Modélisation de l'eutrophisation en Loire

Modèle POLUPA

L.-C. Oudin

Agence de bassin Loire - Bretagne

1. L'eutrophisation dans la Loire et ses affluents

La Loire est chaque année envahie par du phytoplancton avec une intensité croissante de l'amont vers l'aval. Les variations interannuelles sont modérées sauf parfois dans la partie aval comme le montrent les profils de chlorophylle *a* en 1987 et 88 ci-dessous.

La chlorophylle *a* est en effet le pigment photosynthétique qui est présent dans toutes les espèces d'algues phytoplanctoniques (1). La mesure de la concentration en chlorophylle *a* est donc utilisée pour apprécier la quantité globale d'algues en suspension.

Les principaux affluents de la Loire réagissent de façon très variée :

- l'Allier, la Vienne et la Creuse ne sont que faiblement eutrophisés, sauf en année exceptionnelle comme 1989 ;
- l'Indre, le Cher et le Loir présentent une eutrophisation extrêmement variable d'une année sur l'autre, les années à eutrophisation très intense n'étant pas les mêmes pour chaque rivière : 1986 pour l'Indre, 1985 pour le Cher et 1987 pour le Loir ; 1984 étant cependant une année de forte eutrophisation pour les trois rivières ;
- la Mayenne et la Sarthe présentent une situation intermédiaire en intensité et en variabilité.

La Loire apparaît ainsi comme un immense entonnoir de 1 000 km de long où convergent en se compensant parfois mutuellement 130 000 km² de bassins versants

divers. Les cartes ci-dessous des valeurs moyennes et maximales de chlorophylle *a* mesurées de 1984 à 1987 illustrent cette situation.

Avec près de 10 ans de mesures mensuelles de chlorophylle *a* en rivière, l'agence de bassin ne constate pas d'augmentation significative des concentrations. Si l'on cherche à apprécier l'évolution depuis 1980 de l'ensemble des mesures faites chaque année en Loire avec la même fréquence, on constate en effet une certaine variation interannuelle liée à l'ensoleillement, la température et l'hydrologie, mais sans tendance à la hausse. Il faut en effet reculer de 50 ans et plus pour trouver dans les mémoires l'image

English summary on next page

Modelling of eutrophication in the river Loire — the POLUPA model

Over the last ten years the Loire-Bretagne basin agency has been studying the invasion by phytoplanktonic eutrophication of the Loire and its tributaries, by means of a mathematical model called POLUPA which concerns 3 500 km of water ways broken down into 10 km stretches. It is made up of six sub-models : hydrological, water bound, transport, light, temperature and biological.

Five possible patterns for dephosphatization of waste have already shown that in order to be efficient increased dephosphatization is necessary in the upstream regions and secondly each region must be dephosphatized in as uniform a way as possible, which highlights the need to reduce phosphorus in washing powders. These patterns have also enabled an initial dephosphatization programme to be defined concerning urban waste. This programme is at present being carried out.

des eaux de la Loire particulièrement transparentes et pures. On leur attribuait même à la fin du XVIII^e siècle des propriétés thérapeutiques. Dans l'intervalle les types et les densités d'occupation des sols en zone urbaine et en zone rurale ont été profondément modifiées. L'utilisation et la contamination de l'eau ont également été bouleversées : engrais minéraux, déjections animales, produits phytosanitaires, développement industriel, consommation de détergents qui étaient inexistantes il y a 40 ans... ; avec une augmentation générale des rejets.

Il est admis que c'est l'enrichissement des eaux en matières nutritives notamment azotées et phosphorées qui est à l'origine de la croissance de l'eutrophisation. Mais les mesures régulières faites par l'agence en rivière ne remontent, au mieux, qu'à 1971.

— De 1971 à 1986, les concentrations de nitrates ont été multipliées par 3 ;

— Les phosphates mesurés depuis 1971 et le phosphore total mesuré depuis 1982 apparaissent soit stables, soit en augmentation significative (Loire amont et Allier).

C'est dans ce contexte que l'agence s'est posée la question de savoir sur quel paramètre agir pour réduire l'eutrophisation. A long terme, la seule réponse génératrice d'équilibre consiste à réduire tous les excès, aussi bien d'azote que de phosphore.

A court terme ou moyen terme il faut choisir les actions qui sont à la fois : réalisables, capables de réduire signi-

ficativement l'eutrophisation, et dénuées d'effets secondaires négatifs.

La réduction des apports d'azote ne peut être espérée à court terme pour la part diffuse d'origine agricole. Par ailleurs, on peut craindre si l'on réduit massivement les rejets, de favoriser les cyanophycées dont certains sont capables de s'alimenter à partir de l'azote de l'air. La réduction des apports de phosphore paraît plus aisée. Le phosphore biodisponible rejeté en rivière vient en effet majoritairement de sources ponctuelles comme le montre le tableau ci-après.

Flux de phosphore biodisponible rejetés dans les bassins de la Loire et de la Vendée (2)		
Source	Flux annuel t/an	%
Fertilisants minéraux	300 à 2 300	3 à 18 %
Elevages	900 à 1 900	10 à 14 %
Rejets domestiques	5 800	60 à 43 %
Rejets industriels	2 600 à 3 300	27 à 25 %
TOTAL	9 600 à 13 300	100 %

Les rejets domestiques et industriels représentent 68 à 87 % du flux total annuel. En période d'étiage cette proportion augmente encore car les rejets de l'agriculture et de l'élevage sont liés au ruissellement et sont donc plus importants en période de pluie.

Le phosphore apparaît ainsi comme le meilleur facteur de maîtrise de l'eutrophisation, bien qu'il ne faille pas sous-estimer deux difficultés qui seront soulevées par la suite :

— la dispersion d'un grand nombre de rejets ponctuels : petites communes et élevages hors sols,

— l'aménagement des rivières avec des plans d'eau de toutes dimensions où la participation des sédiments à l'alimentation des algues, dans le plan d'eau ou à l'aval, peut devenir importante. Du fait des sources internes de phosphore ainsi créées, une politique de déphosphatation des rejets ponctuels peut alors devenir inefficace.

L'agence a donc décidé de fonder sa stratégie de lutte contre l'eutrophisation en rivière dans le bassin de la Loire sur la réduction des rejets de phosphore urbain et indus-

triel. Cela l'a conduit à développer une modélisation mathématique qui est présentée ci-dessous. Cette stratégie s'accompagne d'une politique de réduction des rejets

d'azote [2] justifiée autant par la lutte contre l'eutrophisation que par la lutte contre les teneurs en nitrates dans l'eau potable.

2. Le modèle POLUPA

2.1. Pourquoi un modèle

Agir sur les rejets de phosphore pour lutter contre l'eutrophisation suppose que l'on connaisse la relation phosphore-algue, que l'on sache prédire quantitativement la réduction de croissance des algues qui sera induite par un scénario hypothétique de réduction des rejets de phosphore. Or, il n'y a pas de relation simple entre phosphore et croissance des algues, essentiellement pour deux raisons :

1. Le processus par lequel le phosphore, le carbone et l'azote entraînent la croissance des algues comporte deux phénomènes de cinétiques différentes : l'assimilation (les algues disposent de réserves de nutriments qu'elles sont capables de remplir en quelques heures), la croissance (les algues croissent et se multiplient en quelques jours à partir des éléments qu'elles ont accumulés en réserve).

2. Le phosphore rejeté a tendance naturellement à se combiner au calcium et à précipiter ou à s'associer aux particules en suspension et à sédimenter progressivement au fond de la rivière, à partir duquel il peut être remis en suspension. Au terme de ces échanges on observe que 70 à 80 % [3] [4] du phosphore rejeté reste en étiage piégé dans les sédiments. Mais ce même phosphore peut, s'il est rejeté dans la rivière en un endroit où se trouvent des quantités significatives ou importantes d'algues carencées en phosphore, être très rapidement absorbé par les algues et participer largement alors au processus d'eutrophisation. On voit donc que le phosphore rejeté contribue à l'eutrophisation dans des proportions très variables, selon les circonstances qui influent sur sa précipitation ou son absorption par les algues.

On comprend ainsi qu'il n'y a pas une relation simple entre les quantités de phosphore rejeté et l'eutrophisation qu'elles entraînent.

Cela est illustré par les profils ci-dessus où apparaissent le long de la Loire les concentrations maximales en P total et en chlorophylle *a* en 1987.

La concentration en phosphore total reste du même ordre de grandeur sur tout le cours de la Loire. La concentration en chlorophylle *a*, au contraire, augmente fortement de l'amont vers l'aval.

Pour expliquer la concentration en chlorophylle *a*, il ne suffit pas de connaître les quantités de phosphore. Il faut aussi tenir compte de la vitesse de sédimentation et des cinétiques d'absorption, de croissance et de transport des algues. Cela revient notamment à introduire le temps. Le graphique ci-dessous donne une idée des temps de séjour en étiage dans chaque tronçon. Pour rendre le graphique lisible, les temps de séjour dans les tronçons des retenues de Grangent et de Villerest, de l'ordre de 100 jours chacun, n'y figurent pas. L'importance de ces temps montre la coupure qu'ils opèrent entre l'amont et l'aval.

Dans ces conditions, l'agence a considéré que la modélisation mathématique était l'outil nécessaire pour tenir compte de l'ensemble de ces phénomènes sur de grands bassins versants.

Le modèle appelé POLUPA (Politique de lutte contre le Phosphore et l'Azote) a été développé pour l'agence entre 1984 et 1986 par la société BETURE avec le concours du CNRS de Toulouse (A. DAUTA) de l'Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse et du Laboratoire d'Hydrologie Mathématique de Montpellier.

2.2. Les questions posées

Les principales questions auxquelles une modélisation du phénomène doit permettre de répondre concernant l'importance des réductions de phosphore à obtenir et leur répartition ; elles sont schématiquement regroupées en quatre points :

1. Quel est l'ordre de grandeur de la réduction de phosphore qu'il faut atteindre pour obtenir différents objectifs

de réduction de l'eutrophisation, sachant que l'agence a fixé [3] : un objectif à moyen terme : 60 mg CHa/m³, un objectif à long terme : 15 mg CHa/m³.

2. Pour réduire l'eutrophisation en rivière à l'aval d'un point X de rejet de phosphore, il est possible de privilégier :
— soit la réduction des rejets de phosphore au point X. Les algues qui passent dans la rivière à cet endroit auront alors moins de phosphore pour alimenter leur croissance dans les jours qui suivent ;
— soit la réduction des rejets de phosphore situés à l'amont X, ce qui diminuera la quantité d'algues arrivant en X. Celles-ci absorberont donc en moins grande quantité le phosphore qui y est rejeté et celui-ci participera alors en plus grande proportion au processus de sédimentation, compte tenu de la cinétique locale de précipitation.

Quelle est, selon les lieux, celle des deux approches qui est la plus efficace du point de vue de la quantité de phosphore à retirer pour atteindre le même objectif de réduction de l'eutrophisation ?

3. Est-il plus efficace, selon les régions, de n'agir que sur les sources principales de phosphore ou d'agir de façon plus uniforme sur l'ensemble des sources réparties le long du cours d'eau ?

4. Compte tenu des réponses aux questions précédentes et des contraintes pratiques d'une politique d'intervention (état des réseaux, rendements de déphosphatation, perspectives de réduction du phosphore des lessives...) quel est le scénario optimal d'action ?

2.3. La structure du modèle

POLUPA est un modèle unidimensionnel portant sur la Loire et ses principaux affluents : Allier, Cher, Indre, Gartempe, Creuse, Clain, Vienne, Mayenne, Sarthe et Loir. Au total, 2 900 kms de cours d'eau représentés sur la carte ci-dessous.

Il est constitué de 4 modèles principaux : hydrologique, hydraulique, transport et biologique, ainsi que de deux modèles simplifiés : température et lumière, articulés comme indiqué ci-dessous. Les cours d'eau sont découpés en tronçons dont la longueur est égale ou voisine de 10 kms. A chaque intervalle de temps (précisé par la suite) le modèle calcule les caractéristiques de l'eau du tronçon en fonction des différents apports et de l'évolution physique, chimique et biologique dans le tronçon.

Le modèle hydrologique calcule en période d'été (200 jours, du 31 mars au 16 octobre), chaque jour, sur chacun des tronçons de 10 kms, le débit moyen à partir des données de 56 stations de jaugeage. L'interpolation est faite proportionnellement aux surfaces des bassins versants correspondants à chaque tronçon. En complément, un modèle de propagation des soutiens d'été permet de calculer l'effet, jour par jour, des lâchers pratiqués par les barrages de Villerest et de Naussac.

Le modèle hydraulique est construit avec des tronçons différents du modèle hydrologique. Les limites des tronçons ont en effet été placées en des points singuliers : stations de jaugeage, confluence, barrage, rupture de pente. Les 323 tronçons ainsi définis sont de trois types :

- les tronçons à écoulement libre (E) où les calculs sont faits à partir d'une station de jaugeage réelle ou fictive (c'est-à-dire reconstituée à partir de profils en travers espacés de 1 km, 295 profils ont été établis sur la Loire). Il existe 147 tronçons de ce type.
- Les tronçons réservoirs (R) pour les retenues importantes. Il en existe 9 : Grangent, Villerest et Blois sur la Loire, Vichy sur l'Allier, Rochebut sur le Cher, Eguzon et La Roche aux Moines sur la Creuse, Jousseau et La Roche sur la Vienne. Les calculs sont faits à partir des relations volume-surface-hauteur spécifiques à chaque retenue.

• Les tronçons mixtes (ER), il en existe 169 découpés eux-mêmes en une succession de sous-tronçons de type E pour les zones à écoulement libre et de type R pour les zones aménagées : plans d'eau, biefs, seuils ou dérivations.

En moyenne, plus de 3 zones aménagées ont été retenues pour chaque tronçon mixte.

Le graphique ci-après situe les cours d'eau en fonction de leur pente et de leur degré d'aménagement.

Le modèle hydraulique calcule alors chaque jour pour chacun des 323 tronçons, les valeurs moyennes de vitesse, temps de séjour et profondeur à partir des débits calculés par le modèle hydrologique, de la géométrie des tronçons et des lois hydrauliques constatées aux stations de jaugeage.

Le modèle transport calcule toutes les heures dans chaque tronçon les concentrations d'azote (NO_3 , NH_4 , Norg), de phosphore (PO_4 , Porg) et de chlorophylle a (Chla) à partir : des apports des rejets, des apports du ou des tronçon(s) affluent(s), des départs vers le tronçon aval, de la variation de volume du tronçon.

L'intervalle de temps de 1 h est divisé par 4 si le temps de séjour dans le tronçon est inférieur à 4 h.

Le modèle biologique, largement inspiré des travaux d'A. DAUTA [5], fonctionne avec le même intervalle de temps que le modèle transport, selon le schéma ci-après dans lequel les équations sont figurées par des flèches. On y distingue :

— le compartiment des algues dans lequel sont dissociés le phénomène d'assimilation de l'azote et du phosphore et

le phénomène de croissance des algues, par l'introduction de quotas d'azote et de phosphore qui représentent les réserves de nutriments que les algues peuvent stocker en quelques heures pour croître ensuite dans les jours qui suivent.

Le modèle simule une seule espèce d'algue à large spectre thermique. La température, l'intensité lumineuse, la profondeur du cours d'eau conditionnent la croissance des algues, de même que la respiration des algues vient contrarier l'assimilation du carbone par photosynthèse ;

— Le compartiment des algues décançées incluant la mortalité et la sédimentation des algues, ainsi que l'azote et le phosphore contenus dans la masse de ces algues, qui participent ensuite à l'approvisionnement de la colonne d'eau en N et P par un processus de minéralisation ;

— les apports à la rivière dans lesquels ont été distingués d'une part les apports d'azote et de phosphore minéral sous forme d'ammonium, de nitrate et de phosphate, d'autre part les apports d'azote et de phosphore organiques ;

— le compartiment eau avec les formes minérales d'azote et de phosphore dans la colonne d'eau alimentées par les apports d'azote et de phosphore minéral, par la minéralisation de l'azote et du phosphore organique des rejets et enfin par la minéralisation de la fraction organique détritifique des algues. A ce compartiment est associé un processus de nitrification et de dénitrification ;

— la sédimentation du phosphore minéral contenu dans la colonne d'eau et la sédimentation de l'azote et du phosphore organique qui entrent en compétition avec leur minéralisation, les transformant en azote et en phosphore minéral dans la colonne d'eau. Il est à noter que ces fractions sédimentées ne participent plus à l'alimentation de la colonne d'eau, c'est une hypothèse du modèle POLUPA qui a été confirmée notamment par des expérimentations plus récentes faites dans la Vilaine.

L'ensemble des équations du modèle figurent dans le rapport de synthèse BETURE [6]. Elles traduisent notamment que :

— le taux de croissance des algues dépend de la température et des quotas cellulaires ;

— la sédimentation des algues est liée à l'état physiologique de la population, faible pour les cellules dont les réserves sont pleines, elle augmente quand leurs réserves s'épuisent ;

— le taux de photosynthèse augmente rapidement avec l'intensité lumineuse, atteint une saturation à l'intensité optimale puis décroît au-delà pour traduire la photoinhibition des cellules.

Le modèle température retenu a été volontairement simplifié : température uniforme sur l'ensemble du bassin avec un minimum de 6 °C à mi-février et un maximum de 30 °C à mi-août. Dans une version mise à jour récemment du modèle, il est devenu possible de simuler la température tronçon par tronçon par modification de constantes dans une fonction sinusoïdale. L'effet d'importants rejets d'eaux chaudes peut ainsi être pris en compte.

Le modèle lumière est également simple et uniforme sur l'ensemble du bassin :

— calcul de la photopériode en fonction du jour de l'année : mini 8 heures en janvier, maxi 16 heures mi-juillet ;
 — calcul de l'intensité lumineuse fonction de la photopériode, d'une intensité maximale variant entre 110 et 350 W/m² selon le jour de l'année, de la nébulosité (fonction aléatoire pouvant atteindre 40 % de l'intensité), d'une nébulosité complémentaire aléatoire par tronçon (10 %), d'un coefficient de réflexion de 0,45.

Dans la version mise à jour récemment, il est possible de simuler l'intensité lumineuse, tronçon par tronçon par modification de constantes dans leur fonction sinusoïdale.

La simplicité des modèles température et lumière était justifiée par le fait que l'on n'observait pas, d'une année à l'autre, de variation significative dans l'abondance du phytoplancton.

3. Fonctionnement du modèle

3.1. Les données

Données hydrologiques : ces données ont été :

- Les débits quotidiens moyens sur 56 stations de jaugeage.

Ils sont apparus cohérents à l'exception de la Maine à Angers où le jaugeage donnait un débit très largement supérieur : d'une part à la somme des débits des 3 affluents, d'autre part à la différence des débits de la Loire entre l'amont et l'aval de la confluence de la Maine. Cette station de jaugeage n'a donc pas été retenue.

- L'évaluation journalière de la réserve d'eau de chacune des 9 retenues qui permet de calculer la variation du débit introduit dans le tronçon aval par les manœuvres du barrage.

- Les débits prélevés dans les cours d'eau n'ont pas été introduits. Ils contribuent à faire apparaître parfois un débit aval inférieur au débit amont.

Données géométriques et hydrauliques : Elles ont toutes été acquises à l'occasion de la réalisation du programme POLUPA.

- 295 profils en travers sur la Loire espacés de 1 km ont été calculés à partir des données du Service Hydrologique Centralisateur.

- La géométrie de chaque tronçon ou sous-tronçon : longueur, pente, largeur moyenne du lit mineur à l'étiage, ainsi que le coefficient K de Strickler ont été définis à partir de données cartographiques au 1/25000, de photos aériennes et d'enquêtes auprès des SRAE et des délégations régionales du conseil supérieur de la pêche.

- 546 plans d'eau de faible importance (digue, biefs de moulins) ont été recensés à partir des cartes au 1/25000^e et définis par : la hauteur de chute, la largeur du seuil et la longueur de la retenue.

Qualité des eaux : Les données sont issues : 1. des réseaux permanents de mesure de la qualité des eaux gérés par l'agence, dans lesquels la chlorophylle *a* est mesurée depuis 1976 et le phosphore total depuis 1982 ; 2. du

réseau de l'inventaire national de la qualité des eaux qui a fonctionné en 1971, 76 et 81 ; 3. d'un réseau supplémentaire qui a fonctionné en 1984 pour les besoins du projet POLUPA.

Les prélèvements sont faits à fréquence mensuelle. Parmi les paramètres analysés, ceux qui intéressent ce projet sont : pH, O₂ dissous, température, NO₂, NO₃, N_{tot}, NH₄, PO₄, P total, Ca, Mg, CH_a.

Les résultats ont été introduits dans le modèle en calculant les valeurs quotidiennes par extrapolation linéaire pour obtenir chaque jour la qualité des tronçons amont. Ils ont été extrapolés linéairement entre deux tronçons faisant l'objet de mesures pour calculer les valeurs à chaque tronçon qui ont servi à initialiser le modèle. Il était ensuite possible de comparer le résultat d'un scénario aux valeurs réelles mesurées. C'est ce qui a été fait pour caler le modèle comme nous le verrons ci-dessous.

Données biologiques : Des mesures de fertilité potentielle ont été effectuées en 26 points et des mesures de quotas en 24 points pendant l'été 1984, de juillet à octobre. Le suivi des quotas (ou stocks internes des algues) permet de connaître l'état trophique de la population : si elle est affamée (quota minimum) donc susceptible d'assimiler du phosphore (s'il s'agit du quota phosphore) ou si elle est gavée (quota maximum) et alors prête à se multiplier à la vitesse maximale. Deux protocoles différents décrits par DAUTA ont servi à calculer :

- d'une part les quotas minimum (Q₀) et maximum (Q_m) relatifs à une espèce : 1. Obtention d'une culture à quota maximal Q_m par mise en incubation sous conditions optimales dans un milieu riche en nutriments ; 2. Suivi de la décroissance d'une culture, jusqu'à obtention du quota minimal Q₀, par incubation en milieu riche, mais carencé en nutriment relatif au quota considéré ; 3. Suivi de la croissance après l'ajout d'une microdose de nutriment, étudié jusqu'à l'obtention de l'arrêt de cette croissance ;
- d'autre part le quota moyen (Q_t) d'une population à l'instant *t* et le quota minimum correspondant : 1. Suivi de la décroissance de la population jusqu'à obtention du quota minimal ; 2. Parallèlement suivi de la décroissance de la même population après ajout d'une microdose de nutriment, jusqu'à obtention du quota minimal ;
- les quotas introduits dans le modèle aux stades d'initialisation ont été les quotas mesurés ou à défaut de mesure, un quota moyen (0,5).

Données pollution : Elles ont été obtenues à partir des fichiers de l'agence :

- fichier des rejets domestiques dans lequel la pollution de chacun des 5 535 communes est calculée en retenant 4 g de phosphore, 15 g d'azote et 57 g de matières organiques par jour et par habitant ;
- fichier des rejets industriels (3500) dans lequel la pollution est calculée forfaitairement ou, pour la plupart des rejets importants, déterminée à partir de mesures ;
- fichier des stations d'épuration (2164) donnant les quantités de pollution soustraites.

Le traitement des données pollution a tout d'abord été effectué par commune, mais les calculs conduisaient

parfois à des flux de phosphore retirés supérieurs aux flux produits. Cela a permis de détecter et de corriger un certain nombre d'erreurs liées la méconnaissance des points de rejet ou des raccordements aux stations d'épuration. Les types d'erreurs ont été détaillés dans le rapport BETURE [6]. La solution retenue a ensuite été de regrouper les flux par zone hydrologique, cela permet de tenir compte sans en avoir connaissance dans le détail de tous les transferts de flux intercommunaux à l'intérieur d'une même zone hydrologique.

Plus récemment un outil informatique a été spécialement créé pour générer les flux de pollution, chaque année, pour chaque zone hydrologique, à partir des différents fichiers de l'agence (fichier résultant de 12 600 lignes et 19 344 enregistrements). Les données obtenues ont encore été améliorées en introduisant les résultats de la totalité des suivis des stations d'épuration pour obtenir des quantités de phosphore et d'azote actuellement soustraits, proches de la réalité. Le modèle permet également de simuler la variabilité des rejets dans le temps (arrêt d'usine, diminution de population, problèmes sur stations d'épuration), ce qui n'était pas le cas auparavant.

Faute d'une connaissance suffisante des flux, les rejets diffus n'ont pas été introduits dans le modèle.

Pour tenter d'apprécier la confiance que l'on peut accorder à nos données, nous avons cherché les circuits qui sont connus ou mesurés parmi tous les circuits des rejets ponctuels de phosphore. Les flux bruts sont estimés à partir de ratios forfaitaires. Parmi les flux nets, seuls les flux (c) et (d) du schéma ci-dessous sortant des stations d'épuration font l'objet de mesures. Les rejets directs (b) et (e) sont le plus souvent mal connus (déversoirs d'orages) ou même non identifiés (rejets épisodiques dans les circuits d'eaux pluviales). Les rejets dispersés ou épandus n'aboutissent, pour ce qui concerne le phosphore, qu'à un taux de rejet très faible vers les cours d'eau (a) et (f).

Si les flux bruts sont à peu près correctement estimés, les calculs que nous avons fait, qui en déduisent la pollution soustraite par les stations d'épuration, ont tendance à surestimer le flux net arrivant en rivière. Ils négligent en effet la dispersion et la rétention par le sol des rejets épars. Or, la population est répartie sur le bassin Loire-Bretagne en un grand nombre de communes, parfois de très faible importance : 33 % de la population totale se répartit dans des communes de moins de 2 000 habitants et 52 % dans des communes de moins de 5 000 habitants. C'est une observation rassurante si une part importante des rejets de ces communes traversent le sol en y laissant fixé l'essentiel du phosphore. C'est par contre une observation inquiétante dans le cas contraire car il sera très difficile d'agir efficacement sur un grand nombre de rejets dispersés.

Si l'on s'intéresse non plus à la répartition des populations, c'est-à-dire des flux de phosphore et d'azote, par commune, mais à la répartition par zone hydrologique, on constate que 10 % de la surface du bassin (100 zones) rejette 60 % du phosphore et de l'azote. Cela a conduit à individualiser à l'intérieur du fichier des rejets les principaux rejets identifiés (en fait les zones hydrologiques correspondantes) sur lesquels des hypothèses fines d'élimination de pollution ont été faites.

3.2. Le calage

Le calage du modèle consiste à simuler une situation dont on connaît les données et le résultat et à ajuster certains paramètres du modèle pour obtenir un résultat simulé aussi voisin que possible du résultat mesuré.

Après l'étape de calage devrait intervenir l'étape de la validation qui consiste à vérifier que le calage reste satisfaisant pour une autre situation significativement différente des données et des résultats. Or, nous ne disposons pas de cette situation différente du point de vue des données phosphore et du résultat en chlorophylle *a*. On a vu en effet qu'on ne peut mesurer d'évolution significative du degré d'eutrophisation des rivières depuis plusieurs années. Il n'est donc pas possible de valider le modèle du point de vue de la relation phosphore-chlorophylle *a*.

Le calage effectué sur l'année 1982 a consisté à : ajuster les coefficients de sédimentation du phosphore tirés de la littérature, appliqués aux biefs modélisés, et à adopter des coefficients globaux de sédimentation du phosphore pour chaque affluent non modélisé, ce qui revient à retenir des taux d'abattement des rejets, fonction de leur distance au réseau modélisé.

Les résultats du calage figurent sur les graphiques ci-après (page suivante) où apparaissent les valeurs moyennes et maxi résultant du modèle ainsi que les valeurs mesurées pendant les 4 mois de l'été 1982.

Le calage du phosphore total apparaît globalement satisfaisant avec toutefois une certaine sous-estimation du phosphore mesuré en Loire et une certaine surestimation du phosphore mesuré dans le Cher. Le calage de la chlorophylle *a* apparaît également satisfaisant malgré la dispersion assez grande des valeurs mesurées. Une rivière cependant apparaît mal calée : Le Loir où le modèle prévoit, à tort, de très faibles valeurs pour la chlorophylle *a*.

Les causes de l'imprécision du calage sont diverses :

- les données sont entachées d'erreurs, on a tenté au paragraphe précédent d'analyser la qualité des données pollution ;
- les points de mesure en rivière sont peu nombreux (36 pour 323 tronçons) ;
- les mesures sont peu fréquentes : une par mois, et déjà très dispersés (chlorophylle *a*).

On est donc conduit à se satisfaire d'un calage dans lequel les valeurs simulées sont du même ordre que les valeurs mesurées. Cela limite d'emblée la précision des résultats obtenus avec des scénarios de réduction du phosphore : ce sont des ordres de grandeur de résultats que l'on pourra prévoir, non des valeurs précises.

Le mauvais calage de la chlorophylle *a* sur le Loir pose cependant un autre problème qu'une modélisation complémentaire prévue prochainement à partir d'analyses et de mesures récentes du débit pourra peut-être résoudre. Mais il est possible que le Loir, rivière à cours lent, qui est très aménagée comme on l'a vu en 2.3, soit le siège d'échanges eau-sédiments dans lesquels les sédiments sont une source interne significative d'alimentation des algues de la colonne d'eau. Le modèle POLUPA qui néglige ce phénomène sauf pour le phosphore des algues décantées, pourrait n'y être plus applicable. C'est d'ailleurs là une des limites du modèle POLUPA sous sa forme actuelle. Il a été conçu pour simuler l'eutrophisation dans des rivières courantes. Il n'est pas conçu pour simuler des situations qui s'apparentent à des retenues.

4. Résultats des simulations

Cinq scénarios de déphosphatation ont été simulés successivement :

1 — déphosphatation uniforme	80 %
2 — déphosphatation uniforme	50 %
3 — déphosphatation uniforme	30 %
4 — déphosphatation différenciée par sous-bassin :	
. amont	50 %
. Sarthe	60 %
. autres	30 %
5 — déphosphatation différenciée par rejet	37 %

Les taux de déphosphatation cités ci-dessus s'appliquent aux rejets nets. Compte tenu du degré de déphosphatation déjà acquis, le taux de 37 % sur les rejets nets correspond à 47 % sur les rejets bruts.

4.1. Les scénarios de déphosphatation uniforme

Les trois premiers scénarios ont consisté à simuler une réduction uniforme sur l'ensemble du bassin de 80, 50 puis 30 % du phosphore actuellement rejeté. Ils constituent plus des tests de sensibilité du modèle à des variations des flux de phosphore rejeté, que des simulations d'actions réalisables.

Les résultats en chlorophylle *a* apparaissent très différents selon le taux de déphosphatation. A 80 %, ils sont très bons avec des valeurs maximales presque toujours inférieures à 60 mg/m³. A 50 %, la valeur maximale de chlorophylle *a* reste toujours inférieure à 60 mg/m³ sur tout le cours de la Loire. Elle dépasse cependant 120 mg/m³ sur la Sarthe et le Cher aval, comme le montre la carte ci-dessous. A 30 %, la chlorophylle *a* maximale sur la Loire dépasse 60 mg/m³ à partir de Gien, c'est-à-dire sur la moitié de son cours.

Le résultat obtenu avec une déphosphatation uniforme de 50 % apparaît donc voisin de l'objectif fixé par l'agence à moyen terme : 60 mg CHA/m³.

4.2. Le scénario différencié par sous-bassin

Le scénario a été conçu dans l'idée qu'en réduisant préférentiellement le phosphore à l'amont on réduirait l'ensemencement par les algues de la partie aval et par conséquent leur capacité à absorber le phosphore qui y est rejeté. On a donc différencié trois régions avec dans chacune d'elles une déphosphatation uniforme : 50 % à l'amont du Bec d'Allier, 60 % sur le bassin de la Sarthe et 30 % sur le reste du bassin. L'ensemble représentant une réduction de 37 % du phosphore rejeté sur la totalité du bassin. Le

résultat obtenu, qui figure sur la carte ci-dessous, est très semblable au scénario uniforme 50 %, alors que l'effort global de déphosphatation n'est que de 37 %.

Cela signifie qu'en différenciant l'action selon les sous-bassins nous pouvons parvenir à améliorer l'efficacité de réduction de l'eutrophisation par rapport à l'investissement de déphosphatation. Ce résultat s'explique en partie par une réduction de l'effort de déphosphatation sur le bassin de la Vienne où l'eutrophisation reste très modérée et en partie par une réduction de l'ensemencement en algues en Loire moyenne obtenue par une déphosphatation soutenue à l'amont.

4.3. Le scénario différencié par rejets

Il correspond comme le scénario précédent à un effort global de déphosphatation de 37 %. Mais dans chaque région, au lieu d'une réduction uniforme du phosphore, des taux de réduction ont été appliqués à chacun des principaux rejets identifiés, en tenant compte des résultats du scénario précédent : effort important sur les bassins amont et sur la Sarthe, mais aussi sur le Clain, l'Indre, la Mayenne et le Thouet.

Le bassin a été découpé en 16 sous-bassins :

	P net total	rejets identifiés	
		nombre	P net
Loire amont	5 390	19	4 436
Allier	3 890	15	2 426
Loire moyenne	4 410	9	3 021
Cher	2 870	7	1 180
Indre	852	6	576
Clain	902	6	611
Gartempe	429	3	115
Creuse	756	5	244
Vienne	2 090	0	0
Thouet	876	6	556
Authion	430	0	0
Loir	1 480	4	501
Sarthe	2 990	5	1 327
Mayenne	3 330	4	1 974
Maine	823	1	754
Loire aval	917	4	471
TOTAL	32 435	94	18 197

Les rejets identifiés y ont fait l'objet d'une étude particulière pour apprécier le phosphore brut produit, le phosphore net rejeté actuellement, le taux de raccordement que l'on peut espérer atteindre sur la commune : % RA, le taux de déphosphatation que l'on peut espérer atteindre (% EP), le taux de population raccordable sur la zone hydrologique correspondante (% RA).

Les taux objectifs ont constitué le scénario différencié par rejet en y ajoutant un taux moyen de déphosphatation des autres rejets, qualifiés d'épars. Le résultat qui apparaît sur la carte ci-dessous est nettement moins bon que celui du précédent scénario. Il est voisin du résultat du scénario uniforme 30 %.

Cette détérioration du résultat est clairement illustrée par le graphique ci-dessous qui donne le résultat des 5 scénarios à Tours.

C'est a priori surprenant. Pourquoi une déphosphatation des principales sources de phosphore donnerait-elle de moins bons résultats du point de vue de l'eutrophisation des cours d'eau qu'une déphosphatation uniforme aboutissant à la même réduction globale du phosphore qui arrive dans les cours d'eau.

C'est en fait un phénomène compréhensible si l'on tient compte du devenir du phosphore rejeté dans les cours d'eau. Celui-ci peut en effet, soit être assimilé par les algues

mais en proportion de la quantité d'algues présentes et cela en quelques heures, soit être progressivement associé aux particules en suspension et décanter pour se retrouver dans les sédiments de la rivière et, pour l'essentiel, ne plus participer au processus d'eutrophisation.

Or l'eutrophisation n'est pas très forte dans les bassins amont ; la quantité d'algues qui transite dans les rivières n'y est donc pas très élevée, et lorsqu'une ville rejette des quantités importantes de phosphore on doit s'attendre à ce qu'une partie seulement de ce phosphore soit assimilée rapidement par les algues puisqu'il y a peu d'algues.

Cela signifie que dans des zones où le cours d'eau est très peu eutrophisé une fraction importante des rejets massifs de phosphore peut se retrouver dans les sédiments et qu'une déphosphatation de ces rejets n'aura pas autant d'incidence sur l'eutrophisation du cours d'eau qu'on aurait pu l'espérer. C'est évidemment l'inverse qui se produit dans un cours d'eau très fortement eutrophisé, par exemple la Loire à Orléans, dans laquelle la quantité très importante d'algues présente est capable d'absorber massivement le phosphore rejeté par la ville.

4.4. Discussion

Les résultats du dernier scénario montrent que nous avons intérêt pour compléter les déphosphatations déjà engagées sur les principales agglomérations, qui constituent une première étape nécessaire, à privilégier les actions qui conduiront à une réduction uniforme des rejets de phosphore dans les rivières. On peut alors envisager, soit une réduction ou une suppression des phosphates dans les lessives, soit une réduction généralisée dans certaines zones de rejets de phosphore des petites et moyennes agglomérations, soit une combinaison de ces deux actions.

La réduction du phosphore des lessives apparaît ainsi comme une orientation nécessaire. Elle ne peut suffire à elle seule à résoudre le problème de l'eutrophisation en rivière. Les taux de déphosphatation qu'il faut atteindre sont en effet supérieurs dans beaucoup de régions à la part du phosphore des lessives dans les rejets totaux. Mais c'est une action qui, par son caractère uniforme présente une efficacité meilleure que la déphosphatation des rejets ponctuels. Il est donc important de mettre en œuvre tous les moyens pour avancer dans cette voie.

D'autres orientations sont aussi à retenir : développer l'assainissement individuel, développer l'épandage des rejets, développer les techniques de déphosphatation adaptées aux petites stations d'épuration, examiner l'opportunité du développement des lagunes lorsqu'elles alimentent en algues des rivières sensibles à l'eutrophisation.

Dans l'immédiat, toutefois les objectifs prioritaires de déphosphatation retenus par l'agence sont ceux qui ont été définis dans le scénario différencié par rejet. Ils apparaissent sur des bordereaux dont un exemple portant sur le bassin de la Loire amont figure à la page suivante.

Pour chaque agglomération citée figurent : le phosphore brut produit, le pourcentage d'épuration actuel, le phosphore actuellement rejeté, le taux de raccordement à atteindre (% RA), le pourcentage d'épuration à atteindre

(% EP), s'il y a lieu, le pourcentage de la population jugée raccordable dans la zone (% RA), le rendement global à atteindre par rapport au phosphore brut produit (% FI), enfin, le phosphore cible simulé.

Ce bordereau mentionne en outre le pourcentage moyen de déphosphatation à atteindre sur l'ensemble des autres collectivités (dénommées épars) : 12 % dans le cas de la Loire amont.

La carte qui figure ci-après indique, pour chaque grand bassin versant, à partir des résultats de POLUPA, si le pourcentage de déphosphatation qu'il faudra globalement atteindre est inférieur à 25 %, compris entre 25 et 50 %, ou supérieur à 50 %. Dans le dernier cas, qui concerne la Loire amont et moyenne, l'Allier, le Thouet, le Clain, la Sarthe, la Mayenne et le Loir, il est probable que l'on devra s'orienter vers une déphosphatation généralisée des rejets urbains et industriels ainsi que des élevages intensifs là où il en existe, si une réduction significative du phosphore des lessives ne peut être obtenue.

5. Conclusion et perspective

Le modèle POLUPA a fourni des réponses aux quatre questions posées en 2.2.

1) Il est possible dans la plupart des rivières du bassin de la Loire d'obtenir des teneurs en chlorophylle *a* inférieures à 60 mg/m³ en réduisant de 20 à 60 % selon les bassins versants les quantités de phosphore rejetées. Il est à noter que c'est un objectif de réduction du phosphore qui est très ambitieux si l'on tient compte du faible taux de raccordement des eaux usées domestiques aux stations d'épuration et si l'on tient compte de la forte proportion de la population du bassin répartie sur des agglomérations de faible importance.

2) Pour réduire l'eutrophisation en Loire moyenne, la solution la plus efficace est de ne pas se contenter d'y réduire les rejets de phosphore mais de réduire encore plus fortement les rejets de phosphore à l'amont du bassin.

BASSIN : LOIRE AMONT

SCENARIO

REJETS EN PHOSPHORE DU BASSIN											MODELE				
COLLECTIVITE CONCERNEE	CODE HYDRO	P.brut produit	X épur actu	P.net rejeté	rendements programmés				P.cible simulé	observations ajustements	N°tr troncon	modification des rejets			
					%RA	%EP	%Ra	%FI				-P1	+P2	-N1	+N2
LE PUY	K 020	378	10	340	90	80	80	70	115	59	A 0001	340	115		
AUREC SUR LOIRE	K 056	69	0	69	90	80		71	20		A 0010	69	20		
ST ETIENNE	K 059	1520	23	1170	90	80	P	75	380	190	A 4001	1170	380		
FIRMINY	K 058	200	20	160	50	50			205	150	A 0011	160	205		
ST JUST	K 060	96	4	92	70	80		60	38		A 0013	92	38		
VILLARS	K 061	91	6	86	70	80		5,5	86		A 0013	86	86		
BALBIGNY	K 079	69	0	69	90	80		71	20		A 0018	69	20		
VEAUCHE	K 063	51	0	51	90	80		71	15		A 0014	51	15		
STE SIGOLENE	K 045	63	5	60	80	80	80	52	30		A 0008	60	30		
MONTBRISON	K 076	87	23	67	80	80		71	25		A 0018	67	25		
ROANNE	K 092	345	0	345	60	90	P	81	65		A 0019	345	65		
MABLY	K 101	70	0	70	80	80			91		A 0021	70	91		
ST VALLIER	K 136	68	0	68	80	80		71	20		A 0027	68	20		
LE CREUSOT	K 135	542	20	434				21	430	100	A 0028	434	430		
MONTCEAU LES MINES	K 135	160	0	160	20	70	P	19	130	50	A 0027	160	130		
NEVERS	K 197	359	15	305	80	85	P	54	165	110	A 0040	305	165		
AUTUN	K 128	122	2	120	80	60		49	62		A 0027	120	62		
DECIZE	K 170	93	0	93	80	80		65	33		A 0025	93	33		
CERCY LA TOUR	K 175	53	0	53	80	60		47	28		A 0036	53	28

3) Il est plus efficace de tendre à une réduction uniforme des rejets de phosphore le long des cours d'eau plutôt que de se limiter à réduire massivement les rejets principaux.

4) Un scénario optimal de déphosphatation des rejets ponctuels a été élaboré. Il est actuellement mis en œuvre avec la participation financière de l'agence.

Différentes questions restent cependant encore sans réponse satisfaisante :

- Comment parvenir à une réduction suffisante de l'eutrophisation notamment sur la Sarthe et le Cher dont les parties aval restent encore fortement eutrophisées dans le dernier scénario ?
- L'explication proposée pour le mauvais calage du Loir

est-elle la bonne ? Si tel est le cas, quelle stratégie d'action peut être étudiée et proposée sur les cours d'eau très aménagés et lents qui peuvent être presque assimilés à une succession de plans d'eau de faible profondeur ?

• Quelle serait la contribution sur le résultat final et du seul point de vue de l'eutrophisation (c'est-à-dire indépendamment d'autres conséquences éventuelles sur l'environnement), d'une réduction, voire d'une suppression du phosphore des lessives, combinée avec un programme de déphosphatation des principaux rejets ?

Pour tenter de répondre à ces questions, l'agence a prévu de procéder dans les mois qui viennent à de nouvelles simulations sur le modèle POLUPA qui a été modifié et amélioré comme cela a été mentionné en 2.

Bibliographie

- [1] B. SAVOURE et H. GODARD. — Evolution du phytoplancton dans les eaux douces enrichies ou non par des nutriments minéraux ou organiques. *Colloque ENSP - ENSC - CGE - RENNES* 15-16 novembre 88 « Traitements curatifs en vue de potabiliser les eaux chargées en microphytes dulsaquicoles ».
- [2] L.C. OUDIN. — Origines et évolution du phosphore et de l'azote observés dans le milieu. Stratégies de lutte contre l'eutrophisation : *Agence de bassin Loire-Bretagne - Journées Eutrophisation*. 30 novembre 88, 14 décembre 88, 2 mars 89.
- [3] Ph. CROUZET. — Lutte contre l'eutrophisation des cours d'eau. Cas du bassin de la Loire. Résultats de l'étude POLU-PA. *Colloque eutrophisation : Agence de bassin Loire-Bretagne*. 25-26 novembre 87.
- [4] J.M. DORIOZ, E. PILLEBOUE & A. FERHI. — Dynamique du phosphore dans les bassins versants : importance des phénomènes de rétention dans les sédiments. *WAT - RES* Vol. 23, n° 2, p. 147-158, 1989.
- [5] A. DAUTA. — *Conditions de développement du phytoplancton. Etude comparative du comportement de huit espèces en culture. Cinétique d'assimilation et de croissance : étude expérimentale. Modélisation appliquée aux cultures et à un milieu naturel : Le Lot*. Thèse : Université Paul Sabatier, Toulouse, 17 mars 1983.
- [6] BETURE-SETAME — Agence de bassin Loire-Bretagne. *Mise en œuvre de la politique de lutte contre l'azote et l'eutrophisation dans le bassin de la Loire - Modèle PO-LU-PA - Rapport de synthèse* - Février 1988.