

# Contamination nitrique des masses d'eau souterraines.

C. Viavattene, J.M. Monget, E. Ledoux, P. Viennot

Centre d'Informatique Géologique, Ecole des Mines de Paris, UMR 7619 Sisyphe

35 rue St Honoré 77305 Fontainebleau cedex

[pascal.viennot@ensmp.fr](mailto:pascal.viennot@ensmp.fr) , [emmanuel.ledoux@ensmp.fr](mailto:emmanuel.ledoux@ensmp.fr) , [christophe.viavattene@ensmp.fr](mailto:christophe.viavattene@ensmp.fr) ,  
[jean-marie.monget@ensmp.fr](mailto:jean-marie.monget@ensmp.fr)

Contamination nitrique des masses d'eau souterraines.....	1
1. Présentation générale.....	1
2. Annexe .....	1

## 1. Présentation générale

Partant des travaux précédents effectués en 2003 et en vue d'améliorer la simulation de la qualité des eaux souterraines, les informations acquises dans le cadre du PIREN-SEINE sur les pratiques culturales ont été étendues à l'ensemble du bassin pour simuler non seulement l'évolution des flux nitriques mais également la concentration de nitrates à l'horizon 2015 dans les trois nappes de l'Oligocène, de l'Eocène et de la craie. Les flux moyens sous-racinaires ont été calculés sur la base de la séquence météorologique 1970/1990 et les pratiques agricoles moyennes regroupées en 12 zones telles qu'elles ont été observées sur la période 1990/2000.

La simulation STICS-MODCOU résultante a été calée sur une étude rétrospective portant 30 ans de mesure des concentrations en nitrates (1970-2000) pour les trois nappes étudiées (données ONQES-SISE EAUX). La méthode utilisée fait appel aux outils statistiques et permet de rechercher, pour chaque aquifère, le meilleur rythme de charge des intrants capable de fidèlement reproduire au niveau de ces concentrations simulées l'accroissement de la médiane des concentrations en nitrate tel qu'il est constaté pour la population des forages AEP dans le fichier ONQES-SISE EAUX.

Sur la base de ces données, une évaluation de l'incertitude des résultats prédictifs a été menée par l'établissement d'une statistique des erreurs d'estimation. Cette dernière est utilisée pour évaluer la probabilité de franchissement des seuils 25 mg/l, 40mg/l, 50 mg/l et 100 mg/l à l'horizon 2015 pour chaque maille du modèle MODCOU.

Les résultats obtenus permettent de répondre à la demande de la Directive-Cadre sur l'Eau quant à l'estimation du risque de non-atteinte du bon état qualitatif des masses d'eau en 2015. Par ailleurs, le modèle permet d'estimer le temps nécessaire à la stabilisation des concentrations en nitrates et les concentrations stabilisés par masses d'eau et par aquifères. Un test d'influence de réduction des apports en nitrates a aussi été réalisé en réduisant de 20 % les intrants en 2005. Enfin les probabilités de franchissement des seuils 25 mg/l, 40 mg/l, 50 mg/l et 100 mg/l à l'horizon 2015 ont été évalués au niveau de chaque maille du modèle MODCOU et pour chaque masse d'eau.

## 2. Annexe

L'ensemble de ces méthodes et résultats est consultable dans le document suivant : Modélisation du fonctionnement hydrogéologique du bassin de la Seine : Renseignement des Masses d'eau de la DCE / Flux nitriques et concentrations en nitrates dans les nappes Simulation à l'horizon 2015.



Centre d'Informatique Géologique



# Modélisation du fonctionnement hydrogéologique du bassin de la Seine

-oOo-

## Renseignement des masses d'eau de la DCE

/

## Flux nitriques et concentrations en nitrates dans les nappes

## Simulation à l'horizon 2015

-oOo-

P. Goblet ( [patrick.goblet@ensmp.fr](mailto:patrick.goblet@ensmp.fr) )  
E. Ledoux ( [Emmanuel.Ledoux@ensmp.fr](mailto:Emmanuel.Ledoux@ensmp.fr) )  
J. M Monget ( [monget@cig.ensmp.fr](mailto:monget@cig.ensmp.fr) )  
C. Viavattene ( [christophe.viavattene@ensmp.fr](mailto:christophe.viavattene@ensmp.fr) )  
P.Viennot ( [Pascal.Viennot@ensmp.fr](mailto:Pascal.Viennot@ensmp.fr) )

Lettre de commande – DIREN Ile-de-France – N° 04349840-42

LHM/RD/04/48

Centre d'Informatique Géologique, 35 rue Saint Honoré, 77305

1.	Préambule.....	3
2.	Reprise de la géométrie des masses d'eau et report sur la grille MODCOU .....	4
3.	Renseignement hydrologique des masses d'eau souterraines .....	7
4.	Mise en oeuvre du modèle couplé STICS-MODCOU sur le bassin de la Seine .....	14
4.1.	Structure du modèle couplé STICS-MODCOU .....	14
4.2.	Description générale du modèle STICS .....	16
4.3.	Spatialisation de STICS en interface de MODCOU .....	17
4.4.	Pratiques agricoles sur le bassin de la Seine : regroupement en zones homogènes .....	18
4.5.	Application de STICS spatialisé au bassin de la Seine. Simulation du flux de nitrates .....	21
4.6.	Modélisation du transfert des nitrates dans les aquifères .....	22
5.	Calage du modèle sur l'historique des concentrations in situ en nitrates dans les aquifères (1970-2000).....	30
5.1.	Etude rétrospective des concentrations mesurées dans les aquifères .....	30
5.2.	Variations spécifiques concernant les principales nappes de l'oligocène .....	33
5.3.	Calage de la chronologie des histogrammes.....	34
5.4.	Réglage du taux temporel d'accroissement des nitrates fourni par le modèle <b>Erreur ! Signet non défini.</b>	
5.5.	Etude des écarts d'estimation du modèle STICS-MODCOU après calage .....	37
5.6.	Interrogations sur les performances du modèle STICS-MODCOU et sur sa mise en oeuvre <b>Erreur ! Signet non défini.</b>	
6.	Exemple de prédiction de l'impact des nitrates à l'échelle communale. Horizon 2015.....	41
6.1.	Tendance statistique d'évolution des nitrates dans les captages du bassin de la Seine de 1975 à 1988 <b>Erreur ! Signet non défini.</b>	
6.2.	Premiers essais d'estimation de l'état des concentrations en nitrates dans les nappes à l'horizon 2015 .....	41
7.	Bibliographie.....	58
8.	Annexe – Les fichiers fournis à la DIREN Ile-de-France .....	59
8.1.	Fichiers graphiques de forme des masses d'eau.....	59
8.2.	Données hydrologiques .....	60
8.3.	Données sur le modèle souterrain.....	62
8.4.	Données sur les nitrates .....	63

## 1. Préambule

La Directive Cadre Européenne sur l'eau prévoit que les états membres effectuent la délimitation des masses d'eau souterraines, puis leur caractérisation initiale et détaillée, et qu'ils évaluent leur bon état quantitatif et qualitatif à ce jour et à l'échéance 2015. Le DIREN a été chargé par le Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable de l'acquisition de données concernant les eaux souterraines du bassin Seine Normandie et de leur présentation sous forme d'état des lieux.

Dans le cadre de sa participation au programme PIREN Seine, le Centre d'Informatique Géologique (CIG-ARMINES) a développé le modèle mathématique hydrodynamique MODCOU simulant les transferts hydriques depuis le sol jusqu'aux nappes, puis dans les rivières. L'ensemble de ce modèle a été repris en 2004 pour les besoins de la DIREN (Viennot P. et E. Ledoux, 2004) par modification locale des champs de transmissivité et de coefficient d'emmagasinement sur l'ensemble des formations aquifères (Oligocène, Eocène, Craie) afin de respecter au mieux les niveaux piézométriques moyens mais également la dynamique d'évolution transitoire de la piézométrie sur l'ensemble du domaine et sur une période globale de simulation de 1985 à 2004.

Au cours de l'année 2004, la DIREN Ile-de-France et l'Agence de l'Eau Seine-Normandie ont été amenées à modifier sensiblement la délimitation des masses d'eau souterraines du bassin Seine Normandie. Celles-ci ont été reprises par le CIG-ARMINES pour les adapter au maillage de MODCOU.

Partant des travaux précédents effectués en 2003, et en vue d'améliorer la simulation de la qualité des eaux souterraines, le CIG-ARMINES a étendu à l'ensemble du bassin de la Seine les informations acquises dans le cadre du PIREN Seine sur les pratiques culturales pour simuler non seulement l'évolution des flux nitriques mais également la concentration de nitrates à l'horizon 2015 dans les trois nappes de l'Oligocène, de l'Eocène et de la Craie. Les flux moyens sous-racinaires ont été calculés sur la base de la séquence météorologique 1970/1990 et les pratiques agricoles moyennes regroupées en 12 zones telles quelles ont été observées pour la période 1990/2000.

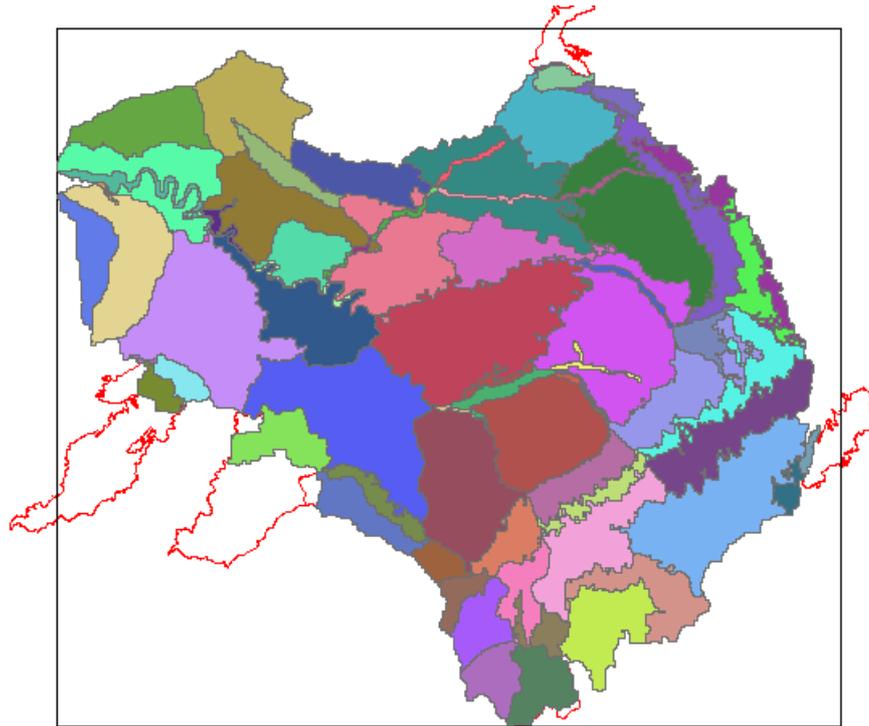
La simulation STICS-MODCOU résultante a été calée sur une étude rétrospective portant sur 30 ans de mesure des concentrations en nitrates (1970-2000) pour les trois nappes étudiées (données ONQES-SISE EAUX). La méthode de calage utilisée fait appel aux outils de la statistique et permet de rechercher pour chaque aquifère, le meilleur rythme de charge des intrants capable de fidèlement reproduire au niveau des concentrations simulées l'accroissement de la médiane des concentrations en nitrate tel qu'il est constaté pour la population des forages AEP dans le fichier ONQES-SISE EAUX.

Les résultats obtenus permettent de répondre à la demande de la Directive-Cadre sur l'Eau quand à l'estimation du risque de non atteinte du bon état qualitatif des masses d'eau en 2015. Par ailleurs, comme le modèle est utilisé sur une période de fonctionnement de 2000 ans, il permet d'estimer la période à partir de laquelle les concentrations en nitrates de chaque masse d'eau et de chaque aquifère se stabilisent ainsi que la concentration en nitrates qu'elles peuvent atteindre. Les simulations initiales ont été faites sans faire intervenir de modification dans les pratiques culturales constatées sur la période 1992-1998. Un test d'influence de réduction des apports en nitrates a été ensuite réalisé en réduisant de 20% les intrants à partir de l'année 2005.

Enfin, les résultats prédictifs fournis l'ensemble STICS-MODCOU sont accompagnés d'une évaluation de l'incertitude qui leur est associée. Cette incertitude résulte entre autre des hypothèses simplificatrices faites dans la simulation sur : le milieu hydrogéologique, le degré de réalisme des paramètres d'entrée du modèles, les aléas climatiques et la plausibilité des scénarios socio-économiques qui définissent les intrants. Partant des mesures de concentration disponibles sur la période 1970-1990, une statistique des erreurs d'estimation a pu être établie. Elle est utilisée pour évaluer la probabilité de franchissement des seuils 25 mg/l, 40 mg/l, 50 mg/l et 100 mg/l à l'horizon 2015 au niveau de chaque maille du modèle MODCOU et pour chaque masse d'eau.

## 2. Reprise de la géométrie des masses d'eau et report sur la grille MODCOU

Le CIG-ARMINES a procédé à la modification des fichiers graphiques MapInfo et ArcView destinés à assurer une correspondance entre le maillage kilométrique du modèle MODCOU et la géométrie détaillée des masses d'eau contenant les dernières modifications apportées en 2004 par la DIREN Ile-de-France (Fig. 1).



*Figure 1: Affichage du fichier ArcView ME2004\_V4.SHP reprenant les masses d'eau de la DIREN Ile-de-France - Agence de l'eau Seine-Normandie sur la grille kilométrique MODCOU.*

Chaque masse d'eau redessinée a reçu un code (Tableau 1) propre au système MODCOU (IDENTME\_04) en dehors de son libellé (NOM DE LA MASSE D'EAU) et de son code de masse d'eau d'origine (N\_MASSE\_FI). On remarquera l'usage de deux codes spécifiques, MODCOU\_HorsME et MODCOU\_Extterne pour les éléments de la grille MODCOU ne correspondant pas à des zones géographiques affectées à une des masses d'eau proposées. On notera aussi que le code IDENTME\_04 permet pour les zones d'alluvions de garder un accès direct au code de la masse d'eau sous-jacente à celles-ci.

Notons également que pour l'ensemble des fichiers SIG (Système d'Information Géographique) transmis à la DIREN Ile-de-France soit au format MapInfo (ME2004\_V4.MID et associés), soit au format ArcView (ME2004\_V4.SHP et associés), chaque polygone est associé aux trois attributs figurant dans le Tableau 1.

Tableau 1 – Correspondance entre code de masse d'eau d'origine DIREN Ile-de-France avec ceux utilisés en correspondance avec la grille MODCOU

<b>IDENTME_04</b>	<b>NOM DE LA MASSE D'EAU</b>	<b>N_MASSE_FI</b>
0	MODCOU_HorsME	
1	MODCOU_Externe	
10170000	BORDURE DU HAINAUT	1017
10170001	BORDURE DU HAINAUT (Externe) – Artois Picardie	1017
20070000	PLATEAU LORRAIN	2007
20070003	PLATEAU LORRAIN (Externe) – Rhin Meuse	2007
32100000	CRAIE DU GATINAIS	3210
30063210	ALLUVIONS BASSEE sur (3210)	3006
32110000	CRAIE ALTEREE DU NEUBOURG/TON/PLAINE ST ANDRE	3211
30013211	ALLUVIONS DE LA SEINE MOYENNE ET AVAL sur (3211)	3001
31020000	TERTIAIRE DU MANTOIS A L'HUREPOIX	3102
30013102	ALLUVIONS DE LA SEINE MOYENNE ET AVAL sur (3102)	3001
31030000	TERTIAIRE DU CHAMPIGNY EN BRIE ET SOISSONNAIS	3103
31040000	EOCENE DU VALOIS	3104
30023104	ALLUVIONS DE L'OISE sur (3104)	3002
31050000	EOCENE DU BASSIN VERSANT DE L'OURCQ	3105
31060000	LUTETIEN - YPRESIEN DU SOISSONNAIS-LAONNOIS	3106
30023106	ALLUVIONS DE L'OISE sur (3106)	3002
30033106	ALLUVIONS DE L' AISNE sur (3106)	3003
31070000	EOCENE ET CRAIE DU VEXIN FRANCAIS	3107
32010000	CRAIE DU VEXIN NORMAND ET PICARD	3201
30013201	ALLUVIONS DE LA SEINE MOYENNE ET AVAL sur (3201)	3001
30023201	ALLUVIONS DE L'OISE sur (3201)	3002
32020000	CRAIE ALTEREE DE L'ESTUAIRE DE LA SEINE	3202
30013202	ALLUVIONS DE LA SEINE MOYENNE ET AVAL sur (3202)	3001
32030000	CRAIE ALTEREE DU LITTORAL CAUCHOIS	3203
32040000	CRAIE des BV de l'Eaulne, Béthune, Varenne, Bresle et Yerres	3204
32050000	CRAIE PICARDE	3205
30023205	ALLUVIONS DE L'OISE sur (3205)	3002
32060000	CRAIE DE THIERACHE-LAONNOIS-PORCIEN	3206
32070000	CRAIE DE CHAMPAGNE NORD	3207
30033207	ALLUVIONS DE L' AISNE sur (3207)	3003
32080000	CRAIE DE CHAMPAGNE SUD ET CENTRE	3208
30043208	ALLUVIONS DE LA MARNE sur (3208)	3004
30073208	ALLUVIONS SEINE AMONT sur (3208)	3007
30083208	ALLUVIONS AUBE amont sur (3208)	3008
32090000	CRAIE DU SENONAIIS ET PAYS D'OTHE	3209
30073209	ALLUVIONS SEINE AMONT sur (3209)	3007
30063209	ALLUVIONS BASSEE sur (3209)	3006
32100002	CRAIE DU GATINAIS (Externe) – Loire Bretagne	3210
32120000	CRAIE LIEUVIN-OUCHÉ - BV de la Risle	3212
30013212	ALLUVIONS DE LA SEINE MOYENNE ET AVAL sur (3212)	3001
32130000	CRAIE ET MARNES LIEUVIN-OUCHÉ/ PAYS D'AUGE - BV de la Touques	3213
32140000	ALBIEN-NEOCOMIEN LIBRE entre Ornain et limite de district	3214
32150000	ALBIEN-NEOCOMIEN LIBRE entre Seine et Ornain	3215
30053215	ALLUVIONS PERTHOIS sur (3215)	3005
32160000	ALBIEN-NEOCOMIEN LIBRE entre Yonne et Seine	3216
32170000	ALBIEN-NEOCOMIEN LIBRE entre Loire et Yonne	3217
32170002	ALBIEN-NEOCOMIEN LIBRE entre Loire et Yonne (Externe) -	3217

	LoireBretagne	
33010000	PAYS DE BRAY	3301
33020000	CALCAIRES TITHONIEN KARSTIQUE entre Ormain et limite du district	3302
33030000	CALCAIRES TITHONIEN KARSTIQUE entre Seine et Ormain	3303
33040000	CALCAIRES TITHONIEN KARSTIQUE entre Yonne et Seine	3304
33050000	CALCAIRES KIMMERIDGIEN-OXFORDIEN KARSTIQUE Nord-Est du District (entre Ormain et limite de district)	3305
33060000	CALCAIRES KIMMERIDGIEN-OXFORDIEN KARSTIQUE entre Seine et Ormain	3306
33070000	CALCAIRES KIMMERIDGIEN-OXFORDIEN KARSTIQUE entre Yonne et Seine	3307
33090000	CALCAIRES DOGGER entre le Thon et limite de District	3309
33100000	CALCAIRES DOGGER entre Armançon et limite de district	3310
34010000	MARNES ET CALCAIRES DE LA BORDURE LIAS TRIAS DE L'EST DU MORVAN	3401
35010000	SOCLE DU MORVAN	3501
40600000	BAZOIS	4060
40600002	BAZOIS (Externe) - LoireBretagne	4060
40610000	CALCAIRE JURASSIQUE DU NIVERNAIS	4061
40610002	CALCAIRE JURASSIQUE DU NIVERNAIS (Externe) - LoireBretagne	4061
40810000	CENOMANIEN SABLEUX LIBRE (PERCHE-MAINE)	4081
40810002	CENOMANIEN SABLEUX LIBRE (PERCHE-MAINE) (Externe) - LoireBretagne	4081
40920000	CALCAIRES TERTIAIRES LIBRES ET CRAIE SENONIENNE DE BEAUCE	4092
40920002	CALCAIRES TERTIAIRES LIBRES ET CRAIE SENONIENNE DE BEAUCE (Externe) - LoireBretagne	4092
41350000	CALCAIRES TERTIAIRES CAPTIFS ET CRAIE SENONIENNE DE BEAUCE	4135
41350002	CALCAIRES TERTIAIRES CAPTIFS ET CRAIE SENONIENNE DE BEAUCE (Externe) - LoireBretagne	4135

### **3. Renseignement hydrologique des masses d'eau souterraines**

L'étude réalisée en 2002-2003 pour le compte de la DIREN Ile-de-France avait permis d'établir la procédure informatique permettant de passer du paramétrage des données et des résultats de MODCOU ventilés sur le maillage d'origine (mailles carrées de 1 à 8 Km de côté) à des données relatives aux masses d'eau de la Directive Européenne de l'Eau (DCE). Les informations suivantes ont ainsi été transmises à la DIREN au format ArcView : précipitations annuelles (Fig. 2), infiltrations annuelles (Fig. 3), alimentations annuelles des différentes nappes (Fig. 4), paramètres hydrodynamiques souterrains : épaisseur de la zone non saturée, transmissivité (T) et coefficient d'emménagement (S) (Fig. 5 à 7).

Le Centre d'Informatique Géologique (CIG-ARMINES) ayant repris en 2004 l'exploitation du modèle mathématique hydrodynamique MODCOU sur une période globale de simulation de 1985 à 2004, les résultats obtenus ont été à nouveau ventilés comme l'année précédente en respectant la nouvelle géométrie des masses d'eaux puis ils ont été transmis à la DIREN dans un format interprétable par les logiciels SIG MapInfo et ESRI ArcView (voir, Chapitre 8 - Annexe – Les fichiers fournis à la DIREN Ile-de-France).

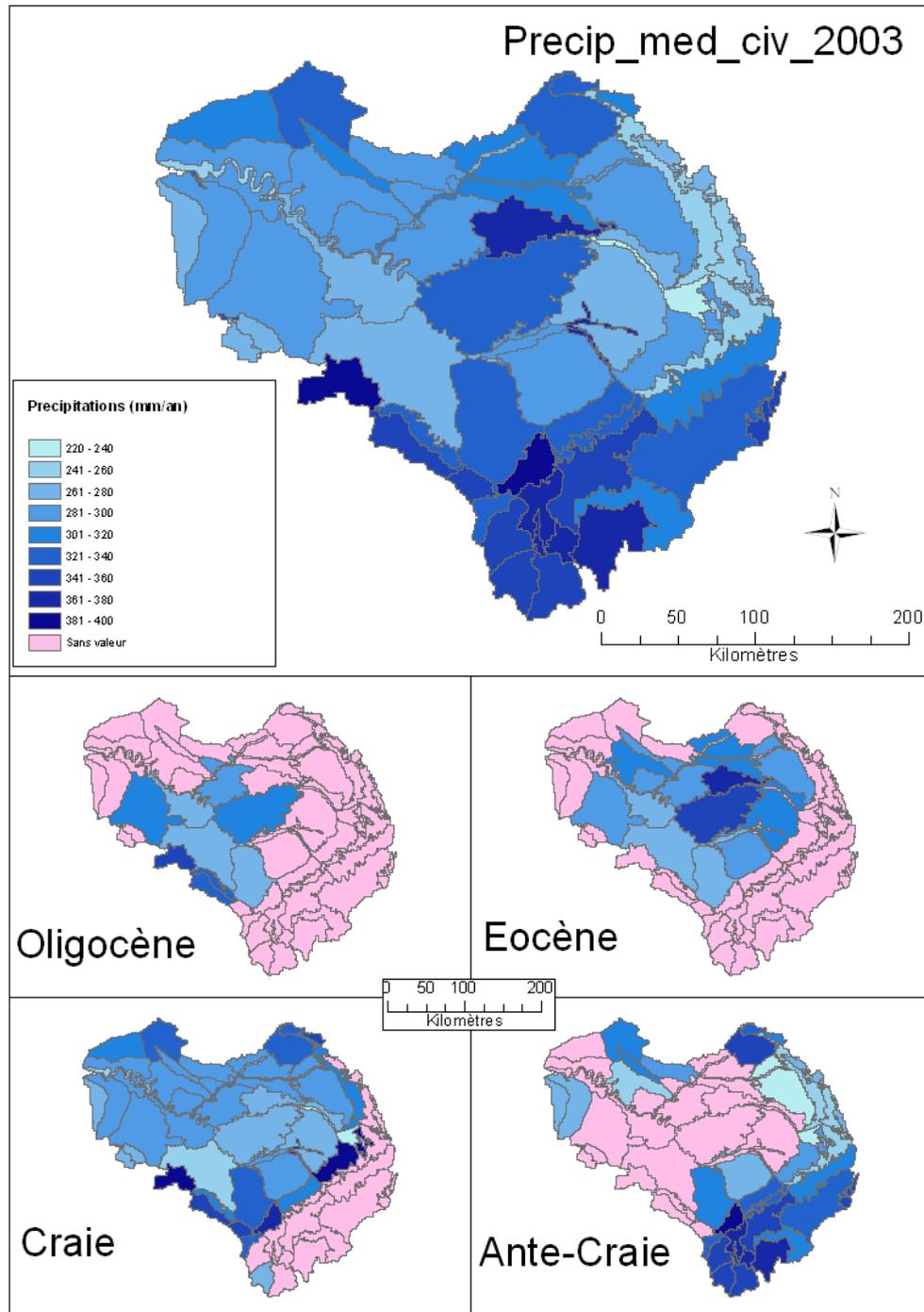


Figure 2: Moyenne des précipitations annuelles par masse d'eau pour l'année décadaire 2003. Répartition sur tout le bassin et par grandes formations.

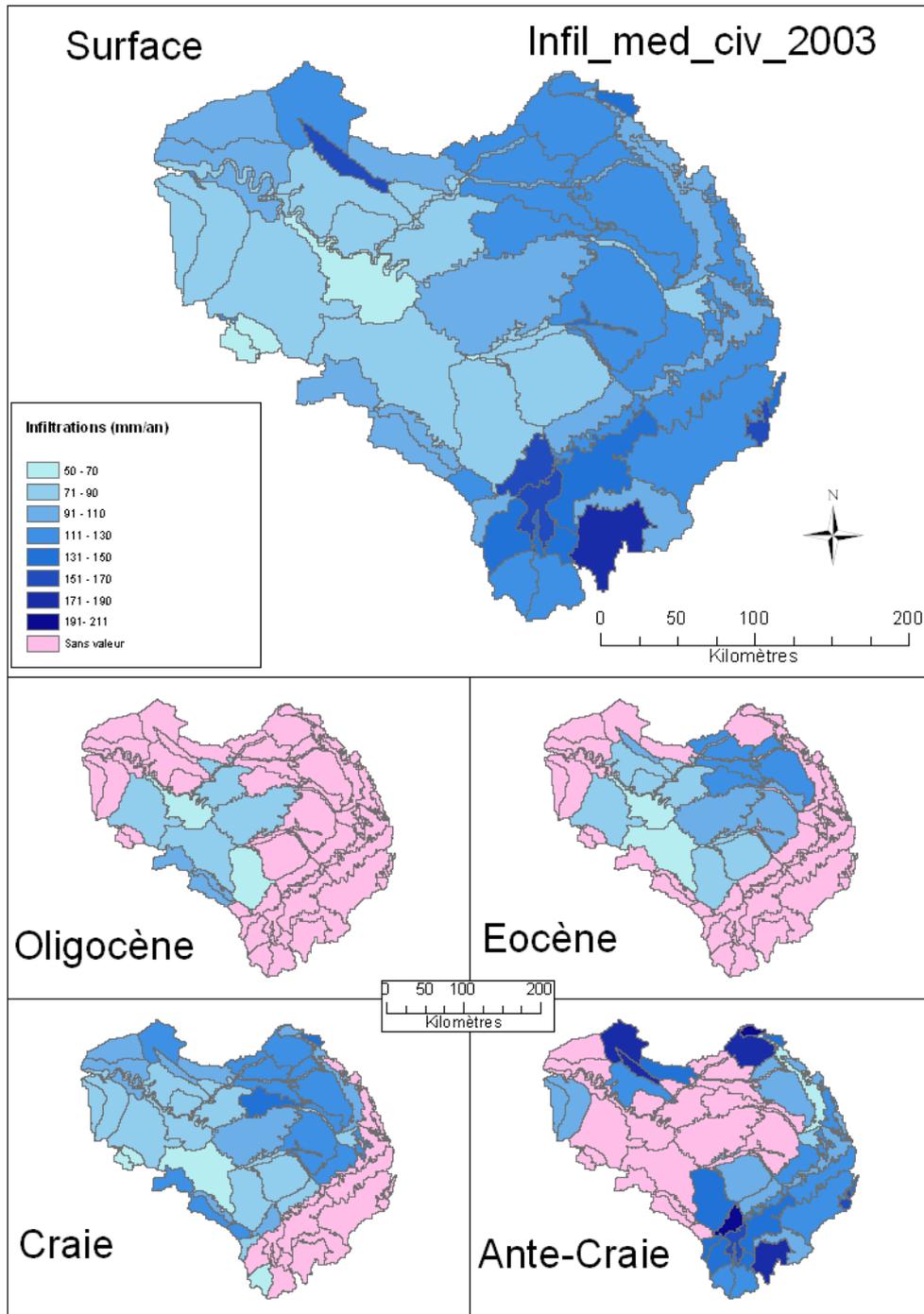


Figure 3: Moyenne de l'infiltration annuelle par masse d'eau pour l'année décadaire 2003.  
Répartition sur tout le bassin et par grandes formations.

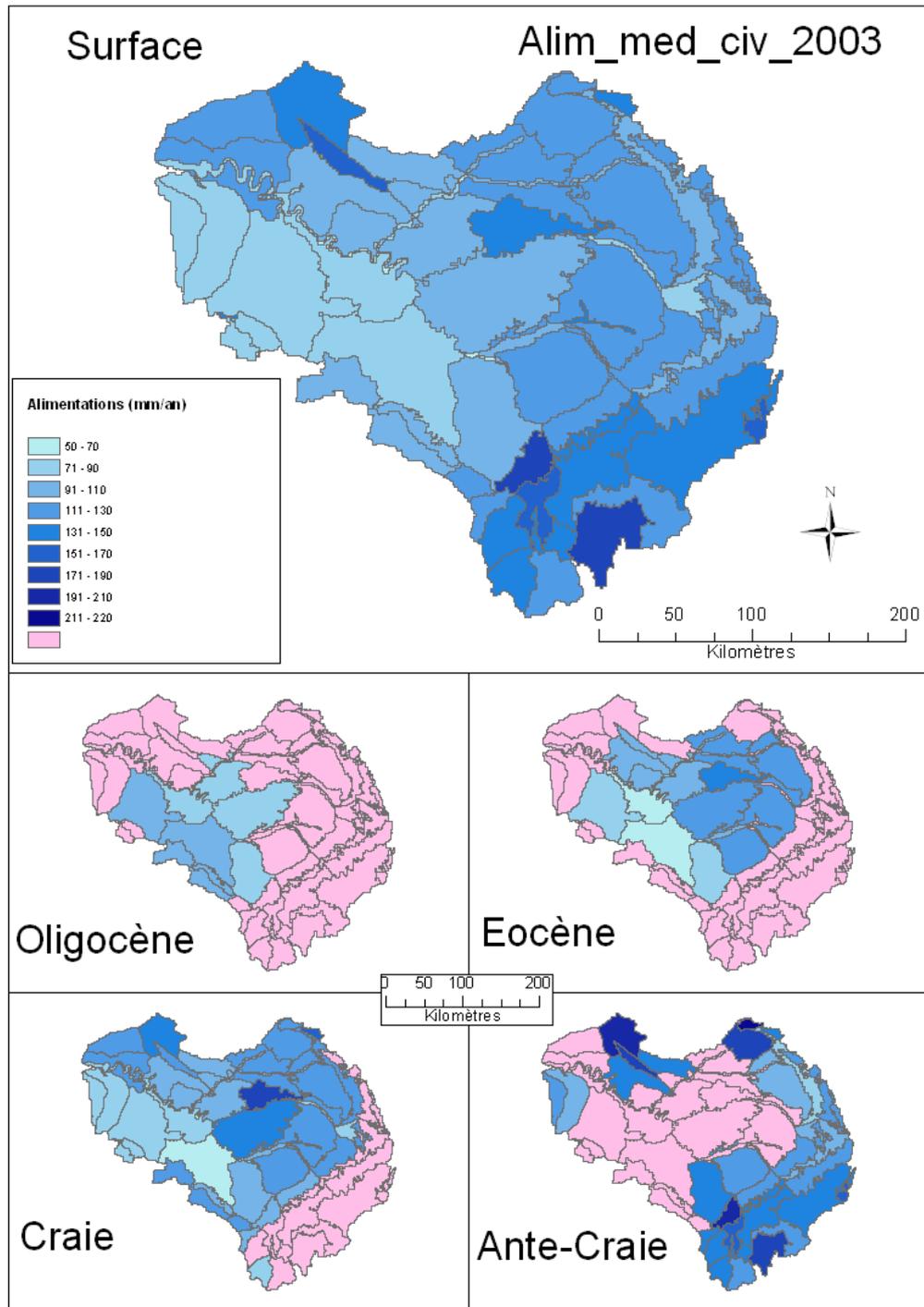


Figure 4: Moyenne de l'alimentation annuelle par masse d'eau pour l'année décadaire 2003. Répartition sur tout le bassin et par grandes formations.

# ME\_nonsat\_med

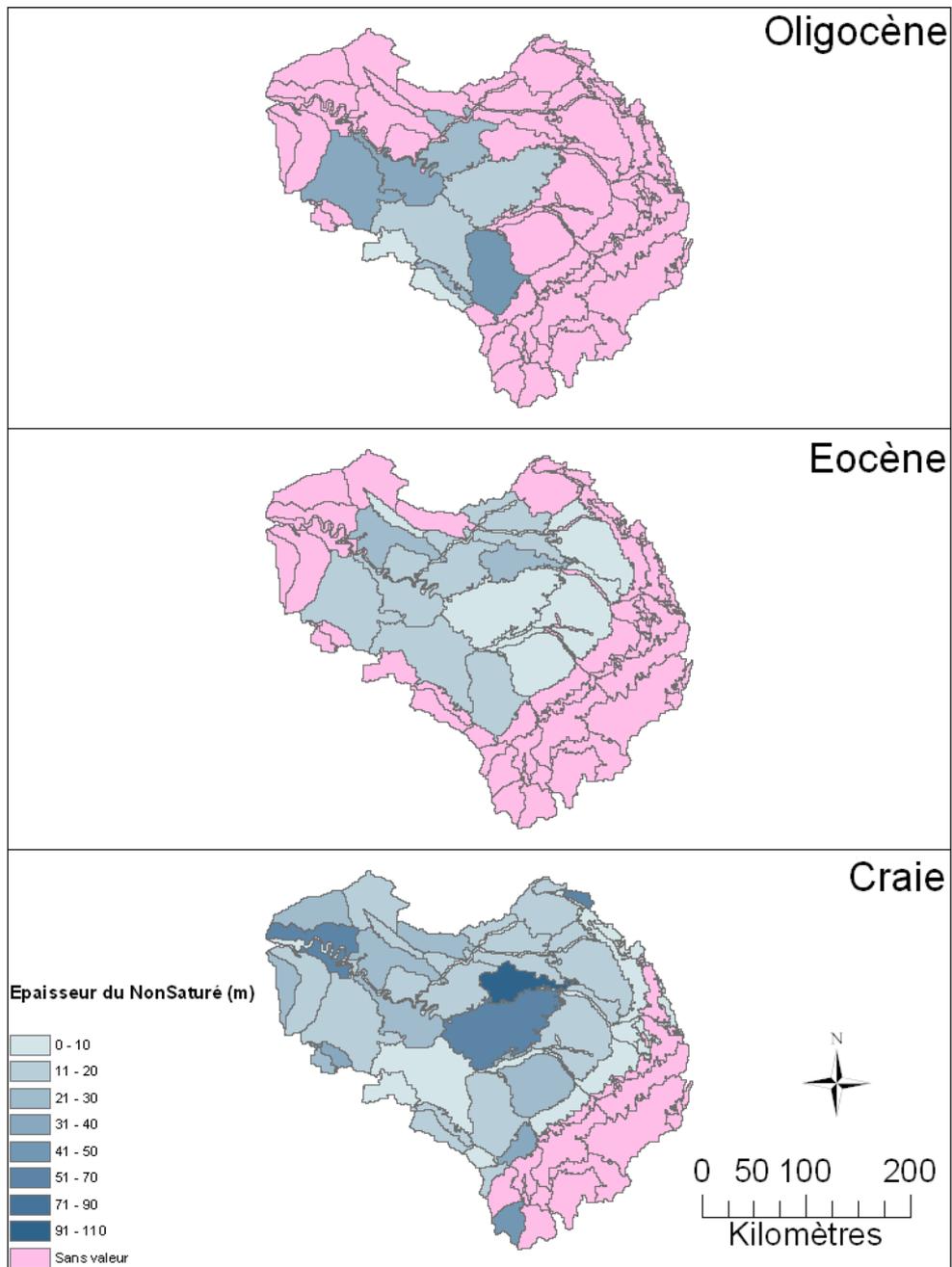


Figure 5: Epaisseur de la zone non saturée sur tout le bassin et par grandes formations.

# ME\_Transmissivité\_med

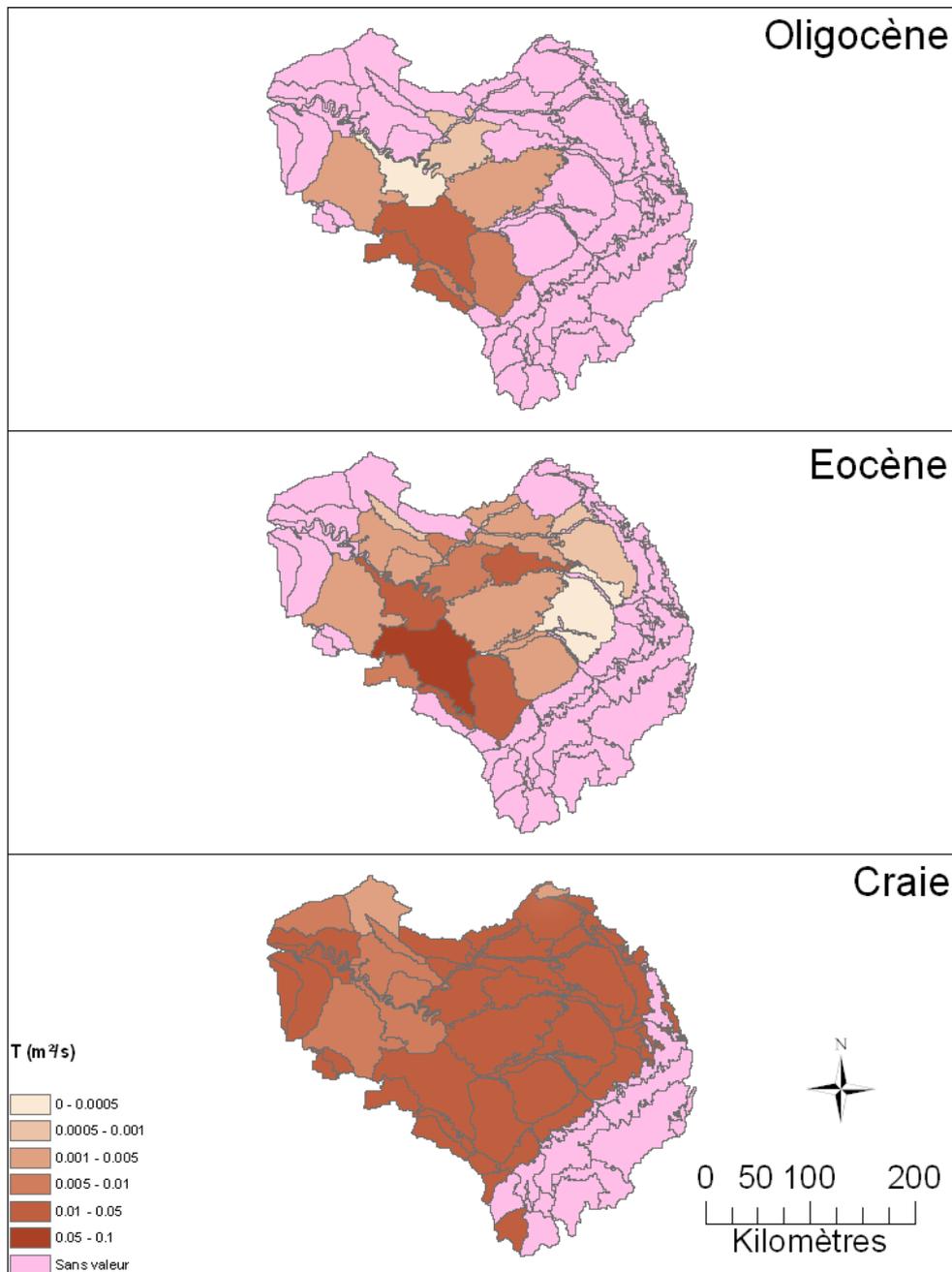


Figure 6: Transmissivité moyenne par masse d'eau sur tout le bassin et par grandes formations.

# ME\_Emmagasinement\_med

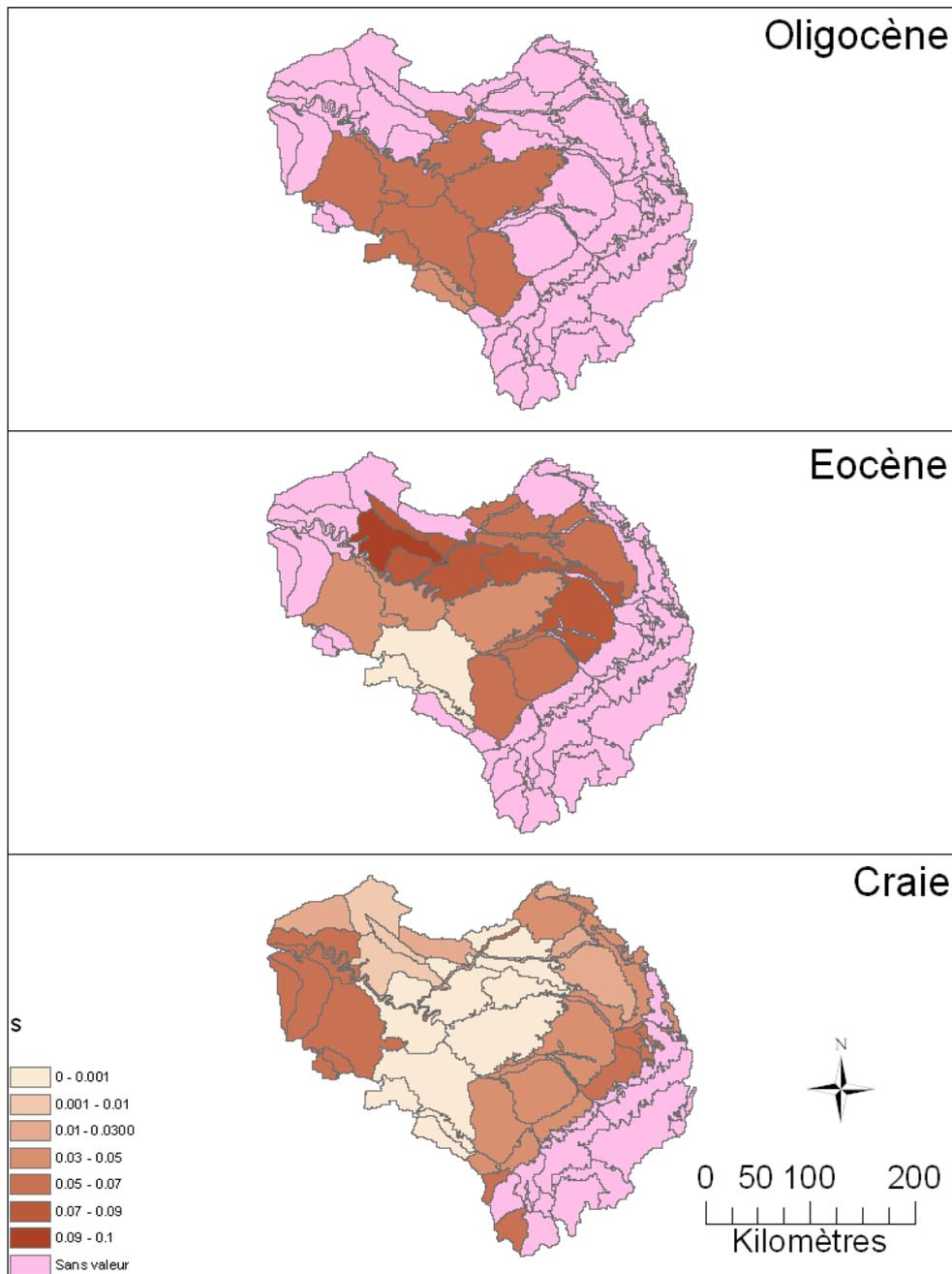


Figure 7: Coefficient d'emmagasinement moyen par masse d'eau sur tout le bassin et par grandes formations.

## **4. Mise en oeuvre du modèle couplé STICS-MODCOU sur le bassin de la Seine**

### **4.1. Structure du modèle couplé STICS-MODCOU**

Le modèle intégré STICS-MODCOU appliqué au bassin de la Seine permet de simuler, au pas de temps journalier, les débits dans le réseau hydrographique mais également la piézométrie dans les aquifères de la Craie, de l'Eocène et de l'Oligocène par le biais d'une modélisation hydrodynamique des nappes. A cette modélisation des écoulements, s'ajoute celle du transfert de l'azote nitrique dans les différents compartiments du système hydrologique : les sols agricoles, la zone non saturée et les aquifères explicitement représentés par le modèle. Les résultats peuvent être exprimés sous la forme de flux ou de concentration à la base de la zone racinaire ou de concentrations dans les différents aquifères modélisés. On remarquera que les différents aquifères de l'auréole anté-Crétacé supérieur, situés sur la bordure orientale du bassin de la Seine, ne font pas l'objet d'une prise en compte par le modèle couplé STICS-MODCOU.

Si la totalité du bassin peut être modélisée du point de vue hydrodynamique (restitution dans le temps et dans l'espace du débit des rivières, reproduction des niveaux piézométriques en régime permanent ou transitoire des principaux aquifères), la dynamique de pollution azotée à partir des intrants agricoles n'est rendu possible que par le renseignement des pratiques agricoles des nombreuses petites régions agricoles présentes sur le bassin.

Le modèle couplé se compose de trois grands modèles distribués :

- le modèle hydrologique de surface MODCOU ;
- le modèle agronomique STICS ;
- les modèles hydrogéologique de transfert en zone non saturée NONSAT et souterrain NEWSAM.

Ces trois modèles distribués permettent les simulations respectives des écoulements superficiels et souterrains, le calcul des flux de nitrates à la base de la zone racinaire et le transport des nitrates dans le système aquifère multicouche. Ces modèles fonctionnent de manière séquentielle et sont articulés entre eux selon le principe précisé sur la figure 8.

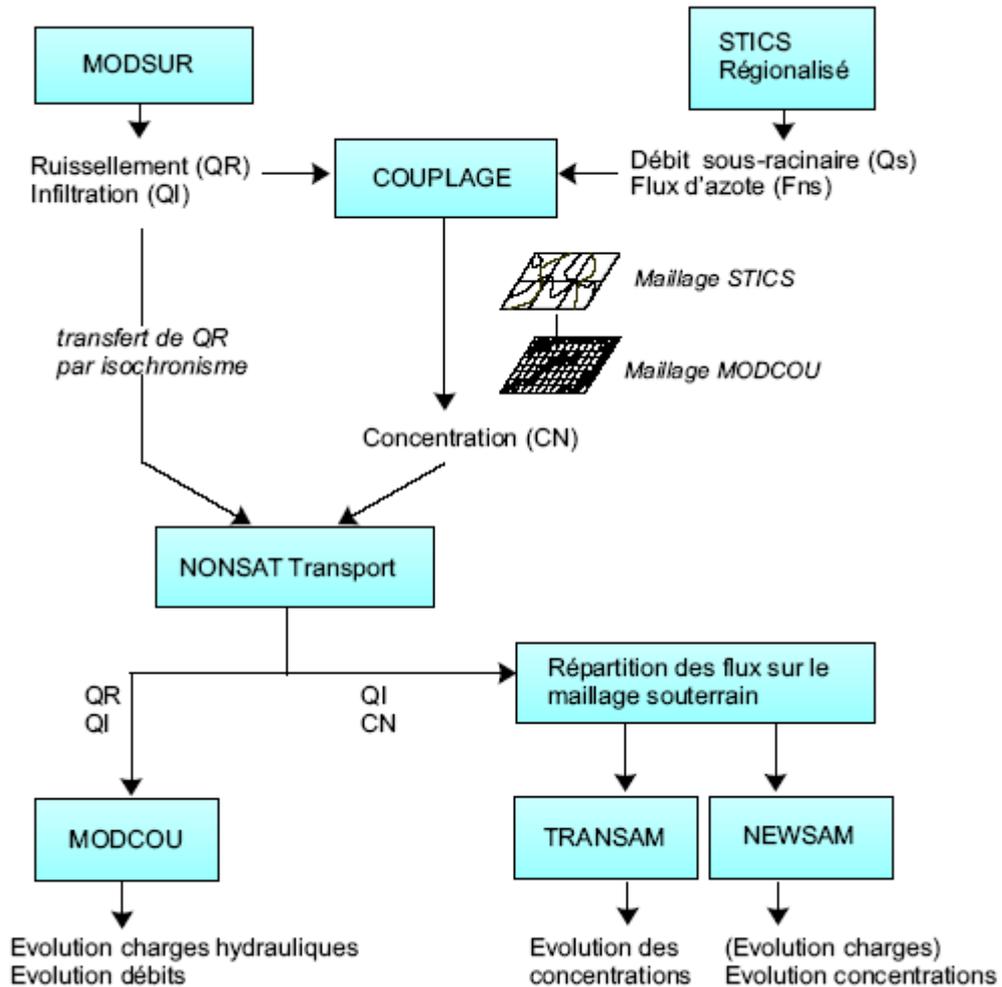


Figure 8: Représentation schématique des couplages STICS-MODCOU-NEWSAM.

Le calcul du bilan hydrique, effectué par le module MODSUR, fournit les débits ruisselés (QR) et infiltrés (QI) sur chaque maille du domaine de surface suivant le pas de temps des données météorologiques. STICS calcule des flux d'azote sous-racinaire (Fns) et des débits drainés à la base de la zone sous-racinaire (Qs).

L'eau d'infiltration (QI) contenant la concentration en nitrates (CN) est acheminée vers les nappes souterraines, à travers la zone non saturée, grâce au module NONSAT. Les flux de nitrates sont ensuite répartis sur les mailles souterraines. On remarquera que lorsqu'une maille de surface n'est pas connectée à une maille souterraine représentée par le modèle NEWSAM, les nitrates sont transportés par un modèle à réservoir TRANSAM. Ce cas se rencontre sur la bordure Est du bassin par exemple.

Enfin, le modèle de transport en milieu souterrain NEWSAM simule l'évolution des concentrations nitriques dans les aquifères. NEWSAM permet également de quantifier les flux de nitrates échangés entre les aquifères et les rivières (Figure 9).

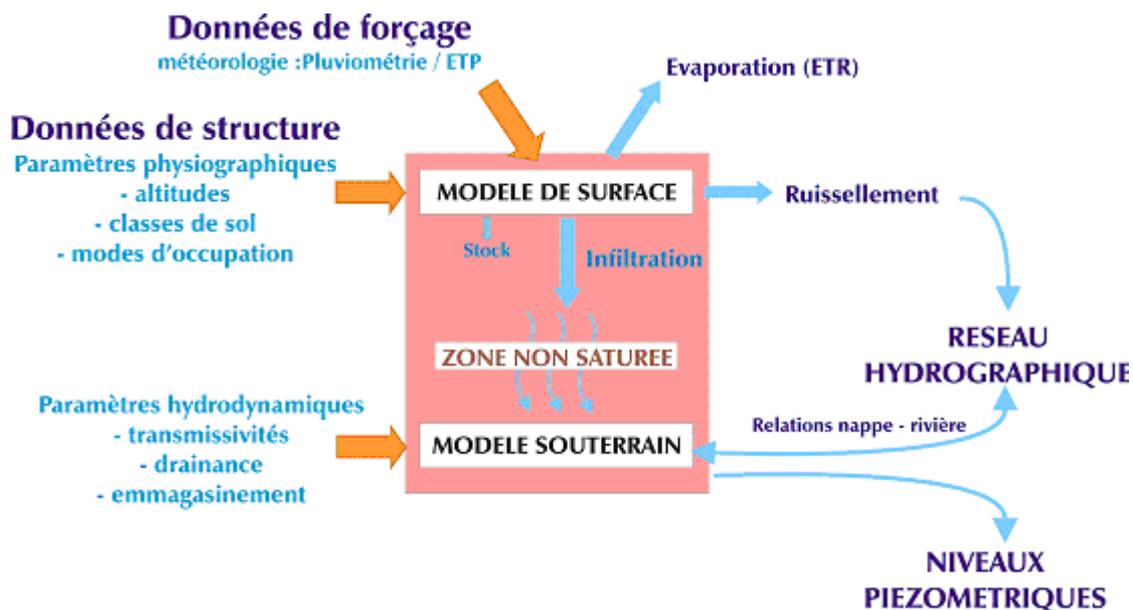


Figure 9: Principe général du modèle hydrogéologique couplé MODCOU.

L'insertion de STICS entre le couple des modèles MODCOU et NEWSAM a permis d'aboutir à une modélisation complète des transferts de nitrates. Cet ensemble est conçu pour représenter les processus de transferts qui se déroulent d'une part, dans les sols agricoles et d'autre part, dans le domaine souterrain constitué par la zone non saturée et les aquifères.

## 4.2. Description générale du modèle STICS

STICS (Simulateur multidisciplinaire pour les cultures standard) est un modèle générique de simulation du cycle agronomique des cultures ainsi que de leurs bilans hydrique et azoté. Il a été développé par l'INRA en collaboration avec différents organismes (ITCF, Agrotransfert, CIRAD, AGPM, CETIOM, CEMAGREF,...). Dans la présente étude, il est utilisé pour simuler au pas de temps journalier, le comportement du système sol-plante au cours de plusieurs années successives d'exploitation (Brisson et al, 2003). L'interface supérieure du modèle est l'atmosphère, caractérisée par plusieurs variables climatiques (radiation solaire, température minimum et maximum, précipitation, évapotranspiration potentielle). L'interface inférieure se situe dans le sol au niveau de la profondeur maximale accessible au système racinaire. Celle-ci est fonction du type de sol et de la nature de la plante cultivée. Le modèle STICS est écrit en FORTRAN 77. Il est organisé en modules, chaque module faisant appel à un certain nombre de sous-programmes traitant des mécanismes spécifiques de fonctionnement du système sol-plante. Les modules principaux concernent : le développement de la plante, la croissance aérienne du végétal, les composantes du rendement, la croissance racinaire, le bilan hydrique, les échanges thermiques avec l'environnement et enfin le bilan azoté.

La mise en oeuvre de STICS requiert quatre sources de données (Figure 10) :

- 1) *données climatiques* : température minimale, maximale, pluviométrie, évapotranspiration potentielle (ETP) et rayonnement global, au pas de temps journalier ;
- 2) *données « sol »* : le sol est décrit comme une succession de couches horizontales caractérisées par leurs propriétés physiques (épaisseurs, masse volumique, teneur en eau à la capacité au champ et au point de flétrissement, teneur en cailloux). La couche de surface où se concentre l'activité biologique) se caractérise par ses paramètres physico-chimiques (teneurs en argile, en calcaire, en azote organique, albédo, etc..) ;

- 3) *paramètres « culture »* : il s'agit des paramètres relatifs aux différents processus agronomiques pris en compte (germination, levée, développement, etc..) incluant la prise en compte de l'effet des stress hydrique, thermique et azoté sur le fonctionnement de la plante ;
- 4) *données « techniques culturales »* : elles déterminent les modalités et les dates des interventions culturales (semis, irrigation, apports d'engrais azotés, apports d'amendements organiques, récolte, travail du sol, incorporation des résidus de culture, etc..).

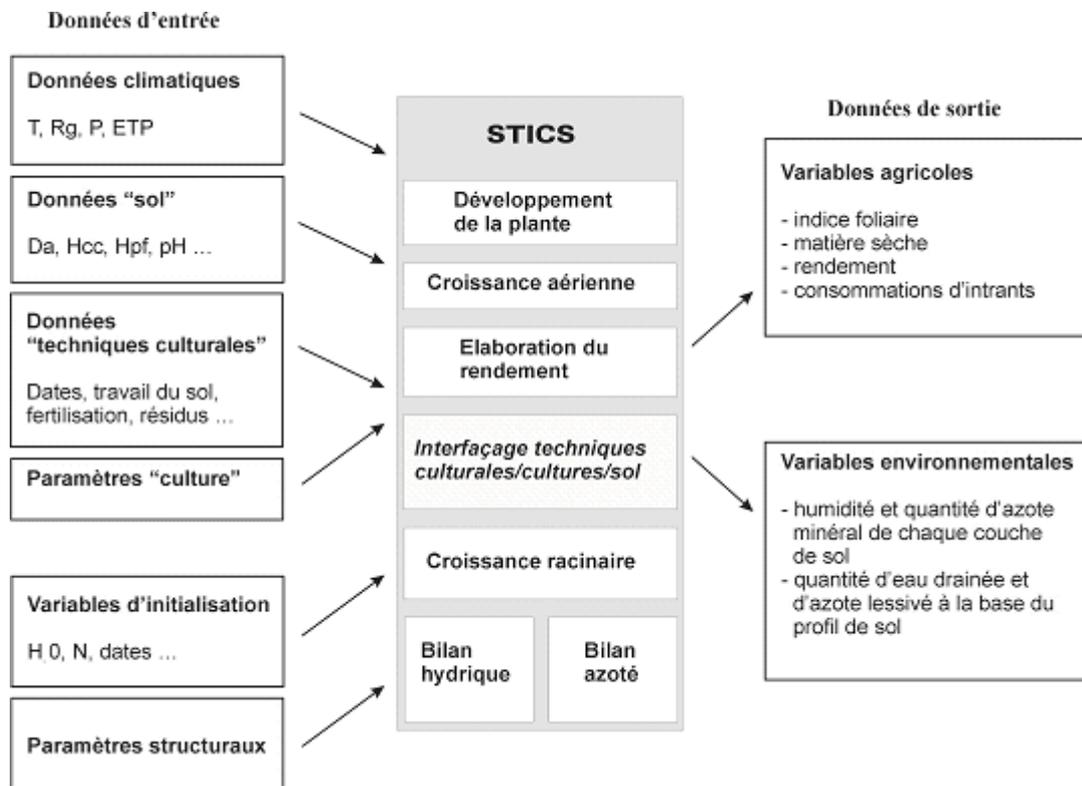


Figure 10: Organisation générale du modèle agronomique STICS.

A ces données d'entrées, s'ajoutent celles concernant les variables d'initialisation (dates de début et fin de simulation ; humidité et quantité d'azote minéral initiales dans les couches du sol) et d'autres paramètres généraux communs à toutes les simulations tels que, par exemple, la profondeur maximale du sol affectée par l'évaporation.

Les données de sortie de STICS fournissent des grandeurs agronomiques (biomasse végétale, rendement en produit récolté, teneur en protéines des grains, bilan azoté de la culture, etc..) et des grandeurs environnementales (flux d'eau et de nitrate sortant de la zone racinaire).

#### 4.3. Spatialisation de STICS en interface de MODCOU

Une procédure de spatialisation (Gomez, 2002) a permis de générer des données d'entrée au modèle STICS en correspondance avec chaque élément de la grille du modèle MODCOU en s'appuyant sur la définition de zones géographiques « homogènes » croisant spatialement les données climatiques, les types de sol et les zones agricoles (Figure 11) tout en tenant compte de l'évolution temporelle des données météorologiques et de pratiques agricoles (pratiques, assolements ...). Chaque cellule (ou unité spatiale) ainsi utilisée est appelée ici Unité Générale de Simulation (UGSM).

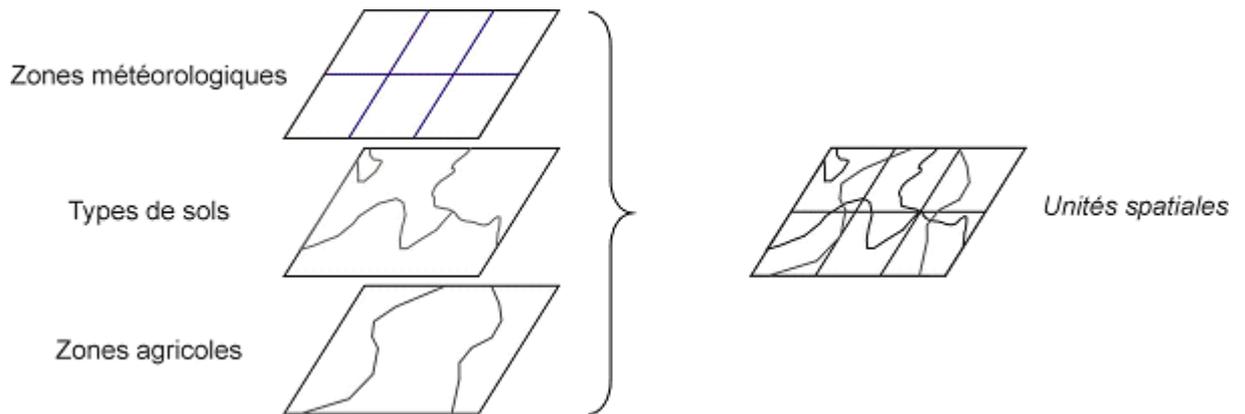


Figure 11: Organisation spatiale des unités de simulation (UGSM) dans STICS spatialisé.

#### 4.4. Pratiques agricoles sur le bassin de la Seine : regroupement en zones homogènes

Le bassin de la Seine ne peut être considéré comme un ensemble homogène en terme d'activité agricole. En effet, toutes les études précédentes (Mignolet et al, 2002) montrent une grande hétérogénéité des systèmes de production adoptés par les agriculteurs, se traduisant par des assolements également très variables selon les régions agricoles. Cette grande hétérogénéité résulte à la fois des choix économiques (proximité des marchés, IAA ou consommateurs), des orientations politiques (de la PAC, notamment) et également des contraintes du milieu.

Pour réaliser le découpage de cet espace agricole en zones homogènes, on s'est d'abord appuyé sur le maillage le plus pertinent, à savoir celui des Petites Régions Agricoles (PRA). L'ensemble du bassin versant de la Seine comporte 147 PRA au total dont la superficie varie de 50 km<sup>2</sup> (Buttes de Dammartin) à 3600 km<sup>2</sup> (Champagne crayeuse).

Pour répondre aux objectifs du programme GICC Seine, ces PRA ont elles-mêmes été regroupées en grandes zones caractéristiques sur la base de critères comprenant, le pourcentage de surfaces toujours en herbe (STH), particulièrement déterminant sur les marges du bassin parisien et les successions de cultures dominantes issues des résultats de l'enquête TER-UTI du Ministère de l'Agriculture pour la période allant de 1992 à 1998. TER-UTI s'appuie sur les données récoltées dans le cadre de l'Enquête d'Utilisation du Territoire menée depuis 1977 par le Ministère de l'Agriculture et qui inventorie annuellement les occupations par parcelles à l'échelle de l'ensemble du territoire français. Dans certains cas, la carte pédologique et celle des OTEX (Orientations technico-économiques des exploitations) dominantes ont été aussi utilisées pour confirmer certains regroupements. Le résultat final de cette opération aboutit à un découpage du bassin de la Seine en 12 zones caractéristiques par l'équipe de l'INRA Mirecourt (Figure 12) :

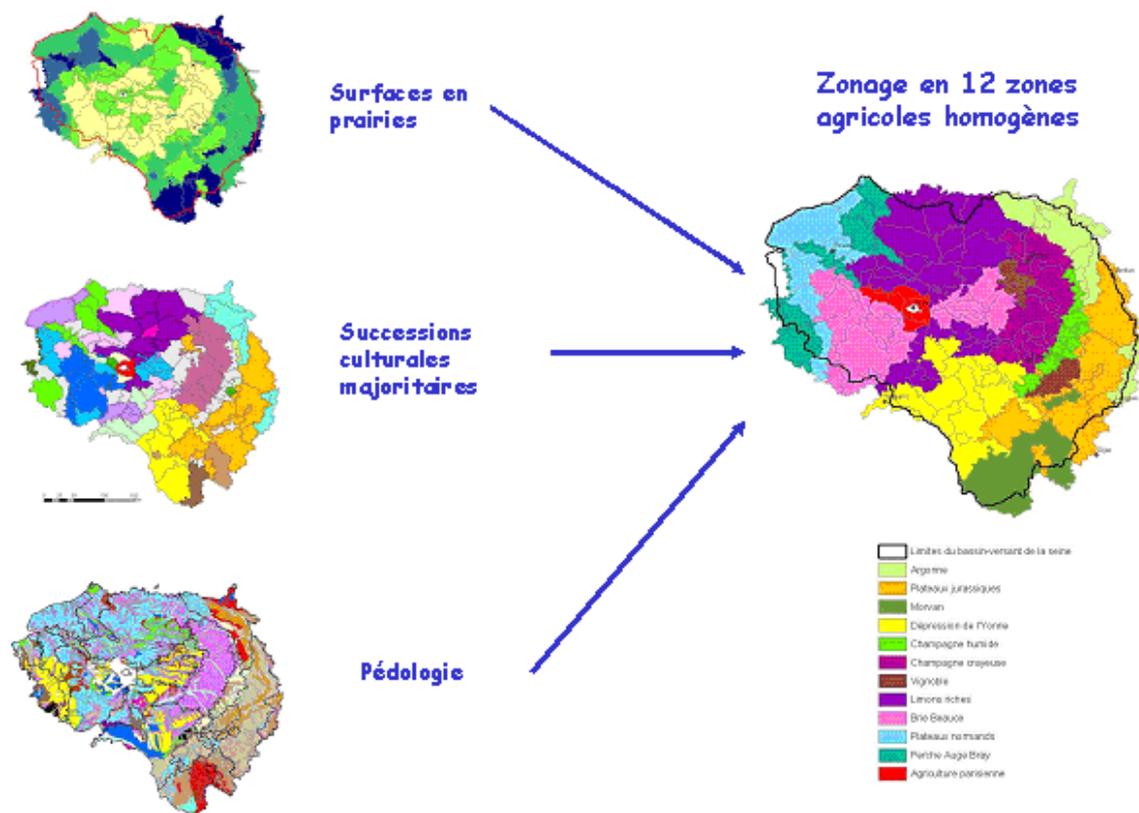


Figure 12: Zones homogènes du bassin de la Seine déterminées par l'INRA Mirecourt en amont de STICS spatialisé.

La dénomination de ces zones est basée sur le nom des principales PRA situées dans chacune d'entre elles (Argonne, Morvan, Champagne humide...), sur le nom des grands ensembles géomorphologiques (plateaux jurassiques, dépression de l'Yonne,...) ou enfin sur un type d'agriculture caractéristique (vignoble, agriculture parisienne). Chacune de ces zones est décrite par un ensemble d'indicateurs socio-économiques représentatifs de son agriculture et par des pratiques culturales moyennes.

Chacune de ces zones se caractérise comme suit :

- 1) *Argonne* : Très forte proportion de surface en herbe (> 50%), successions de culture basées sur les céréales, le maïs ensilage et le colza. Les OTEX dominantes sont "bovin lait et viande" et "polyculture-élevage".
- 2) *Plateaux jurassiques* : Forte prépondérance de succession "colza-blé-orge" , surfaces en prairies inférieures à 30 %. OTEX dominantes : "céréales et oléoprotéagineux" et "polyculture-élevage". Bonne concordance avec les plateaux de calcaires jurassiques.
- 3) *Morvan* : Très forte proportion de surfaces en herbe (autour de 70%), OTEX dominante : "bovin viande". Bonne concordance avec le socle cristallin granitique du Morvan.
- 4) *Dépression de l'Yonne* : Surfaces en prairies autour de 10%, successions de cultures triennales de type "colza-blé-orge" ou "tournesol-blé-orge" : l'OTEX dominante est "céréales et oléoprotéagineux".
- 5) *Champagne Humide* : Surfaces en prairies autour de 20%, successions de cultures à base de colza, tournesol, pois, maïs. Forte présence du maïs en monoculture ou assolé.
- 6) *Champagne crayeuse* : zone caractérisée par la prépondérance de successions à base de luzerne, pois, betterave. Surfaces en prairies presque inexistantes. OTEX dominantes :

- "Culture générale" et "Céréales et oléoprotéagineux". Très bonne concordance avec le substrat crayeux de cette région.
- 7) *Vignoble* : PRA caractérisée par une forte proportion de vigne dans l'assolement (16% en moyenne). Le reste de l'assolement est typique des PRA limitrophes.
  - 8) *Limons riches* : Moins de 10% de surfaces en prairies. Prépondérance de la betterave, associée ou non au pois ou à la pomme de terre. OTEX dominante : "Culture générale".
  - 9) *Brie Beauce* : Autour de 6% de surface en prairies. Prédominance du pois et du colza en tête de rotation et des céréales. OTEX dominante : "Céréales et oléoprotéagineux".
  - 10) *Plateaux normands* : Zone caractérisée par la coexistence de prairies (30% en moyenne) et de cultures industrielles (betterave, lin) et d'oléoprotéagineux (pois, colza).
  - 11) *Perche, Auge et Bray* : Cette zone discontinue est caractérisée par une forte proportion de prairies (autour de 50%) et des successions essentiellement basées sur le maïs ensilage. OTEX dominantes : "Bovins lait viande" et "polyculture-élevage".
  - 12) *Agriculture parisienne* : cette zone se distingue, du fait de sa proximité avec l'agglomération parisienne, par une forte proportion de l'assolement en légumes et potagers. On y trouve également des successions à base de maïs grain et de betterave.

Pour ce qui concerne les travaux exploratoires conduits en 2002 par E. Gomez dans le cadre de sa thèse, l'équipe de l'INRA Mirecourt avait effectué, dans le cadre du PIREN Seine, un travail préliminaire de renseignement portant sur 64 PRA couvrant le bassin de la Marne et quelques parties des bassins de la l'Oise, de la Seine et de l'Aube. Les pratiques agricoles avaient alors été définies sur la période de recensement 1970-1990.

Au cours de la période 2003-2004, l'équipe de l'INRA Mirecourt n'a pu prolonger le travail détaillé entrepris au cours des années précédentes dans le cadre du PIREN Seine, mais a part contre établi en 2004, dans le cadre du programme GICC (Ducharne et al, 2004), le renseignement complet des 12 zones regroupées définies précédemment. Les pratiques agricoles moyennes par zone ont été déterminées à partir des résultats de l'enquête conduite en 2001 par le Service Central des Enquêtes et Etudes Statistiques (SCEES) du Ministère de l'Agriculture sur les « Pratiques culturelles sur grandes cultures ». Les valeurs représentatives par culture pour chaque zone ont été extraites et moyennées (par exemple pour les rendements ou les doses d'engrais) ou triées par fréquence maximale d'occurrence (pour les dates de semis par exemple). Ce renseignement s'est limité à la période de recensement 1992-1998, étendue à la période 1990-2000.

La nouvelle base de donnée Mirecourt contenant l'ensemble des données pratiques agricoles sur les 12 zones a été fournie au CIG-ARMINES sous la forme d'un fichier au format Microsoft Access. Deux nouveaux modules ont été développés sous ESRI ArcView en Visual Basic Application afin de générer à partir de ces données les fichiers d'entrée du programme STICS spatialisé sur le bassin de la Seine (fichier de description des successions agricoles « ficsuccAD » et de définition des Petites Régions Agricoles « PRA »).

Notons que la base de donnée INRA Mirecourt contient 3 types de prairies (fauchée, pâturée, mixte). Ces prairies diffèrent en pourcentage de surface et en pratiques agricoles associées. Lors des anciennes simulations STICS (Gomez, 2003), ces prairies étaient confondues en une seule succession cumulant les apports en fertilisant et surestimant ainsi les flux d'azote sous-racinaires. Pour corriger ce problème, elles sont maintenant intégrées dans les fichiers d'entrée STICS en successions agricoles différentes au prorata de leur surface.<sup>1</sup>

De plus, un nouveau module codé en Visual Basic Application permet de générer directement depuis ArcView des scénarios dit « raisonnés » en implantant, par exemple, des CIPAN (Cultures Intermédiaires Pièges à Nitrate : la moutarde dans notre cas) selon les critères fournis par l'INRA-Laon et/ou en réduisant la fertilisation minérale azotée de manière uniforme. Les effets d'une réduction uniforme de la fertilisation à hauteur de 20% sont ainsi testés dans la présente étude.

---

<sup>1</sup> STICS ne permet pas la modélisation du pâturage. Cette activité n'est donc pas prise en compte dans nos calculs.

#### **4.5. Application de STICS spatialisé au bassin de la Seine. Simulation du flux de nitrates**

Afin d'étudier la dynamique du transfert des pollutions azotées à l'échelle du bassin tout entier, les flux moyens annuels sous-racinaires ont été calculés à l'aide de STICS spatialisé sur une période de 20 ans en utilisant un fichier de données météorologiques couvrant la période 1970-1990 et le fichier des pratiques agricoles moyennes regroupées par zone pour la période 1990-2000. Ce schéma de dix années de pratiques agricoles étant juxtaposé à l'identique pour couvrir la période de 20 ans de simulation. L'irréalisme apparent d'un tel scénario tient au fait que l'étude ne porte pas sur une tentative de reproduction du passé de l'évolution des nitrates dans le bassin mais plutôt sur l'évaluation des impacts futurs d'une politique de « laisser-faire » où les conditions de climat et d'exploitation agricole actuelles seraient reproduites indéfiniment.

En 2003, le temps d'exécution du programme STICS spatialisé pour une série de 40 ans au pas de temps journalier en tenant compte de 7 zones agricoles INRA-Mirecourt seulement avait été de 28 jours d'exploitation sans discontinuer. Il était donc évident que de gros efforts de logiciel étaient nécessaires pour rendre réalisable la présente étude. Le code FORTRAN initial de STICS fourni par l'INRA a été parallélisé par notre collègue P. Goblet du CIG-ARMINES (Van der Lee et al, 2002).

La parallélisation permet l'utilisation simultanée de plusieurs unités de traitement CPU (Computer Processing Unit) pour exécuter le code FORTRAN dans une configuration dite de « cluster » sous LINUX. Les CPUs utilisées peuvent ainsi traiter chacune une UGSM (Unité générale de simulation) du modèle STICS de manière indépendante des autres. Lorsqu'il emploie un « cluster » de 7 CPUs en parallèle, ce nouveau code permet d'effectuer la simulation au pas de temps journalier sur les 12 zones pour 40 ans en deux jours de calcul. Notons d'autre part qu'au cours de l'année 2004, des modifications dans le code de STICS version 4 ont été apportées suivant les recommandations de l'INRA-Laon.

Une fois le calcul de STICS spatialisé effectué, on calcule sur la période 1990-2000 la moyenne annuelle des flux d'azote sous-racinaire et les données de rendements (kg/ha/an par plante) pour chaque zone polygonale Unité Générale de Simulation (UGSM). Ces résultats sont exportés et visualisés sous ArcView. La figure 13 présente le flux d'azote sous-racinaire annuel moyen ainsi obtenu sur les zones renseignées par l'INRA Mirecourt. Notons que celles-ci débordent à l'Est de la couronne de la Craie du Crétacé.

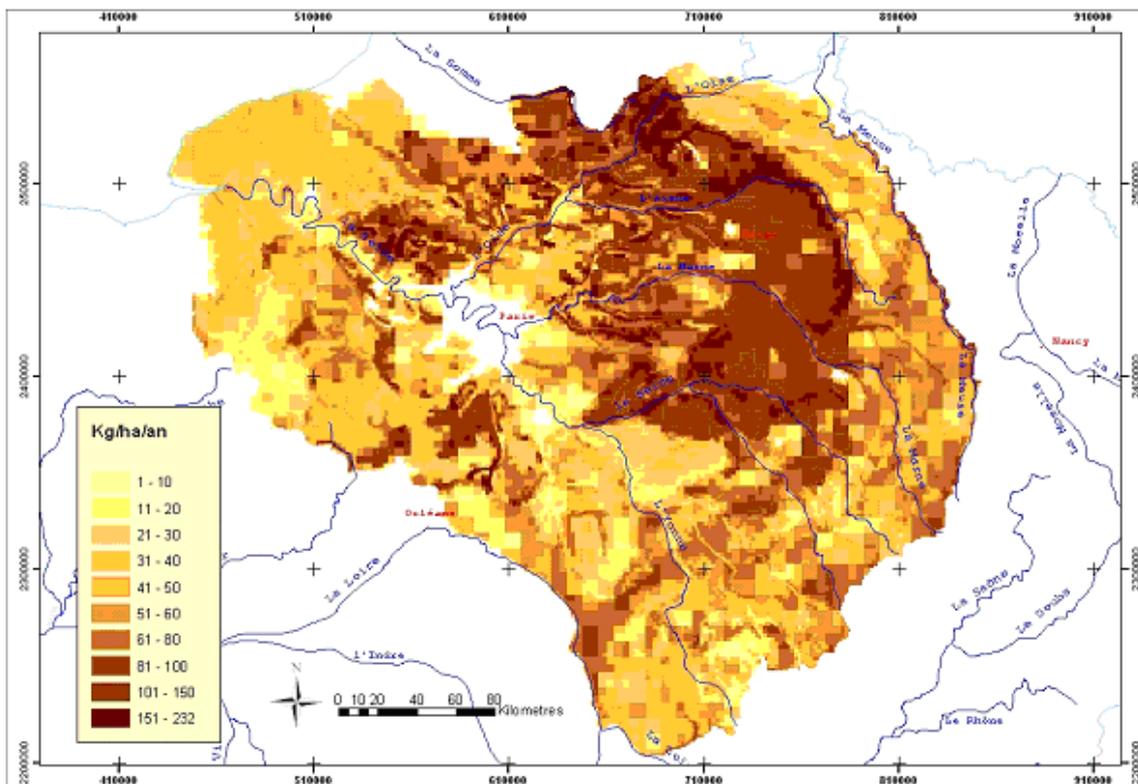


Figure 13: Flux de nitrates annuel moyen (période 1990-2000) calculé par STICS à la base de la zone racinaire pour les zones renseignées par l'INRA Mirecourt.

#### 4.6. Modélisation du transfert des nitrates dans les aquifères

Pour réaliser le couplage entre les résultats fournis par STICS spatialisé et la chaîne MODCOU-NEWSAM (Figure 8), on calcule une concentration en nitrates pour chaque maille de MODCOU en combinant les flux d'eau délivrés par la couche superficielle MODSUR et les flux d'azote fournis par STICS par UGSM. La Figure 14 donne la répartition spatiale de ces concentrations avant leur introduction dans le module NONSAT de la chaîne MODCOU. Notons que dans le cadre de la présente étude, la chaîne MODCOU est utilisée à un pas de temps annuel et que les facteurs correctifs de calage du modèle couplé (voir, Chapitre 5 - Calage du modèle sur l'historique des concentrations in situ en nitrates dans les aquifères) ont été appliqués à ce niveau aux concentrations sous-racinaires avant routage dans NONSAT. A savoir : pour l'Oligocène les concentrations ont été divisées par 1.7, pour l'Eocène par 2.0 et pour la Craie, elles ont été multipliées par 1.3.

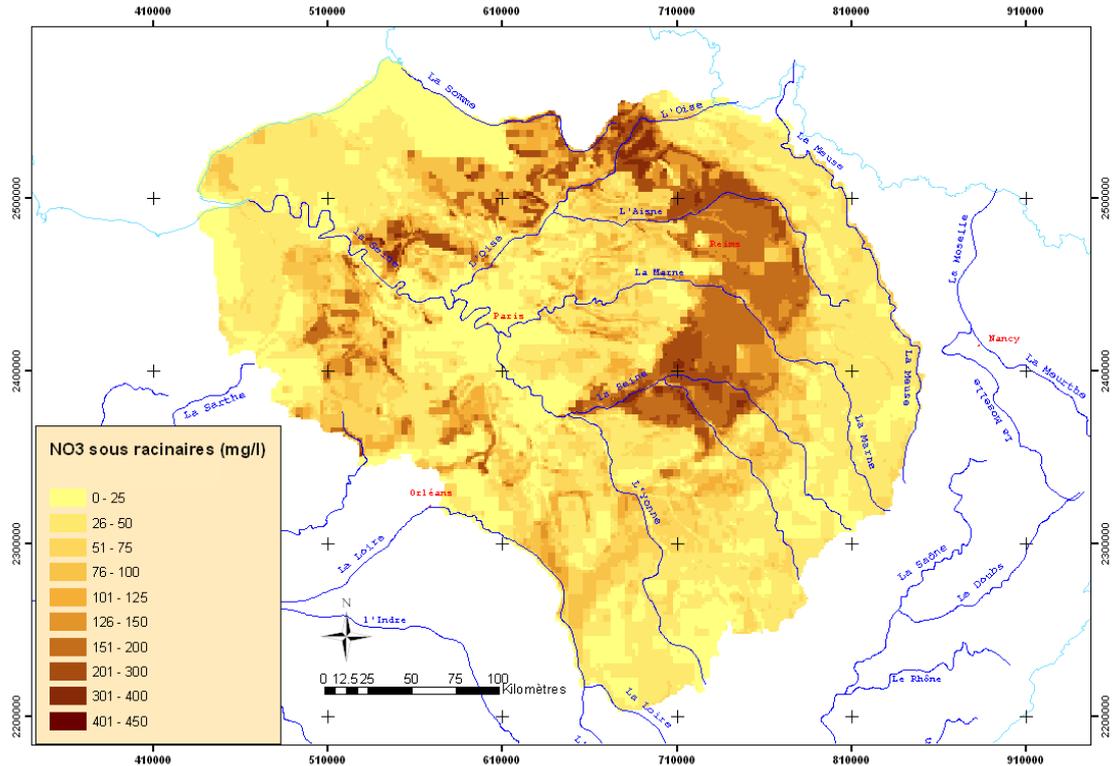


Figure 14: Concentration sous racinaire moyenne annuelle résultant de la combinaison des résultats de STICS et de MODSUR..

Le modèle permet de rendre compte du régime transitoire en tenant compte de la dynamique du transfert des nitrates dans la zone non saturée et dans les aquifères. Le calcul a d'abord été mené sur une période globale de 200 ans au pas de temps annuel. Les flux sortant de la zone sous racinaire servent à alimenter la zone non saturée sur la période globale de simulation. Les flux sortant de la zone non saturée rejoignent ensuite le système aquifère multicouche où une simulation de transfert est effectuée, toujours en régime transitoire. De cette manière, la réponse du système souterrain à une pollution diffuse intègre, d'une part, le transfert des nitrates dans la zone non saturée et, d'autre part, la vitesse de déplacement des nitrates au sein des aquifères. A titre d'illustration, les figures 15 à 17 présentent les concentrations en nitrates calculées dans la formation de l'Oligocène à  $t = 10, 25$  et  $50$  ans. On remarquera qu'à  $t = 0$ , les concentrations initiales dans les aquifères et la zone non saturée sont supposées nulles.

Pour rendre compte des valeurs atteintes dans le cas d'un régime « quasi-permanent » stabilisé, l'exploitation du modèle est prolongée sur une durée de 2000 ans au pas de temps annuel. Les figures 18 à 20 présentent les cartes de concentrations en nitrates ainsi obtenues dans les trois aquifères modélisés.

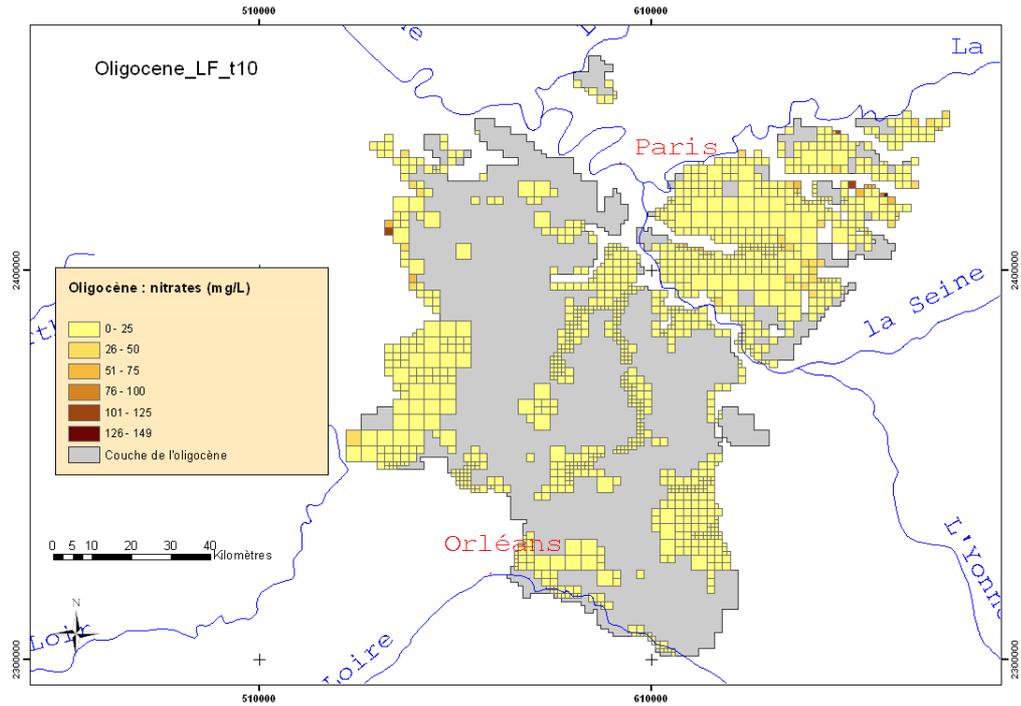


Figure 15 : Concentration en nitrates calculée à  $t = 10$  ans dans la formation aquifère de l'Oligocène. On remarque que comme la simulation STICS-MODCOU débute à concentration nulle, peu de cellules présentent des concentrations notables au bout de 10 ans.

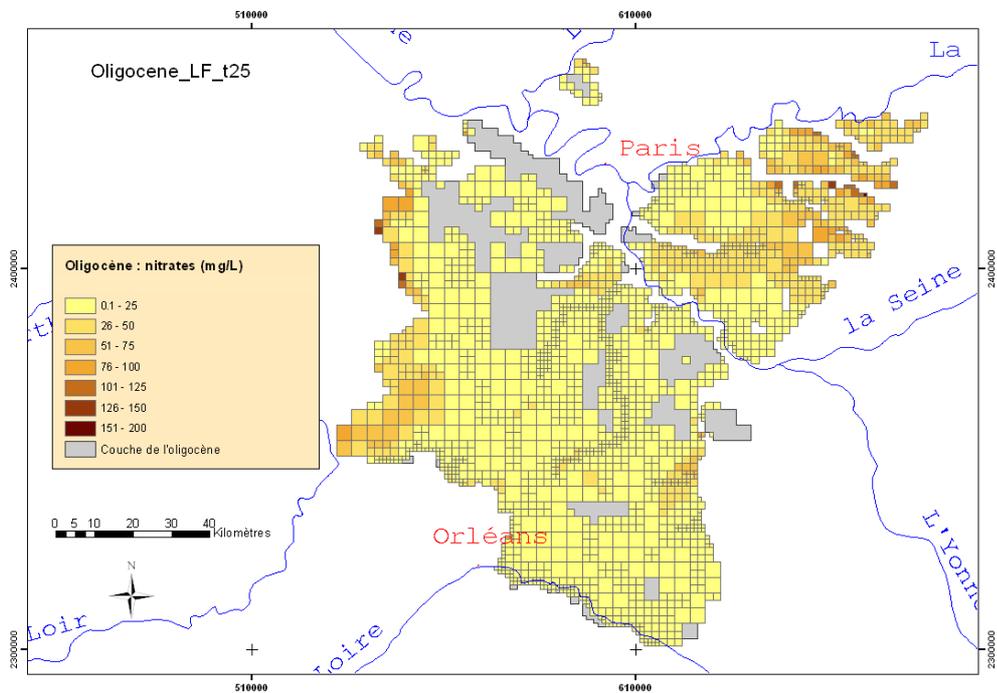


Figure 16 : Concentration en nitrates calculée à  $t = 25$  ans dans la formation aquifère de l'Oligocène.

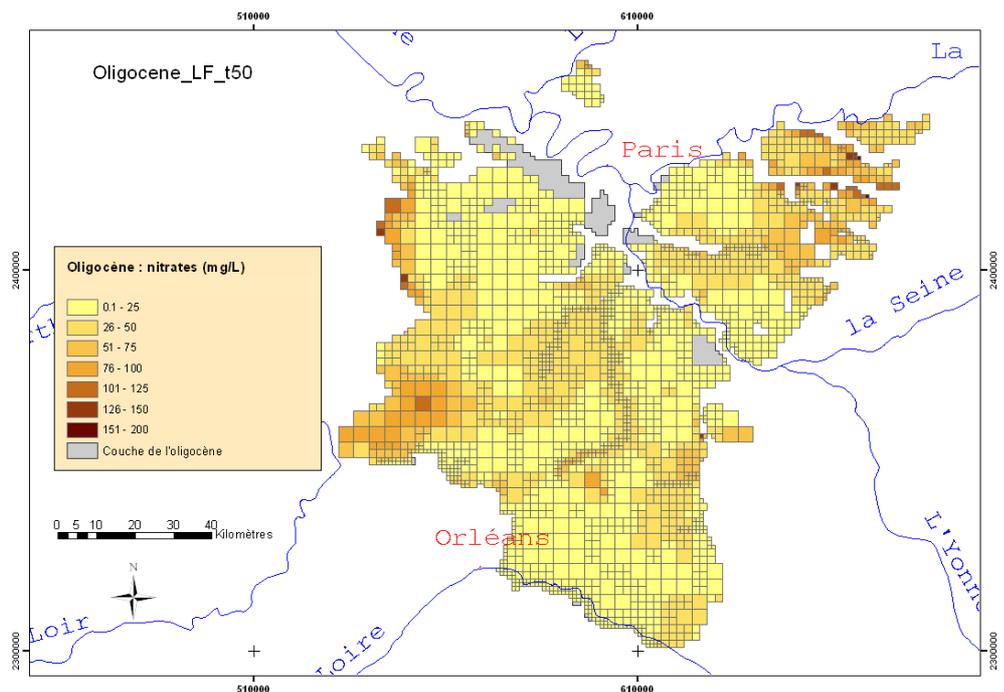


Figure 17 : Concentration en nitrates calculée à  $t=50$  ans dans la formation aquifère de l'Oligocène.

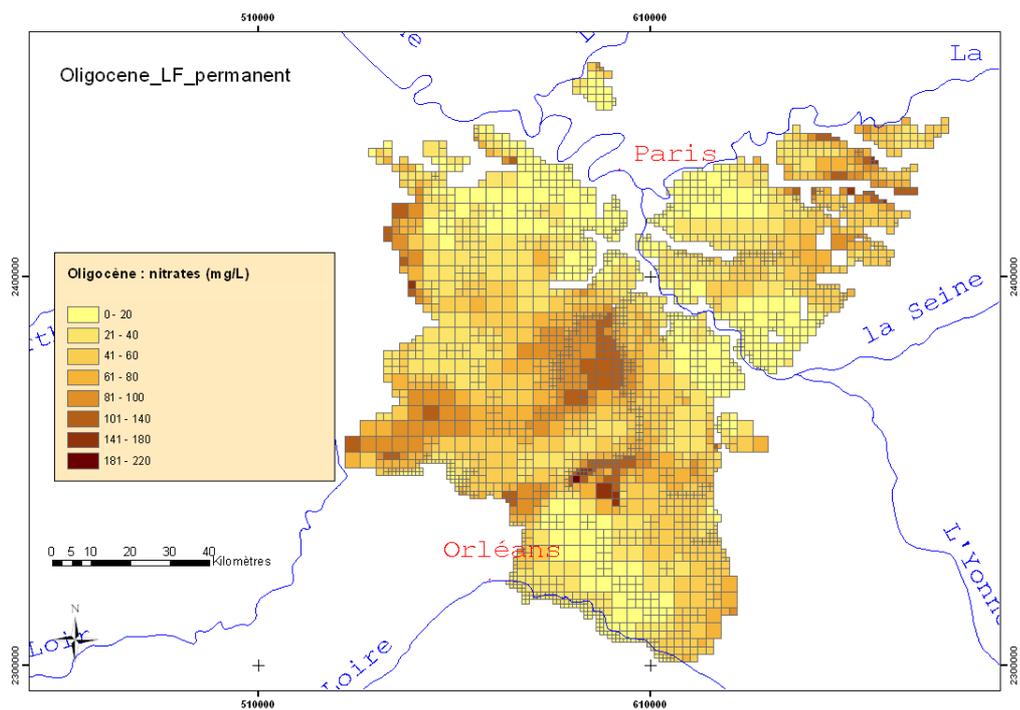


Figure 18: Concentration en nitrates calculée par STICS-MODCOU en régime quasi-permanent (2000 ans) dans la formation aquifère de l'Oligocène.

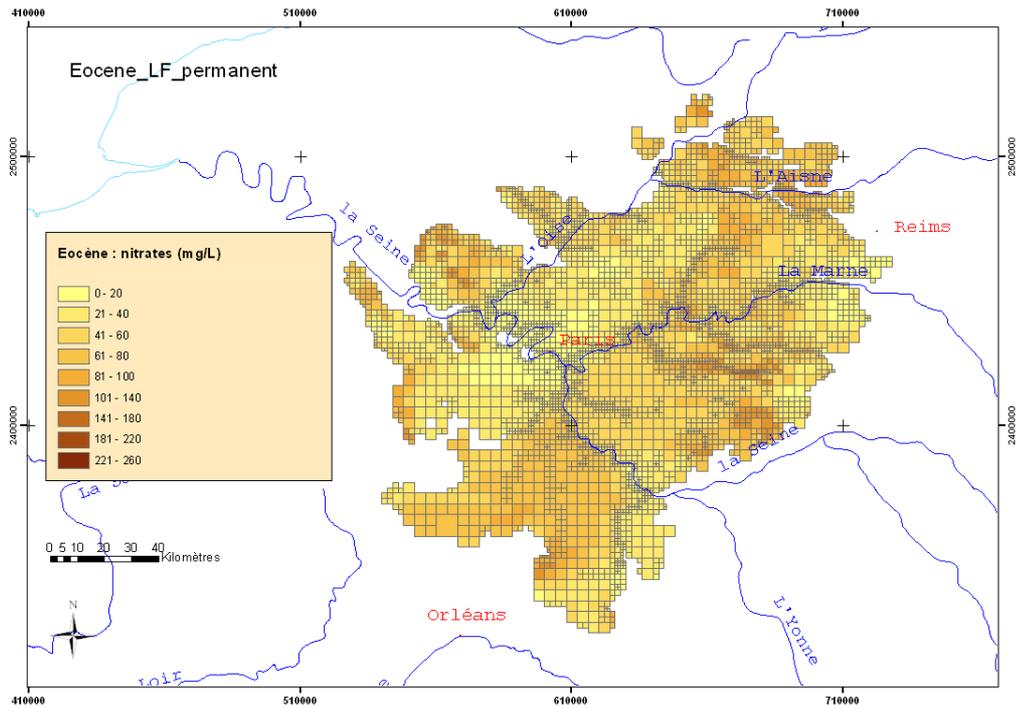


Figure 19 : Concentration en nitrates calculée par STICS-MODCOU en régime quasi-permanent (2000 ans) dans la formation aquifère de l'Eocène.

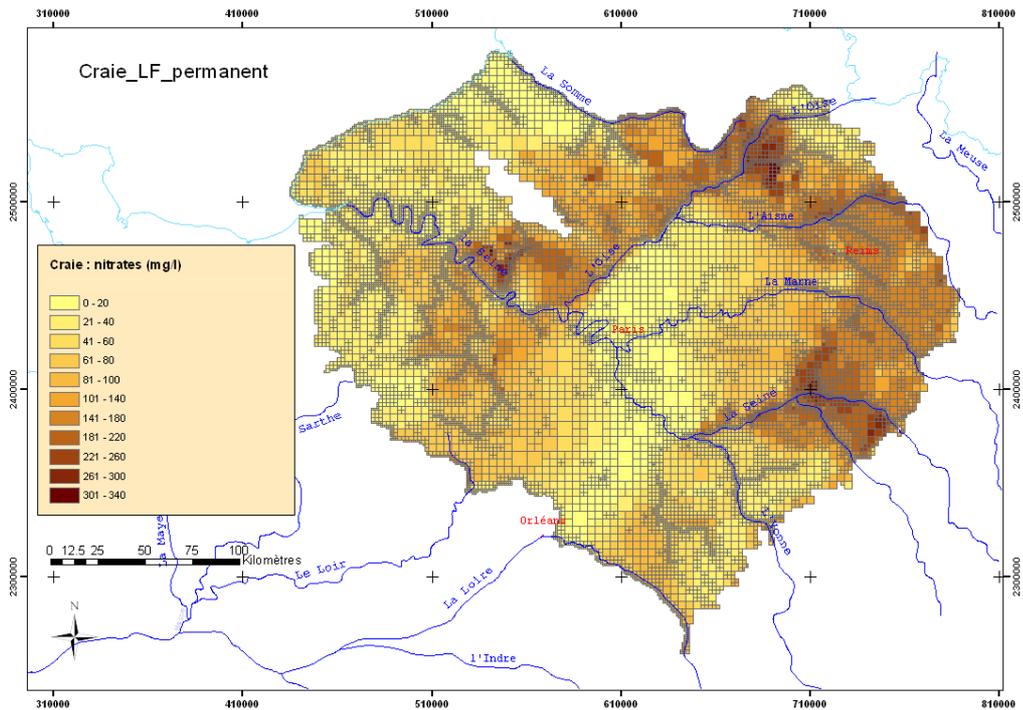


Figure 20 : Concentration en nitrates calculée par STICS-MODCOU en régime quasi-permanent (2000 ans) dans la formation aquifère de la Craie.

Une fois définies les valeurs de concentrations stabilisées, l'exploitation du modèle est reprise au pas annuel sur une période de 500 ans, afin de déterminer pour chacune des mailles de chaque aquifère, le temps nécessaire pour atteindre 95% de la valeur stabilisée acquise précédemment. Ce calcul permet de définir pour chaque maille, le temps d'établissement d'un régime stabilisé (idem, « quasi-permanent »). Les figures 21 à 24 présentent la cartographie de ce temps de stabilisation par aquifère et par masse d'eau dans le cas d'un scénario « laisser faire » à partir de 2005.

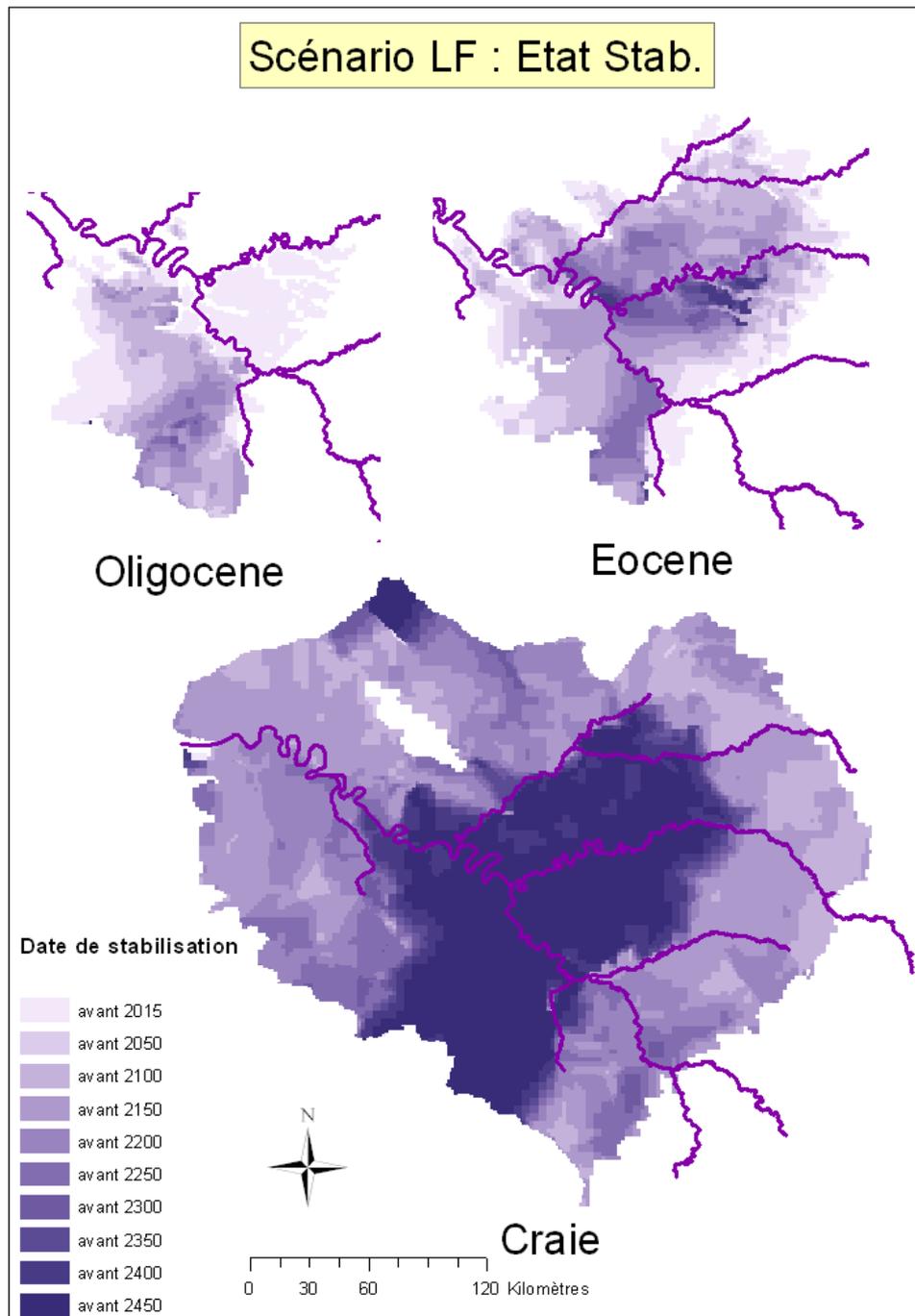


Figure 21 : Dates d'atteinte du régime stabilisé par aquifère en scénario « laisser faire » à partir de l'année 2005..

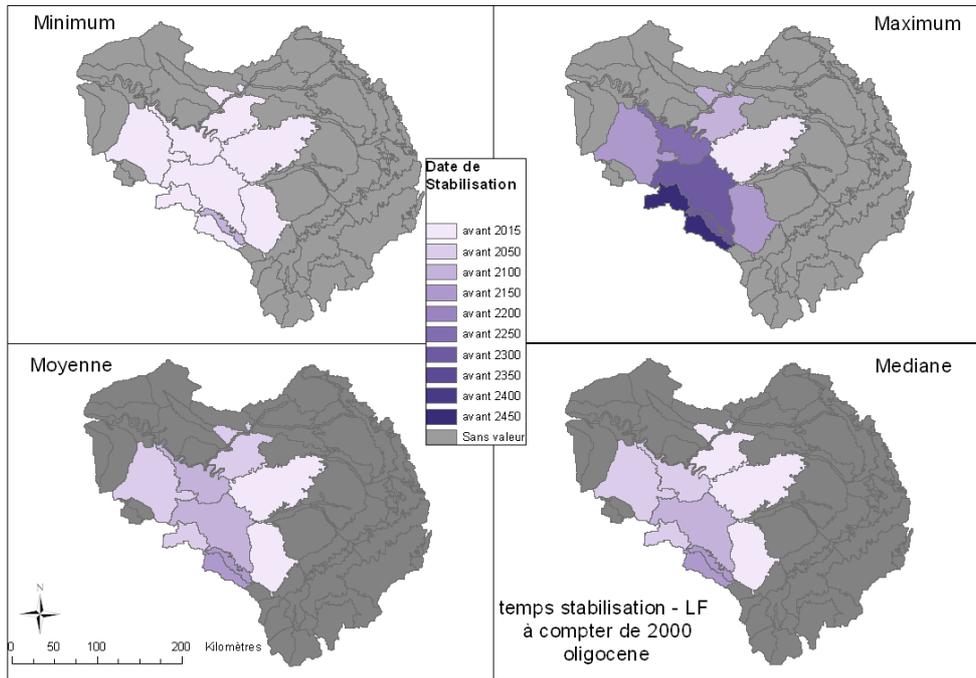


Figure 22 : Dates d'atteinte du régime stabilisé par masse d'eau pour l'aquifère de l'Oligocène en scénario « laissez faire » à partir de l'année 2005. .

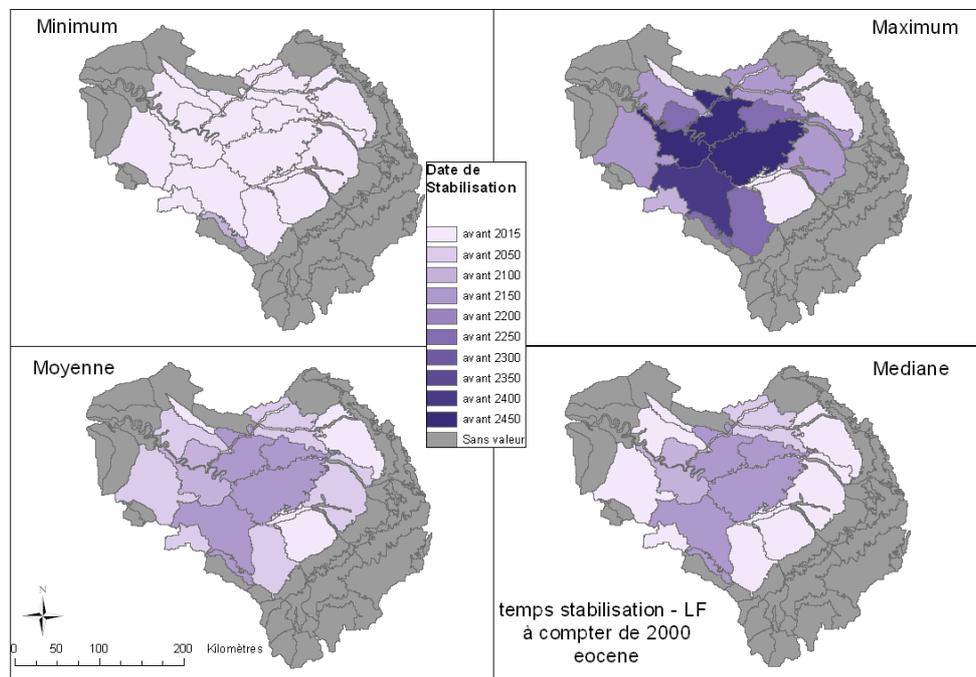


Figure 23 : Dates d'atteinte du régime stabilisé par masse d'eau pour l'aquifère de l'Eocène en scénario « laissez faire » à partir de l'année 2005.

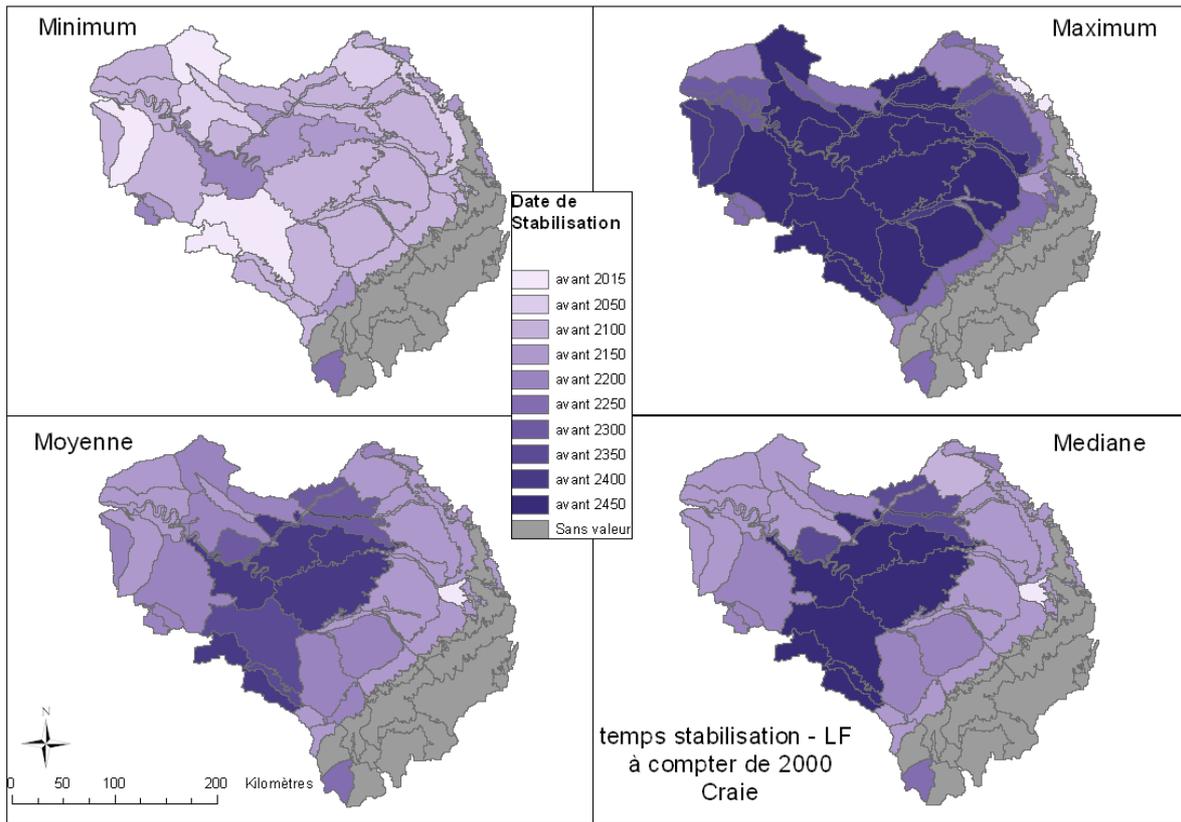


Figure 24 : Dates d'atteinte du régime stabilisé par masse d'eau pour l'aquifère de la Craie en scénario « laissez faire » à partir de l'année 2005. .

## 5. Calage du modèle sur l'historique des concentrations in situ en nitrates dans les aquifères (1970-2000)

### 5.1. Etude rétrospective des concentrations mesurées dans les aquifères

En 2003 (Monget et al, 2004), 4442 points de captage (Fig. 25) de la base de données de l'Observatoire National de la Qualité des Eaux Souterraines (ONQES) avaient été utilisés pour caractériser l'évolution des nitrates sur la période 1975-1988. En 2004, environ 20% de ces forages ont pu être enrichis grâce aux apports du fichier SISE EAUX (Système d'Information en Santé - Environnement) de la DDASS et dans une moindre mesure du fichier ADES (Banque Nationale d'Accès aux Données sur les Eaux Souterraines) géré par le BRGM. Cet apport supplémentaire a permis d'accéder dans de meilleures conditions que précédemment à un historique portant sur la période 1970-2000 soit une période de 30 ans.

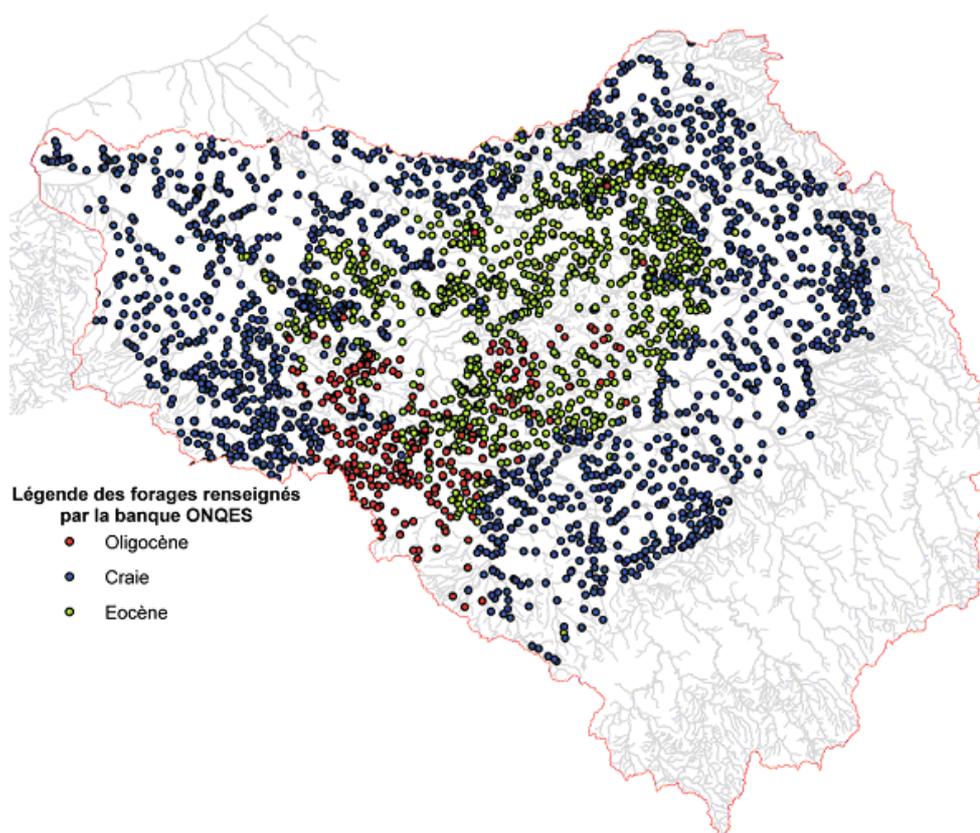


Figure 25 : Couverture géographique de l'ensemble des 6500 forages disponibles dans la base ONQES sur le bassin de la Seine

A titre d'illustration, la figure 26 présente l'évolution des histogrammes de concentrations en nitrates, mesurées en  $\text{mgNO}_3/\text{l}$ , sur une période de 5 ans allant de 1980 à 1984 pour l'ensemble du bassin. On remarque que ceux-ci présentent un étalement important avec une atténuation progressive du pic caractérisant les forages peu contaminés au fil du temps.

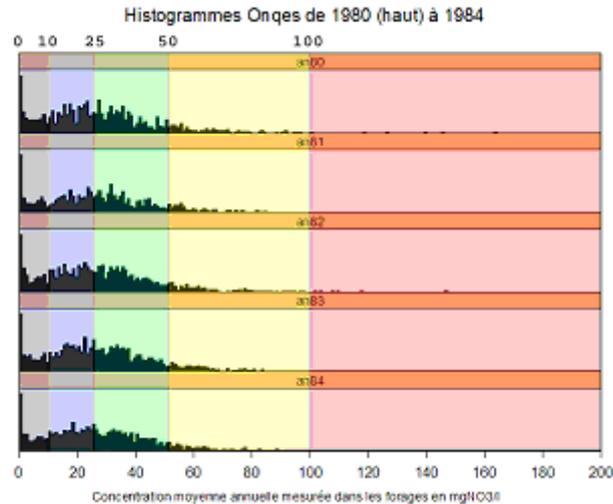


Figure 26 : Evolution annuelle des histogrammes de concentrations en nitrates pour la population des forages recensés dans la base ONQES sur l'ensemble du bassin de la Seine. Les seuils colorés sont inspirés du code de couleur recommandé par SEQ-Eau.

La recherche d'indices globaux pouvant caractériser l'état de dispersion d'un traceur au travers de la loi de distribution statistique de sa concentration dans l'espace a fait l'objet de nombreux travaux dans le domaine de la dispersion des contaminants ou traceurs contenus dans les panaches se libérant dans l'atmosphère (Munro, 2001). Les lois de la diffusion appliquées à la dispersion des polluants par transport turbulent donnent des formes d'histogrammes de concentrations variant selon le schéma présenté en figure 27. On remarque la similarité de forme entre celle du cas (B) caractérisant un état de dispersion moyenne et celle de l'histogramme des valeurs de nitrates mesurées dans les captages de la base de données ONQES (Fig. 26).

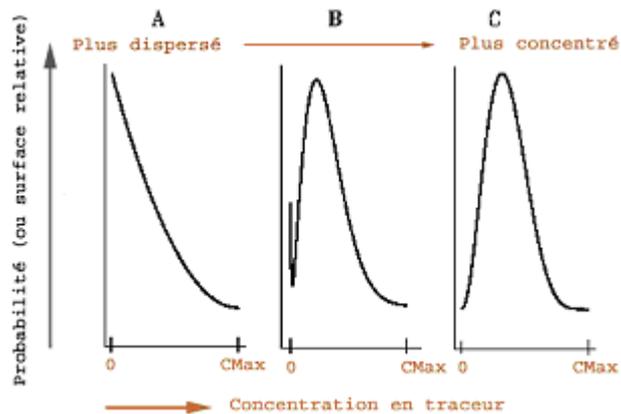


Figure 27: Schéma théorique montrant l'évolution de la densité de probabilité des concentrations d'un traceur.

Bien que nous ne connaissions pas encore de travaux équivalents dans le domaine de la dispersion des polluants en nappes souterraines, on remarque que cette similitude de forme s'applique aussi à l'évolution des formes d'histogrammes de concentrations produits par le modèle STICS-MODCOU au fur et à mesure de l'avancée de la durée de simulation (Figure 28).

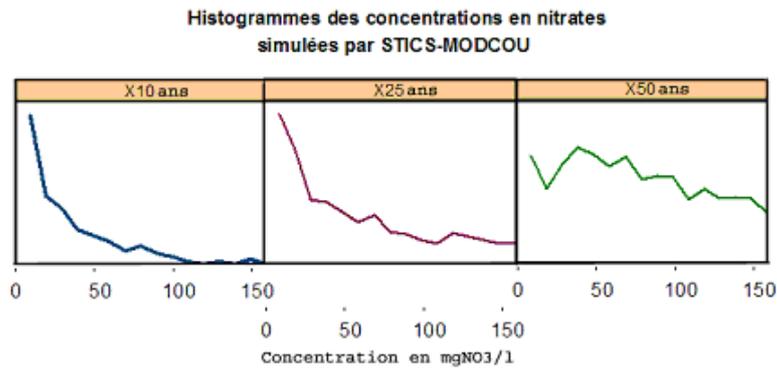


Figure 28: Evolution des formes d'histogramme de concentrations en nitrates au fil du développement chronologique du modèle STICS-MODCOU appliqué à l'oligocène.

Compte tenu du fait que les distributions statistiques observées pour les valeurs des concentrations de nitrates dans un aquifère qu'elles soient mesurées ou simulées ne présentent pas de forme proche de celle d'une distribution de Gauss (elles ne sont en particulier pas symétriques) et compte tenu de leur grande dispersion (ou « étalement »), ceci a conduit caractériser statistiquement la population des valeurs de concentrations en nitrates par la médiane de leur distribution plutôt par leur moyenne. La médiane est connue comme un estimateur plus « robuste », beaucoup moins sensible aux valeurs anormalement élevées en particulier.

L'évolution de la médiane et des deux premiers quartiles de la distribution statistique des concentrations en nitrates sur l'ensemble du bassin de la Seine montre (Figure 29) une augmentation régulière remarquablement continue et quasi-linéaire des trois indices. L'augmentation constatée pour la médiane est d'environ 0,64 mg/l. Son estimation est tirée de l'ajustement d'une droite de régression calculée en fonction du temps. On remarque que l'écart type de la distribution est d'environ 10 mg/l quelle que soit l'année d'observation.

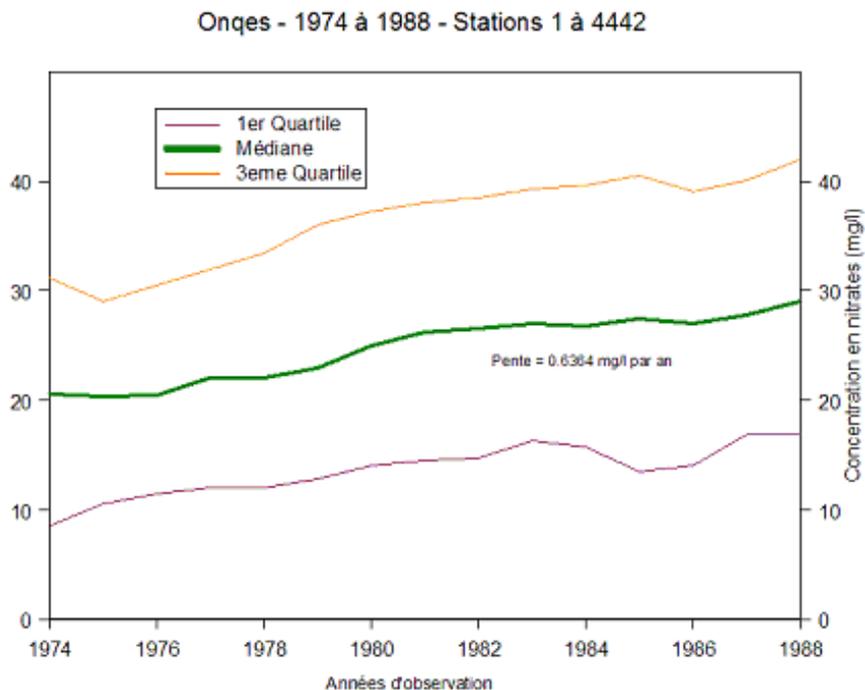


Figure 29: Evolution constatée des concentrations en nitrates dans les captages sur l'ensemble du bassin de la Seine, tous aquifères confondus (données ONQES)

Cette évolution statistique globale ne peut bien entendu témoigner avec fidélité des variations de tel ou tel captage particulier, mais il peut être intéressant de la confronter avec les données couramment publiées dans la littérature (Meybeck, 1998 et Billen, 2001). On peut en particulier constater que les captages reconnus (Figure 30) présentent des niveaux de concentrations notoirement supérieurs à ceux de la médiane de la population. On remarquera que le rythme d'accroissement des nitrates pour le captage de aquifère des calcaires de Champigny illustré ici s'apparente à celui constaté pour l'ensemble des captages du bassin, tous aquifères confondus bien que son niveau moyen soit plus élevé d'environ 20 mg/l.

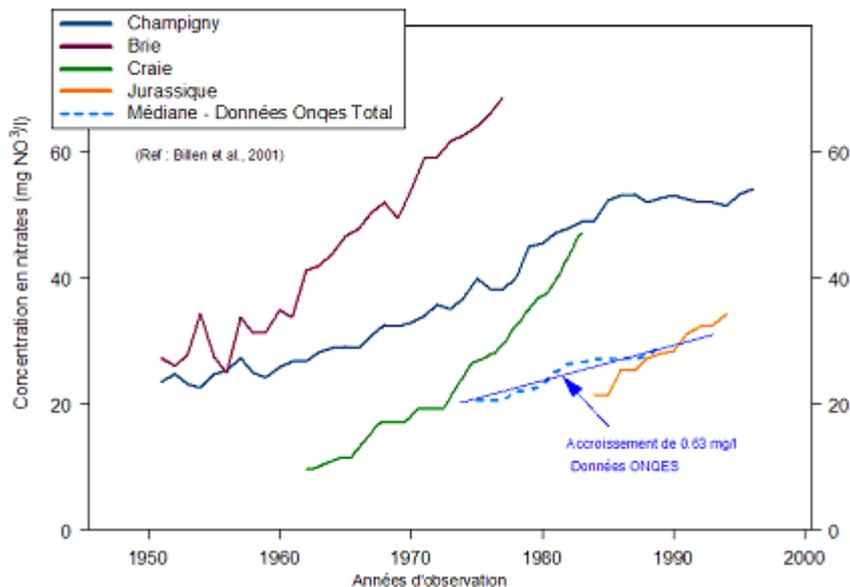


Figure 30: Comparaison de l'évolution constatée des concentrations en nitrates dans les captages pour l'ensemble du bassin de la Seine avec quelques suivis caractéristiques des aquifères principaux (Billen et al, 2001)

## 5.2. Variations spécifiques concernant les principales nappes de l'oligocène

En 2003, une première tentative de calage du modèle STICS-MODCOU avait été conduite par le CIG-ARMINES sur l'aquifère de l'Oligocène. Pour ce qui concerne les formations constitutives de cet aquifère, on remarque en particulier (Fig. 31) que le domaine de variation de la concentration en nitrates de la Beauce et des Sables de Fontainebleau se situent au-dessus du mode général, les Sables de Fontainebleau ayant un comportement proche de celui de la population totale.

En 2003, une première méthode de calage s'était basée sur un test du *Chi2* (Saporta, 1990) appliqué à la comparaison d'un histogramme des concentrations en nitrates calculées par le modèle STICS-MODCOU après k années de progression de la simulation pour l'aquifère de l'oligocène et l'histogramme normalisé en probabilité, calculé sur les données de la base de données ONQES mesurées en 1985 pour l'ensemble des forages accédant au même aquifère. Ce calage sur une année avait ensuite été suivi d'un ajustement du coefficient de réduction qu'il était nécessaire d'appliquer aux résultats du modèle pour faire en sorte que la pente d'évolution annuelle de la médiane des concentrations simulées épouse celle de l'évolution des données des forages ONQES. Un coefficient de correction de 1.5 avait ainsi été déterminé (Fig. 31).

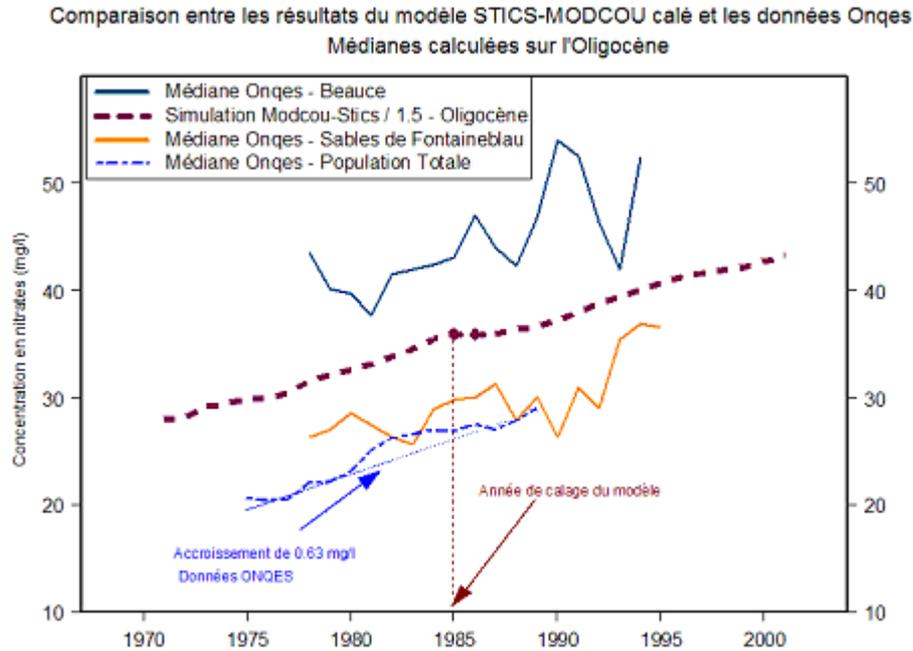


Figure 31: Premier calage du modèle STICS-MODCOU effectué en 2003 pour l'aquifère de l'oligocène.

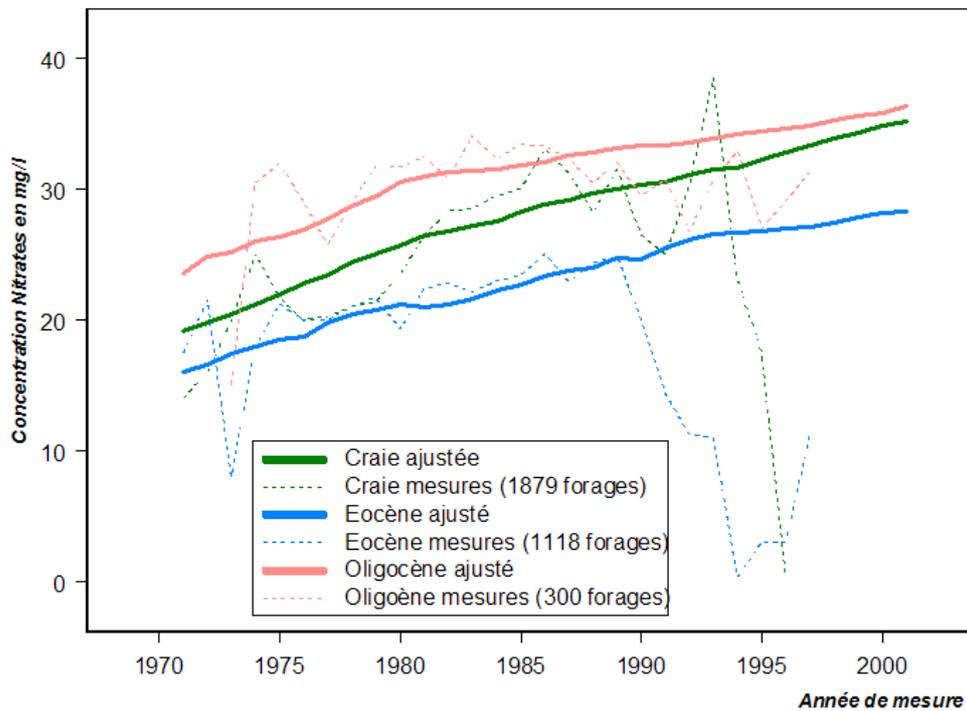
Cette première expérience de calage fit apparaître un certain nombre de défauts de conception qu'il a fallu corriger pour aborder en 2004 le calage simultané de l'ensemble des aquifères.

D'une part, il a semblé plus logique d'appliquer un coefficient correctif non pas aux concentrations dans les aquifères en sortie du modèle mais plutôt aux concentrations sous-racinaires avant entrée dans la chaîne NONSAT-NEWSAM. D'autre part, le calage en deux phases consistant à trouver la meilleure date « moyenne » puis à ajuster la pente s'est révélé être imprécis et trop sensible aux variations de valeur de la médiane observée dans les aquifères. Ces variations erratiques proviennent en grande partie des interruptions de mesure constatées dans les fichiers de type ONQES (idem, « trous de mesures »).

### 5.3. Calage statistique des concentrations en nitrates calculées sur les données observées après lissage structurel

Pour réduire l'effet des variations annuelles erratiques des valeurs de la médiane des concentrations en nitrates mesurées dans les forages ONQES – SISE EAUX et du même coût combler les interruptions de mesure que l'on peut y constater, nous avons procédé à un ajustement linéaire au moindre carrés pour chacun des 3297 points de captage pris en compte (300 pour l'Oligocène, 1118 pour l'Eocène et 1879 pour la Craie). La médiane calculée sur ces données « lissées » (on parlera ici de lissage structurel) s'est révélée beaucoup plus apte à une comparaison directe avec celle provenant des données simulées (Fig. 32).

**Comparaison courbes d'évolution de la médiane par aquifère**  
Données brutes Onqes et données ajustées



*Figure 32: Evolution comparative par aquifère de la médiane des données observées et de celle des données lissées par ajustement linéaire aux moindres carrés.*

La chronologie médiane ajustée sur 30 ans (1970-2000) pour les concentrations mesurées dans chacun des aquifères a ensuite été comparée par aquifère à la médiane des concentrations fournies par STICS-MODCOU en utilisant une technique de moindre carrés par voisinage glissant afin de déterminer le segment de 30 ans de données le plus similaires à celui de même durée extrait des données simulées sur la période 0-200 ans. Le décalage pour lequel la variance des écarts entre les deux série est minimale définit le calage optimal au sens des moindres carrés. Pour chaque aquifère, une fois le décalage estimé, on a affiné l'ajustement en faisant varier un coefficient de réduction ou de multiplication des concentrations sous-racinaires déterminée par STICS spatialisé.

Le résultat final de calage (Fig. 33 à 35) est d'une excellente qualité, la variance des erreurs ne dépassant pas 1 mg/l. La valeur intrinsèque de ce résultat doit être nuancée en constatant que la méthode de calage employée permet de faire de STICS-MODCOU un excellent estimateur de l'évolution de la médiane des concentrations en nitrates par aquifère sans aucune garantie sur sa fiabilité à l'échelle locale de chaque forage.

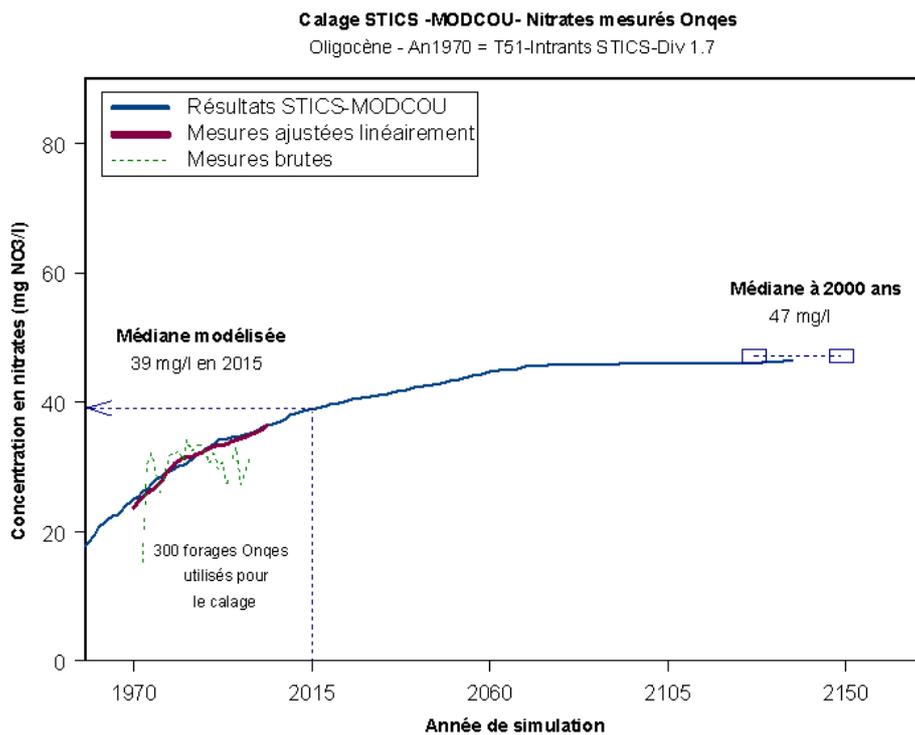


Figure 33: Calage temporel des résultats fournis par STICS-MODCOU sur les valeurs de concentrations en nitrates observées pour l'aquifère de l'Oligocène

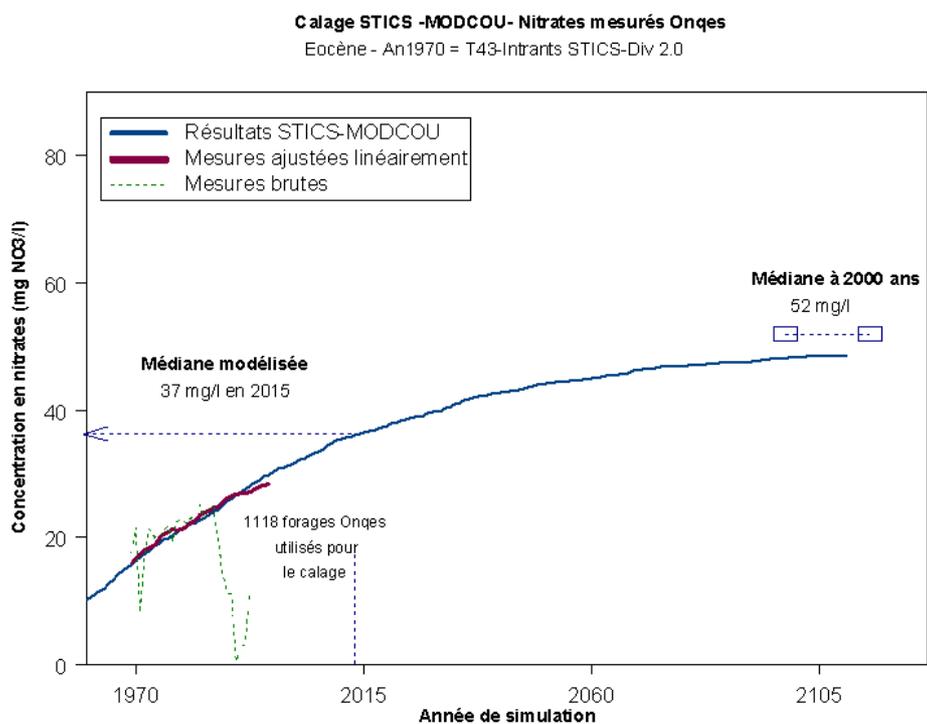
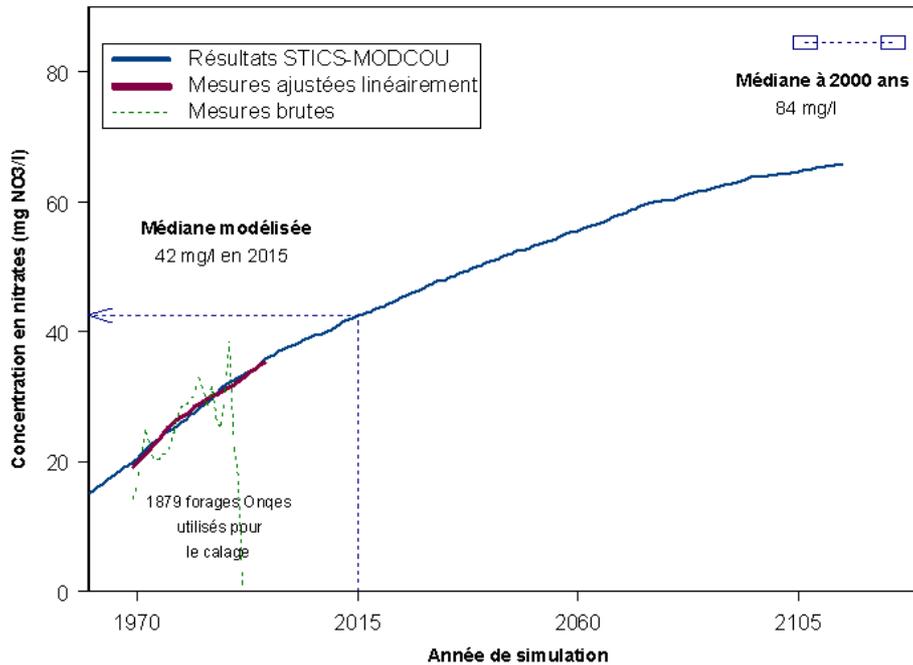


Figure 34: Calage temporel des résultats fournis par STICS-MODCOU sur les valeurs de concentrations en nitrates observées pour l'aquifère de l'Eocène

**Calage STICS -MODCOU- Nitrates mesurés Onqes**  
Craie - An1970 = T39-Intrants STICS-Mul 1.3



*Figure 35: Calage temporel des résultats fournis par STICS-MODCOU sur les valeurs de concentrations en nitrates observées pour l'aquifère de la Craie*

Les facteurs correctifs de calage du modèle couplé appliqués à ce niveau aux concentrations sous-racinaires avant routage dans NONSAT. A savoir : pour l'Oligocène les concentrations ont été divisées par 1.7, pour l'Eocène par 2.0 et pour la Craie, elles ont été multipliées par 1.3. Le calage temporel de l'année 1970 donne le temps nécessaire au modèle pour s'établir au niveau des concentrations observées pour cette année de référence. Il est respectivement de 51 ans pour l'Oligocène, 43 ans pour l'Eocène et de 39 ans pour la Craie. Ces durées n'ont pas de réelle signification physique hormis le fait qu'elles traduisent par leurs différences, une légère désynchronisation du fonctionnement des 3 aquifères dans STICS-MODCOU.

#### **5.4. Etude des erreurs d'estimation du modèle STICS-MODCOU après calage**

Comme l'objectif essentiel du calage temporel du modèle est d'en faire un outil de prédiction des concentrations en nitrates dans les aquifères, il est important d'évaluer avec plus de précision la statistique des écarts entre valeurs simulées et valeurs observées pour la période 1970-2000 afin de pouvoir attacher à chaque valeur prédite dans le futur un certain niveau de confiance.

Ces écarts sont calculés pour chaque forage entre la moyenne annuelle des concentrations mesurées et la valeur moyenne simulée telle qu'elle est affectée par STICS-MODCOU à la cellule du modèle contenant le forage. Cette statistique des écarts est présentée ici (Figure 36) pour les forages appartenant aux aquifères de l'oligocène. Elle révèle une distribution de forme quasi-gaussienne centrée (estimateur sans biais) avec un écart type d'environ 28 mg/l.

### Histogramme des erreurs de modélisation des concentrations en nitrates par MODCOU-STICS

Aquifère de l'Oligocène - Mesures in situ ONQES - SISE EAUX - Année 1985

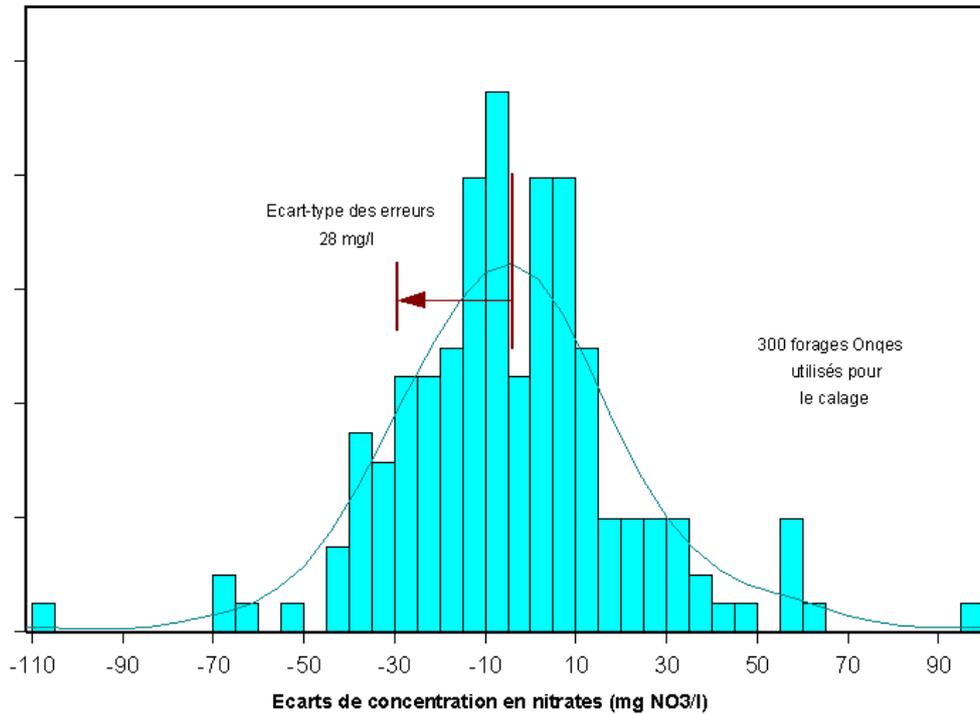


Figure 36: Histogramme des écarts existants entre valeurs mesurées pour l'année 1985 et valeurs simulées par STICS-MODCOU au droit des forages.

Il est aussi important d'étudier la variation de la statistique des écarts par aquifère en fonction du temps de façon à vérifier si les propriétés de ces écarts sont relativement indépendantes de la variabilité annuelle des phénomènes. Les Fig. 37 à 39, présentent ces évolutions annuelles au cours de la période 1970-2000 pour chacun des trois aquifères étudiés.

On constate qu'aux fluctuations près dues en début et en fin de période à une inhomogénéité manifeste du nombre de forages recensés, le modèle STICS-MODCOU donne des résultats quasiment sans biais et que l'écart type des erreurs est à peu près indépendant de l'aquifère et 25 mg/l.

Compte tenu de la forme de la distribution présentée sur la Figure 26 nous avons décidé de modéliser ces erreurs par une distribution de Gauss (idem, Loi Normale), d'écart type égal à 25 mg/l quelque soit l'aquifère et la période modélisée. Ce modèle d'incertitude sera utilisé par la suite pour évaluer la probabilité de dépassement d'un seuil de concentration (ex : 50 mg/l) à un horizon donné (ex : 2015).



**Statistique des erreurs de modélisation des concentrations en nitrates par MODCOU-STICS**  
 Aquifère de l' Oligocène - Mesures in situ ONQES - SISE EAUX

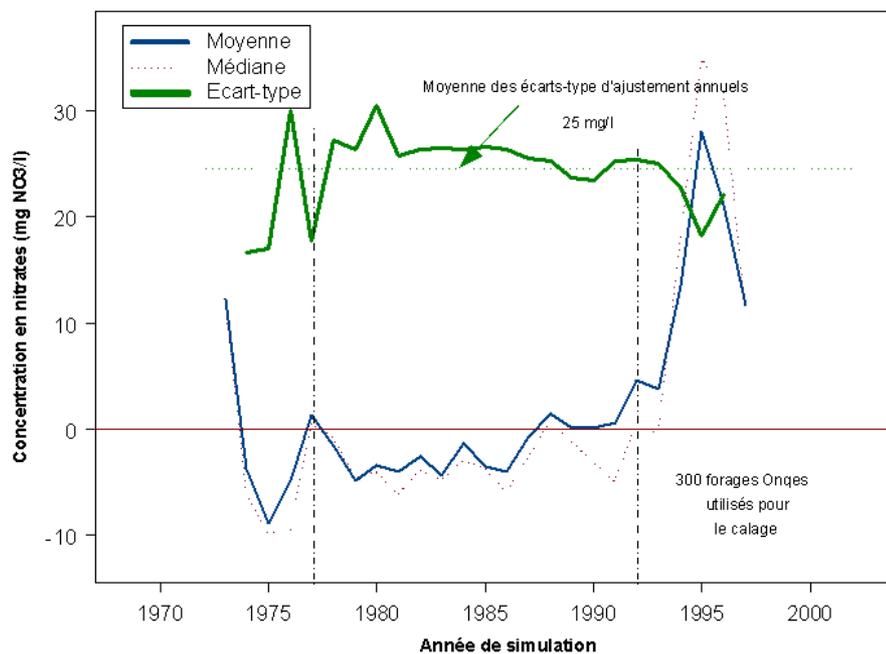


Figure 39: Evolution annuelle des paramètres statistiques décrivant la distribution des écarts existants entre valeurs mesurées et valeurs simulées par STICS-MODCOU au droit des forages de la Craie.

## 6. Prédiction de l'impact des nitrates sous différentes hypothèses de gestion

### 6.1. Estimation de l'état des concentrations en nitrates dans les nappes à l'horizon 2015 pour un scénario de « laisser faire »

#### 6.1.1 Résultats présentés par aquifère pour le « laisser faire »

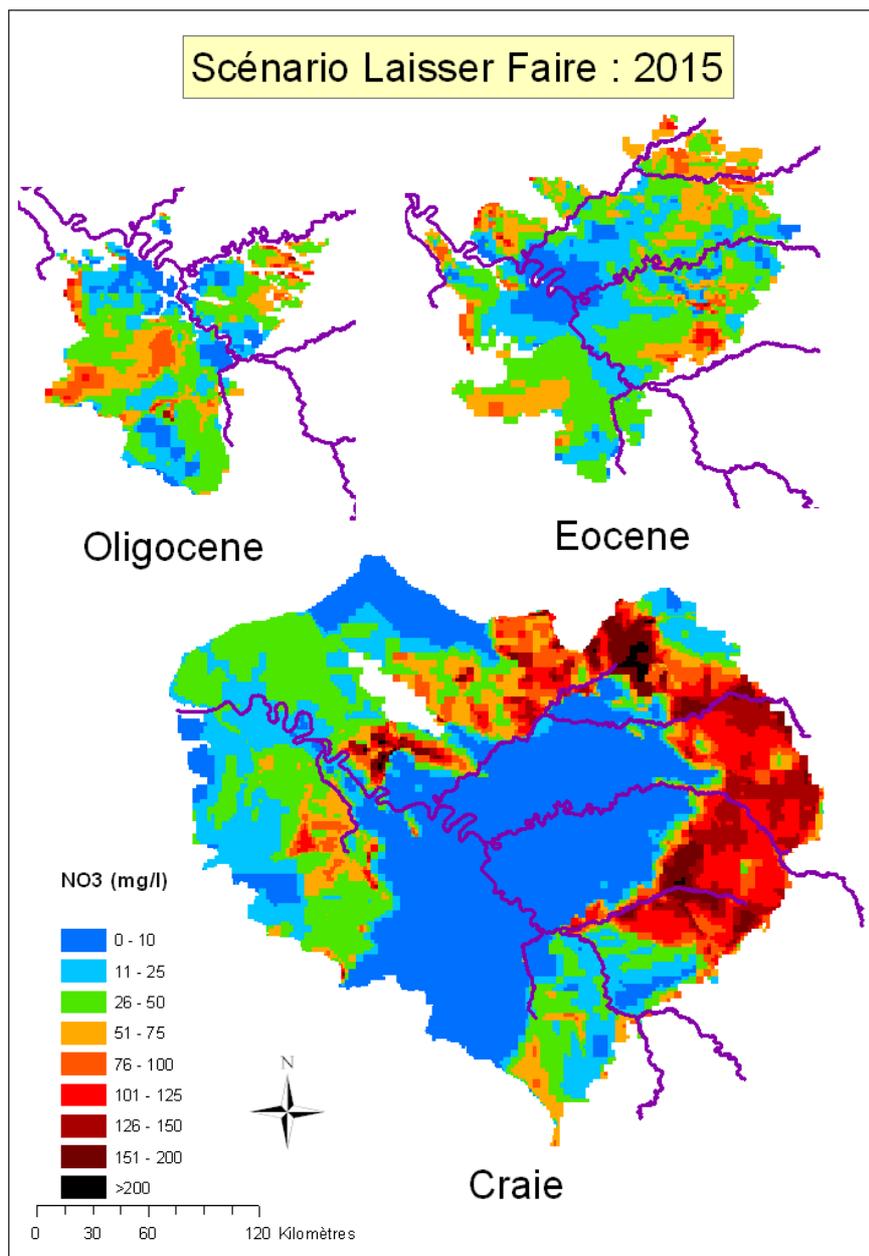
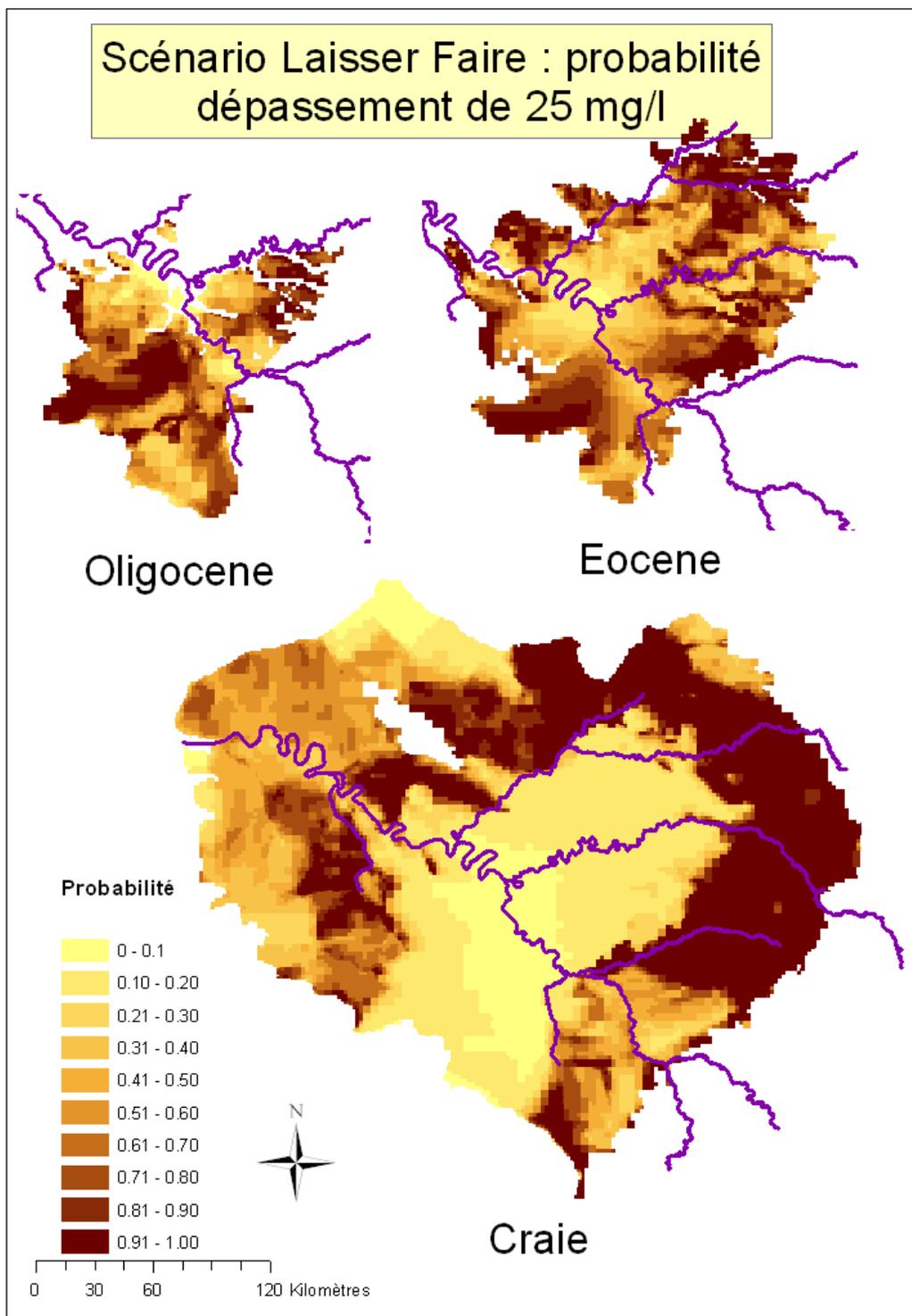
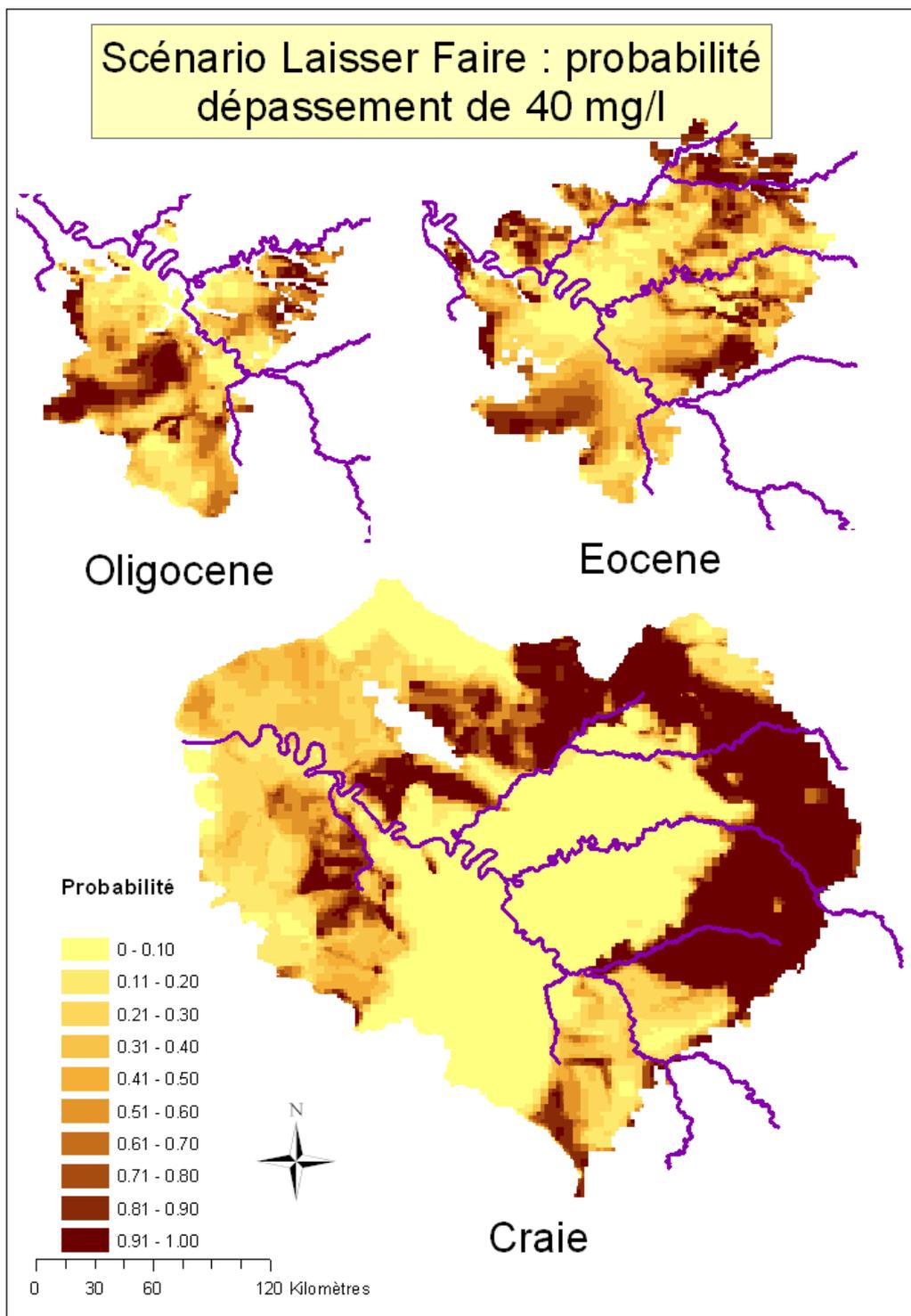


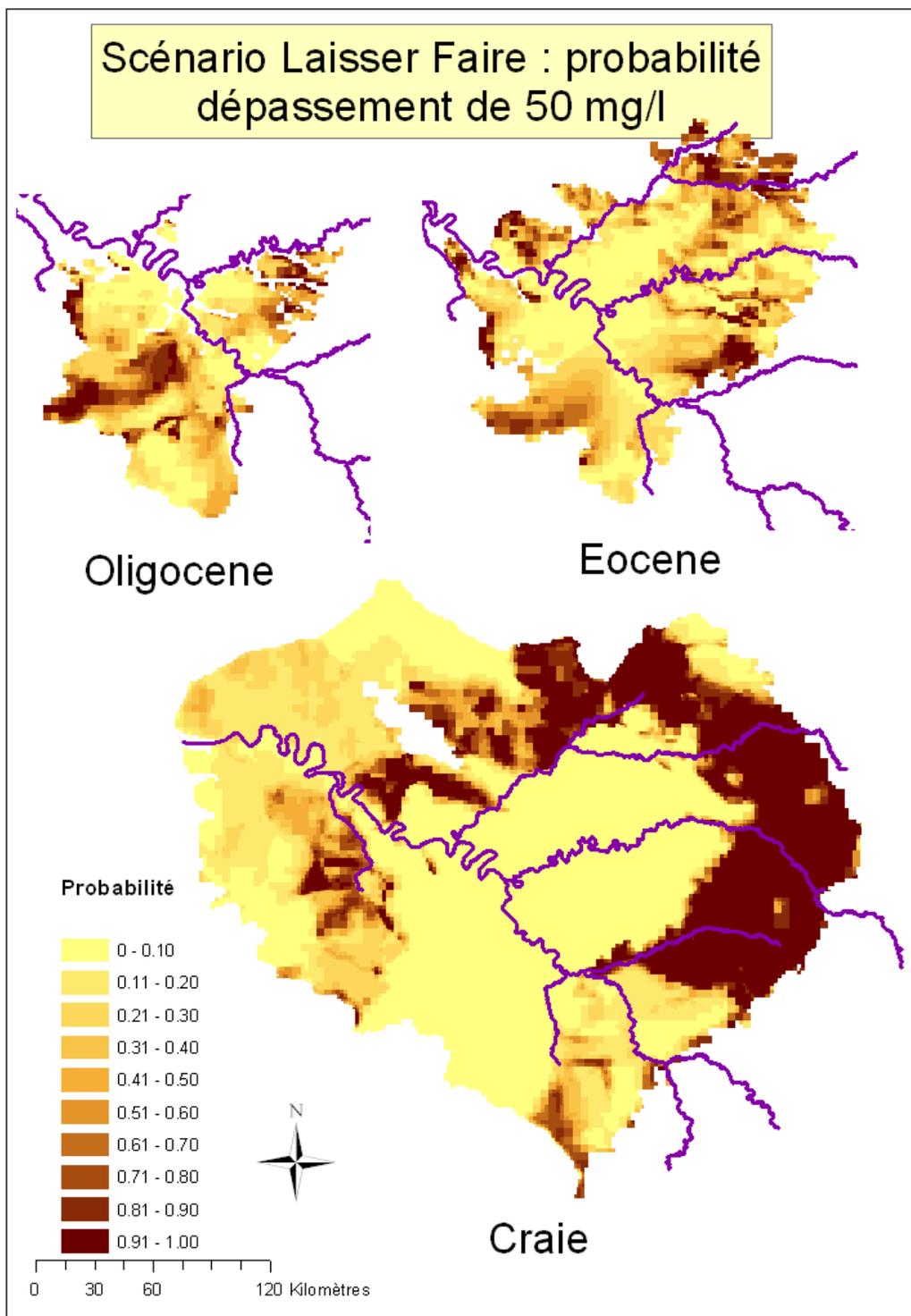
Figure 40: Projection des concentrations en nitrates dans les nappes à l'horizon 2015 pour un scénario dit de « laisser faire »



*Figure 41: Carte de probabilité de franchissement du seuil de nitrates de 25 mg/l dans les nappes à l'horizon 2015 pour un scénario dit de « laisser faire »*



*Figure 42: Carte de probabilité de franchissement du seuil de nitrates de 40 mg/l dans les nappes à l'horizon 2015 pour un scénario dit de « laisser faire »*



*Figure 43: Carte de probabilité de franchissement du seuil de nitrates de 50 mg/l dans les nappes à l'horizon 2015 pour un scénario dit de « laisser faire »*

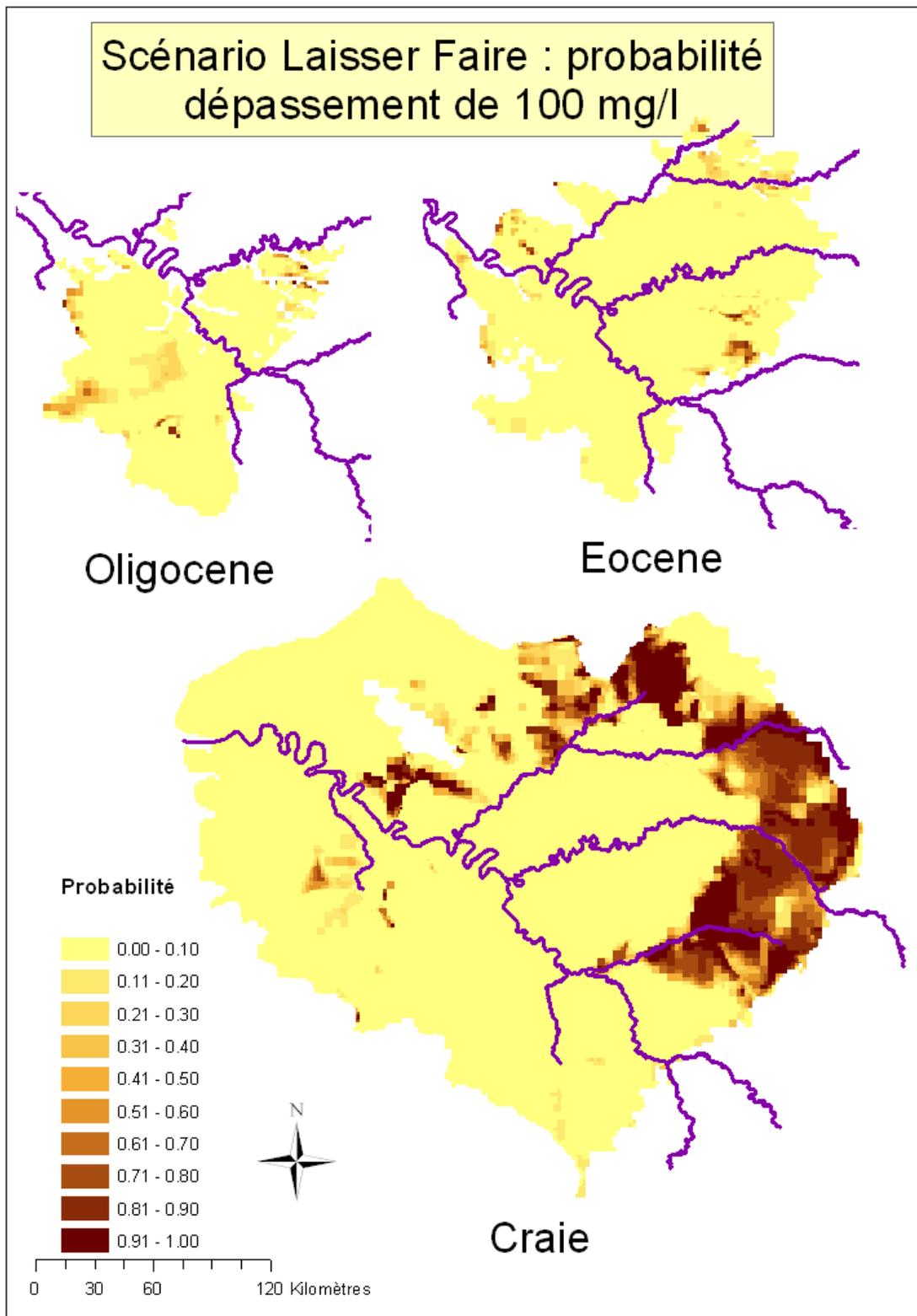


Figure 44: Carte de probabilité de franchissement du seuil de nitrates de 100 mg/l dans les nappes à l'horizon 2015 pour un scénario dit de « laisser faire »

6.1.2 Résultats présentés par masse d'eau pour le « laisser faire »

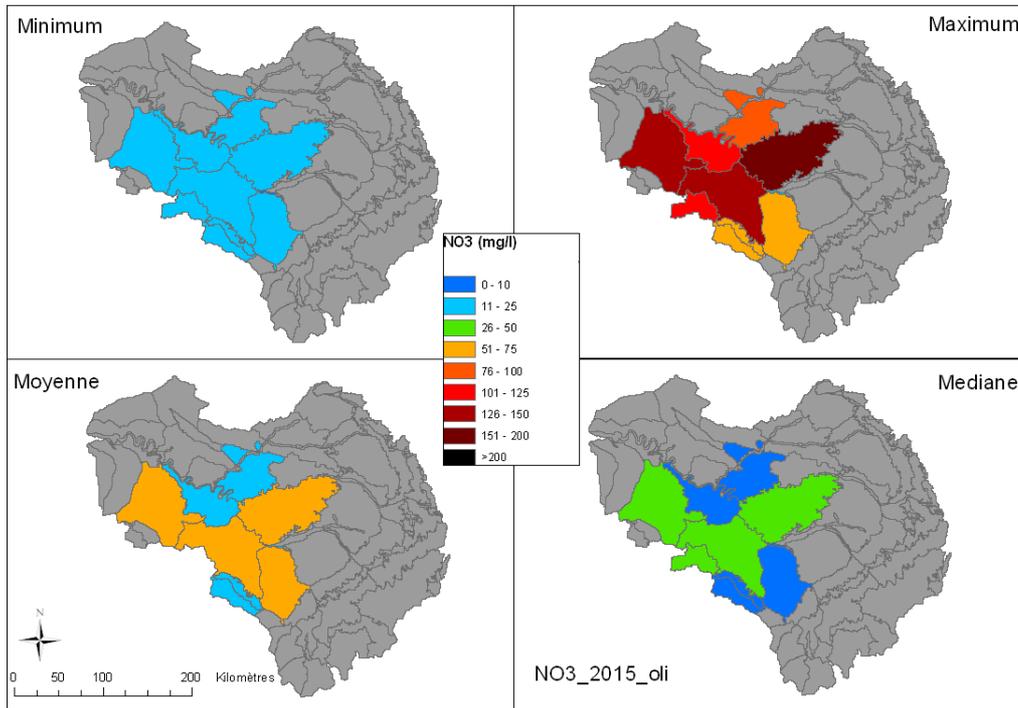


Figure 45:Projection des concentrations en nitrates par masse d'eau à l'horizon 2015 pour un scénario dit de « laissé faire » pour l'aquifère de l'Oligocène

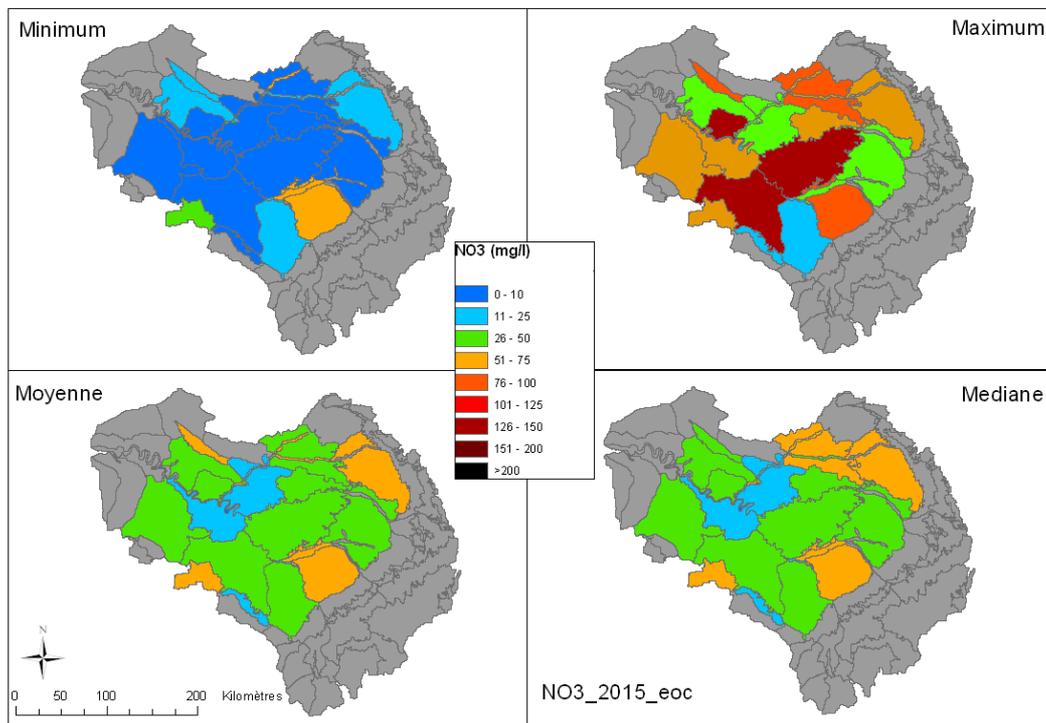


Figure 46:Projection des concentrations en nitrates par masse d'eau à l'horizon 2015 pour un scénario dit de « laisser faire » pour l'aquifère de l'Eocène

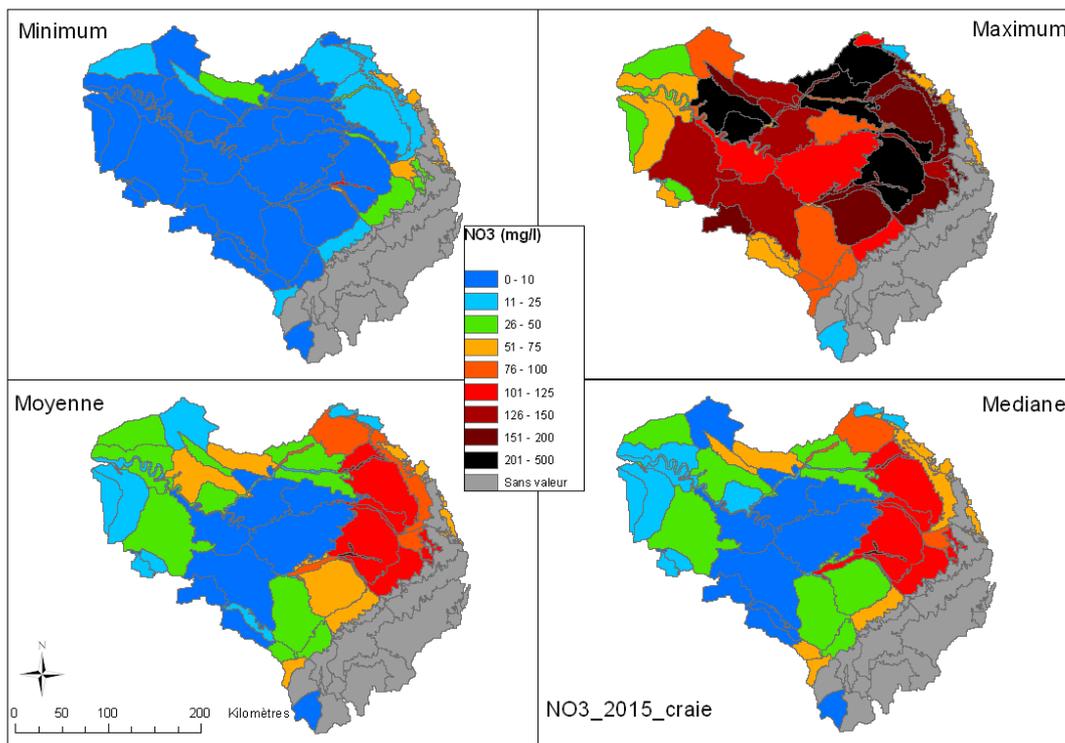


Figure 47: Projection des concentrations en nitrates par masse d'eau à l'horizon 2015 pour un scénario dit de « laisser faire » pour l'aquifère de la Craie

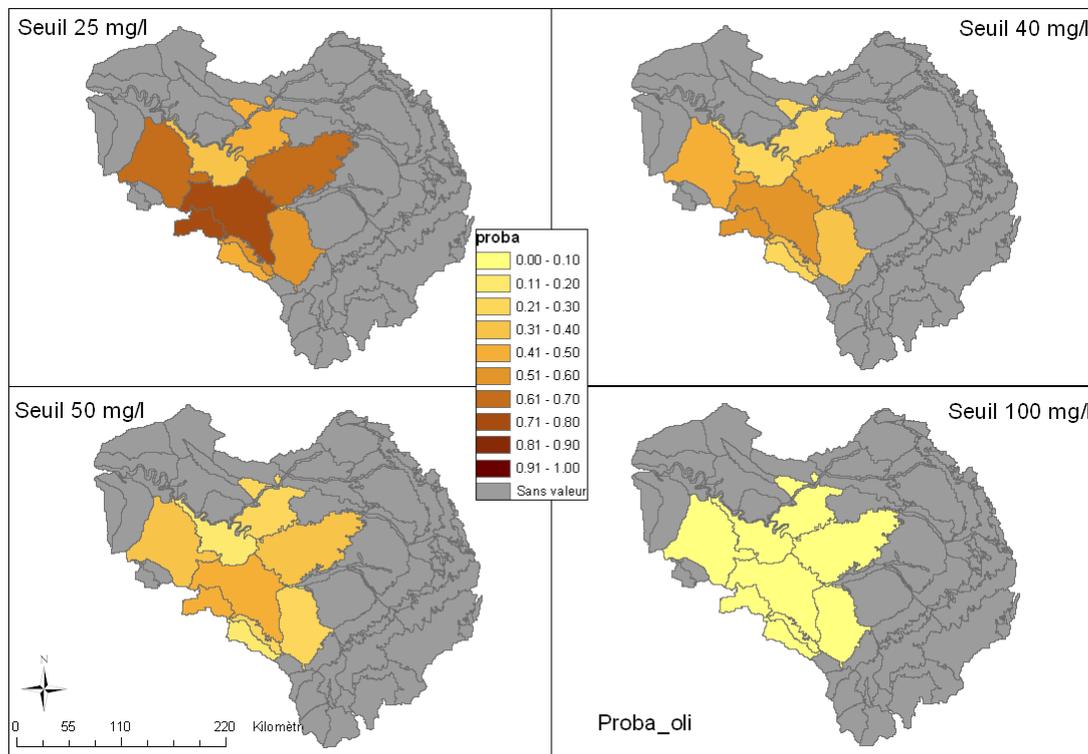


Figure 48: Carte de probabilité de franchissement de seuil de nitrates par masse d'eau à l'horizon 2015 pour un scénario dit de « laisser faire » pour l'aquifère de l'Oligocène

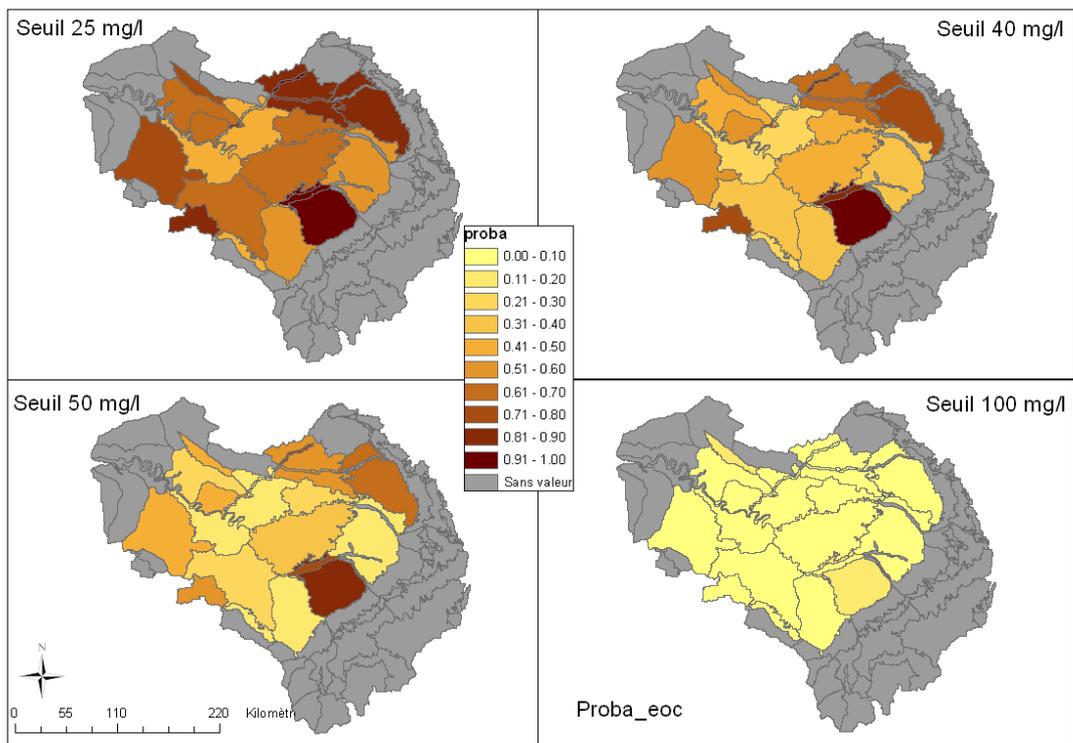


Figure 49: Carte de probabilité de franchissement de seuil de nitrates par masse d'eau à l'horizon 2015 pour un scénario dit de « laissé faire » pour l'aquifère de l'Eocène

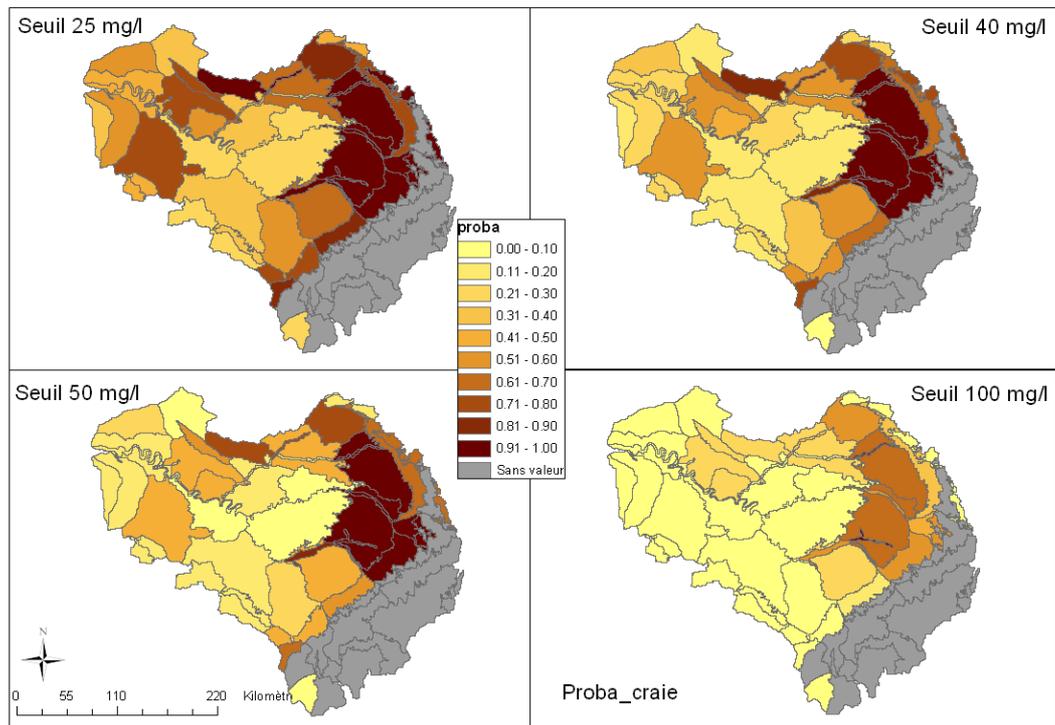


Figure 50: Carte de probabilité de franchissement de seuil de nitrates par masse d'eau à l'horizon 2015 pour un scénario dit de « laissé faire » pour l'aquifère de la Craie

## 6.2. Estimation de l'état des concentrations en nitrates dans les nappes à l'horizon 2015 pour un scénario de réduction de 20% des intrants

### 6.2.1 Résultats présentés par aquifère pour une réduction de 20% des intrants

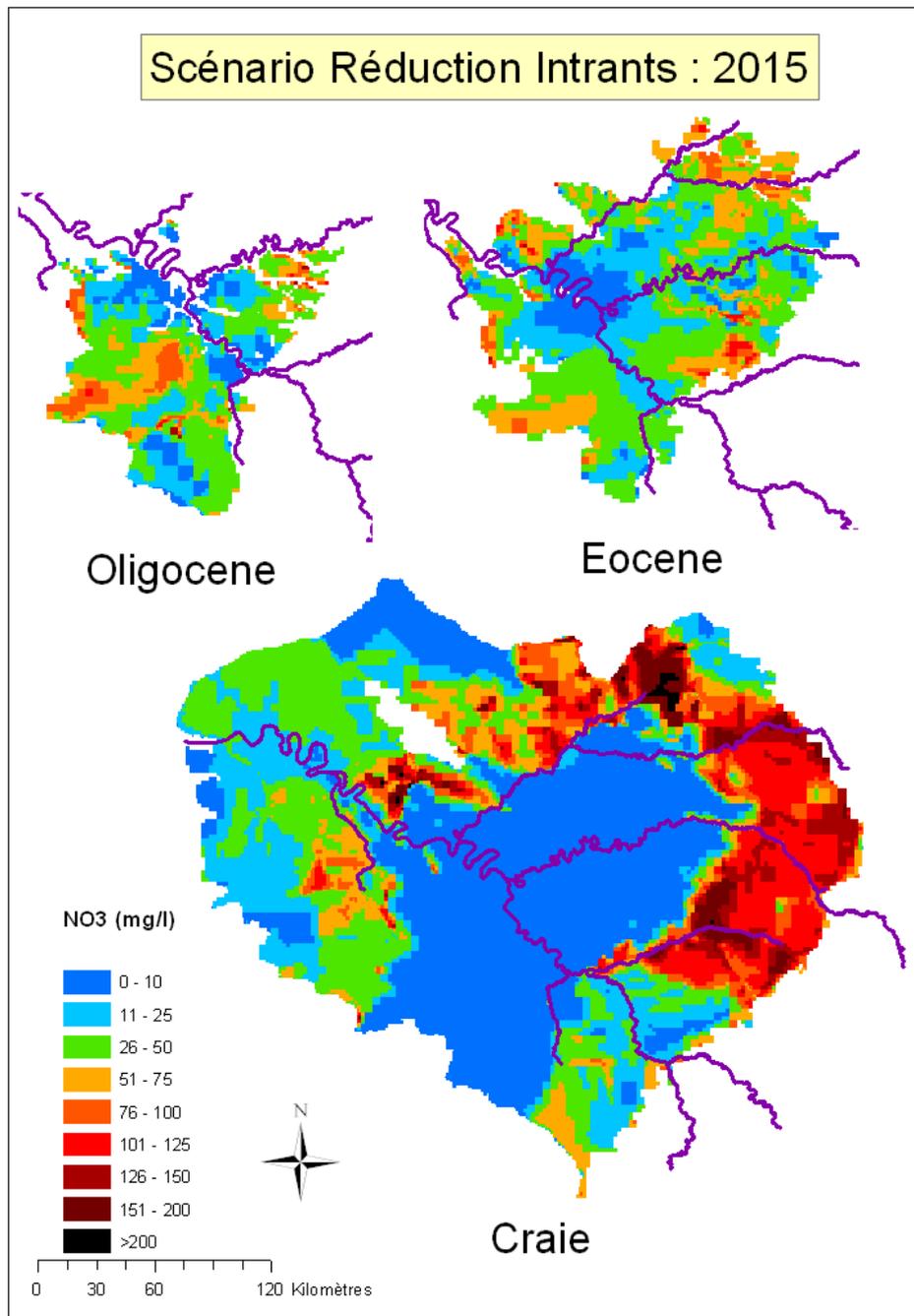


Figure 51: Projection des concentrations en nitrates dans les nappes à l'horizon 2015 pour un scénario de réduction de 20% des intrants

6.2.2 Résultats présentés par masse d'eau pour une réduction de 20% des intrants

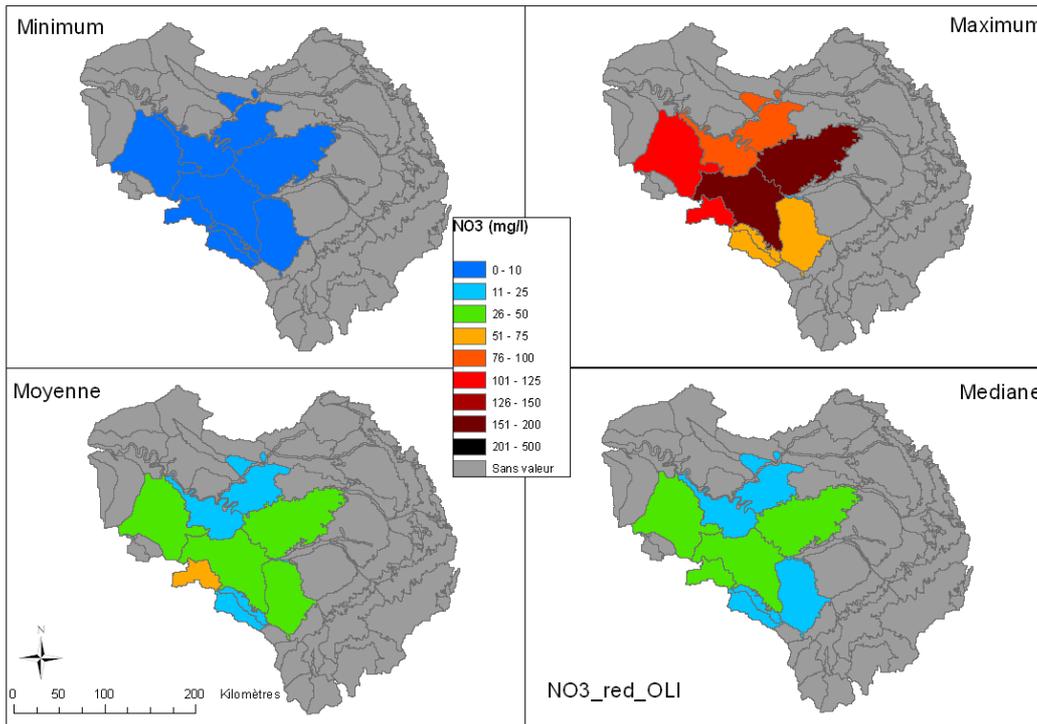


Figure 52: Projection des concentrations en nitrates par masse d'eau à l'horizon 2015 pour un scénario de réduction de 20% des intrants pour l'aquifère de l'Oligocène

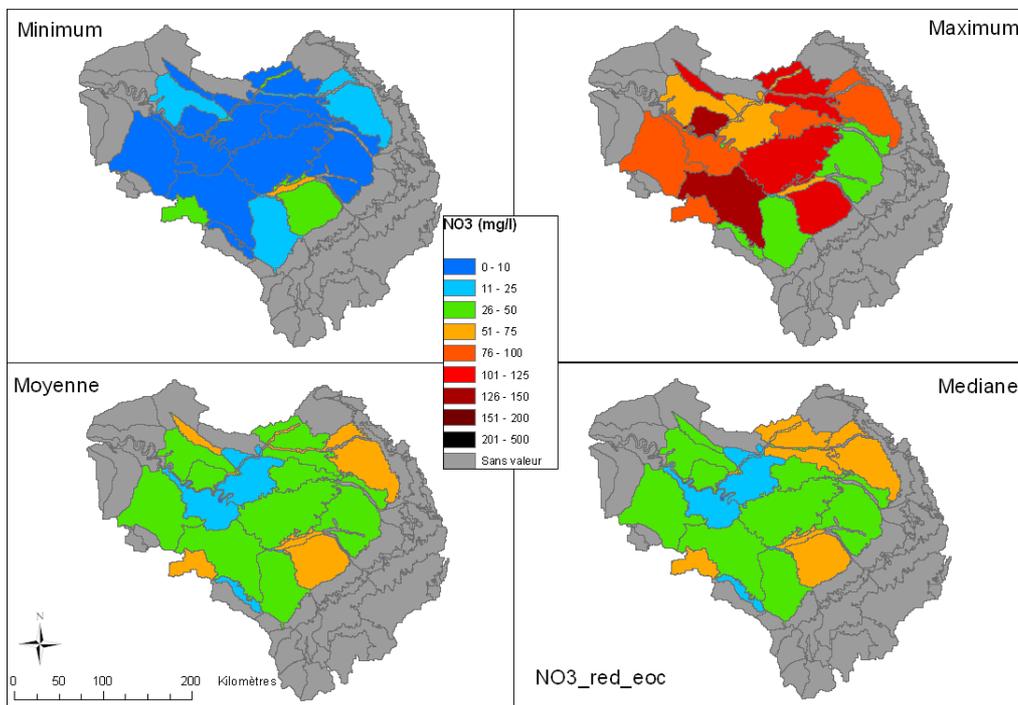


Figure 53: Projection des concentrations en nitrates par masse d'eau à l'horizon 2015 pour un scénario de réduction de 20% des intrants pour l'aquifère de l'Oligocène

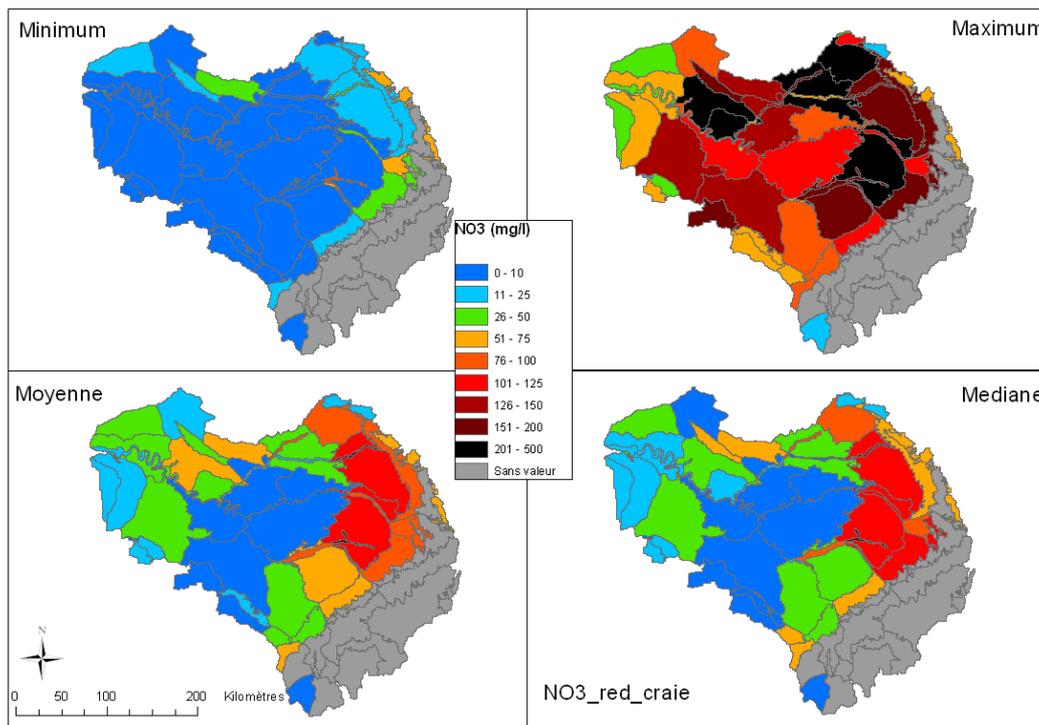


Figure 54: Projection des concentrations en nitrates par masse d'eau à l'horizon 2015 pour un scénario de réduction de 20% des intrants pour l'aquifère de la Craie

6.3. Estimation de l'état des concentrations en nitrates à l'état « quasi stationnaire pour un scénario de « laisser faire »

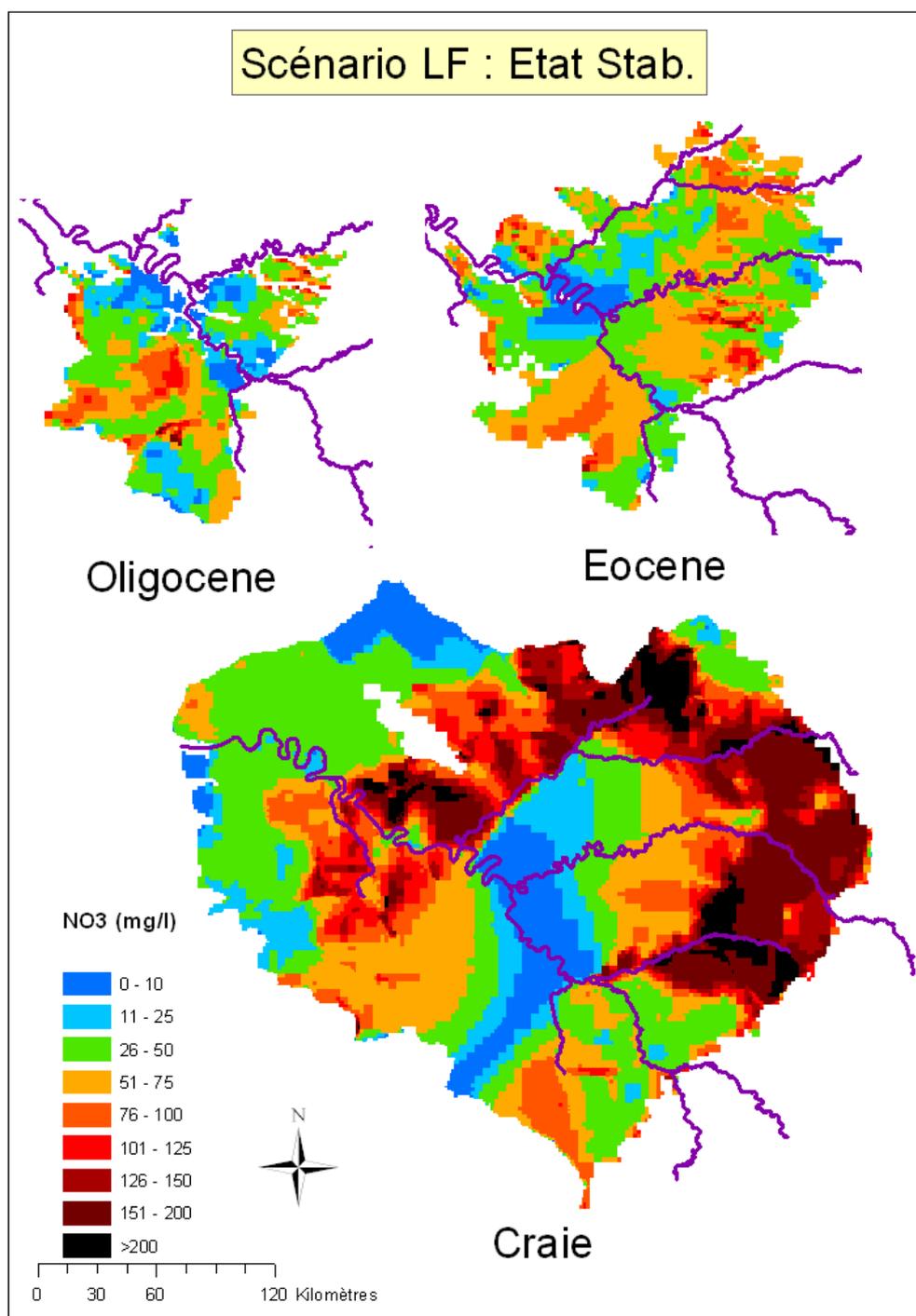


Figure 55: Projection des concentrations en nitrates dans les nappes à l'état quasi-stationnaire pour un scénario de « laisser faire »

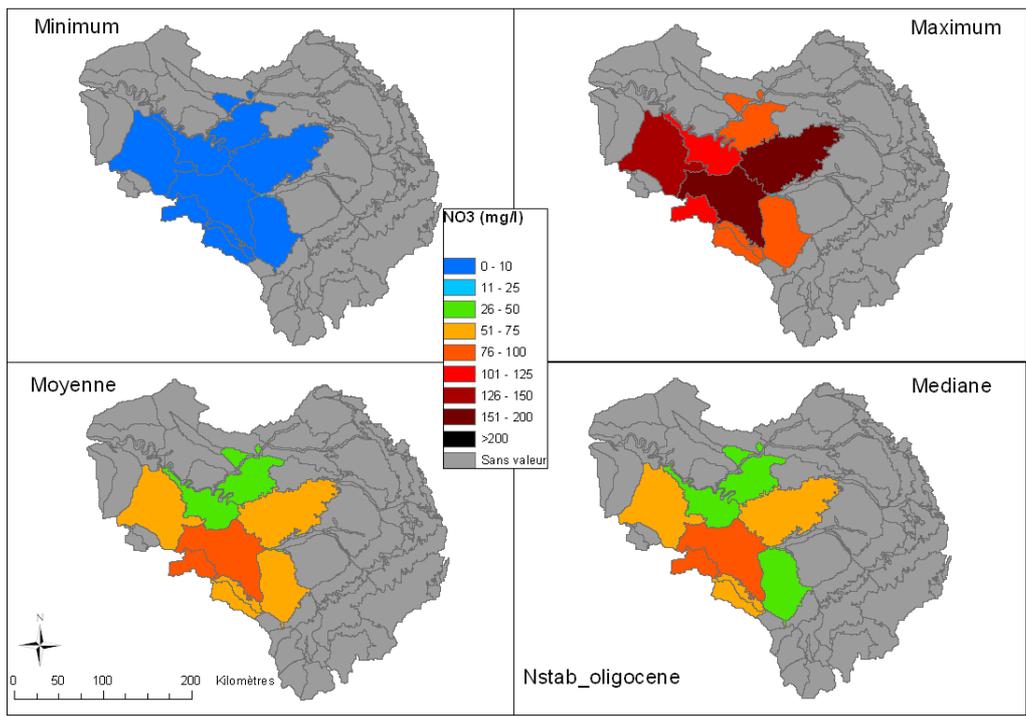


Figure 56: Projection des concentrations en nitrates par masse d'eau à l'état quasi-stationnaire pour un scénario dit de « laissé faire » pour l'aquifère de l'Oligocène

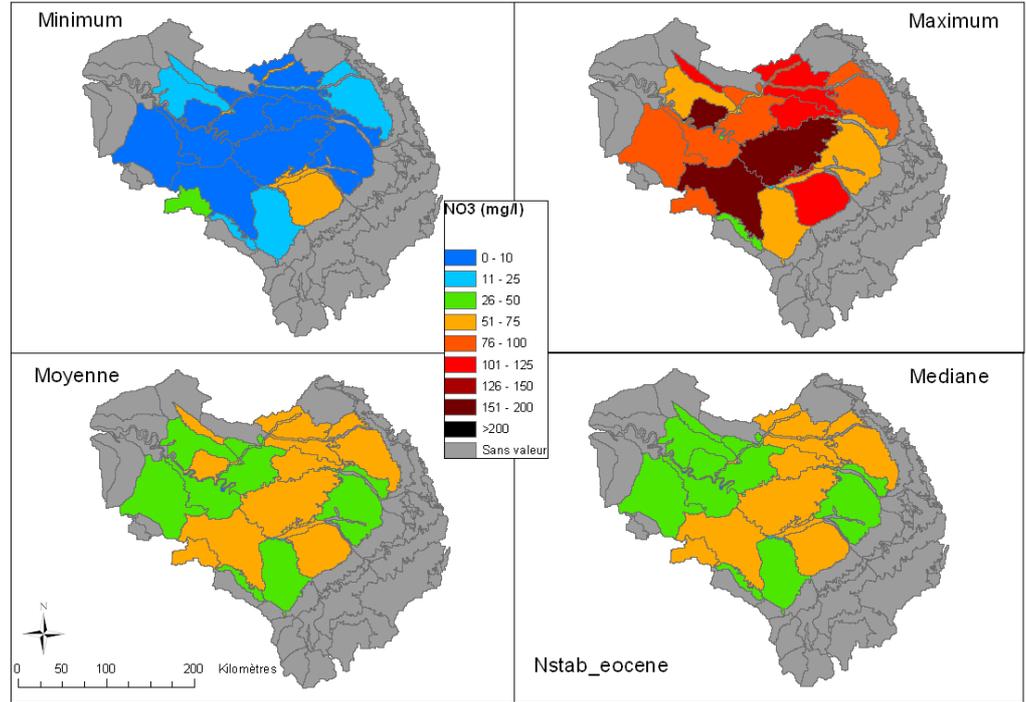


Figure 57: Projection des concentrations en nitrates par masse d'eau à l'état quasi-stationnaire pour un scénario dit de « laisser faire » pour l'aquifère de l'Eocène

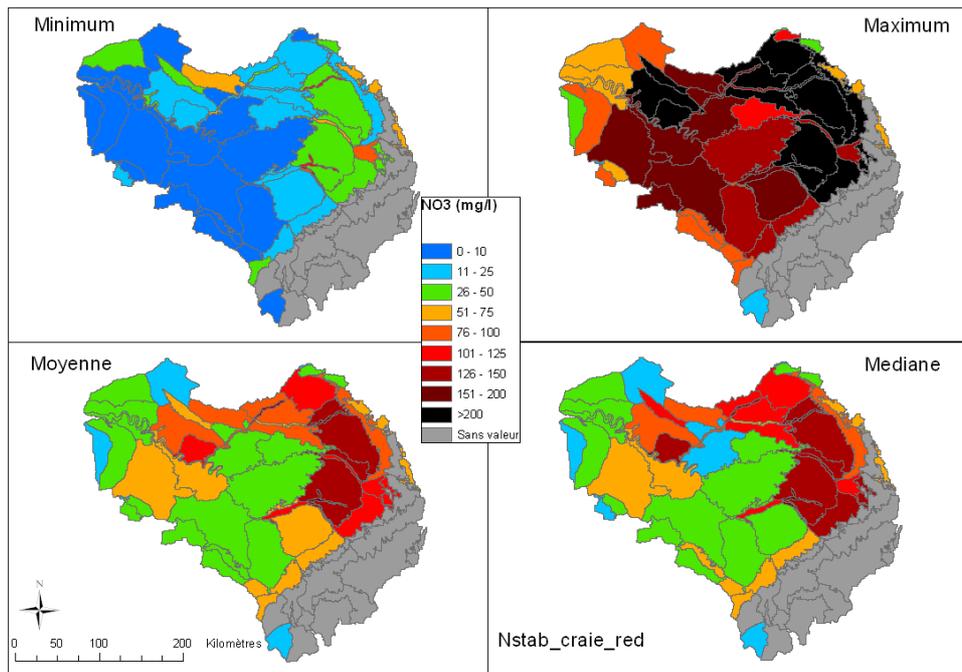


Figure 58: Projection des concentrations en nitrates par masse d'eau à l'état quasi-stationnaire pour un scénario dit de « laissez faire » pour l'aquifère de la Craie

**6.4. Estimation de l'état des concentrations en nitrates à l'état « quasi stationnaire pour un scénario de réduction de 20% des intrants**

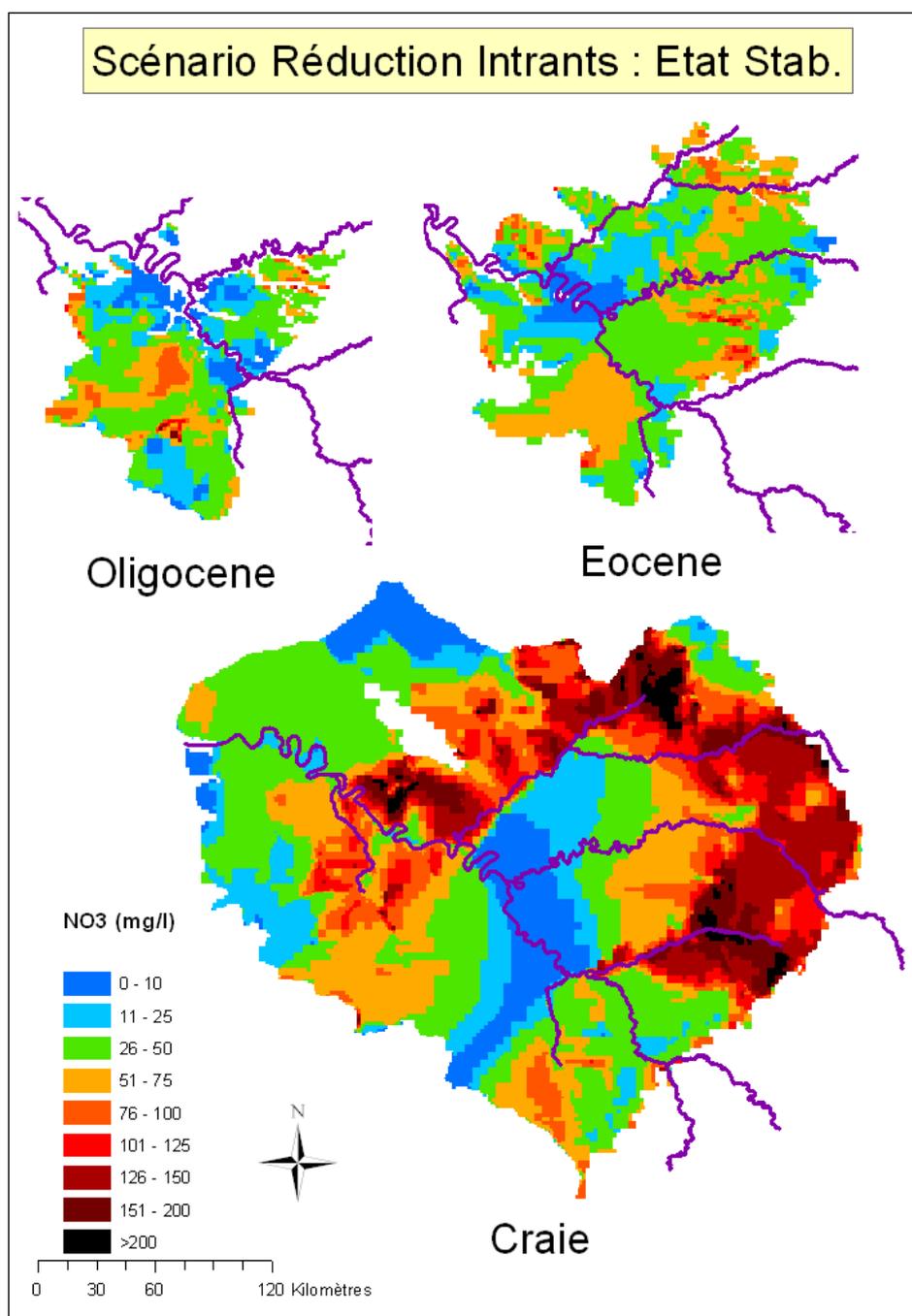


Figure 59: Projection des concentrations en nitrates dans les nappes à l'état quasi-stationnaire pour un scénario de réduction de 20% des intrants

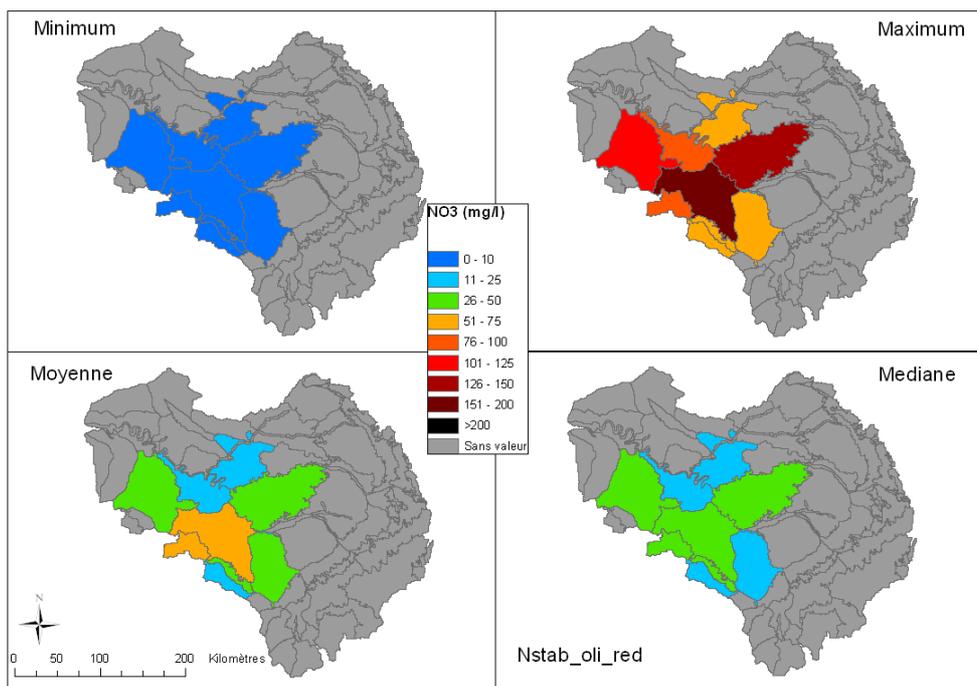


Figure 60: Projection des concentrations en nitrates par masse d'eau à l'état quasi-stationnaire pour un scénario de réduction de 20% des intrants pour l'aquifère de l'Oligocène

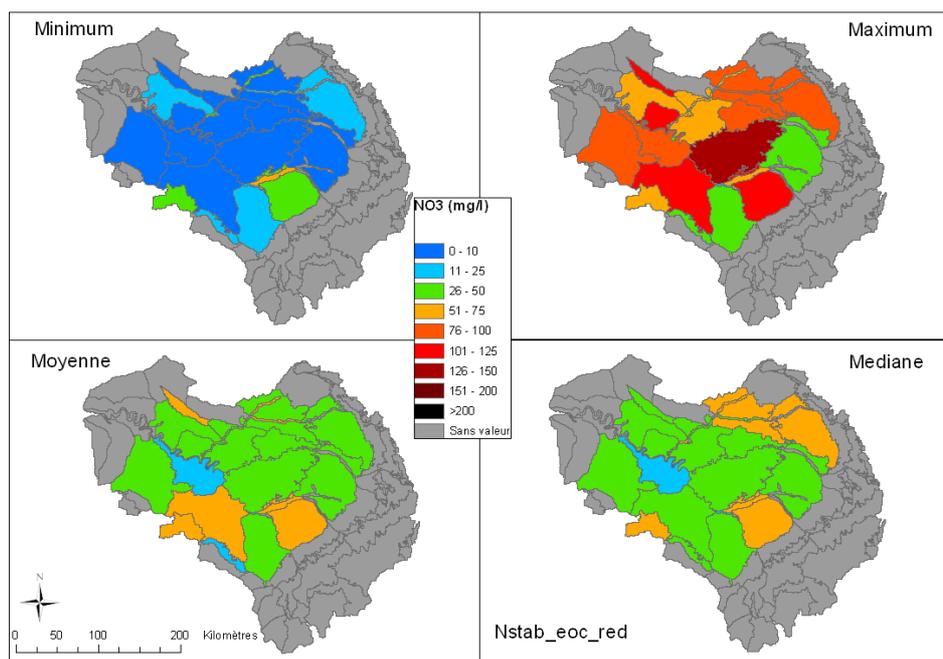


Figure 61: Projection des concentrations en nitrates par masse d'eau à l'état quasi-stationnaire pour un scénario de réduction de 20% des intrants pour l'aquifère de l'Eocène

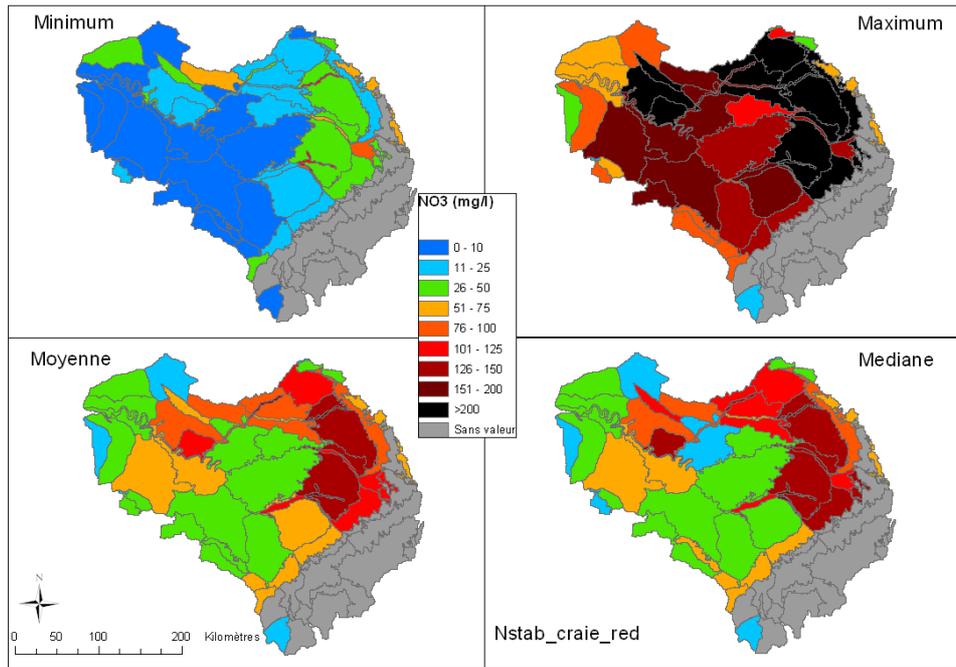


Figure 62: Projection des concentrations en nitrates par masse d'eau à l'état quasi-stationnaire pour un scénario de réduction de 20% des intrants pour l'aquifère de la Craie

## 7. Bibliographie

- Billen G., J. Garnier, A. Ficht, C. Cun (2001). Modeling the response of water quality in the Seine river estuary to human activity in its watershed over the last 50 years. *Estuaries*, **24**(6B), pp 977-993
- Brisson N., C.Gary, E.Justes, R.Roche, B.Mary, D.Ripoche, D.Zimmer, J.Sierra, P.Bertuzzi, P.Burger, F.Bussière, Y.M.Cabidoche, P.Cellier, P.Debaeke, J.P.Gaudillère, C.Hénault, F.Maraux, B.Segu n, H.Sinoquet, 2003. An overview of the crop model STICS, *European Journal of Agronomy*, **18**, 309-332.
- A. Ducharme et al, Projet GICC-Seine, Influence du changement climatique sur le fonctionnement hydrologique et biogéochimique du bassin de la Seine, Rapport final, Nov. 2004, 60 p.
- Gomez E. (2002). Modélisation intégrée du transfert de nitrate à l'échelle régionale dans un système hydrologique. Application au bassin de la Seine. Thèse, *Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris*.
- Gomez E. et E. Ledoux (2003). Etude de l'évolution de la contamination nitrrique des aquifères du bassin de la Marne à l'aide d'outils de modélisation. *Centre d'Informatique Géologique, Rapport Interne*. Mars 2003, 73 p.
- Meybeck M., De Marsily G., Fustec E., 1998. La Seine en son bassin : fonctionnement écologique d'un système fluvial anthropisé. *Elsevier*. pp 749 .
- Mignolet C., C. Schott, J-F. Mari, M. Benoit. (2002). Typologies des successions de cultures et des techniques culturales dans le Bassin de la Seine – *Rapport d'activité de l'année 2002. Programme Piren-Seine*. pp23
- Monget J-M., C. Viavattene, P. Viennot., 2004. Simulation au moyen du logiciel STICS-MODCOU des pollutions azotées sur l'Oligocène du Bassin Parisien. Mise en oeuvre et confrontation avec les données de terrain. *Rapport d'activité de l'année 2003. Programme Piren-Seine*.
- Munro R.J., P.C. Chatwin, N. Mole (2001). Models for concentration fluctuations in relative and absolute dispersion. *Proc. MODSIM 2001, International Congress on Modelling and Simulation*, Australian National University, Canberra, 10-13 December 2001, pp. 905-910
- Saporta G. (1990). Probabilités, analyse de données et statistiques. *Technip*. 493 p.
- Viennot P. et E. Ledoux, 2004. Modélisation du fonctionnement hydrogéologique du bassin de la Seine - Prévision des étiages. *Centre d'Informatique Géologique, Rapport Interne*. LHM/RD/04/30, 92 p.
- Van der Lee J., L. De Windt, V. Lagneau and P. Goblet, 2002 Presentation and application of the reactive transport code HYTEC in: *Computational Methods in Water Resources*, Hassanizadeh,S.M (ed.), **47/2**, *Developments in Water Science Series*, Elsevier, pp. 599-606

## 8. Annexe – Les fichiers fournis à la DIREN Ile-de-France

La prestation du CIG-ARMINES a consisté à transférer, en s'appuyant sur les outils SIG mis en œuvre à la DIREN (MapInfo) et à l'Agence (ESRI ArcView), les informations utiles qui concernent le bassin de la Seine se rapportant à la base de données et à la base de résultats de MODCOU. Après une phase préparatoire consistant à mettre en relation la géométrie des masses d'eau définies par le groupe thématique « eaux souterraines » et le maillage de l'application MODCOU au bassin de la Seine, le transfert est prévu en trois phases. Une première phase concerne les données pluviométriques et d'infiltration dans le système aquifère ; la seconde traitera de certains paramètres relatifs à la zone non saturée et au domaine souterrain et la troisième des résultats de simulations effectuées au CIG pour le paramètre nitrate.

### 8.1. Fichiers graphiques de forme des masses d'eau

Les fichiers de forme (.shp) permettent de visualiser sous un Système d'Information Géographique (compatible avec ESRI ArcView) les différentes entités géographiques utilisées et les données fournies. Ces fichiers sont de type géométrique polygone.

Pour l'ensemble de ces fichiers, le système de projection géographique est le suivant:

Lambert\_Conformal\_Conic  
False\_Easting: 600000.000000  
False\_Northing: 2200000.000000  
Central\_Meridian: 2.337229  
Standard\_Parallel\_1: 45.898919  
Standard\_Parallel\_2: 47.696014  
Latitude\_Of\_Origin: 46.800000

GCS\_Clarke\_1866  
Datum: D\_Clarke\_1866  
Prime Meridian: 0

#### Fichiers fournis relatifs aux différents maillages du modèle Modcou:

Ces fichiers sont accompagnés d'une table contenant l'identifiant, la surface et l'aire de chaque maille :

<b>Surface_maille.shp</b>	maillage de surface
<b>Oligocene_maille.shp</b>	maillage de l'aquifère oligocène
<b>Eocene_maille.shp</b>	maillage de l'aquifère éocène
<b>Eocene_aff_maille.shp</b>	maillage de la partie affleurante de l'éocène
<b>Craie_maille.shp</b>	maillage de l'aquifère craie
<b>Craie_aff_maille.shp</b>	maillage de la partie affleurante de la craie
<b>Mailleriv.shp</b>	maillage de surface drainant une surface supérieure ou égale à 250 km <sup>2</sup> .

#### Fichier relatif aux masses d'eau souterraine :

<b>Me2004_V4.shp</b>	masses d'eau souterraine
----------------------	--------------------------

Ce fichier est accompagné d'une table contenant, pour chaque masse d'eau, un identifiant « IDENTME\_04 », le nom « NOM », un code « N\_MASSE\_FI » et la surface kilométrique « areakm ».

L'identifiant « IDENTME\_04 » :

Le code identifiant est composé de 8 chiffres. Les quatre premiers chiffres correspondent au numéro de masse d'eau, alluvions inclus. Les quatre chiffres suivants précisent la nature de la masse :

- 0000 : masses d'eau classique
- 0001 : les zones externes en Artois Picardie
- 0002 : les zones externes en Loire Bretagne
- 0004 : les zones externes en Rhin Meuse

Dans le cas des alluvions, ils précisent le code de la formation (masse d'eau) sous-jacente. Le code identifiant 1 indique les zones externes sans code.

*Le code « N\_MASSE\_FI » :*

Ce code reprend le code de masse d'eau (les quatre premiers chiffres de l'identifiant).

#### Fichiers originaux :

Les fichiers **MASSE\_EAU\_SOUT\_V2004.shp** et **TRANS2004.shp** sont les fichiers de base utilisés pour l'élaboration de Me2004\_V4.shp

*Remarque* : ces informations concernent aussi les fichiers .MIF pour Mapinfo

## **8.2. Données hydrologiques**

Cette phase porte sur la fourniture des précipitations, des infiltrations et des alimentations annuelles des nappes par maille MODCOU et par masse d'eau. Ces données sont présentées sous forme de fichiers .dbf, directement consultable sur Arcview, et transférable sur MapInfo, à partir des fichiers **maillage-surf.shp** et **Me2004\_V4.shp** servant de support à la visualisation.

Les données ont été compressées en 6 fichiers zip :

**Precip\_hyd\_7002.zip** : précipitation par année hydrologique

**Precip\_civ\_7103.zip** : précipitation par année civile

**Infilt\_hyd\_7002.zip** : infiltration par année hydrologique

**Infilt\_civ\_7103.zip** : infiltration par année civile

**Alimaq\_hyd\_7002.zip** : alimentations par année hydrologique

**Alimaq\_civ\_7103.zip** : alimentations par année civile

Chaque fichier compressé comprend les données associées aux mailles MODCOU et aux masses d'eau.

#### Données associées aux mailles MODCOU

Les fichiers de précipitations, d'infiltrations et d'alimentation des nappes contiennent des lames d'eau définies sur le maillage MODCOU en mm/an. Ces données sont organisées par année civile (1971 à 2003) ou par année hydrologique (70-71 à 02-03). Notons qu'une année hydrologique débute par convention le 1<sup>er</sup> septembre.

Le nom des fichiers est organisé de la façon suivante : « donnée » « an début » « an fin » « type ».dbf avec :

- « donnée » : Precip, Infilt ou AlimAq (correspondant respectivement à la précipitation incluant la pluie et la neige, à l'infiltration à la base des sols, et à l'alimentation des aquifères en sortie de zone non saturée)
- « an début », « an fin » : les données sont stockées sur une période de temps incluse entre les limites « an début » et « an fin »
- « type » : \_civ, \_hyd (pour année civile ou hydrologique)

Chaque ligne correspond à un numéro de maille. Les colonnes comportent le numéro des mailles du modèle et les valeurs annuelles. L'ensemble représente un total de 6 fichiers relatifs aux 35698 mailles de surface. Les liens entre les bases se font par les champs « IDSURF » de surface\_maille.shp et « Num » des fichiers .dbf

#### Données associées aux masses d'eau souterraines

Un groupe de fichiers définis sur les masses d'eau, organisés par année civile ou par année hydrologique concernent les variables suivantes :

- précipitations moyennes annuelles totales et sur chaque aquifère
- précipitations minimales annuelles totales et sur chaque aquifère
- précipitations maximales annuelles totales et sur chaque aquifère
- précipitations médianes annuelles totales et sur chaque aquifère
- idem pour l'infiltration au niveau du sol
- idem pour l'alimentation des nappes.

Le nom des fichiers est organisé de la façon suivante : « donnée » « an début » « an fin » « type », « stat » \_mass.txt, avec :

- « donnée » : Precip, Infil ou AlimAq (correspondant respectivement à la précipitation incluant la pluie et la neige, à l'infiltration à la base des sols, et à l'alimentation des aquifères en sortie de zone non saturée)
- « an début », « an fin » : les données sont stockées sur une période de temps incluse entre les limites « an début » et « an fin »
- « type » : \_civ, \_hyd (pour année civile ou hydrologique)
- « stat » : variable statistique calculée sur la surface occupée par une masse d'eau souterraine. Stat correspond à -min, -max, -moy, -med pour minimum, maximum, moyenne et médiane.

*Remarque* : pour tenir compte du fait qu'une même masse d'eau souterraine peut être en relation avec plusieurs aquifères distincts, les variables fournies dans les fichiers (précipitation, infiltration, alimentation des aquifères, avec leurs valeurs minimales, maximales, moyennes ou médianes) sont calculées sur les différentes couches du modèle hydrologique. On peut donc afficher les valeurs calculées, d'une part, sur la surface totale occupée par une masse d'eau et, d'autre part, sur la surface de la masse d'eau qui se trouve en relation avec la partie affleurante d'un aquifère donné. On distingue donc 5 niveaux d'information, notées par un suffixe, de la façon suivante :

- c0 : totalité de la surface de la masse d'eau
- c1 : masse d'eau en relation avec la couche Oligocène
- c2 : masse d'eau en relation avec la partie affleurante de la couche Eocène
- c3 : masse d'eau en relation avec la partie affleurante de la couche Craie
- c4 : masse d'eau en relation avec les aquifères anté-Craie, située essentiellement sur la périphérie orientale du bassin de la Seine.

Chaque ligne correspond à une masse d'eau. Les colonnes comportent un numéro d'ordre de masses d'eau « NMASS », le numéro d'identifiant de la masse d'eau « NUM » et les valeurs annuelles pour les couches c0, c1, c2, c3, c4. Les liens entre les bases se font par les champs « IDENTME\_04 » de ME2004\_V4.shp et « NUM » des fichiers .dbf.

L'ensemble représente un total de 24 fichiers relatifs à 69 masses d'eau souterraines, en incluant les masses d'eau alluvionnaires.

### 8.3. Données sur le modèle souterrain

Cette phase porte sur la fourniture des données suivantes par maille MODCOU et par masse d'eau :

- Epaisseur de la zone non saturée
- Transmissivité et coefficient d'emmagasinement

Ces données sont présentées sous forme de fichiers .dbf (format DBase), directement consultables sous ERSI ArcvView, et transférables sur MapInfo, à partir des fichiers shapefile (.shp) précédemment énumérés servant de support à la visualisation.

#### Epaisseur de la zone non-saturée

Les fichiers **Me\_ « nom-aquifère »\_nonsat.dbf** fournissent par masse d'eau la valeur médiane, maximale, minimale et moyenne de l'épaisseur de la zone non saturée en mètre. Le champ « nbmaille » de la table indique le nombre de maille renseigné sur la masse d'eau par le maillage. L'absence de correspondance entre les maillages Modcou et les masses d'eau est traduite par la valeur 999. Chaque fichier doit être joint par le champ « IDENTME\_04 » au champ « IDENTME\_04 » de ME2004\_V4.shp.

Les fichiers **Nonsat\_ « nom-aquifère »\_dbf** fournissent l'épaisseur de la zone non saturée en mètre pour chaque maille Modcou de l'aquifère considéré. Chaque fichier doit être joint par le champs identifiant au champs identifiant du fichier de forme aquifère correspondant (affleurant ou non).

#### Transmissivité et coefficient d'emmagasinement

Les fichiers **Trans\_Me\_ « nom-aquifère »\_dbf** et **Me\_ « nom-aquifère »\_emm.dbf** fournissent par masse d'eau la valeur médiane, maximale, minimale et moyenne de la transmissivité T (m<sup>2</sup>/s) et du coefficient d'emmagasinement S. Le champ « nbmaille » de la table indique le nombre de maille renseigné sur la masse d'eau par le maillage. L'absence de correspondance entre les maillages Modcou et les masses d'eau est traduite par la valeur 999. Chaque fichier doit être joint par le champ « IDENTME\_04 » au champ « IDENTME\_04 » de ME2004\_V4.shp.

Les fichiers **Transmiss\_ « nom-aquifère »\_dbf** et **Emm\_ « nom-aquifère »\_dbf** fournissent respectivement la transmissivité T (m<sup>2</sup>/s) et le coefficient d'emmagasinement S pour chaque maille Modcou de l'aquifère considéré. Chaque fichier doit être joint par le champ identifiant au champ identifiant du fichier de forme aquifère correspondant.

#### 8.4. Données sur les nitrates

Cette phase porte sur la fourniture des données suivantes par maille MODCOU et par masse d'eau :

- Résultat de la simulation d'une projection à 2015 sous scénario « Laisser-Faire »
- Résultat de la simulation d'une projection à l'état stabilisé sous scénario « Laisser-Faire »
- Temps d'atteinte de l'état stabilisé sous scénario « Laisser-Faire »
- Probabilité de dépassement de seuil en 2015 sous scénario « Laisser-Faire »
- Résultat de la simulation d'une projection à 2015 sous scénario « réduction des intrants »
- Résultat de la simulation d'une projection à l'état stabilisé sous scénario « réduction des intrants »

Ces données sont présentées sous forme de fichiers .dbf, directement consultables sur Arcview, et transférables sur MapInfo, à partir des fichiers « shapefile » (.shf) précédemment énumérés servant de support à la visualisation.

##### Résultat de la simulation sous scénario « Laisser-Faire »

Les fichiers **LF\_ « nom-aquifère ».dbf** fournissent les résultats du scénario « laisser-faire » (continuité des pratiques agricoles 90-00) en 2015 (champs 2015) et à l'état stabilisé (champs STAB) pour chaque maille MODCOU de l'aquifère considéré. Chaque fichier doit être joint par le champs NUMMAILLE au champs identifiant du fichier de forme aquifère correspondant (affleurant ou non).

Les fichiers **Me\_ « nom-aquifère »\_LF\_2015.dbf** et **Me\_ « nom-aquifère »\_LF\_stab.dbf** fournissent par masse d'eau la valeur médiane, maximale, minimale et moyenne des résultats du scénario « laisser-faire » respectivement en 2015 et à l'état stabilisé. Le champ « nbmaille » de la table indique le nombre de maille renseigné sur la masse d'eau par le maillage. L'absence de correspondance entre les maillages Modcou et les masses d'eau est traduite par la valeur 999. Chaque fichier doit être joint par le champ « IDENTME\_04 » au champ « IDENTME\_04 » de ME2004\_V4.shp.

##### Temps d'atteinte de l'état stabilisé sous scénario laisser-faire

Les fichiers **LF\_ « nom-aquifère »\_Tstab.dbf** fournissent la période pour laquelle le modèle estime la stabilisation des concentrations en nitrates sous scénario « laisser-faire » à compter de l'année 2000 pour chaque maille MODCOU de l'aquifère considéré. Chaque fichier doit être joint par le champs NUMMAILLE au champs identifiant du fichier de forme aquifère correspondant (affleurant ou non).

Les fichiers **Me\_ « nom-aquifère »\_LF\_Temps\_stab.dbf** fournissent par masse d'eau la valeur médiane, maximale, minimale et moyenne de la période pour laquelle le modèle estime la stabilisation des concentrations en nitrates sous scénario « laisser-faire » à compter de l'année 2000. Le champ « nbmaille » de la table indique le nombre de maille renseigné sur la masse d'eau par le maillage. L'absence de correspondance entre les maillages Modcou et les masses d'eau est traduite par la valeur 999. Chaque fichier doit être joint par le champ « IDENTME\_04 » au champ « IDENTME\_04 » de ME2004\_V4.shp.

##### Probabilité de dépassement de seuil en 2015 sous scénario « laisser-faire »

Les fichiers **LF\_ « nom-aquifère »\_proba.dbf** fournissent les probabilités de dépassement de seuil 20, 40, 50 et 100 mg/l à l'horizon 2015 sous scénario « laisser-faire » pour chaque maille MODCOU de l'aquifère considéré. Chaque fichier doit être joint par le champs NUMMAILLE au champs identifiant du fichier de forme aquifère correspondant (affleurant ou non).

Les fichiers **Me\_ « nom-aquifère »\_proba.dbf** fournissent par masse d'eau la valeur moyenne des probabilités de dépassement de seuil 20, 40, 50 et 100 mg/l à l'horizon 2015 sous scénario « laisser-faire ». Le champ « nbmaille » de la table indique le nombre de maille renseigné sur la masse d'eau par le maillage. L'absence de correspondance entre les maillages Modcou et les masses d'eau est traduite par la valeur 999. Chaque fichier doit être joint par le champ « IDENTME\_04 » au champ « IDENTME\_04 » de ME2004\_V4.shp.

#### Résultat de la simulation sous scénario « Réduction des Intrants »

Les fichiers **LF\_2000\_ferti80\_ « nom-aquifère »\_dbf** fournissent les résultats du scénario « Réduction des intrants » (continuité des pratiques agricoles 90-00 avec réduction de 20% des apports en fertilisants minéraux à compter de 2000) en 2015 (champs 2015) et à l'état stabilisé (champs STAB) pour chaque maille MODCOU de l'aquifère considéré. Chaque fichier doit être joint par le champs NUMMAILLE au champs identifiant du fichier de forme aquifère correspondant (affleurant ou non).

Les fichiers **Me\_ « nom-aquifère »\_LF\_2000\_ferti80\_2015.dbf** et **Me\_ « nom-aquifère »\_LF\_2000\_ferti80\_stab.dbf** fournissent par masse d'eau la valeur médiane, maximale, minimale et moyenne des résultats du scénario « Réduction des intrants » respectivement en 2015 et à l'état stabilisé. Le champ « nbmaille » de la table indique le nombre de maille renseigné sur la masse d'eau par le maillage. L'absence de correspondance entre les maillages Modcou et les masses d'eau est traduite par la valeur 999. Chaque fichier doit être joint par le champ « IDENTME\_04 » au champ « IDENTME\_04 » de ME2004\_V4.shp.