modèle STOFFBILANZ sur toute la période.

**Evolution de la masse de nitrates**
La Figure 3.1 illustre l'évolution de la masse de nitrates contenue dans la nappe pour les quatre scénarios. On peut observer une diminution de la masse de nitrates dans la nappe à partir d'une quantité initiale de 950 kt en 2014. Dans le cas des scénarios 0 et 2, la tendance amorcée dès 2005 se confirme, les écarts entre les développements moyen et optimal de la moutarde sont faibles. En ce qui concerne le scénario 3, la tendance baissière aurait plutôt tendance à faiblir et met en évidence les effets des CIPAN (types de cultures et surface cultivée en 2009) sur la réduction des concentrations en nitrates d'ores et déjà visibles par comparaison au scénario 0. Le scénario 1 (fertilisation réduite pour le maïs grain) apporte toutefois des améliorations plus importantes. Seule une modification des assolements permettra d'élargir les potentialités d'utilisation des CIPAN.

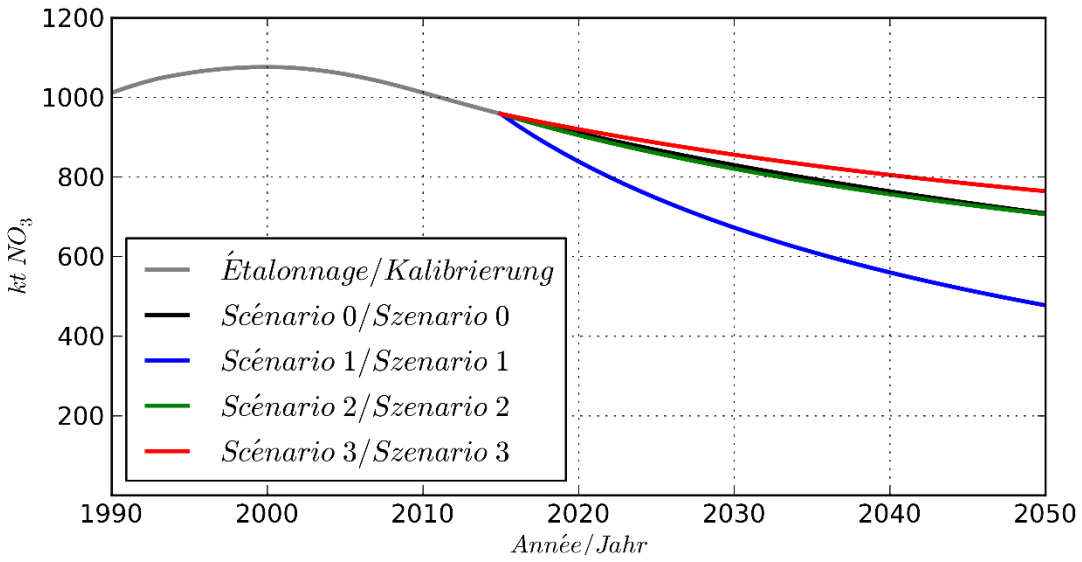


*Figure 3.1: chronogramme de la masse de nitrates stockée dans la nappe pour les différents scénarios*

**Répartition spatiale de la pollution par les nitrates**

La répartition des teneurs en nitrates calculées dans la zone de profondeur 0 – 40 m pour 2015 pour les trois scénarios est représentée en 2. Dans le cas du scénario 1 de diminution de la fertilisation du maïs grain, les concentrations passent sous le seuil des 10 mg/l dans une grande partie Nord du domaine d'étude. Les valeurs dépassant les 50 mg/l restent très localisées.

Les secteurs présentant des concentrations supérieures à 25 ou à 50 mg/l sont en net diminution dans les scénarios 0, 2 et 3. Les zones étendues avec des concentrations dépassant le seuil des 25 mg/l se situeraient en 2050 au Nord de Strasbourg et au Sud du Kaiserstuhl.

La différence entre les scénarios 0, 2 et 3 est relativement minime à l'échelle de la zone d'étude.Figure 3.6 établit une comparaison directe entre les scénarios 2 (Best Case - CIPAN moutarde optimal) et 3 (Worst Case - sans CIPAN). Les écarts sont visibles dans la partie Sud de la zone d'emprise du modèle au Markgräflerland et dans le secteur de la Hardt. Dans le cas du Markgräflerland, les zones présentant des teneurs en nitrates supérieures à 50 mg/l sont très inférieures dans la variante Best Case que dans la variante Worst Case ; en d'autres termes la mise en culture des CIPAN conduira à une diminution notable de la pollution par les nitrates principalement dans ces secteurs fortement contaminés.

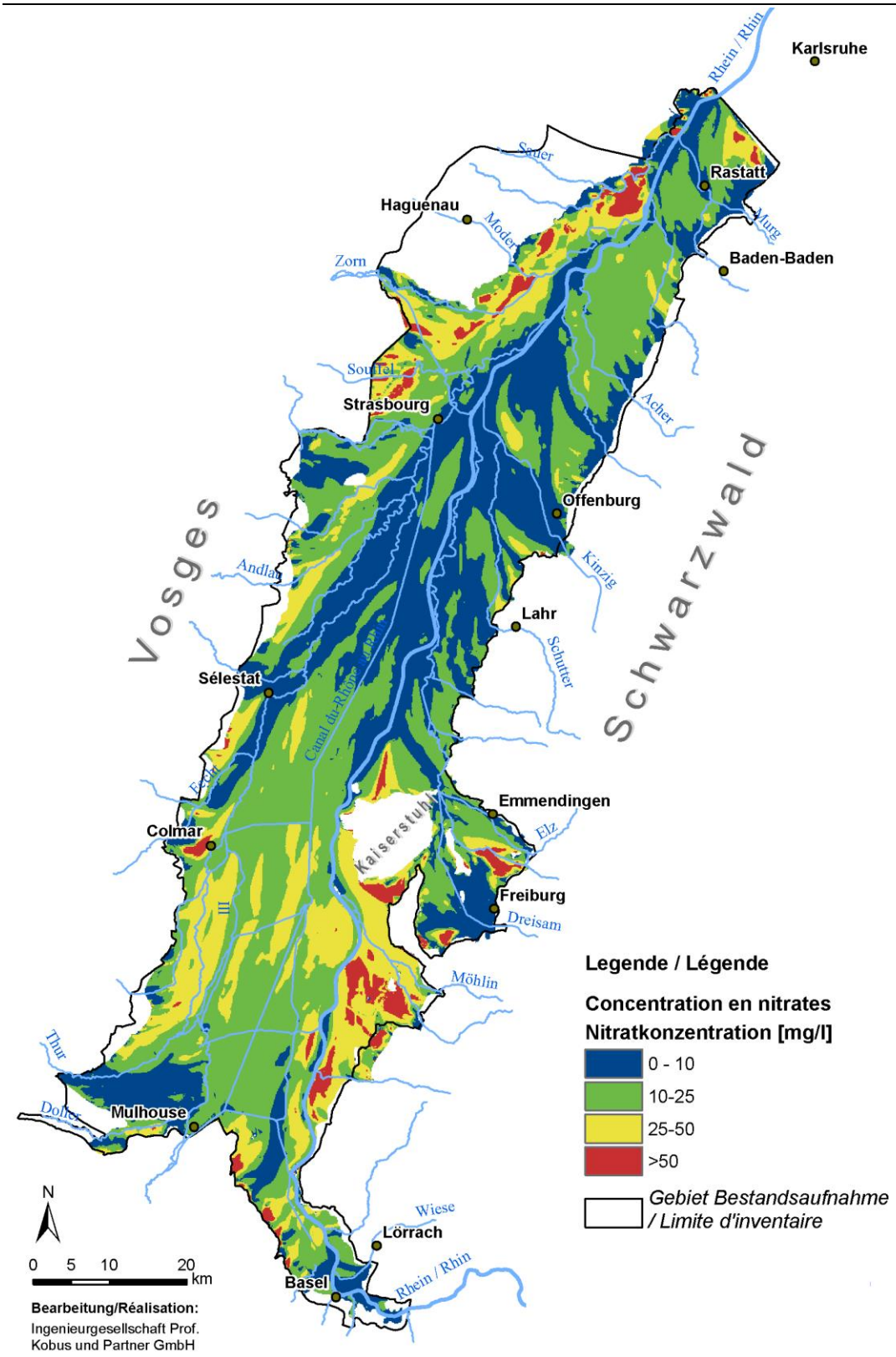


*Figure 3.2: Scénario 0: Lessivage de nitrates en 2009 avec CIPAN (moutarde, conditions moyennes) : répartition calculée des teneurs en nitrates en 2050 (zone de profondeur 0 – 40 m)*

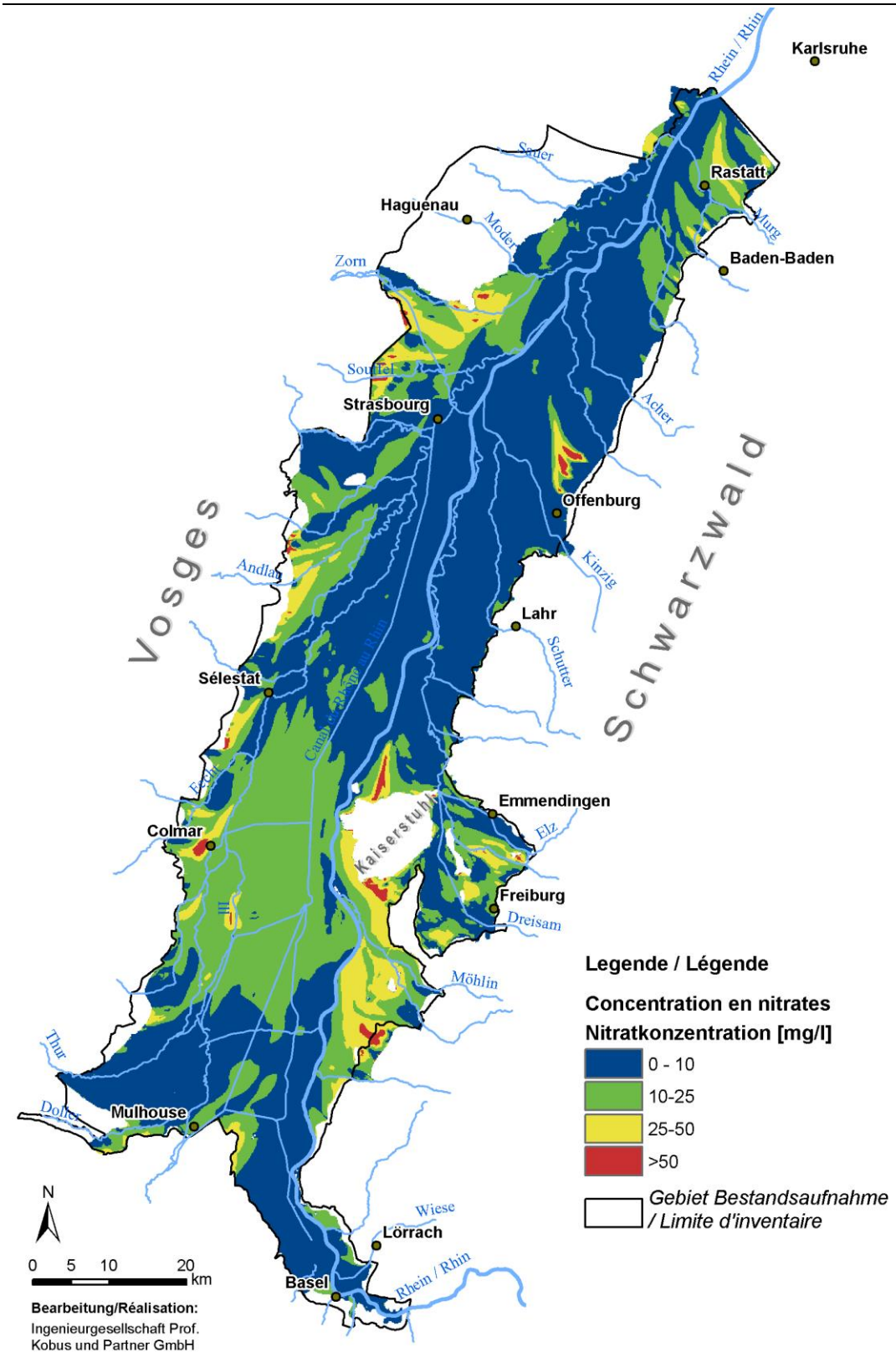


*Figure 3.3: Scénario 1: Fertilisation réduite pour le maïs grain : Répartition calculée des teneurs en nitrates en 2050 (zone de profondeur 0 – 40 m)*

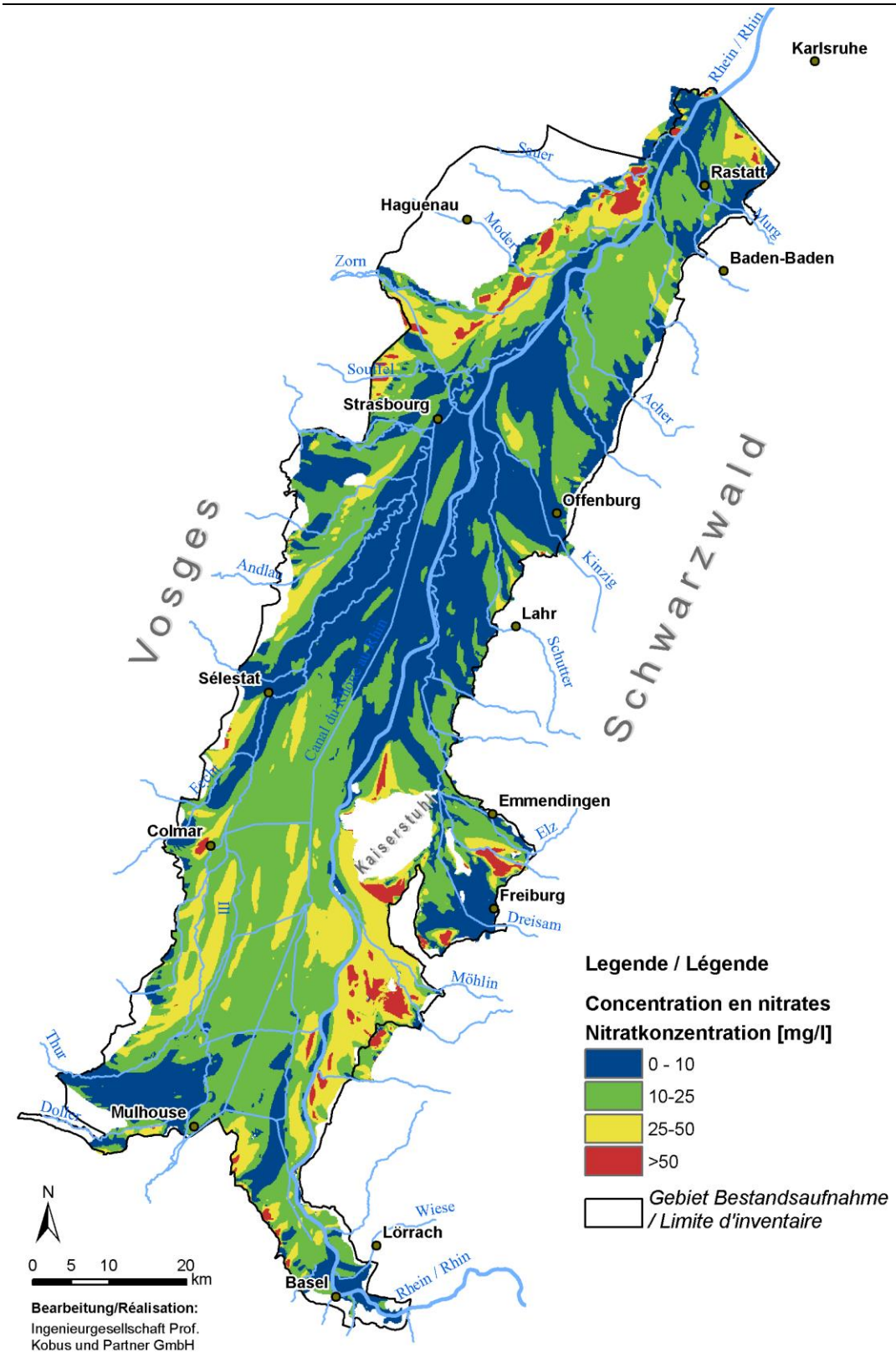


*Figure 3.4: Scénario 2: CIPAN moutarde en conditions optimales : Répartition calculée des teneurs en nitrates en 2050 (zone de profondeur 0 – 40 m)*

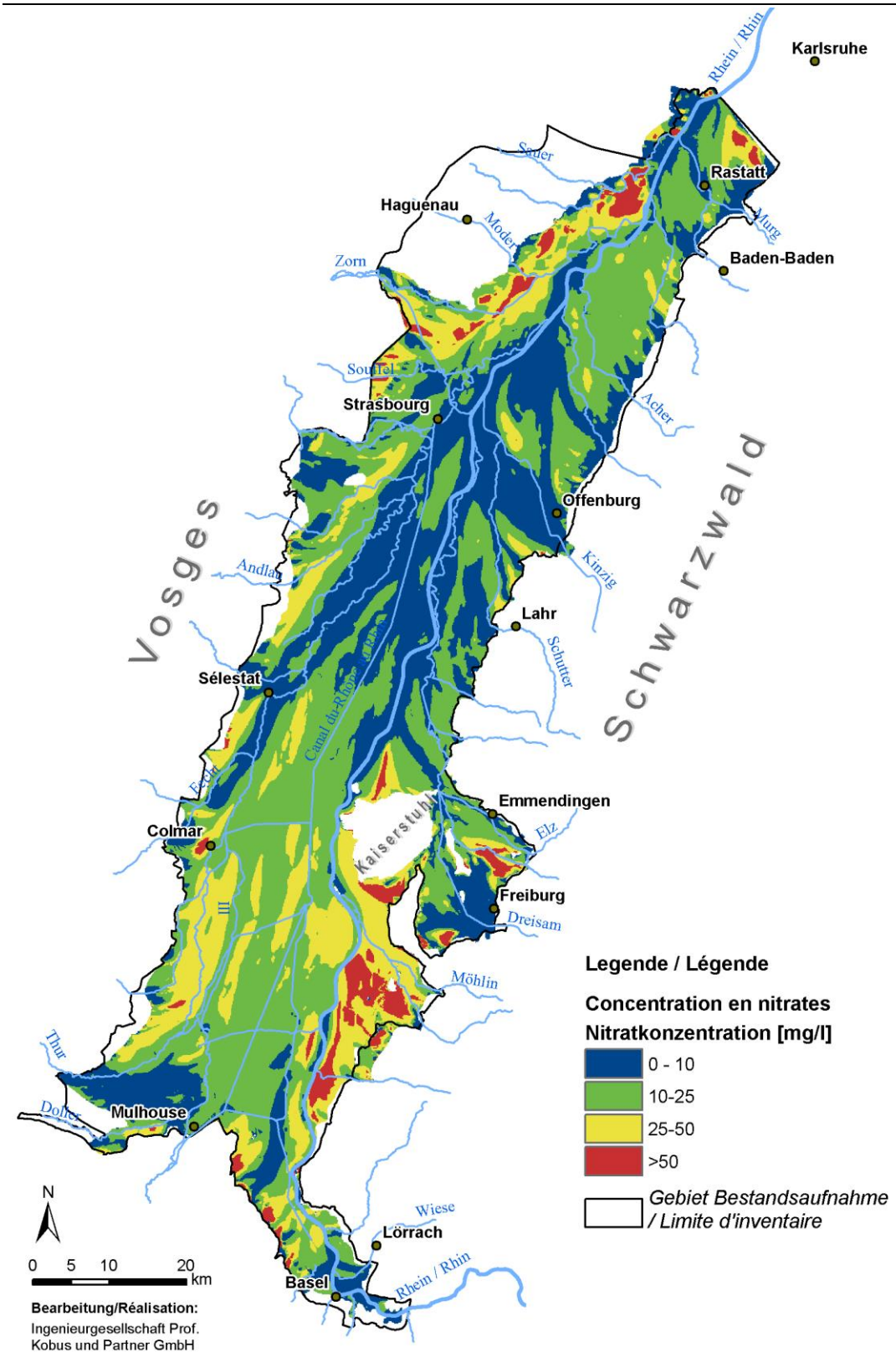


*Figure 3.5: Scénario 3: sans CIPAN : Répartition calculée des teneurs en nitrates en 2050 (zone de profondeur 0 – 40 m)*

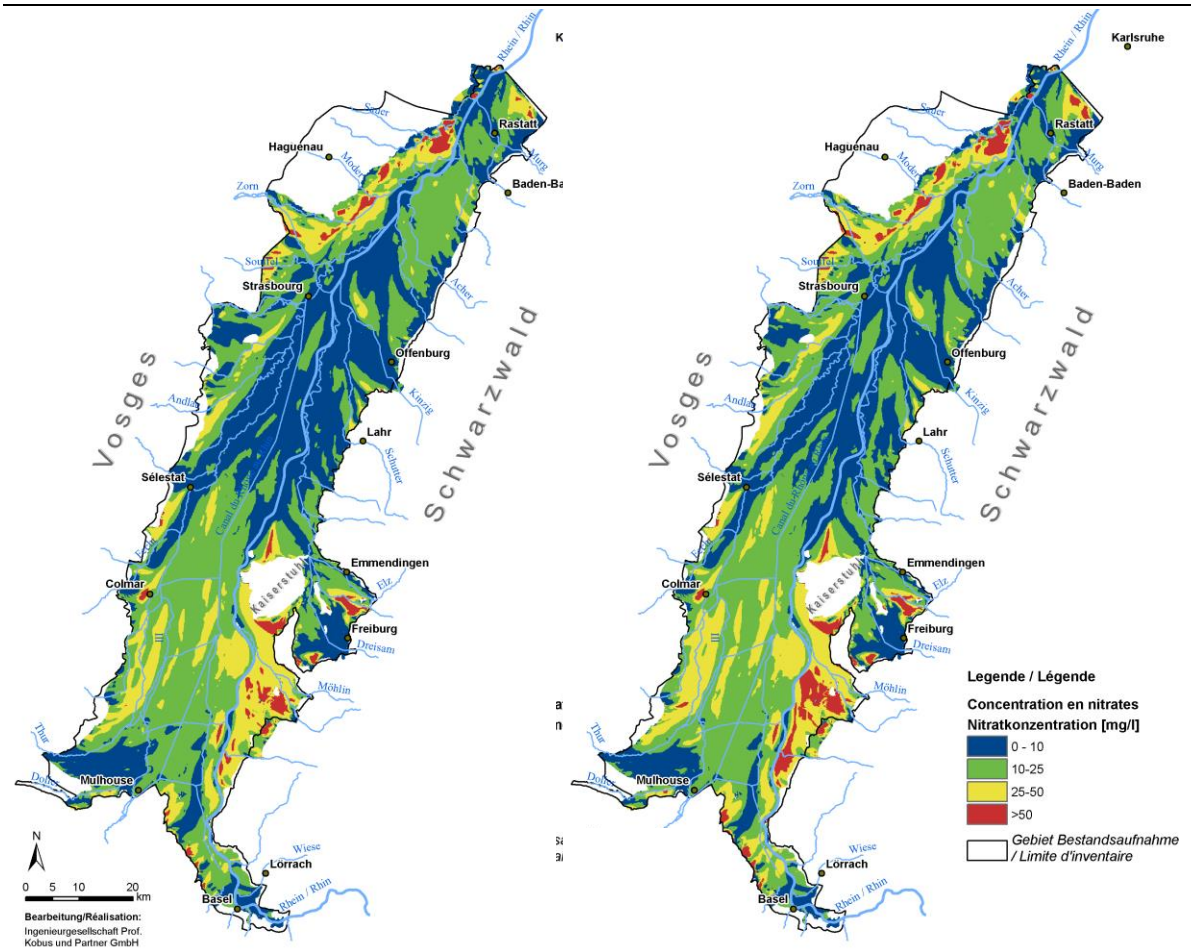


*Figure 3.6: Répartition calculée des teneurs en nitrates en 2050 (zone de profondeur 0 – 40 m)) Scénario 2 (gauche) et Scénario 3 (droite). Les écarts révèlent la potentialité maximale des CIPAM sur la base des assolements en 2009*

**Evolutions des surfaces avec des teneurs élevées**

Les zones présentant des concentrations supérieures à 10, 25 et 50 mg/l à l'horizon 2050 sont représentées dans les Figure 3.7 à Figure 3.9. Il a été renoncé à représenter les résultats du scénario 0 dont les résultats se situent entre ceux des scénarios 2 et 3 pour des raisons de clarté.

Dans le cas du scénario 1, la taille des secteurs avec des teneurs dépassant 10 mg/l diminue de moitié, celle des secteurs dépassant 25 mg/l est réduite de deux tiers et des secteurs supérieurs à 50 mg/l de cinq sixièmes.

Les scénarios 2 et 3 mettent en évidence une diminution comparable mais assez faible des zones de dépassement des 10 mg/l. Les effets sont beaucoup plus marqués dans les secteurs avec des concentrations supérieures à 25 mg/l et surtout 50 mg/l. La Figure 3.9 illustre l'efficacité de la mise en culture des CIPAN dans les secteurs fortement dégradés. Dans ce cas de figure, les surfaces de dépassement observées dans la variante Best Case sont 1½ fois inférieurs à celles de la variante Worst Case « sans CIPAN ».

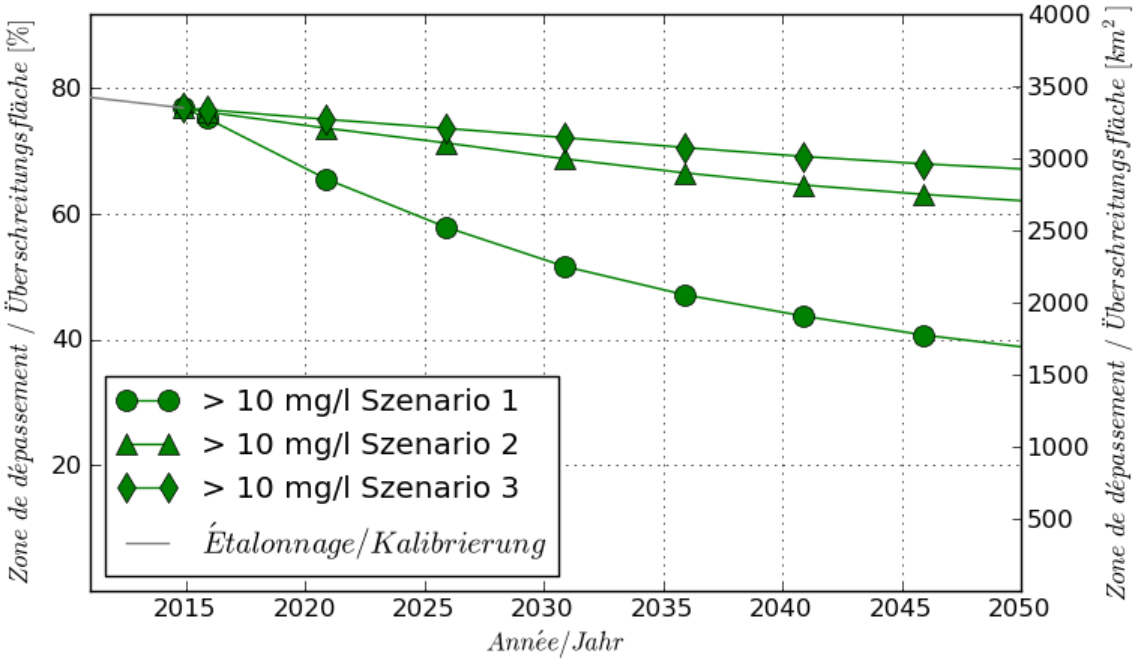


*Figure 3.7: Evolution des surfaces de dépassement des teneurs en nitrates de 10 mg/l pour les différents scénarios.*

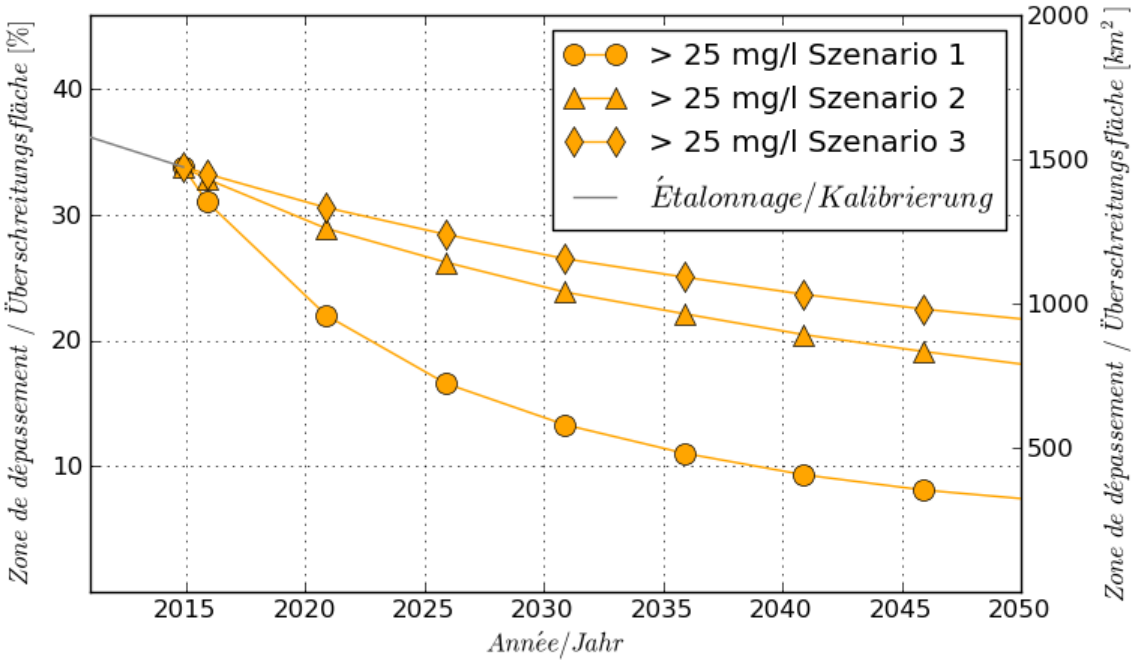

*Figure 3.8: Evolution des surfaces de dépassement des teneurs en nitrates de 25 mg/l pour les différents scénarios.*

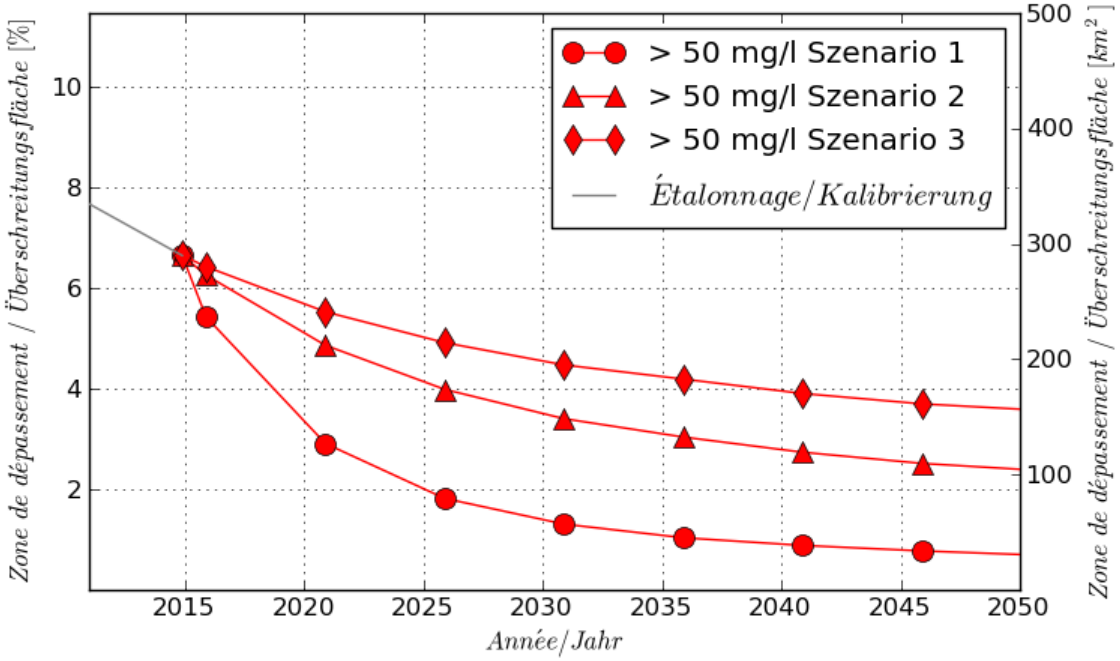


*Figure 3.9: Evolution des surfaces de dépassement des teneurs en nitrates de 50 mg/l pour les différents scénarios.*

# 4 Résumé

Le modèle hydrodynamique de transport LOGAR a permis de réaliser une simulation actualisée du transport des nitrates. Le transport des nitrates a été simulé sur la période de 1950 à 2014 sur la base des transferts de nitrates actualisés pour les années 2000 et 2009.

La répartition des teneurs en nitrates calculée en 2014 a constitué le point de départ de 4 scénarios. Ces 4 scénarios se distinguent uniquement par les différents transferts de nitrates appliqués à compter de 2015.

Ont été simulées pour les différents scénarios les répartitions des teneurs ne nitrates à l'horizon 2050 ainsi que l'évolution des surfaces concernées par des dépassements de concentrations en nitrates de respectivement 10, 25 et 50 mg/l. Les diminutions de la surface des zones concernées sont relativement nettes, principalement en ce qui concerne les secteurs les plus dégradés.

Le scénario de « Réduction de la fertilisation du maïs grain » s'avère plus efficace pour réduire le lessivage des nitrates que la mise en culture de CIPAN. Cette situation est liée au fait que les assolements actuels (situation 2009) limitent les possibilités d'implantation des CIPAN. Seule une modification des assolements avec une augmentation de la part des céréales permettra d'élargir les potentialités d'utilisation des CIPAN. Les mesures réglementaires dans le cadre du greening ainsi que des mesures agro-environnementales volontaires (par ex. FAKT au Bade-Wurtemberg) devraient à terme aboutir à une augmentation des CIPAN

La mise en culture de CIPAN « actuelle » (types de cultures et CIPAN en 2009) a permis de réduire efficacement le lessivage des nitrates dans la nappe phréatique – comme le confirme la comparaison entre les scénarios 0 et 3 « sans CIPAN ». Les CIPAN sont particulièrement efficaces pour résorber la pollution par les nitrates dans les eaux souterraines dans la région du Markgräfler Land.

L'optimisation des CIPAN (scénario 2 – moutarde en conditions optimales) apporte des améliorations plutôt modérées. C'est la raison pour laquelle les autres simulations effectuées avec STOFFBILANZ pour des variantes des CIPANS « avec des mélanges de semences ou avec des légumineuses » devraient avoir des effets limités sur l'évolution de la pollution de la nappe par les nitrates – pour la configuration « actuelle » des assolements.

Une nouvelle version actualisée d'un modèle hydrodynamique de transport qui permettra de mieux appréhender la problématique des nitrates dans la nappe phréatique rhénane entre Bâle et Karlsruhe est désormais disponible. Des

interprétations et des évaluations plus précises ainsi que de nouveaux scénarios peuvent être mis en œuvre.

**BIBLIOGRAPHIE**

INTERREG II (2000): Inventaire de la qualité des eaux souterraines dans le fossé du Rhin supérieur. Région Alsace, Strasbourg

INTERREG II (2002): Grenzüberschreitende Erkundung des tiefen rheinnahen Grundwasserleiters zwischen Fessenheim und Breisach. Endbericht, Regierungspräsidium Freiburg.

INTERREG III A (2008): Werkzeug zur grenzüberschreitenden Bewertung und Prognose der Grundwasserbelastung mit Chlorid zwischen Fessenheim und Burkheim, Endbericht, Regierungspräsidium Freiburg

LOGAR (2016): Modell STOFFBILANZ (mit Anpassungen an den Bedarf des LOGAR*-Netzwerks). Simulation der Nitratauswaschung ausgehend von der Stickstoffbilanz.

LUBW (LANDESANSTALT FÜR UMWELT, MESSUNGEN UND NATURSCHUTZ BADEN-WÜRTTEMBERG) (2006): MoNit: Grundwasserströmung und Nitrattransport. INTERREG III A-Projekt MoNit "Modellierung der Grundwasserbelastung durch Nitrat im Oberrheingraben", Karlsruhe, 182 Seiten

LUBW (LANDESANSTALT FÜR UMWELT, MESSUNGEN UND NATURSCHUTZ BADEN-WÜRTTEMBERG) (2006): MoNit: Hydrogeologischer Bau und hydraulische Eigenschaften. INTERREG III A-Projekt MoNit "Modellierung der Grundwasserbelastung durch Nitrat im Oberrheingraben", Karlsruhe, 160 Seiten

LUBW (LANDESANSTALT FÜR UMWELT, MESSUNGEN UND NATURSCHUTZ BADEN-WÜRTTEMBERG) (2006): MoNit: Prognosen zur Entwicklung der Nitratbelastung. INTERREG III A-Projekt MoNit "Modellierung der Grundwasserbelastung durch Nitrat im Oberrheingraben", Karlsruhe, 152 Seiten

LTZ&ARAA (2016): Dokumentation der Berechnungen mit STOFFBILANZ von November 2015 bis Januar 2016: calcul actualisé pour les situations dans les années 2000 et 2009. Scénarios de réduction de la fertilisation et d'implantation de CIPAN.

MCDONALD, M.G., HARBAUGH, A.W. (1988): A modular three- dimensional finite difference ground-water flow model. U.S. Geological Survey Techniques of Water-Resources Investigations, book 6, chap. A1, 586 p

Région Alsace (2012). Rapport final; Liaison Opérationnelle pour la Gestion de l'Aquifère Rhénan (LOGAR). Projet INTERREG-IV LOGAR, Strasbourg.

RICHERT, J (2004): Détermination des vitesses de transfert de l'eau, des nitrates et d'autres solutés dans la zone non saturée dans un loess profond. Rap. Chambre d'Agriculture du Bas Rhin, 85p, 77 ill.

USGS Ground-Water Software, MODFLOW-2005 Version 1.8, Three-dimensional finite-difference ground-water model--2005 version

STARR, R.C., GILLHAM, R. W. (1993): Denitrification and organic carbon availability in two aquifers, Ground Water 31(6), 934-947.

ZENG Z., WANG P.P. (1999): MT3DMS: A Modular Three-Dimensional Multispecies Transport Model for Simulation of Advection, Dispersion, and Chemical Reactions of Contaminants in Groundwater Systems; Documentation and User's Guide. University of Alabama, US Army Corps of Engineers, Engineer Research and Development Center, Contract Report SERDP-99-1.