



HAL
open science

Les modèles Nutting : une boîte à outils pour estimer des flux et des rétentions d'azote et de phosphore dans les masses d'eau

Pierre-Louis Legeay, Rémi Dupas, Chantal Gascuel-Oudou, Florentina Moatar, Nolwenn Bougon, Gaëlle Deronzier

► To cite this version:

Pierre-Louis Legeay, Rémi Dupas, Chantal Gascuel-Oudou, Florentina Moatar, Nolwenn Bougon, et al.. Les modèles Nutting : une boîte à outils pour estimer des flux et des rétentions d'azote et de phosphore dans les masses d'eau. Sciences Eaux & Territoires, 2016, HS 31, pp.1-9. 10.14758/SET-REVUE.2016.HS.09 . hal-04023727

HAL Id: hal-04023727

<https://hal.inrae.fr/hal-04023727>

Submitted on 10 Mar 2023

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License

Sciences Eaux & Territoires

La revue d'Irstea

Article hors-série numéro 31

Les modèles Nutting : une boîte à outils pour estimer des flux et des rétentions d'azote et de phosphore dans les masses d'eau

Pierre-Louis LEGEAY, Florentina MOATAR, Nolwenn BOUGON, Gaëlle DERONZIER, Rémi DUPAS et Chantal GASCUEL-ODOUX

www.set-revue.fr

Sciences Eaux & Territoires, la revue d'Irstea

Article hors-série numéro 31 – 2016

Directeur de la publication : Jean-Marc Bournigal

Directeur éditorial : Nicolas de Menthère

Comité éditorial : Daniel Arnault, Louis-Joseph Brossollet, Denis Cassard, Camille Cédra, Thomas Curt, Alain Dutartre, André Évette, Véronique Gouy, Alain Hénaut, Bruno Héroult, Ghislain Huyghe, Emmanuelle Jannès-Ober, Cédric Laize, Jean-Michel Laya, André Le Bozec, Alette Maillard, Thierry Mougey, Christel Prudhomme, Christian Romaneix pour le CINOVTEN et Michel Vallance.

Rédactrice en chef : Caroline Martin

Secrétariat de rédaction et mise en page : Valérie Pagneux

Infographie : Françoise Peyriguer

Conception de la maquette : CBat

Contact édition et administration : Irstea-DP2VIST

1 rue Pierre-Gilles de Gennes – CS 10030

92761 Antony Cedex

Tél. : 01 40 96 61 21 – Fax : 01 40 96 61 64

E-mail : set-revue@irstea.fr

Numéro paritaire : 0511 B 07860 – Dépôt légal : à parution – N°ISSN : 2109-3016

Photo de couverture : © Lucie Liger (Irstea)



Les modèles Nutting : une boîte à outils pour estimer des flux et des rétentions d'azote et de phosphore dans les masses d'eau

L'évaluation des pressions d'azote et de phosphore et de leurs impacts sur les masses d'eau continentales constitue un enjeu écologique et réglementaire majeur pour les acteurs de l'eau. Cet article présente l'intérêt de la boîte à outils Nutting pour estimer les flux et la rétention de ces substances au sein des bassins versants et du réseau hydrographique. Après avoir présenté la démarche de modélisation, il montre comment le modèle est utilisé, quelles données d'entrée sont nécessaires, et quelles possibilités, limites et perspectives offrent la boîte à outils Nutting aux acteurs de la gestion de l'eau.

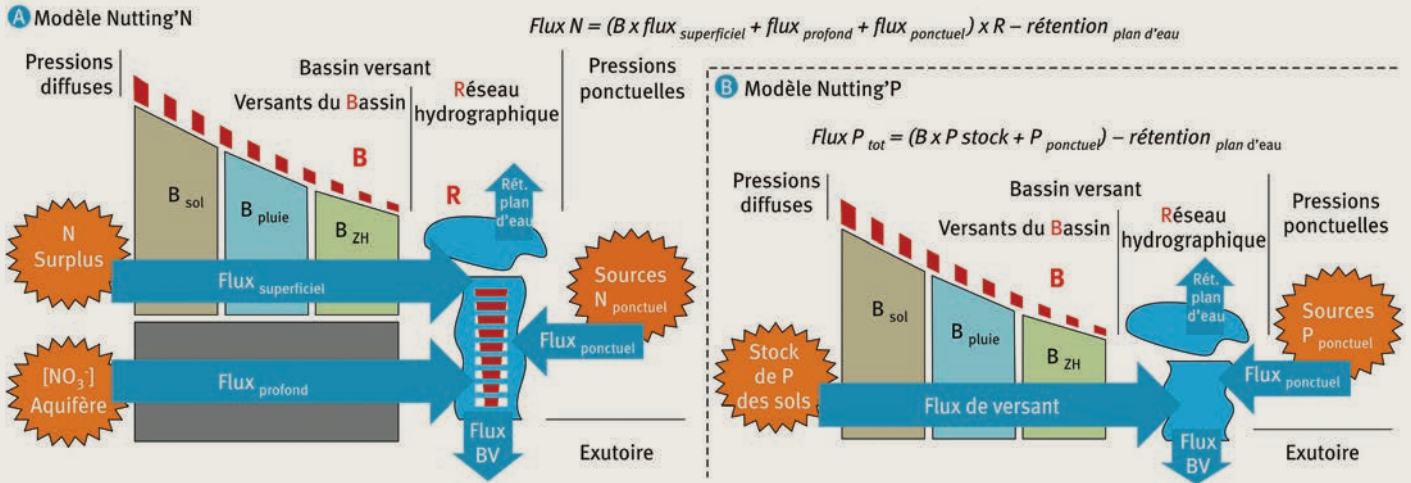


La directive cadre sur l'eau (DCE) prévoit une obligation de résultat sur l'atteinte et la conservation du bon état écologique et chimique des masses d'eau. Cet état, évalué par les agences de l'eau, est traduit en un risque de non-atteinte du bon état des eaux qui prend en compte les pressions et les impacts des masses d'eau* dites DCE (Affeltranger *et al.*, 2011). Nombreuses sont les masses d'eau qui ont à faire face à des pollutions diffuses, notamment en azote (N) et en phosphore (P). Les activités agricoles génèrent en effet une pression importante en lien avec les apports de fertilisants minéraux et organiques. Les surplus*, une fois les exportations par les plantes prises en compte, sont disponibles au transfert, notamment vers les cours d'eau, avec des concentrations et des flux pouvant dépasser les seuils admis et engendrer des perturbations dans les écosystèmes aquatiques. La caractérisation des pressions d'origine agricole, par la seule estimation des apports d'azote et de phosphore au sol, était auparavant utilisée pour l'état des lieux des masses d'eau à l'échelle des zones hydrographiques. Cette quantification des apports n'était pas satisfaisante pour faire explicitement le lien avec leurs effets sur la qualité de l'eau, ne prenant pas en compte l'ensemble des processus de transfert et de rétention* au sein des bassins versants et des cours d'eau. Le modèle Nutting'N (pour *NU*Trient *Transfer model-ling*) (Dupas *et al.*, 2013) a permis de faire ce lien pour N, à l'échelle de la masse d'eau, à partir d'une fonction

de transfert basée sur les caractéristiques du bassin versant immédiat de la masse d'eau et de son réseau hydrographique. Ce modèle consiste à associer aux pressions (agricoles, domestiques et industrielles) des coefficients de transfert qui caractérisent la part effective de ces pressions transférée vers le milieu aquatique, de celle qui est exportée (plantes), retenue (adsorption, stockage dans les sols ou la nappe) ou y est transformée (dénitrification, incorporation dans la matière organique des sols...). Cette approche, conceptuelle et statistique, inspirée du modèle GREEN, constitue un compromis entre une représentation précise des phénomènes physiques en jeu, qui implique le recours à un nombre important de paramètres souvent difficiles à acquérir, et une représentation plus globale reposant sur des données homogènes et accessibles à l'échelle de régions ou d'un pays. Des approches de même type ont été développées dans d'autres pays européens (de Klein *et al.*, 2011 ; Windolf *et al.*, 2011).

Cette approche a été étendue au P avec le modèle Nutting'P (Dupas *et al.*, 2015). Des améliorations ont été apportées aux modèles calibrés sur la période 2008-2012, permettant une spécification par zone géographique et un routage des flux entre masses d'eau, passant du simple outil, initialement proposé, à une réelle boîte à outils destinée aux acteurs de l'eau pour l'évaluation des pressions, des capacités de rétention et des émissions de N et P dans les masses d'eau, applicable à différentes échelles de gestion.

❶ Structures et équations des modèles Nutting'N (A) et Nutting'P (B) (d'après Dupas et al., 2015). Les coefficients B et R correspondent à des coefficients d'abattement, respectivement dans le bassin versant et le réseau hydrographique.



Cet article est structuré en deux parties :

- il présente tout d'abord la démarche de modélisation et la calibration du modèle sur des bassins versants au meilleur niveau d'information ;
- il montre ensuite comment le modèle est utilisé pour extrapoler les résultats sur d'autres bassins versants, quelles données d'entrée sont nécessaires, quelles possibilités, limites et perspectives offre maintenant la boîte à outils Nutting aux acteurs de la gestion de l'eau.

Ce travail est détaillé par ailleurs (Legeay *et al.*, 2016), et accessible sur le site de l'Onema (rubrique Médiathèque/Informations scientifiques et techniques : <http://www.onema.fr/node/2030>).

Des modèles pour estimer les rétentions et des flux inter-annuels

Le modèle Nutting est un modèle conceptuel, calé statistiquement sur des observations, permettant de relier les pressions de nutriments (N ou P) aux flux aux exutoires de bassins versants, à partir des caractéristiques de ces bassins versants et du réseau hydrographique. Il a été développé de manière à n'utiliser que des bases de données disponibles aux échelles régionales ou nationales. Il a été calibré à partir des flux moyens observés disponibles sur une période de cinq années civiles, de manière à lisser la variabilité hydrologique inter-annuelle, en se basant sur des bassins versants disposant de valeurs observées suffisantes. Il fournit des estimations des flux spécifiques annuels moyens. Deux modèles ont été développés : Nutting'N pour les nitrates (NO_3), considérant que c'est la forme essentielle des émissions d'azote, et Nutting'P considérant le P total (P_{tot}).

L'équation du modèle Nutting'N (figure ❶A) prend en compte les différentes sources de N (ponctuelles et diffuses), les voies de transfert (superficiel ou profond de nappe) et les rétentions (rétention de versant, dénitrification dans les plans d'eau ou in-stream), des versants jusqu'à l'exutoire du bassin versant. Les sources pon-

ctuelles correspondent aux émissions domestiques et industrielles rejetées dans les cours d'eau. Les sources diffuses de N comprennent deux types de voies de transfert :

- le flux superficiel correspondant au surplus agricole azoté (SurplusN) rejoignant annuellement le milieu aquatique par lessivage ;
- le flux profond correspondant au N dissous présent dans l'aquifère et rejoignant le cours d'eau par des échanges nappes-rivières.

La répartition entre ces deux flux est effectuée à partir de l'indice d'écoulement de base (BFI : *Base Flow Index*) proposé par l'*Institute of Hydrology* (1980) et permettant d'estimer la proportion d'origine souterraine de la lame d'eau annuelle écoulée (Q_{tot}).

$$\text{Flux}_{\text{superficiel}} = (1 - \text{BFI}) \times \text{SurplusN} \times Q_{\text{tot}}$$

$$\text{Flux}_{\text{profond}} = \text{BFI} \times \text{NO}_3 \times Q_{\text{tot}}$$

DÉFINITIONS

Masse d'eau : la masse d'eau correspond à un découpage élémentaire des milieux aquatiques présentant des caractéristiques assez homogènes et pour lesquels on peut définir un même objectif environnemental.

Rétention : ensemble des processus par lesquels les nutriments (nitrate et phosphore notamment) entrant dans le bassin versant ne rejoignent pas l'exutoire.

Surplus : le surplus correspond au résultat positif de la différence entre les entrées et les sorties d'un élément fertilisant, sur une surface agricole définie.

Les entrées correspondent aux fertilisants minéraux et organiques, à la fixation symbiotique et à la déposition atmosphérique. Les sorties sont les exportations par les cultures ou les prairies, et les émissions gazeuses vers l'atmosphère. La résultante est disponible au transfert vers les cours d'eau.

RMSE : pour *Root Mean Square Error*, ou en français, erreur quadratique moyenne. Cette mesure statistique indique l'écart entre la valeur observée et la valeur prédite par un modèle.

IDPR : pour indice de développement et de persistance des réseaux. Cet indicateur spatial, développé par le BRGM (Mardhel *et al.*, 2004) indique l'aptitude des formations du sol et du sous-sol à laisser ruisseler ou s'infiltrer les eaux de surface.

Entité hydrologique : nom générique qui représente le bassin versant d'un regroupement de cours d'eau comme les bassins versants de masses d'eau ou les zones hydrographiques où les modèles Nutting peuvent être appliqués.

Rétention apparente : elle est définie comme le ratio entre les sorties et les entrées et équivaut à la part des pressions retenues par le bassin versant. Calculée ici suivant la formule : $\text{Rétention apparente} = 1 - \text{flux}_{\text{exutoire}} / (\text{surplus} + \text{rejets ponctuels})$.

Les processus de rétention dans les différentes zones du bassin versant sont traduits par deux coefficients d'abattements :

- un coefficient B pour la rétention entre les versants émetteurs et le milieu aquatique ;
- un coefficient R pour la rétention au sein du réseau hydrographique (*in-stream*) ;
- un terme rétention_{plan d'eau} qui correspond à la quantité de N retenue ou dénitrifiée dans les plans d'eau.

Les coefficients de rétention B et R évoluent entre 0 et 1, correspondant respectivement à un abattement total et à un abattement nul. Ces coefficients sont construits de manière à pouvoir prendre en compte l'ensemble des facteurs hydro-climatiques, géomorphologiques, pédologiques et d'occupation du sol, intervenant dans les processus de rétention, renseignés par un large ensemble de bases de données.

Le modèle Nutting'P a une structure légèrement différente (figure 1B), du fait que la rétention moyenne est de 95 % (± 29 %) du surplus de P, contre 53 % (± 24 %)

du surplus de N, traduisant la forte capacité d'adsorption du sol vis-à-vis du P :

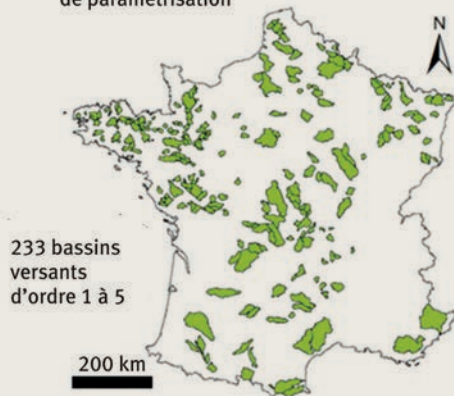
- le stock de P dans l'horizon superficiel de sol (0-30 cm) est la variable de pression, intégratrice des surplus sur quelques décennies ;
- aucun abattement n'est considéré au sein du réseau hydrographique, les processus *in-stream* de changement de nature de P (passage d'une forme particulière à une forme dissoute par exemple) n'affectant pas la quantité de P_{tot} et les phénomènes de sédimentation/remobilisation de P étant considérés comme se compensant annuellement ou inter-annuellement avec la variabilité hydrologique du cours d'eau.

La paramétrisation des modèles (figure 2), étape de développement des modèles, comprend :

- la sélection d'un jeu de bassins versants de calibration et l'initialisation des valeurs des paramètres ;
- la sélection des variables qui vont intervenir dans le calcul de la rétention ;
- le calage des modèles à partir des flux observés et l'évaluation des modèles.

2 Étapes de paramétrisation des modèles : A) Initialisation des valeurs de variables pour la paramétrisation, calculs des flux sur une sélection de bassins versants ; B) Sélection des variables de rétention : sur les bassins versants (B) et au sein du réseau hydrographique (R) ; C) Calibration et évaluation des modèles.

A Calcul des flux observés, des pressions d'entrée et des variables sur les bassins de paramétrisation



B Sélection des variables de rétention pour B et R :
 $B \text{ ou } R = \exp(-S a_j \times \text{variable}_j)$

Variables sélectionnées pour :

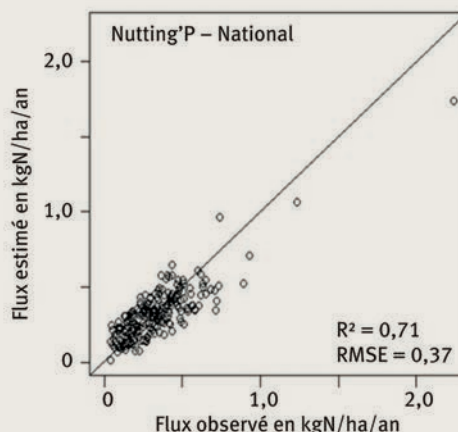
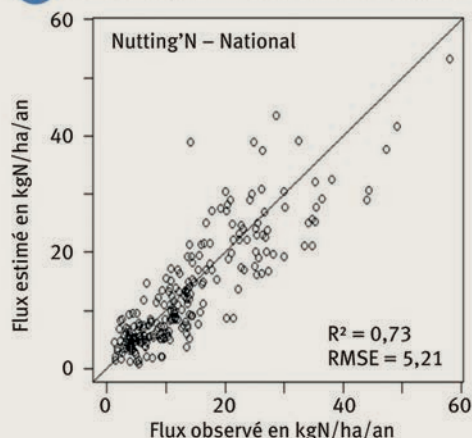
Nutting'N

- Pluie efficace
- Milieux potentiellement humides
- IDPR *
- Temps de transfert/profondeur

Nutting'P

- % forêts et milieux semi-naturels
- IDPR *
- Temps de transfert/profondeur

C Calibration par la méthode des moindres carrés et validation croisée



Au niveau national, le modèle a été paramétré à partir d'un jeu de 233 bassins versants indépendants, de cours d'eau d'ordre de Strahler égal ou inférieur à 5, sélectionnés sur la base de la fréquence de mesure des concentrations en NO_3 et P_{tot} sur une année (un minimum de 9 par an) et de leur proximité à une station de mesure du débit, de manière à minimiser les incertitudes sur le calcul des flux observés (figure 2A). Leur faible nombre dans le Sud-Est tient aux faibles fréquences d'observation. Pour chacun des 233 bassins versants, la valeur agrégée des pressions d'entrée, ici le surplus annuel N moyen, et de toutes les variables susceptibles d'expliquer la rétention, par exemple le pourcentage de la surface en forêt, est calculée, ainsi que le flux observé à l'exutoire. Une valeur moyenne des variables sur cinq ans, illustrée dans cet article sur la période 2008-2012, a été calculée pour chaque bassin versant ou chaque entité hydrologique*. Les pressions diffuses et ponctuelles, les données météorologiques, les flux observés (calculés à partir des chroniques de débits et de concentrations issues des réseaux de contrôle de surveillance et de contrôle opérationnel (RCS et RCO)), se rapportent à cette période. Les variables sélectionnées comme explicatives de la rétention sont issues des bases de données (BdD) les plus récentes possibles.

Une phase de sélection de variables, parmi toutes celles disponibles dans des bases de données, permet de choisir celles qui vont être les plus significatives, et donc retenues pour expliquer la rétention et intégrer les coefficients B et R. Cette phase est réalisée au moyen du critère statistique d'information bayésien et de connaissances expertes. Les variables retenues pour les modèles nationaux sont détaillées figure 2B. Les modèles sont ensuite calibrés par la méthode des moindres carrés. Une procédure de validation croisée a été effectuée, consistant à calibrer le modèle sur n-1 bassins versants et à évaluer les erreurs de prédiction du modèle sur le nième bassin versant restant. Ce processus est réitéré sur les 233 bassins versants. Le calcul du R^2 et du RMSE (*Root Mean Square Error*)* liés à cette procédure permet d'évaluer l'efficacité des modèles. Les ajustements retenus pour Nutting'N et Nutting'P, pour la calibration nationale, présentent respectivement des $R^2 = 0,73$ et $0,71$ et des $\text{RMSE} = 5,21 \text{ kgN/ha/an}$ et $0,37 \text{ kgP/ha/an}$ (figure 2C).

La disponibilité des bases de données et couches d'informations spatialisées sur tout le territoire est cruciale : celles-ci interviennent à la fois lors de la paramétrisation pour la sélection de variables et le calage des modèles comme on vient de le voir, mais aussi lors de leur utilisation par les gestionnaires de l'eau, pour définir les entrées des modèles (flux) et calculer les rétentions à partir des caractéristiques des bassins versants et du réseau hydrographique. La fiabilité et la résolution de ces données sont donc primordiales pour la qualité des estimations issues du modèle.

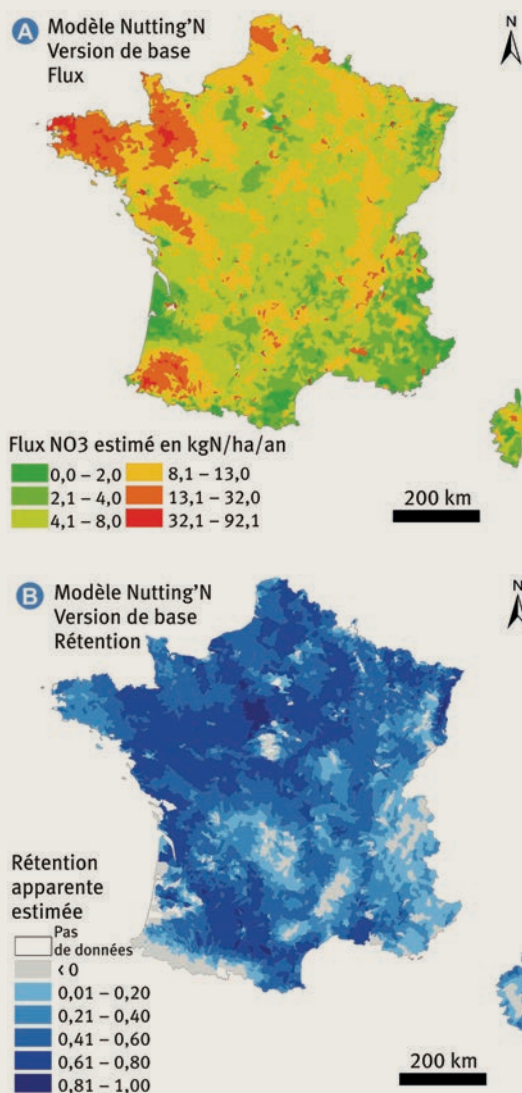
Cette démarche classique de conception, calibration et validation de modèle a été scientifiquement reconnue par deux publications (Dupas *et al.*, 2013 ; 2015). Au final, nous obtenons des équations simples qui peuvent être facilement appliquées par les acteurs de l'eau, pour extrapoler la démarche à l'ensemble des masses d'eau, pourvu de disposer d'un système d'information géographique et d'avoir accès aux bases de données nécessaires.

L'extrapolation à un ensemble de masses d'eau

Les variables nécessaires à l'application des modèles Nutting sont présentées au tableau 1. Elles sont classées selon la structure du modèle et leur accès est mentionné. Ces variables sont issues de couches raster ou vecteurs géo-référencées existantes, ou construites à dessins à partir de BdD. Les modèles Nutting valorisent ainsi un large panel de base de données élaborées ces dernières années à l'échelle nationale dans le domaine de l'eau. Des BdD régionales ou locales, disponibles à ces échelles ou produites sur des territoires de gestion, peuvent également être utilisées, valorisant alors des initiatives locales, mais elles nécessiteront alors de paramétrer à nouveau le modèle à partir de ces données plus fines.

L'utilisation du modèle Nutting permet de créer des cartes des flux spécifiques ou de la rétention du NO_3 ou du P_{tot} des bassins versants immédiats (figure 3). Au-delà de la simple quantification des impacts et de la réalisation d'un état des lieux, les estimations de flux à partir

3 Application à l'échelle France de Nutting'N calibré sur 2008-2012. A) Flux estimés en kgN/ha/an ; B) Rétention apparente estimée.



des pressions diffuses et ponctuelles permettent d'analyser les relations entre ces pressions sur le bassin versant et les impacts sur les milieux aquatiques à l'échelle de la masse d'eau. Les cartes, les équations et bases de données calculées sont mises à disposition sur demande. Elles ont d'ores et déjà été utilisées par certaines agences de l'eau et sur certains territoires pour le rapportage DCE. Croiser les flux et les rétentions apparentes obtenues permet au gestionnaire d'identifier les zones à fortes pressions et faibles impacts, et de comprendre ce qui, dans le bassin versant, peut expliquer la forte rétention, ou à l'inverse, d'identifier les zones à fortes pressions et forts impacts et ainsi de prioriser des actions, ou tout simplement de renforcer la surveillance sur un bassin.

Les estimations des modèles Nutting peuvent être réalisées pour d'autres entités hydrologiques telles que des zones hydrographiques ou des bassins versants délimités manuellement s'ils rentrent dans le périmètre d'application de la calibration. L'utilisation de ces modèles peut se révéler utile dans des contextes où l'information est faible, pour estimer par exemple les apports à des plans d'eau ayant de multiples tributaires non instrumentés. Des applications ont d'ores et déjà été développées en ce sens.

Une analyse attentive des résultats est cependant requise. La figure 3b montre en effet que dans certains cas (moins de 8 % du territoire), la rétention apparente* calculée est négative indiquant, soit que le flux spécifique est sures-

1 Variables entrant dans les modèles Nutting lors de la calibration nationale sur la période 2008-2012.
Les variables mentionnées sont celles retenues suite à la sélection de variables.

Variable	Information	Données mobilisées	Résolution
Pressions diffuses s'appliquant sur l'entité hydrologique			
N Surplus	Surplus moyen de N (kgN/ha/an)	NOPOLU 2010, SOeS, MEDDE	À la zone géographique
[NO ₃] profond	Concentration interannuelle moyenne de NO ₃ dans les eaux souterraines (mg/L)	Bd ADES	Ponctuel
Q _{tot}	Lame d'eau annuelle moyenne écoulée (mm)	Lame d'eau annuelle spatialisée, Irstea	1 km
Base Flow Index (BFI)	Proportion du débit des cours d'eau alimenté par des eaux souterraines (%)	Recalcul du BFI selon la méthode de Meinardi	1 km
Stock P _{tot}	Stock de P _{tot} dans l'horizon superficiel 0-30 cm (kgP/ha)	Teneur en P _{tot} , 2000-2009 Inra ; densité apparente, Bd European Soil	1 km
Pressions ponctuelles s'appliquant sur l'entité hydrologique			
N ponctuel	Flux interannuel moyen des rejets ponctuels de N et P (kg/ha/an)	Période 2008-2012, Agences de l'eau	Ponctuel
P ponctuel			
Bassin versant/Caractéristiques propres à l'entité hydrologique			
Versant des bassins/Coefficient de transfert B			
Forêt	Pourcentage de la surface occupée par de la forêt ou des milieux semi-naturels (%)	Corine Land Cover 2010, European Environmental Agency	0,25 km ²
Milieux potentiellement humides (MPH)	Pourcentage de la surface ayant une probabilité forte et très forte d'être un MPH (%)	Inra, GISSOL et MEDDE, 2014	50 m
Pluie efficace (PE)	Précipitations annuelles moyennes (mm)	Période 2008-2012, Météo France	8 km
Ration infiltration/ruissellement (IDPR)	Indice de persistance et de développement des réseaux (-)	BRGM	50 m
N _{ret,plan d'eau}	Rétention interannuelle de N et P dans les plans d'eau (kgN/ha/an)	Bd Plan d'eau, Irstea ; Bd Carthage, SANDRE	Au plan d'eau
P _{ret,plan d'eau}			
Réseau hydrographique/Coefficient de transfert R			
Temps de transfert (T)	Somme des temps de transfert (s)	Réseau hydrographique théorique et Bd ESTIMKART, Irstea	Au tronçon hydrographique
Profondeur (H)	Profondeur moyenne (m)		
Exutoire (seulement pour la paramétrisation)			
Flux NO ₃	Flux interannuel moyen de NO ₃ ou P _{tot} à l'exutoire des bassins de paramétrisation (kg/ha/an)	Période 2008-2012, chroniques RCS, RCO, Agences de l'eau ; chroniques débits, Banque Hydro	Au bassin versant
Flux P _{tot}			

timé par le modèle, soit que les données d'entrée de surplus ou de rejets ponctuels sont sous-estimées, ou encore que la contribution du flux profond est sous-estimée, ou les trois. On note que ces zones, situées principalement en zone de montagne, sont celles où le surplus calculé par NOPOLU est mal évalué. Dans certains secteurs où l'information est disponible, des estimations spatialisées du surplus ou même de la lixiviation de N et P par systèmes de culture pourront alors être préférées.

Toujours en ce qui concerne ce surplus azoté calculé par NOPOLU, combinant à la fois des données de recensement agricole, de modélisation de dépôt atmosphérique et de ventes de fertilisants, on souligne qu'il n'est disponible qu'au grain de la zone hydrographique. Plus l'on descend d'échelle pour appliquer les modèles Nutting'N, plus on va au-delà de la résolution des données d'entrée. L'estimation sur les flux est alors susceptible d'être entachée d'erreurs, mettant en défaut l'hypothèse faite d'une homogénéité spatiale du surplus au sein de la zone hydrographique, et donc des cultures et pratiques agricoles qui y sont associées. Par ailleurs, l'estimation des rejets ponctuels étant actuellement issue des données redevances pour pollution, qui agrègent des mesures d'auto-surveillance et des estimations au forfait, mériterait d'être améliorée. Enfin, la calibration des modèles s'effectue sur des flux observés qui comportent un biais (corrige) et une incertitude quantifiable liée aux fréquences de suivi des concentrations en NO₃ et P_{tot} (Moatar *et al.*, 2013). Les limites principales de la mise en œuvre actuelle de l'approche sont donc imposées par les données d'entrée disponibles dont la qualité et la résolution définissent des limites d'application et la qualité de la paramétrisation des modèles. Son amélioration devrait donc passer par l'amélioration de ces données.

Une boîte à outils a été progressivement développée pour diversifier les applications (figure 4). Au modèle Nutting'N initial (Dupas *et al.*, 2013), calibré sur la période 2005-2009, est venu s'ajouter le modèle Nut-

ting'P (Dupas *et al.*, 2015). Ces deux outils ont été mis à jour et re-paramétrés sur la période 2008-2012 pour intégrer des données plus récentes, ou de nouvelles données comme la couche des milieux potentiellement humides de France. De nouveaux outils et calibrations ont été développés pour former une vraie boîte à outils à différentes échelles et pour différentes finalités (figure 4). L'objectif premier des deux outils les plus aboutis, *i.e.* Nutting'N et Nutting'P dans leur version de base et en calibration nationale, est d'estimer des flux spécifiques de NO₃ et de P_{tot} issus des bassins versants immédiats de masses d'eau non instrumentées, et la rétention apparente afférente (figure 4). Les deux versions de base de ces modèles permettent également des calibrations sur des régions hydrographiques spécifiques, définies par exemple par leur substrat géologique. Ces paramétrisations peuvent donner lieu à une sélection de variables différentes suivant les régions pour expliquer la rétention, tout en apportant une meilleure estimation.

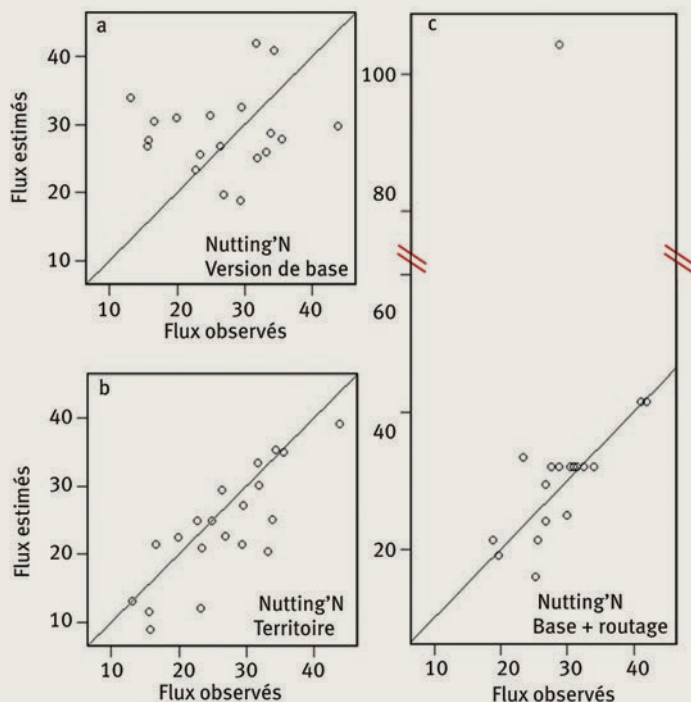
Un second outil permet de prendre en compte un module de routage. Il permet d'estimer le flux spécifique à l'exutoire d'un bassin versant en tenant compte des flux estimés provenant de l'amont, à la place d'une estimation basée sur les pressions et variables de rétention du seul bassin versant immédiat, comme c'est le cas avec la version de base. Pour l'instant, ce module n'est disponible que pour des applications au grain de la zone hydrographique, le chaînage entre masses d'eau n'étant pas disponible.

Un troisième outil existe pour Nutting'N. Il s'agit d'une version du modèle dédiée à un territoire de gestion. Il a été testé sur le bassin versant du Blavet (territoire correspondant à un schéma d'aménagement et de gestion de l'eau, bassin versant de 2 000 km², Bretagne), avec des données spécifiques à ce territoire. Un modèle a été identifié, donnant localement de meilleurs résultats et permettant l'estimation de flux pour des sous-bassins versant non instrumentés (figure 5).

4 Boîte à outils Nutting 2015.

Outils disponibles		Calibrations	Application	Objectifs
Nutting'N 2015	Nutting'N version de base	Nationale	France entière	⇒ Estimation du flux spécifique et de la rétention de bassins versants immédiats non instrumentés
		Régionales	Bretagne, bassins sédimentaires, zone de socle	⇒ Étude des différences de paramétrisation suivant les régions ⇒ Fournir un modèle plus adapté et mieux calibré pour certaines régions
	Nutting'N version de base Nutting'N + Routage	Nationale	France entière	⇒ Améliorer l'estimation des flux par rapport à la version de base ⇒ Intégrer le routage du flux entre entités hydrologiques au modèle ⇒ Estimer le flux spécifique de tout le bassin versant et non plus du seul bassin versant immédiat
				Nutting'N Territoire
Nutting'P 2015	Nutting'P version de base	Nationale	France entière	⇒ Disposer d'un outil similaire pour N et P ⇒ Estimation du flux spécifique et de la rétention de bassins versants immédiats non instrumentés
		Régionales	Bretagne, bassins sédimentaires, zone de socle	⇒ Étude des différences de paramétrisation suivant les régions ⇒ Fournir un modèle plus adapté et mieux calibré pour certaines régions

- 5 Application à l'échelle du bassin versant du Blavet, calibré sur 2008-2012.
 a. À partir de la calibration nationale.
 b. À partir d'une calibration propre au territoire.
 c. À partir de la calibration nationale prenant en compte un module de routage.



EN SAVOIR PLUS...

- AFFELTRANGER, B., DERONZIER, G., PARROT-LAMICHE, E., 2011, *Guide « pressions-impacts » pour la mise à jour de l'état des lieux DCE, Partie I : Contexte et enjeux*, SANDRE, 27 p.
- DUPAS, R., CURIE, F., GASCUEL-ODOUX, C., MOATAR, F., DELMAS, M., PARNAUDEAU, V., DURAND, P., 2013, Assessing N emissions in surface water at the national level: Comparison of country-wide vs. regionalized models, *Science of the Total Environment*, n° 443, p. 152-162.
- DUPAS, R., DELMAS, M., DORIOZ, J.-M., GARNIER, J., MOATAR, F., GASCUEL-ODOUX, C., 2015, Assessing the impact of agricultural pressures on N and P loads and eutrophication risk, *Ecological Indicators*, n° 48, p. 396-407.
- INSTITUTE OF HYDROLOGY, 1980, *Low flow studies report*, 3 volumes, Institute of Hydrology, Wallingford, UK.
- LEGEAY, P.-L., MOATAR, F., GASCUEL-ODOUX, C., 2016, *Estimation des émissions d'azote et de phosphore dans les eaux de surface des têtes de bassin versant sur la France et à méso-échelle, rapport de contrat Diagnostic pression – impact N et P à l'échelle nationale*, Convention Inra-Onema, 71 p.
- DE KLEIN, J.J., KOELMANS, A. A., 2011, Quantifying seasonal export and retention of nutrients in West European lowland rivers at catchment scale, *Hydrological Processes*, 25(13), p. 2102-2111.
- MOATAR, F., MEYBECK, M., RAYMOND, S., BIRGAND, F., CURIE, F., 2013, River flux uncertainties predicted by hydrological variability and riverine material behavior, *Hydrological Processes*, n° 27, p. 3535-3546.
- WINDOLF, J., THODSEN, H., TROLDORGBORG, L., LARSEN, S.E., BOGESTRAND, J., OVESEN, N.B., KRONVANG, B., 2011, A distributed modelling system for simulation of monthly runoff and nitrogen sources, loads and sinks for ungauged catchments in Denmark, *Journal of Environmental Monitoring*, 13(9), p. 2645-2658.

Conclusion et perspectives

La boîte à outils Nutting constitue une avancée pour l'évaluation des pressions et des impacts sur les masses d'eau françaises qui ne disposent pas de données d'observation. Elle vient occuper une place jusqu'ici vacante dans la diversité des modèles existants, celle de modèles opérationnels, disponibles à l'échelle nationale, déclinables régionalement ou localement.

La démarche initiée sur le schéma d'aménagement et de gestion de l'eau du Blavet utilisant un modèle paramétré localement est prometteuse : elle permet la valorisation de données acquises à l'échelle du territoire, fournissant de meilleures estimations des flux qu'avec le modèle national. Des améliorations sont en cours d'étude. Il s'agit d'une part du remplacement de l'entrée pression diffuse « surplus azotés » par une entrée « pertes sous-racinaires selon les systèmes de cultures », estimées par l'outil Syst'N de diagnostic de pertes azotées. Cette évolution permettra la création de scénarios de modifications des systèmes de cultures et l'analyse de leurs impacts sur les flux. Il s'agit d'autre part d'une meilleure quantification de la proportion de l'écoulement issu de la nappe. Cela pourrait être fait par l'utilisation d'un modèle hydrologique à réservoirs estimant mieux cette contribution. Enfin, l'erreur moyenne de prédiction liée aux ajustements des modèles pourrait être remplacée par une estimation de l'incertitude associée aux flux estimés. À ce jour, les données utilisées et calculées sont mises à disposition sur demande. Dans un futur proche, elles seront mises en libre accès sur une infrastructure de donnée spatiale, permettant la navigation, l'interrogation et l'extraction de sorties de modèles, comme cela existe déjà pour les modèles de localisation des zones humides potentielles à l'échelle France (http://geowww.agrocampus-ouest.fr/web/?page_id=1723). Une utilisation simplifiée de ces modèles pourrait être développée grâce à un service web (WPS) qui stockerait toutes les couches de données et les modèles, et permettrait aux acteurs d'obtenir, sur n'importe quelle masse d'eau, des sorties des modèles pour différentes périodes ou différentes zones. ■

Les auteurs

Pierre-Louis LEGEAY, Rémi DUPAS et Chantal GASCUEL-ODOUX *

INRA et Agrocampus Ouest
 UMR 1069 Sol Agro et hydrosystème Spatialisation
 65 rue de St-Brieuc, F-35042 Rennes Cedex, France

✉ pl.legeay@gmail.com

✉ Remi.Dupas@inra.fr

✉ Chantal.Gascuel@inra.fr *

* Auteur correspondant

Florentina MOATAR

UMR GeHCO, Université de Tours,
 Parc de Grandmont, F-37200 Tours, France

✉ florentina.moatar@univ-tours.fr

Nolwenn BOUGON et Gaëlle DERONZIER

Office national de l'eau et des milieux aquatiques,
 5 square Félix Nadar, F-94300 Vincennes, France

✉ nolwenn.bougon@onema.fr

✉ gaelle.deronzier@onema.fr



Remerciements

Nous remercions l'Onema pour le financement de l'étude, ainsi que le groupe de pilotage du projet, composé de représentants des différentes agences de l'eau, et les différentes personnes et organismes nous ayant fourni des données (tableau 1), en particulier N. Lamouroux et E. Sauquet d'Irstea.