

Conclusion générale

Ce travail visait à développer un modèle permettant d'estimer les apports d'azote en fonction des activités anthropiques rencontrées sur un bassin versant tout en intégrant la variabilité temporelle des phénomènes de crue en contexte méditerranéen. Les hypothèses du modèle, sa conceptualisation et la méthode de calage/vérification proposée devaient permettre une utilisation opérationnelle de cet outil sur des bassins de plusieurs dizaines de km².

Quatre bassins d'une cinquantaine de km² situés en amont des étangs de l'Or et de Thau ont été retenus pour la mise en œuvre du modèle. Il s'agit des bassins du Pallas, de la Vène pour l'étang de Thau et du Salaison et du Dardaillon pour l'étang de l'Or.

L'analyse des données de flux d'azote collectées sur les bassins d'étude conforte les résultats rencontrés dans la bibliographie concernant la dynamique des flux d'azote en contexte méditerranéen. Ainsi, les épisodes de pluie occasionnent des crues rapides caractérisées par une exportation massive d'azote. Ces bassins présentent des activités anthropiques variées qui se traduisent en terme de rejets par différentes formes d'azote et par des apports aux cours d'eau de type ponctuels et diffus.

Les spécificités des bassins en terme d'activités anthropiques et climatiques d'une part et l'objectif de développement d'un outil opérationnel d'autre part ont conduit à retenir plusieurs contraintes. Le modèle d'exportation devait ainsi :

- être adapté au contexte méditerranéen où les exportations d'azote sont prédominantes durant les crues rapides observées dans ce type de climat ;
- pouvoir être utilisé avec des données accessibles sur les bassins versants en terme de variables de forçage (pluie, température), de variables d'entrée (masses d'azote apportées sur les cultures, quantification des rejets ponctuels), de caractéristiques physiques (topographie, longueur du réseau hydrographique) et de caractéristiques anthropiques des bassins (occupation du sol, localisation des points de rejets) ;
- reposer sur un nombre limité de paramètres permettant de mener la phase du calage du modèle avec les seules chroniques de flux d'azote à l'exutoire.

En fonction de ces contraintes, les différentes approches existantes de modélisation pluie-flux d'azote ou pluie-concentration d'azote ont été analysées pour déterminer leur adéquation avec l'objectif recherché.

La majorité des modèles repose sur un pas de temps journalier. Or, l'intensité et le volume des précipitations ainsi que la taille des bassins d'étude sont à l'origine de réponses rapides en terme de flux d'azote, de l'ordre de quelques heures. De même, les modèles uniquement adaptés aux bassins versants agricoles ont été exclus puisque ces modèles sont incapables d'intégrer les rejets ponctuels observés sur les bassins étudiés. La contrainte liée à l'accessibilité des données ne permet pas de retenir les approches physiques. Le volume de données requis par ce type de modèle est incompatible avec les qualités opérationnelles recherchées. Enfin, certains modèles nécessitent le calage d'un grand nombre de paramètres. Cette étape de calage de ces modèles s'avère peu efficace avec les seules chroniques pluie-flux d'azote à l'exutoire d'un bassin.

Ces différents modèles analysés dans la bibliographie ne peuvent donc pas être retenus pour répondre à l'objectif recherché, cependant cette analyse a permis de proposer les premières pistes pour le développement du modèle d'exportation d'azote en contexte méditerranéen. Ce modèle d'exportation d'azote original, dénommé POL, a été développé pour reproduire et prévoir les exportations d'azote durant les périodes de crue et de basses eaux, avec un pas de temps variable selon les cas et dans une approche spatialisée.

Le modèle POL repose sur un découpage de l'espace en sous-bassins versants considérés comme les unités de production et en biefs de rivière constituant les unités de transport. Cette segmentation dépend d'une part de la structure du réseau hydrographique : position des sources et confluences de la rivière et d'autre part de la localisation des points de rejets ponctuels. Cette vision du bassin permet d'intégrer les différentes activités anthropiques dans le schéma de production et de transport des flux d'azote. Le comportement du bassin est assimilé à un ensemble de réservoirs correspondant à chaque unité. La production et le transport des masses d'azote sont calculés localement sur les différentes unités à l'aide de 2 paramètres F et T définis globalement sur le bassin. Le paramètre F traduit le délai d'influence de la pluie sur la production d'azote sur les sous-bassins versants et le paramètre T contrôle la dynamique du transport des flux d'azote dans les différents biefs de rivière. Les flux générés sur les sous-bassins versants dépendent également du stock d'azote potentiellement mobilisable lors d'un épisode de pluie. On suppose que cette grandeur, notée N, est uniquement liée à l'occupation du sol et aux pratiques culturales.

L'analyse des flux observés à l'exutoire des bassins a permis de distinguer deux comportements : un comportement de crise lors des épisodes pluvieux et un comportement de non crise entre les épisodes de pluie, qui sont intégrés dans le modèle. On distingue un fonctionnement de crise (ou événementiel) qui permet de générer un flux d'azote diffus lors des épisodes pluvieux et un fonctionnement de non-crise qui fournit un flux de base en fonction des rejets ponctuels en dehors des épisodes de crise. Le modèle peut être utilisé sur une succession de périodes de pluie en considérant des crises séparées par des périodes de non crise avec un flux de base constant.

Le modèle répond donc aux contraintes de départ. Sa conception repose sur des hypothèses simplificatrices, adaptées à l'objectif du travail et aux caractéristiques des bassins. Toutefois, le modèle présente des limites qu'il est important de souligner.

Ainsi, l'utilisation des chroniques de pluie au pas de temps horaire limite l'application du modèle aux seuls bassins équipés de pluviographes.

Ensuite, dans l'état actuel du développement du modèle, l'apport d'azote par la pluie n'est pas pris en compte, ce qui exclut l'application de ce modèle aux bassins naturels sur lesquels l'apport météorique est prédominant.

De plus, l'assainissement autonome étant peu répandu sur les zones d'étude, la composante diffuse de la pollution domestique n'a pas été intégrée dans le modèle. Les apports urbains, liés au ruissellement sur les surfaces imperméabilisées lors des épisodes de pluie, n'ont pas été pris en compte dans le modèle. Ce choix, qui est dû à la difficulté d'estimer ces apports sur les bassins, a pu peser sur les performances du modèle notamment sur le bassin urbanisé du Salaison.

Par ailleurs, la faible longueur des rivières des bassins d'étude a conduit à négliger les processus de dénitrification en rivière, ce qui limite l'utilisation du modèle sur des réseaux hydrographiques de longueurs inférieures à quelques dizaines de km.

Enfin, les apports d'azote depuis la nappe vers les eaux superficielles n'ont pas été pris en compte dans le modèle en raison des caractéristiques hydrogéologiques des bassins d'étude. Cette hypothèse limite l'utilisation du modèle sur des bassins pour lesquels ce mode d'apport n'est pas prédominant.

Le modèle POL en mode événementiel a été appliqué sur un bassin élémentaire pour étudier la sensibilité des variables de sortie aux valeurs des paramètres. Les deux variables de sortie du modèle retenues pour décrire le flux moyen généré durant un épisode de crise sont la masse totale exportée et la durée de l'épisode. L'exploration aléatoire du domaine de

définition des paramètres a été préférée à une exploration systématique pour l'analyse de sensibilité. Une méthode originale est proposée afin de déterminer le nombre de simulations nécessaire et suffisant pour une exploration du domaine des variables de sortie « masse et durée ».

L'analyse de sensibilité permet de conclure que les paramètres F et T du modèle ne sont pas redondants. Pour une valeur initiale du stock d'azote N, un couple « masse-durée » observé est reproduit par le modèle pour un couple unique des paramètres F et T. La masse s'avère peu sensible au découpage de l'espace en terme de nombre et de longueur de biefs, et à la répartition du stock initial d'azote N. Ce faible degré de sensibilité s'explique par l'hypothèse de conservation de l'azote dans le réseau hydrographique. A l'opposé, la durée de crise est très sensible au découpage de l'espace et à la répartition du stock initial d'azote N sur le bassin.

Le modèle POL a ensuite été mis en œuvre sur trois des quatre bassins d'étude, à savoir les bassins du Pallas, de la Vène et du Salaison. Cette étape permet de définir et de caractériser les unités du modèle en fonction de la morphologie du bassin, de la géométrie du réseau hydrographique et de son occupation du sol.

Le calage du modèle en mode événementiel a été effectué sur l'ensemble des crues disponibles. Ce calage, crue par crue, met en évidence le problème d'équifinalité qui correspond à l'existence de multiples jeux des paramètres F et T et du stock d'azote initial N fournissant des résultats corrects à l'exutoire. Une méthode, dénommée GLUEP, est proposée pour analyser la distribution des différents jeux F,T et N. Cette méthode combine l'approche stochastique du calage de la méthode GLUE et l'efficacité de la méthode d'optimisation de POWELL en mode local.

Les résultats du calage permettent de retenir une valeur unique du paramètre F sur l'ensemble des 15 crues échantillonnées sur les trois bassins. Les valeurs du paramètre T et du stock initial d'azote N obtenues à l'issue de la phase de calage sont très variables selon les crues.

Les simulations du modèle POL, soumis à une succession d'épisodes de pluie, ont ensuite été confrontées aux données observées lors du suivi régulier des bassins d'étude.

Pour appliquer le modèle sur une succession d'épisodes de pluie, les valeurs de T et de N ont dû être déterminées au début de chaque épisode de crue. Des relations permettant de relier les valeurs de T et N obtenues lors du calage en fonction de caractéristiques climatiques, physiques et anthropiques des bassins ont ainsi été proposées. Une relation commune aux trois bassins permet ainsi d'estimer la valeur de T obtenue lors du calage en fonction des conditions climatiques antérieures. Une relation établie sur chaque bassin permet d'estimer les valeurs de N obtenues lors du calage en fonction d'un descripteur D_p intégrant l'occupation du sol et les pratiques culturales. La pertinence des relations obtenues a été analysée en comparant les valeurs simulées par le modèle, pour la valeur de F fixée lors du calage et pour les valeurs T et N estimées par les relations de précaractérisation, par rapport aux masses et durée observées. Cette analyse met en évidence un écart relatif moyen sur les 15 crues de l'ordre de 40 % sur les masses et de 20 % sur les durées. Ce degré d'incertitude élevé est toutefois acceptable pour un premier diagnostic des apports des bassins vers les lagunes. L'analyse des relations entre valeurs des paramètres calés et les éléments de contextes (climatique, cultural, ...) doit être poursuivie pour diminuer les incertitudes.

Une première tentative de transposition du modèle POL sur le bassin du Dardaillon offre des résultats encourageants pour la simulation des flux d'azote en basses eaux et lors des épisodes de crue. La fréquence limitée des observations de validation implique de poursuivre l'étude de la transposition du modèle. L'application du modèle sur l'ensemble des sous-bassins du

bassin de l'Or et de celui de Thau permet de fournir une première estimation des flux annuels exportés. Les résultats obtenus sur le bassin de l'Or, mettent en évidence la contribution prédominante des rejets ponctuels sur le flux superficiel annuel. Sur le bassin de Thau, les rejets diffus occasionnés par le ruissellement lors de épisodes pluvieux constituent l'apport prédominant d'azote vers la lagune.

Ce travail constitue donc une nouvelle approche de modélisation des exportations d'azote depuis les bassins versants méditerranéens en terme de segmentation de l'espace, de conceptualisation des processus et de méthode de calage/vérification retenue. Plusieurs pistes de travail peuvent être proposées pour poursuivre cette étude.

La phase incontournable pour la poursuite du développement du modèle POL consiste à vérifier sa transposabilité sur d'autres bassins. Cette piste de développement nécessite de retenir des bassins versants sur lesquels les hypothèses simplificatrices du modèle sont acceptables.

Une analyse préalable des données doit être menée pour s'assurer que les informations requises par le modèle existent et que leur précision thématique et cartographique sont suffisantes pour son application. La vérification du caractère transposable du modèle nécessite également l'existence de chroniques des flux d'azote à l'exutoire du bassin versant pour disposer de données de contrôle.

La transposabilité du modèle événementiel est vérifiée si les résultats obtenus, avec la valeur de F déterminée lors du calage et les valeurs de T et de N estimées par les relations de précaractérisation, reproduisent correctement les exportations d'azote sur un nouveau bassin. La relation de précaractérisation du paramètre T et la valeur unique du paramètre F ont été obtenues sur trois bassins présentant des caractéristiques physiques et anthropiques différentes. Ceci permet d'espérer une utilisation directe sur un nouveau bassin méditerranéen des valeurs de F et T estimées précédemment. Pour le stock initial N, une relation différente a été établie sur les trois bassins en fonction du descripteur Dp. La régionalisation du stock d'azote implique une analyse complémentaire, sur un plus grand nombre de bassins, de la relation entre N et le descripteur Dp. L'utilisation actuelle du descripteur Dp suppose que l'évolution du stock d'azote dépend uniquement des doses apportées par l'agriculture et de la durée séparant l'application et l'épisode de pluie. Il sera sans doute nécessaire de modifier le descripteur Dp en fonction d'autres éléments de contexte (prise en compte de l'urbain, simplification de la nomenclature d'occupation du sol, compléments sur les pressions agricoles).

De plus, il est indispensable de vérifier la capacité du modèle à reproduire les flux d'azote à la fois globalement à l'exutoire mais surtout en interne sur le bassin. La spatialisation des observations sur le bassin peut ainsi répondre au problème d'équifinalité rencontré lors du calage des modèles distribués en général et du modèle POL en particulier. Ainsi, le jeu de paramètres retenu après calage du modèle POL doit permettre de reproduire correctement le comportement global et interne du bassin.

La répartition des activités anthropiques sur le bassin doit guider le choix des points de mesure pour disposer, dans la mesure du possible, de zones homogènes en terme d'occupation du sol. Une première analyse des activités anthropiques permet de retenir une quinzaine de points sur le bassin de l'Or et autant sur le bassin de Thau. Outre les grandes zones homogènes en terme d'occupation du sol, ces points permettraient d'analyser la dynamique des flux d'azote des principales stations d'épurations sur ces deux bassins. Pour ne pas alourdir la phase d'analyse des échantillons, un prélèvement cumulé durant l'épisode de crue peut être envisagé. L'analyse de ce prélèvement conduit à déterminer la concentration

moyenne en azote représentative de l'épisode de crue. L'acquisition simultanée de l'hydrogramme de crue permet d'accéder aux deux variables de calage du modèle POL : masse exportée durant l'épisode de crue et durée de la crue.

Le modèle dans son état actuel de développement porte uniquement sur l'élément azote. La structure du modèle peut être valorisée pour reproduire l'exportation d'autres éléments pour lesquels les eaux superficielles sont un vecteur de contamination prédominant. Dans cette optique, les fonctions de production et de transfert vont nécessiter de probables modifications pour intégrer les processus liés au devenir de l'élément pris en compte. Selon les processus en jeu, des caractéristiques physiques et anthropiques supplémentaires pourront être intégrées lors de la segmentation spatiale du bassin, en vue de sa modélisation.

La dernière piste de poursuite de ce travail consiste à réfléchir au couplage du modèle POL avec les modèles de fonctionnement des milieux aval. Le modèle d'exportation peut permettre d'améliorer l'estimation des apports d'azote qui constituent une des variables d'entrée prédominante dans ces modèles. Cette réflexion sur le couplage peut porter sur le choix des variables de sortie du modèle POL « masse exportée et durée des crises » et sur la prise en compte de l'azote total sans distinguer les différentes formes. Sur les bassins d'étude, cette réflexion peut être menée dans le cadre du couplage avec les modèles de fonctionnement des lagunes situées à l'aval. Des modèles de fonctionnement de ces milieux sont actuellement développés, notamment sur l'étang de Thau. Ces approches de modélisation requièrent une estimation de la dynamique des apports des bassins et notamment de l'azote qui contribue au phénomène d'eutrophisation. Par conséquent, le modèle d'exportation d'azote pourrait constituer un module permettant de préciser les apports des bassins en azote dans un modèle de gestion des ressources en eau sur les milieux aval.