Influence d'une irrigation généralisée sur les ressources en eau du bassin de la Seine

Pascal VIENNOT et Emmanuel LEDOUX

Centre de Géosciences, Ecole des mines de Paris, 35 rue Saint Honoré, 77305 FONTAINEBLEAU Cedex – *Pascal.Viennot@ensmp.fr*

Influence d'une irrigation généralisée sur les ressources en eau du bassin de la Seine 1
1. Présentation générale de la chaîne de modélisation STICS-MODCOU 2
1.1. Représentation schématique des couplages STICS-MODCOU-NEWSAM. 3
1.2. Description générale du modèle STICS 4
1.3. Spatialisation de STICS en interface de MODCOU 5
1.4. Pratiques agricoles sur le bassin de la Seine : regroupement en zones homogènes 6
2. Prise en compte de l'irrigation dans la chaîne de modélisation STICS-MODCOU..... 8
2.1. Principes généraux 8
2.2. Application au bassin de la Seine..... 9
2.2.1 Doses d'irrigation calculées 9
2.2.2 Impact sur la ressource en eau..... 14
2.2.3 Impact sur les rendements moyens des cultures..... 18
3. Perspectives..... 19
4. Bibliographie..... 19

L'irrigation est devenue la tendance la plus lourde de l'agriculture depuis la fin du siècle dernier. En effet, entre 1988 et 1995, la surface totale irriguée en France est passée de 1,15 à 1,65 millions d'hectares, soit une augmentation moyenne annuelle de 5%. Sur le bassin Seine Normandie, les surfaces irriguées représentent environ 110 000 hectares, ce qui reste à ce jour relativement faible, mais les politiques agricoles (la PAC assure par exemple une surprime aux surfaces irriguées pour compenser la lourdeur des investissements) devraient continuer à inciter à produire plus sur un minimum de surface et donc à forcer la nature. L'irrigation est devenue un facteur de production dont les coûts monétaires doivent être compensées par un accroissement de la valeur de production et se traduire, pour l'exploitation, par une augmentation de la marge nette. De plus, l'irrigation peut devenir un facteur de sécurité en permettant de rendre l'agriculture moins vulnérable aux aléas climatiques (les différentes sécheresses pluriannuelles observées au cours de ces deux dernières décennies ou l'augmentation des sécheresses estivales telle que le prévoit l'étude du changement climatique en sont un bon exemple). Enfin, l'irrigation permet une bonne maîtrise de la production en quantité et en qualité, ce qui devient l'une des conditions essentielle de contractualisation de l'agriculteur avec les industries agro-alimentaires ou de semences.

Face au développement des surfaces irriguées du bassin, une question se pose alors : que risquent de devenir les ressources en eau si l'ensemble des agriculteurs se lance dans une irrigation intensive ? Même si cette hypothèse peut paraître tout à fait irréalisable dans son principe (coût d'investissements prohibitifs, ressource non accessible, …), nous avons tout de même cherché à quantifier l'impact sur le bassin (débit des rivières, niveau des nappes) que pourrait avoir une telle politique. Pour ce faire, nous utilisons la chaîne de modélisation STICS-MODCOU (mise en place dans la cadre du PIREN-SEINE (Gomez 2002) pour simuler le fonctionnement hydrodynamique général du bassin et la dynamique des pollutions agricoles azotées) grâce à une fonctionnalité particulière du modèle STICS permettant de calculer à chaque pas de temps de calcul la dose d'irrigation (optimale ou non) à apporter aux cultures pour permettre leur bon développement. Ceci va donc permettre, en première approche, de calculer pour chaque type de culture et sur l'ensemble de la diversité agricole du bassin, les quantités d'eau à prélever dans les formations aquifères sous jacentes et d'en estimer l'impact maximal sur la ressource.

1. Présentation générale de la chaîne de modélisation 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'Éocène 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 et 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 sont pas décrits explicitement par le modè.

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 1.

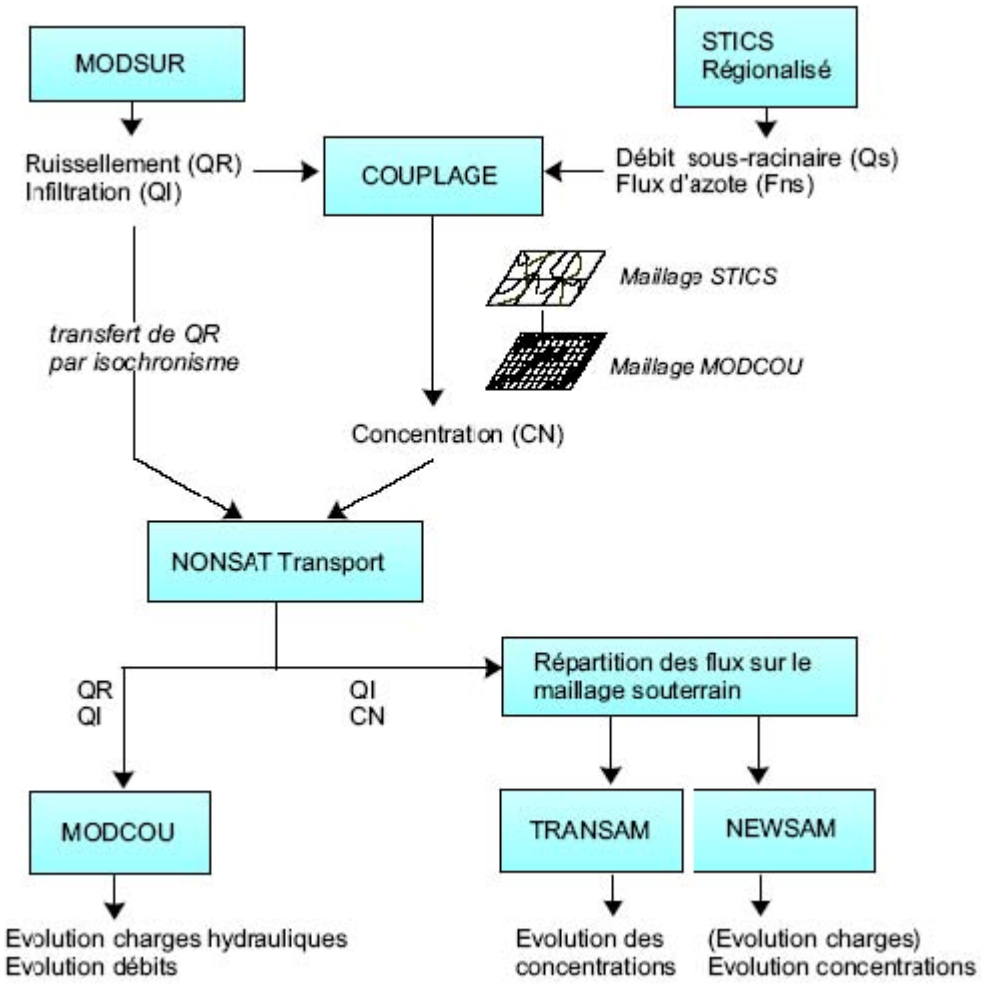

Figure 1: Représentation schématique des couplages STICS-MODCOU-NEWSAM

1.1. 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 2).

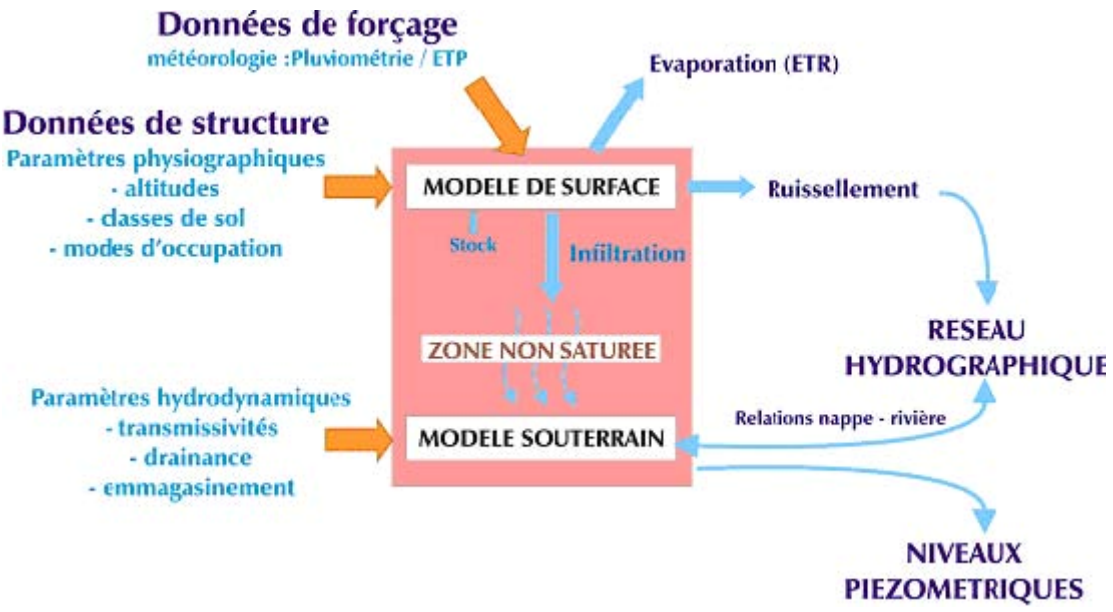

Figure 2: Principe général du modèle hydrogéologique couplé MODCOU

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.

1.2. 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 3) :

- données climatiques : température minimale, maximale, pluviométrie, évapotranspiration potentielle (ETP) et rayonnement global, au pas de temps journalier ;
- 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 physicochimiques (teneurs en argile, en calcaire, en azote organique, albédo, etc..) ;
- 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 ;

- 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..).

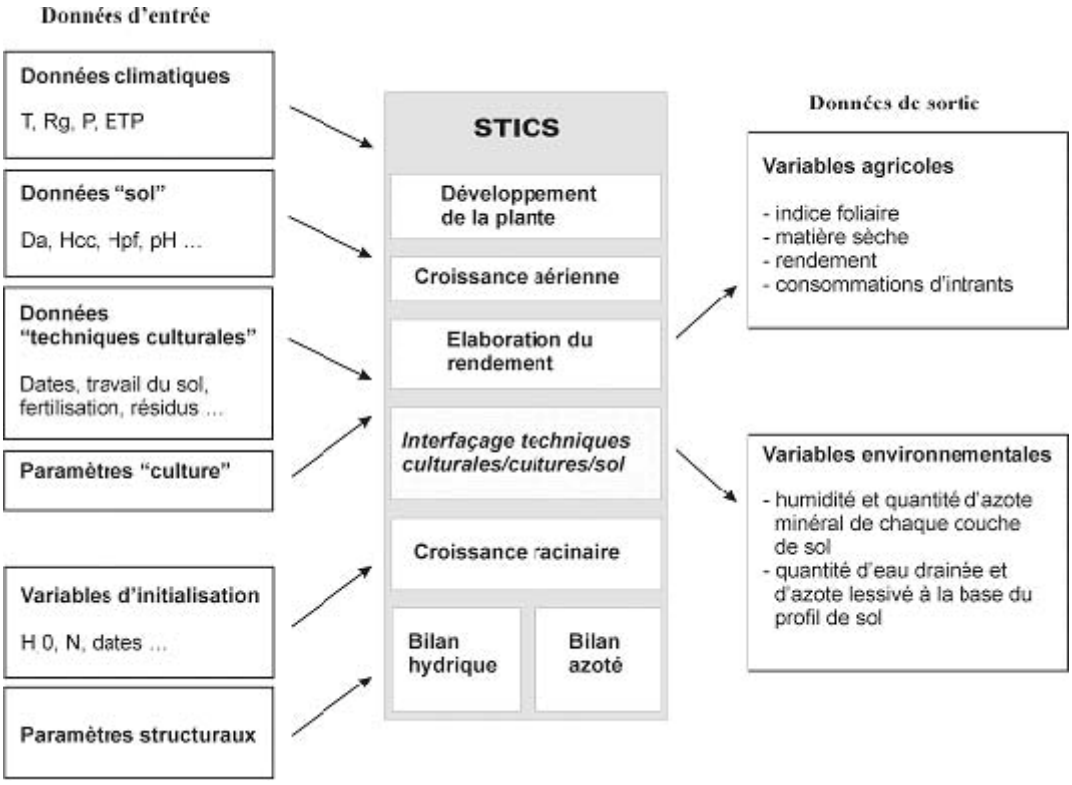

Figure 3: entrées-sorties de STICS

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).

1.3. 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 4) 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).

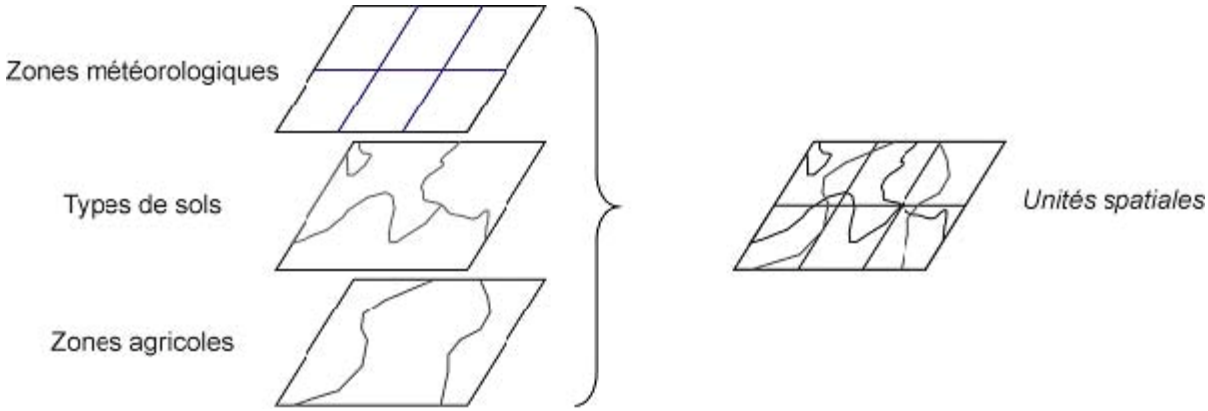

Figure 4 : organisation spatiale des données météorologiques, pédologiques et agricoles

1.4. 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, Industries Agro-Alimentaires 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^2 (Buttes de Dammartin) à 3600 km^2 (Champagne crayeuse).

En raison de la non exhaustivité de la base dans l'état actuel du travail , les PRA ont 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 5) :

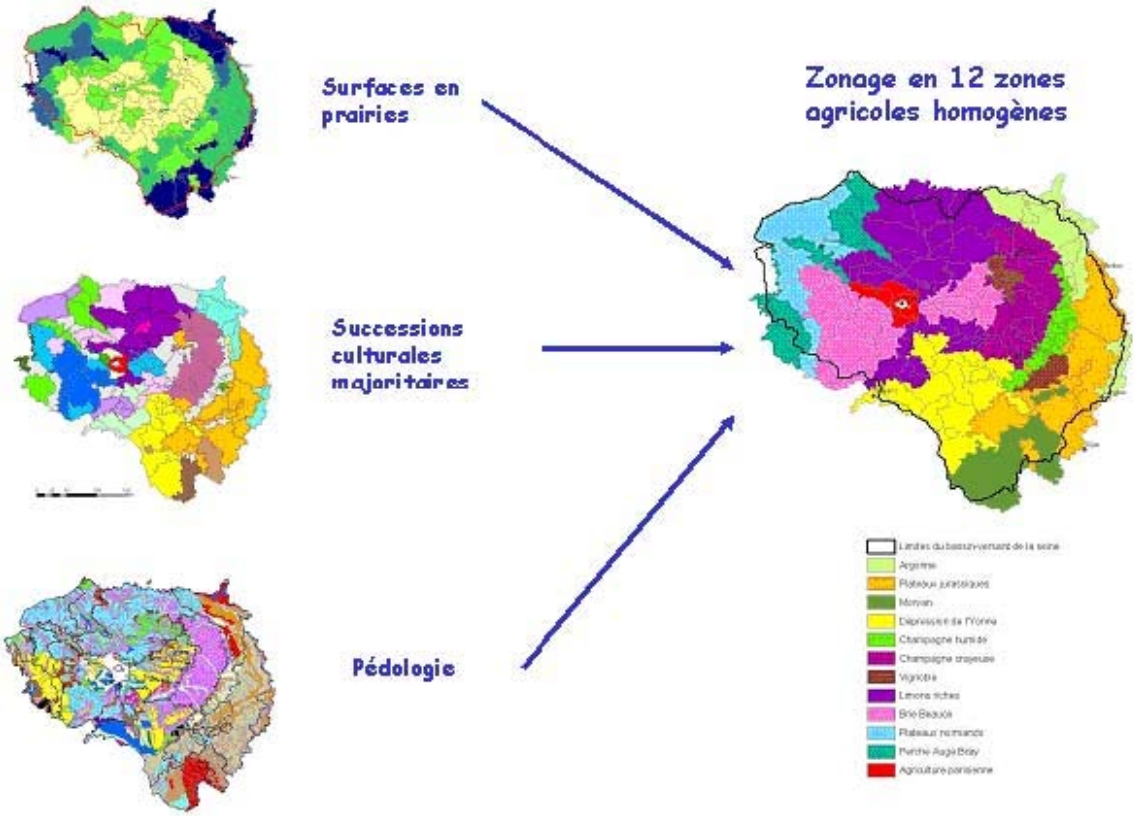

Figure 5 : découpage du bassin de la Seine en 12 zones de paramétrisation des pratiques agricoles

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 :

- 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".

- 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.

- Morvan : Très forte proportion de surfaces en herbe (autour de 70%), OTEX dominante : "bovin viande". Bonne concordance avec le socle cristallin granitique du Morvan.

- 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".

- 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.

- 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.

- 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.

- 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".

- 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".

- Plateaux normands : Zone caractérisée par la coexistence de prairies (30% en moyenne) et de cultures industrielles (betterave, lin) et d'oléoprotéagineux (pois, colza).

- 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".

- 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.

2. Prise en compte de l'irrigation dans la chaîne de modélisation STICS-MODCOU

2.1. Principes généraux

Les apports d'eau pris en compte dans le modèle STICS peuvent être de deux formes :

- apports d'eau météorique : les quantités d'eau arrivant au sol proviennent des pluies et sont donc lues, au pas de temps de calcul, dans le fichier météorologique associé à l'unité générale de simulation (UGSM) ;

- apports d'eau par l'irrigation : les quantités/doses des apports par l'irrigation peuvent être imposées en entrée ou calculées par le modèle :

  - **irrigations imposées** : le modèle utilise le calendrier d'irrigations donné en entrée dans le fichier des techniques ;

  - **irrigations calculées** : le modèle calcul automatiquement les apports d'eau de façon à satisfaire les besoins en eau à hauteur d'un paramètre (RATIOL) fixé en début de simulation. RATIOL représente le taux de satisfaction des besoins en eau : le modèle déclenche une irrigation chaque fois que l'indice de stress stomatique est inférieur à ce taux de satisfaction. Les irrigations sont alors calculées de façon à remplir la réserve en eau du sol jusqu'à la capacité au champ, sans toutefois dépasser la dose maximale journalière autorisée par le système d'irrigation. L'utilisation de cette fonction de STICS a été appliquée à l'ensemble du bassin de la Seine et les premiers résultats obtenus sont présentés ci-après.

2.2. Application au bassin de la Seine

2.2.1 Doses d'irrigation calculées

Le principe général retenu lors des simulations, basé sur une conception exclusivement hydrogéologique, est le suivant :

- l'ensemble des exploitations agricoles du bassin a accès à l'irrigation ;
- toutes les cultures de chaque exploitation (excepté les prairies et la vigne) sont irriguées, du semis à la récolte ;
- l'irrigation s'effectue par aspersion et sans perte en ligne (efficacité de 100%) ;
- les quantités d'eau nécessaires sont intégralement prélevées dans les nappes ;
- la ressource est facilement accessible (pas de souci d'exploitabilité des nappes) ;
- le calcul est effectué au pas de temps journalier sur la période 1995-2004

Les sorties du modèle STICS sont, en plus des principales variables initialement retenues (quantités d'eau drainée, flux d'azote sous racinaire, rendements par culture) les apports d'irrigation journaliers moyens par unité de simulation.

Deux taux de satisfaction des besoins en eau ont été utilisés :

- taux maximal (RATIOL=1) : la capacité au champ est constamment maintenue par l'irrigation pendant toute la période végétative des cultures ;
- taux « moyen » (RATIOL=0,5) : ce taux permet de calculer une sorte d'irrigation « d'appoint » correspondant à des apports relativement réguliers sur les cultures en période peu humide.

A titre d'exemple, la Figure 6 présente les quantités d'eau journalières à apporter sur quatre unités de simulations réparties sur le bassin pour assurer constamment une satisfaction maximale en eau aux cultures. Ces quantités d'eau sont les doses apportées sur les surfaces cultivables.

Les Figure 7 et Figure 8 présentent les doses moyennes d'irrigation calculées par STICS sur la période de simulation 1995-2004 et selon les deux taux de satisfaction des besoins en eau retenus.

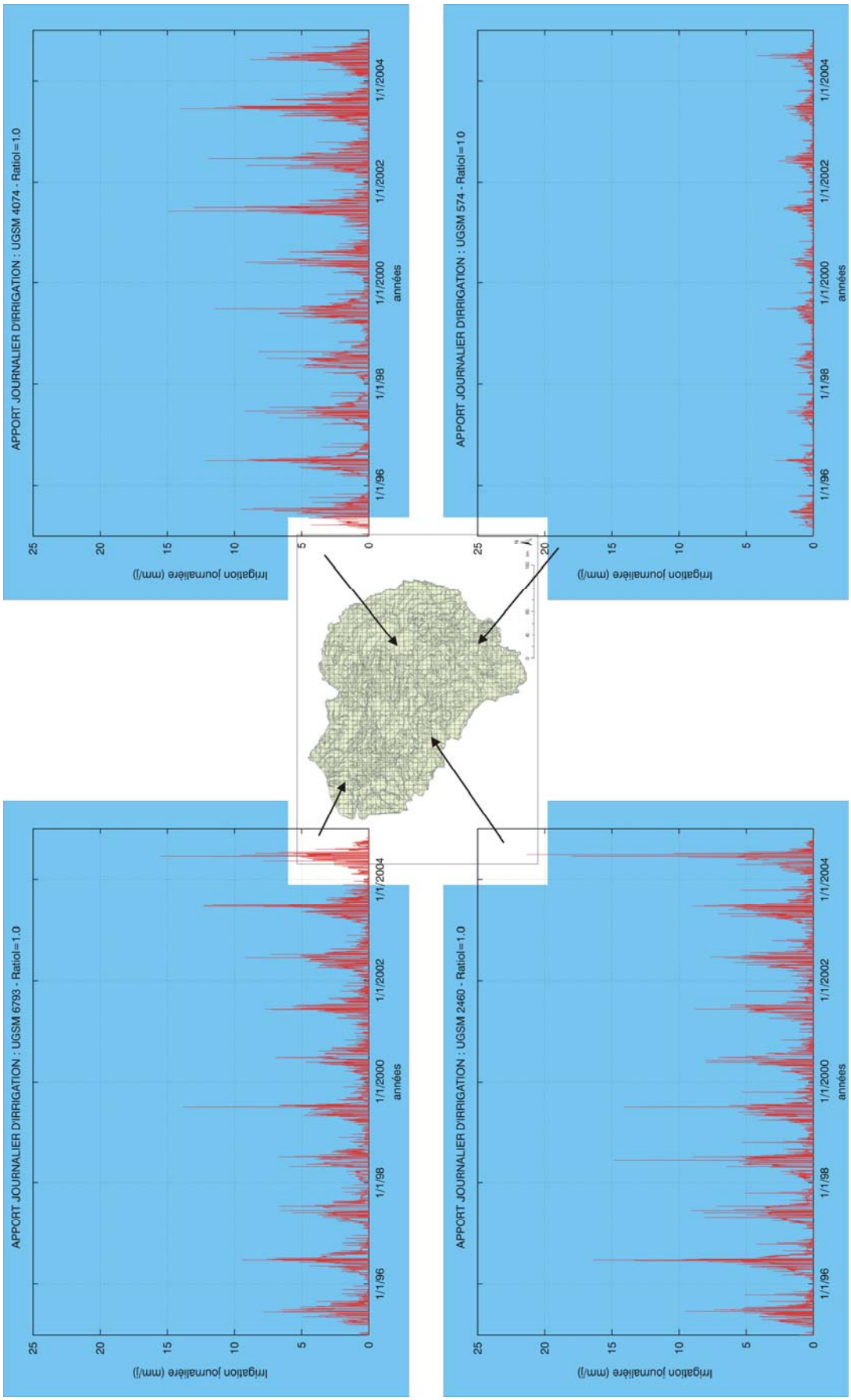

Figure 6 : apports journaliers nécessaires sur la période de simulation pour assurer une satisfaction maximale en eau

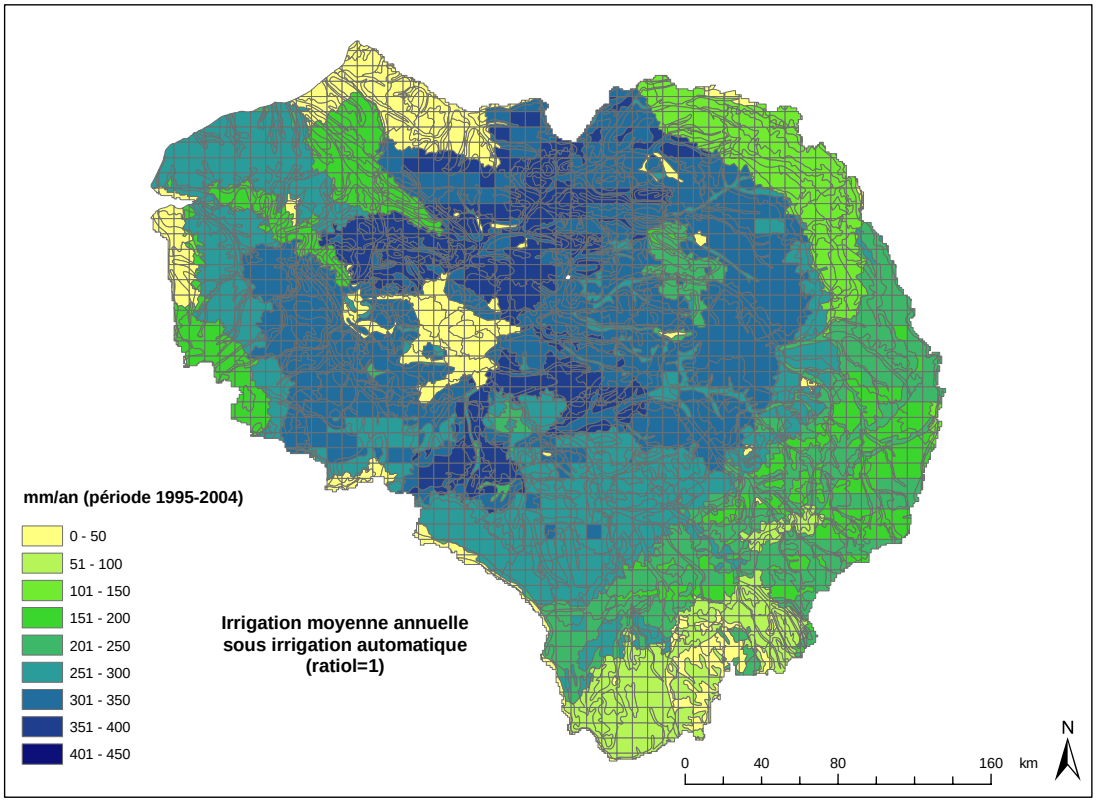

Figure 7 : irrigation moyenne annuelle (mm) : taux de satisfaction en eau maximal (ratiol=1)

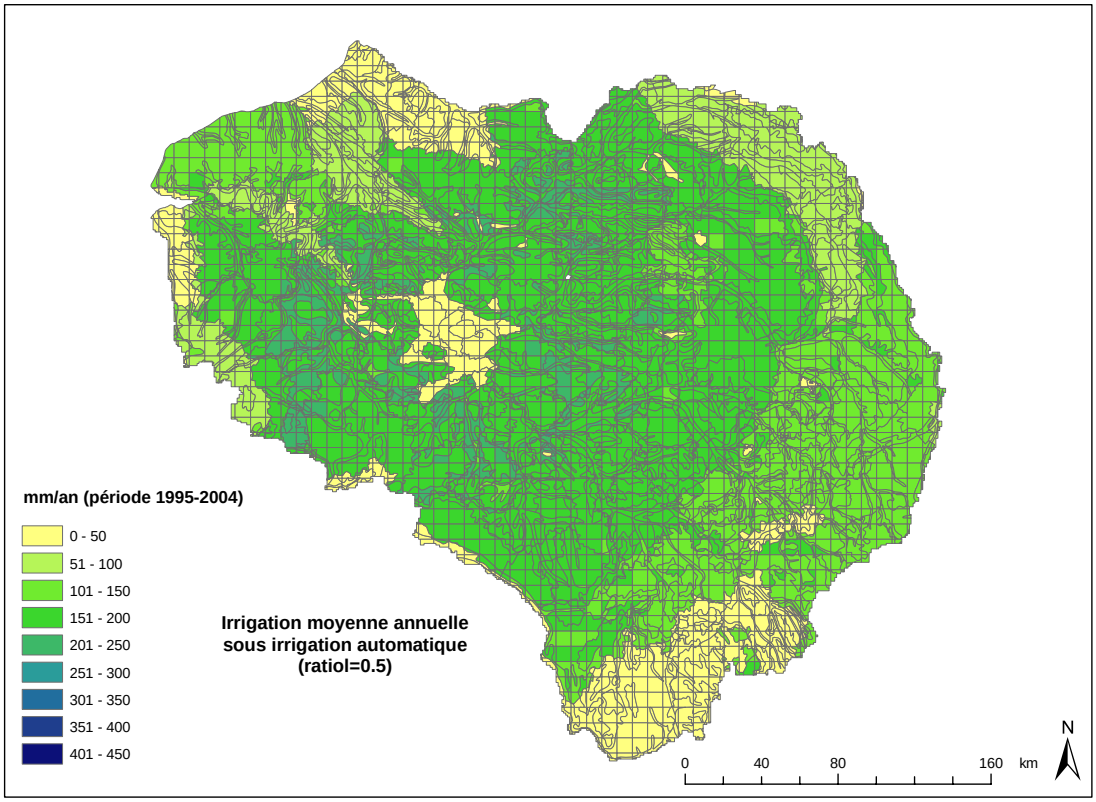

Figure 8: irrigation moyenne annuelle (mm) : taux de satisfaction en eau moyen (ratiol=0.5)

Connaissant la répartition des surfaces agricoles utiles sur la superficie totale des mailles de surface du modèle MODCOU, les doses d'apport par irrigation peuvent être rapportées sur ces mailles (Figure 9 et Figure 10).

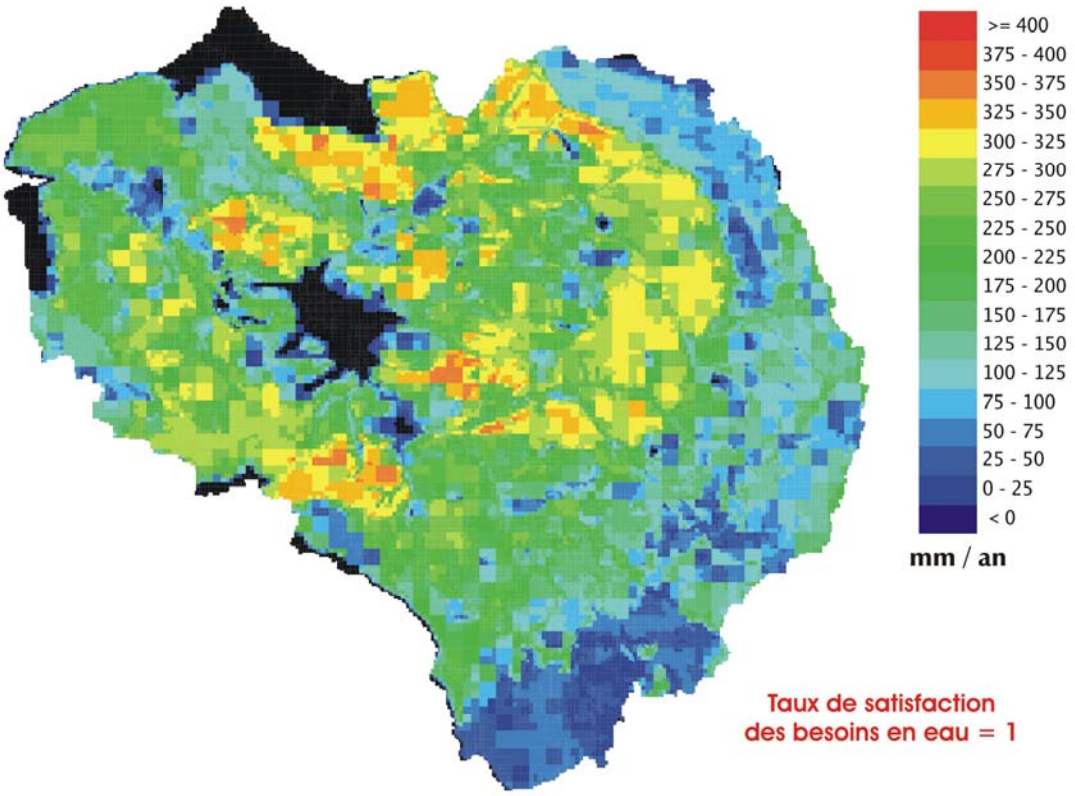

Figure 9 : doses moyennes annuelles d'irrigation : satisfaction maximale en eau des cultures

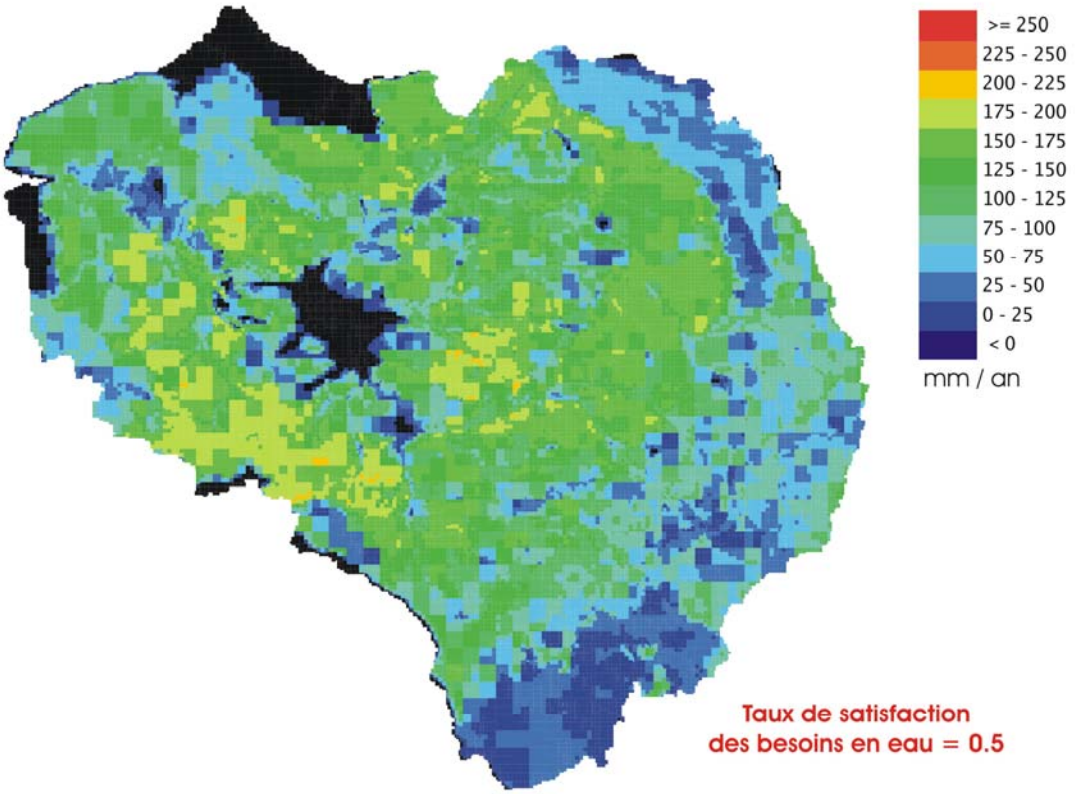

Figure 10 : doses moyennes annuelles d'irrigation : satisfaction moyenne en eau des cultures

Si l'on compare ces figures avec les infiltrations efficaces moyennes sur la période 1995/2004 calculées par le modèle de surface MODSUR (Figure 11), on s'aperçoit d'ores et déjà que, dans la plupart des régions et plus particulièrement les « grandes régions agricole » (Beauce, Brie, Champagne, …), les doses d'irrigation qui devraient être apportées sont nettement supérieures aux quantités d'eau réalimentant les nappes et ce, dans les deux cas de satisfaction en eau pris en compte.

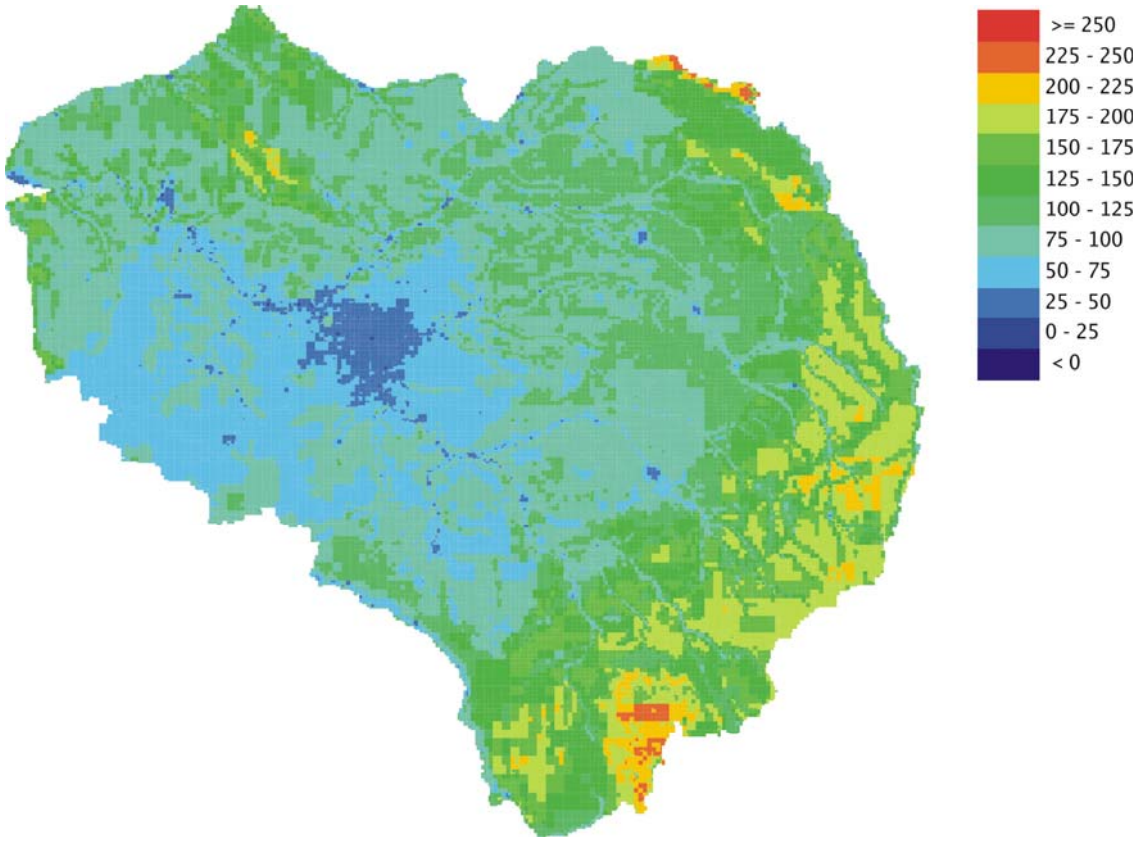

Figure 11: infiltrations efficaces moyennes annuelles (période 1995-2004)

Il en ressort un déficit d'alimentation en eau des nappes comme le montre la Figure 12 qui présente les différences moyennes « apports-prélèvements » dans le cas d'une irrigation généralisée sur le bassin et un coefficient de satisfaction en eau des plantes de 0.5. Les zones en bleu indiquent un déficit d'alimentation (les prélèvements sont supérieurs aux alimentations par les eaux météoriques).

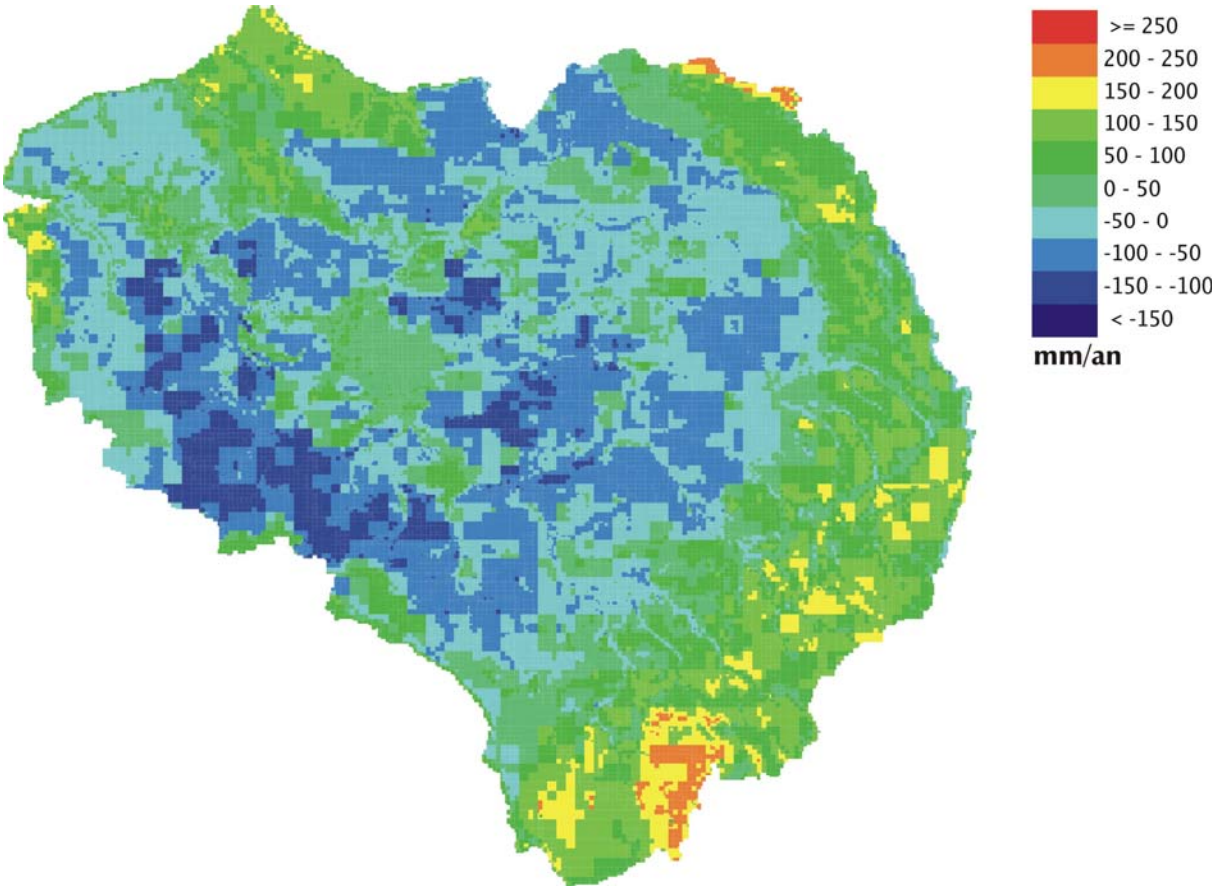

Figure 12 : différences alimentatins-prélèvement (ratiol=0.5)

2.2.2 Impact sur la ressource en eau

Le calcul d'impact sur la ressource en eau et ses conséquences (variation de débit des rivières, rabattements piézométriques) est obtenu en imposant, au pas de temps de calcul journalier, un débit de pompage dans les nappes phréatiques égal à la dose d'irrigation calculée (sous hypothèse RATIOL=0,5) sur l'ensemble des surfaces cultivées. Le calcul est effectué en supposant un pompage sur une période de 9 ans consécutifs, du 1/8/1995 au 31/07/2004.
La Figure 13 présente l'impact sur l'évolution comparée du débit calculé de la Seine à Paris, en régime actuel et en régime avec irrigation généralisé (indice de satisfaction des plantes = 0,5). Les différences importantes calculées en période d'étiage montrent, en fin de période de simulation, une division par deux du débit de la Seine à Paris. Cette diminution des débits d'étiage est due à l'abaissement général des nappes internes du bassin comme le montre la Figure 14 qui présente le rabattement général des nappes calculé après ces 9 ans d'irrigation intensive, ou les Figure 15 et Figure 16 qui montrent l'évolution dans le temps de la charge hydraulique calculée sur deux piézomètres à la nappe de la Craie. On constate en particulier que le régime hydrodynamique n'est pas du tout stabilisé après 9 ans : ceci montre le caractère tout à fait théorique de cette simulation.

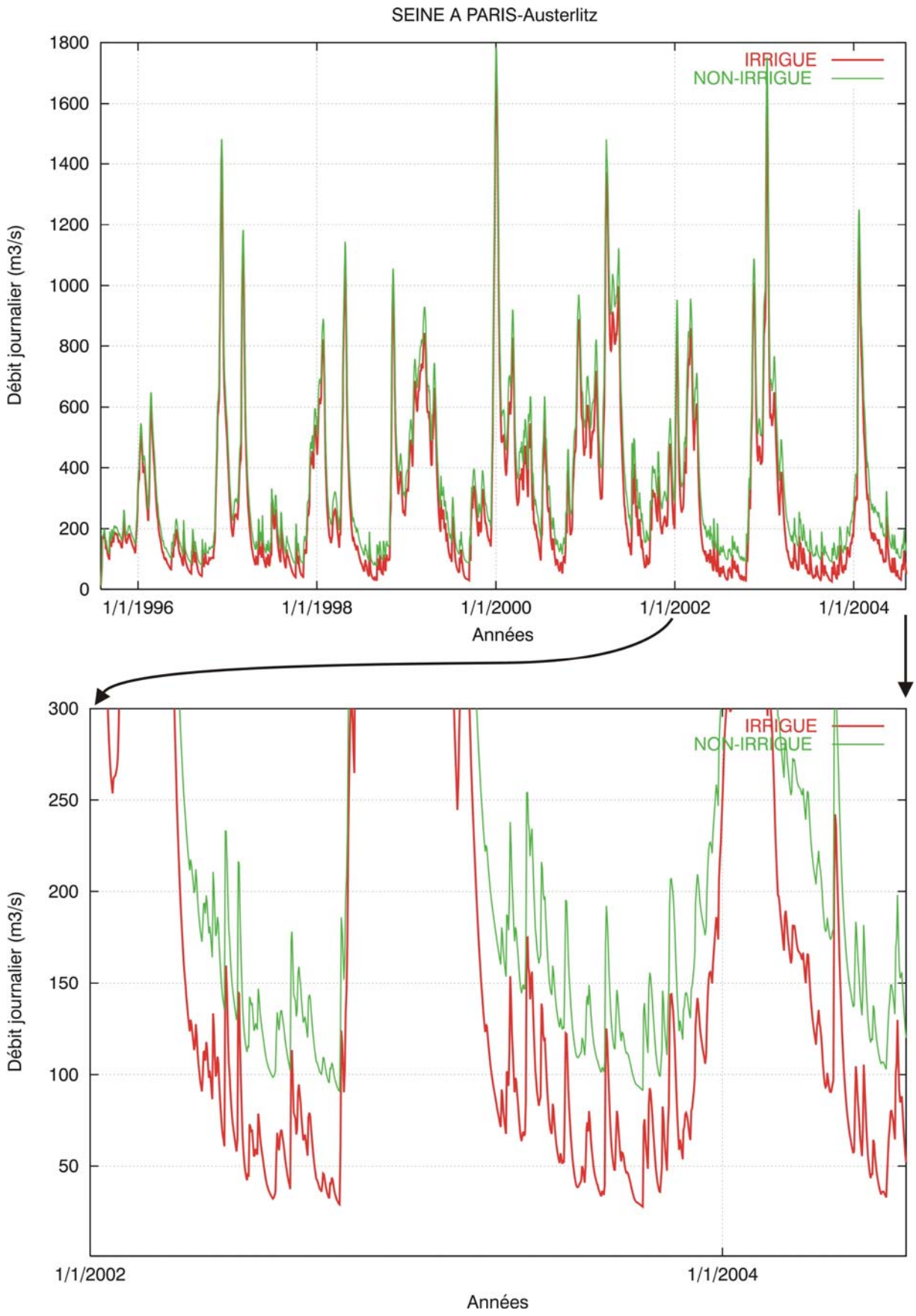

Figure 13: évolution du débit calculé de la Seine à Paris avec ou sans irrigation intensive

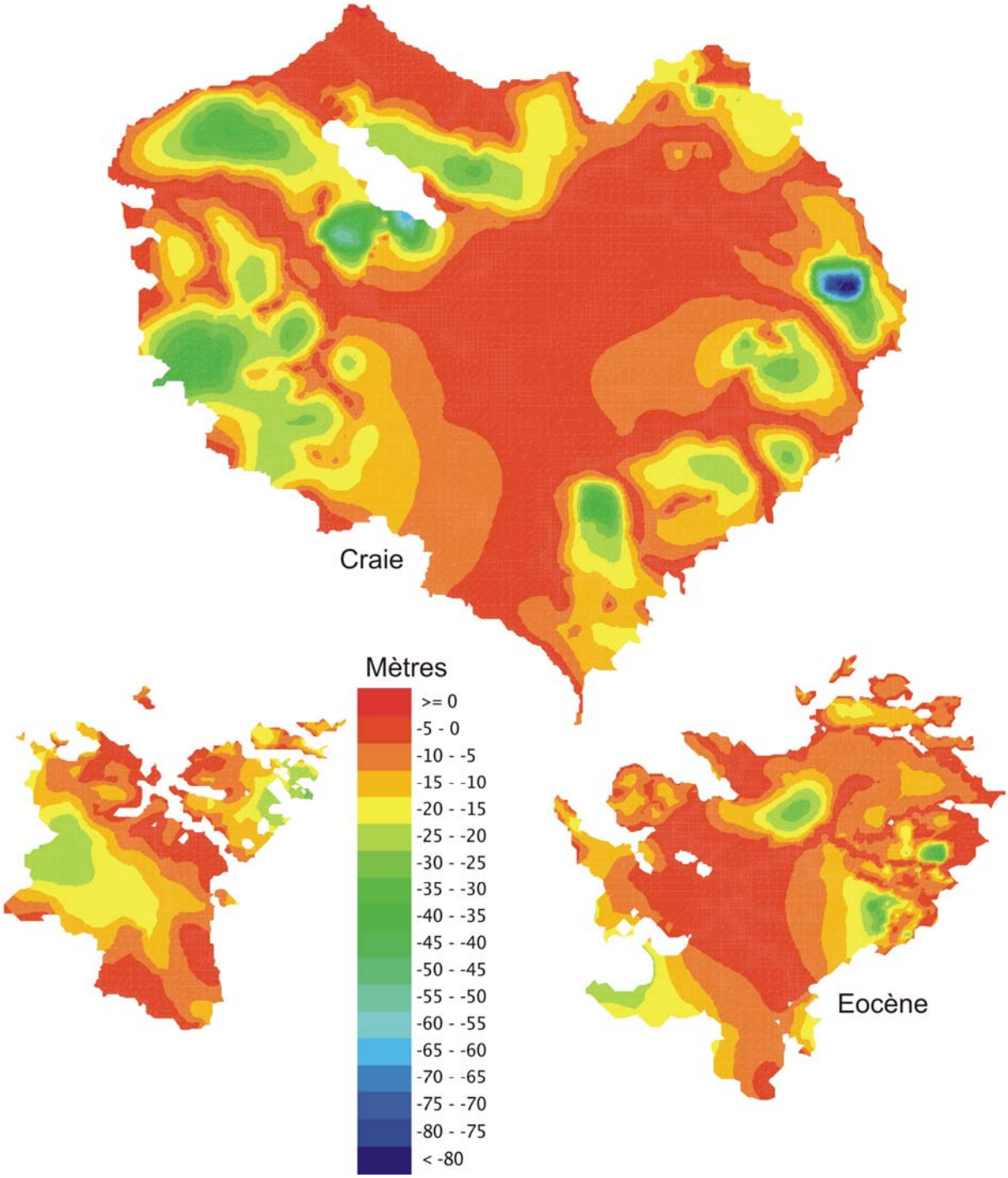

Figure 14 : variations piézométriques calculées après 9 ans d'irrigation intensive

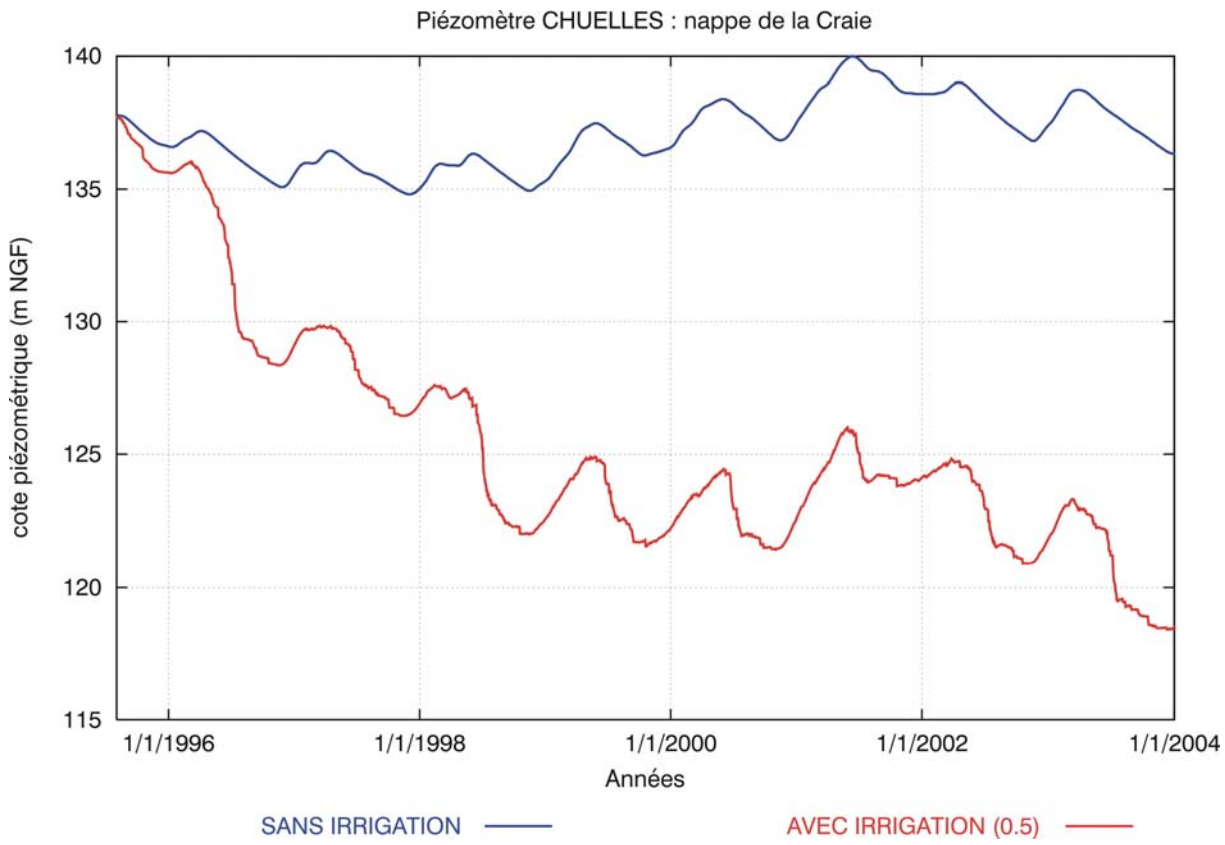

Figure 15 : évolution de la piézométrie calculée au piézomètre de Chuelles

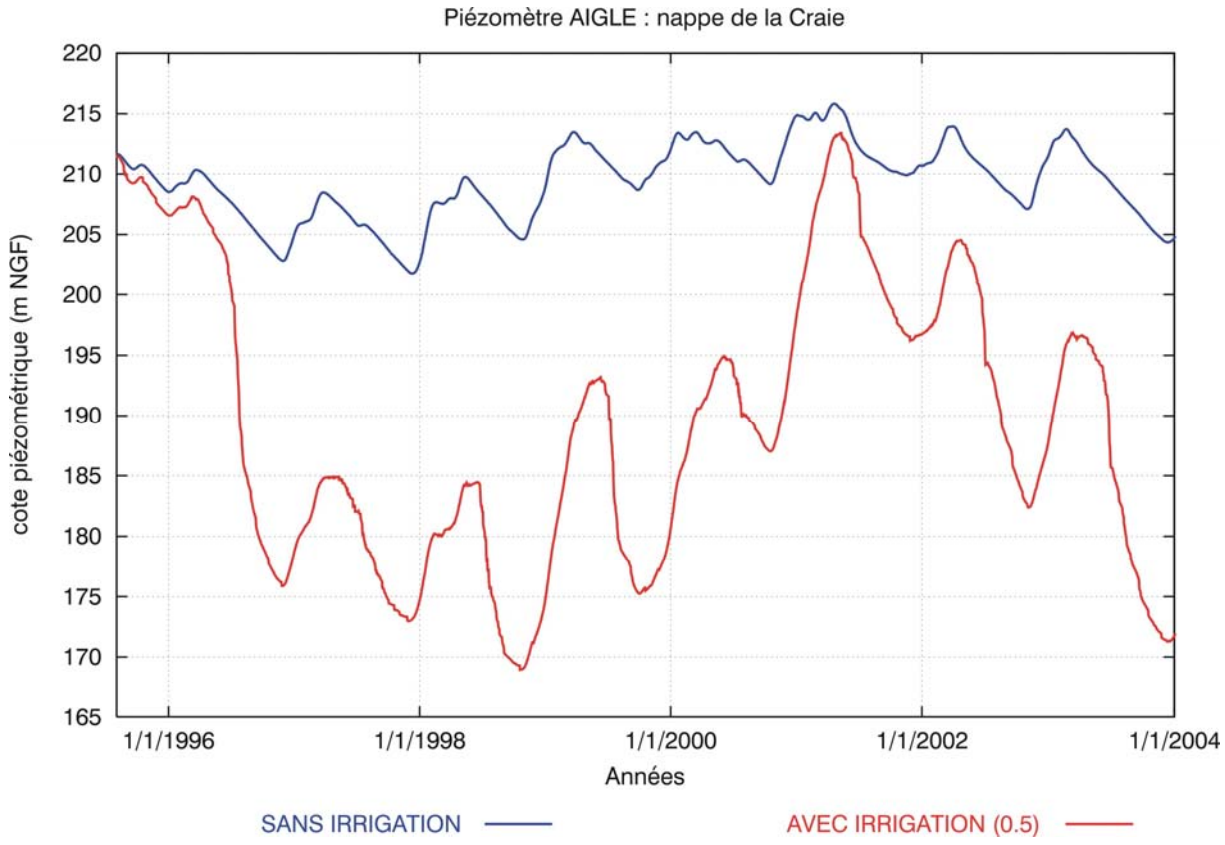

Figure 16 : évolution de la piézométrie calculée au piézomètre d'Aigle

2.2.3 Impact sur les rendements moyens des cultures

Si l'irrigation, principale consommatrice d'eau du secteur agricole, a pour vocation principale de favoriser une activité agricole stable en l'affranchissant, tout ou partiellement, des aléas climatiques, elle joue également un rôle important sur la qualité et la quantité des produits. L'irrigation tend donc à s'étendre vers les grandes cultures industrielles (betterave industrielle, pomme de terre de conservation) pour lesquelles l'exigence de régularité dans le rendement amène les agriculteurs à s'équiper.
Pour illustrer ce propos, la Figure 17 montre l'évolution des rendements moyens calculés sur 10 ans (1995-2004) par STICS pour 5 types de grandes cultures présents sur le bassin, sans ou avec irrigation (telle que définie au paragraphe 2.2.1).

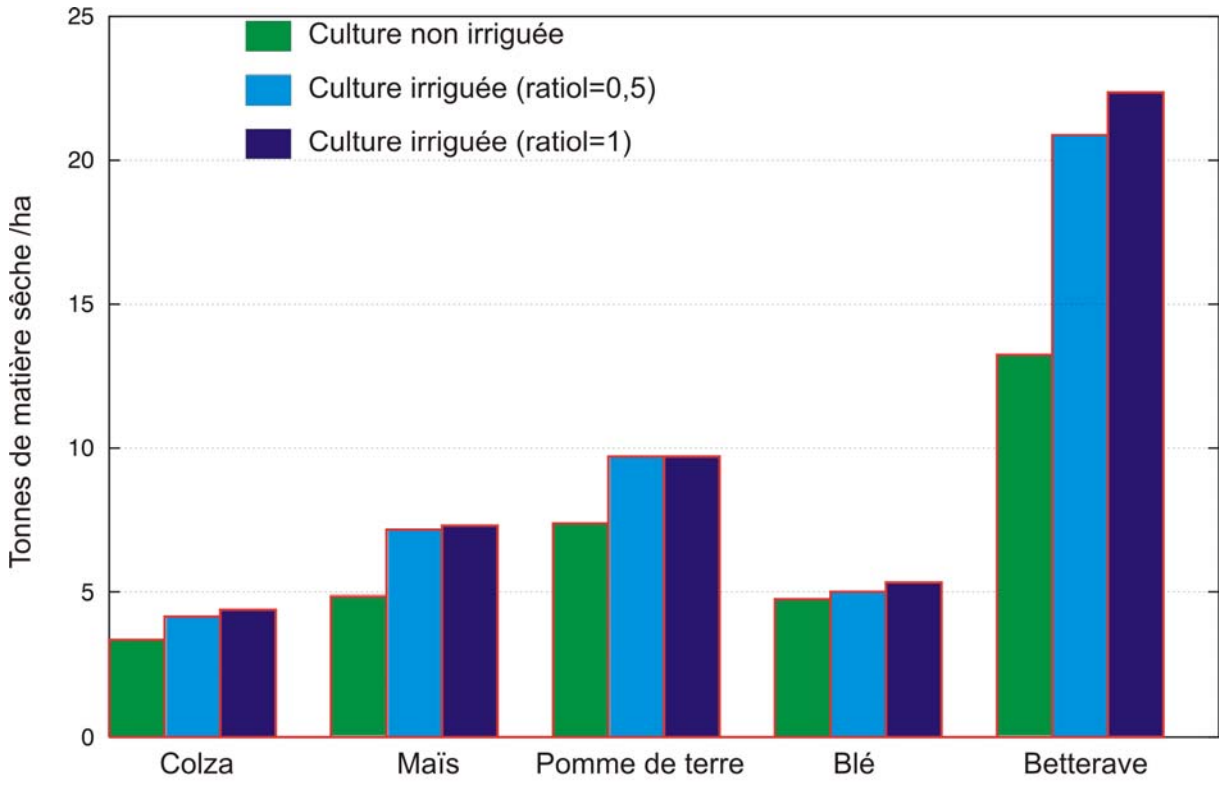

Figure 17: rendements moyens calculés sur le bassin de la Seine (période 1995-2004)

On remarque que, pour les cultures à cycle végétatif estival (maïs, pomme de terre, betterave), l'augmentation de rendement moyen lié à l'irrigation est sensible. Dans certaines régions, les écarts obtenus peuvent être plus importants : une culture de betterave irriguée en Beauce, par exemple, voit ces rendement pratiquement doubler. Les cultures de printemps ou de début d'été (colza, blé) sont bien sûr moins sensibles.

3. Perspectives

Les résultats présentés ne représentent qu'une première approche, volontairement simpliste, voire irréaliste, dans un premier temps, de la prise en compte d'une irrigation intensive. Elle permet d'exploiter une nouvelle fonctionnalité de la chaîne STICS-MODCOU par le biais du calcul automatique des doses d'irrigation à apporter pour assurer un développement optimal ou non des cultures. Elle permet également de prendre en compte l'influence d'une évolution du taux de surfaces agricoles irriguées sur les ressources en eau du bassin de la Seine. Ceci devra être complété et précisé par la prise en compte :

- de la définition d'une irrigation accrue, mais raisonnée, par interruption de l'irrigation de certaines cultures à certains stades végétatifs (blé en phase de maturation par exemple) ;

- de la modification du bilan hydrique lié aux apports par irrigation : le devenir d'une forte pluie sur un sol d'ores et déjà à la capacité au champ sera différent de celui sur un sol plus « sec ». L'irrigation peut donc générer des apports complémentaires, en certaines périodes, à l'alimentation des nappes phréatiques par les pluies météoriques ;

- de l'influence de l'irrigation sur le bilan azoté lié à l'augmentation des rendements et aux modifications du bilan des apports en eau au niveau du sol ;

- de l'exploitabilité des nappes (accès à la ressource) et plus généralement du coût de la mise en œuvre de la ressource en eau (coût du capital, de maintenance, d'exploitation, …) ;

- de l'influence du changement climatique qui tend à contraster le climat sur le bassin : augmentation des régimes pluvieux en hiver, diminution en été, ce qui pourrait accentuer les besoins en eau.

4. Bibliographie

Brisson N. et *al* (2002) Stics version 5.0. Notice concepts et formalismes, juillet 2002 INRA, pp85

Brisson N. et *al* (2002) Stics version 5.0. Notice entrées-sorties, juillet 2002, INRA, pp42

Gomez E. (2002) Modélisation intégrée du transfert de nitrate à l'échelle régionale dans un système hydrologique. Application au bassin de la Seine. *Thèse de doctorat*, Ecole des Mines de Paris, pp218

Levy J.D. (2005) Irrigation durable. Ministère de l'Agriculture, de l'Alimentation, de la Pêche et de la Ruralité, Conseil Général du Génie Rural, des Eaux et des Forêts, pp39