



Influence de l'augmentation des prélèvements anthropiques en formations aquifères sur le fonctionnement hydrodynamique du bassin de la Seine

P. VIENNOT, E. LEDOUX

**Références : R060713PVIE
ARMINES : N° 60592**

Centre de Géosciences
35 rue Saint Honoré - F 77305 Fontainebleau cedex
Tél. : 33 (0) 1-64-69-47-02 - Fax : 33 (0) 1-64-69-47-03

SOMMAIRE

1. Préambule.....	6
2. Analyse des données de prélèvements anthropiques sur le bassin de la Seine	7
2.1. Prélèvements d'origine agricole.....	7
2.2. Prélèvements d'origine industrielle et d'AEP	8
3. Présentation général du modèle hydrogéologique MODCOU	9
4. Intégration des données de prélèvement dans le modèle hydrogéologique.....	13
5. Exploitation du modèle hydrogéologique	17
5.1. Choix d'une année hydrogéologique moyenne.....	17
5.2. Estimation des débits calculés minimaux mensuels de période de retour 5 ans sur la période de simulation 1970-2004.....	22
5.3. Etat piézométrique de référence correspondant à la situation hydrogéologique cinq ans sec	24
5.4. Modélisation de l'augmentation des prélèvements anthropiques sur la bassin	28
5.4.1 Principes généraux.....	28
5.4.2 Résultats de simulations.....	30

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : moyenne des prélèvements agricoles agrégés par commune (moyenne des années 1997-2001)	7
Figure 2 : volumes prélevés en nappe à des fins industrielles en m ³ /an : année 2004.....	8
Figure 3 : volumes prélevés en nappe pour l'AEP en m ³ /an : année 2004.....	9
Figure 4 : principe général du modèle hydrogéologique couplé MODCOU	10
Figure 5 : principe de la schématisation multicouche.....	10
Figure 6 : maillage de la couche de surface.....	11
Figure 7 : maillage des formations souterraines prises en compte	11
Figure 8 : grille d'entrée des données météorologiques	12
Figure 9 : précipitations et ETP moyennes annuelles sur la période 1970-1990	12
Figure 10 : croisement communes – mailles du modèle de surface	13
Figure 11 : réseau hydrographique « modèle »	14
Figure 12 : prélèvements en nappes globaux rapportés au maillage de surface du modèle .	15
Figure 13 : prélèvements agricoles en nappes moyens 1997-2001 rapportés sur le maillage de surface du modèle.....	15
Figure 14 : prélèvements AEP 2004 en nappes rapportés sur le maillage de surface du modèle.....	16
Figure 15 : prélèvements industriels 2004 en nappes rapportés au maillage de surface du modèle.....	16
Figure 16 : alimentations efficaces moyennes des nappes calculées entre 1970 et 2004	17
Figure 17 : pluviométrie moyenne journalière (données SAFRAN-Météo-France).....	18
Figure 18 : infiltration efficace journalière moyenne calculée.....	18
Figure 19 : infiltration moyenne calculée – année 2002-2003.....	19
Figure 20 : alimentation efficace moyenne des nappes rapportée aux masses d'eau de la DCE	19
Figure 21 : part relative prélèvements globaux / alimentation des nappes	20
Figure 22 : part relative prélèvements agricoles / alimentation des nappes	20
Figure 23 : part relative prélèvements industriels / alimentation des nappes.....	21
Figure 24 : part relative prélèvements AEP / alimentation des nappes.....	21
Figure 25 : situation des points de calcul sur les rivières d'ordre 1 du modèle	22
Figure 26 : calcul du QMNA5	23
Figure 27 : QMNA5 calculés sur le bassin pour la période 1971-2003 (années civiles)	24
Figure 28 : années de calcul du QMNA5 sur la période 1971-2003	25
Figure 29 : répartition temporelle des QMNA5 calculés.....	26
Figure 30 : piézométrie calculée dans la formation Oligocène – été 1990.....	26
Figure 31 : piézométrie calculée dans la formation Eocène – été 1990.....	27
Figure 32 : piézométrie calculée dans la formation de la Craie – été 1990	27
Figure 33 : formation de l'Oligocène – épaisseur de la formation	29
Figure 34 : formation de l'Eocène – épaisseur de la formation	29
Figure 35 : variations relatives calculées du débit d'étiage en année moyenne liées à un doublement de l'ensemble des prélèvements	32
Figure 36 : variations relatives calculées du débit d'étiage en année moyenne liées à une augmentation de 50% des prélèvements agricoles.....	33
Figure 37 : variations relatives calculées du débit d'étiage en année moyenne liées à un doublement des prélèvements agricoles.....	34
Figure 38 : variations relatives calculées du débit d'étiage en année moyenne liées à un triplement des prélèvements agricoles.....	35
Figure 39 : variations relatives calculées du débit d'étiage en année moyenne liées à une augmentation de 50% des prélèvements AEP	36
Figure 40 : variations relatives calculées du débit d'étiage en année moyenne liées à un doublement des prélèvements AEP	37
Figure 41 : variations relatives calculées du débit d'étiage en année moyenne liées à un doublement des prélèvements industriels	38
Figure 42 : variations relatives calculées du débit d'étiage en période climatique sévère liées à un doublement de l'ensemble des prélèvements	40

Figure 43 : variations relatives calculées du débit d'étiage en période climatique sévère liées à une augmentation de 50% des prélèvements agricoles.....	41
Figure 44 : variations relatives calculées du débit d'étiage en période climatique sévère liées à un doublement des prélèvements agricoles.....	42
Figure 45 : variations relatives calculées du débit d'étiage en période climatique sévère liées à un triplement des prélèvements agricoles.....	43
Figure 46 : variations relatives calculées du débit d'étiage en période climatique sévère liées à une augmentation de 50% des prélèvements AEP.....	44
Figure 47 : variations relatives calculées du débit d'étiage en période climatique sévère liées à un doublement des prélèvements AEP.....	45
Figure 48 : variations relatives calculées du débit d'étiage en période climatique sévère liées à un doublement des prélèvements industriels.....	46
Figure 49 : rapport Qmin moyen mensuel/QMNA5 calculé en année moyenne sans augmentation des prélèvements anthropiques.....	48
Figure 50 : rapport Qmin moyen mensuel /QMNA5 calculé en année moyenne avec doublement de l'ensemble des prélèvements.....	49
Figure 51 : rapport Qmin moyen mensuel /QMNA5 calculé en année moyenne avec augmentation de 50% des prélèvements agricoles.....	50
Figure 52 : rapport Qmin moyen mensuel /QMNA5 calculé en année moyenne avec doublement des prélèvements agricoles.....	51
Figure 53 : rapport Qmin moyen mensuel /QMNA5 calculé en année moyenne avec triplement des prélèvements agricoles.....	52
Figure 54 : rapport Qmin moyen mensuel /QMNA5 calculé en année moyenne avec augmentation de 50% des prélèvements AEP.....	53
Figure 55 : rapport Qmin moyen mensuel /QMNA5 calculé en année moyenne avec doublement des prélèvements AEP.....	54
Figure 56 : rapport Qmin moyen mensuel /QMNA5 calculé en année moyenne avec doublement des prélèvements industriels.....	55
Figure 57 : rapport Qmin moyen mensuel /QMNA5 calculé après trois années « sévères » sans modification des prélèvements anthropiques.....	57
Figure 58 : rapport Qmin moyen mensuel /QMNA5 calculé après trois années « sévères » avec doublement de l'ensemble des prélèvements.....	58
Figure 59 : rapport Qmin moyen mensuel /QMNA5 calculé après trois années « sévères » avec augmentation de 50% des prélèvements agricoles.....	59
Figure 60 : rapport Qmin moyen mensuel /QMNA5 calculé après trois années « sévères » avec doublement des prélèvements agricoles.....	60
Figure 61 : rapport Qmin moyen mensuel /QMNA5 calculé après trois années « sévères » avec triplement des prélèvements agricoles.....	61
Figure 62 : rapport Qmin moyen mensuel /QMNA5 calculé après trois années « sévères » avec augmentation de 50% des prélèvements AEP.....	62
Figure 63 : rapport Qmin moyen mensuel /QMNA5 calculé après trois années « sévères » avec doublement des prélèvements AEP.....	63
Figure 64 : rapport Qmin moyen mensuel /QMNA5 calculé après trois années « sévères » avec doublement des prélèvements industriels.....	64
Figure 65 : évolution relative en % de la valeur du QMNA5 avec doublement de l'ensemble des prélèvements.....	66
Figure 66 : évolution relative en % de la valeur du QMNA5 avec augmentation de 50% des prélèvements agricoles.....	67
Figure 67 : évolution relative en % de la valeur du QMNA5 avec doublement des prélèvements agricoles.....	68
Figure 68 : évolution relative en % de la valeur du QMNA5 avec triplement des prélèvements agricoles.....	69
Figure 69 : évolution relative en % de la valeur du QMNA5 avec augmentation de 50% des prélèvements AEP.....	70
Figure 70 : évolution relative en % de la valeur du QMNA5 avec doublement des prélèvements AEP.....	71
Figure 71 : évolution relative en % de la valeur du QMNA5 avec doublement des prélèvements industriels.....	72

Figure 72 : période de retour du QMNA5 initial : prélèvements globaux doublés	74
Figure 73 : période de retour du QMNA5 initial : prélèvements agricoles augmentés de 50 %	75
Figure 74 : période de retour du QMNA5 initial : prélèvements agricoles doublés	76
Figure 75 : période de retour du QMNA5 initial : prélèvements agricoles triplés	77
Figure 76 : période de retour du QMNA5 initial : prélèvements AEP augmentés de 50%	78
Figure 77 : période de retour du QMNA5 initial : prélèvements AEP doublés	79
Figure 78 : période de retour du QMNA5 initial : prélèvements industriels doublés	80
Figure 79 : situation géographique des piézomètres retenus	82
Figure 80 : évolution piézométrique calculée au piézomètre d'Allainville - formation Oligocène	83
Figure 81 : évolution piézométrique calculée au piézomètre de Mainvilliers - formation Oligocène	84
Figure 82 : évolution piézométrique calculée au piézomètre de Ferolles - formation Eocène	85
Figure 83 : évolution piézométrique calculée au piézomètre de Janvilliers - formation Eocène	86
Figure 84 : évolution piézométrique calculée au piézomètre de Lagny - formation Eocène ..	87
Figure 85 : évolution piézométrique calculée au piézomètre de Chuelles - formation de la Craie	88
Figure 86 : évolution piézométrique calculée au piézomètre de Vailly - formation de la Craie	89
Figure 87 : évolution piézométrique calculée au piézomètre de Morains - formation de la Craie	90
Figure 88 : évolution piézométrique calculée au piézomètre de Laon - formation de la Craie	91
Figure 89 : évolution piézométrique calculée au piézomètre de Farceaux - formation de la Craie	92
Figure 90 : évolution piézométrique calculée au piézomètre d'Aigle - formation de la Craie ..	93
Figure 91 : évolution piézométrique calculée au piézomètre d'Omecourt - formation de la Craie	94
Figure 92 : évolution piézométrique calculée sur trois années climatiques « sévères » au piézomètre d'Allainville - formation de l'Oligocène	96
Figure 93 : évolution piézométrique calculée sur trois années climatiques « sévères » au piézomètre de Mainvilliers - formation de l'Oligocène	97
Figure 94 : évolution piézométrique calculée sur trois années climatiques « sévères » au piézomètre de Férolles - formation de l'Eocène	98
Figure 95 : évolution piézométrique calculée sur trois années climatiques « sévères » au piézomètre de Janvilliers - formation de l'Eocène	99
Figure 96 : évolution piézométrique calculée sur trois années climatiques « sévères » au piézomètre de Lagny - formation de l'Eocène	100
Figure 97 : évolution piézométrique calculée sur trois années climatiques « sévères » au piézomètre de Chuelles - formation de la Craie	101
Figure 98 : évolution piézométrique calculée sur trois années climatiques « sévères » au piézomètre de Vailly - formation de la Craie	102
Figure 99 : évolution piézométrique calculée sur trois années climatiques « sévères » au piézomètre de Morains - formation de la Craie	103
Figure 100 : évolution piézométrique calculée sur trois années climatiques « sévères » au piézomètre de Laon - formation de la Craie	104
Figure 101 : évolution piézométrique calculée sur trois années climatiques « sévères » au piézomètre de Farceaux - formation de la Craie	105
Figure 102 : évolution piézométrique calculée sur trois années climatiques « sévères » au piézomètre d'Aigles - formation de la Craie	106

1. Préambule

L'étude du fonctionnement hydrodynamique du bassin de la Seine (transferts hydriques de surface et/ou souterrains) a permis de caractériser et de quantifier la ressource globale en eau et son évolution dans le temps. Cette compréhension a permis la conceptualisation et la mise en œuvre d'une modélisation de ce fonctionnement hydrodynamique à l'aide du modèle MODCOU. Ce modèle, mis en œuvre initialement par E. Gomez dans le cadre de sa thèse (ENSMP,2002), a pour objectif la simulation conjointe des écoulements de surface et souterrains. Le calage initial des données de structure de la couche de surface et des trois couches souterraines prises en compte a été effectué pour optimiser la restitution des débits des rivières sur plus de 120 stations hydrométriques et celle des charges hydrauliques de près de 140 piézomètres, sur une période couvrant, au pas de temps journalier, les années 1970-2005.

Ces modélisations ont permis, entre autres, de préciser le rôle des différents aquifères sur les régimes de crue ou d'étiage des principales rivières du bassin. Les principaux résultats montrent que la contribution des nappes externes (Crétacé inférieur, Jurassique) est très importante sur les débits en période de hautes eaux (>50%) et que celle des nappes internes (Craie, Eocène, Oligocène) est essentielle en période d'étiage mais peuvent varier sensiblement en fonction des années et, par conséquent, de l'état de recharge des nappes (60 à 180 m³/s pour la Seine en étiage à Paris).

A ce jour, la DIREN Île-de-France, nous demande d'étudier, à l'aide de ce même modèle, l'influence d'une augmentation de l'ensemble des prélèvements anthropiques en nappes (agricoles essentiellement mais également AEP et industrie) sur le fonctionnement hydrodynamique du bassin et ses réponses en terme de variations piézométriques et de débit des cours d'eau d'ordre 1 associé en période d'étiage.

2. Analyse des données de prélèvements anthropiques sur le bassin de la Seine

Les données utilisées dans cette étude concernent l'ensemble des prélèvements anthropiques du bassin et nous ont été fournies par la DIREN Île-de-France et l'Agence de l'Eau Seine Normandie (AESN). Elles couvrent de manière inégale une période globale comprise entre 1994 et 2004.

Après accord avec la DIREN, il a été décidé de prendre en compte :

- les prélèvements agricoles moyens de la période 1997-2001 (données DIREN) ;
- les prélèvements industriels et pour l'Alimentation en Eau Potable (AEP) de l'année 2004 (données AESN).

2.1. Prélèvements d'origine agricole

Le fichier de données « brutes », fourni sous format Excel, couvre la période 1994-2001. Ce fichier répertorie plus de 5000 ouvrages répartis sur le bassin Seine-Normandie et fournit, entre autres, pour chaque année, le volume cumulé annuel, le nom de l'ouvrage et la commune concernée (avec son numéro INSEE associé)

Le traitement de ces données pour cette étude a consisté à la réalisation de la moyenne des années 1997-2001 et à l'agrégation par commune. En final, les volumes obtenus par commune sont présentés Figure 1. Le volume global moyen annuel prélevé sur le bassin est alors de 91 697 528 m³.

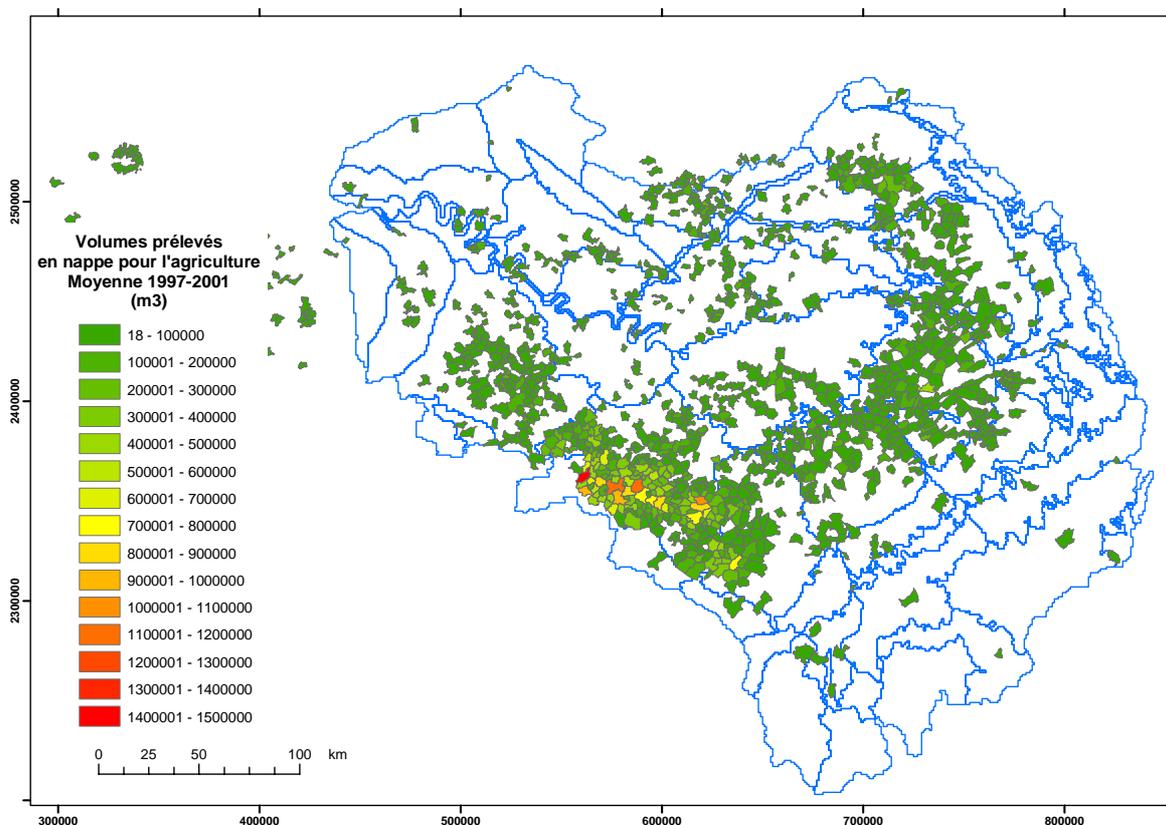


Figure 1 : moyenne des prélèvements agricoles agrégés par commune (moyenne des années 1997-2001)

2.2. Prélèvements d'origine industrielle et d'AEP

Le fichier de données fourni par l'AESN couvre la période 2000-2004 et concerne à la fois les prélèvements à des fins industrielles et d'AEP et répertorie plus de 7800 points de prélèvement. Comme pour les données de prélèvements d'origine agricole, le fichier précise le nom de la commune, son numéro Insee ..., mais également la nature de l'eau (nappe ou surface).

Dans cette étude, seules les données de prélèvement en nappe sont utilisées. Le tableau suivant précise l'évolution annuelle des prélèvements industriels et AEP sur la période 2000-2004.

Années	2000	2001	2002	2003	2004
Industrie	162 627 296	155 413 184	146 535 904	141 831 936	135 705 232
A.E.P	501 204 928	512 786 784	503 166 976	504 613 728	463 718 592

Tableau 1 : volumes annuels prélevés en nappe sur le bassin Seine-Normandie (m^3)

Sur la période retenue (2004), les prélèvements en nappe agrégés par commune pour l'industrie sont présentés Figure 2 et Figure 3 pour les prélèvements AEP.

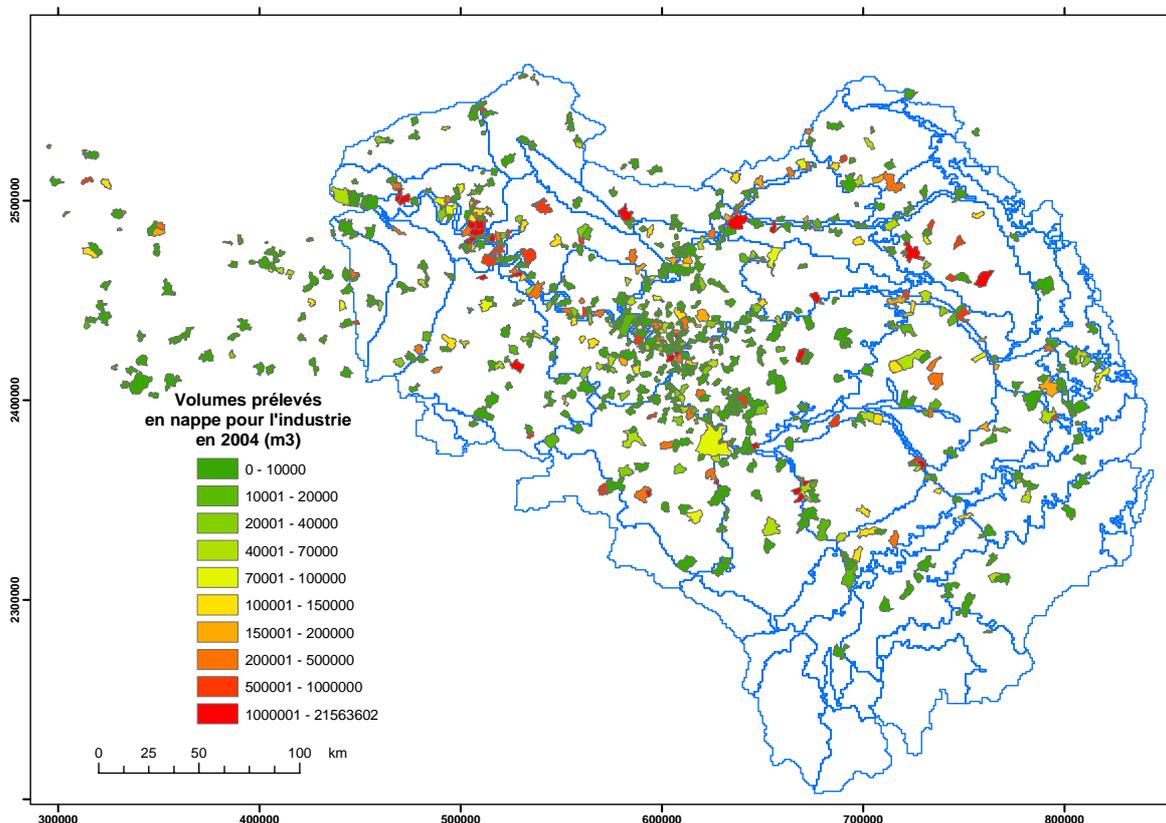


Figure 2 : volumes prélevés en nappe à des fins industrielles en m^3 /an : année 2004

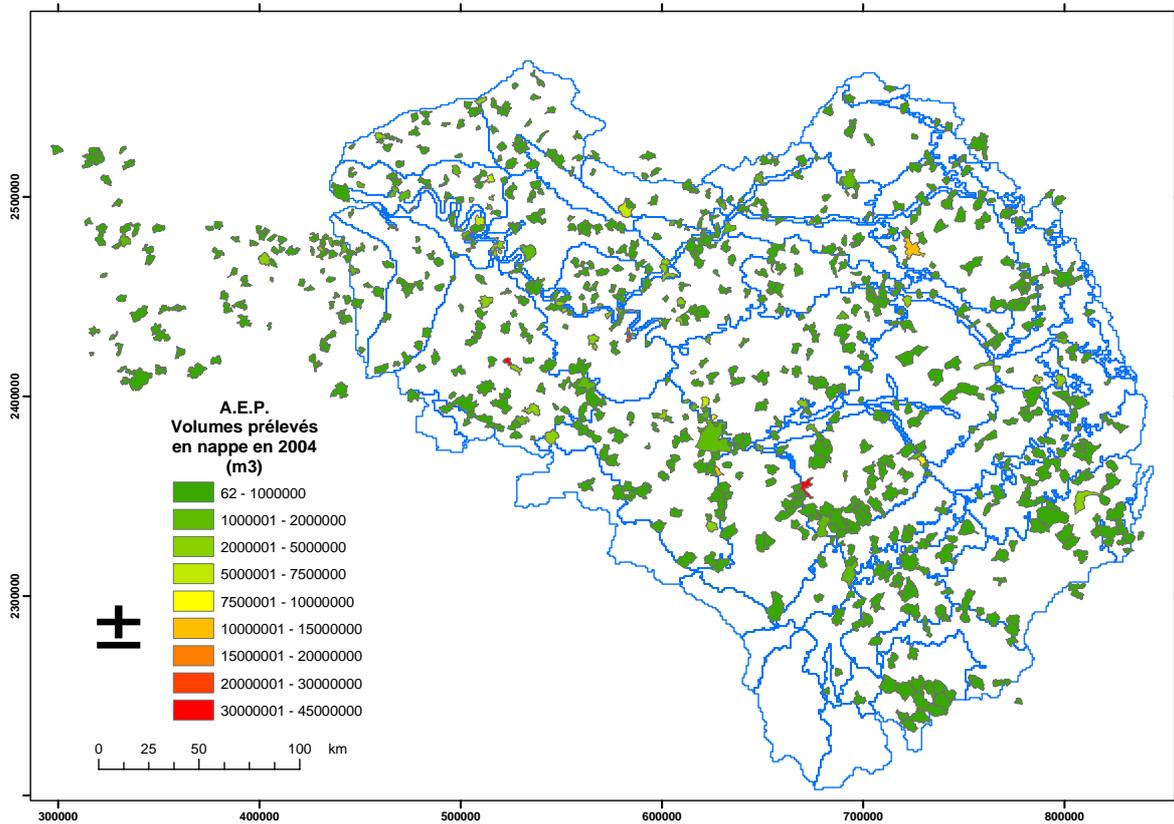


Figure 3 : volumes prélevés en nappe pour l'AEP en m³/an : année 2004

3. Présentation général du modèle hydrogéologique MODCOU

La Figure 4 présente le principe général du modèle hydrogéologique MODCOU utilisé dans cette étude. Ce modèle est, comme son nom l'indique, un modèle qui couple les écoulements de surface et les écoulements souterrains afin de reproduire, entre autres, les débits aux rivières simulées et les piézométries dans les aquifères représentés. Globalement, le modèle de surface assure le bilan hydrique des eaux météoriques entre évaporation, ruissellement et infiltration et le modèle souterrain assure le transfert dans les formations aquifères et les échanges nappe-rivière.

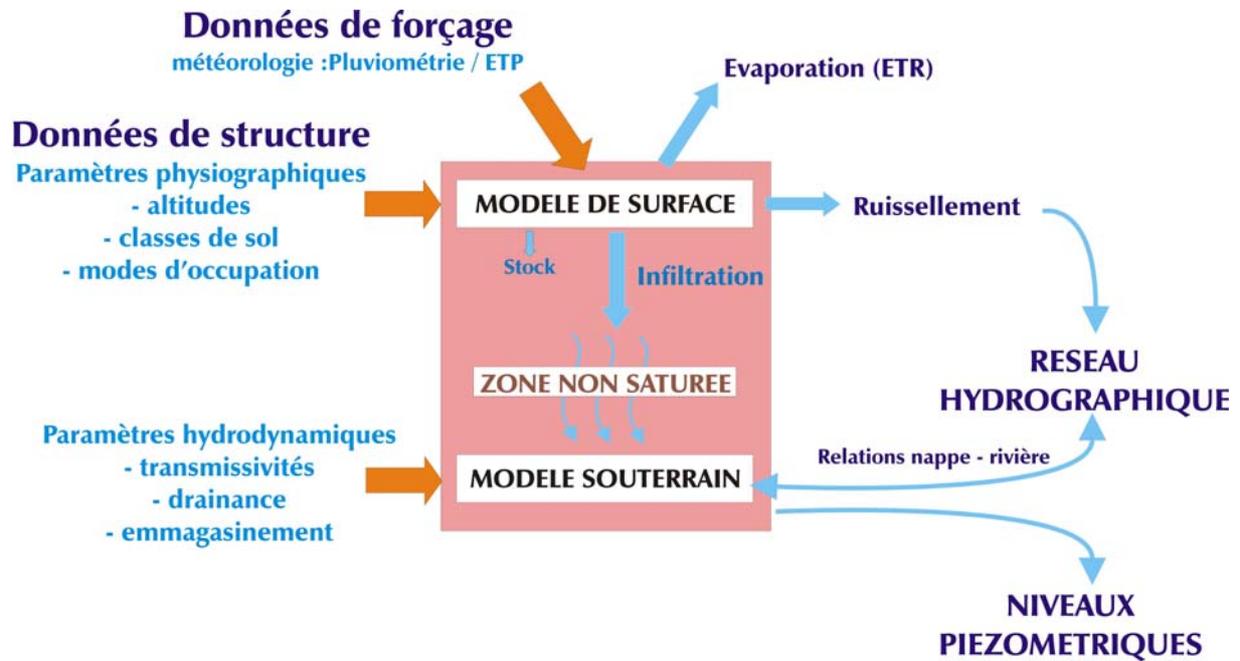


Figure 4 : principe général du modèle hydrogéologique couplé MODCOU

Le modèle étudié est discrétisé en une structure multicouche (Figure 5) utilisant des mailles carrées emboîtées, mailles auxquelles sont rattachées les caractéristiques du domaine (direction de drainage, altitude, distribution des zones de production pour les mailles de surface ; transmissivité, drainance, coefficient d'emmagasinement pour les mailles des couches souterraines).

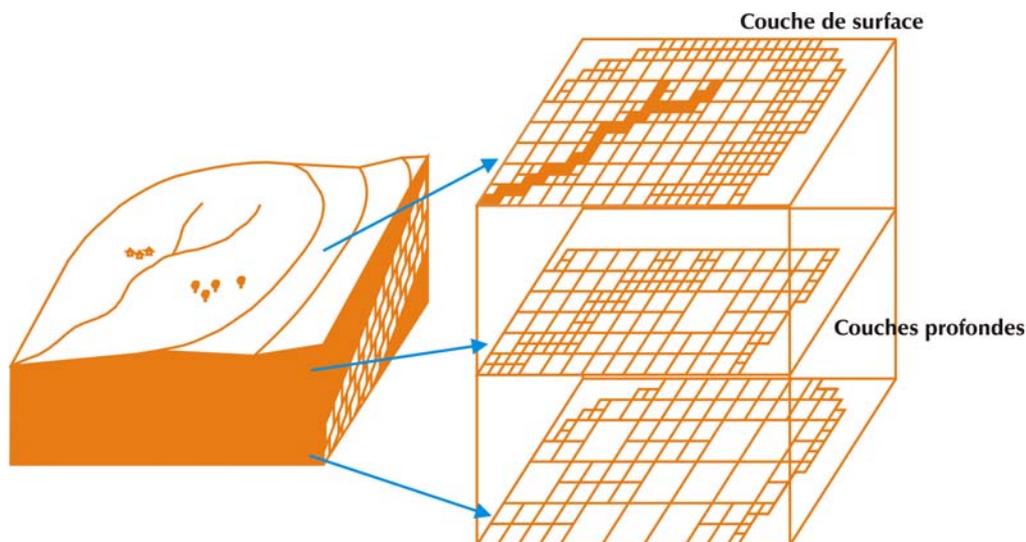


Figure 5 : principe de la schématisation multicouche

Pour le modèle du bassin de la Seine, la couche de surface couvre une surface totale de 95560 km² constituée de 35198 mailles de 1 à 8 kilomètres de côté (Figure 6). Les formations aquifères représentées sont au nombre de trois et sont respectivement, de la plus superficielle à la plus profonde, l'Oligocène, l'Eocène et la Craie (Figure 7).

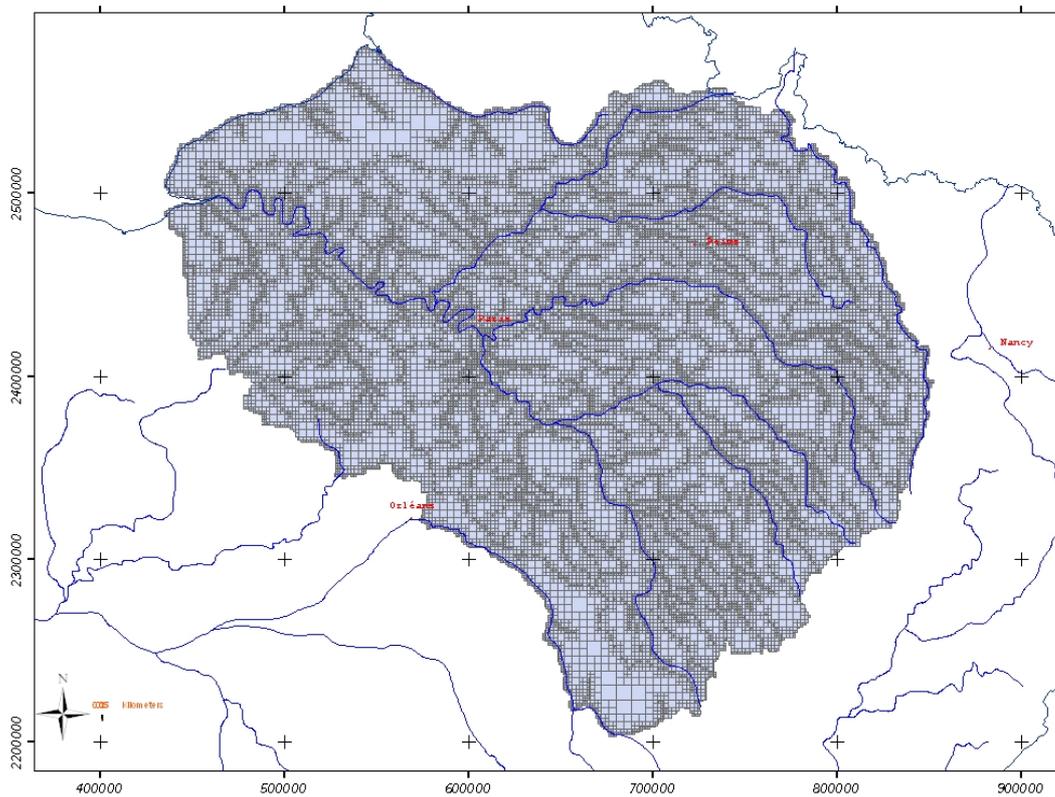


Figure 6 : maillage de la couche de surface

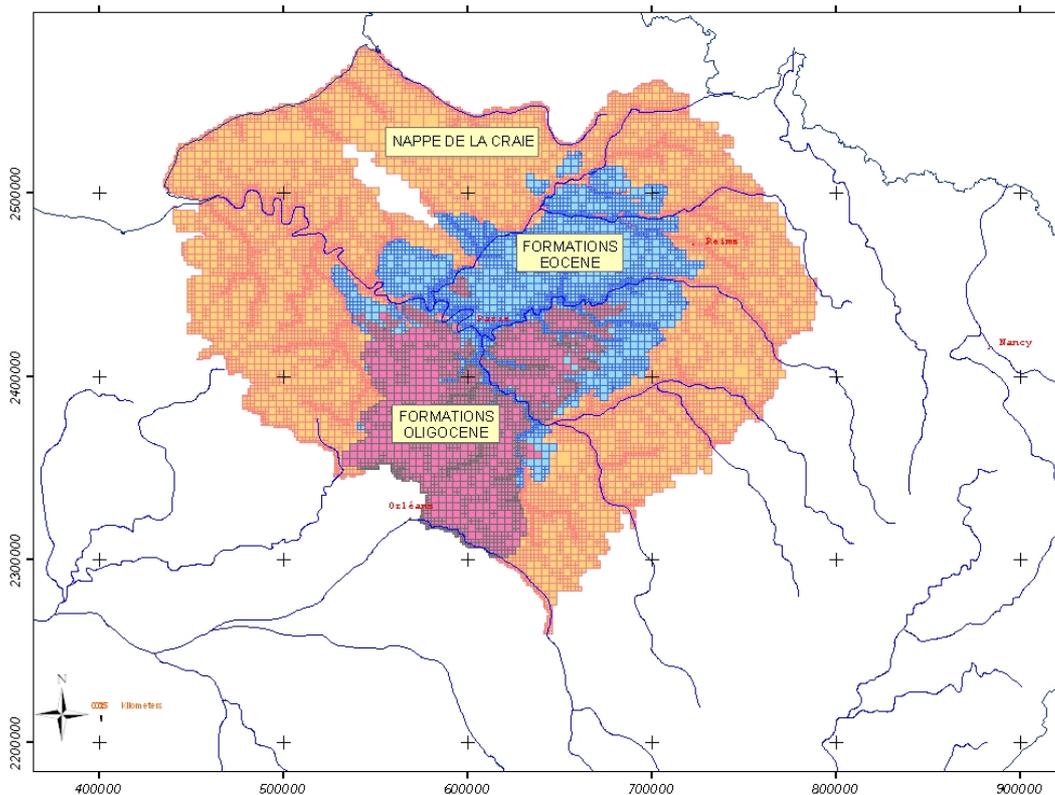


Figure 7 : maillage des formations souterraines prises en compte

Les données de forçage sont essentiellement constituées par les données météorologiques représentées par la pluviométrie globale (pluie + neige) et l'évapotranspiration potentielle (ETP).

Ces données météorologiques, issues de la procédure SAFRAN de Météo France, sont entrées sur une grille régulière au pas de 8 kilomètres couvrant l'ensemble du bassin de la Seine (Figure 8).

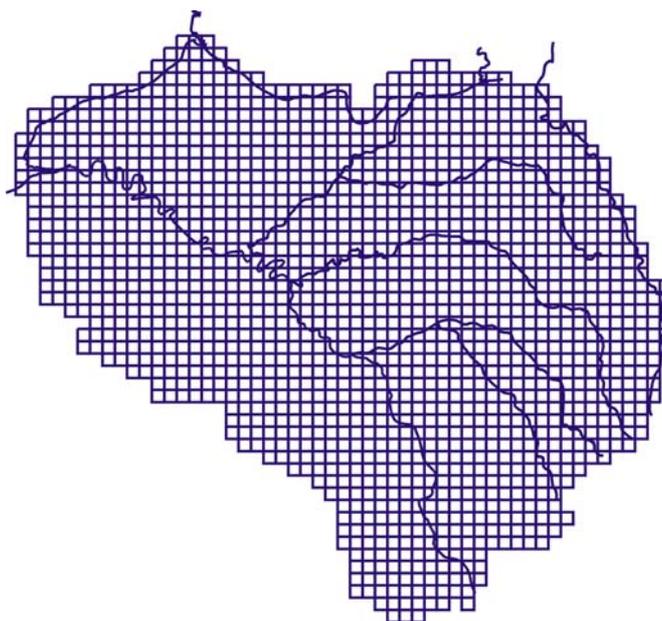


Figure 8 : grille d'entrée des données météorologiques

A titre d'exemple, la présente les précipitations et l'évapotranspiration potentielle moyennes annuelles sur la période 1970-1990.

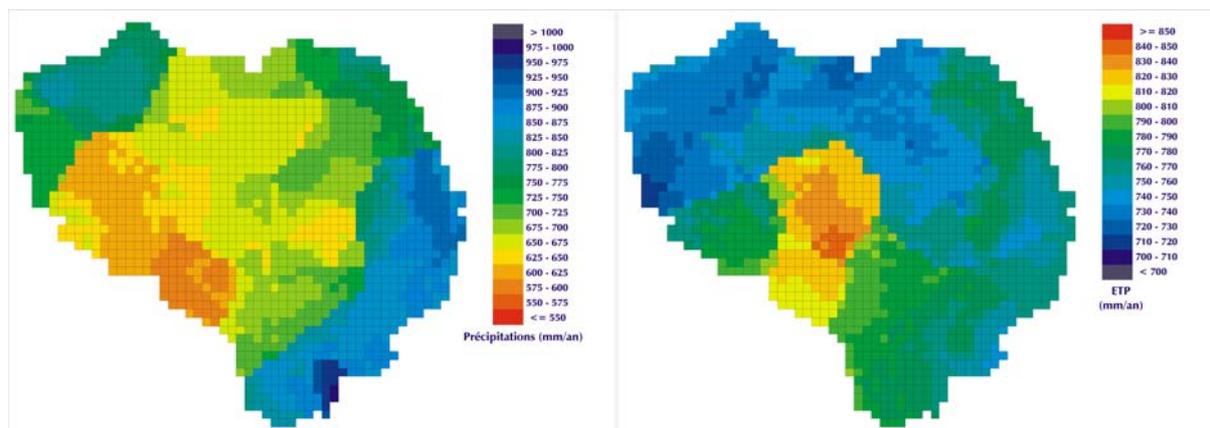


Figure 9 : précipitations et ETP moyennes annuelles sur la période 1970-1990

Le calage global du modèle sur le bassin de la Seine, initié par E. Gomez lors de son travail de thèse (2002), a été affiné lors d'une étude commanditée par la DIREN en 2004, « Modélisation du fonctionnement hydrogéologique du bassin de la Seine – Calage du comportement des nappes internes du bassin de la Seine – Prévision des étiages », rapport Armines/Ecole des Mines de Paris – Centre d'Informatique Géologique, LHM/RD/04/30.

4. Intégration des données de prélèvement dans le modèle hydrogéologique

L'intégration des données de prélèvement dans le modèle MODCOU suppose le transfert des données de prélèvement agrégées par commune sur les mailles de surface du modèle hydrogéologique. Pour ce faire, on supposera que les volumes prélevés par commune sont uniformément répartis sur le territoire de cette dernière. Le volume à affecter par maille du modèle se fera donc au *pro rata* des surfaces d'intersection commune - maille de surface (Figure 10).

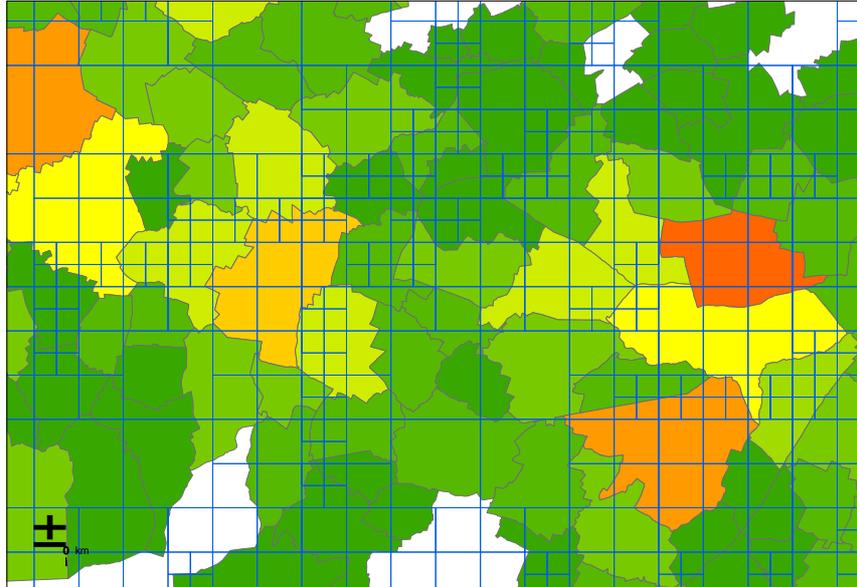


Figure 10 : croisement communes – mailles du modèle de surface

De plus, au niveau du modèle, afin de n'étudier que l'impact des prélèvements anthropiques en nappe, tout prélèvement s'effectuant dans une maille rivière du modèle n'est pas pris en compte (afin de s'affranchir des prélèvements effectués en nappe alluviale).

La Figure 11 présente le réseau de mailles rivières définies dans le modèle. Ce « réseau hydrographique modèle » a été obtenu en définissant que toute maille est déclarée « rivière » si la surface drainée par celle-ci est supérieure à 250 km².

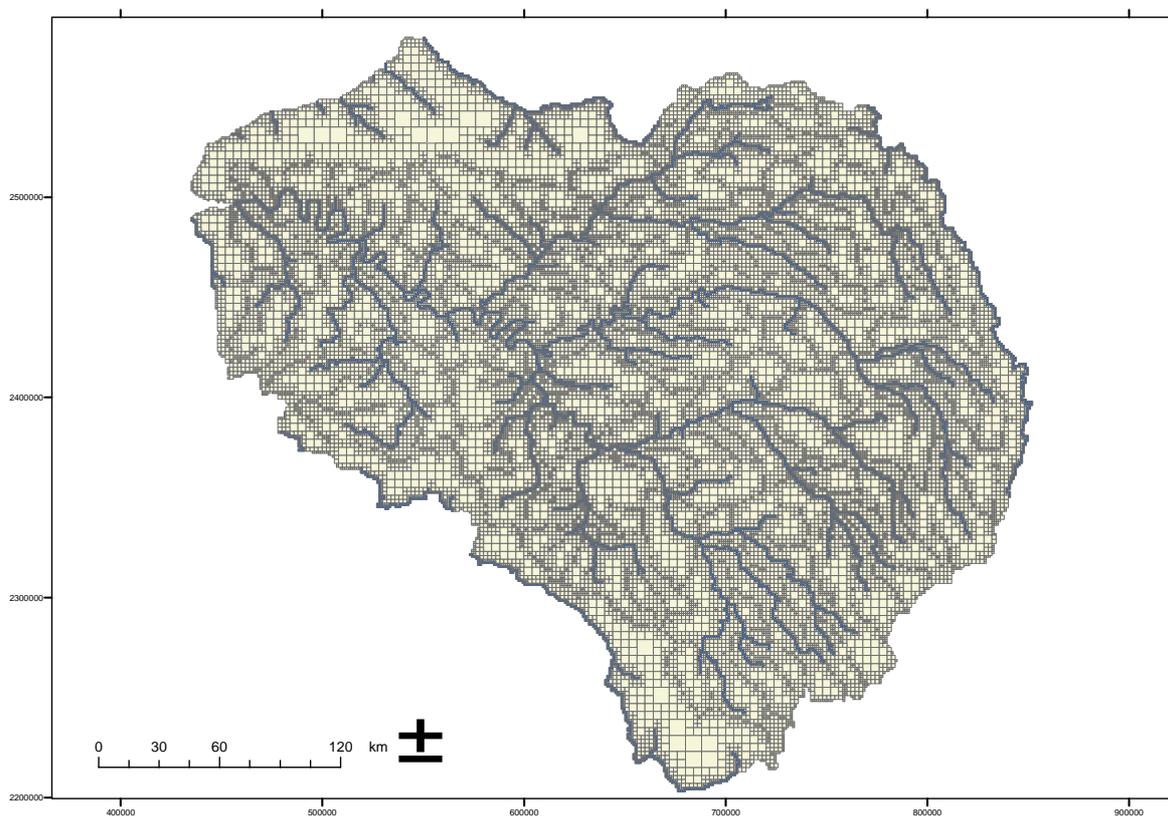


Figure 11 : réseau hydrographique « modèle »

Au niveau des calculs d'impact des prélèvements, le volume global pris en compte dans les modélisations, après suppression des prélèvements au niveau des mailles rivières est de 532 573 960 m³, réparti en :

- Prélèvements d'origine agricole : 85 924 912 m³ (95,3 % des prélèvements agricoles totaux sur la bassin) ;
- Prélèvement A.E.P. : 338 199 328 m³ (72,9 %) ;
- Prélèvements industriels : 108 449 720 m³ (79,9 %).

Les Figure 12 à Figure 15 présentent la répartition géographique de ces prélèvements rapportés sur le maillage de surface du modèle.

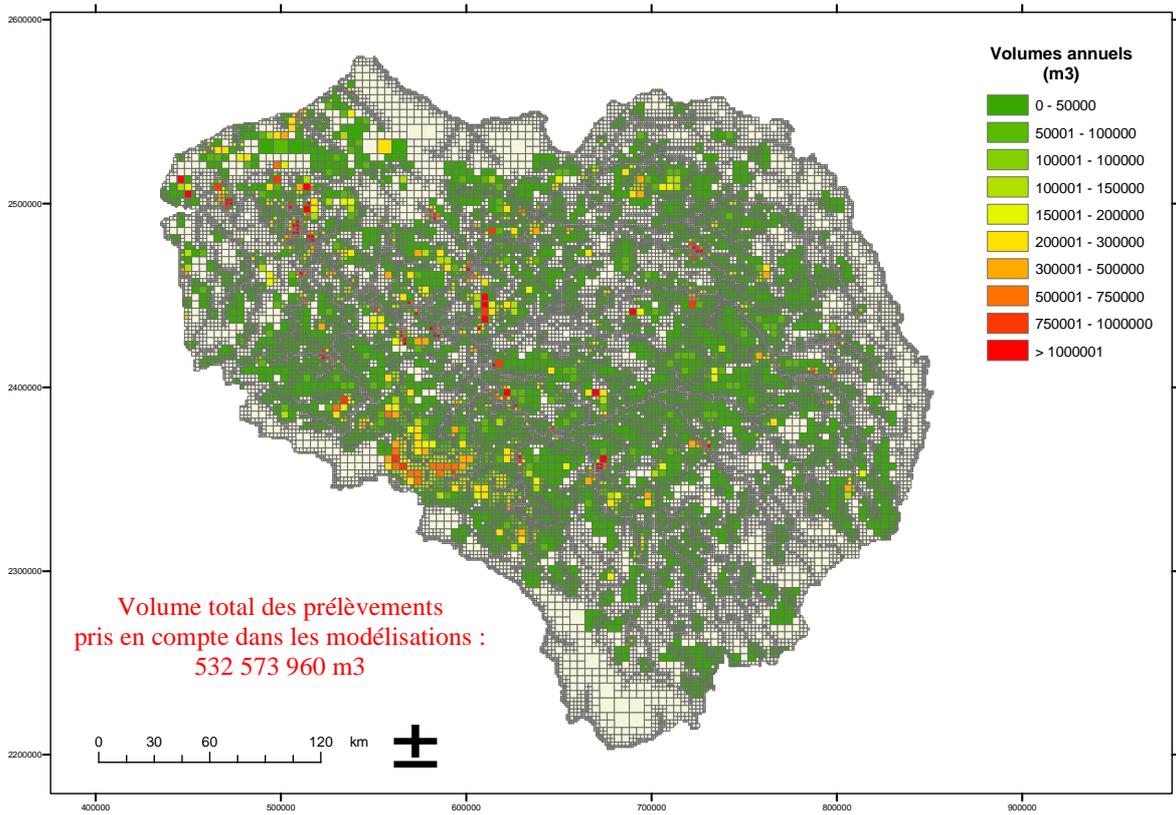


Figure 12 : prélèvements en nappes globaux rapportés au maillage de surface du modèle

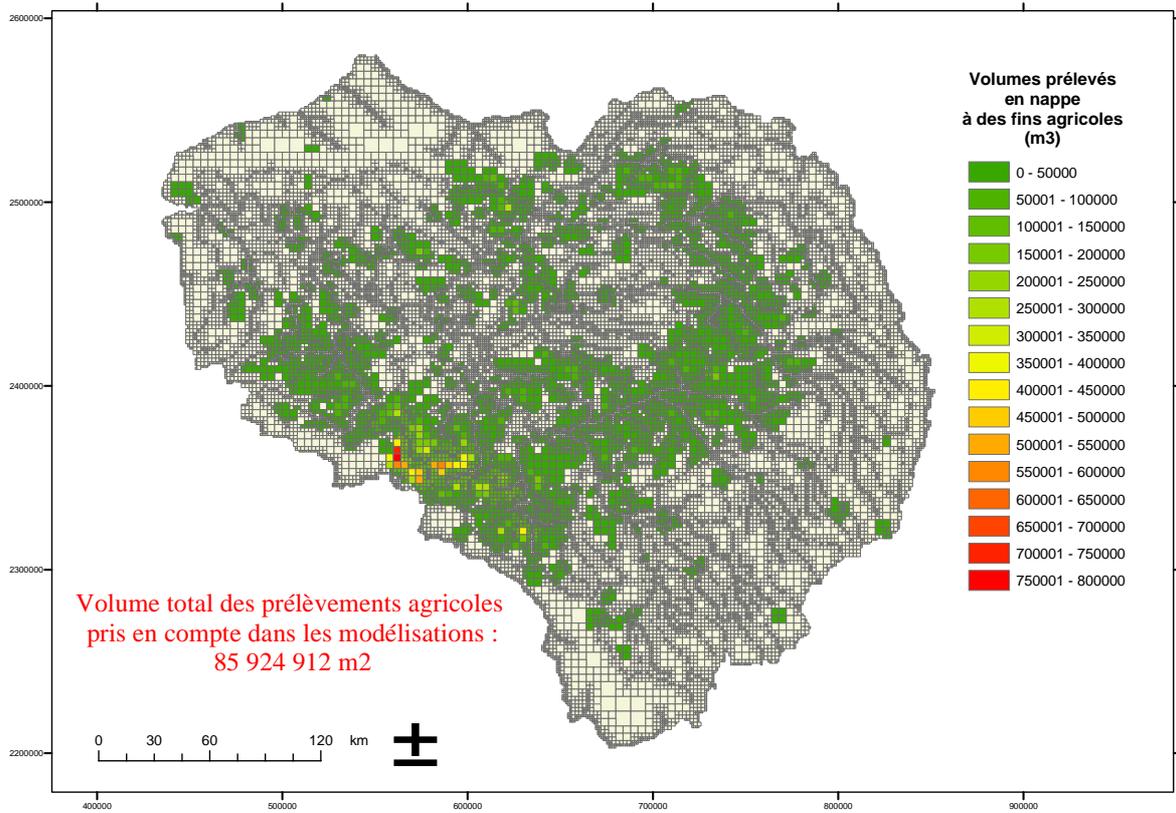


Figure 13 : prélèvements agricoles en nappes moyens 1997-2001 rapportés sur le maillage de surface du modèle

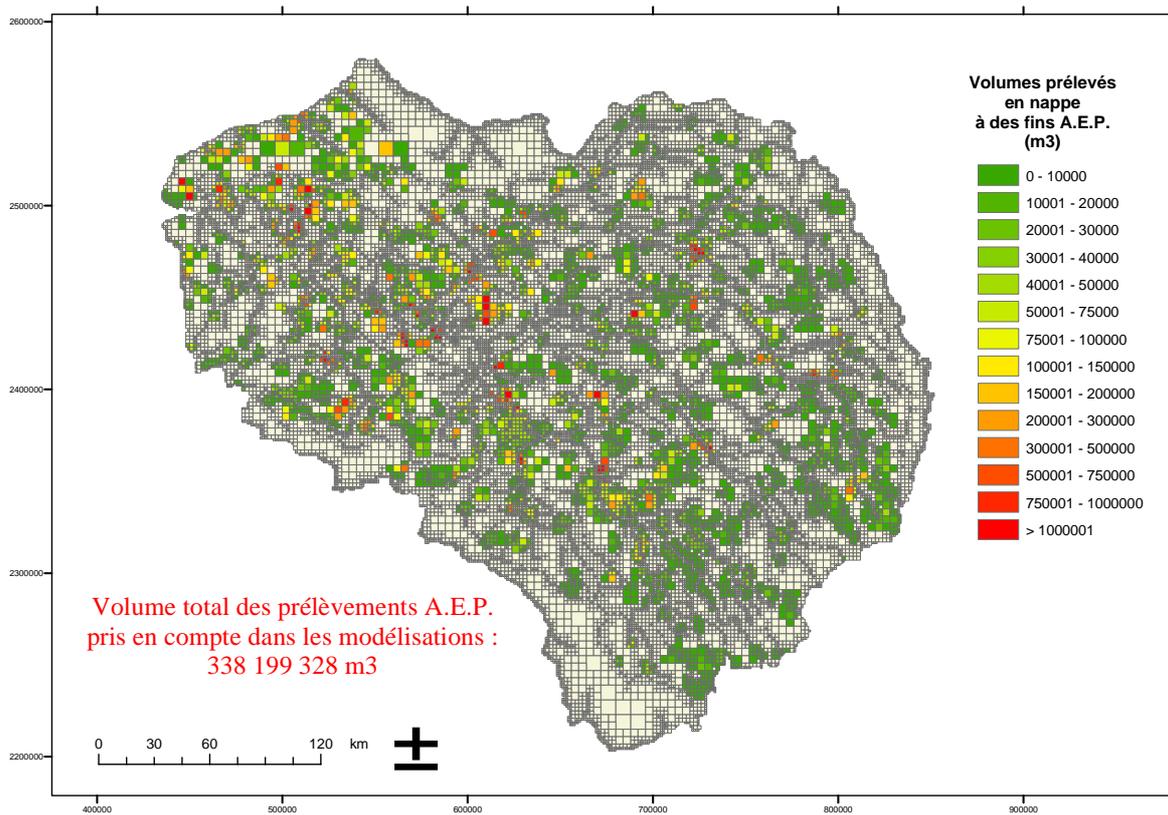


Figure 14 : prélèvements AEP 2004 en nappes rapportés sur le maillage de surface du modèle

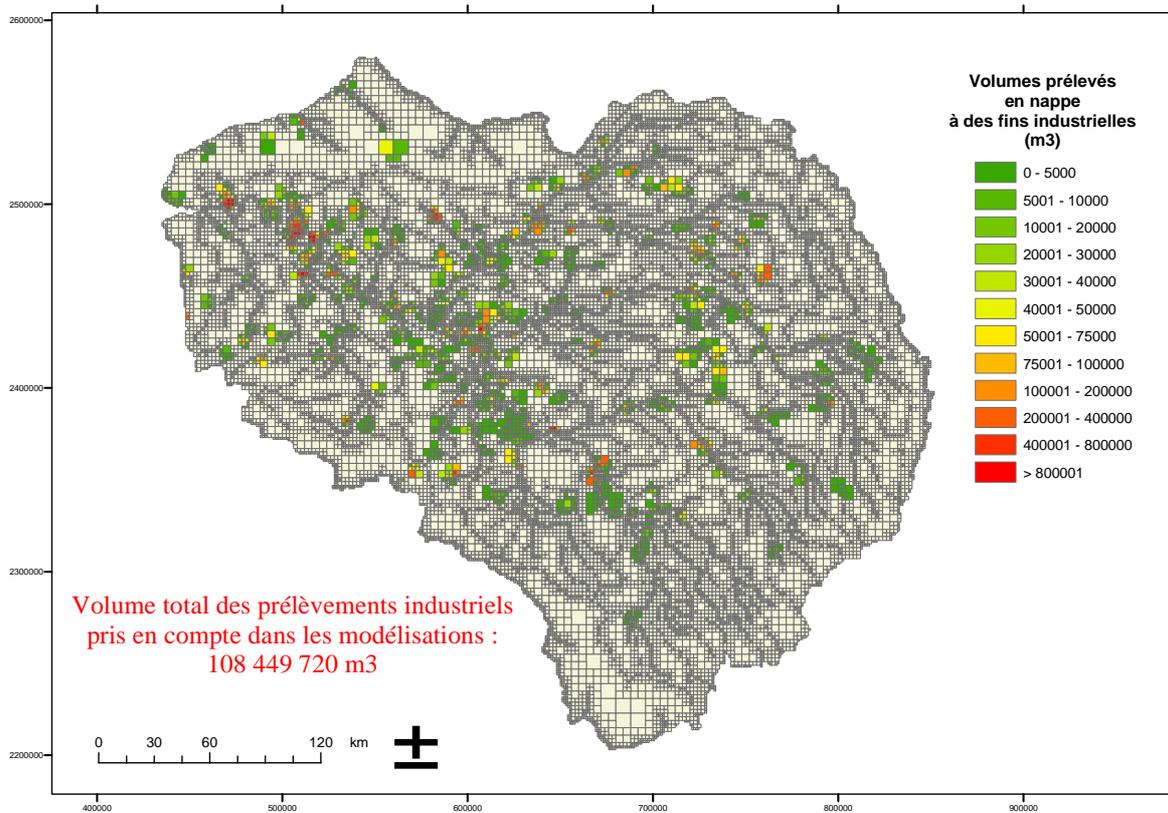


Figure 15 : prélèvements industriels 2004 en nappes rapportés au maillage de surface du modèle

5. Exploitation du modèle hydrogéologique

5.1. Choix d'une année hydrogéologique moyenne

Le modèle permet actuellement la simulation du fonctionnement hydrogéologique du bassin sur une période allant du 1/08/1970 au 31/07/2004, soit 34 années hydrologiques complètes. Le but de la présente étude étant d'estimer l'impact d'une augmentation des prélèvements anthropiques du bassin sur son fonctionnement hydrogéologique, il est nécessaire de définir une année hydrogéologique moyenne qui servira, dans les modélisations prospectives, d'année de référence.

A l'échelle du bassin et plus généralement en hydrogéologie, la moyenne journalière sur une année de l'ensemble des variables météorologiques (pluie et ETP) ne permet pas de reproduire une année « moyenne ». En effet, la moyenne des pluies, par exemple, conduit à faire pleuvoir pratiquement tous les jours en lissant les périodes les plus humides (s'ajoute à cela la variabilité spatiale observée sur le bassin). De plus, une année météorologique qui serait considérée comme moyenne au sens climatique ne conduit pas spécialement à une année de recharge moyenne des aquifères.

L'année de recharge moyenne la plus représentative a donc été obtenue en comparant les alimentations efficaces moyennes annuelles calculées par le modèle de surface sur les 34 années de simulation (Figure 16).

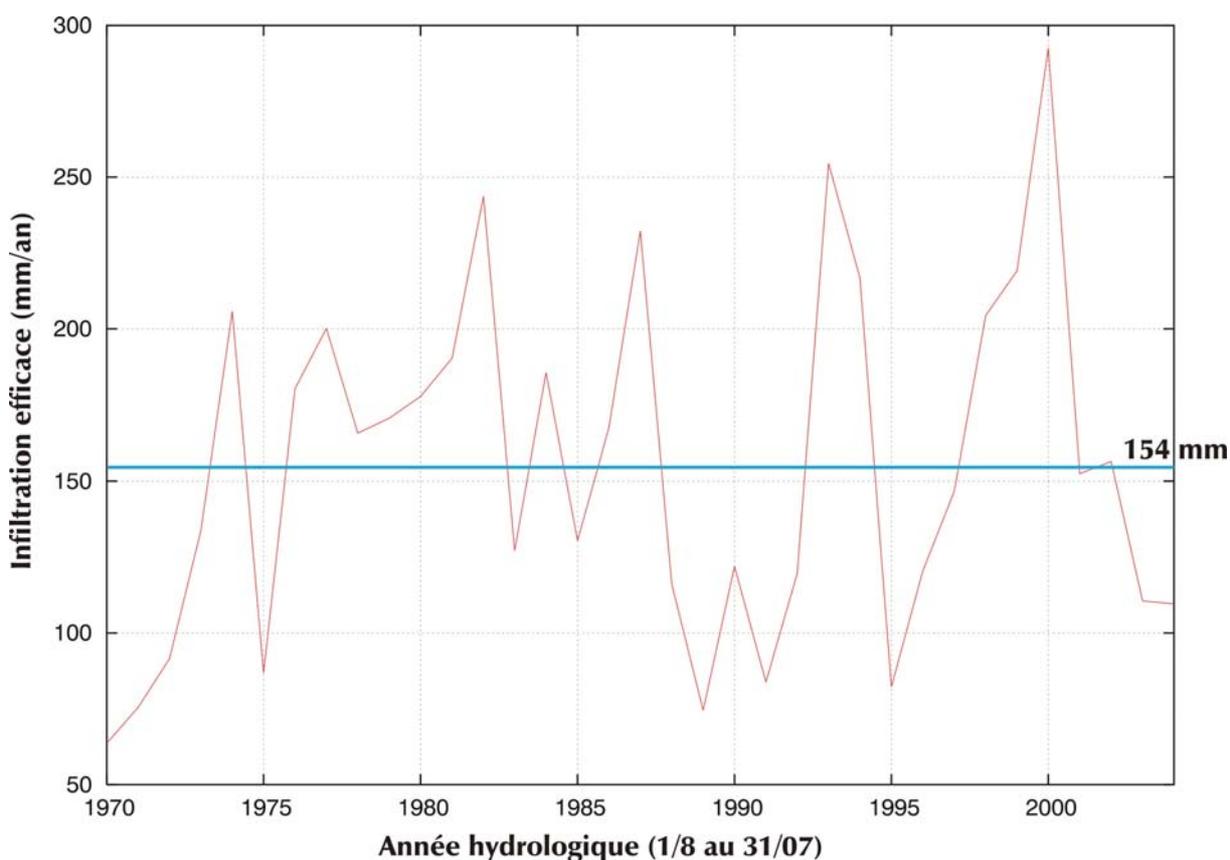


Figure 16 : alimentations efficaces moyennes des nappes calculées entre 1970 et 2004

A partir de ces données, les évolutions journalières calculées des années les plus proches de la moyenne (154 mm/an) ont été comparées et l'année qui présentait le meilleur contraste entre période de recharge et période sèche a été retenue, soit 2002/2003. La Figure 17 présente la pluviométrie moyenne obtenue sur le bassin et la Figure 18 l'évolution de la

recharge efficace des nappes calculée sur cette année entre le 1^{er} août 2002 et le 31 juillet 2003.

Il est important d'insister sur le fait que l'année choisie n'est donc représentative que d'une **recharge efficace moyenne sur l'ensemble du bassin.**

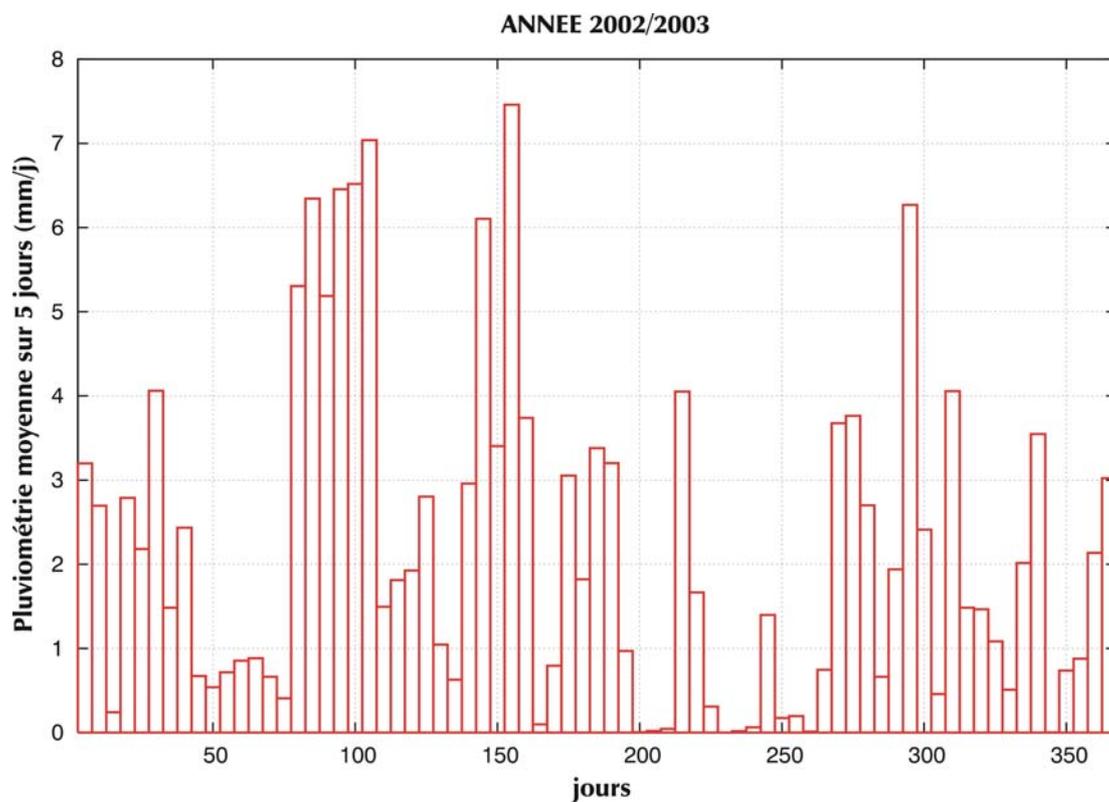


Figure 17 : pluviométrie moyenne journalière (données SAFRAN-Météo-France)

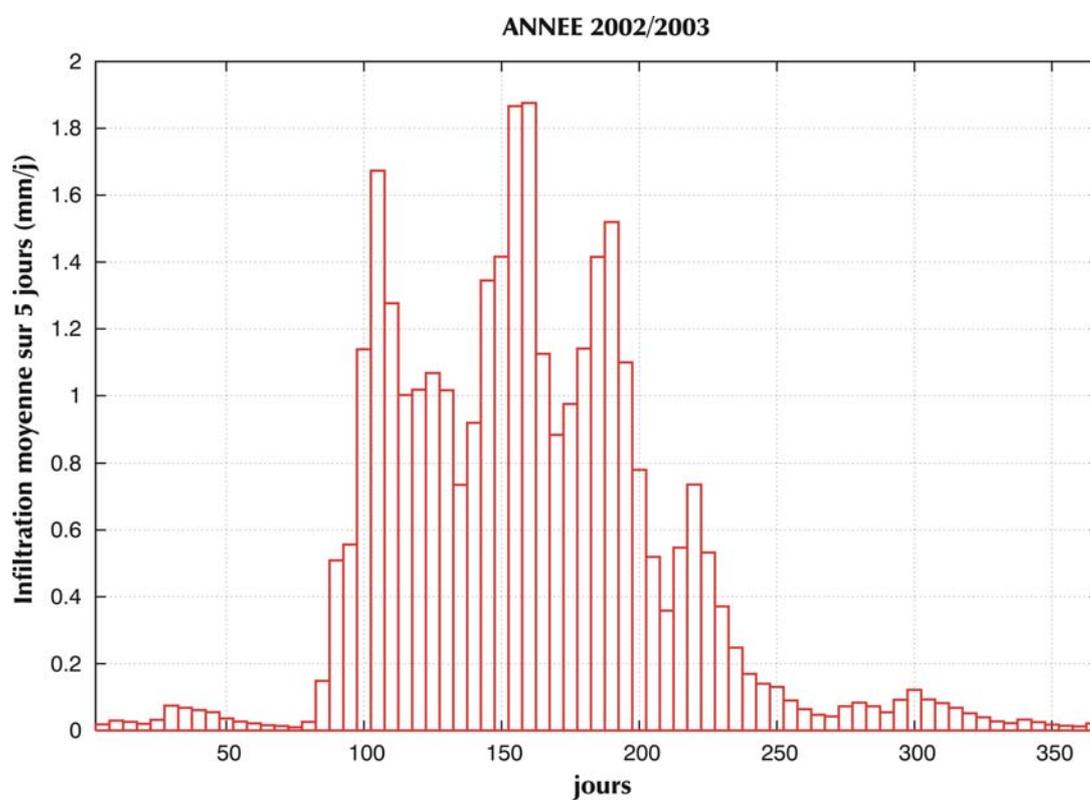


Figure 18 : infiltration efficace journalière moyenne calculée

La Figure 19 présente la répartition spatiale de cette infiltration moyenne annuelle (en mm) sur la bassin rapportée sur les maillage de surface. La Figure 20 présente la même variable exprimée en volume global annuel par masse d'eau de la DCE.

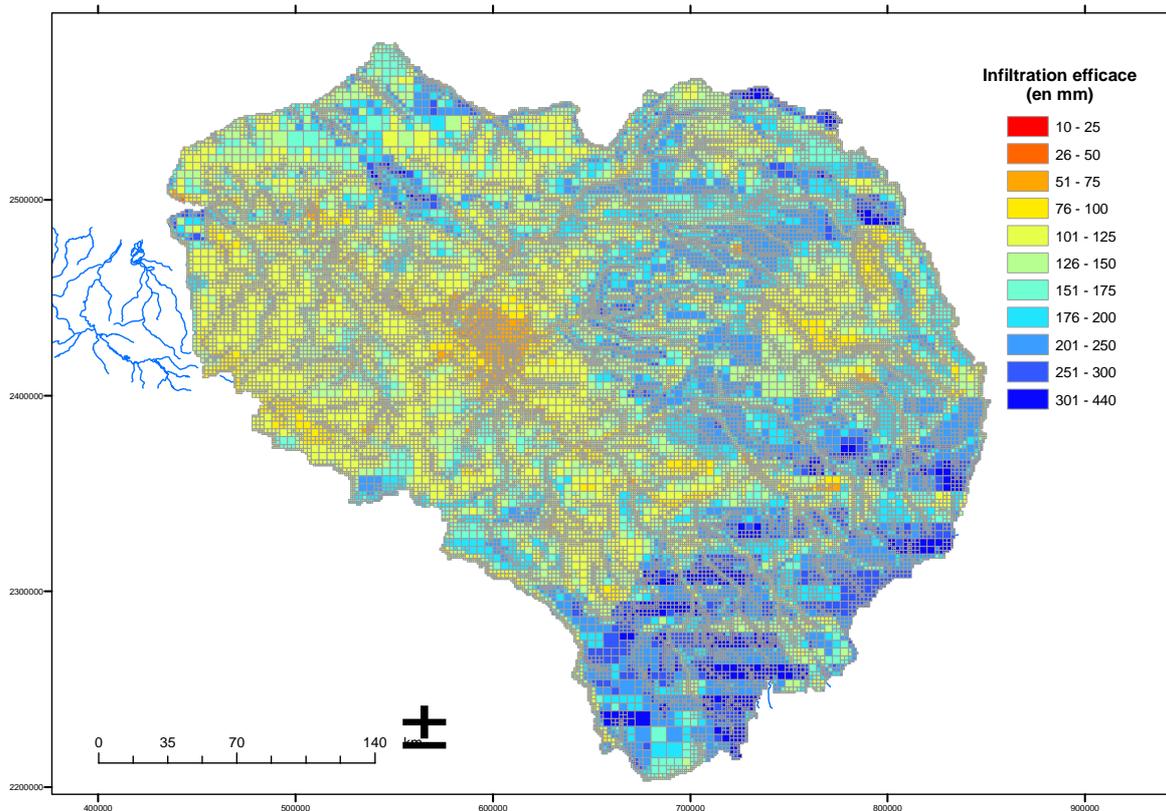


Figure 19 : infiltration moyenne calculée – année 2002-2003

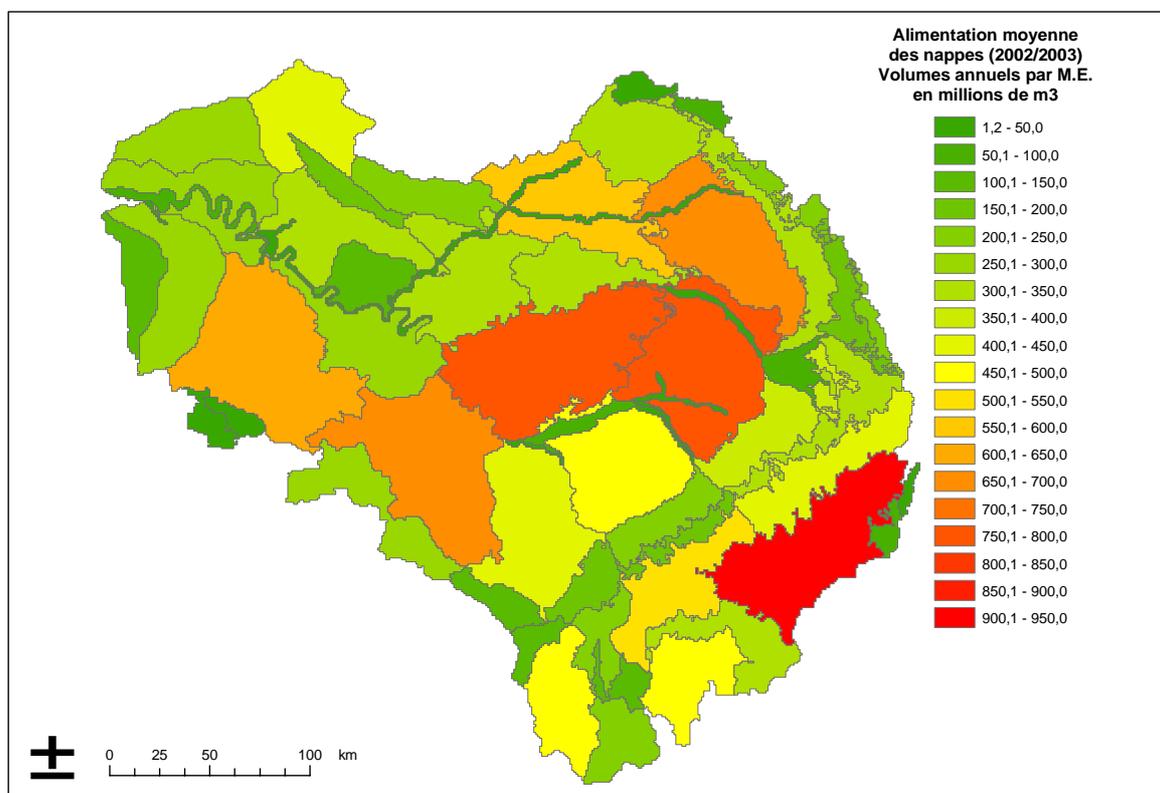


Figure 20 : alimentation efficace moyenne des nappes rapportée aux masses d'eau de la DCE

Les Figure 21 Figure 24 indiquent la part relative des prélèvements anthropiques par rapport à l'alimentation moyenne des nappes.

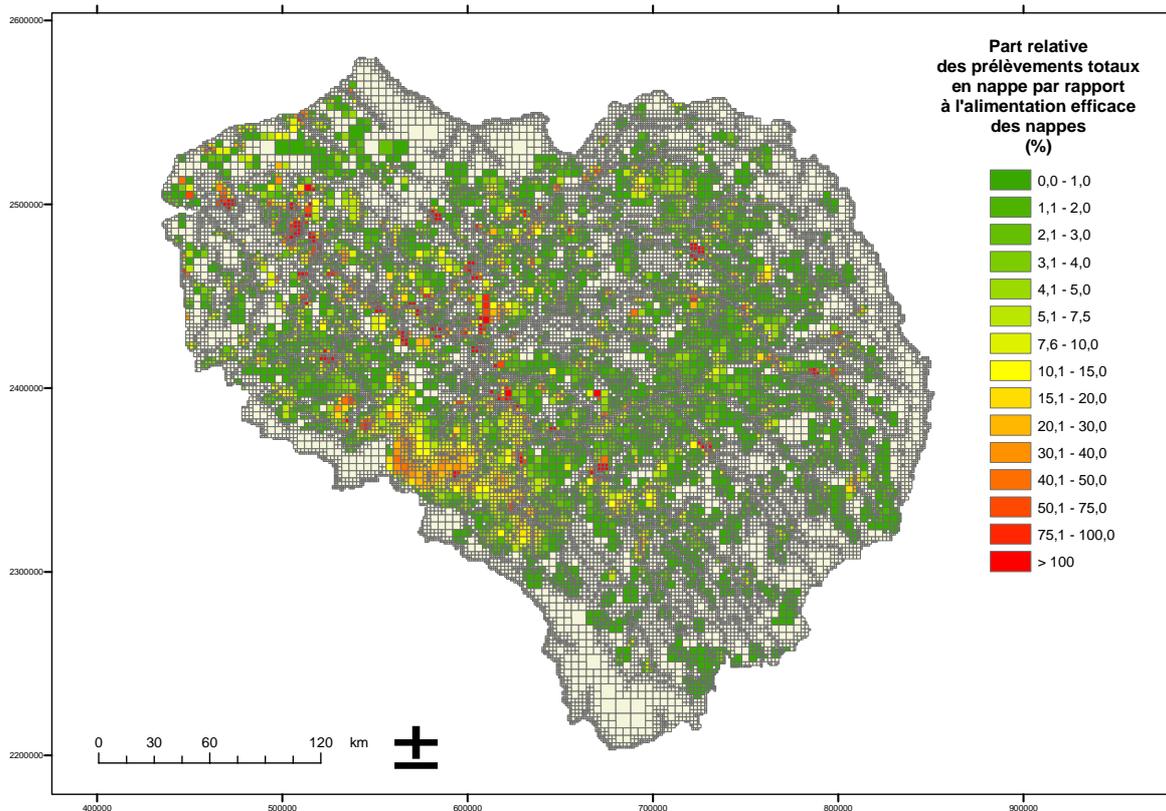


Figure 21 : part relative prélèvements globaux / alimentation des nappes

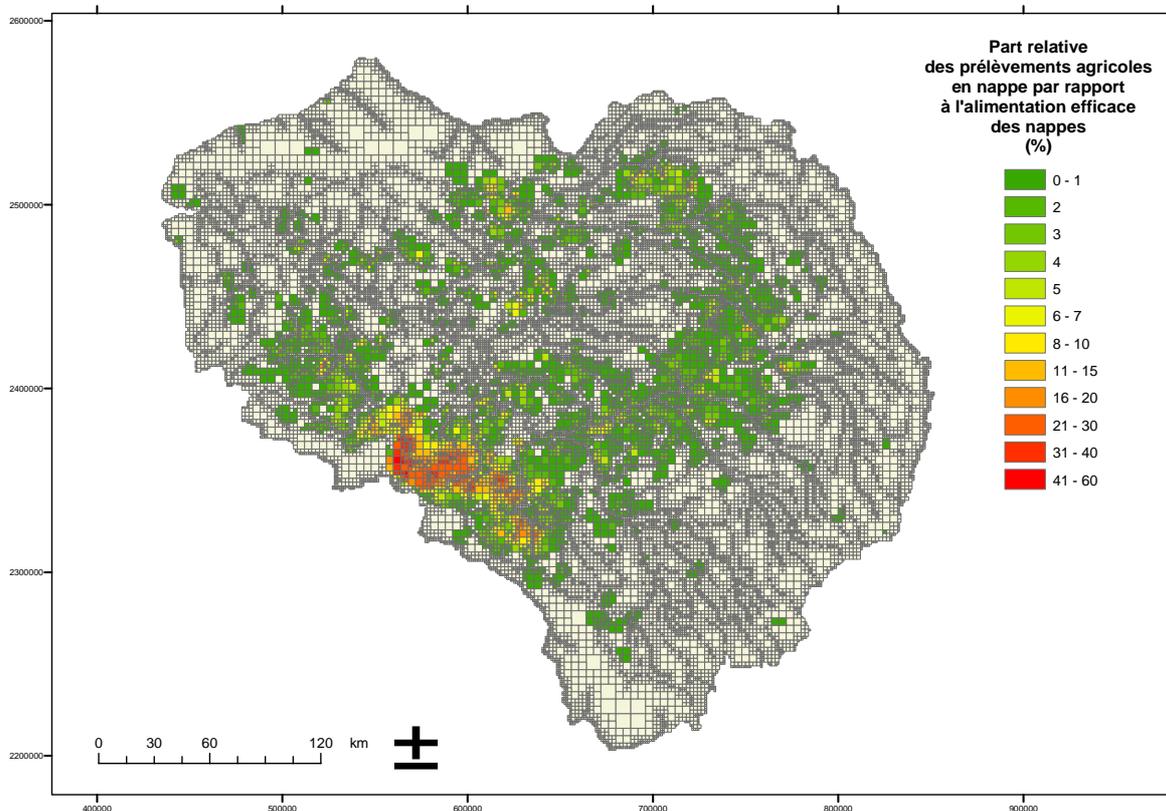


Figure 22 : part relative prélèvements agricoles / alimentation des nappes

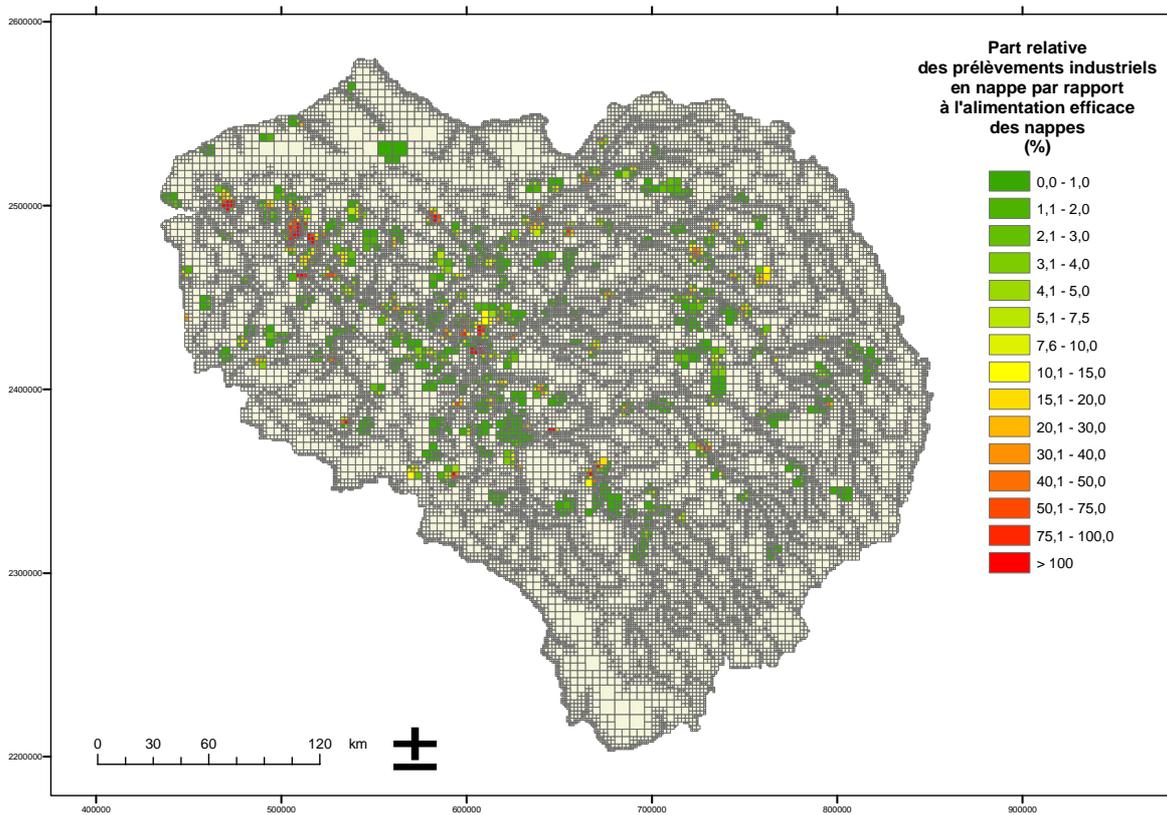


Figure 23 : part relative prélèvements industriels / alimentation des nappes

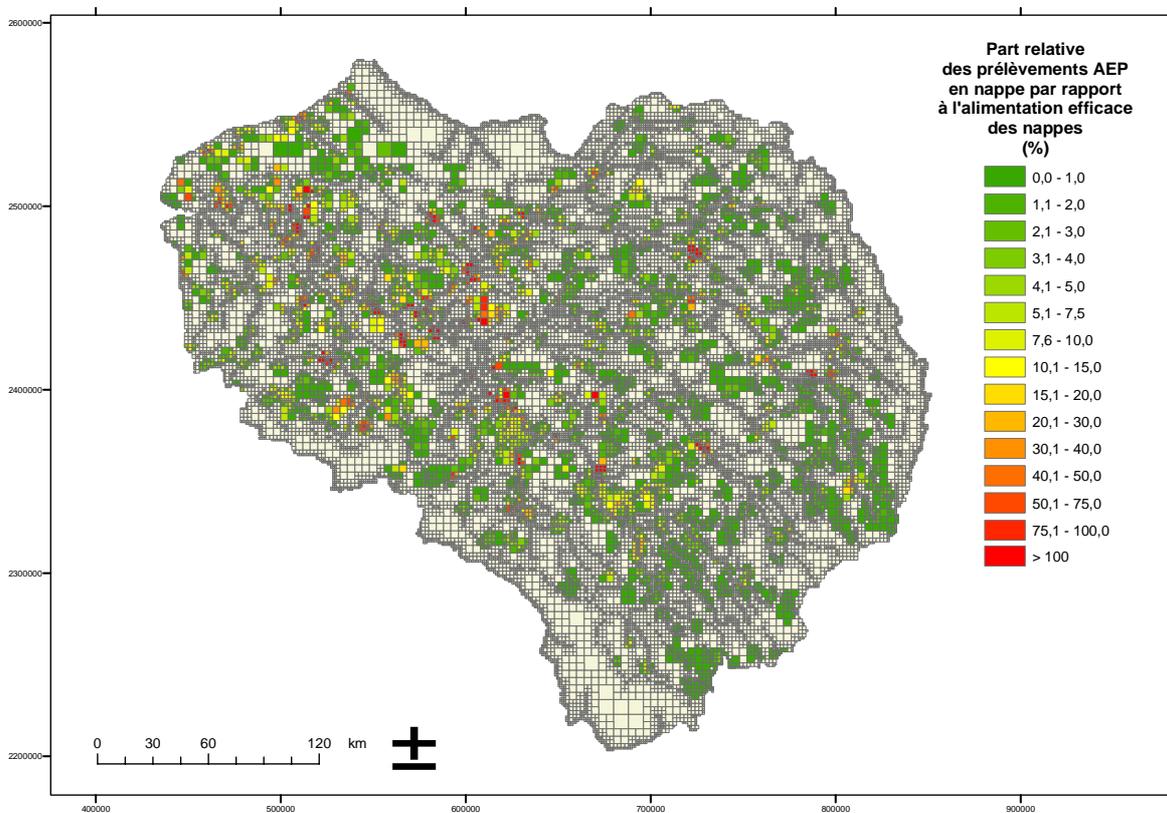


Figure 24 : part relative prélèvements AEP / alimentation des nappes

5.2. Estimation des débits calculés minimaux mensuels de période de retour 5 ans sur la période de simulation 1970-2004

Afin de déterminer l'impact de l'augmentation des prélèvements anthropiques sur le débit des cours d'eau amont, un certain nombre de points de calcul d'évolution du débit ont été répartis sur l'ensemble du bassin et placés sur les tronçons de maille rivière d'ordre 1 (Figure 25). L'ensemble des calculs d'évolution de débit s'effectuera au niveau des ces « stations hydrologiques » fictives.

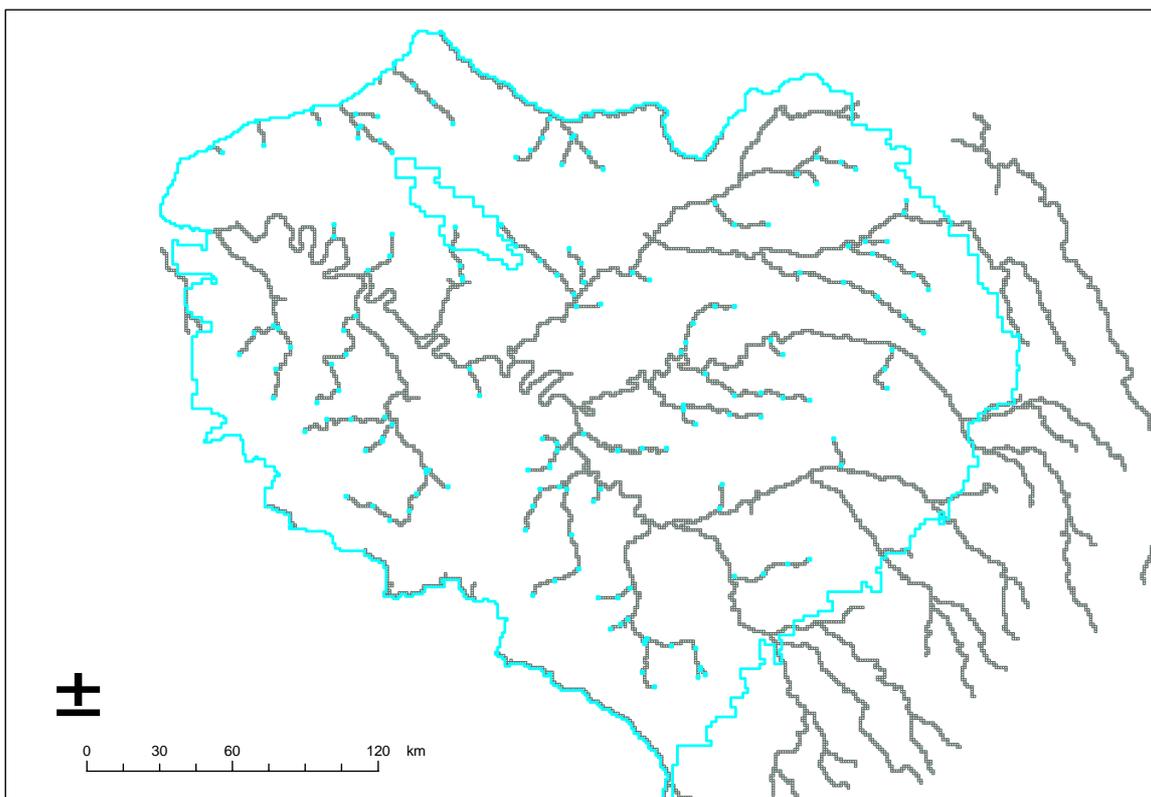


Figure 25 : situation des points de calcul sur les rivières d'ordre 1 du modèle

Le calcul du débit minimal mensuel de retour 5 ans (QMNA5) de l'ensemble de ces « stations » s'obtient de la manière suivante :

- calcul des débits moyens mensuels sur 34 ans pour chaque « station » retenue ;
- sélection pour chaque année civile (33 années pour ce qui nous concerne) du débit moyen mensuel minimal, indépendamment du mois où il est observé, pour chaque « station » ;
- tri de ces 33 valeurs par « station » de la plus faible à la plus forte en associant à la i -ème valeur sur n ($n=33$), la fréquence empirique $F=(i-0.3)/(n-0.4)$. La valeur $F=0.5$ représente la médiane ;
- pour les valeurs inférieures à 0.5 on pose $T=1/F$, T exprimant la rareté en "années", d'où l'expression de période de retour. Avec $T=5$ ans, $F=0.2$.

A titre d'exemple, la Figure 26 présente la courbe d'évolution des débits minimaux mensuels classés associés à la fréquence calculée F pour une « station » donnée.

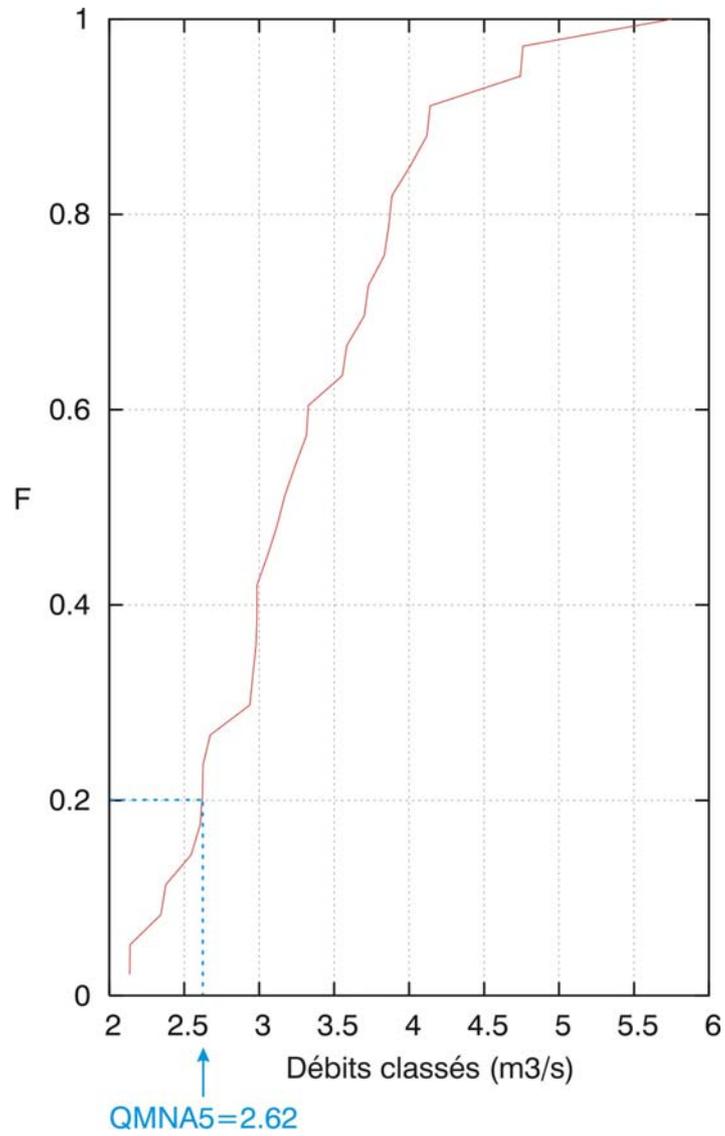


Figure 26 : calcul du QMNA5

La Figure 27 précise, pour chaque « station » simulée, le débit minimal mensuel de retour 5 ans calculé sur la période 1971-2003 (années civiles).

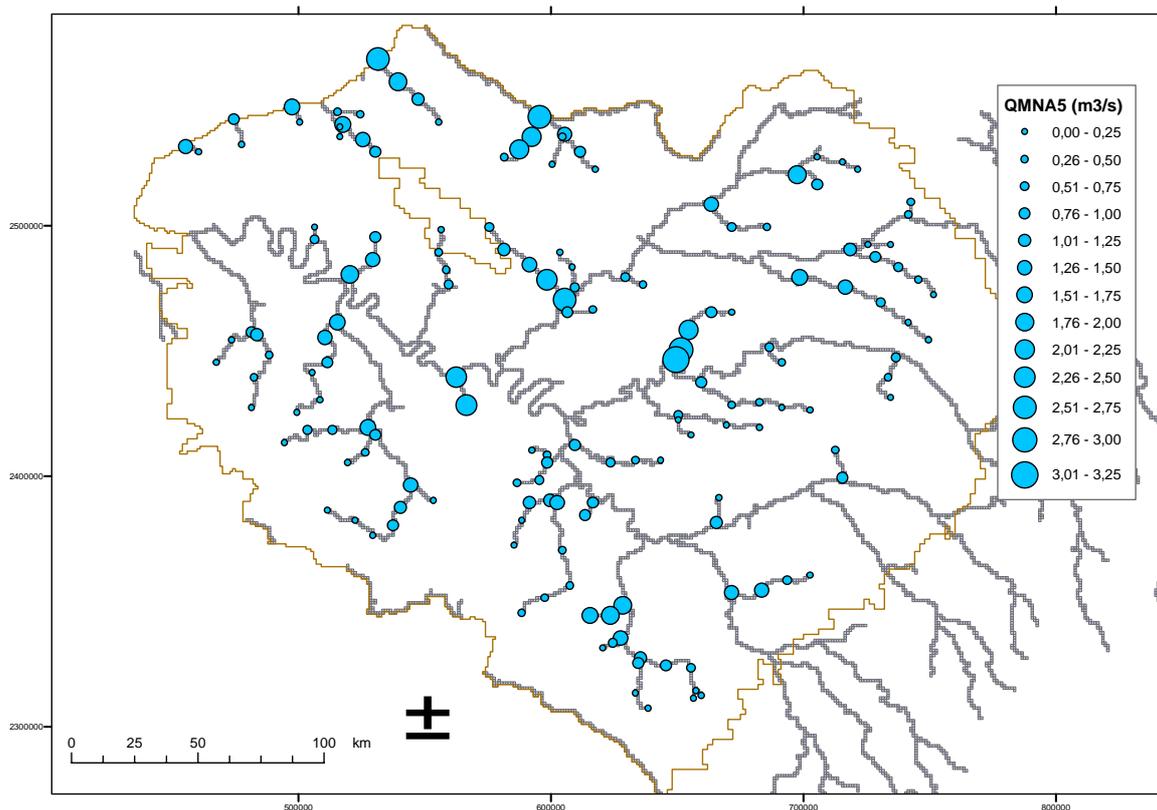


Figure 27 : QMNA5 calculés sur le bassin pour la période 1971-2003 (années civiles)

5.3. Etat piézométrique de référence correspondant à la situation hydrogéologique cinq ans sec

Du fait de la variabilité spatiale des précipitations, des ETP, de la nature des sols, etc... sur le bassin, l'ensemble des QMNA5 calculés au chapitre précédent n'est pas obtenu la même année comme le montre la Figure 28.

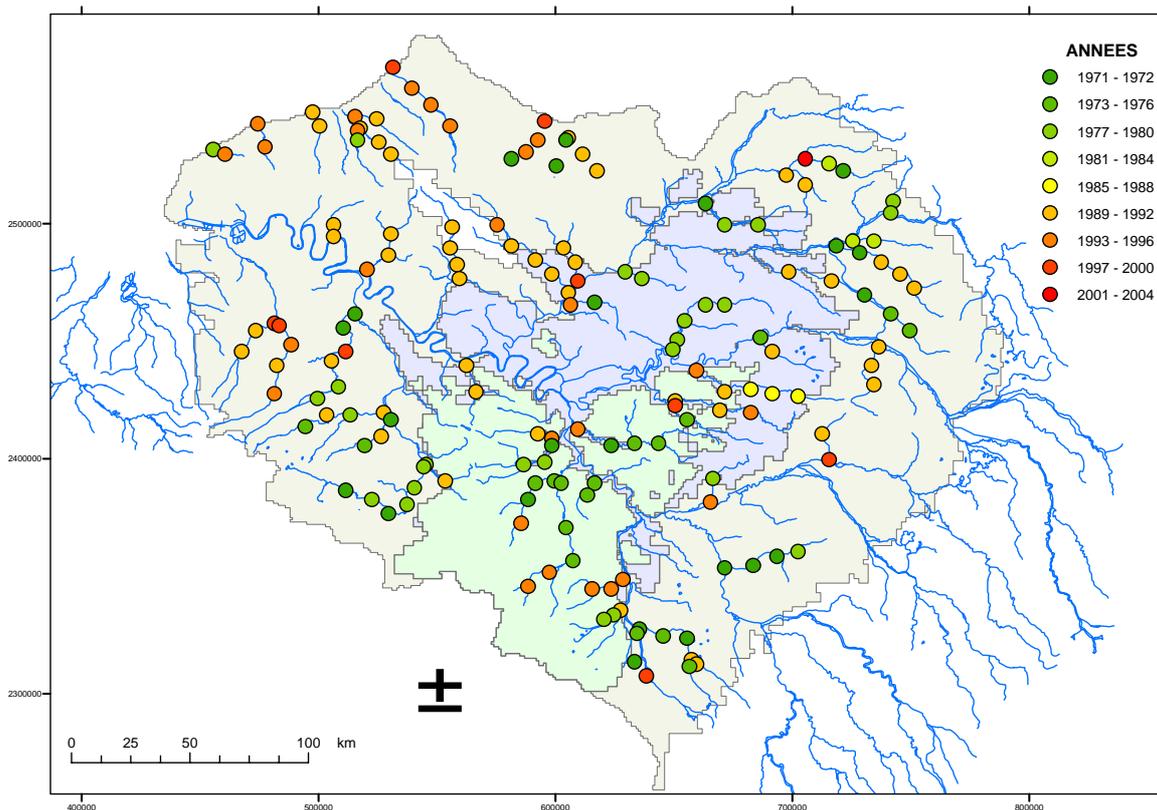


Figure 28 : années de calcul du QMNA5 sur la période 1971-2003

Il est donc difficile de déterminer, sur l'ensemble du bassin, une piézométrie correspondant à une « période QMNA5 ». La Figure 29 présente, pour les 162 « stations » simulées, un histogramme représentant la répartition temporelle des QMNA5. L'année où les QMNA5 sont les plus nombreux est l'année 1990.

On peut donc estimer que la piézométrie calculée en période d'étiage de cette année là peut être considérée comme « piézométrie représentative QMNA5 ». Les Figure 30, Figure 31 et Figure 32 présentent les piézométrie calculées pour chaque aquifère modélisé à cette période.

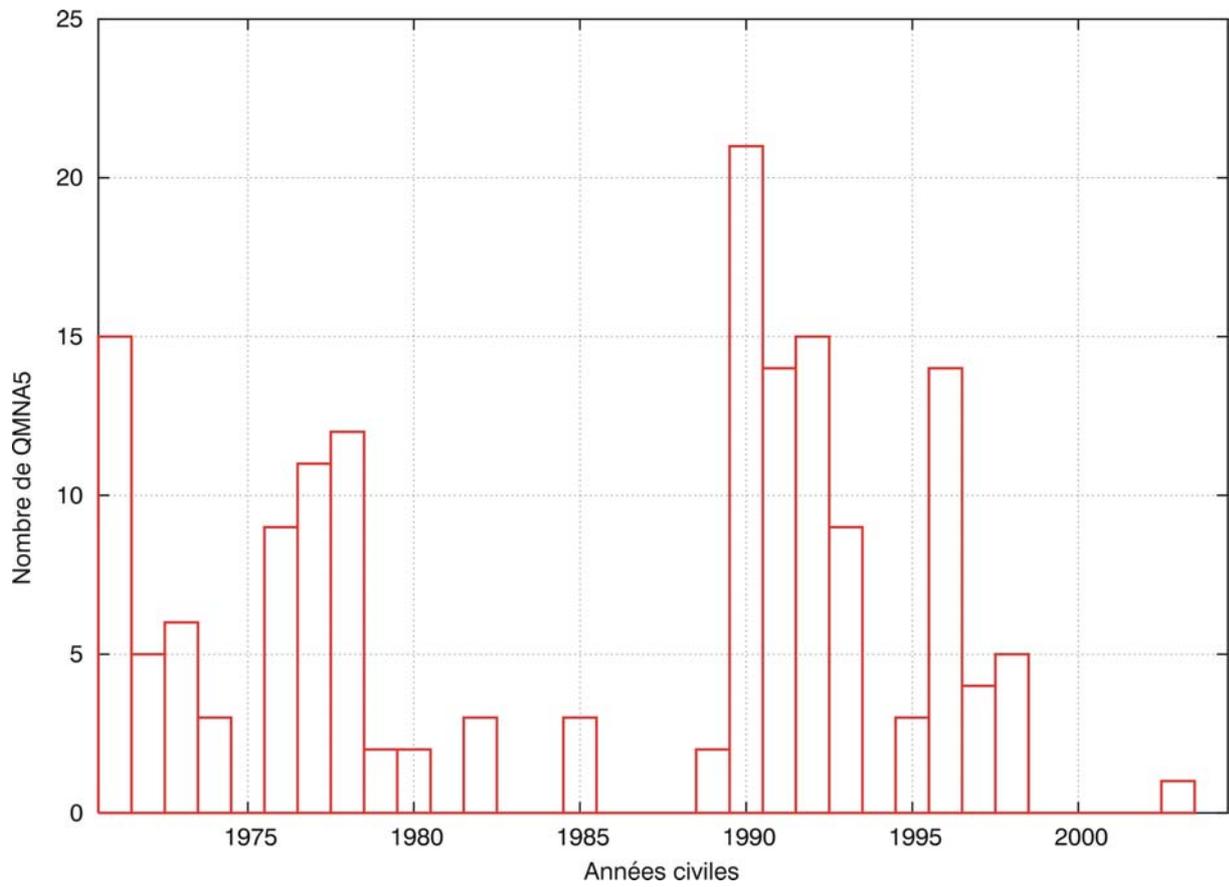


Figure 29 : répartition temporelle des QMNA5 calculés

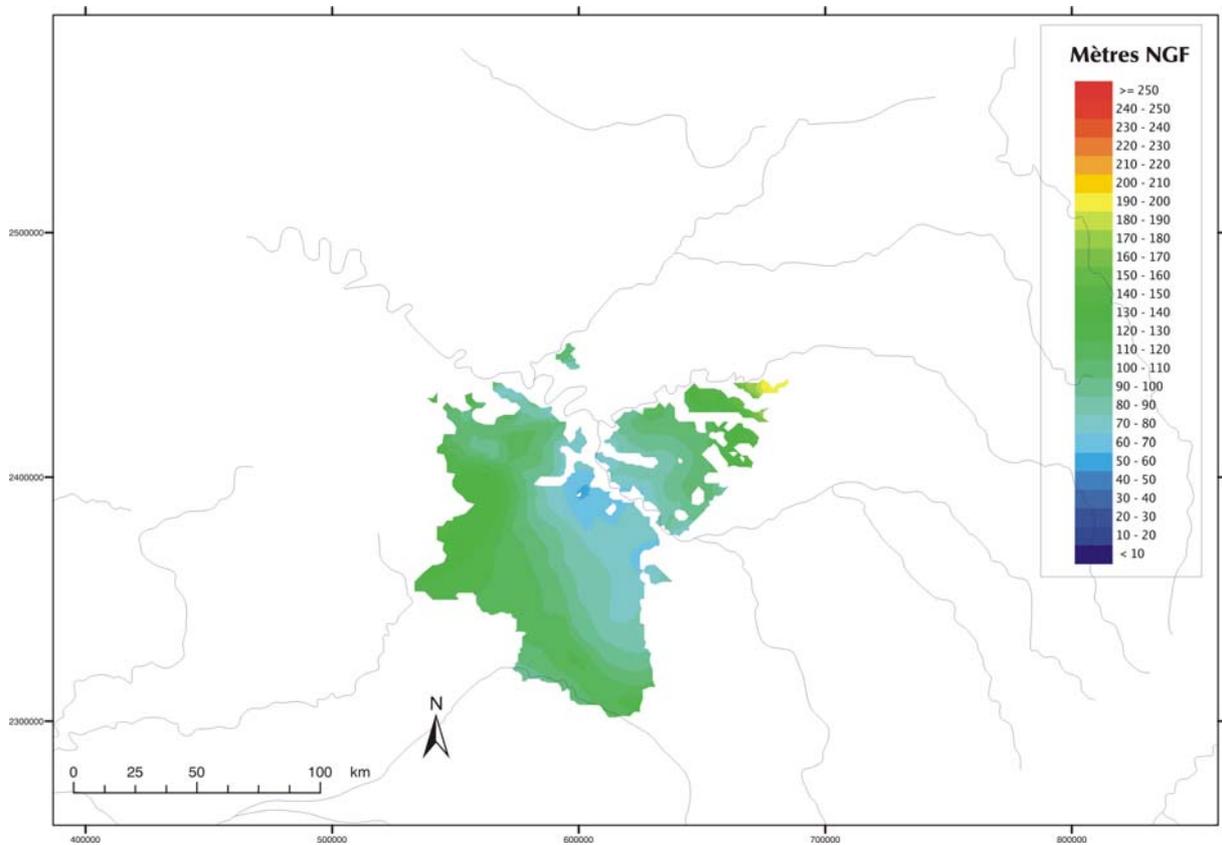


Figure 30 : piézométrie calculée dans la formation Oligocène – été 1990

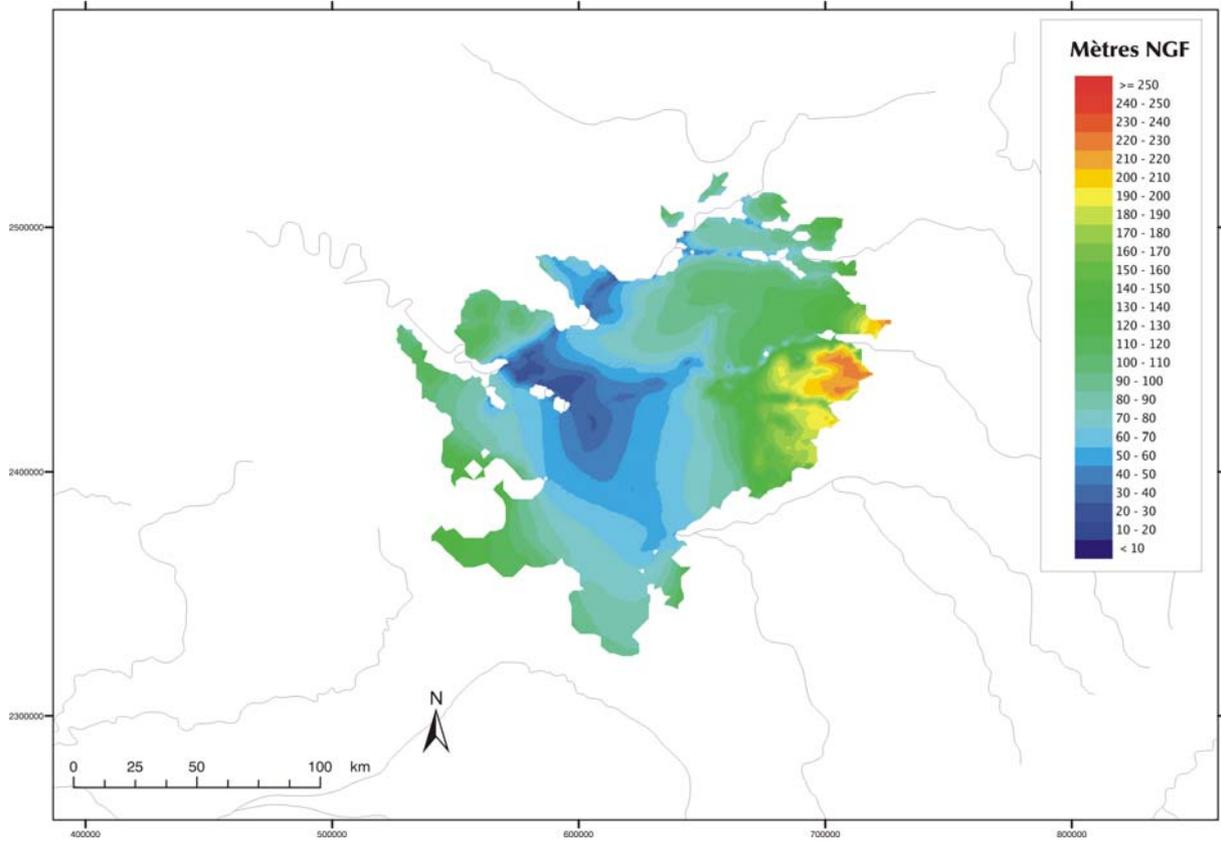


Figure 31 : piézométrie calculée dans la formation Eocène – été 1990

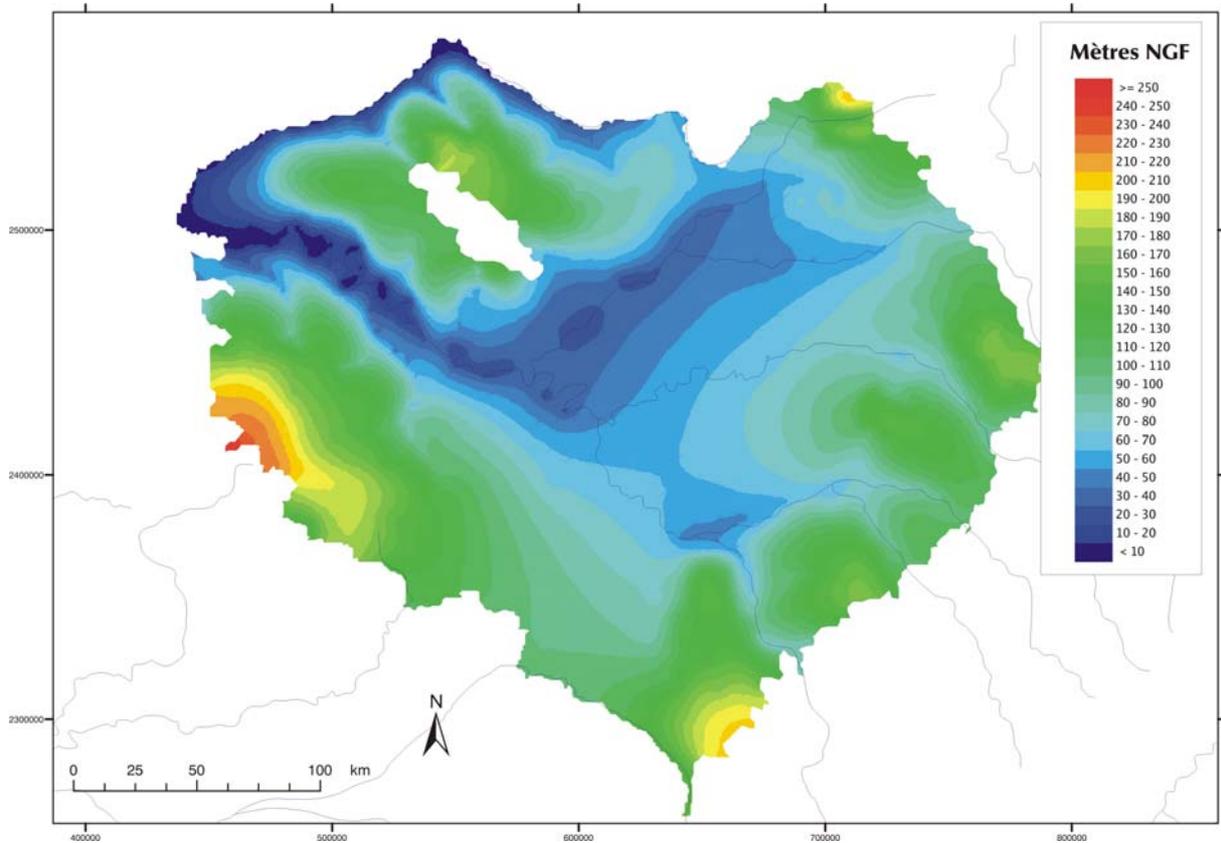


Figure 32 : piézométrie calculée dans la formation de la Craie – été 1990

5.4. Modélisation de l'augmentation des prélèvements anthropiques sur la bassin

5.4.1 Principes généraux

Les principes généraux retenus lors de ces modélisations sont les suivants :

- réalisation d'une simulation en régime moyen stabilisé obtenu par simulation d'un nombre important d'années moyennes successives. Ceci permet d'obtenir un régime quasi-permanent moyen représentatif. Une simulation sur 20 ans a été retenue ;
- à partir de cet état quasi-permanent, les modélisations d'étude de l'influence d'une augmentation des prélèvements anthropiques sont effectuées sur 15 années moyennes suivies de trois années de séquence climatique sévère. Sur la base des infiltrations moyennes présentée Figure 16 , la séquence climatique du 01/08/1989 au 31/07/1992 a été retenue. La simulation sans modification des prélèvements anthropiques est dénommée « simulation de référence » ;
- toujours à partir de l'état quasi-permanent, des calculs de l'influence d'une augmentation des prélèvements anthropiques pendant les trois années de séquence climatique sévère sont réalisés ;
- l'introduction de l'augmentation des prélèvements anthropiques est effectuée sur la base des éléments quantitatifs présentés au chapitre 2. Ces prélèvements sont introduits par pompage dans les formations aquifères au droit même des mailles de surface concernées, sans condition particulière d'accès à la ressource. A la verticale de ces mailles de surface, si la formation aquifère directement sous-jacente (donc affleurante) a une épaisseur de moins de 20 mètres, le prélèvement se fait dans la couche située immédiatement en dessous. La Figure 33 et la Figure 34 présentent, pour les formations Oligocène et Eocène, l'épaisseur globale des couches ainsi que l'extension des zones pour lesquelles les prélèvements s'effectueront dans la couche inférieure. Pour ce qui concerne la formation de la Craie, tous les prélèvements aux affleurements s'effectuent dans la formation puisque les aquifères plus profonds ne sont pas modélisés.

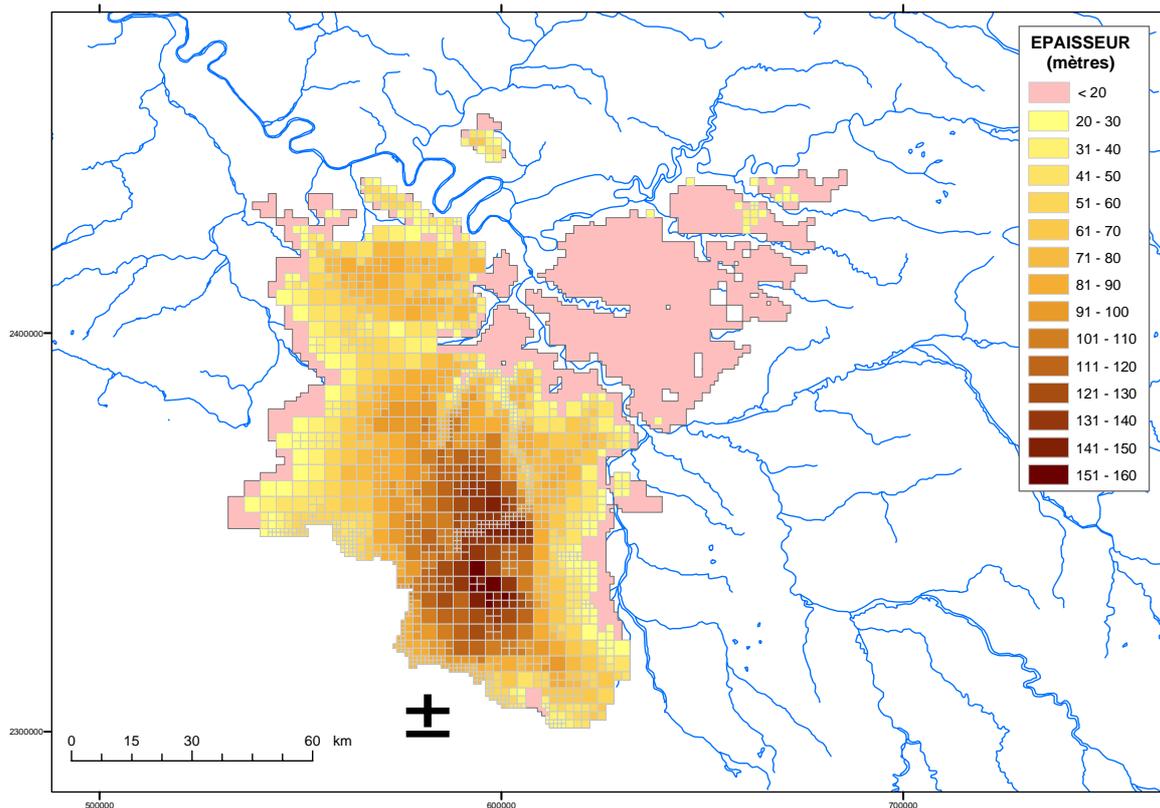


Figure 33 : formation de l'Oligène – épaisseur de la formation

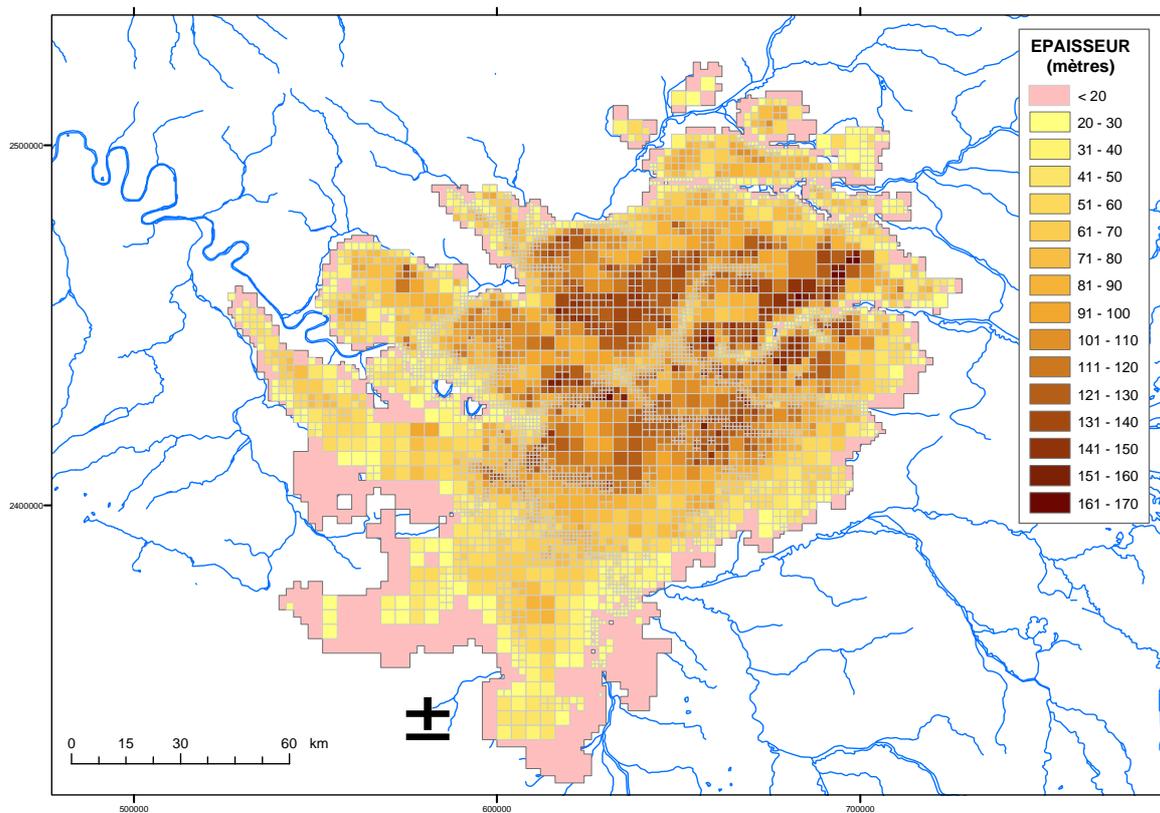


Figure 34 : formation de l'Eocène – épaisseur de la formation

Les quantités prélevées s'effectuent en moyenne journalière sur l'ensemble de l'année pour les prélèvements industriels et A.E.P. et réparties seulement sur 5 mois (d'avril à août) pour les prélèvements agricoles (ces prélèvements étant essentiellement destinés à l'irrigation).

5.4.2 Résultats de simulations

Les résultats de simulation (Figure 35 à Figure 102) sont présentés sous forme :

- d'évolution relative du débit d'étiage liée aux différents prélèvements en période d'année moyenne obtenu par $(Q-Q_{ref})/Q_{ref}$ exprimé en pourcent, Q_{ref} étant le débit calculé après 15 ans de simulation d'année moyenne et Q le débit calculé à la même période après 15 années d'augmentation de prélèvements anthropiques (p.32) ;
- de la même manière mais après trois années supplémentaires de séquence climatique sévère (p.40) ;
- d'évolution du rapport débit minimal moyen mensuel calculé en période d'année moyenne sur le débit minimal de retour 5 ans (QMNA5) calculé sur la période 1971-2003 et exprimé en pourcent (p.48) ;
- d'évolution relative de la valeur du QMNA5 calculé sur la période 1971-2003 en supposant une augmentation des prélèvements sur toute la période de simulation du 1/8/1970 au 31/7/2004 (p.66) ;
- d'évolution de la période de retour de la valeur du QMNA5 initial sous scénarii d'augmentation des prélèvements (p.72) ;
- d'évolution de la piézométrie calculée sur douze piézomètres répartis sur l'ensemble du bassin lors du calcul en régime transitoire sur 15 années moyennes successives poursuivi par trois années de séquence climatique sévère. Les charges hydrauliques calculées sont comparées à une hauteur piézométrique de retour 5 ans (HMNA5) calculée de la même manière que celle présentée au chapitre 5.2 pour les débits (p.82) ;
- d'évolution de la piézométrie calculée sur ces douze piézomètres en imposant les trois années météorologiques sévères dès la mise en régime pseudo permanent du système (p.96).

Cartes d'évolution relative du débit d'étiage liée aux différents prélèvements en période d'année moyenne

$$\left((Q_{\text{prélèvements}} - Q_{\text{référence}}) / Q_{\text{référence}} \right) * 100$$



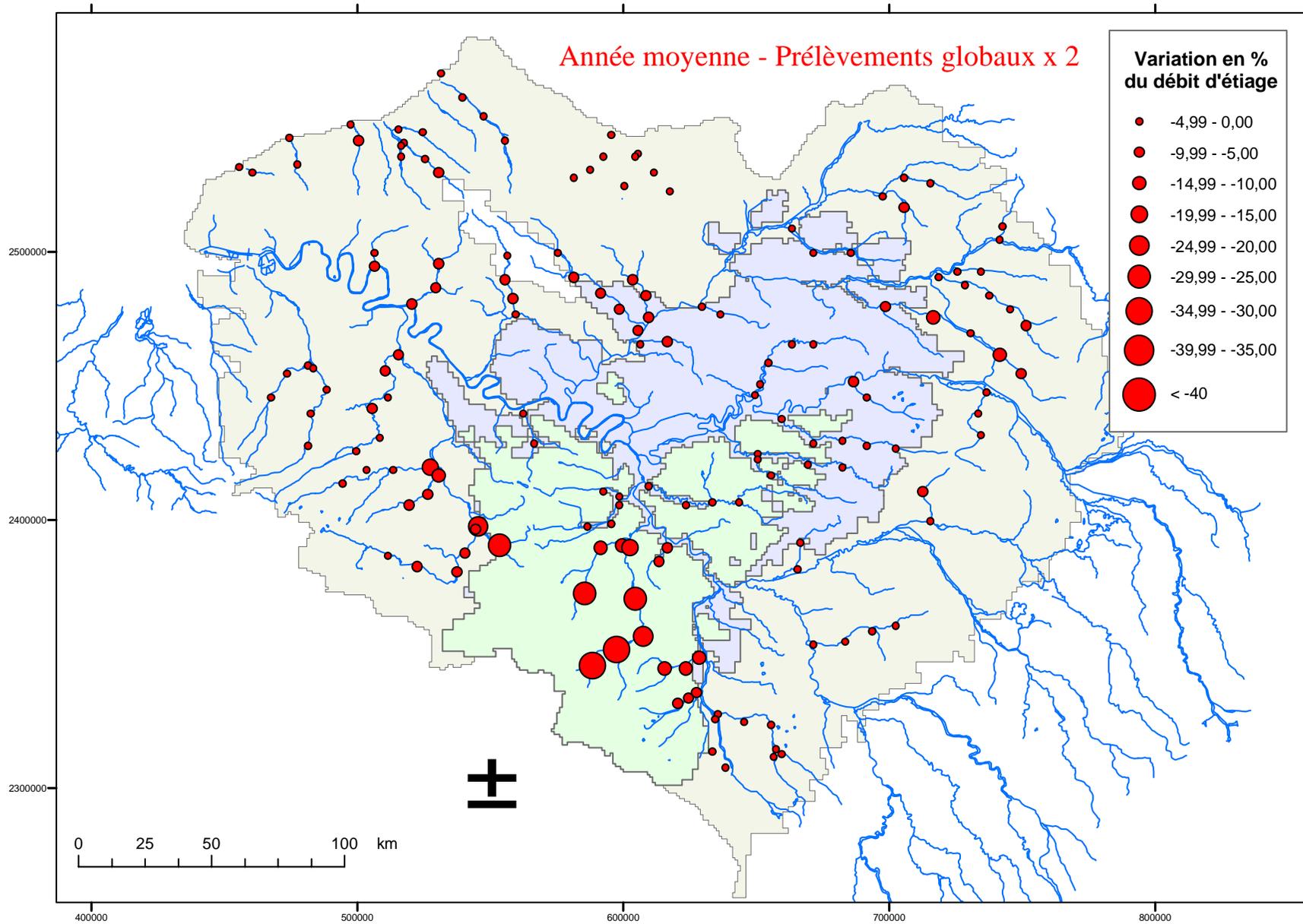


Figure 35 : variations relatives calculées du débit d'été en année moyenne liées à un doublement de l'ensemble des prélèvements

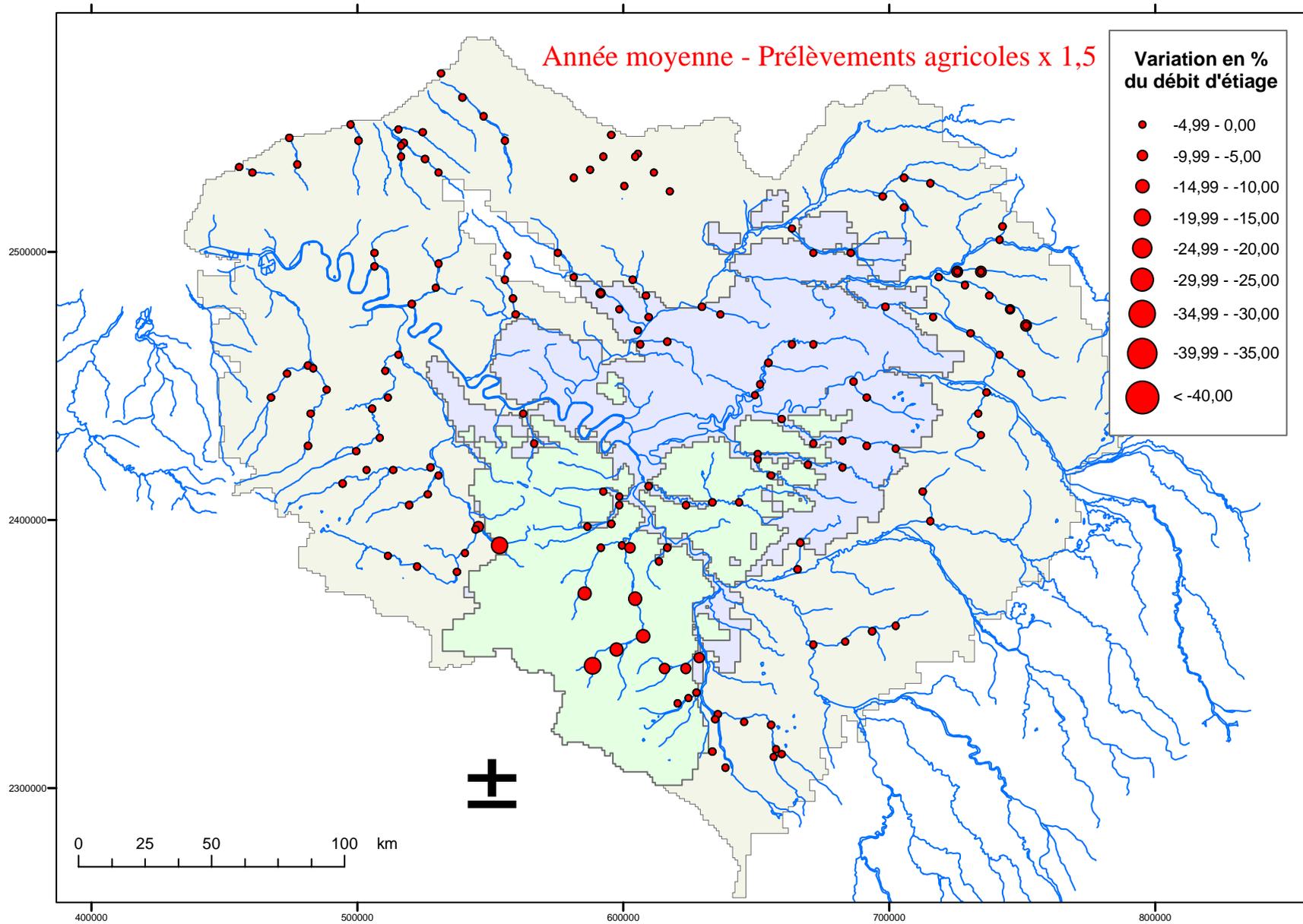


Figure 36 : variations relatives calculées du débit d'été en année moyenne liées à une augmentation de 50% des prélèvements agricoles

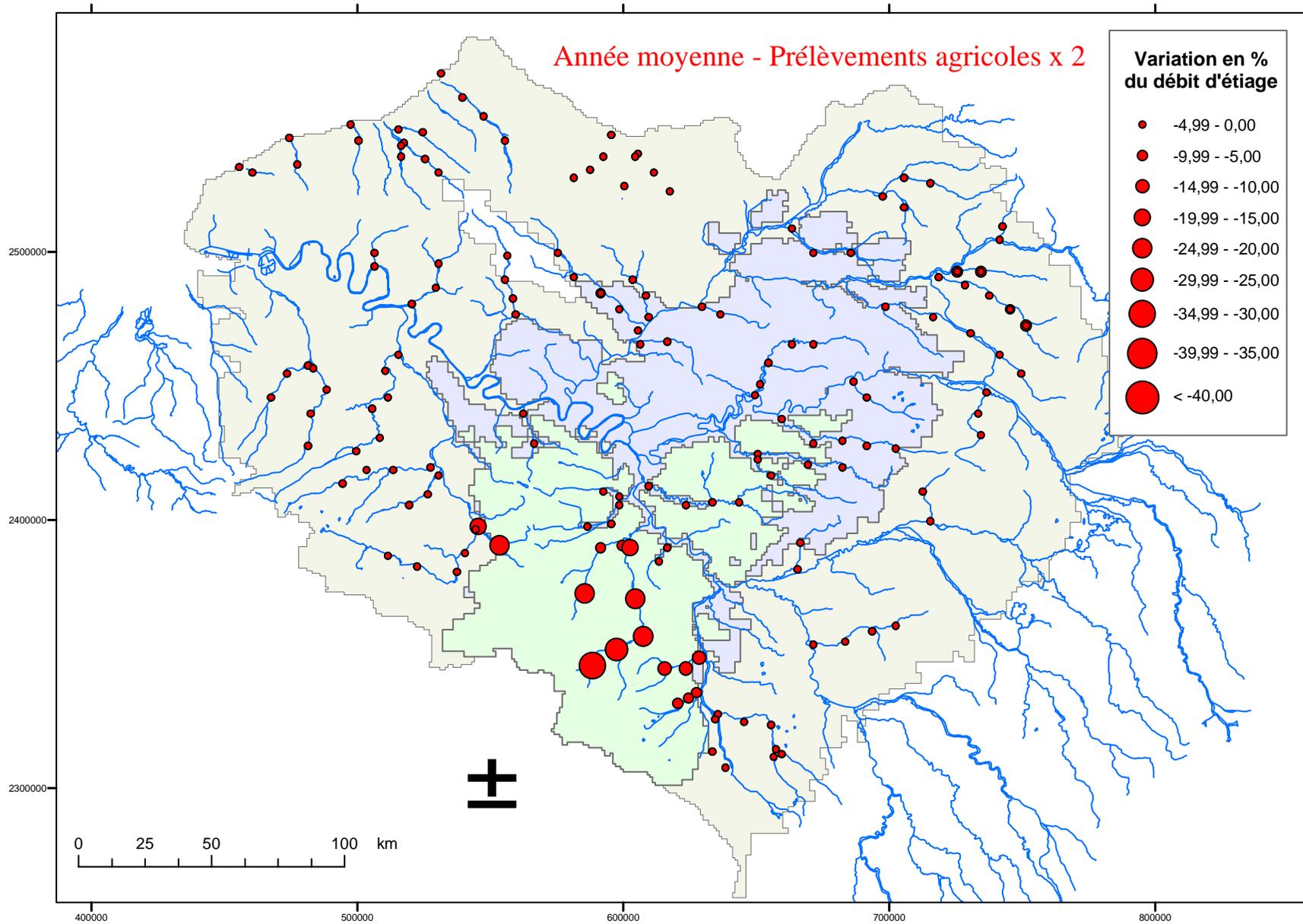


Figure 37 : variations relatives calculées du débit d'été en année moyenne liées à un doublement des prélèvements agricoles

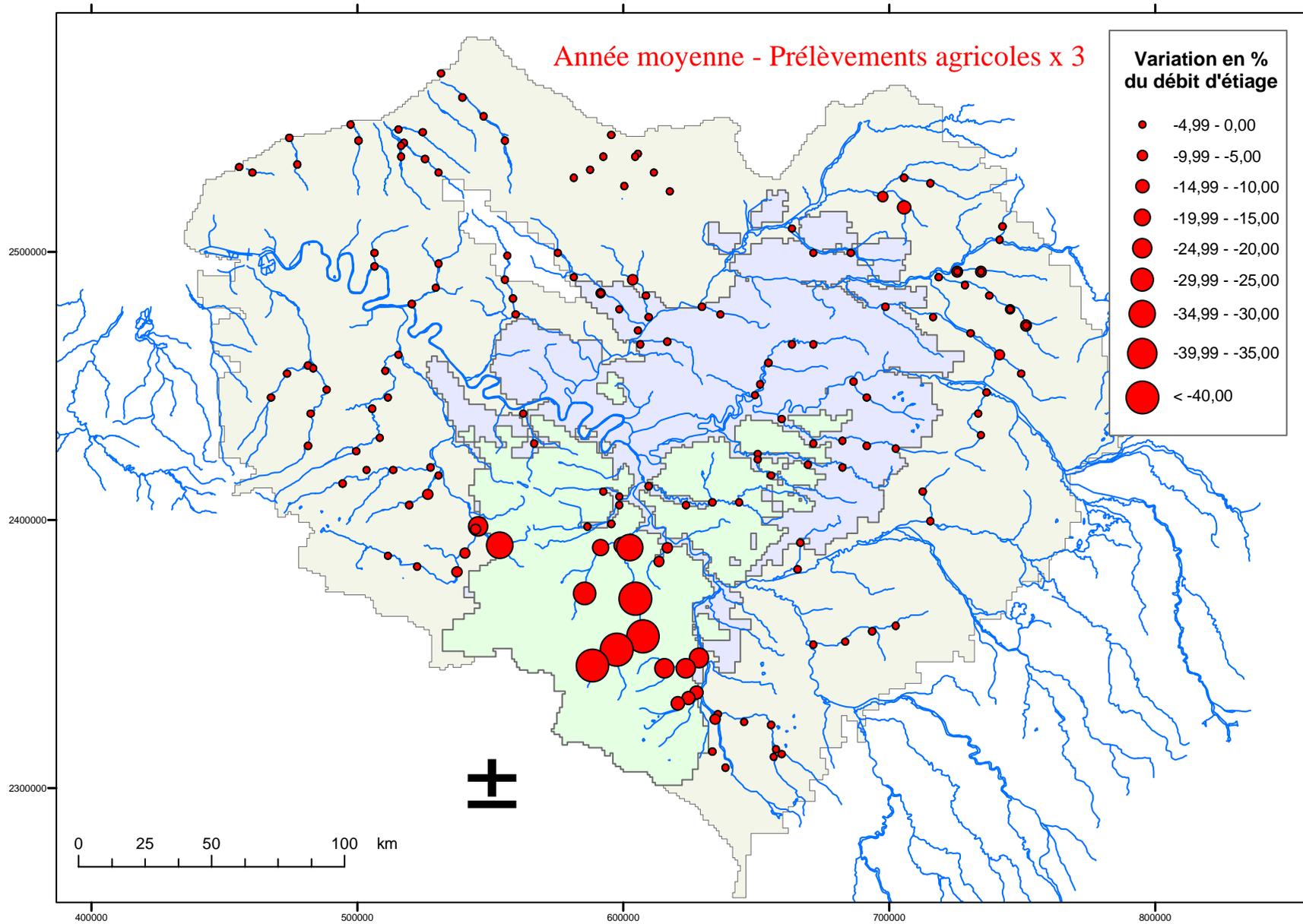


Figure 38 : variations relatives calculées du débit d'été en année moyenne liées à un triplement des prélèvements agricoles

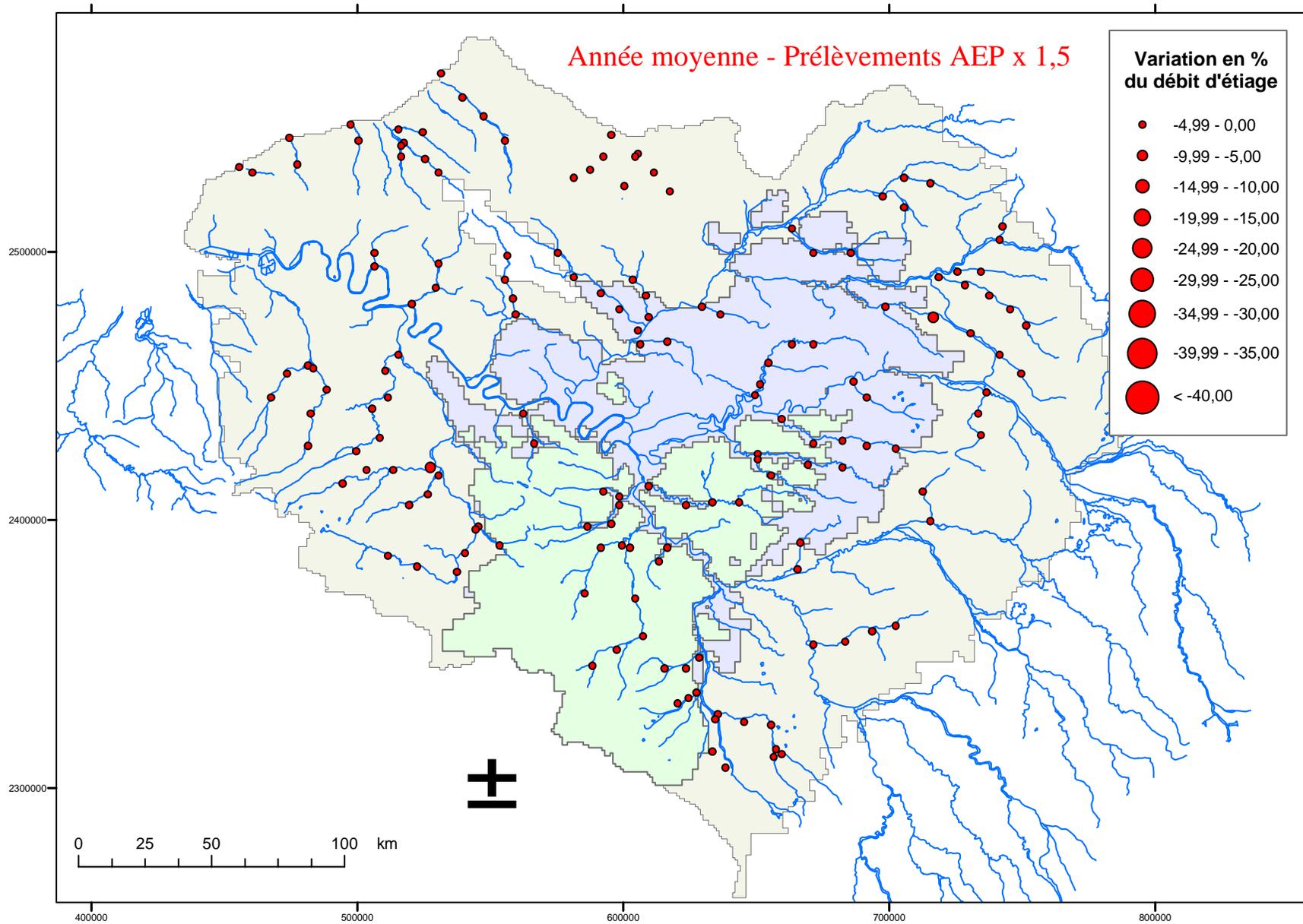


Figure 39 : variations relatives calculées du débit d'étéage en année moyenne liées à une augmentation de 50% des prélèvements AEP

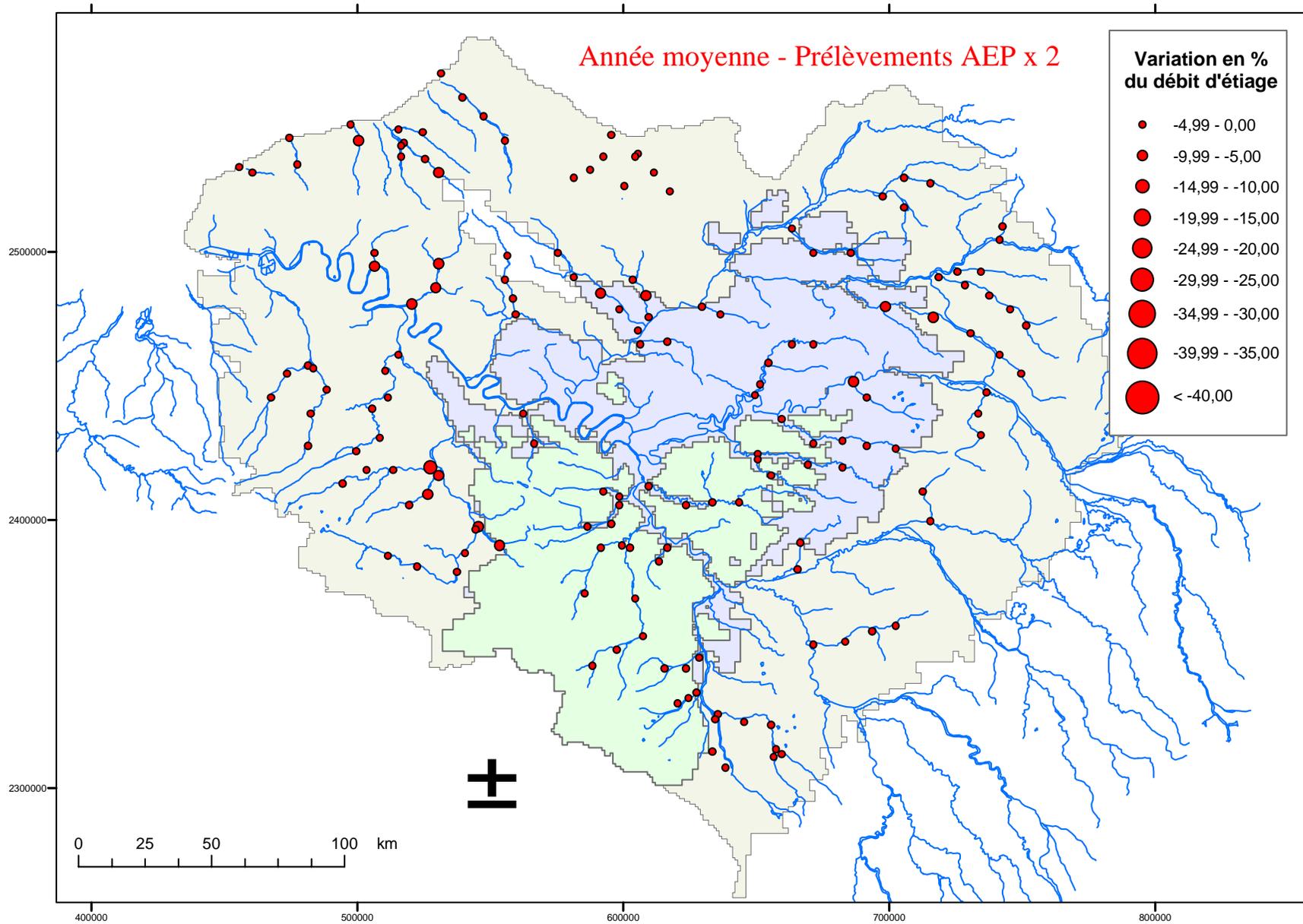


Figure 40 : variations relatives calculées du débit d'étéage en année moyenne liées à un doublement des prélèvements AEP

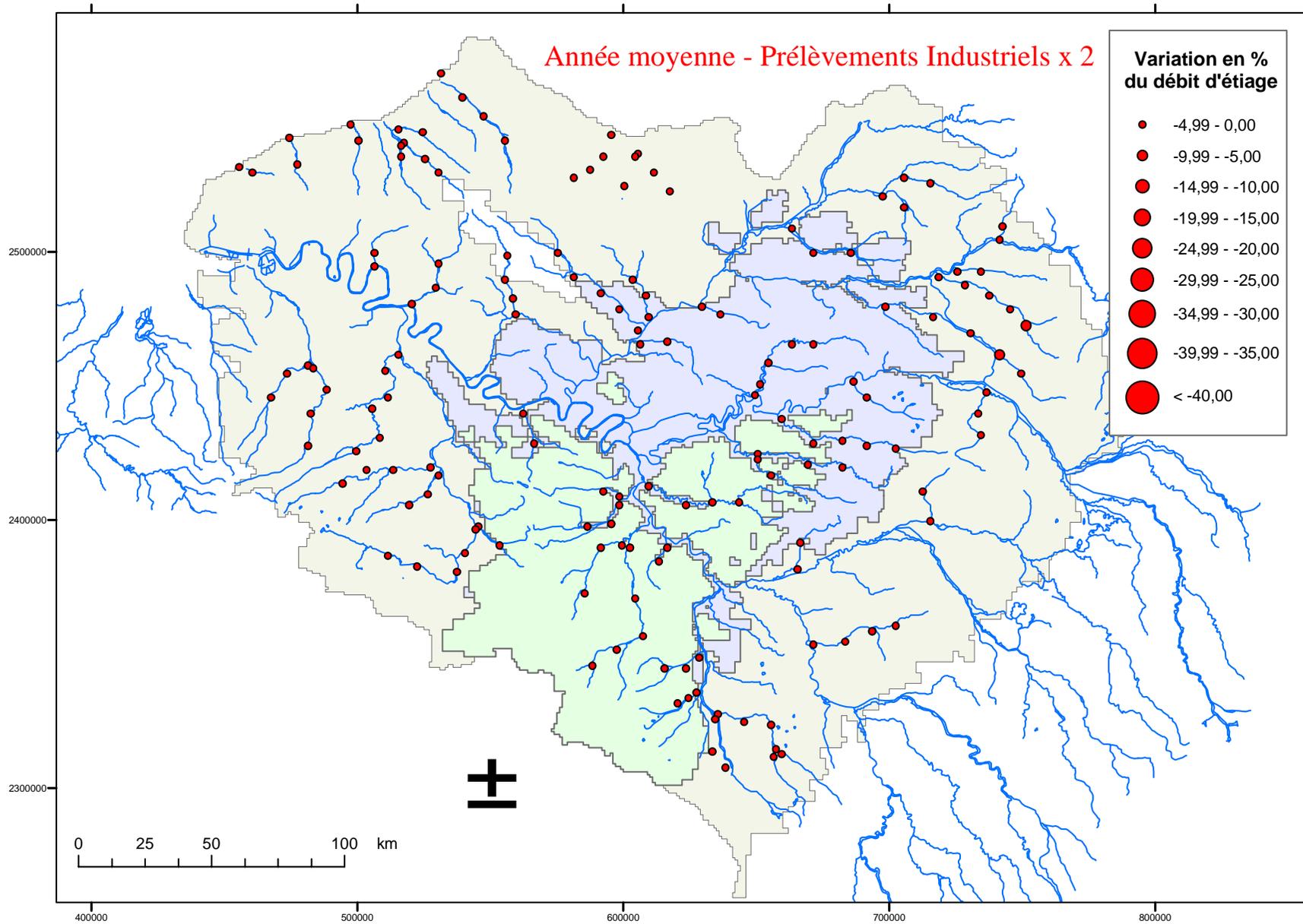


Figure 41 : variations relatives calculées du débit d'étéage en année moyenne liées à un doublement des prélèvements industriels

Cartes d'évolution relative du débit d'étiage liée aux différents prélèvements en période d'années climatiques sévères

$$((Q_{\text{prélèvements}} - Q_{\text{référence}}) / Q_{\text{référence}}) * 100$$



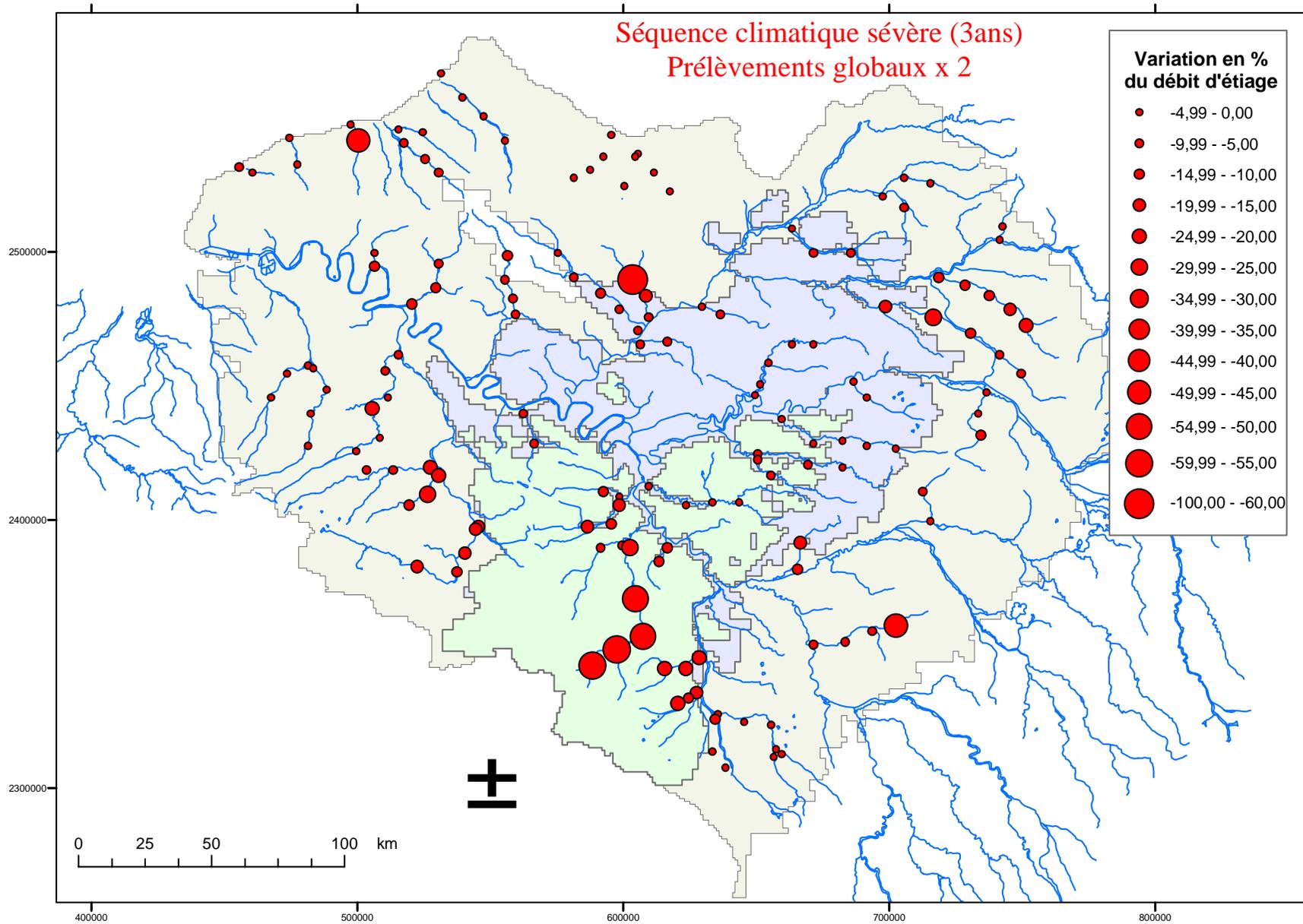


Figure 42 : variations relatives calculées du débit d'été en période climatique sévère liées à un doublement de l'ensemble des prélèvements

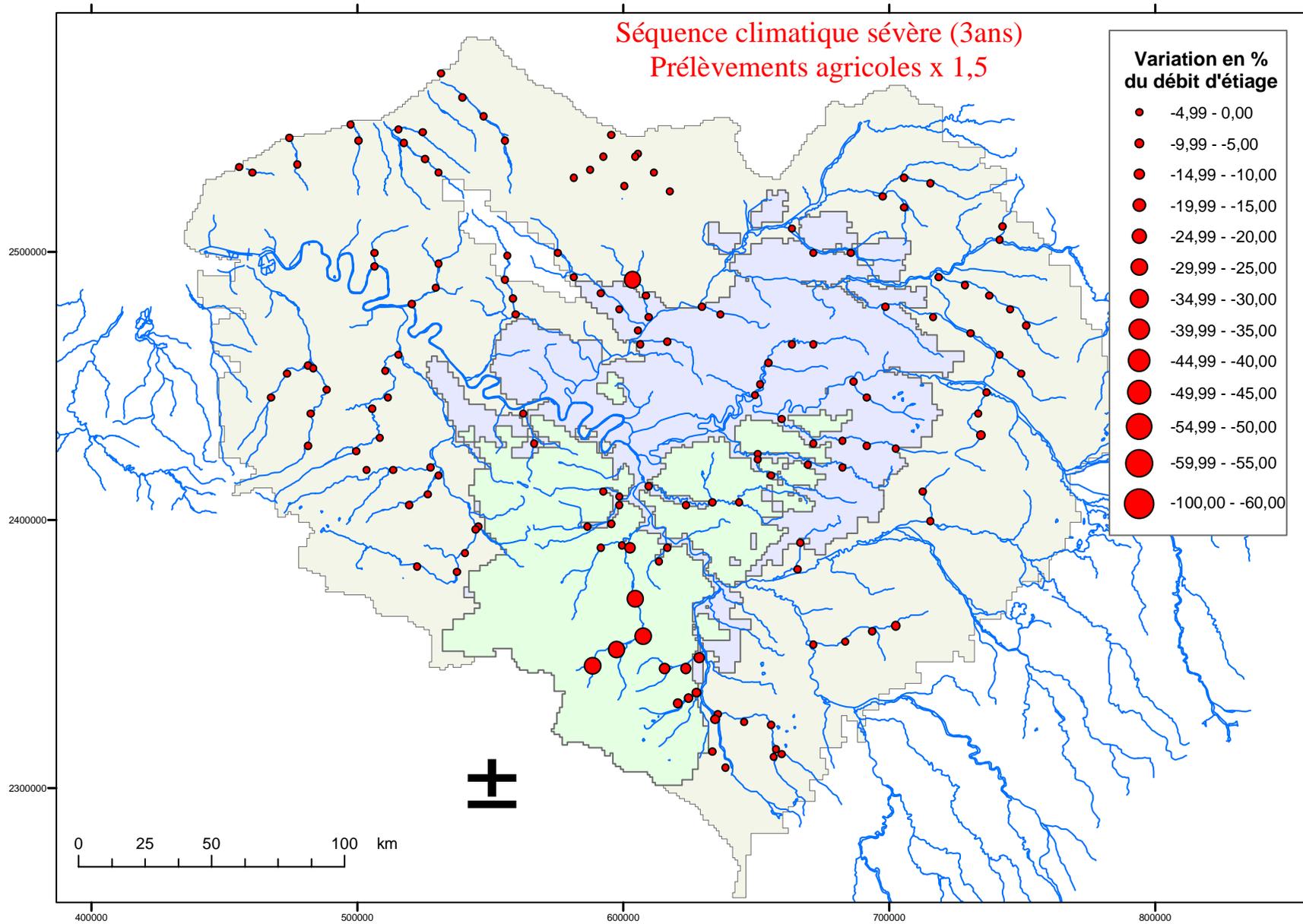


Figure 43 : variations relatives calculées du débit d'été en période climatique sévère liées à une augmentation de 50% des prélèvements agricoles

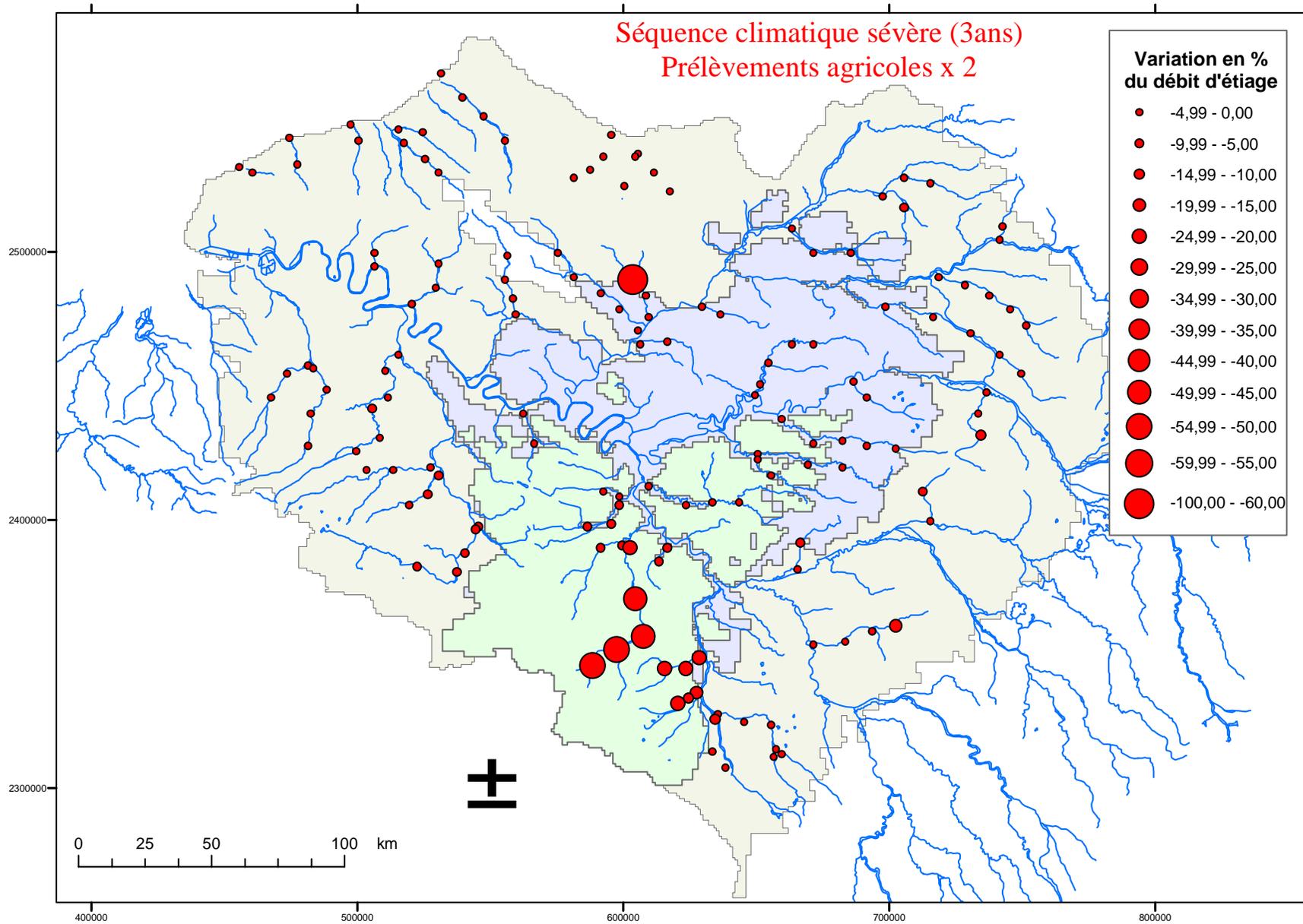


Figure 44 : variations relatives calculées du débit d'été en période climatique sévère liées à un doublement des prélèvements agricoles

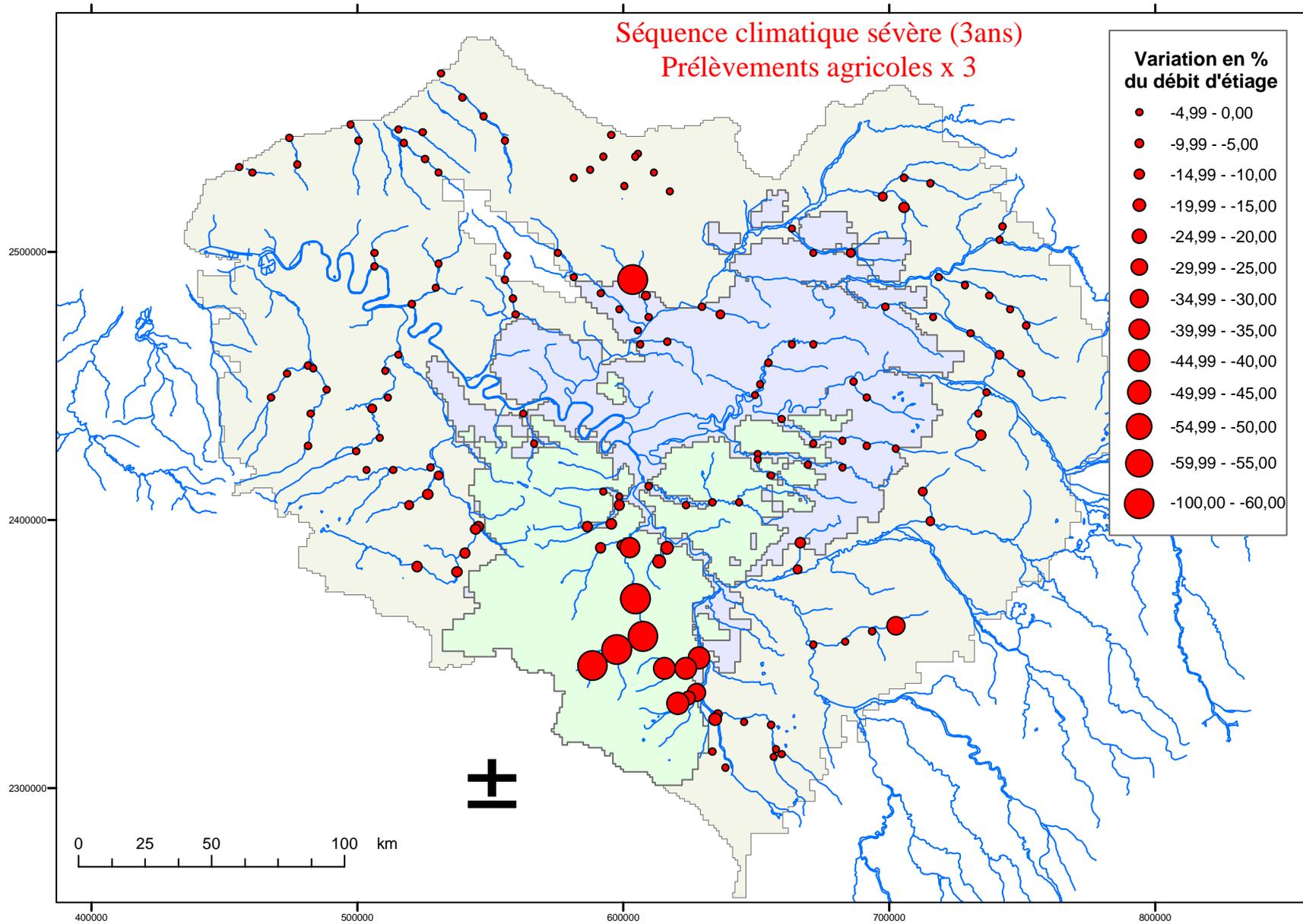


Figure 45 : variations relatives calculées du débit d'été en période climatique sévère liées à un triplement des prélèvements agricoles

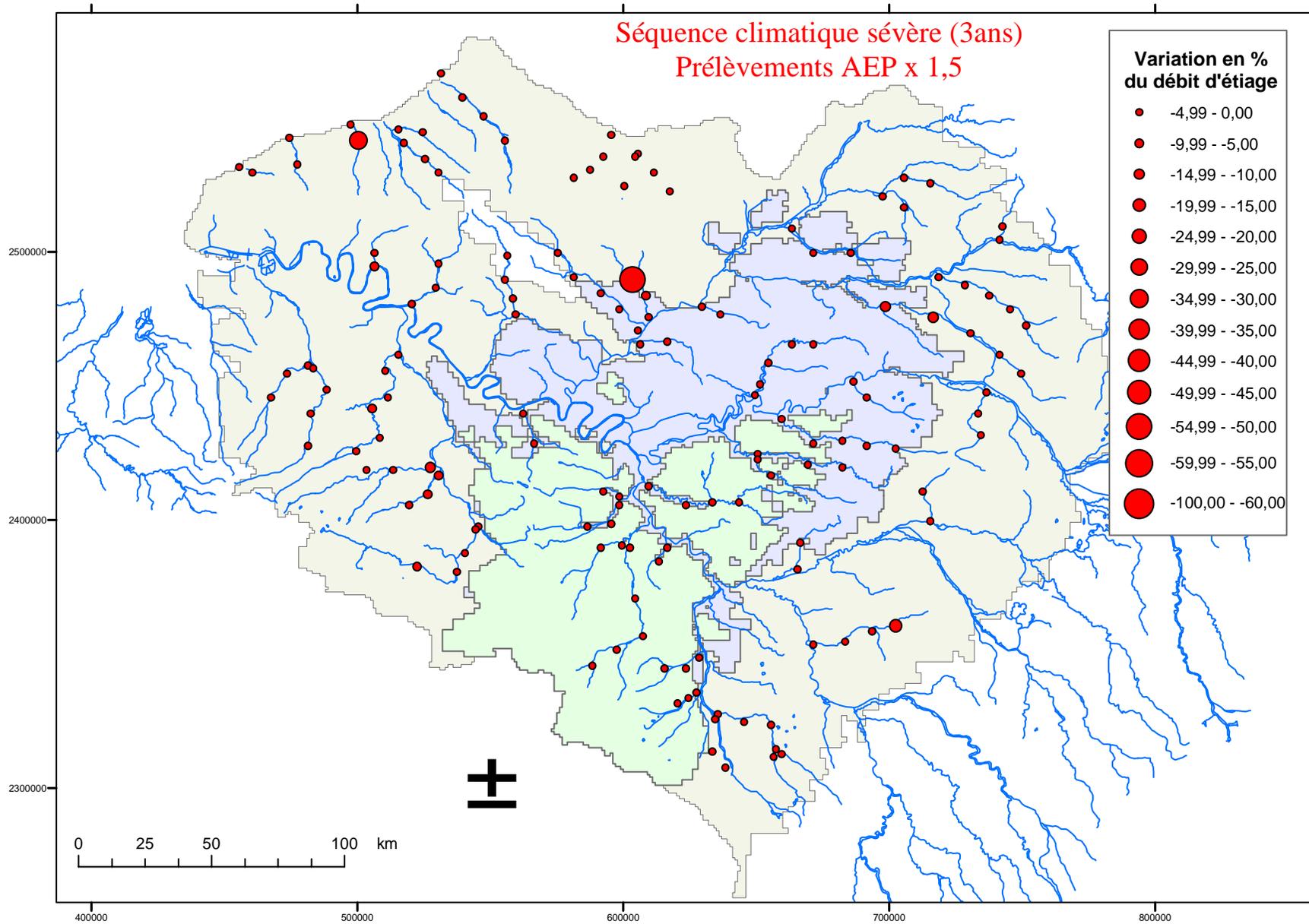


Figure 46 : variations relatives calculées du débit d'été en période climatique sévère liées à une augmentation de 50% des prélèvements AEP

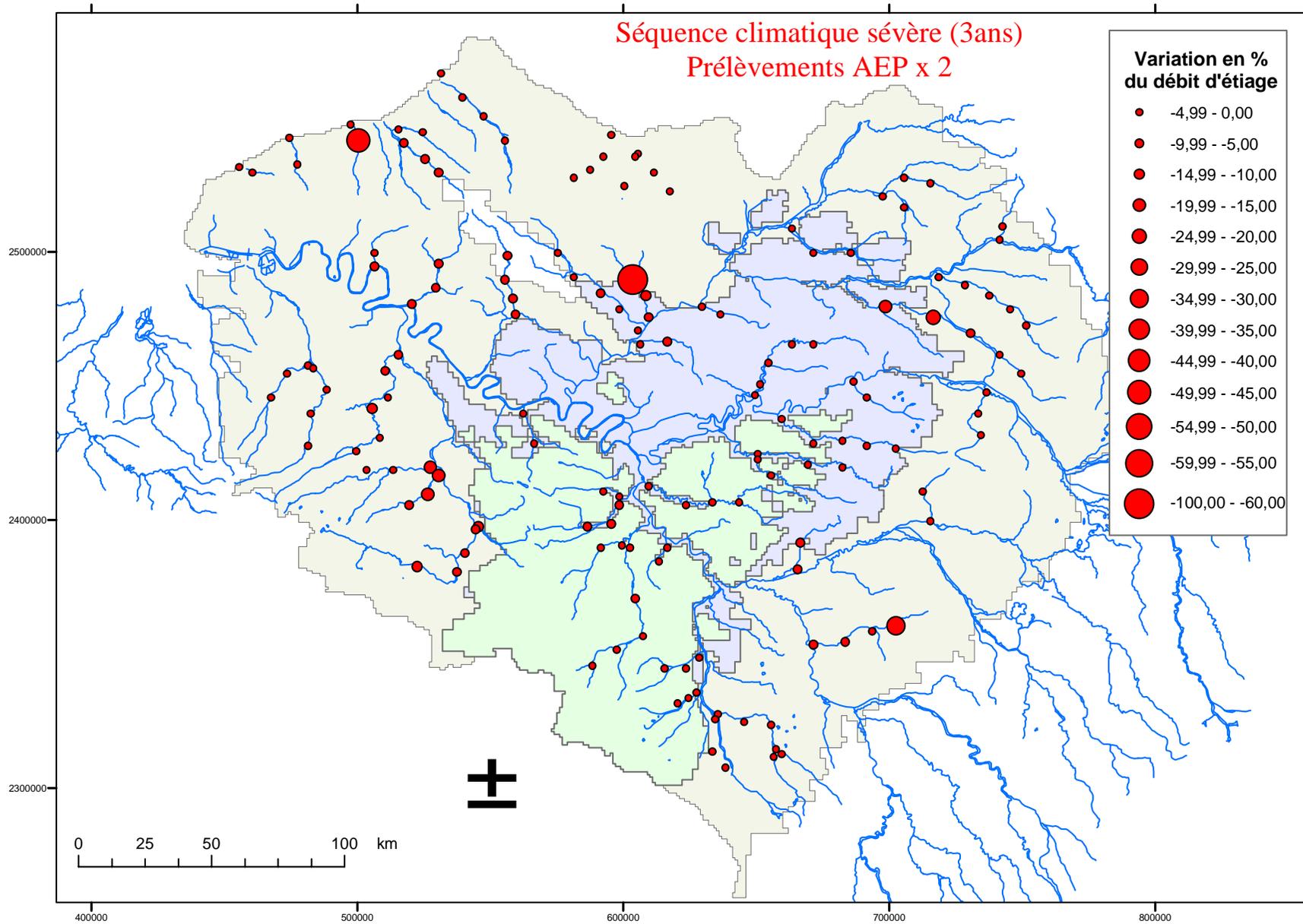


Figure 47 : variations relatives calculées du débit d'été en période climatique sévère liées à un doublement des prélèvements AEP

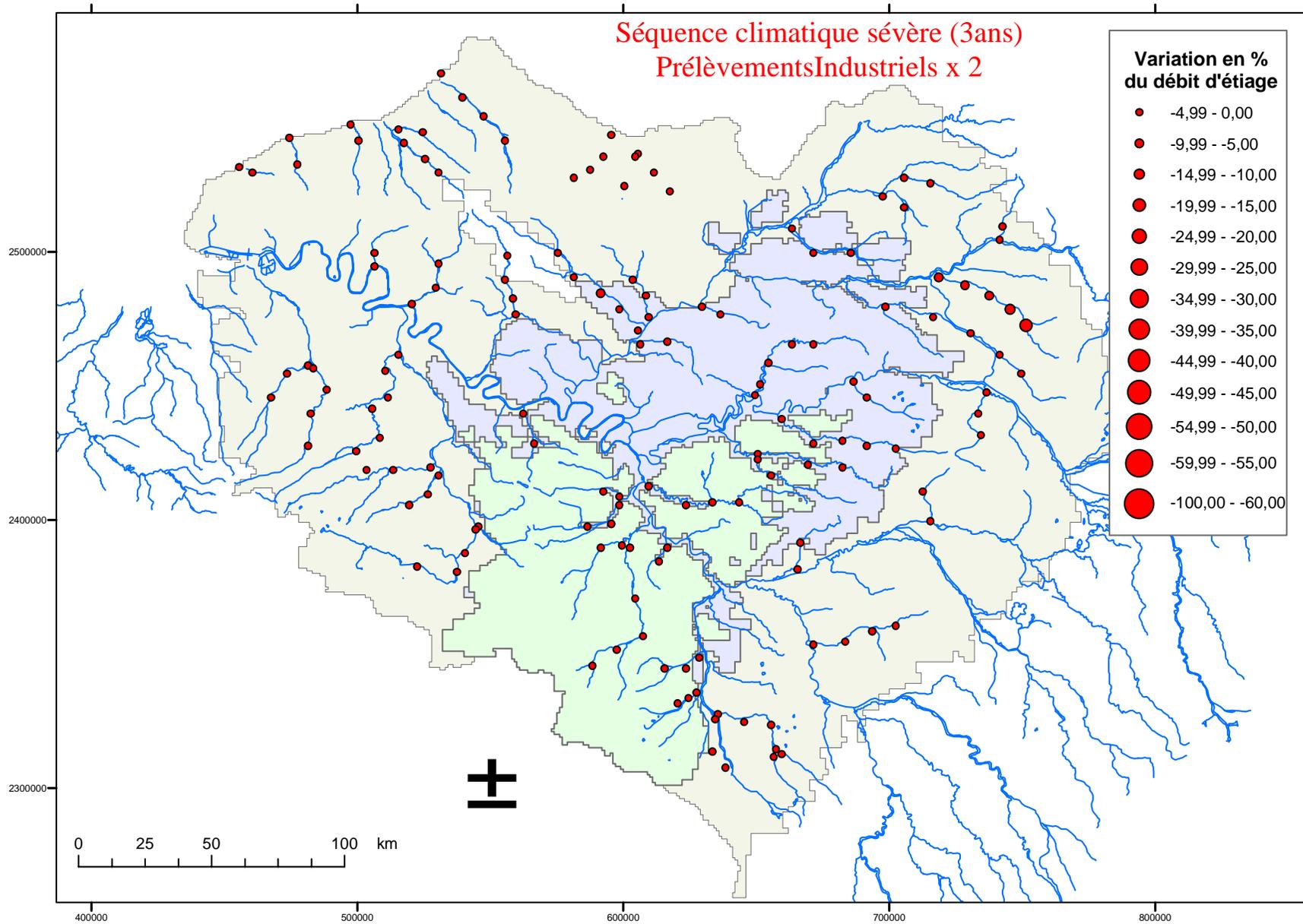


Figure 48 : variations relatives calculées du débit d'été en période climatique sévère liées à un doublement des prélèvements industriels

Rapport débit moyen minimal mensuel calculé en période d'année moyenne / débit minimal de retour 5 ans (QMNA5)

$$(Q_{\min_mensuel} / Q_{MNA5}) * 100$$

(les valeurs de QMNA5 retenue sont présentées Figure 27)



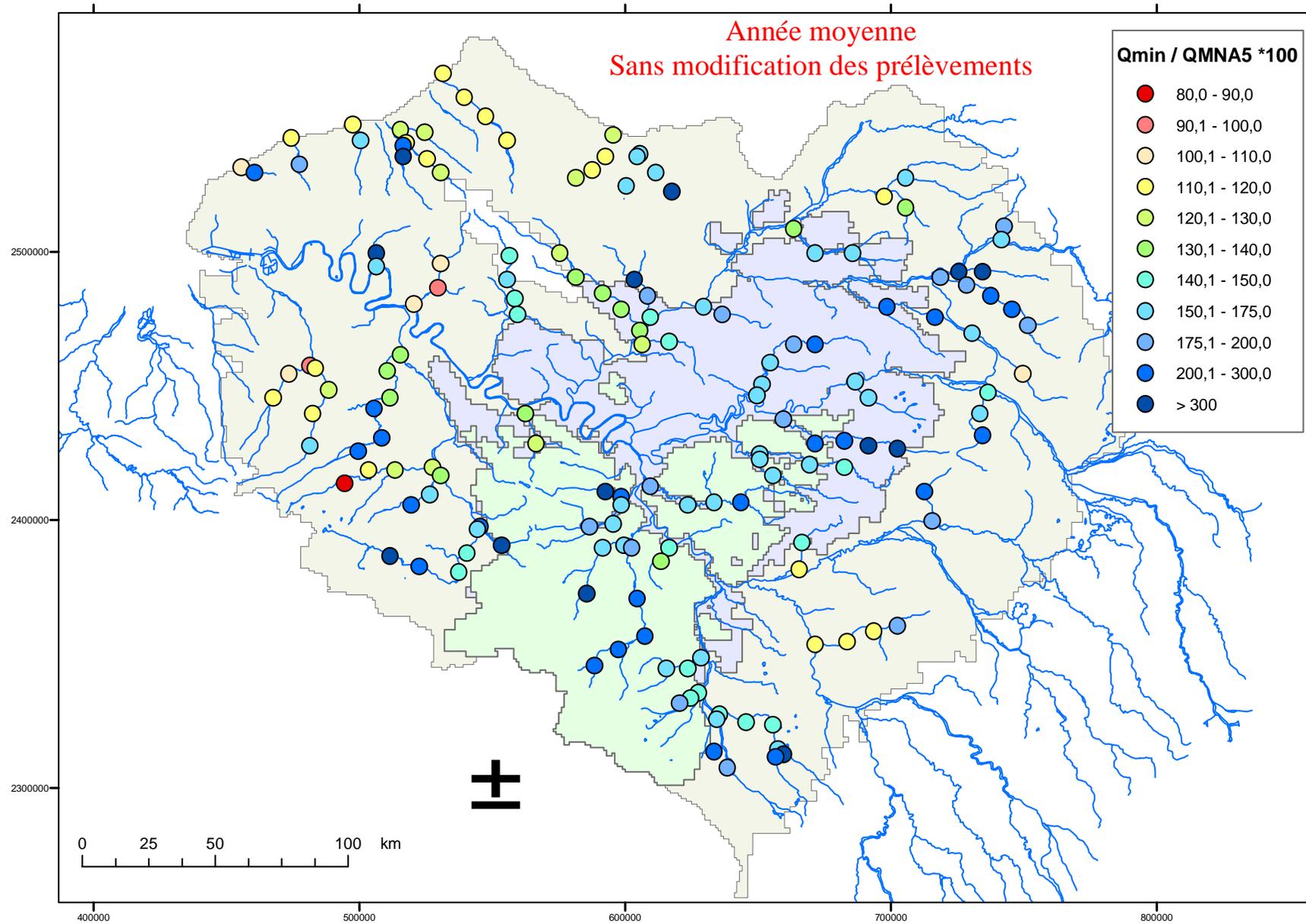


Figure 49 : rapport Q_{min} moyen mensuel/ Q_{MNA5} calculé en année moyenne sans augmentation des prélèvements anthropiques

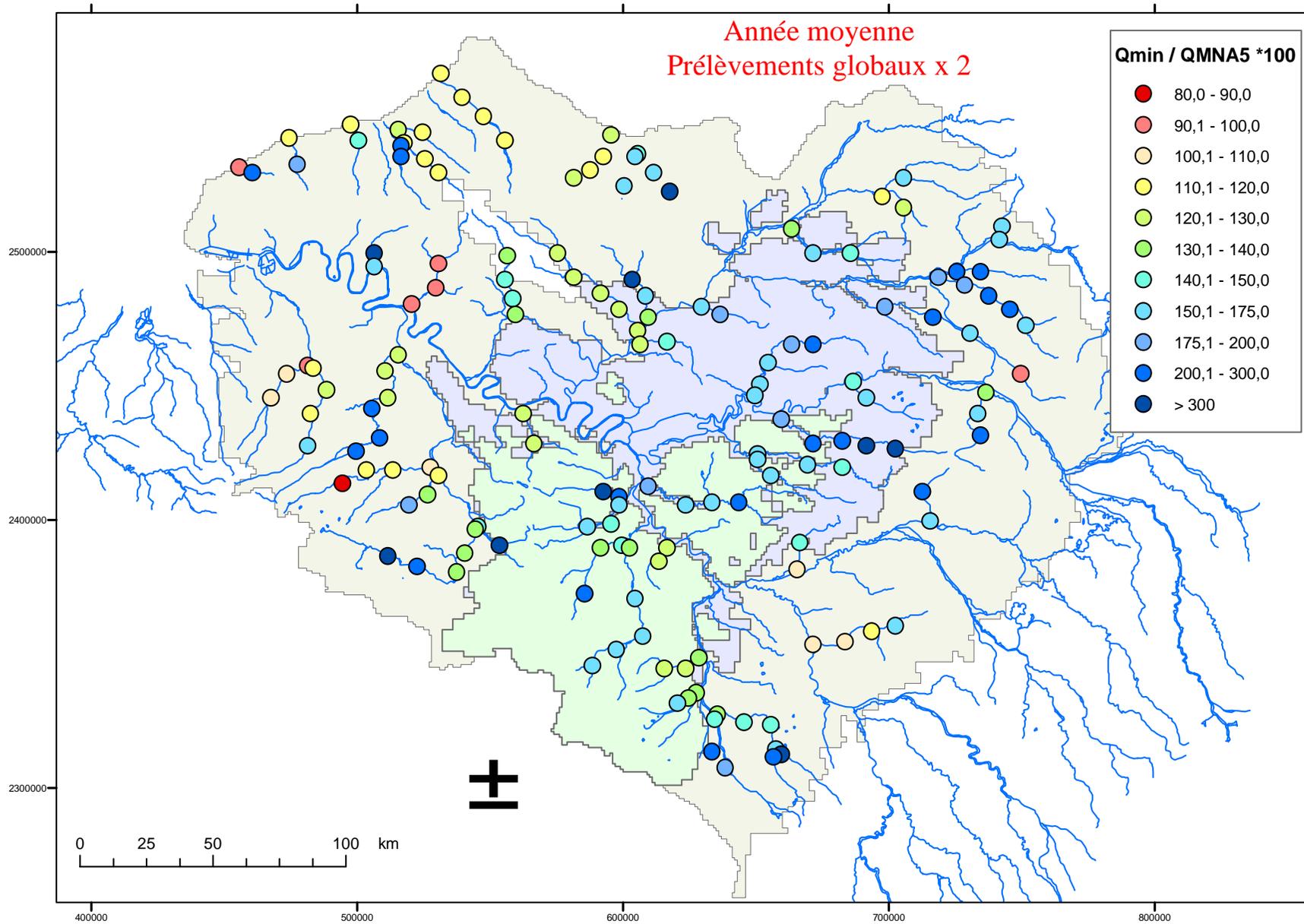


Figure 50 : rapport Q_{min} moyen mensuel / Q_{MNA5} calculé en année moyenne avec doublement de l'ensemble des prélèvements

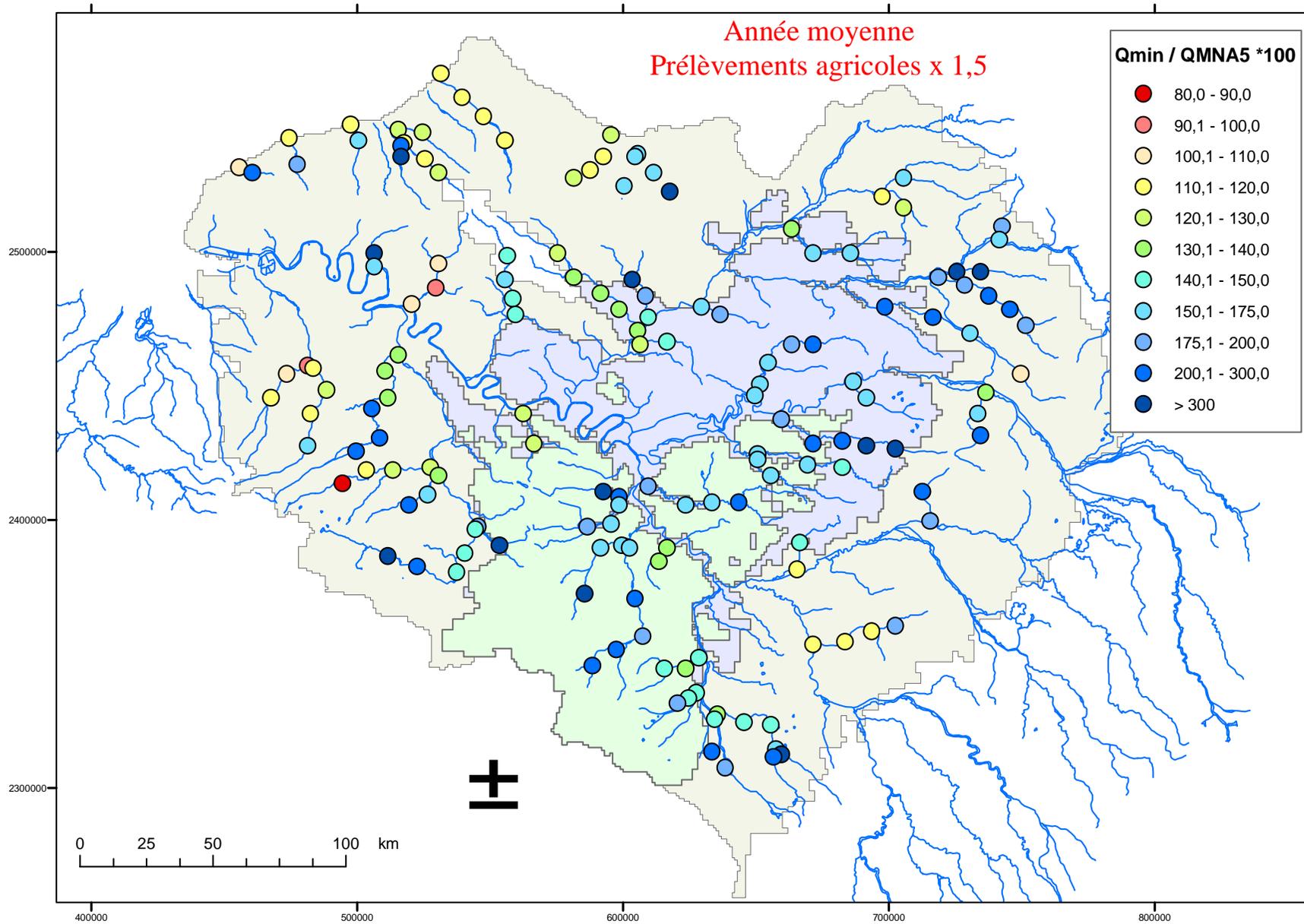


Figure 51 : rapport Q_{min} moyen mensuel / $QMNA5$ calculé en année moyenne avec augmentation de 50% des prélèvements agricoles

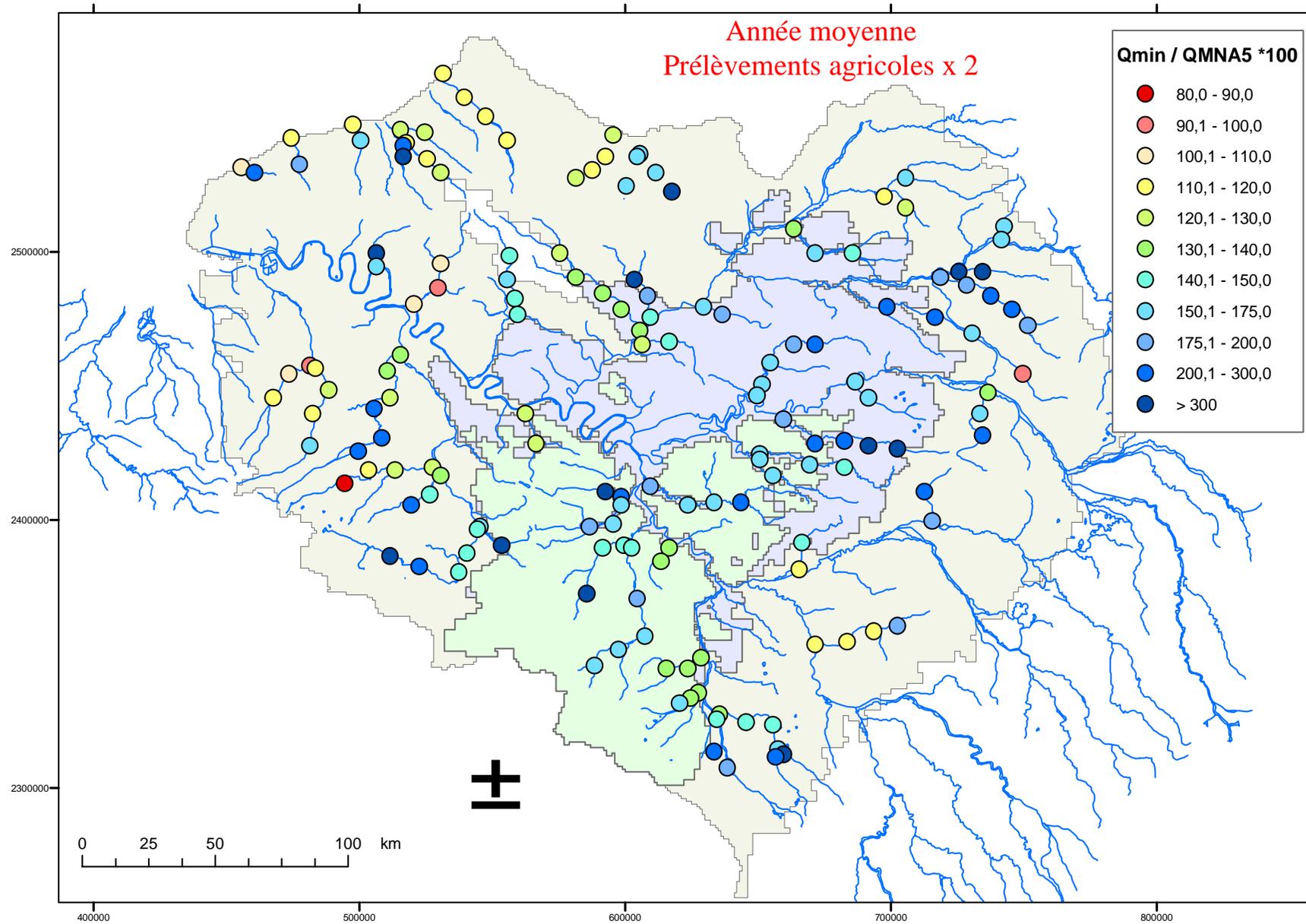


Figure 52 : rapport Q_{min} moyen mensuel / $QMNA5$ calculé en année moyenne avec doublement des prélèvements agricoles

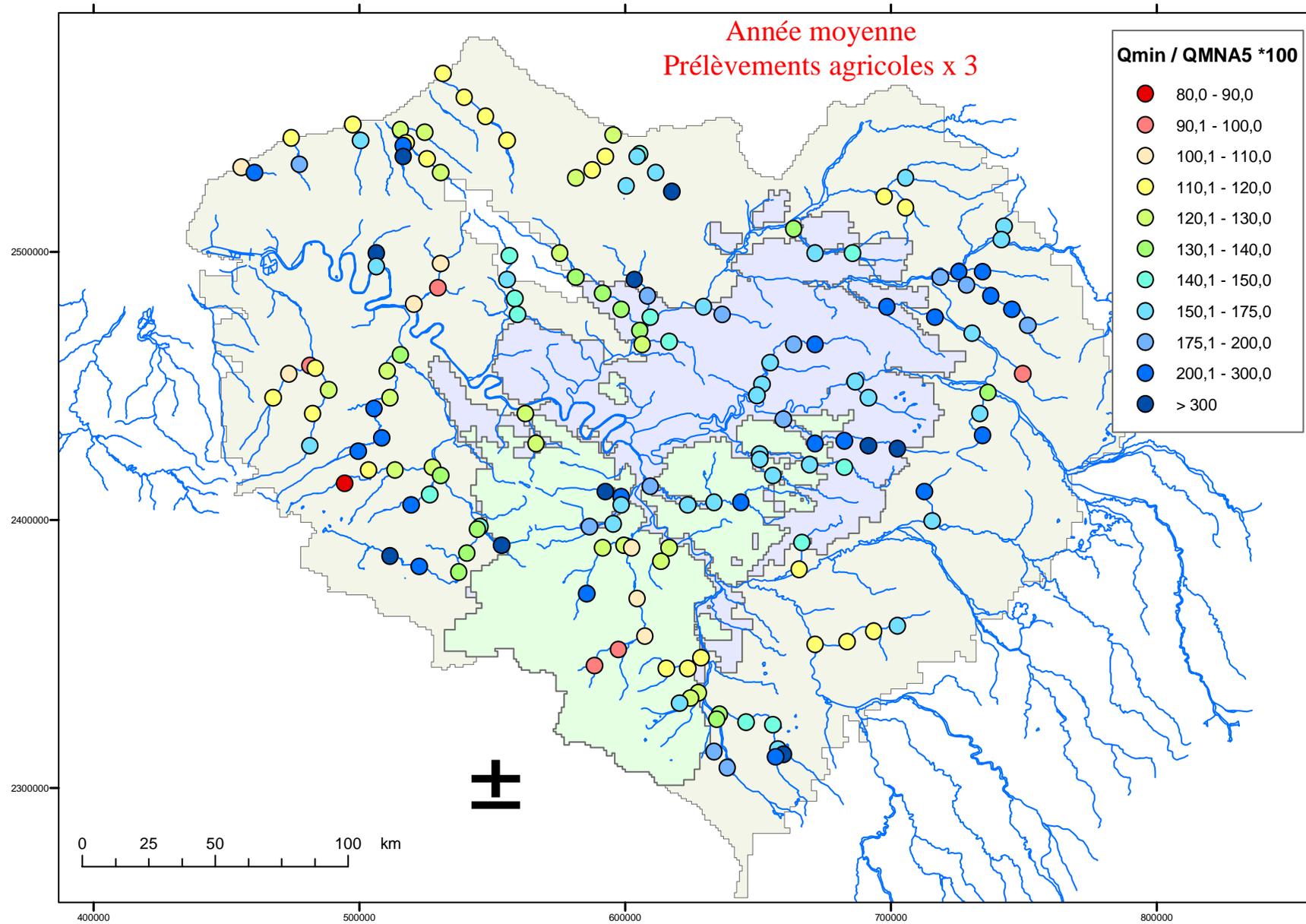


Figure 53 : rapport Q_{min} moyen mensuel / $QMNA5$ calculé en année moyenne avec triplement des prélèvements agricoles

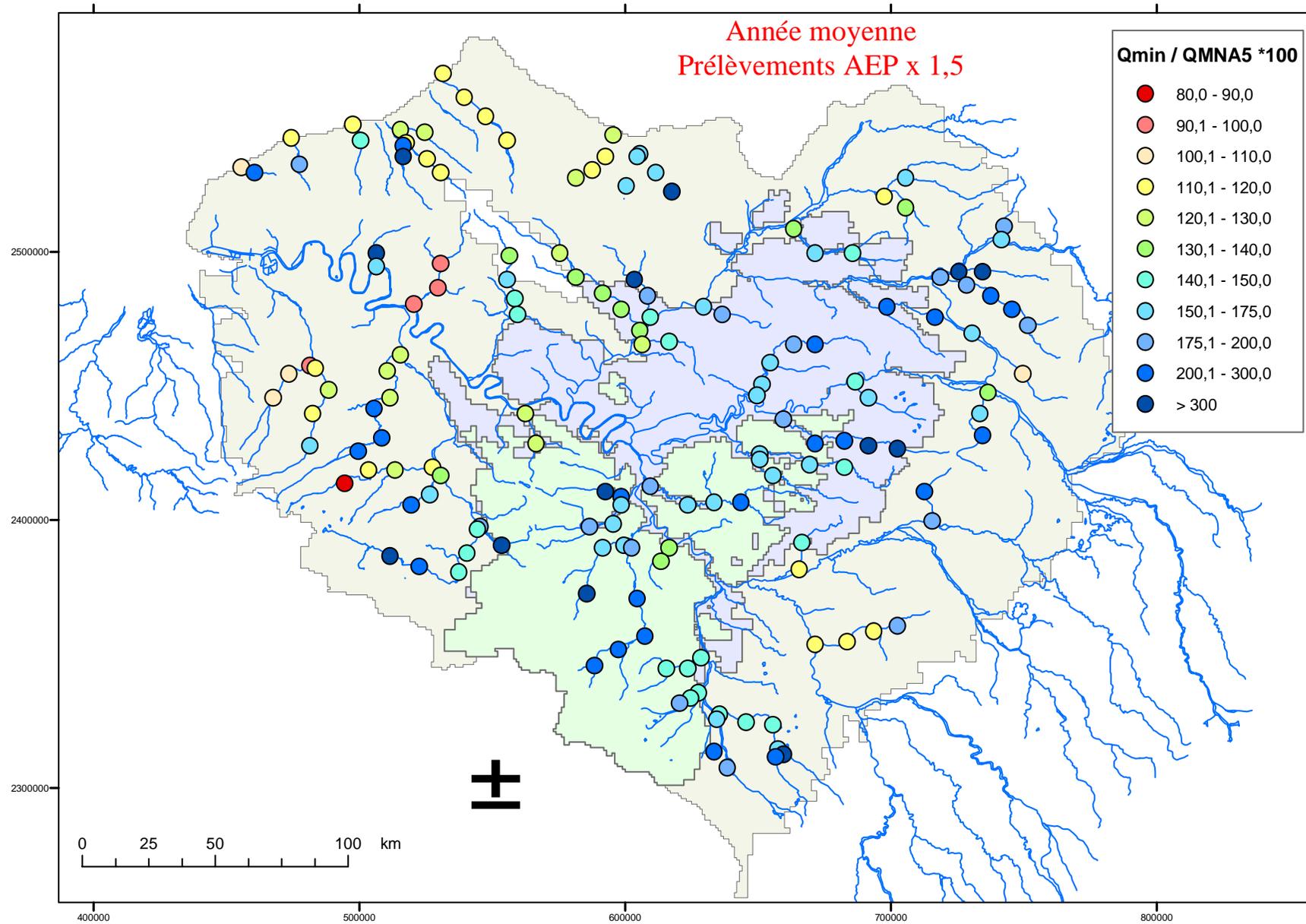


Figure 54 : rapport Q_{min} moyen mensuel / Q_{MNA5} calculé en année moyenne avec augmentation de 50% des prélèvements AEP

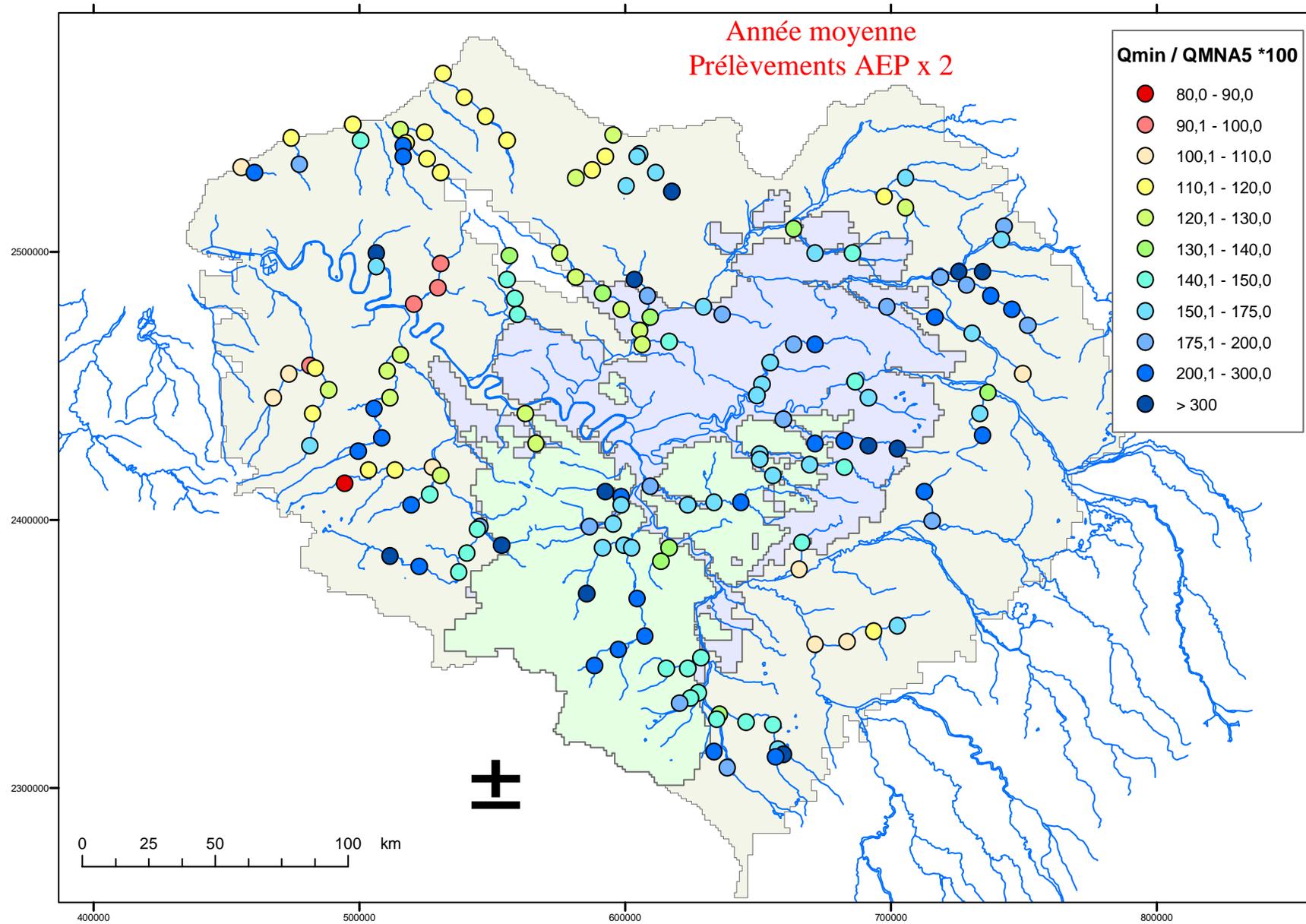


Figure 55 : rapport Q_{min} moyen mensuel / $QMNA5$ calculé en année moyenne avec doublement des prélèvements AEP

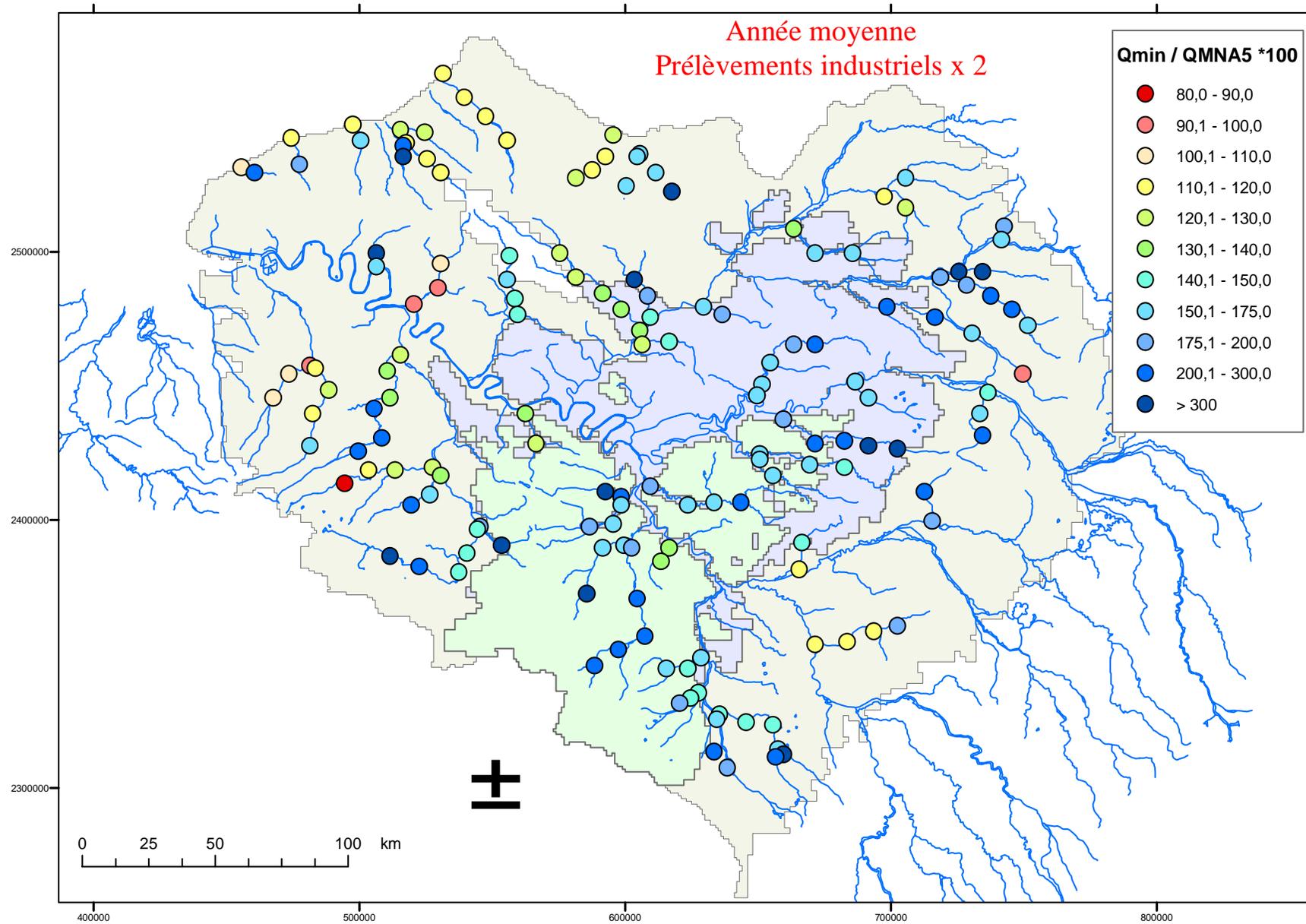


Figure 56 : rapport Q_{min} moyen mensuel / $QMNA5$ calculé en année moyenne avec doublement des prélèvements industriels

Rapport débit moyen minimal mensuel calculé après 15 années moyennes et 3 années hydrogéologiques sévères / débit minimal de retour 5 ans (QMNA5)

$$(Q_{\min_mensuel} / Q_{MNA5}) * 100$$

(les valeurs de QMNA5 retenue sont présentées Figure 27)



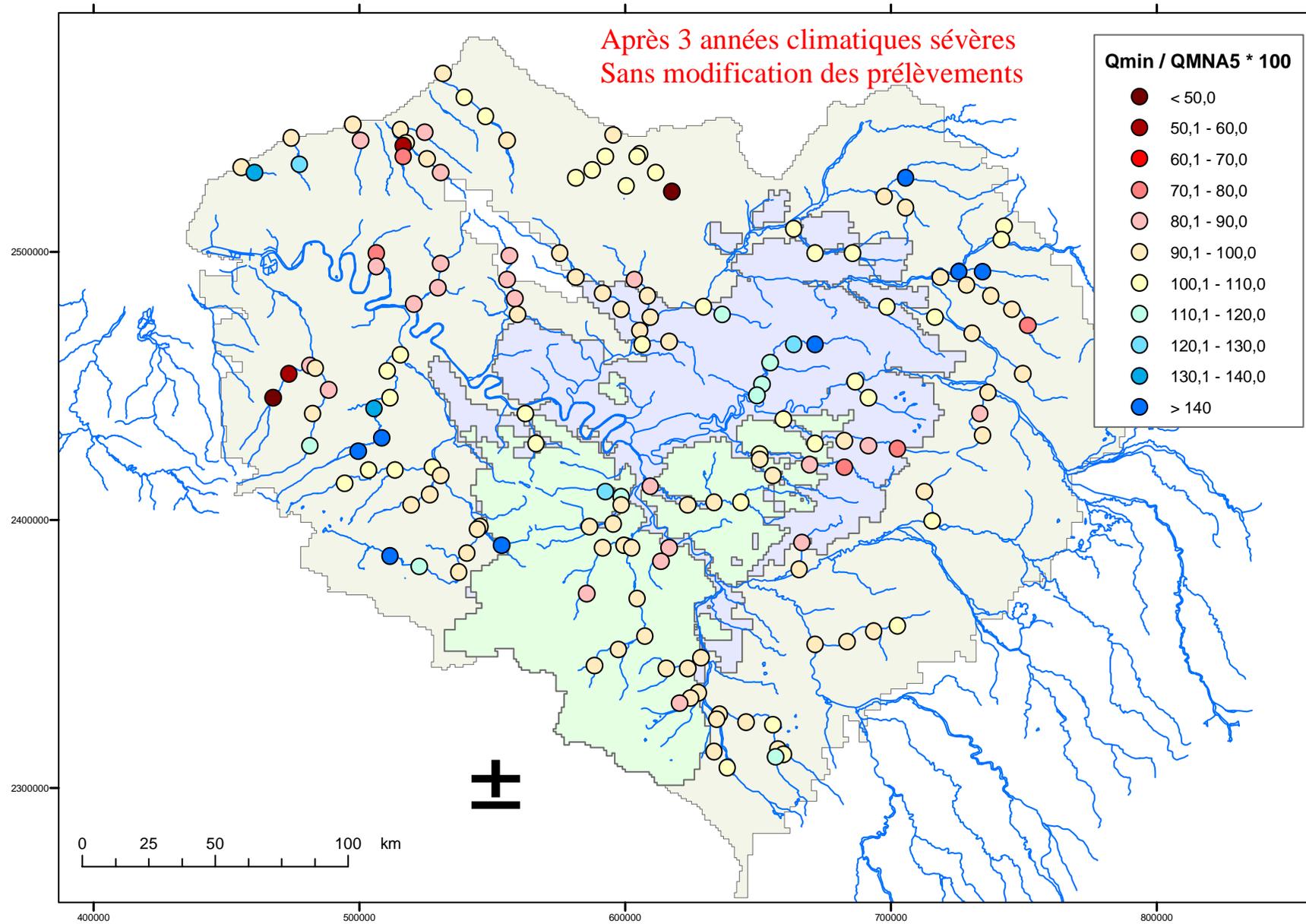


Figure 57 : rapport Q_{min} moyen mensuel / $QMNA5$ calculé après trois années « sévères » sans modification des prélèvements anthropiques

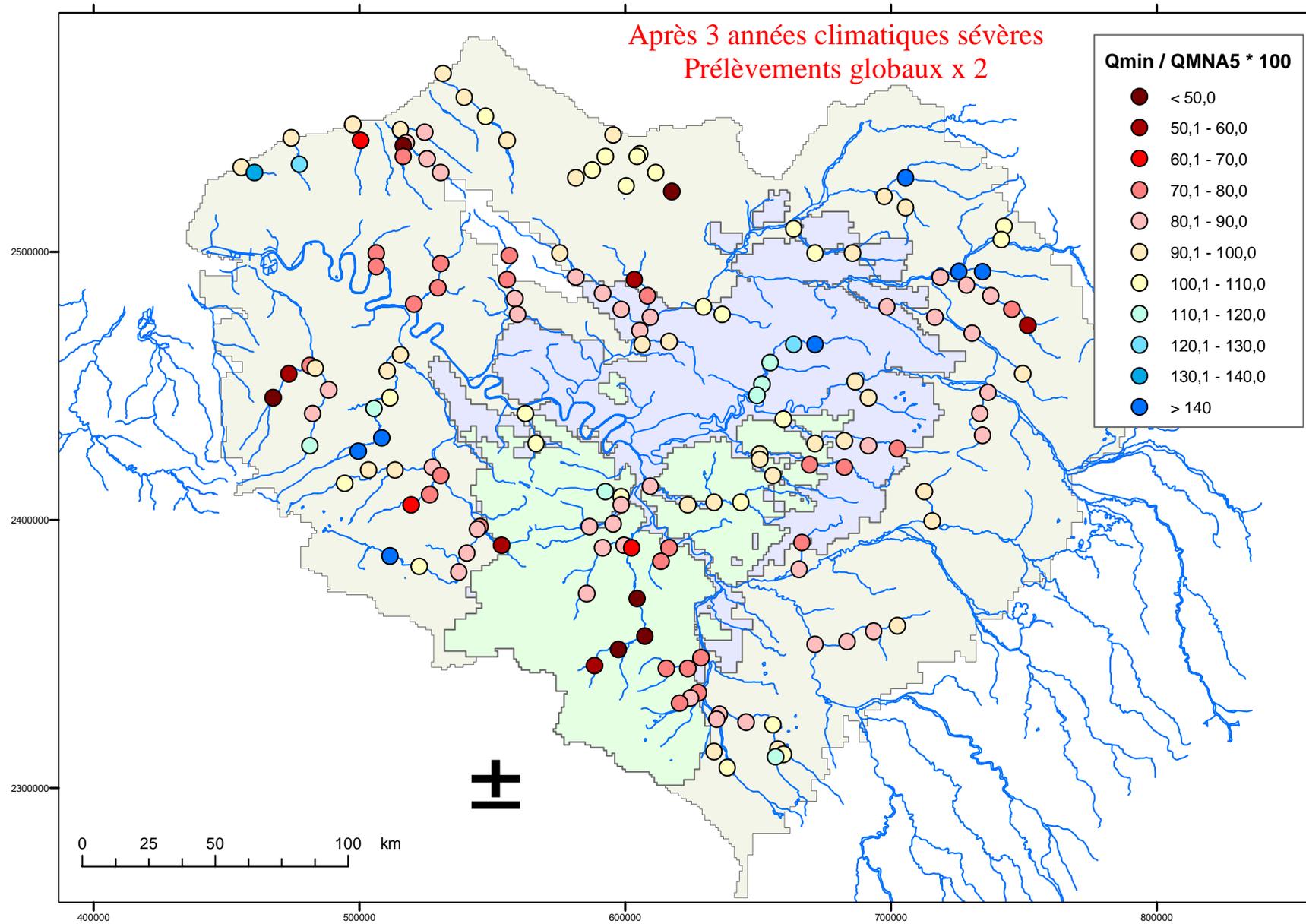


Figure 58 : rapport Q_{min} moyen mensuel / Q_{MNA5} calculé après trois années « sévères » avec doublement de l'ensemble des prélèvements

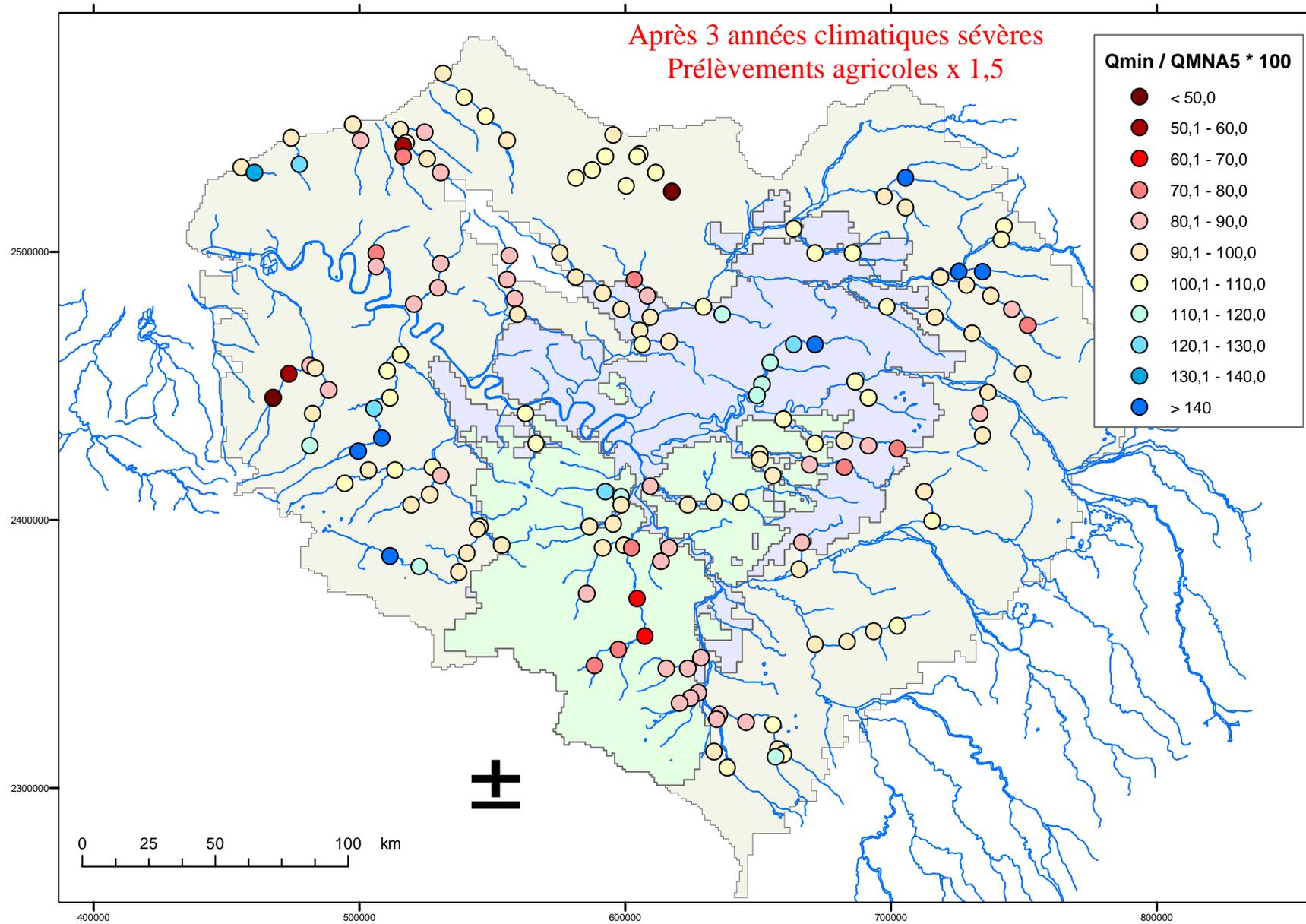


Figure 59 : rapport Q_{min} moyen mensuel / Q_{MNA5} calculé après trois années « sévères » avec augmentation de 50% des prélèvements agricoles

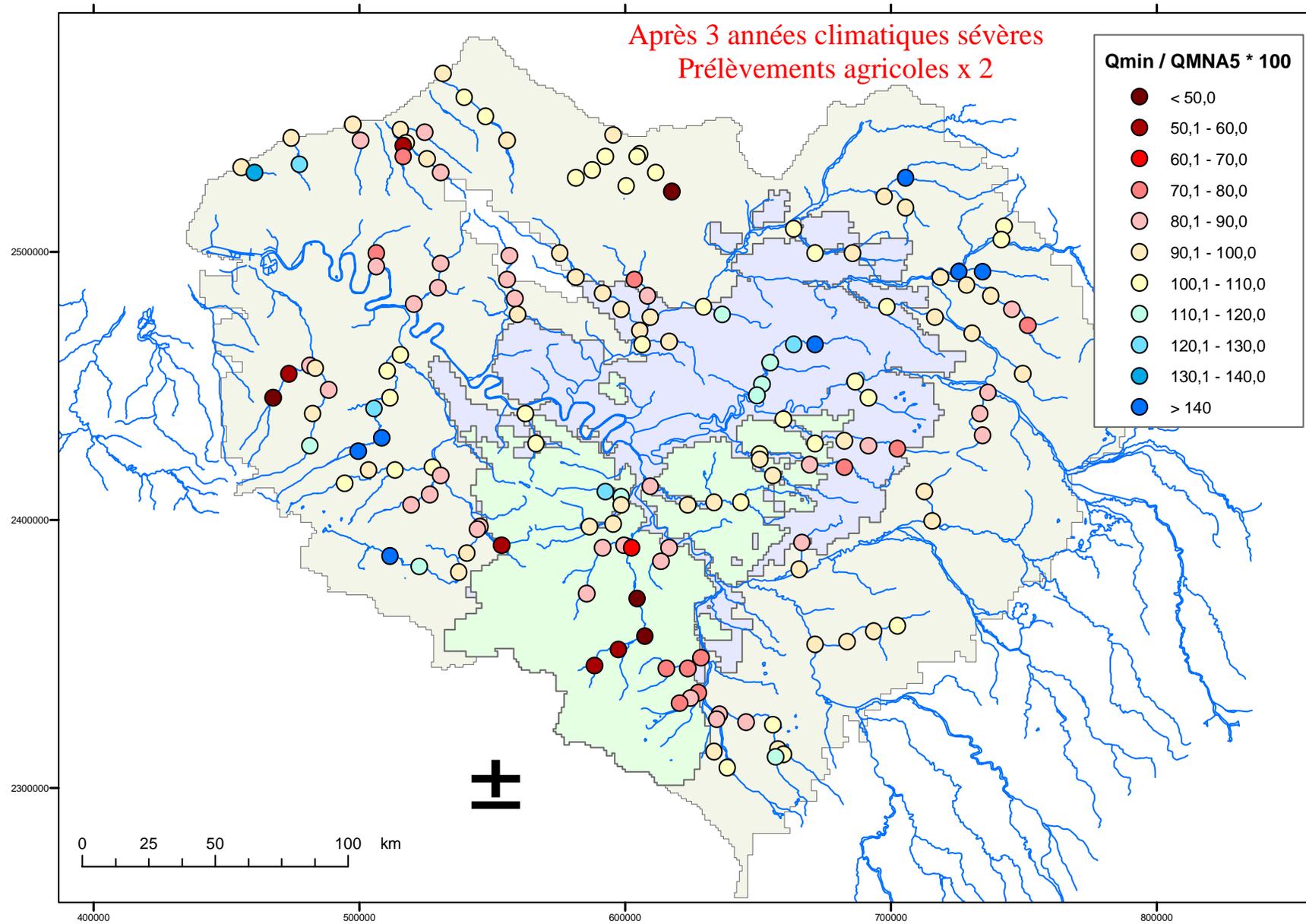


Figure 60 : rapport Q_{min} moyen mensuel / $QMNA5$ calculé après trois années « sévères » avec doublement des prélèvements agricoles

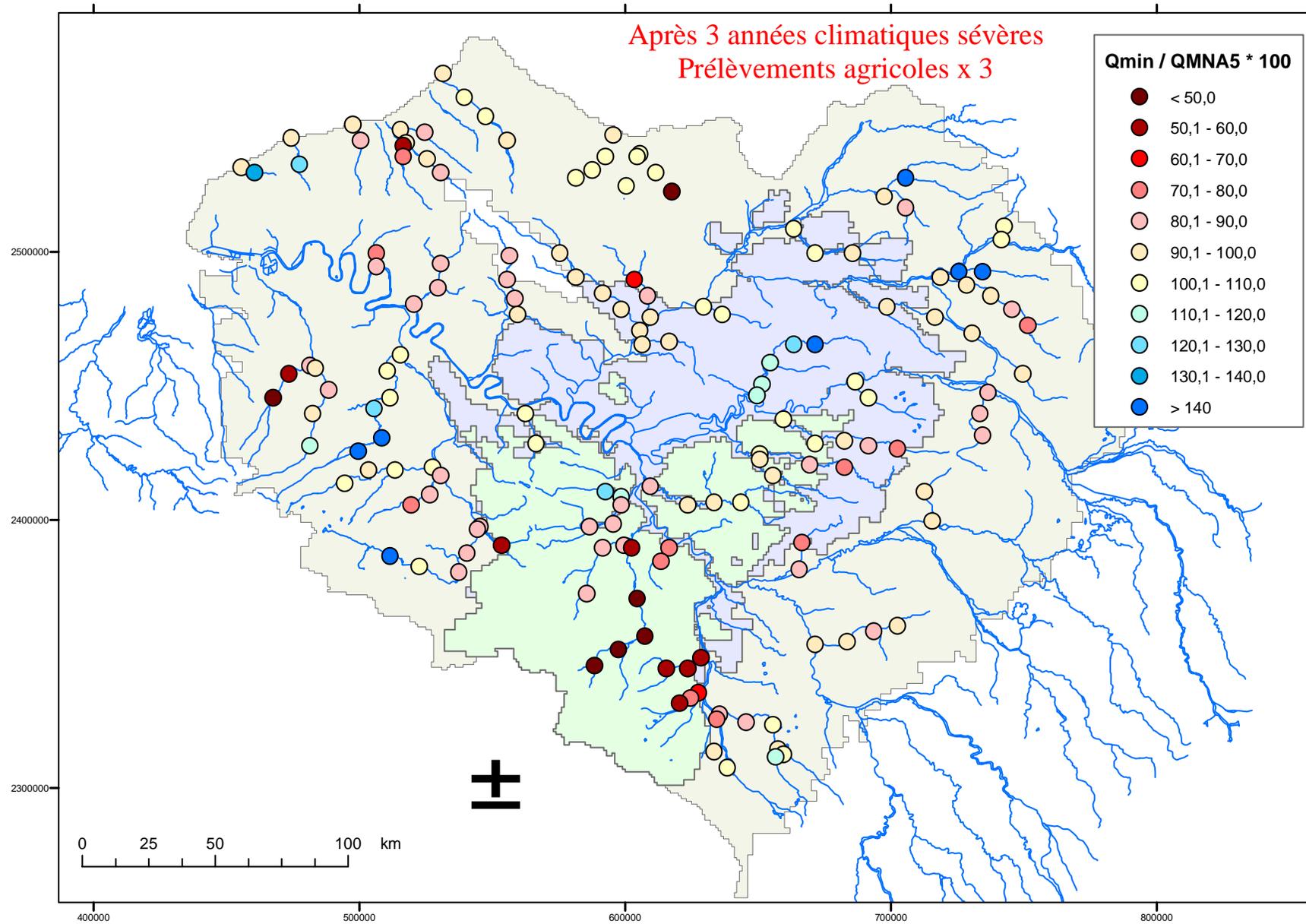


Figure 61 : rapport Q_{min} moyen mensuel / $QMNA5$ calculé après trois années « sévères » avec triplement des prélèvements agricoles

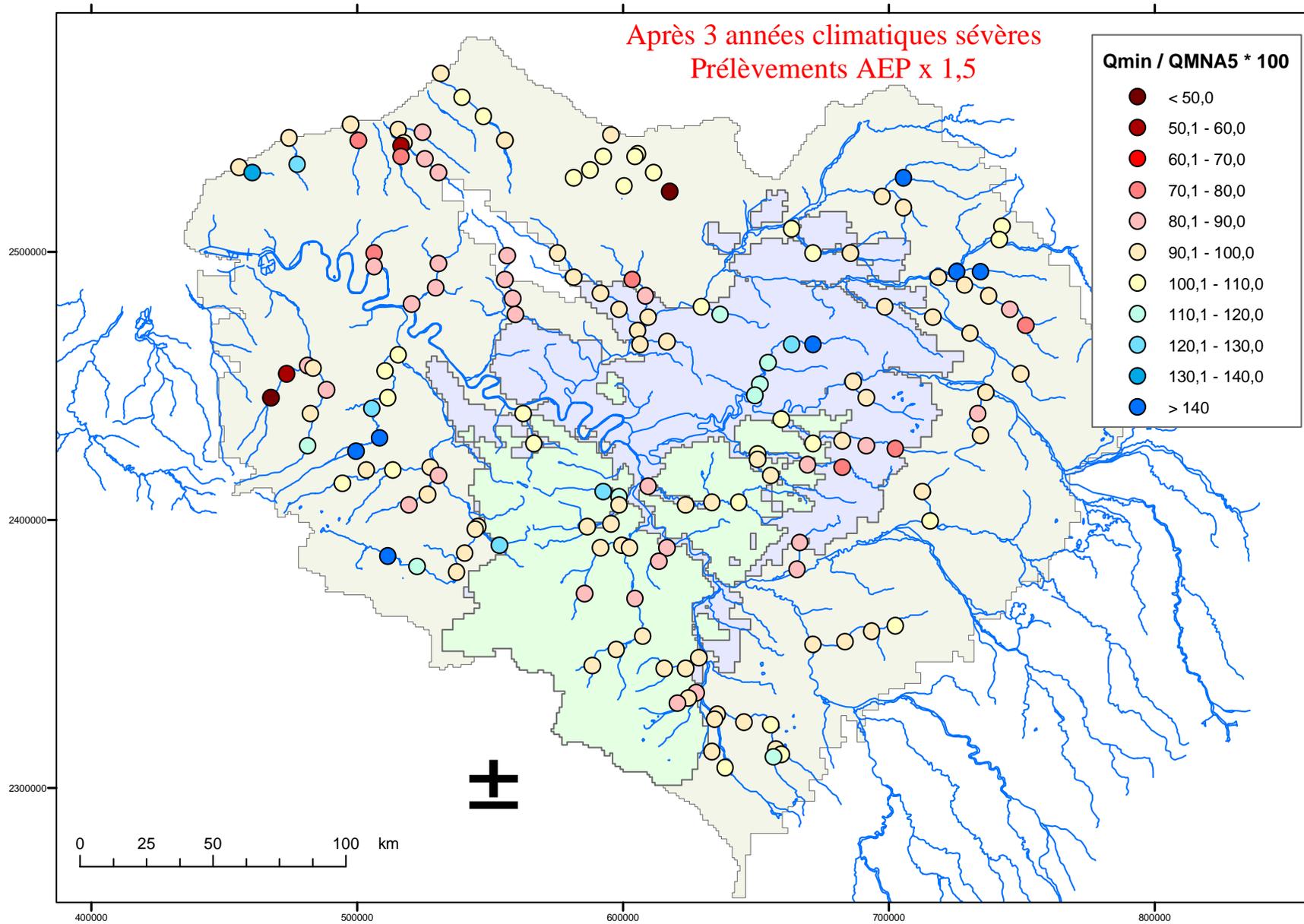


Figure 62 : rapport Q_{min} moyen mensuel / Q_{MNA5} calculé après trois années « sévères » avec augmentation de 50% des prélèvements AEP

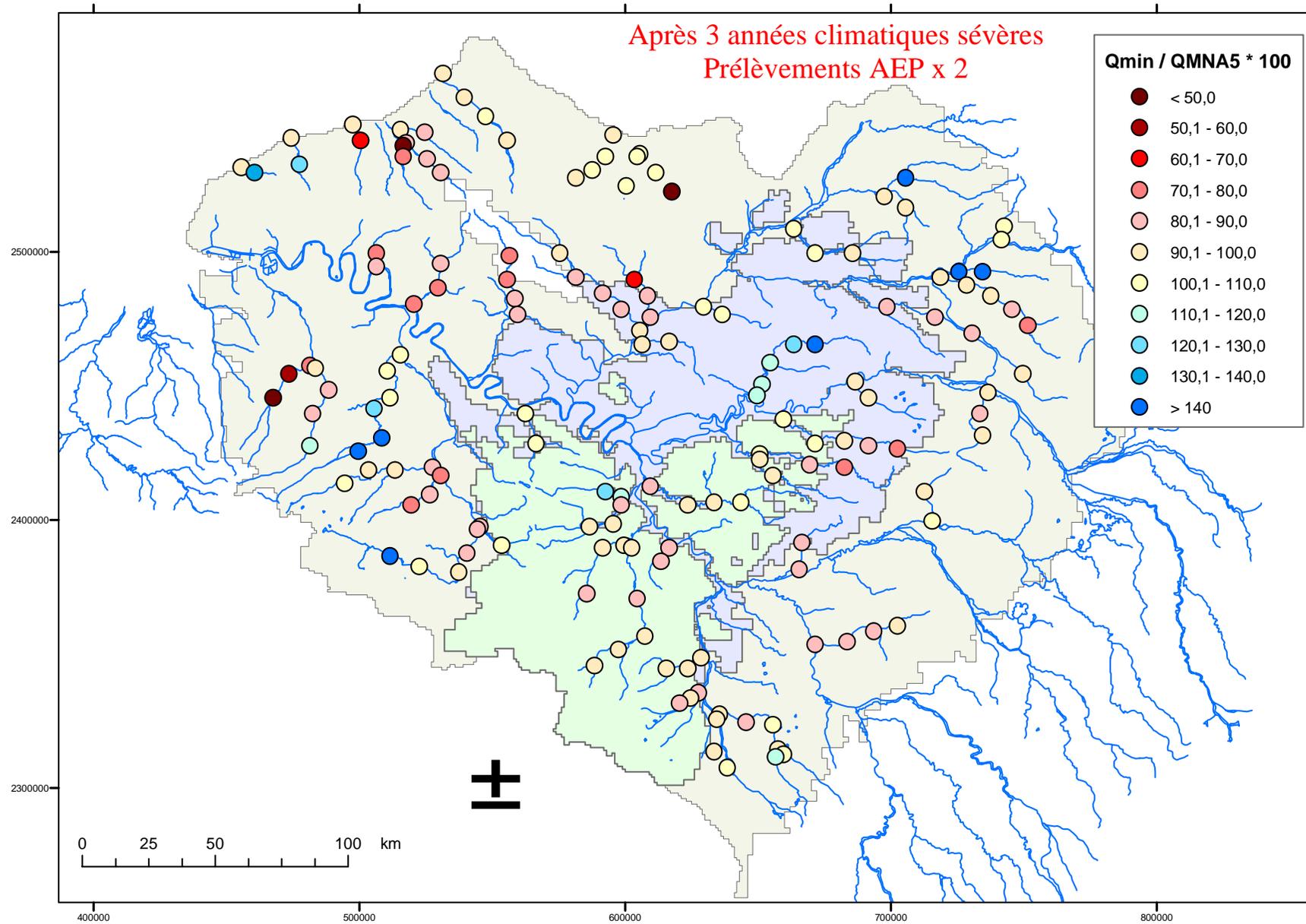


Figure 63 : rapport Q_{min} moyen mensuel / Q_{MNA5} calculé après trois années « sévères » avec doublement des prélèvements AEP

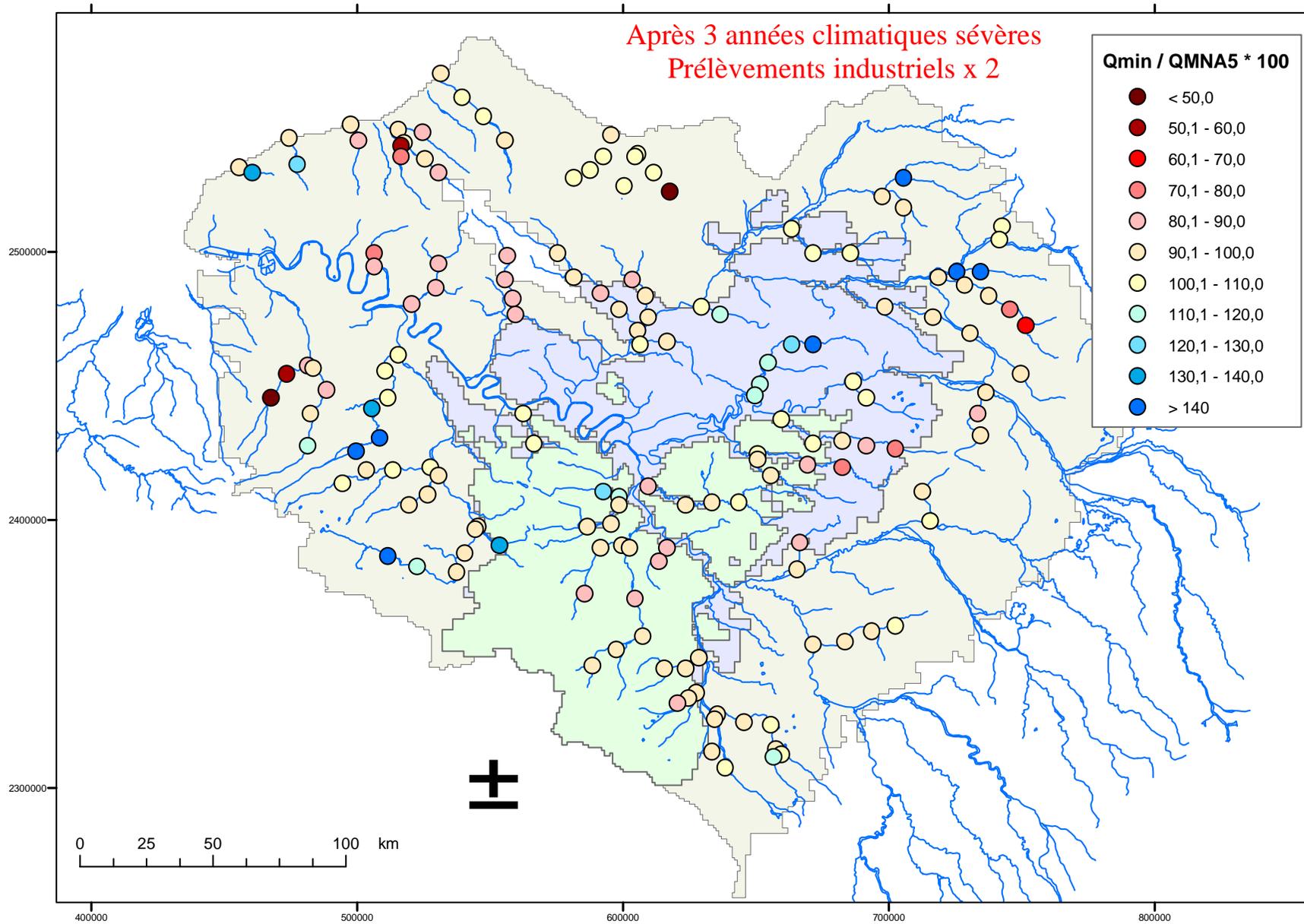


Figure 64 : rapport Q_{min} moyen mensuel / $QMNA5$ calculé après trois années « sévères » avec doublement des prélèvements industriels

SIMULATIONS SUR LA PERIODE 1970-2004

-oOo-

Evolution relative de la valeur du QMNA5 liée à l'augmentation des prélèvements

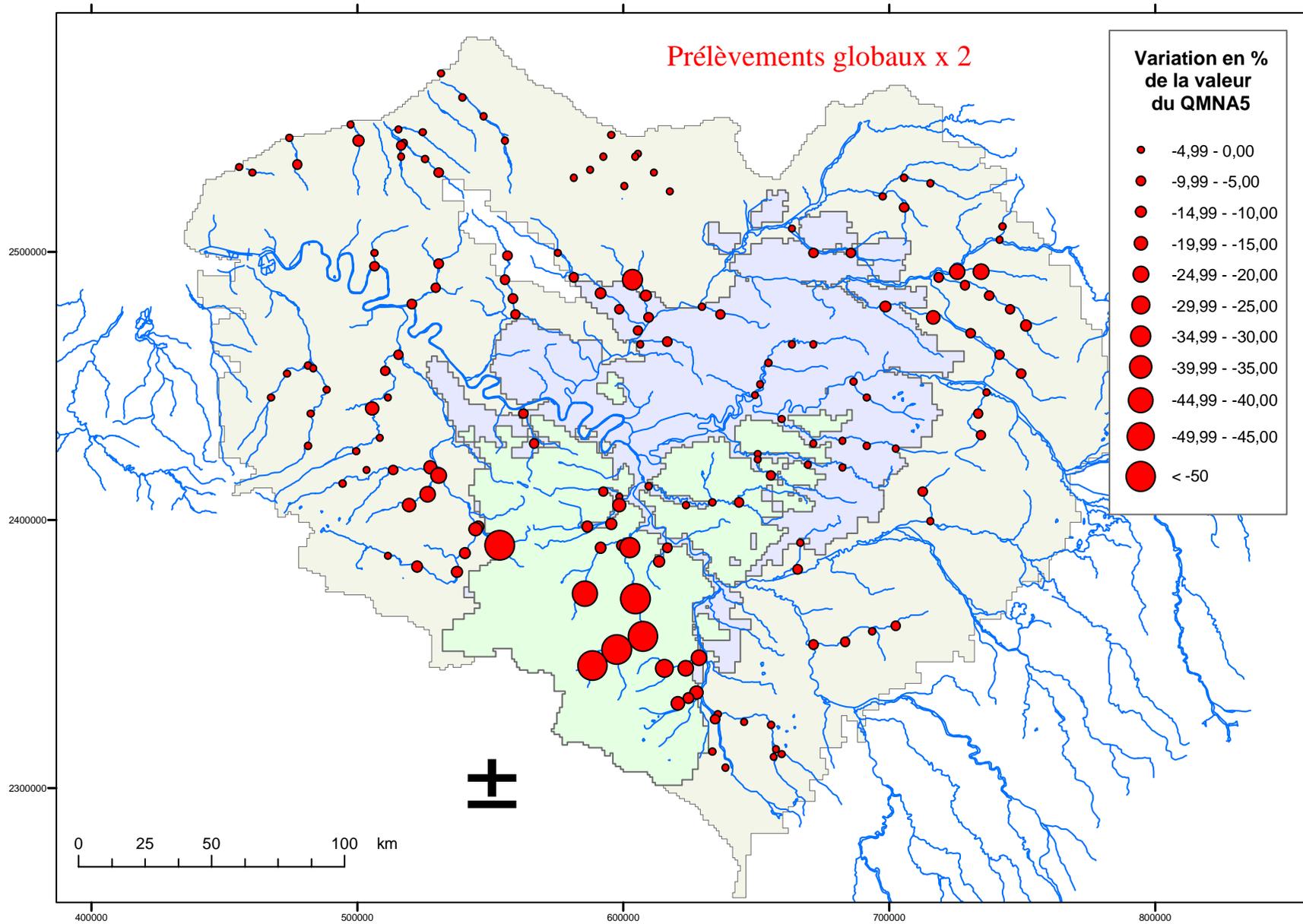


Figure 65 : évolution relative en % de la valeur du QMNA5 avec doublement de l'ensemble des prélèvements

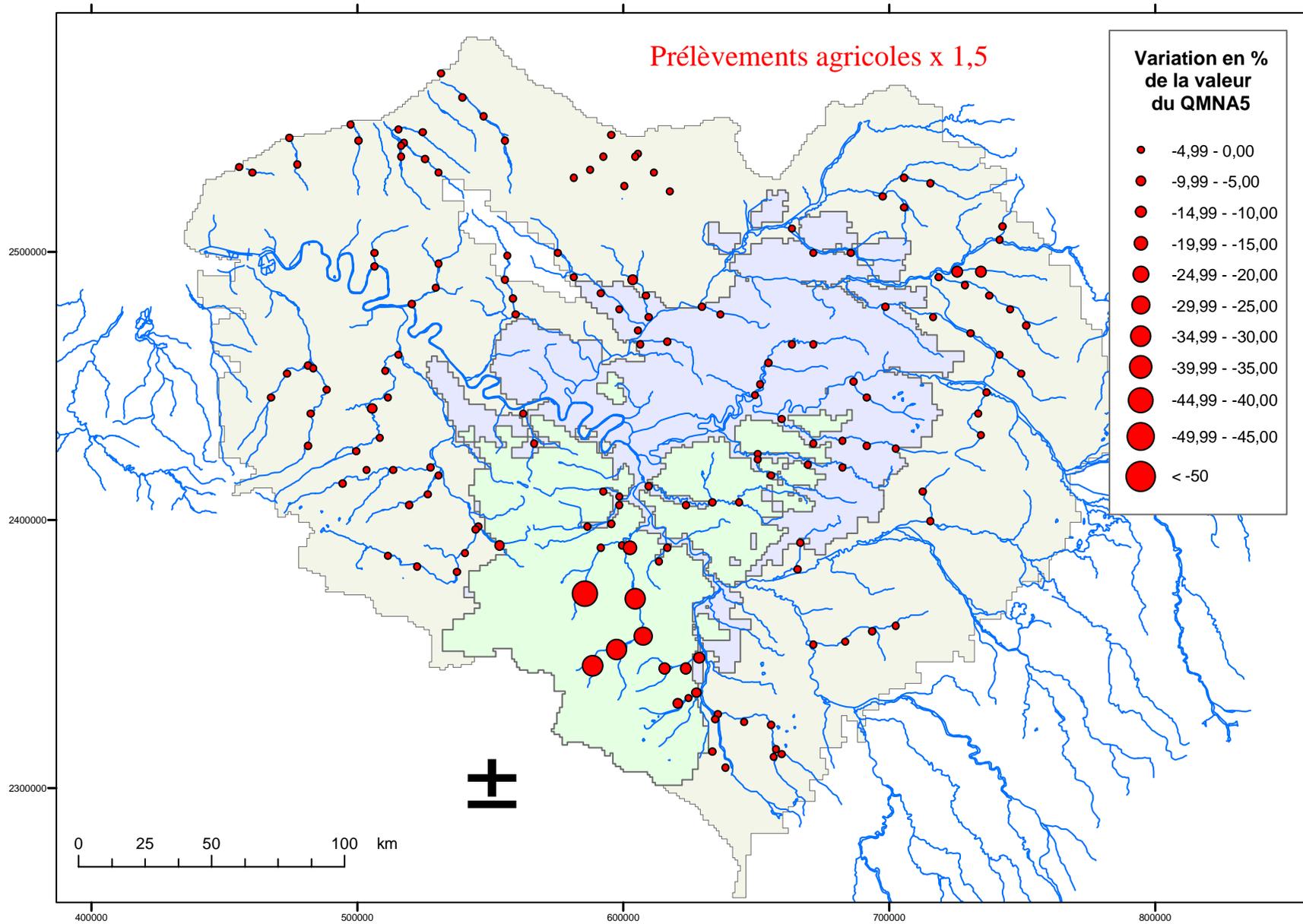


Figure 66 : évolution relative en % de la valeur du QMNA5 avec augmentation de 50% des prélèvements agricoles

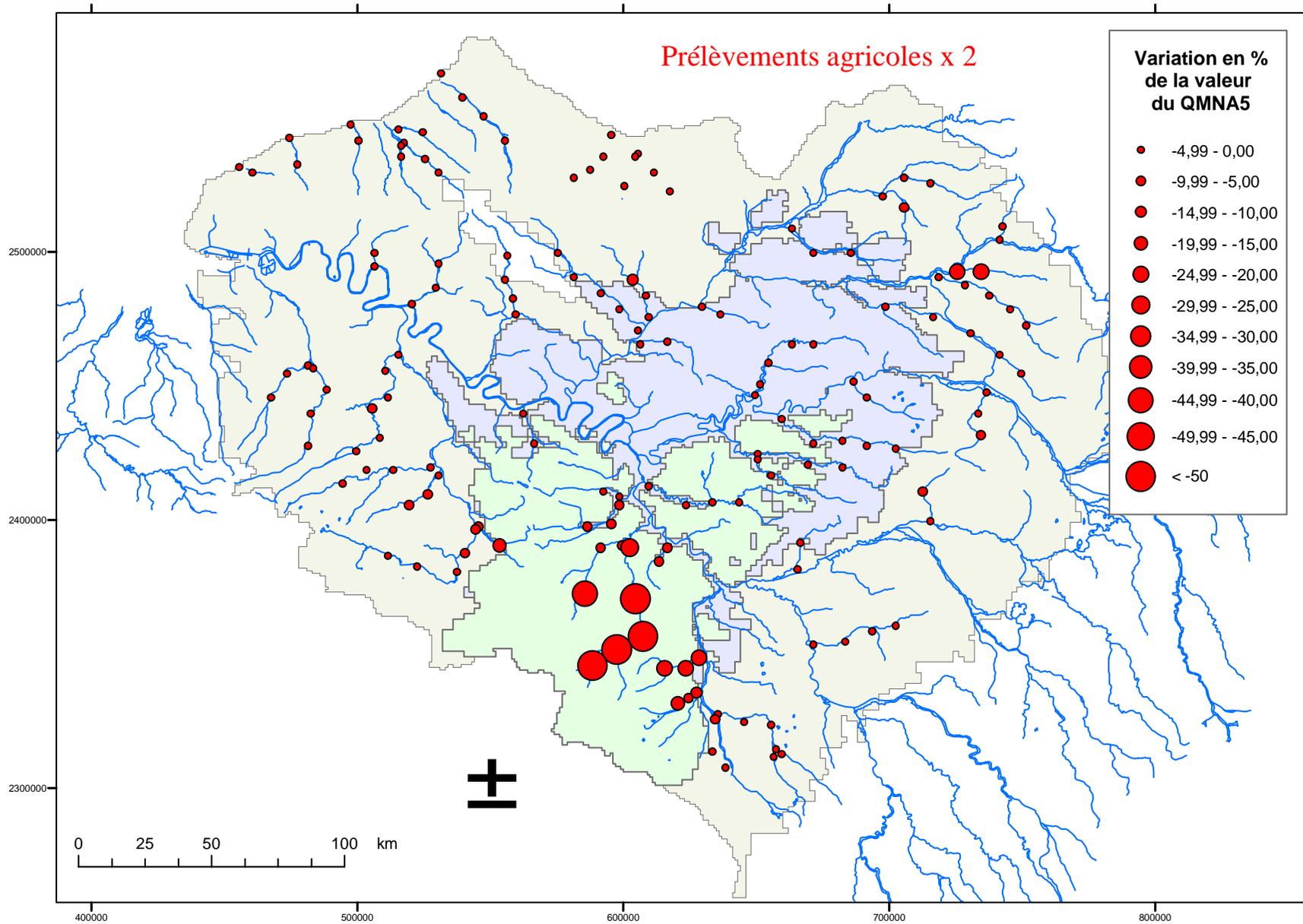


Figure 67 : évolution relative en % de la valeur du QMNA5 avec doublement des prélèvements agricoles

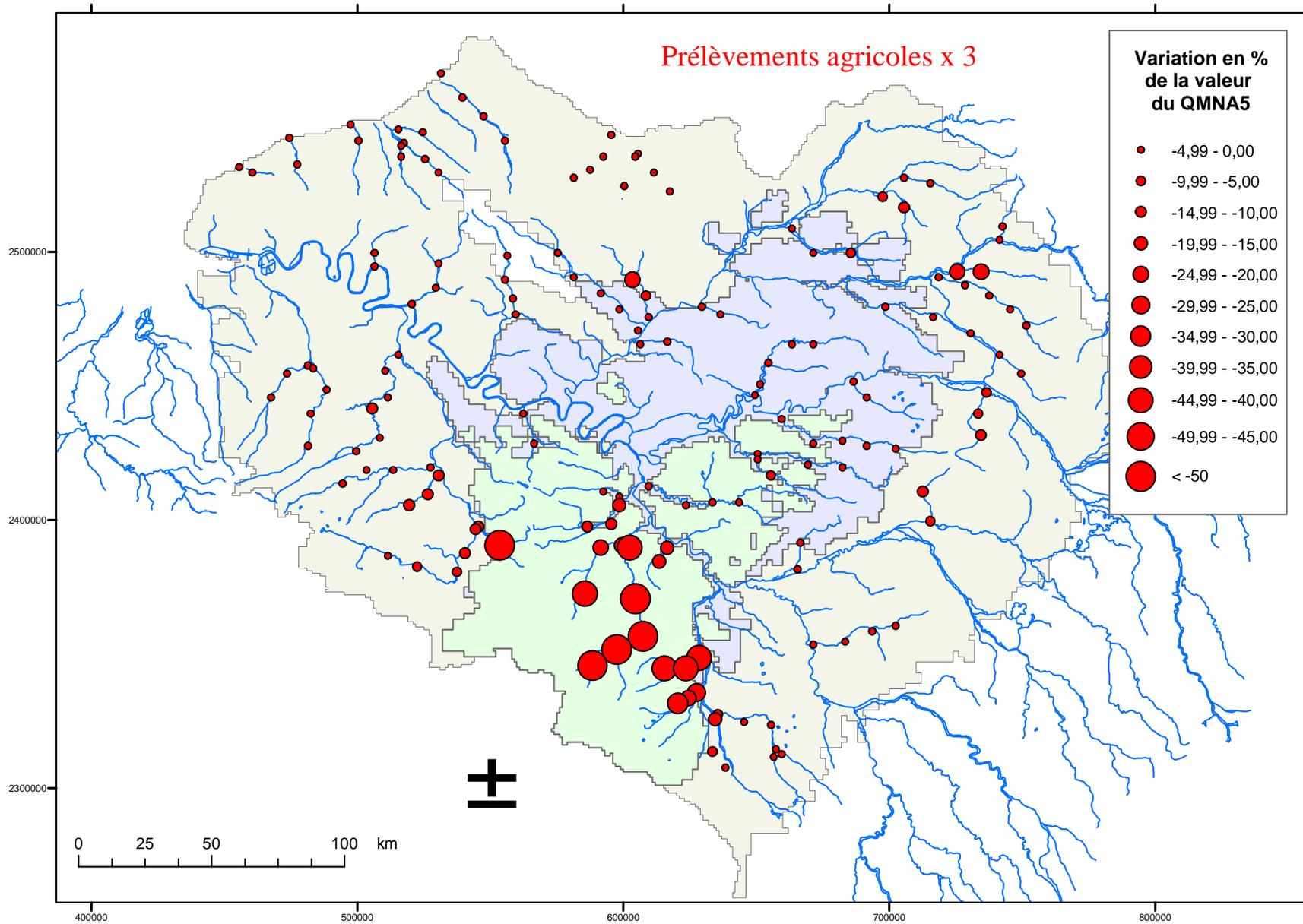


Figure 68 : évolution relative en % de la valeur du QMNA5 avec triplement des prélèvements agricoles

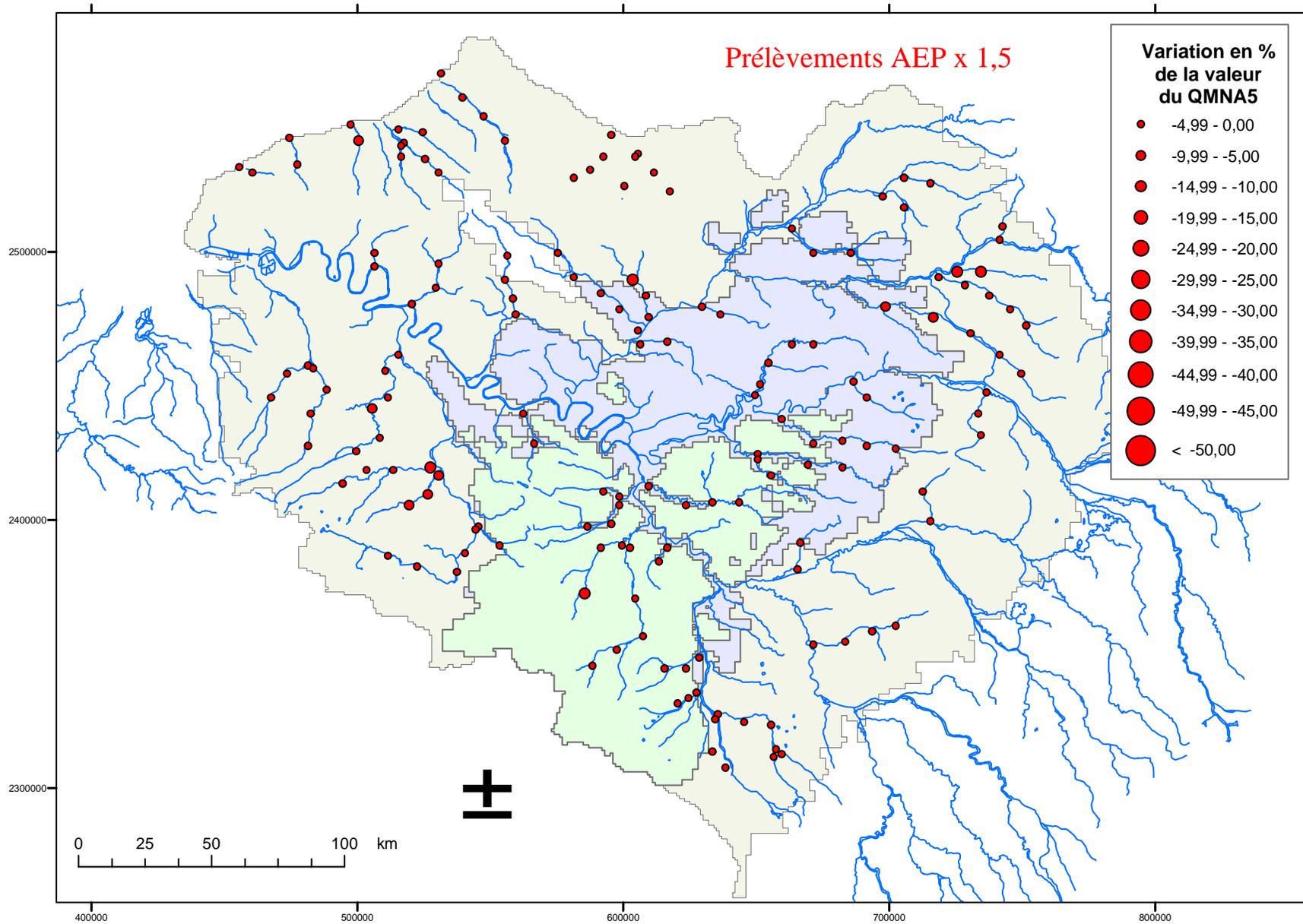


Figure 69 : évolution relative en % de la valeur du QMNA5 avec augmentation de 50% des prélèvements AEP

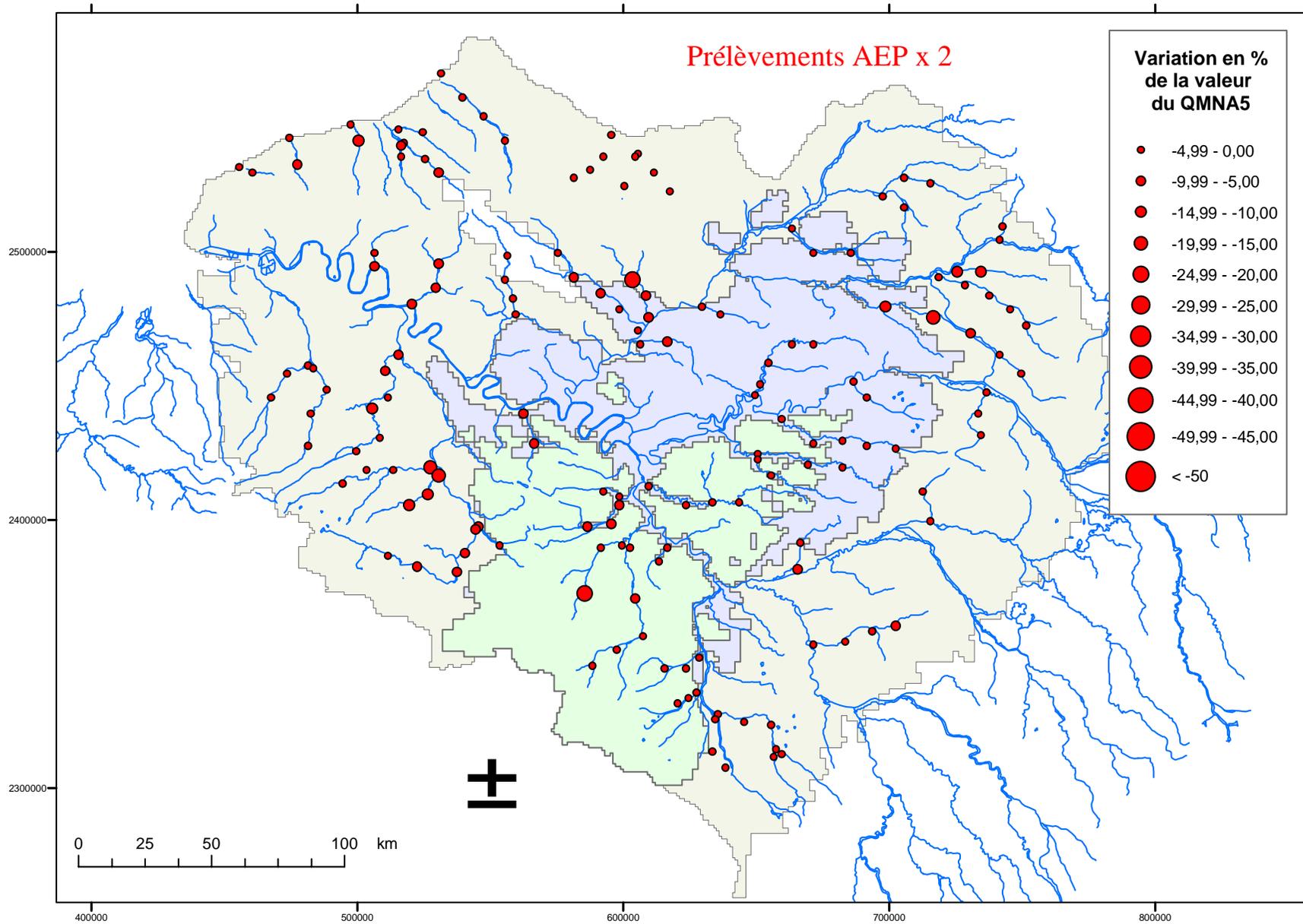


Figure 70 : évolution relative en % de la valeur du QMNA5 avec doublement des prélèvements AEP

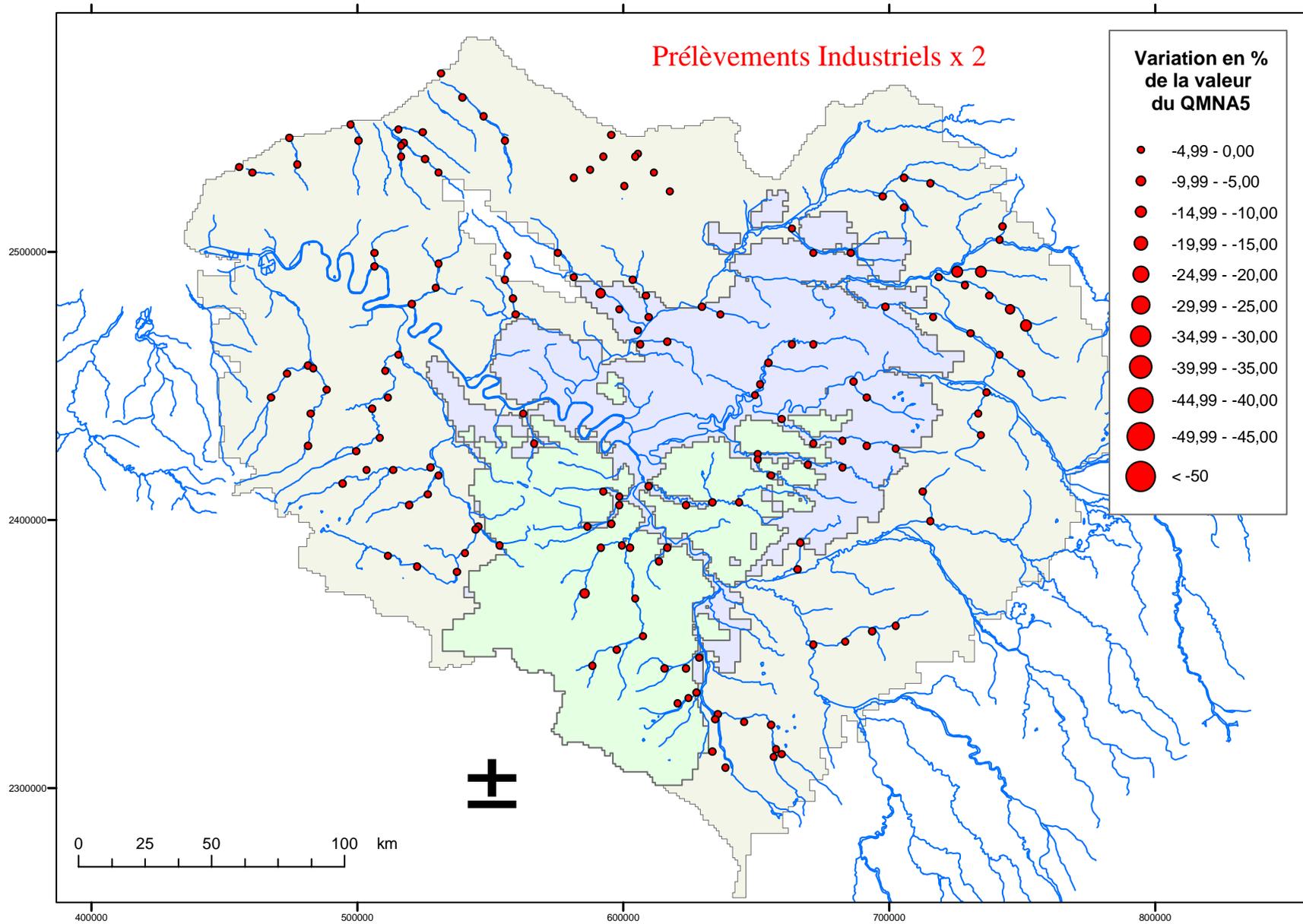


Figure 71 : évolution relative en % de la valeur du QMNA5 avec doublement des prélèvements industriels

SIMULATIONS SUR LA PERIODE 1970-2004

-oOo-

**Influence de l'augmentation des prélèvements anthropiques sur la période de retour
de la valeur du QMNA5 initial**

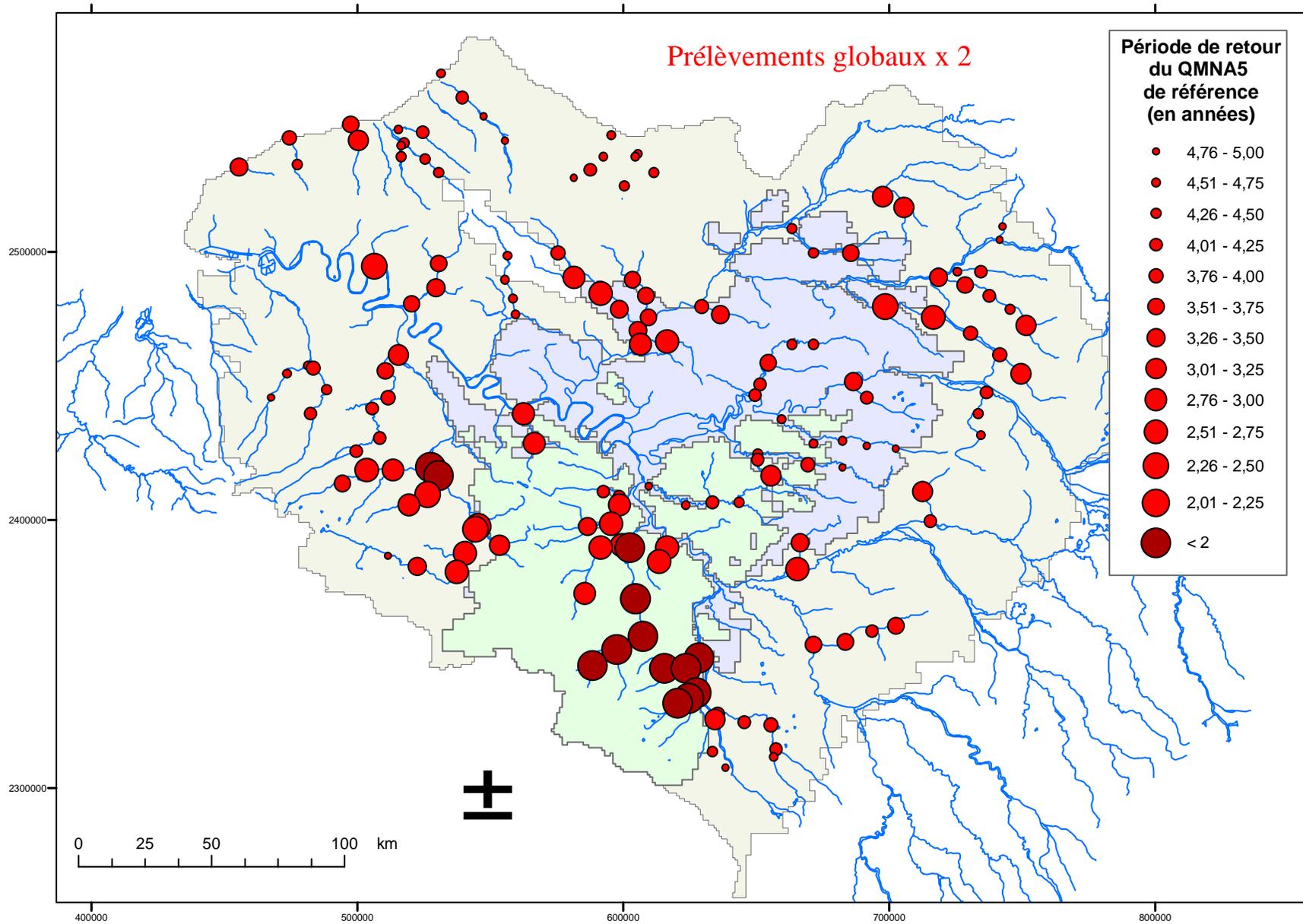


Figure 72 : période de retour du QMNA5 initial : prélèvements globaux doublés

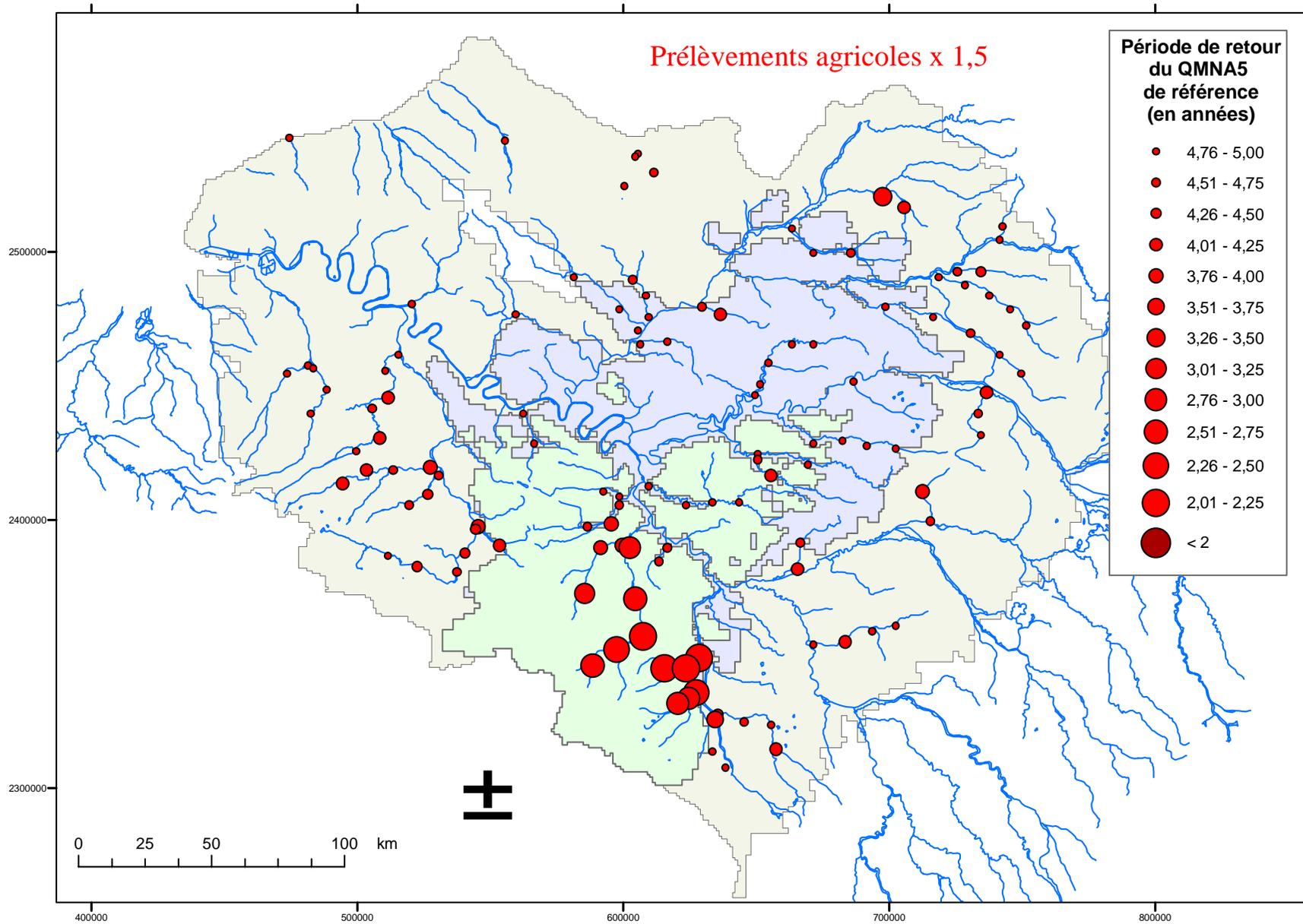


Figure 73 : période de retour du QMNA5 initial : prélèvements agricoles augmentés de 50 %

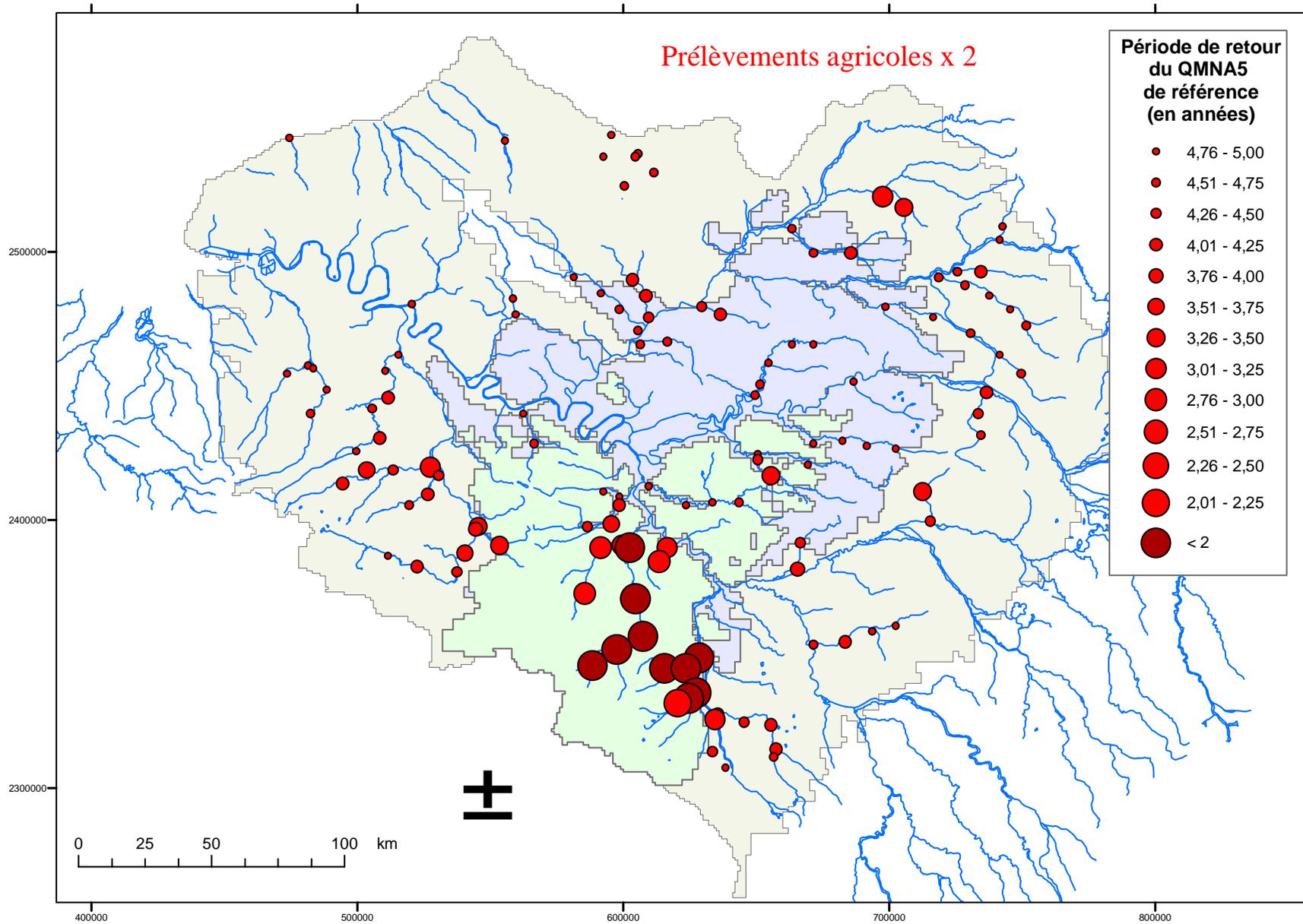


Figure 74 : période de retour du QMNA5 initial : prélèvements agricoles doublés

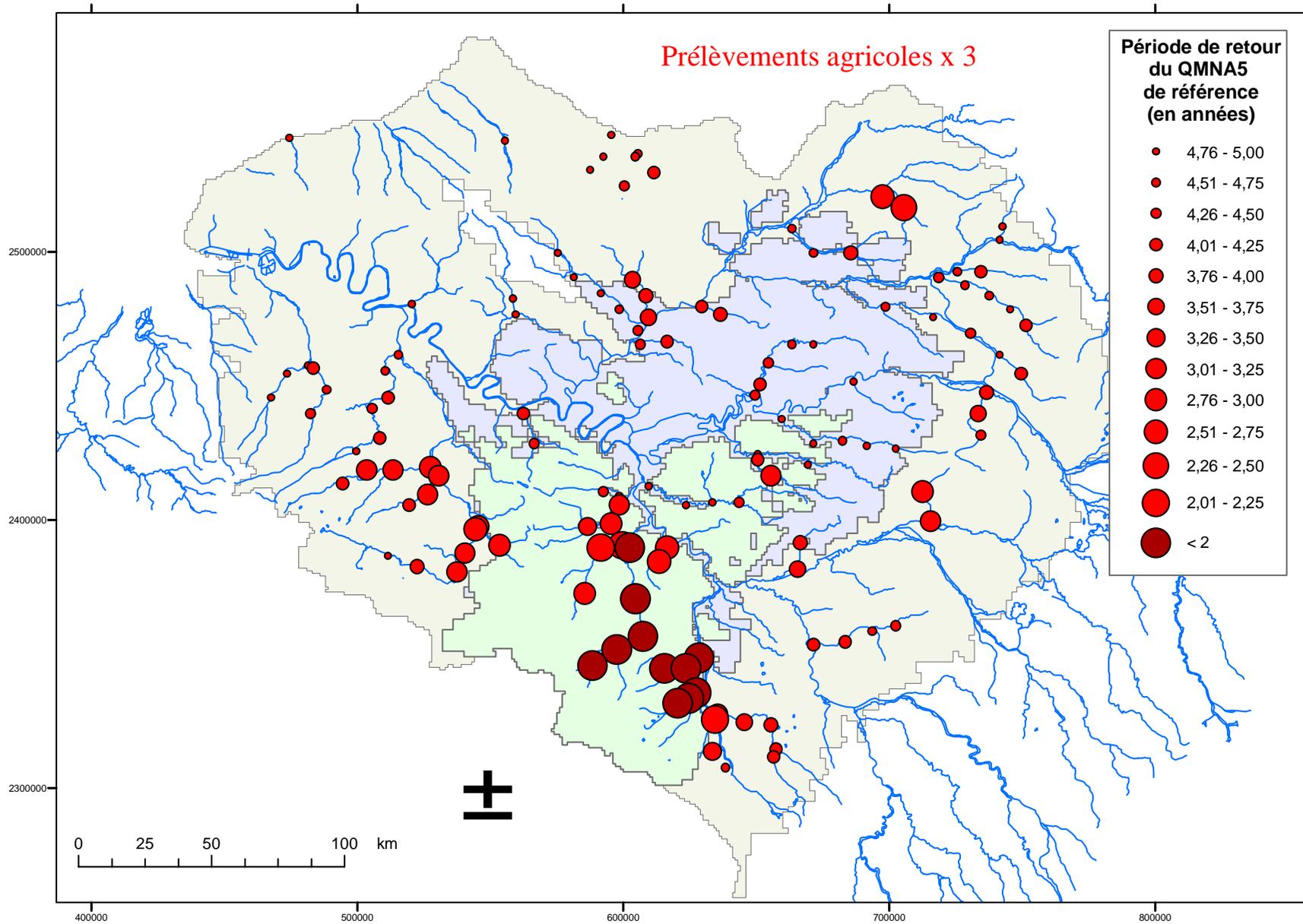


Figure 75 : période de retour du QMNA5 initial : prélèvements agricoles triplés

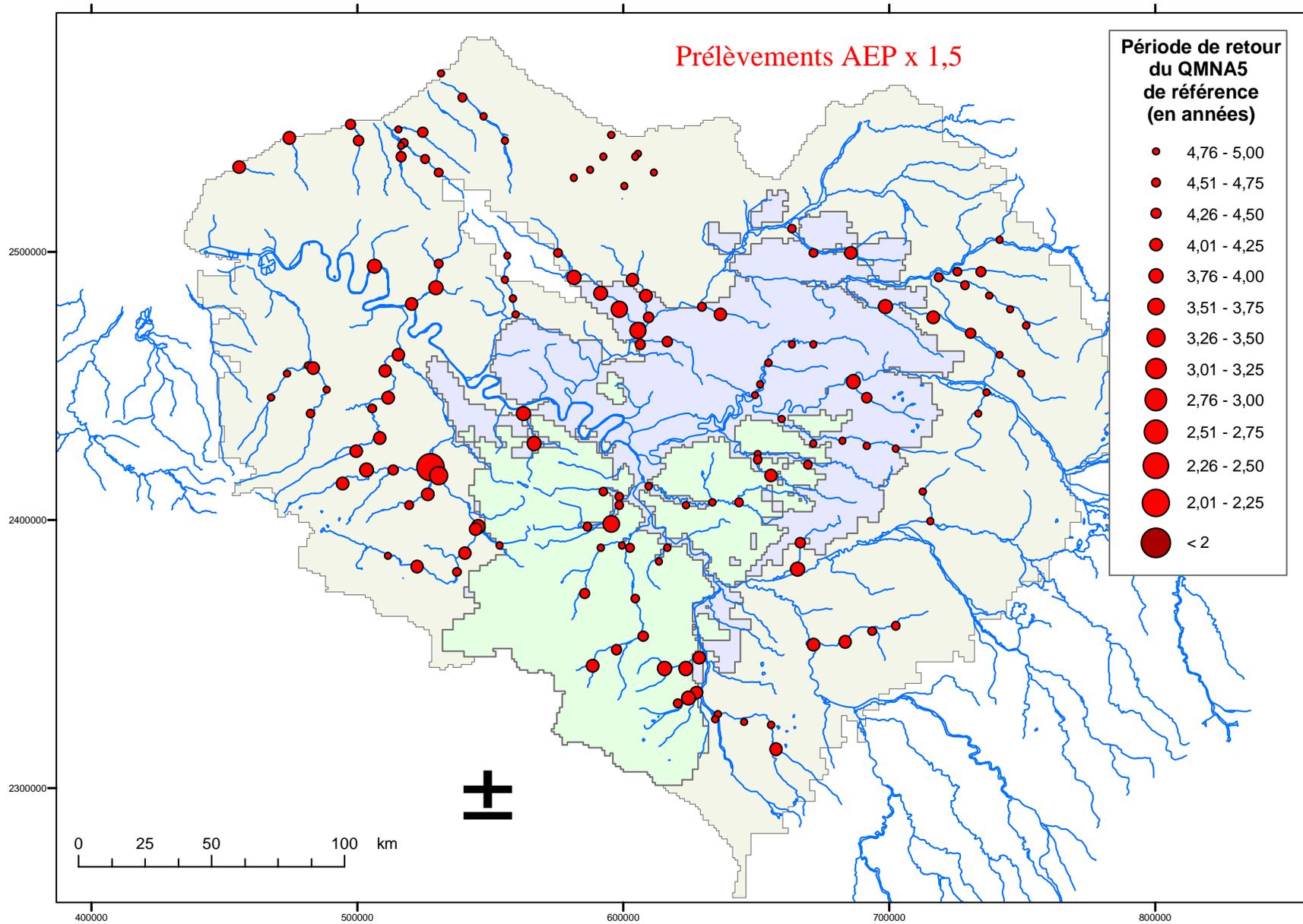


Figure 76 : période de retour du QMNA5 initial : prélèvements AEP augmentés de 50%

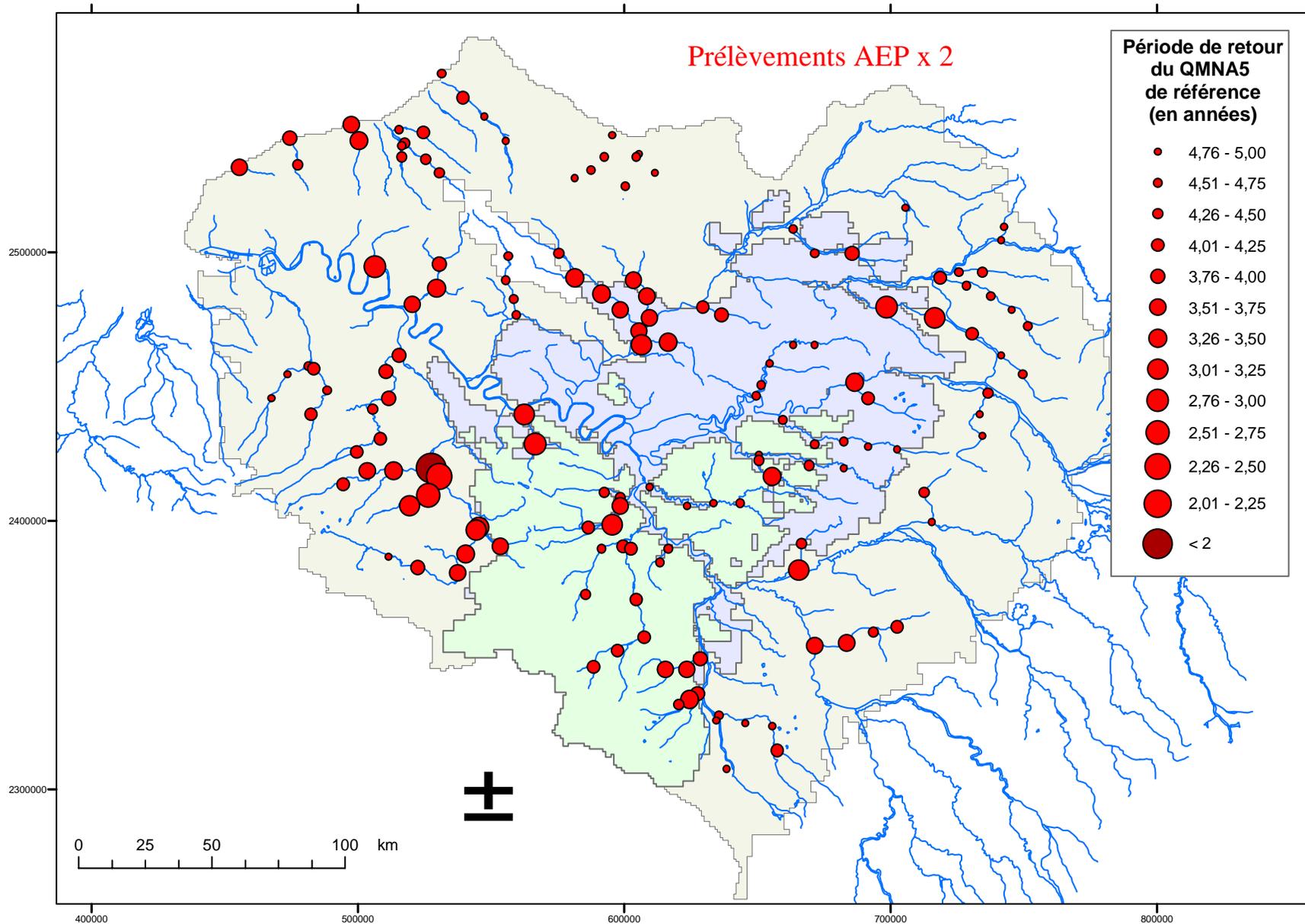


Figure 77 : période de retour du QMNA5 initial : prélèvements AEP doublés

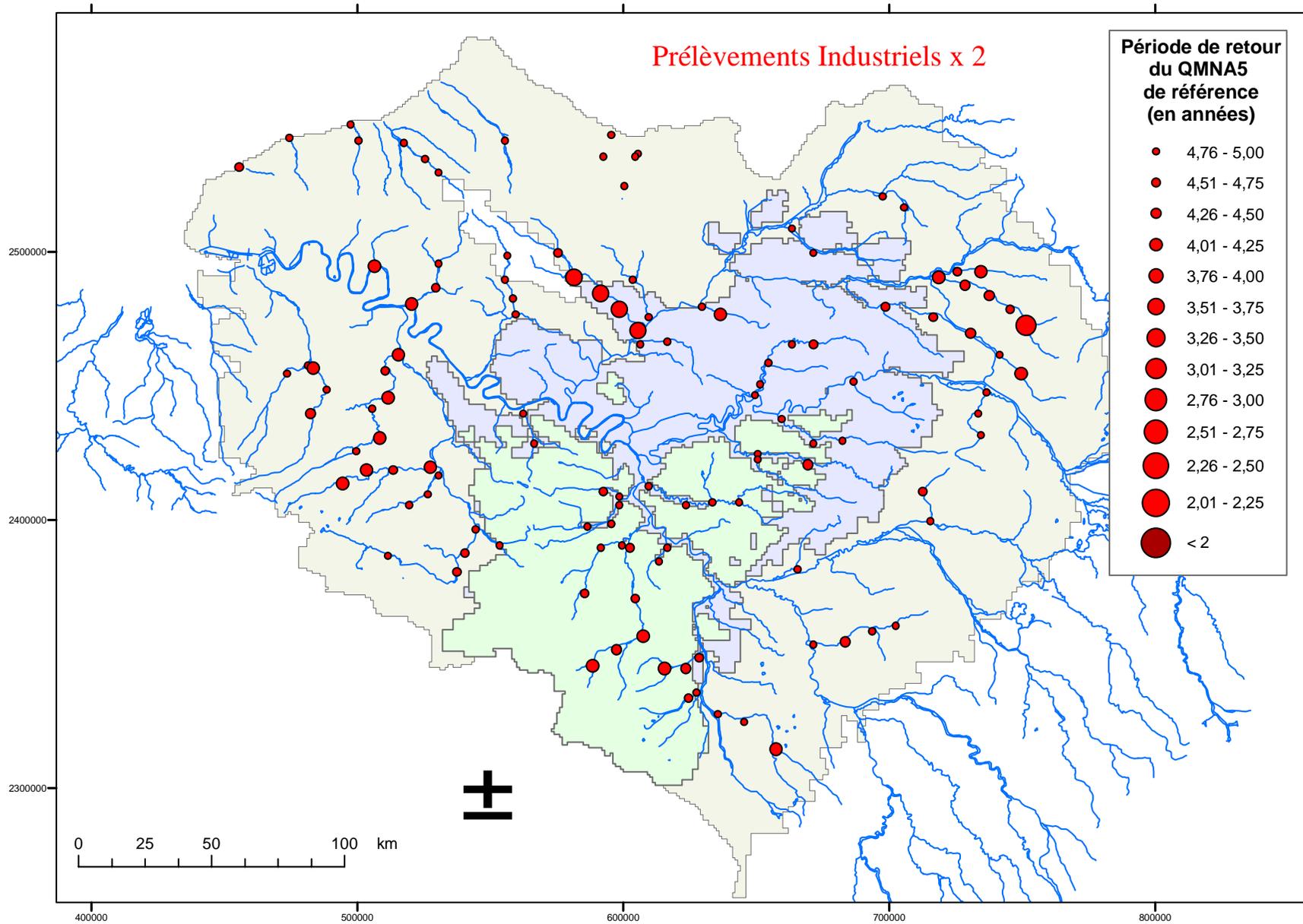


Figure 78 : période de retour du QMNA5 initial : prélèvements industriels doublés

Evolutions piézométriques calculées sur douze piézomètres répartis sur le bassin

Simulations en régime transitoire sur 15 ans successifs d'année moyenne et trois ans de climat sévère



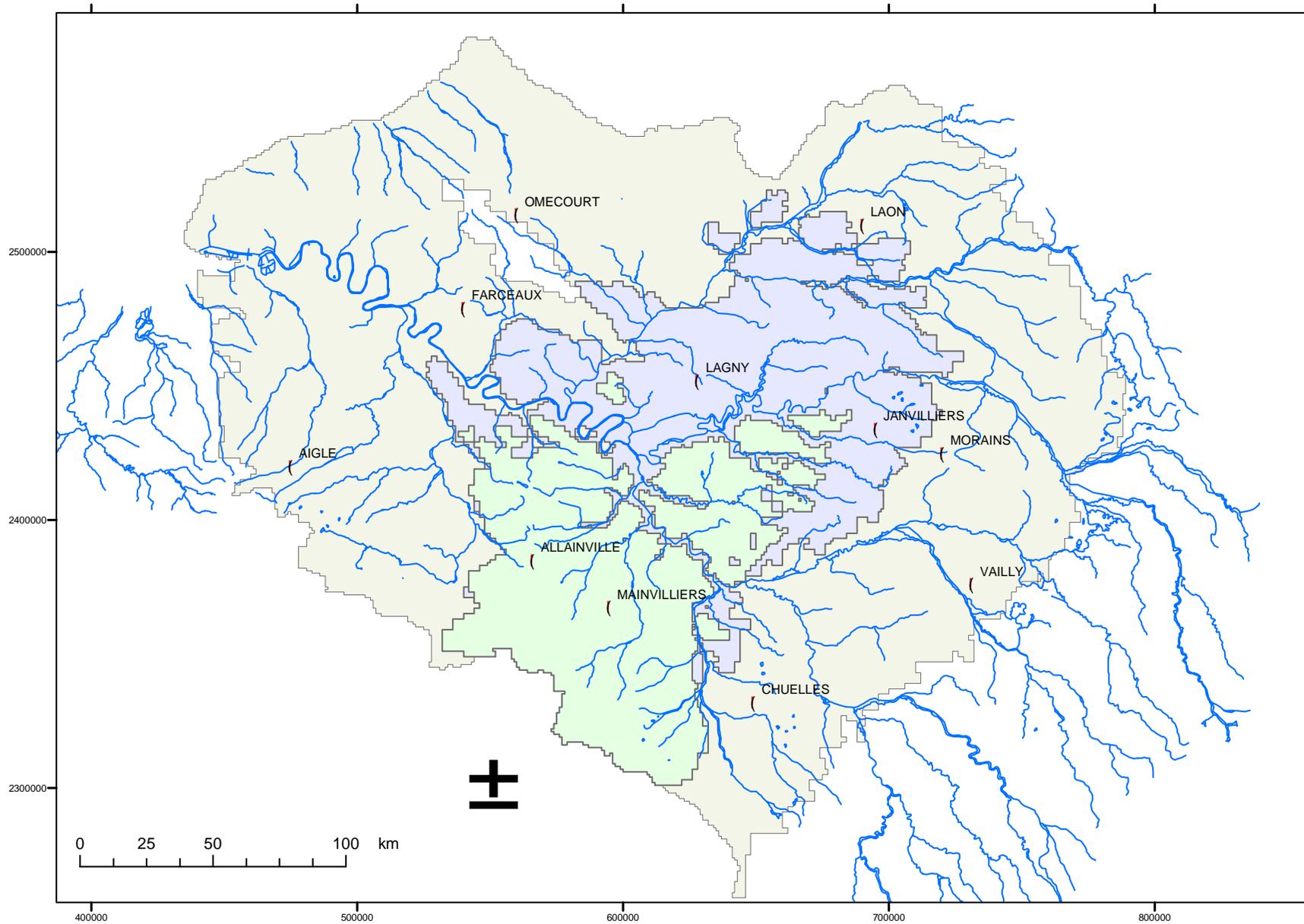


Figure 79 : situation géographique des piézomètres retenus

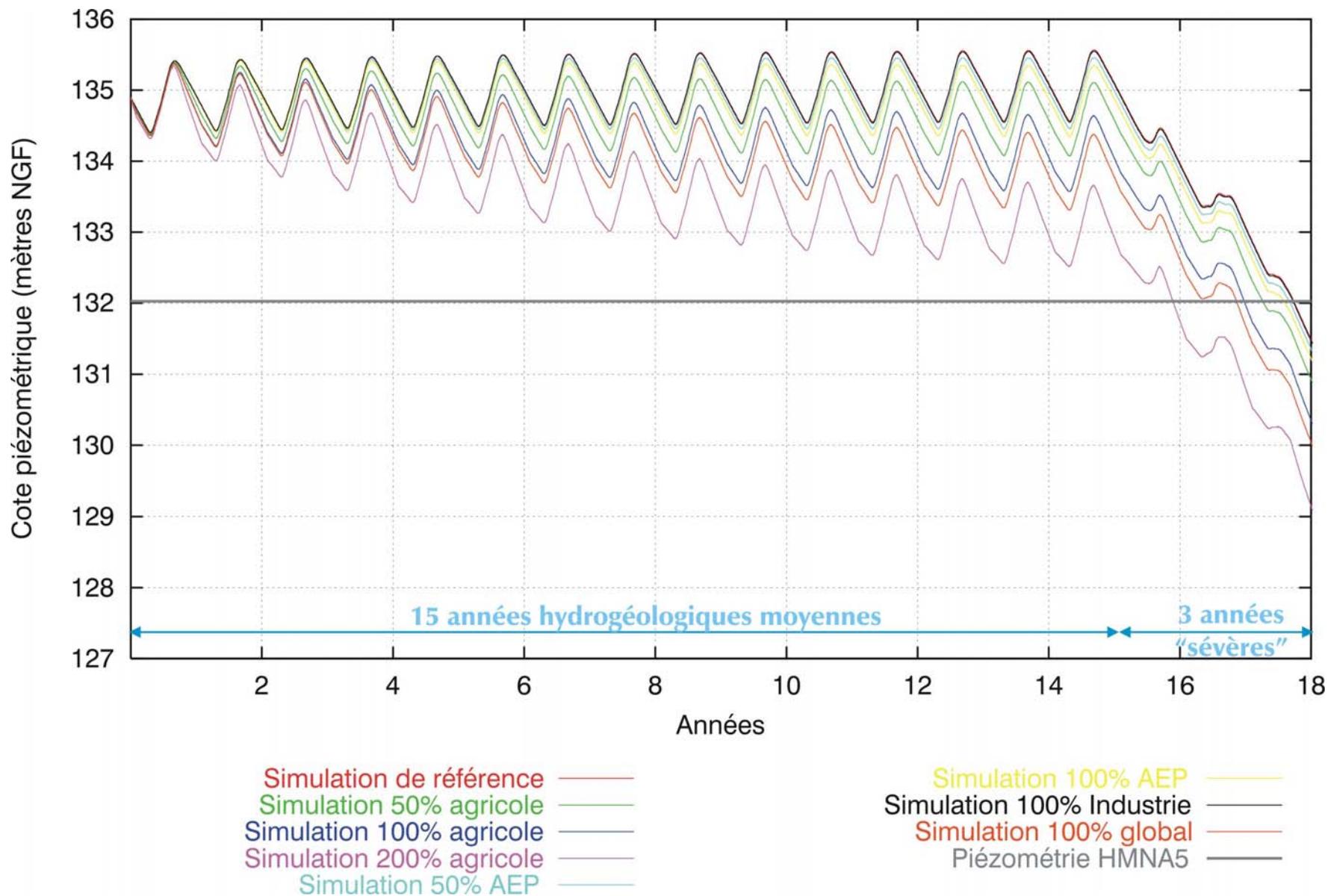


Figure 80 : évolution piézométrique calculée au piézomètre d'Allainville - formation Oligocène

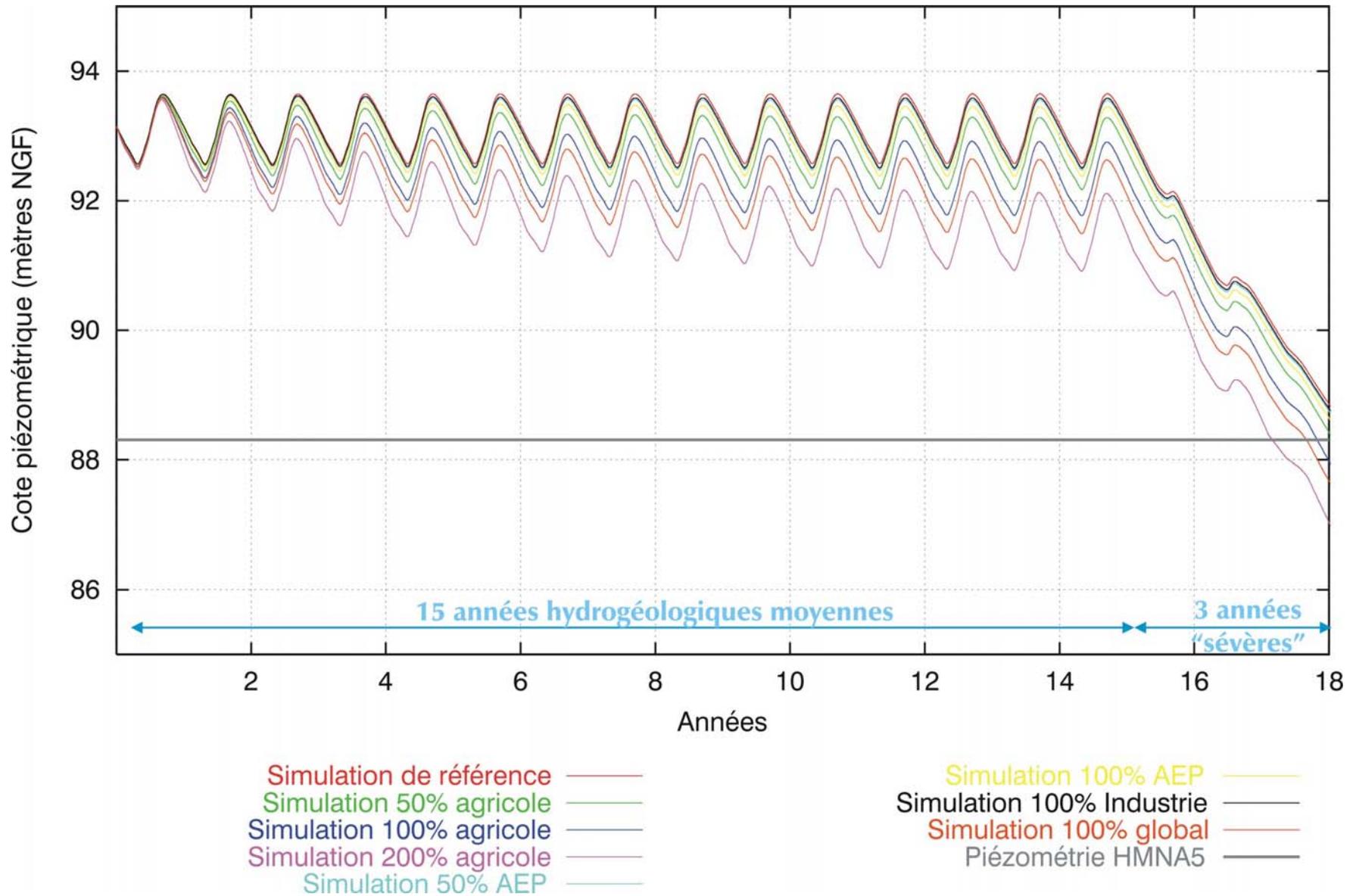


Figure 81 : évolution piézométrique calculée au piézomètre de Mainvilliers - formation Oligocène

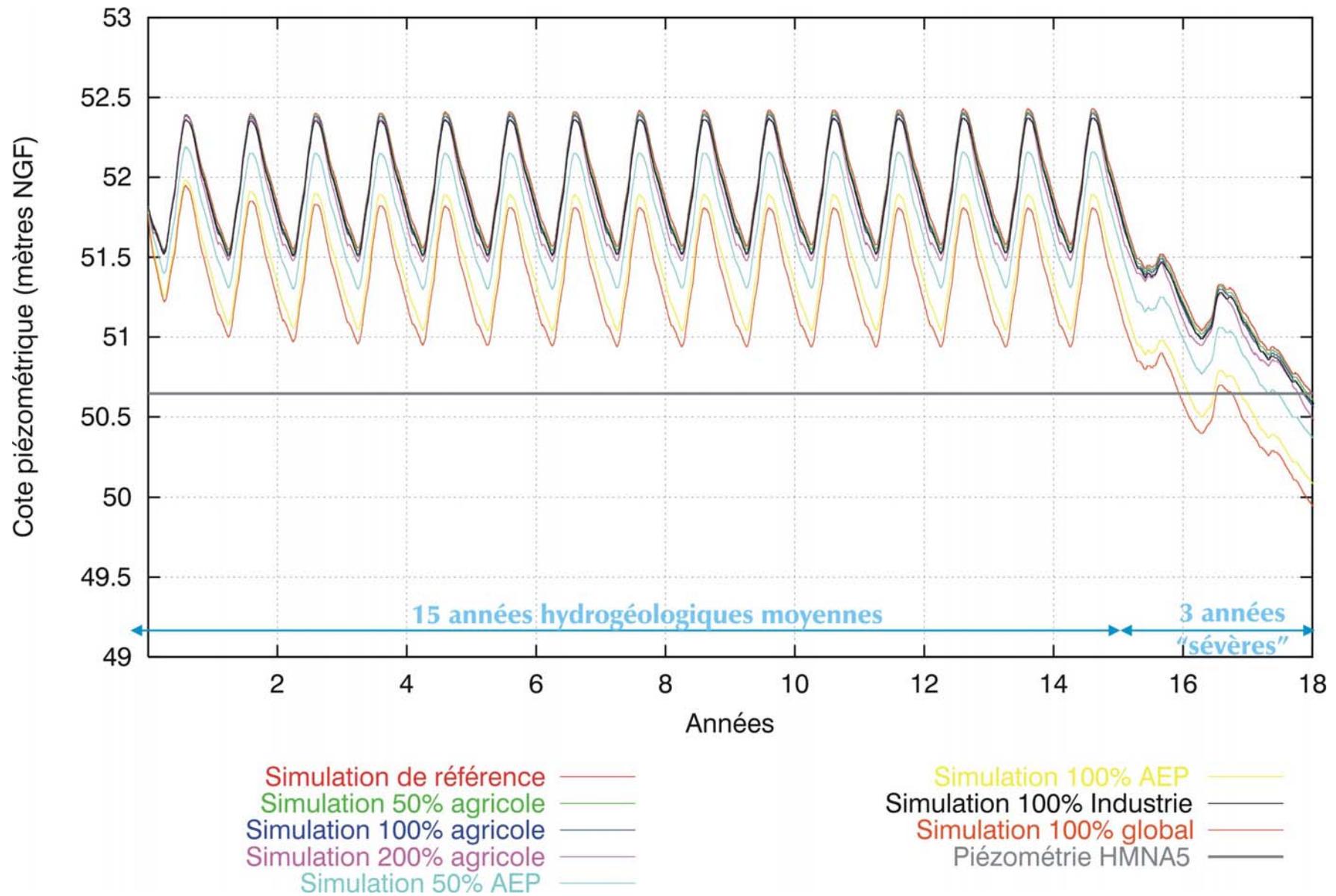


Figure 82 : évolution piézométrique calculée au piézomètre de Ferolles - formation Eocène

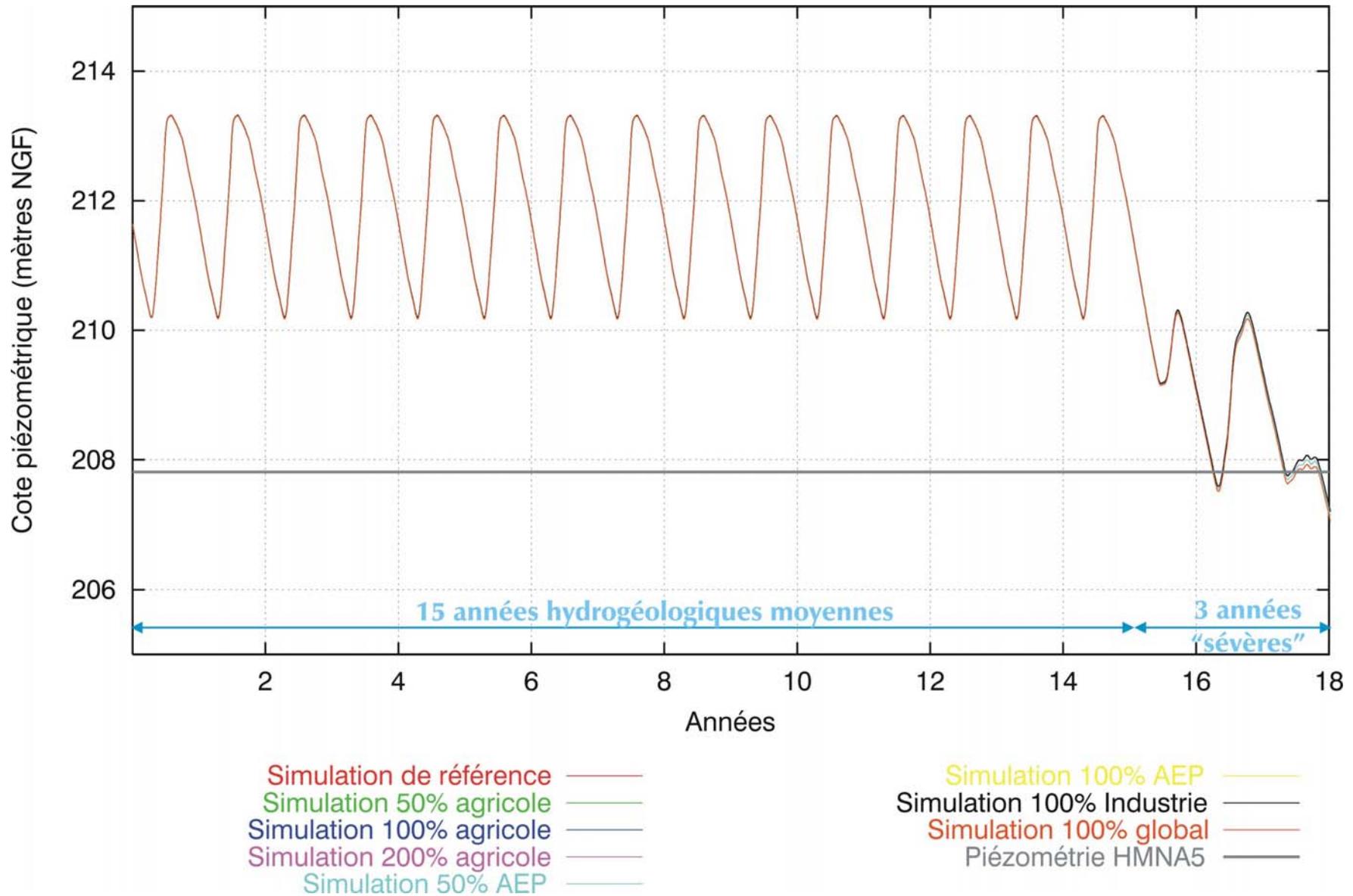


Figure 83 : évolution piézométrique calculée au piézomètre de Janvilliers - formation Eocène

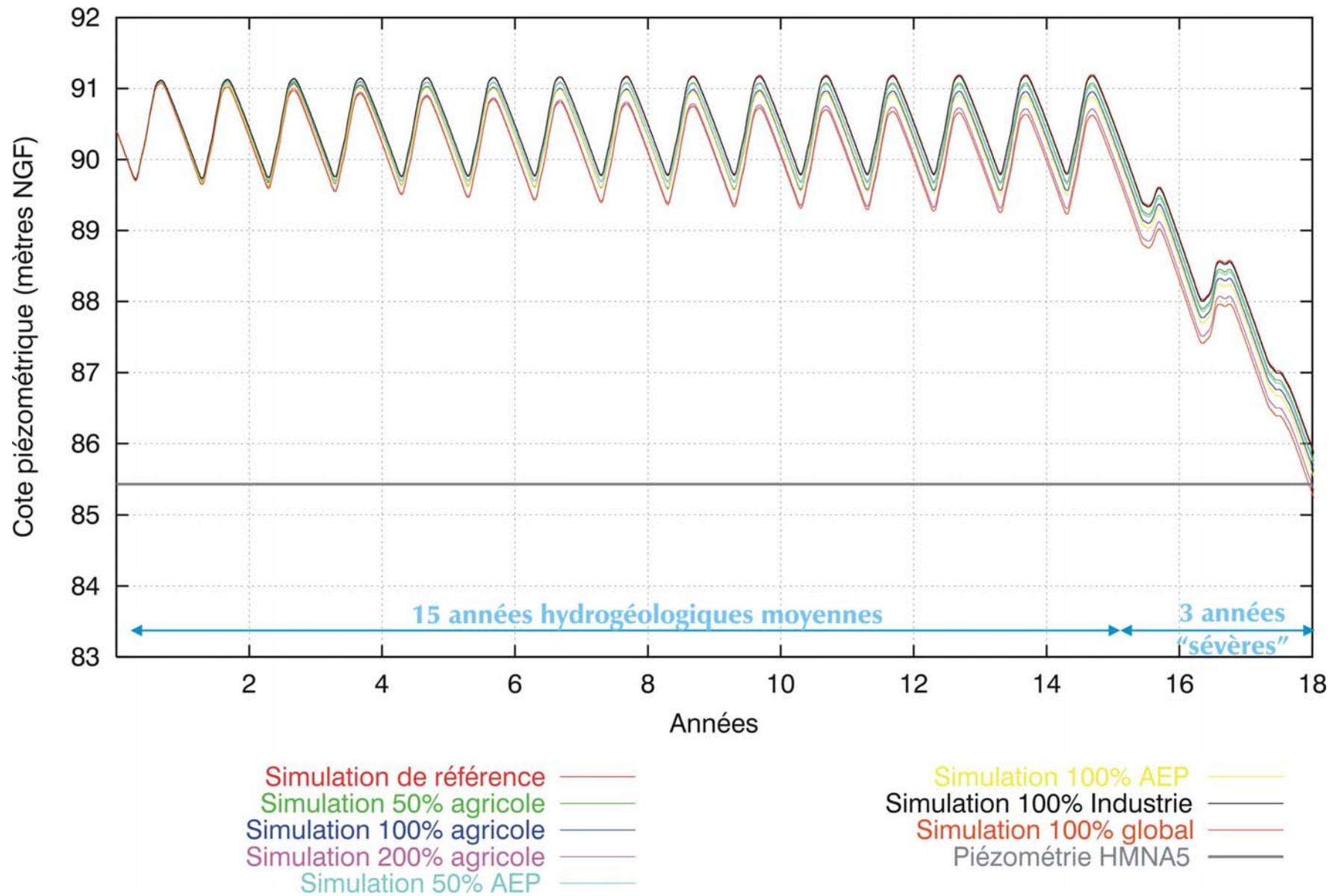


Figure 84 : évolution piézométrique calculée au piézomètre de Lagny - formation Eocène

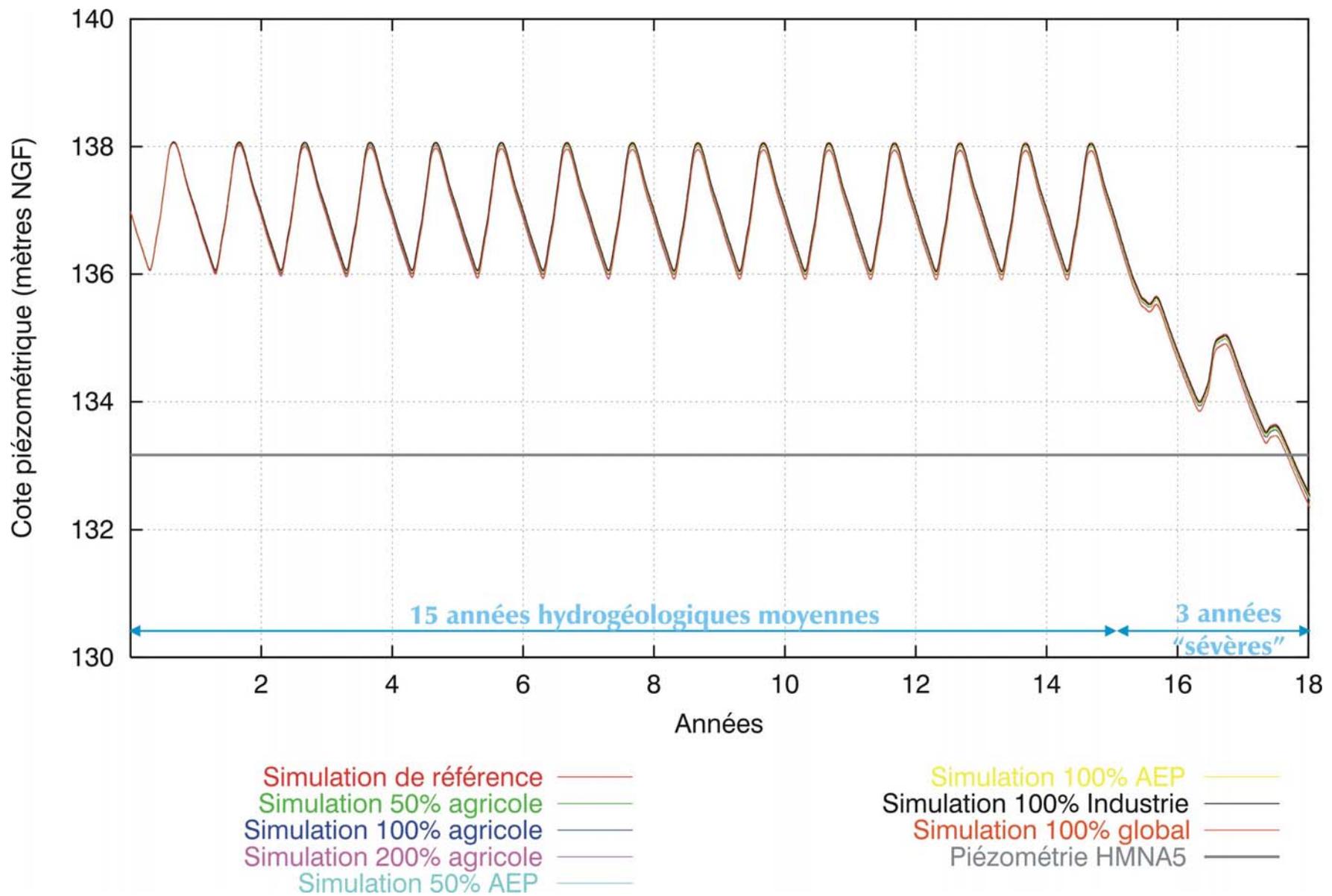


Figure 85 : évolution piézométrique calculée au piézomètre de Chuelles - formation de la Craie

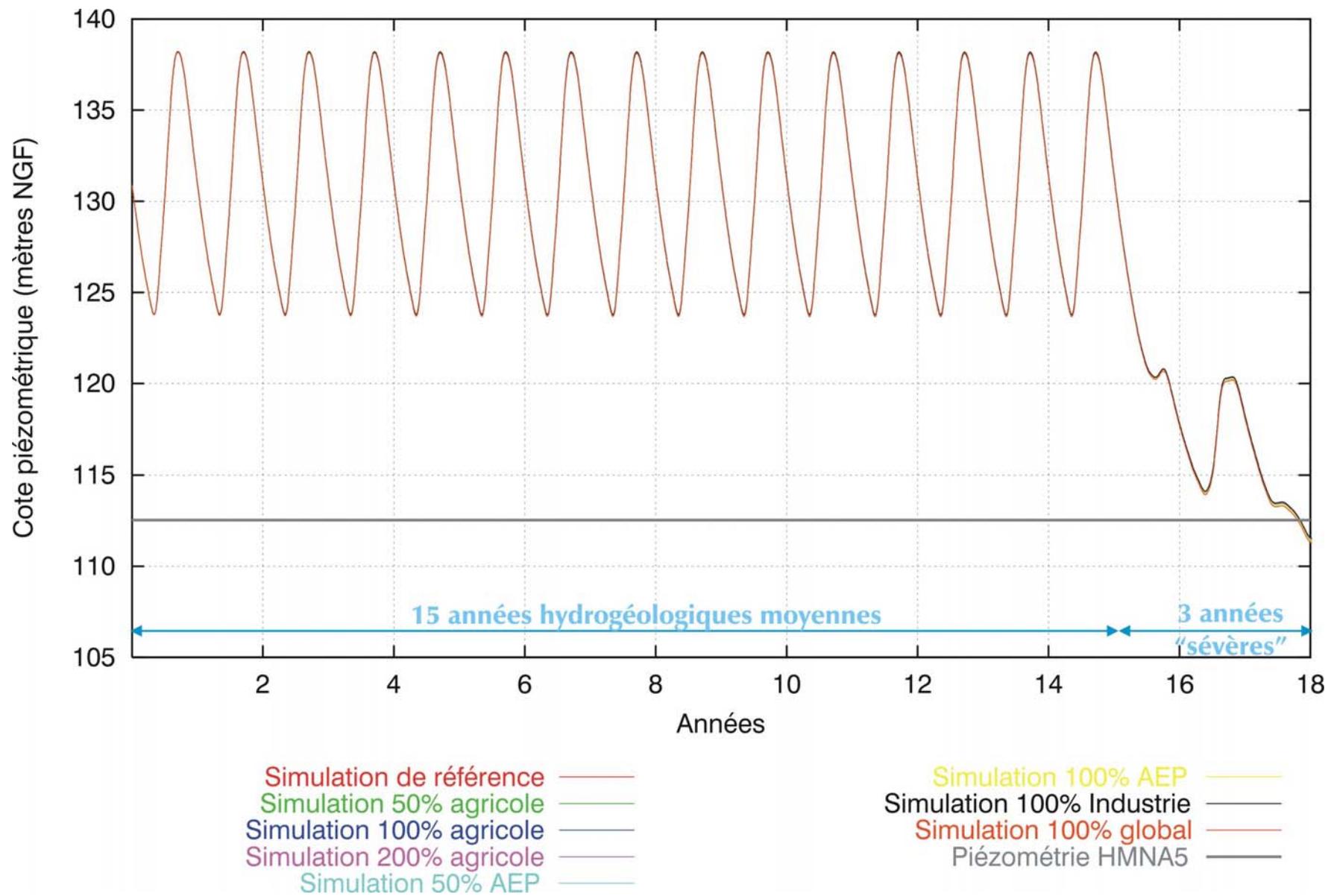


Figure 86 : évolution piézométrique calculée au piézomètre de Vailly - formation de la Craie

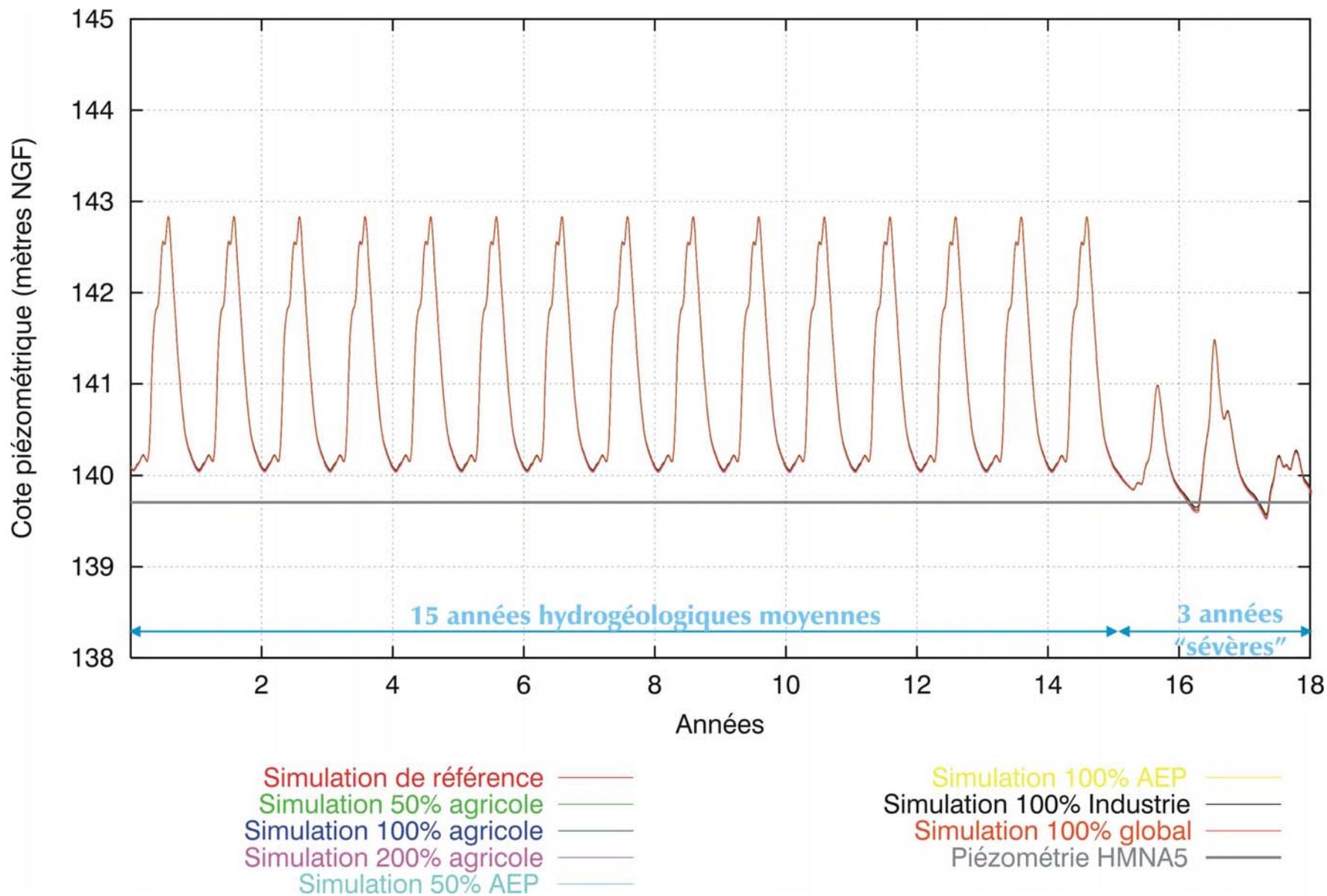


Figure 87 : évolution piézométrique calculée au piézomètre de Morains - formation de la Craie

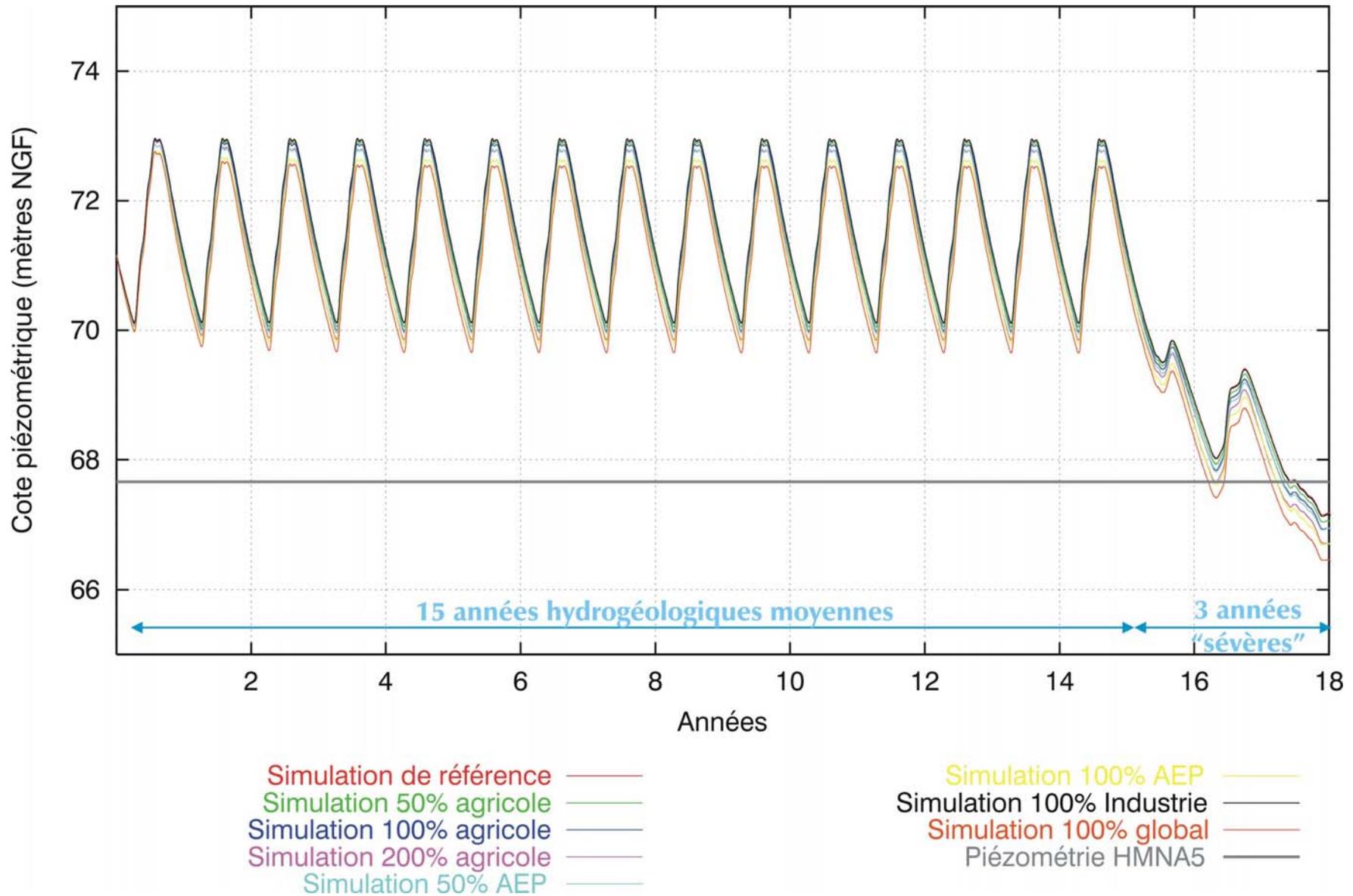


Figure 88 : évolution piézométrique calculée au piézomètre de Laon - formation de la Craie

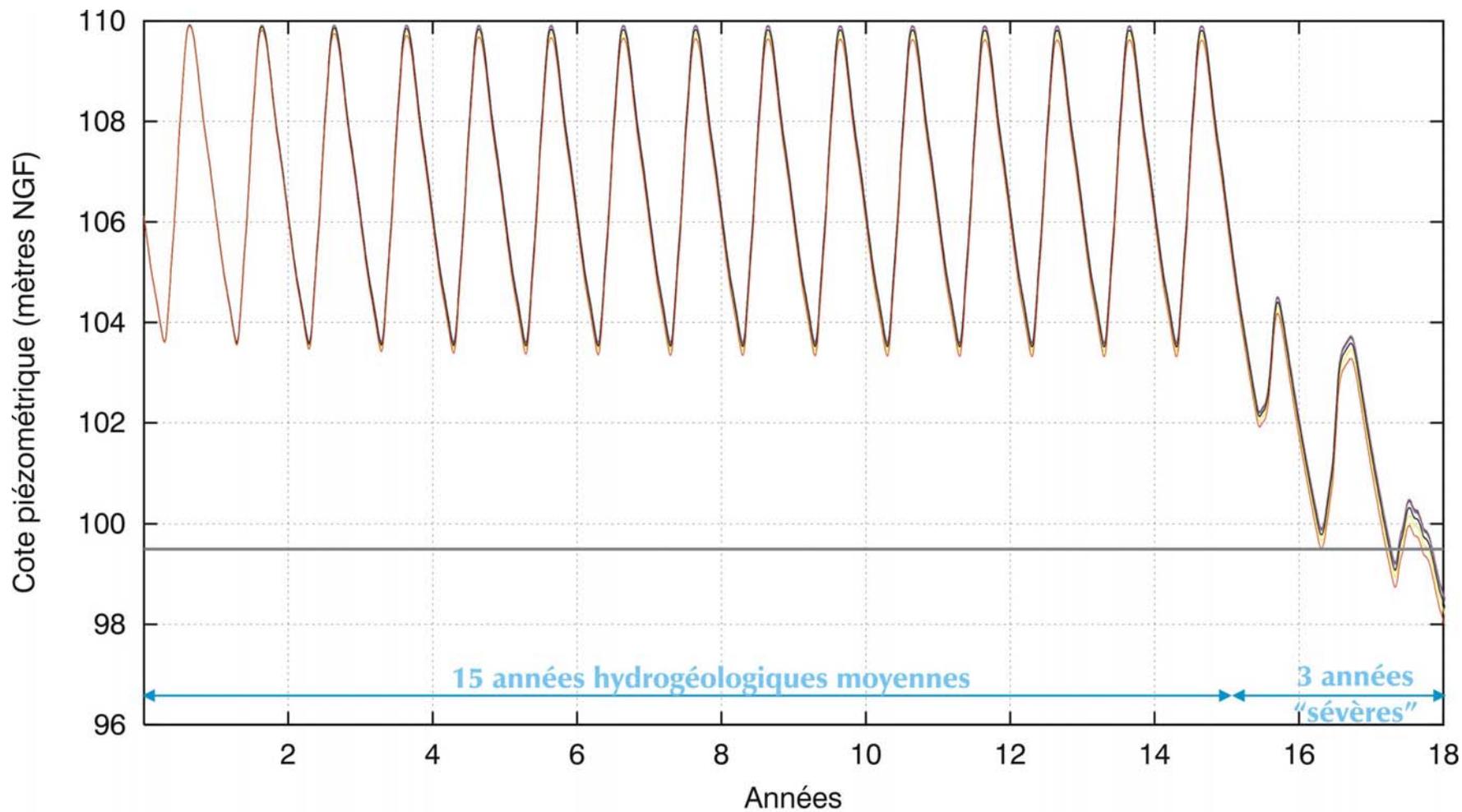


Figure 89 : évolution piézométrique calculée au piézomètre de Farceaux - formation de la Craie

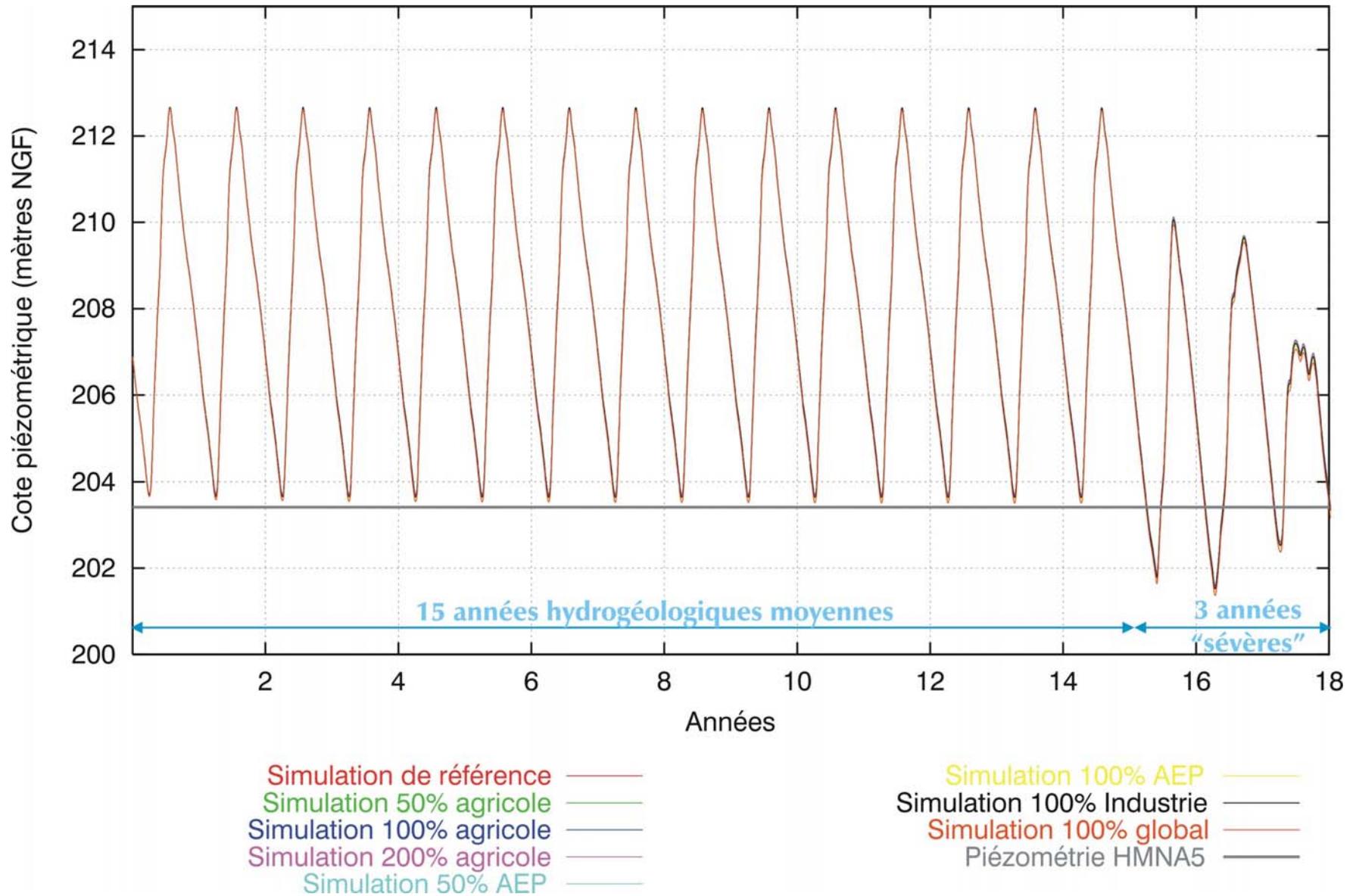


Figure 90 : évolution piézométrique calculée au piézomètre d'Aigle - formation de la Craie

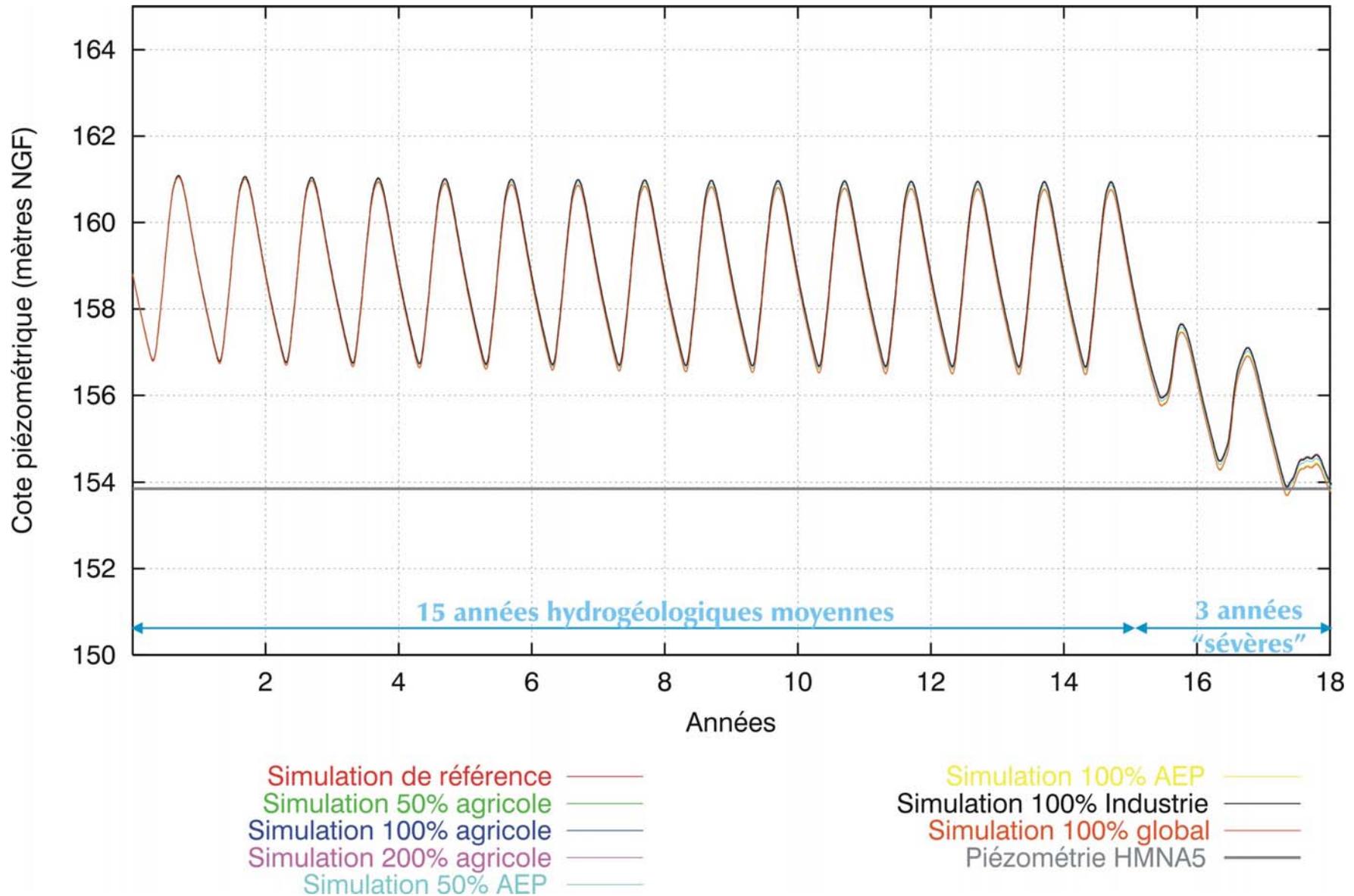


Figure 91 : évolution piézométrique calculée au piézomètre d'Omecourt - formation de la Craie

Evolutions piézométriques calculées sur douze piézomètres répartis sur le bassin

-oOo-

**Simulations en régime transitoire sur trois années hydrogéologiques « sévères »
(01/08/89 – 31/07/92)**



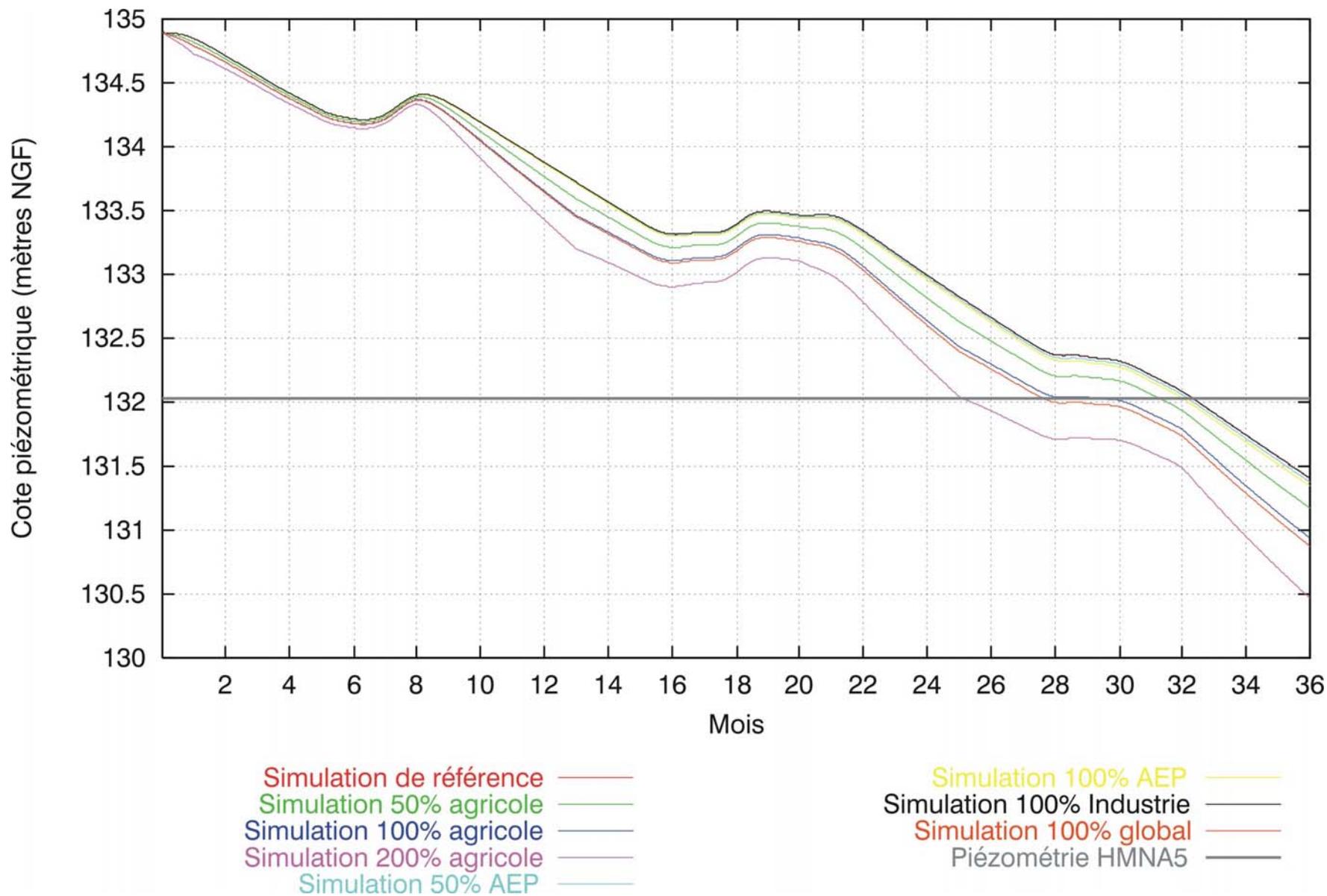


Figure 92 : évolution piézométrique calculée sur trois années climatiques « sévères » au piézomètre d'Allainville - formation de l'Oligocène

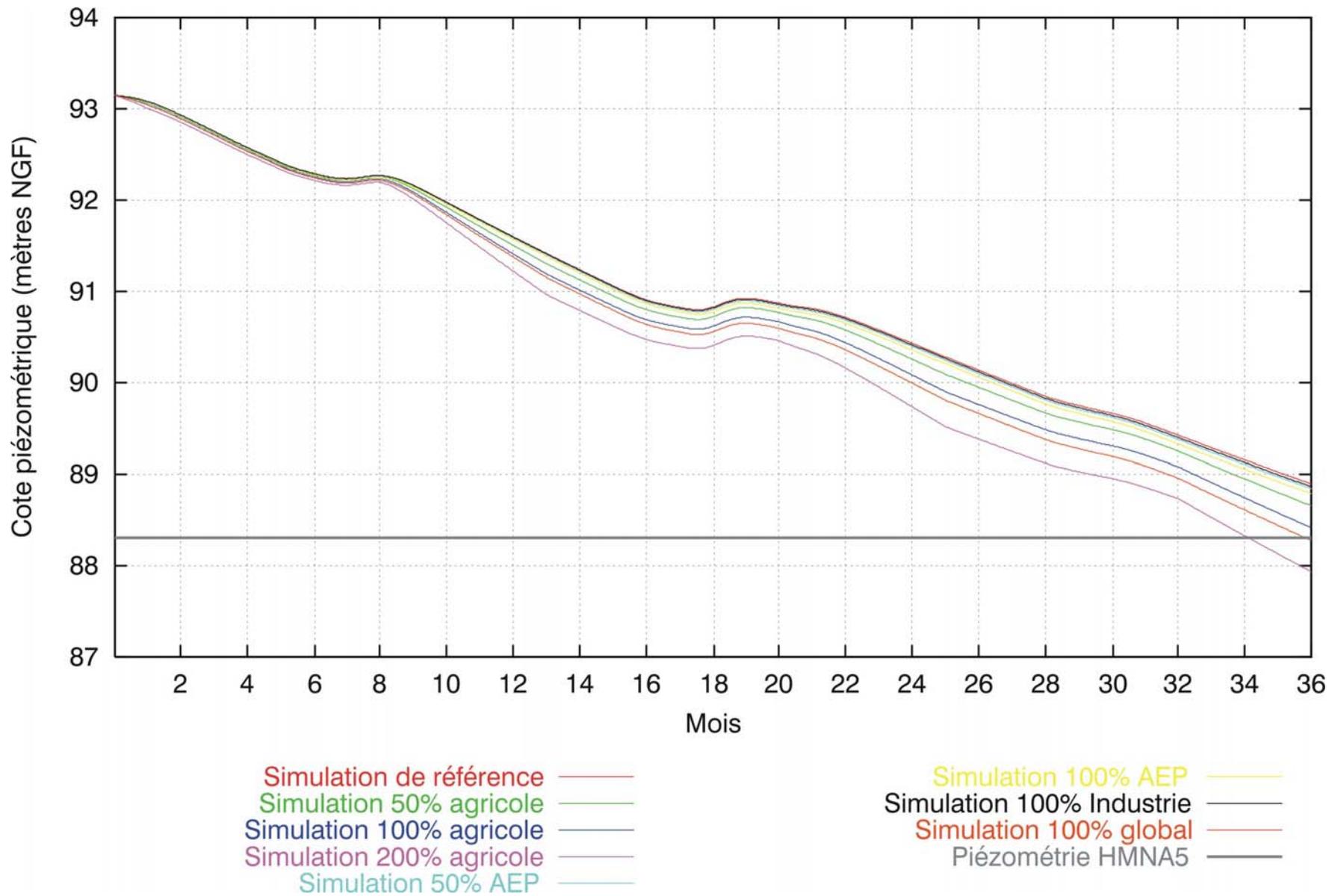


Figure 93 : évolution piézométrique calculée sur trois années climatiques « sévères » au piézomètre de Mainvilliers - formation de l'Oligocène

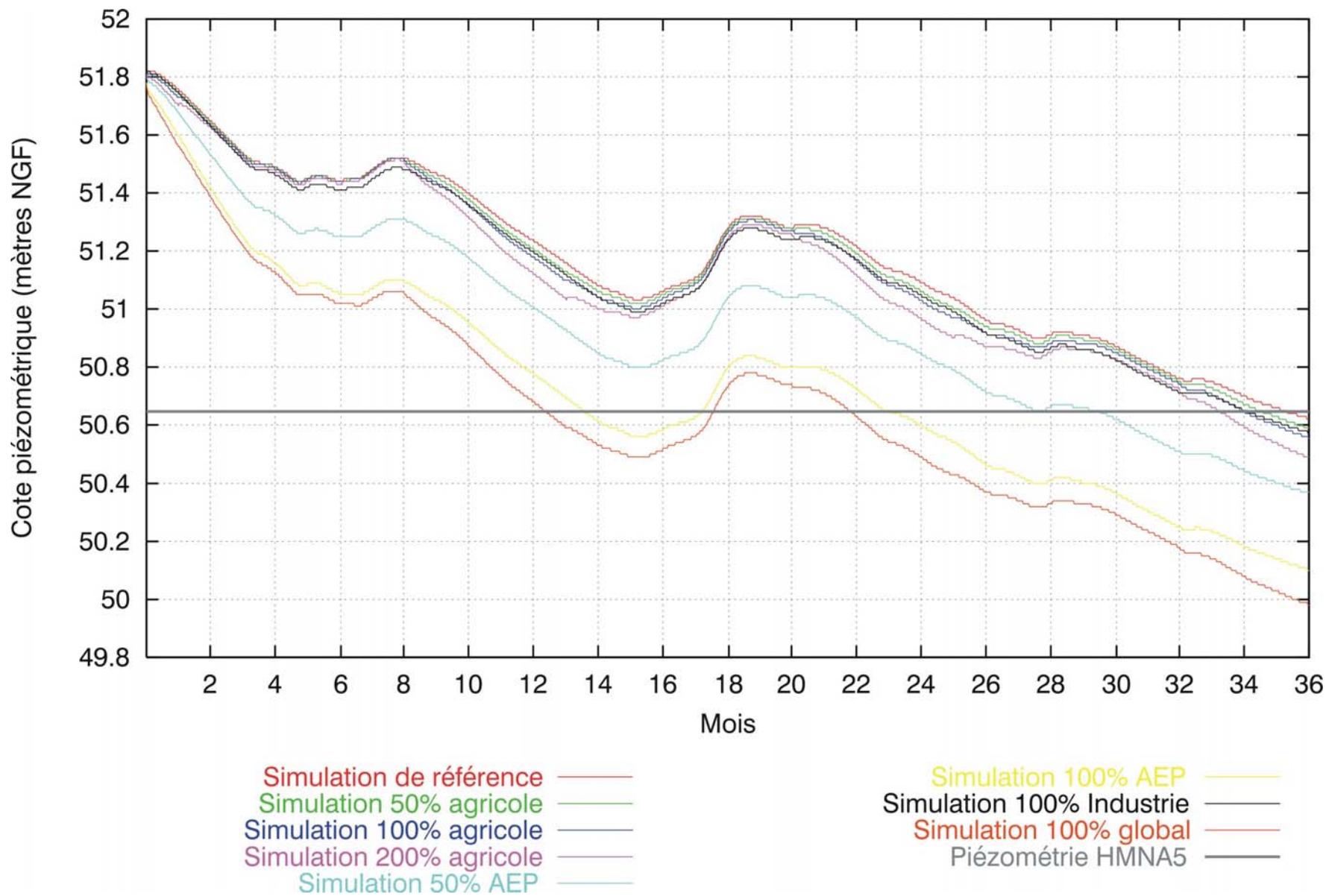


Figure 94 : évolution piézométrique calculée sur trois années climatiques « sévères » au piézomètre de Férolles - formation de l'Eocène

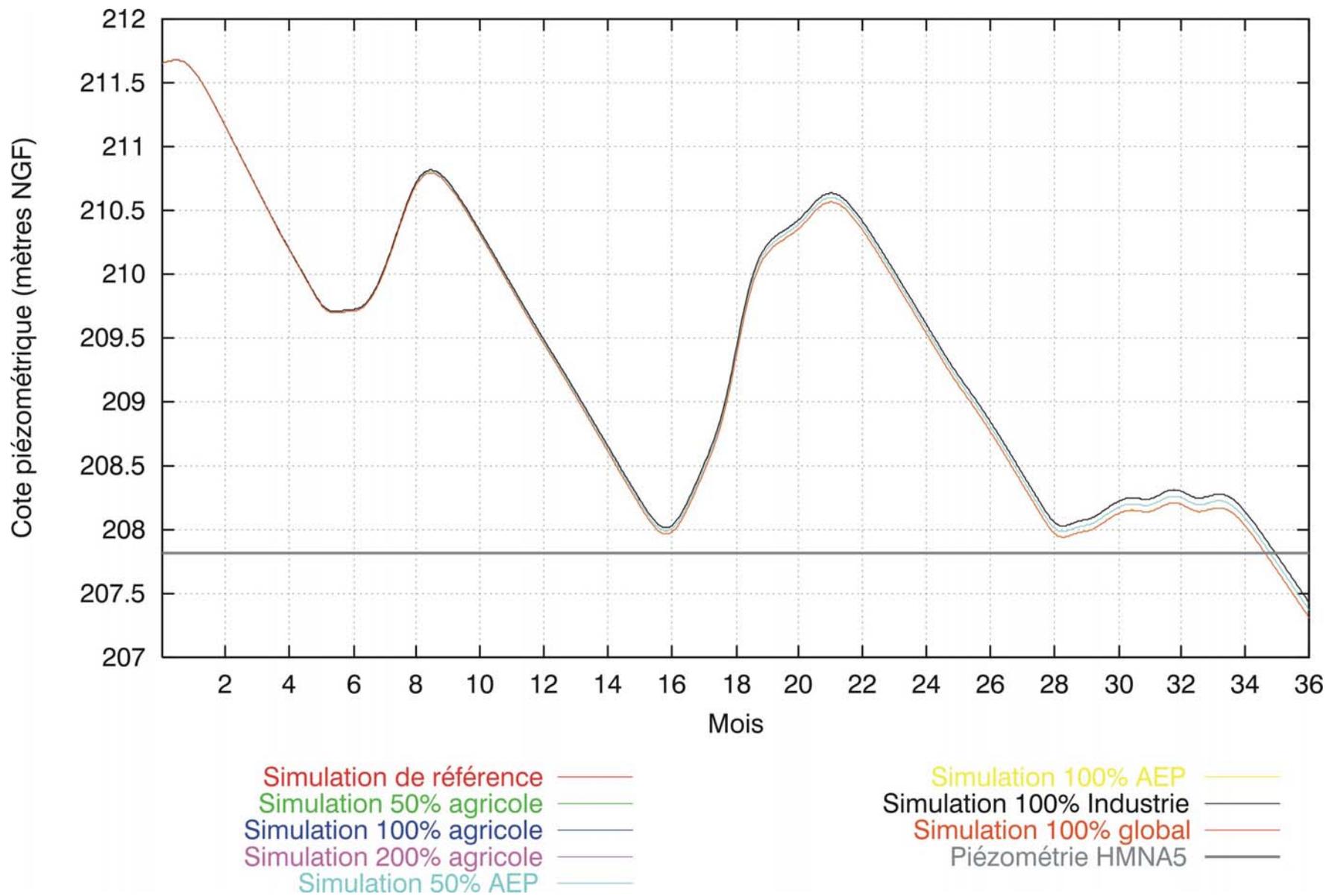


Figure 95 : évolution piézométrique calculée sur trois années climatiques « sévères » au piézomètre de Janvilliers - formation de l'Eocène

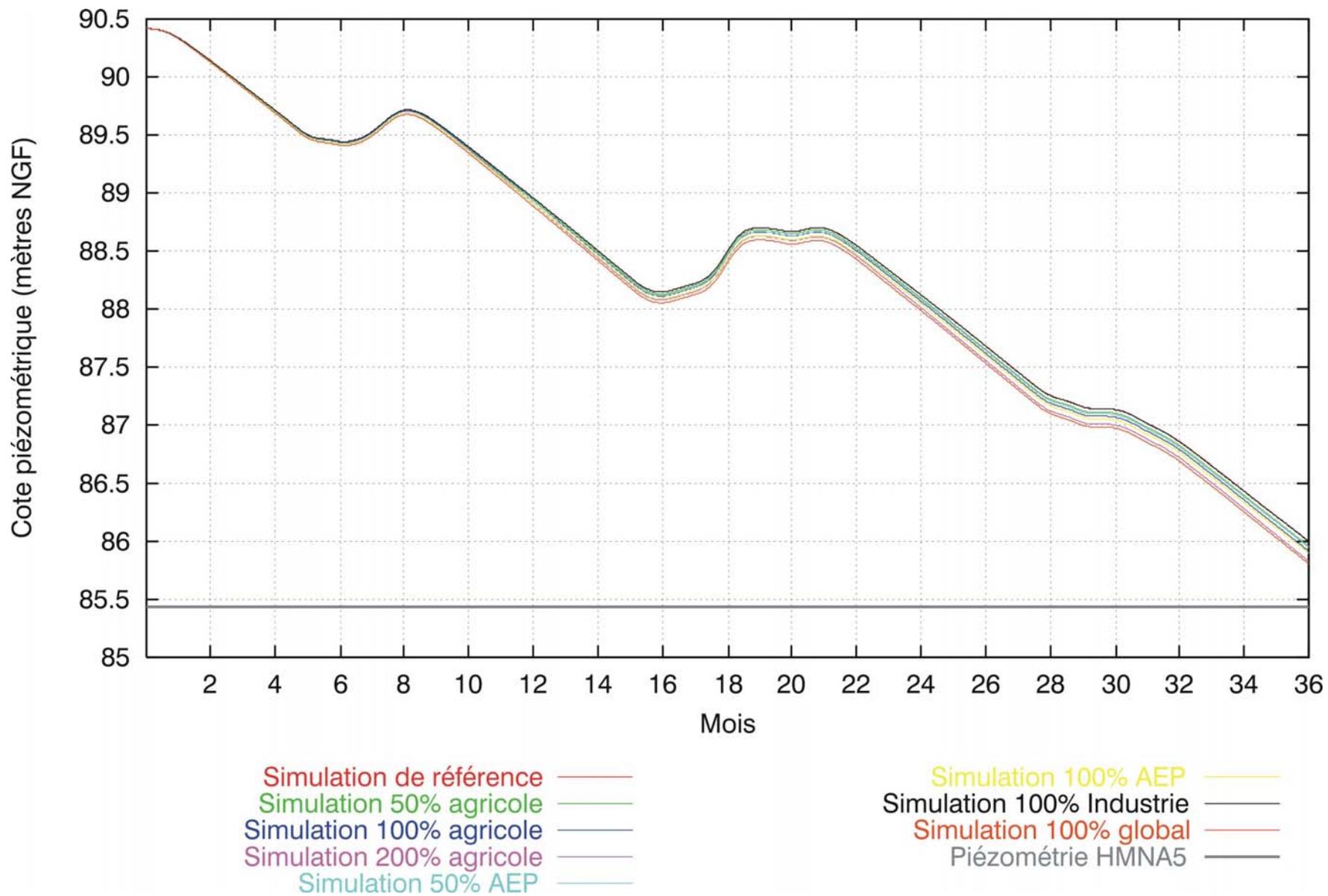


Figure 96 : évolution piézométrique calculée sur trois années climatiques « sévères » au piézomètre de Lagny - formation de l'Eocène

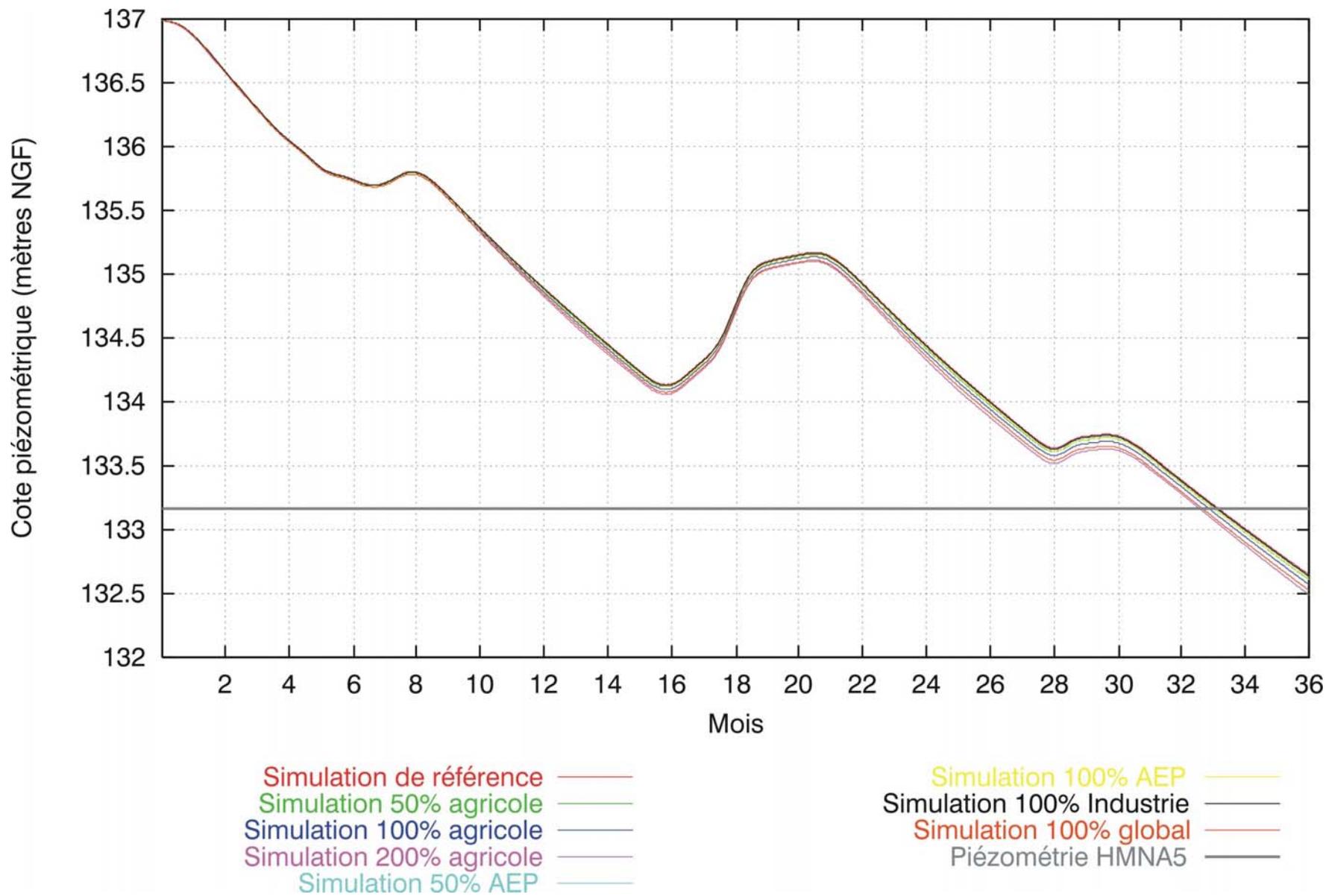


Figure 97 : évolution piézométrique calculée sur trois années climatiques « sévères » au piézomètre de Chuelles - formation de la Craie

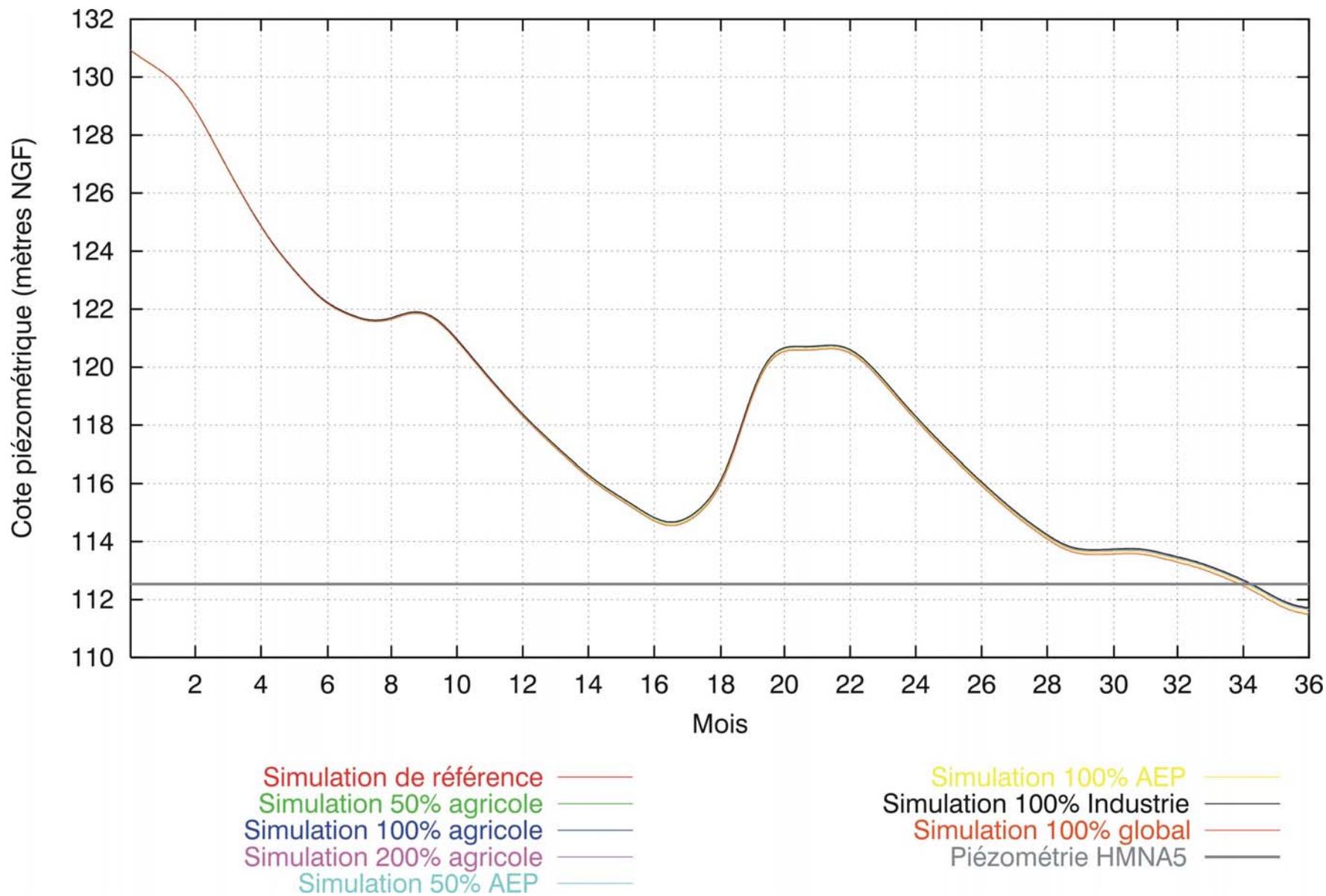


Figure 98 : évolution piézométrique calculée sur trois années climatiques « sévères » au piézomètre de Vailly - formation de la Craie

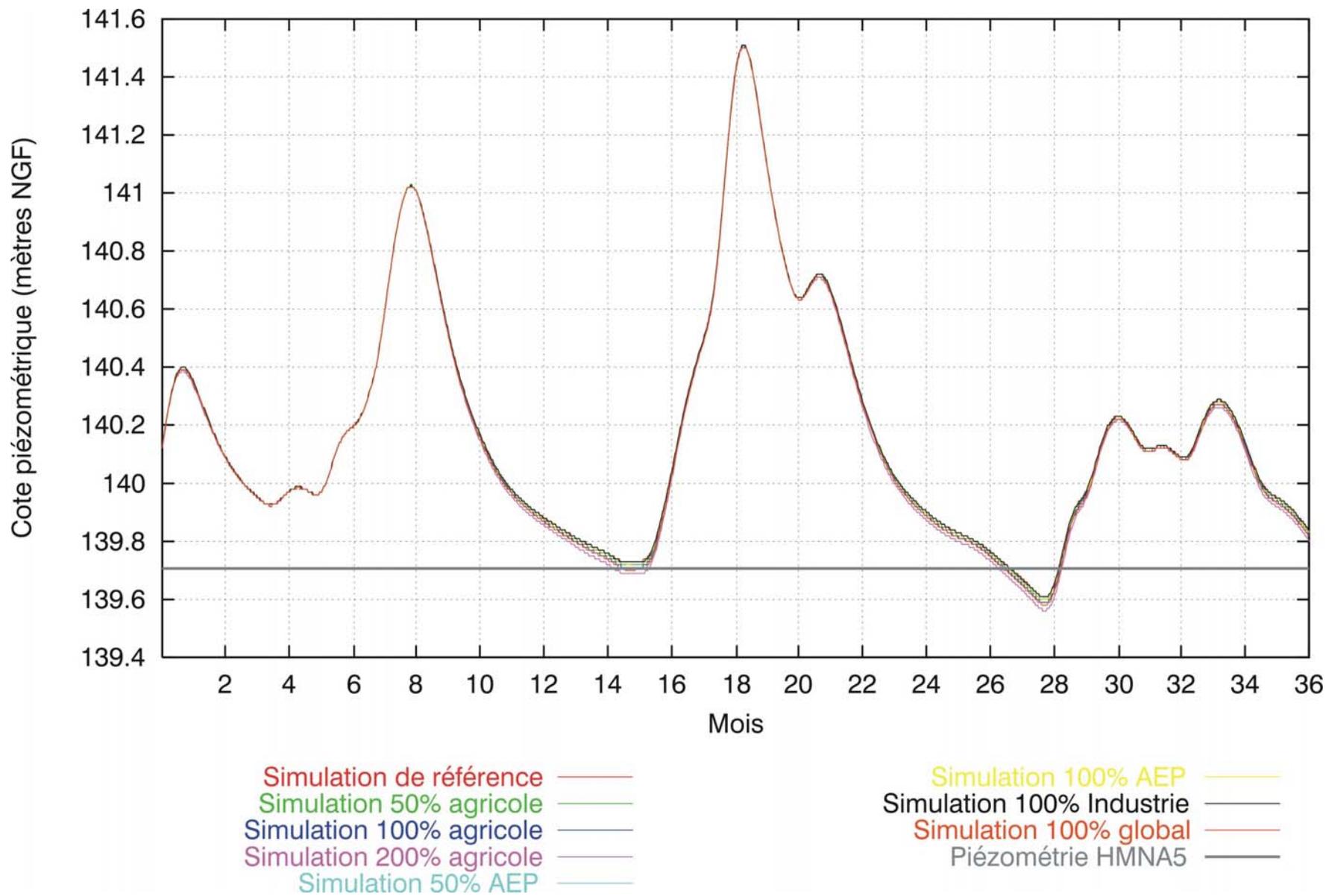


Figure 99 : évolution piézométrique calculée sur trois années climatiques « sévères » au piézomètre de Morains - formation de la Craie

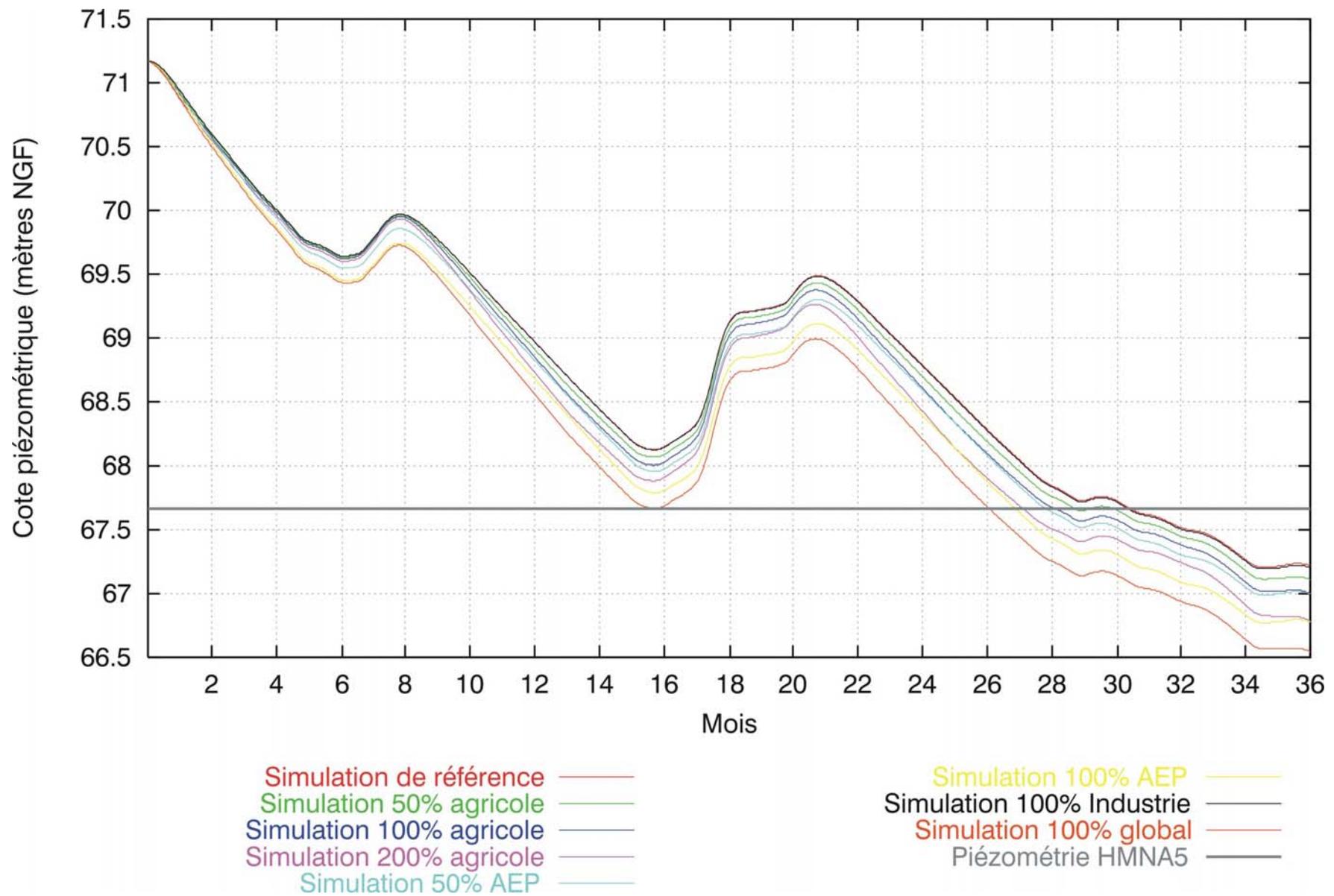


Figure 100 : évolution piézométrique calculée sur trois années climatiques « sévères » au piézomètre de Laon - formation de la Craie

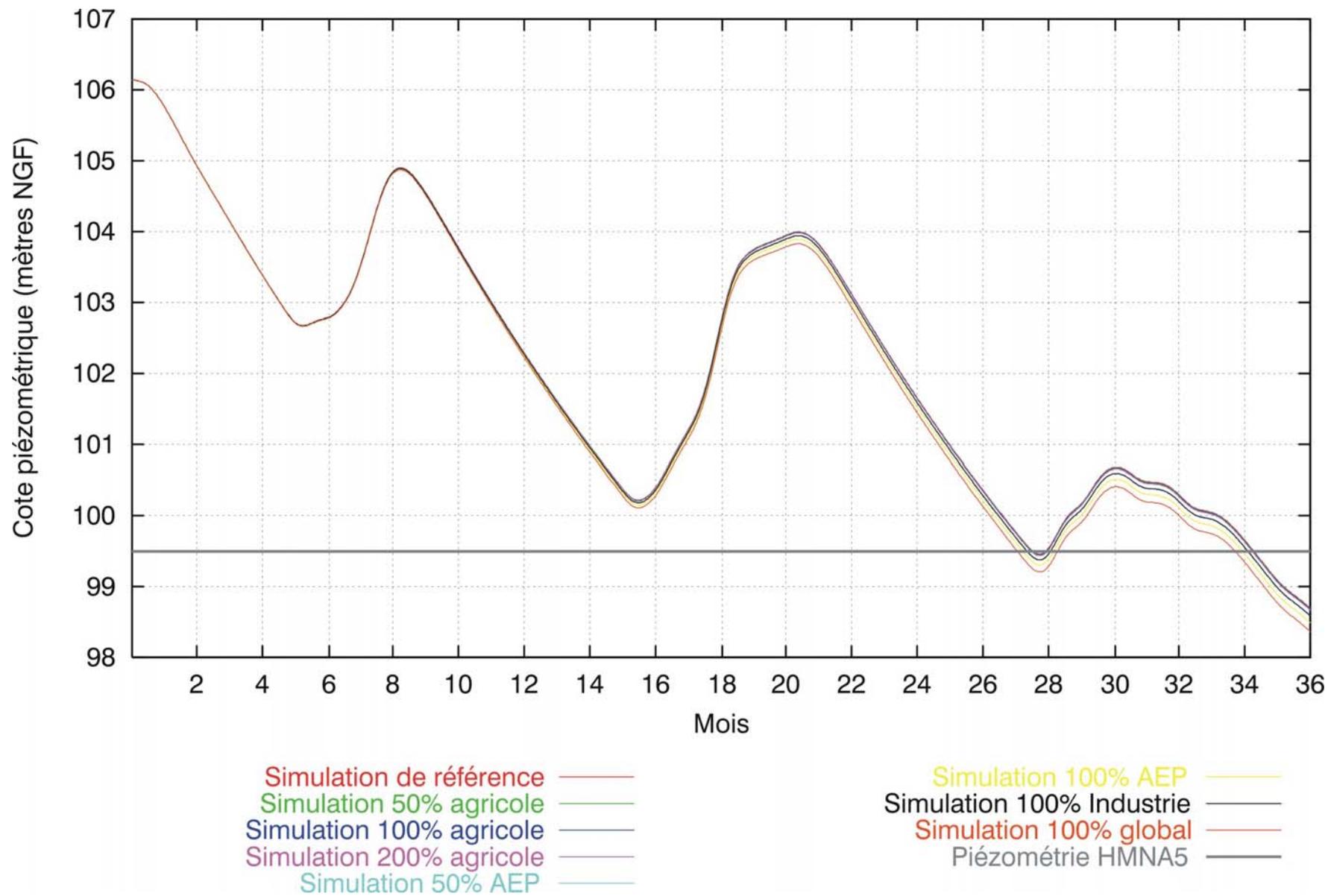


Figure 101 : évolution piézométrique calculée sur trois années climatiques « sévères » au piézomètre de Farceaux - formation de la Craie

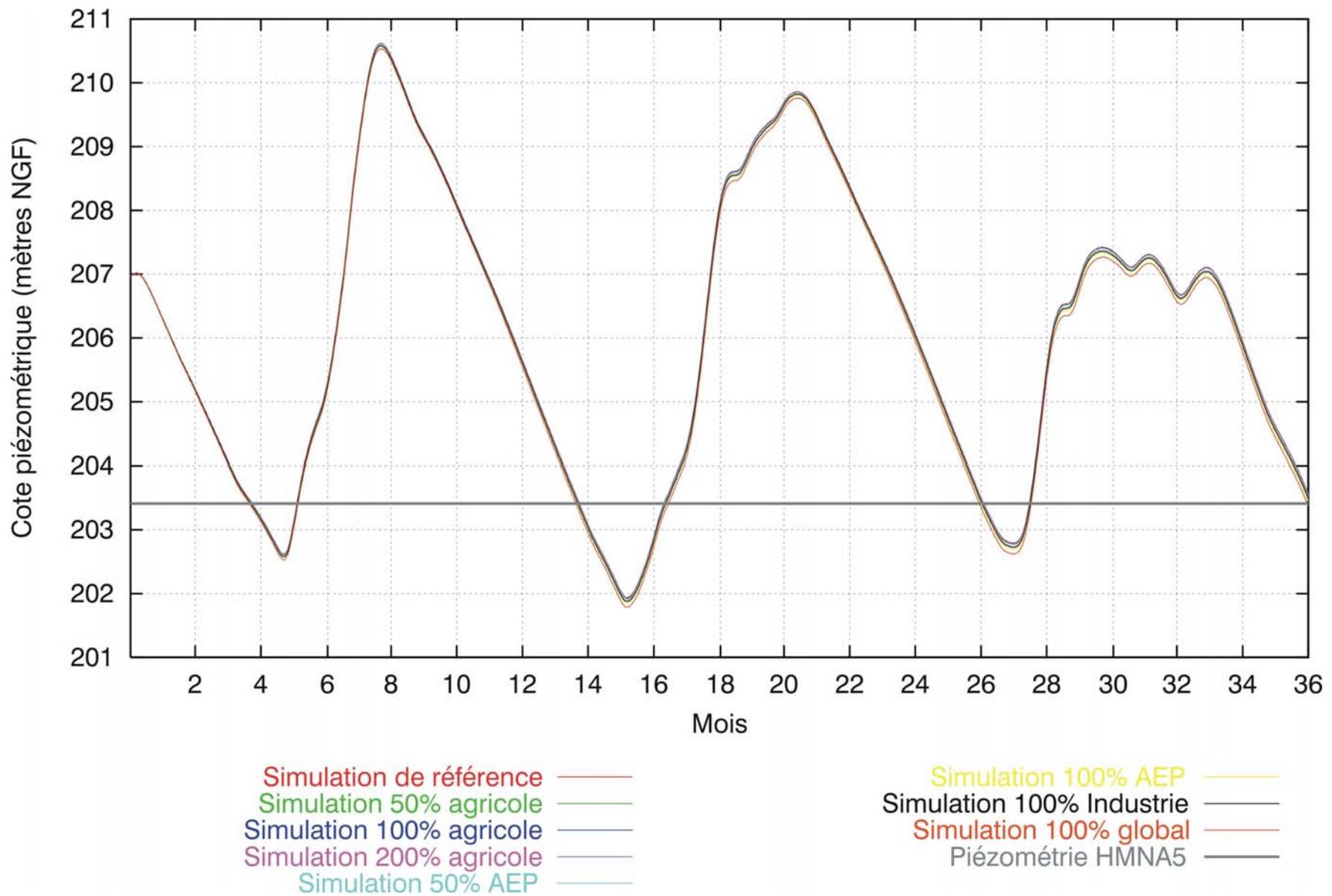


Figure 102 : évolution piézométrique calculée sur trois années climatiques « sévères » au piézomètre d'Aigles - formation de la Craie