

PEGASE, UNE MÉTHODOLOGIE ET UN OUTIL DE SIMULATION PRÉVISIONNELLE POUR LA GESTION DE LA QUALITÉ DES EAUX DE SURFACE

J. SMITZ, E. EVERBECQ, J.F. DELIEGE

(Université de Liège, Centre d'Etude et de Modélisation de l'environnement)

J.P. DESCY (Facultés Universitaires de Namur, Unité d'Ecologie des eaux douces)

R. WOLLAST, J.P. VANDERBORGHT (Université libre de Bruxelles, Laboratoire de traitement des eaux)

RÉSUMÉ

Le modèle PEGASE (Planification Et Gestion de l'Assainissement des Eaux) a été développé afin d'orienter les choix en matière de gestion des eaux de surface par le calcul prévisionnel et déterministe de la qualité des eaux en fonction des apports et rejets polluants, dans des conditions hydrologiques diverses. PEGASE est un modèle intégré bassin versant / réseau hydrographique. PEGASE peut traiter plusieurs centaines de rivières simultanément et la superficie des bassins hydrographiques considérés peut atteindre plusieurs dizaines de milliers de km². PEGASE comprend un sous-modèle hydrologique et hydrodynamique, un sous-modèle thermique et un sous-modèle de la qualité de l'eau et du fonctionnement de l'écosystème aquatique. PEGASE représente de façon structurée les rejets urbains, les rejets industriels, le rôle des stations d'épuration, les rejets dus aux activités d'élevage et les apports diffus des sols. PEGASE calcule explicitement les mécanismes d'autoépuration dans les cours d'eau et calcule l'évolution de l'eutrophisation. D'une manière générale, le modèle PEGASE permet de comparer des scénarios afin de dégager des politiques optimales. PEGASE peut être utilisé via une interface-utilisateur graphique conviviale. Les données d'entrée et les résultats calculés sont traités et visualisés par Système d'Informations Géographiques (SIG).

Mots-clés : modèle mathématique, qualité, eaux de surface, gestion des eaux, assainissement, épuration, SIG.

SUMMARY

The PEGASE model has been developed as a tool for surface water management. It provides a deterministic and predictive assessment of the water quality as a function of pollutants loads, under various hydrological conditions. PEGASE is an integrated basin / river model. PEGASE is able to handle a few hundred of rivers simultaneously and the area of hydrological basins can rise up to a few ten thousands square kilometers. PEGASE includes a hydrological and hydrodynamic sub-model, a thermal sub-model and a sub-model of the water quality and of the aquatic ecosystem. PEGASE offers a structured approach and inventory of domestic loads, industrial loads, role of purification plants, diffuse loads by the soils and direct loads from rearing. PEGASE calculates explicitly the mechanisms of self-purification in the rivers and calculates the evolution of eutrophication. PEGASE enables the comparison of scenarios in order to design optimal policies. PEGASE can be used through a graphic user-friendly interface. Input data and computed results are processed and visualized by a Geographical Information System (GIS).

Key-words : mathematical model, quality, surface waters, water management, purification, GIS.

1. HISTORIQUE DU DÉVELOPPEMENT DU MODELE PEGASE

L'application des législations nationales et européennes en matière de protection et de gestion des eaux de surface a imposé de nombreuses tâches aux autorités chargées de la gestion de l'eau :

- la définition d'objectifs de qualité pour les cours d'eau,
- l'établissement de programmes d'investissement en matière d'assainissement et d'épuration,
- la délivrance d'autorisations de rejet pour les eaux usées industrielles,

- l'identification d'actions préventives au niveau de l'ensemble du bassin,
- la mise en place de réseaux de mesure adéquats pour la surveillance de la qualité des eaux.

Pour réaliser efficacement ces tâches, les administrations et agences compétentes doivent pouvoir :

- 1° acquérir une vision globale de la qualité des eaux de surface à l'échelle de grands bassins versants;
- 2° orienter les choix en matière de gestion par la simulation prévisionnelle et déterministe des niveaux de qualité en fonction des différents rejets.

Pour répondre à cette demande, trois universités belges (Université de Liège, Facultés Universitaires de Namur et Université Libre de Bruxelles) ont entrepris le développement du modèle PEGASE (Planification et Gestion de l'Assainissement des Eaux).

Le modèle mathématique PEGASE est un outil de calcul orienté vers la gestion quantitative et qualitative des eaux de surface, les objectifs visés étant de pouvoir :

- évaluer l'effet de toute réduction des apports et rejets polluants ;
- simuler l'effet des programmes d'investissement (stations d'épuration) ;
- déterminer les actions nécessaires pour atteindre des objectifs de qualité donnés (localisation des stations d'épuration, type et efficacité des traitements à mettre en oeuvre, ...), tout en utilisant au mieux le pouvoir auto-épurateur des cours d'eau ;
- prévoir l'évolution de l'eutrophisation en fonction d'actions ponctuelles ou globales ;
- positionner de manière optimale les points de mesure d'un réseau de surveillance.

D'une manière générale, le modèle PEGASE permet de comparer des scénarios par le biais de simulations, afin de dégager des politiques optimales tant sur le plan technique que sur le plan économique.

On trouvera ci-après une description synthétique de la méthodologie utilisée pour le développement du modèle PEGASE.

Le modèle PEGASE a été utilisé avec succès par plusieurs administrations et agences :

- la Région wallonne, pour les bassins de la Meuse et de l'Escaut ;
- l'Agence de l'Eau Rhin-Meuse pour les bassins du Rhin, de la Moselle, de la Sarre et de la Meuse ;
- le Département du Bas-Rhin pour le bassin de la Zorn ;
- le Ministère de l'Environnement du Québec pour le bassin de la Nicolet ;
- l'Agence de l'Eau Artois Picardie, la Région wallonne et la Vlaamse Milieumaatschappij pour l'ensemble du bassin de l'Escaut ;
- le Grand-Duché du Luxembourg pour le réseau hydrographique grand-ducal.

2. PRÉSENTATION DE LA MÉTHODOLOGIE PEGASE

Les caractéristiques principales de l'approche et du modèle PEGASE sont les suivantes :

- PEGASE est un modèle intégré bassins versants / réseau hydrographique orienté vers la gestion quantitative et qualitative des eaux de surface ;
- le réseau hydrographique est représenté par une structure

en arbre ; il peut comporter de une à plusieurs centaines de rivières traitées simultanément ; il y a possibilité d'inclure la représentation de : prélèvements d'eau, apports, dérivations, rivières canalisées, canaux, barrages-déversoirs, barrages-écluses et autres singularités;

- les bassins versants représentés ont une superficie comprise entre quelques dizaines de km² et plusieurs milliers de km² ;
- PEGASE contient une représentation structurée des rejets urbains, des rejets industriels, des réseaux de collecteurs, des stations d'épuration, des rejets dus aux activités d'élevage, des apports diffus des sols ;
- les informations relatives aux rejets peuvent être accompagnées de dates (par exemple, pour les stations d'épuration, la date de mise en service), ce qui permet d'effectuer des simulations de l'évolution long terme (passée et future).
- PEGASE est adapté à la représentation de la pollution organique (carbone, azote, phosphore, oxygène, algues, etc.) ainsi qu'à la représentation des activités biologiques qui se déroulent dans l'écosystème aquatique, notamment les processus d'auto-épuration (aérobiques et anaérobiques) et les processus d'eutrophisation ; des développements sont en préparation pour le traitement des métaux lourds et des micropolluants organiques.

Globalement, la méthodologie de PEGASE (approche intégrée rivière/bassin versant) peut être divisée en 4 grandes étapes :

1. Représentation du milieu physique

- caractérisation physique et topologique du réseau hydrographique des rivières ;
- représentation de la topographie et de l'occupation du sol ;
- calcul des bassins versants.

2. Estimation des rejets

- rejets industriels, urbains et diffus ;
- stations d'épuration.

3. Modélisation de l'évolution de la qualité de l'eau et de l'écosystème aquatique

- simulations de situations passées (validation) et futures (simulations prévisionnelles).

4. Analyse des résultats

- comparaison de scénarios.

Il faut noter que toutes les représentations spatiales sont à pas variables et que la précision des positionnements géographiques n'est pas limitée par l'outil de calcul, mais uniquement par la précision des données disponibles.

Il faut également noter que toutes les données de base utilisées sont des données qui sont **normalement et habituellement disponibles** sans nouvelles mesures de terrain auprès des administrations et agences qui sont compétentes pour la gestion des eaux de surface. La valeur ajoutée par

l'approche PEGASE est l'organisation et la structuration de ces données pour permettre une représentation cohérente du système bassin versant / réseau hydrographique.

3. REPRÉSENTATION DU MILIEU PHYSIQUE

Une des premières étapes de PEGASE est d'obtenir une représentation fonctionnelle du système constitué par les bassins hydrographiques et les cours d'eau sur l'ensemble d'un territoire pouvant atteindre une superficie totale de plusieurs milliers de km².

A cette fin, les éléments constitutifs du système sont classés selon leur nature géométrique :

- éléments de type "point" (points de rejet, points de prélèvement, points d'échantillonnage ou de mesure, etc.);
- éléments de type "ligne" (cours d'une rivière, lignes de pente, limites administratives, ...);
- éléments de type "surface" (surfaces de bassins hydrographiques, surfaces affectées à l'utilisation agricole, surfaces urbanisées, etc.).

Cette première caractérisation est complétée par d'autres informations, du type "structure" ou "relation". En particulier, le réseau hydrographique est défini par une structure arborescente ou, de manière plus générale, par une structure topologique maillée (pour pouvoir tenir compte des canaux et dérivations).

L'ensemble de ces éléments est géoréférencé. Ces informations se prêtent dès lors parfaitement à la création d'une base de données gérée à travers un Système d'Information Géographique (SIG). Le SIG utilisé est le logiciel Arc/Info.

3.1 DIGITALISATION DU TRACÉ DES RIVIERES ET TOPOLOGIE

La liste des cours d'eau à représenter, la topologie du réseau hydrographique et les tracés digitalisés des rivières constituent les données de base à utiliser. Le nombre de rivières est variable.

La digitalisation du tracé des cours d'eau est à pas variable, de manière à représenter de façon suffisamment précise les méandres et les distances réelles parcourues par les eaux des rivières.

A titre d'exemple, la figure 1 présente le réseau hydrographique de la Région wallonne tel que traité actuellement par PEGASE (255 rivières).

3.2 DÉTERMINATION DES BASSINS HYDROGRAPHIQUES

Une méthode de calcul automatique des bassins hydrographiques a été mise au point à partir du modèle numérique de terrain (MNT) et à partir des tracés numérisés des cours

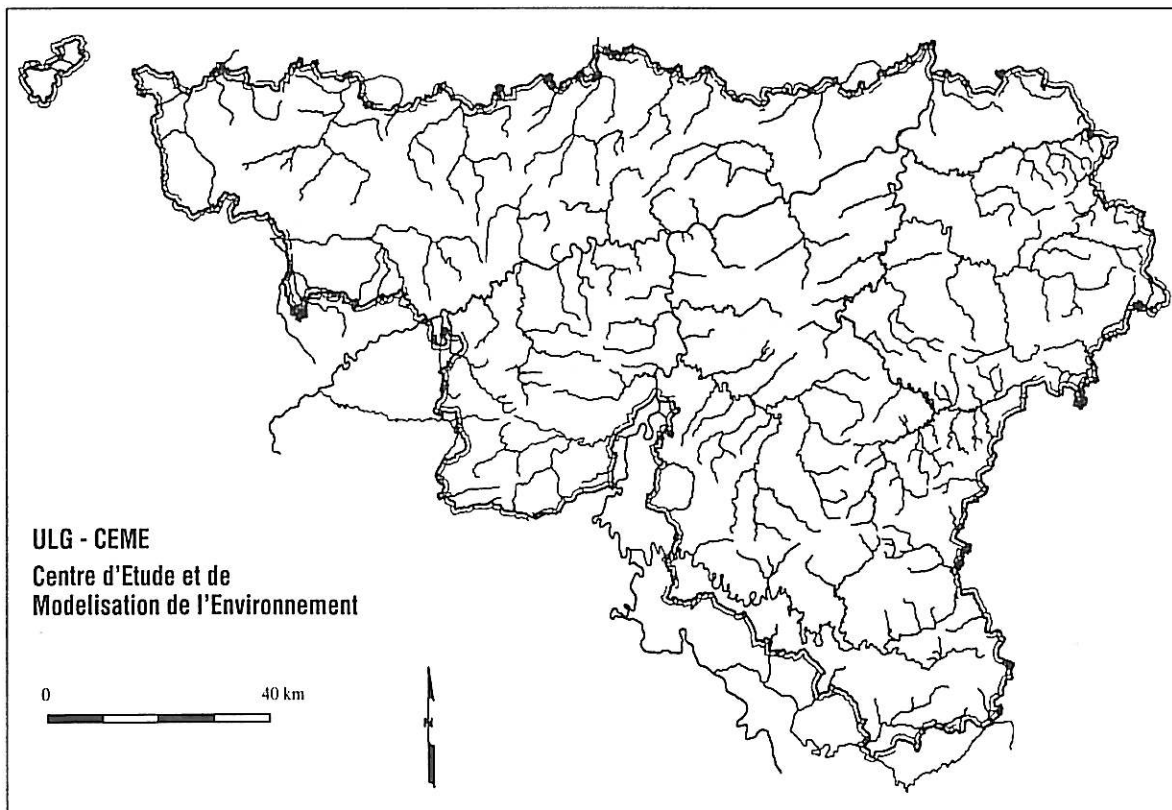


Fig. 1 - PEGASE - Sélection des Rivières - River Model - Région Wallonne

d'eau. La précision de ces déterminations peut être augmentée par l'utilisation de contours de zones hydrologiques (optionnel).

Trois types d'informations sont ainsi obtenus par traitement algorithmique (calcul du chemin de plus grande pente) :

- 1° la délimitation des bassins hydrographiques des rivières prises en considération : les bassins hydrographiques propres (c'est-à-dire sans compter les bassins versants des affluents explicitement décrits) et les bassins hydrographiques totaux ;
- 2° la surface des bassins hydrographiques, ainsi que la distribution de la surface des bassins hydrographiques en fonction de la distance à la source;
- 3° la relation "point d'émission/point d'impact": pour tout point d'émission identifié par ses coordonnées, le calcul permet l'identification automatique de la rivière "réceptrice" et la détermination de la coordonnée curviligne du point d'impact sur cette rivière. Cette relation est stockée dans une matrice dite "de connectivité".

3.3 OCCUPATIONS DES SOLS

L'occupation des sols est un des facteurs qui influencent de la manière la plus significative les apports diffus vers le réseau hydrographique. Les divers types d'occupation des sols sont regroupés en 6 catégories : forêts de conifères, forêts de feuillus, prairies, cultures, zones urbanisées et zones diverses. Trois sources d'informations peuvent être utilisées :

1. l'utilisation de l'imagerie multispectrale de télédétection. Cette solution est à priori la solution idéale. Cependant, la grande quantité d'information à traiter (couverture de milliers de km² avec une maille qui peut être de l'ordre de 20 m sur 20 m) impose l'utilisation de méthodes de calcul avec pré-traitement. Cette approche s'impose de plus en plus, compte tenu de la possibilité d'utiliser des informations déjà traitées de manière standard à différentes échelles (notamment les données 'Corine Land Cover' de la Communauté Européenne).
2. la numérisation de cartes. Cette méthode demande un travail de numérisation extrêmement important et permet difficilement une actualisation régulière.
3. l'utilisation des statistiques communales (cadastre, Recensement Général Agricole, ...). Ces données, établies dans un but différent, conduisent souvent à des difficultés d'interprétation. Si les communes ont une surface relativement importante, la résolution spatiale est moins bonne.

Outre les données d'occupation des sols, sont également utilisées les informations relatives aux types de sols.

3.4 UTILISATION DES STATISTIQUES ADMINISTRATIVES

Pour les informations de type socio-économique, de nombreuses sources (Institut National de Statistique I.N.S., recensement agricole, etc.) ne fournissent que des valeurs

agrégées par commune. Une couverture homogène à l'échelle du bassin, décrivant les polygones de contour des limites administratives (commune) doit donc être créée, de manière à pouvoir superposer aux différentes données déjà utilisées (altitude, tracés, bassins, ...), des données supplémentaires fournies à l'échelle communale (occupation du sol, population, gros bétail, ...).

4. REPRÉSENTATION DES REJETS ET DES APPORTS

Pour les besoins de PEGASE, un inventaire et une évaluation des apports, des rejets et des stations d'épuration doivent être réalisés. Les composés intervenant de manière prioritaire dans l'élaboration d'une stratégie de prévention et d'épuration à l'échelle régionale sont pris en considération : matières carbonées, azotées et phosphorées.

Une classification cohérente des apports et des rejets a été établie en fonction des diverses origines possibles des pollutions, en fonction des schémas réglementaires, en fonction des modes d'action pouvant être mis en œuvre pour modifier ou traiter les apports ou encore en fonction de l'appareil statistique existant. Cette classification a également tenu compte des possibilités de localisation spatiale des points d'émission. A ce titre, trois types d'apports et de rejets ont été définis :

- 1° les apports et rejets ponctuels : ce sont les apports et rejets isolés, émis en des points précis et identifiables (rejets provenant des collecteurs ou des stations d'épuration urbaines, rejets industriels);
- 2° les apports et rejets dispersés : il s'agit des apports et rejets, généralement de faible intensité, dont la distribution spatiale est telle qu'elle ne permet pas la localisation individuelle précise des points d'émission (exemple : rejets domestiques en milieu rural);
- 3° les apports diffus : ce sont les apports des sols, auxquels sont attachées, par nature, des surfaces contributives.

La classification adoptée dans PEGASE est actuellement la suivante (voir organigramme représenté à la figure 2) :

■ les rejets industriels, de type ponctuel : ils comprennent tous les apports et rejets industriels soumis à autorisation. Dans cette catégorie sont également repris les rejets provenant des élevages intensifs lorsqu'ils sont soumis à autorisation de rejet. Les rejets industriels sont déversés en rivière, avec ou sans épuration industrielle, ou déversés en égouts, ceux-ci étant raccordés ou non à une station d'épuration urbaine.

■ les rejets domestiques dans les égouts : comprennent les charges domestiques et assimilées (c'est-à-dire les charges des collectivités, petites industries, artisanat, commerce, etc.) non soumises à autorisation de rejet et qui sont collectées par un réseau d'assainissement, entraînant un rejet ponctuel dans les eaux de surface. La population prise en compte par PEGASE comprend la population sédentaire ainsi que, le cas échéant, une population "hors

domicile" (bureaux, etc.) et/ou une population saisonnière (par exemple : population touristique).

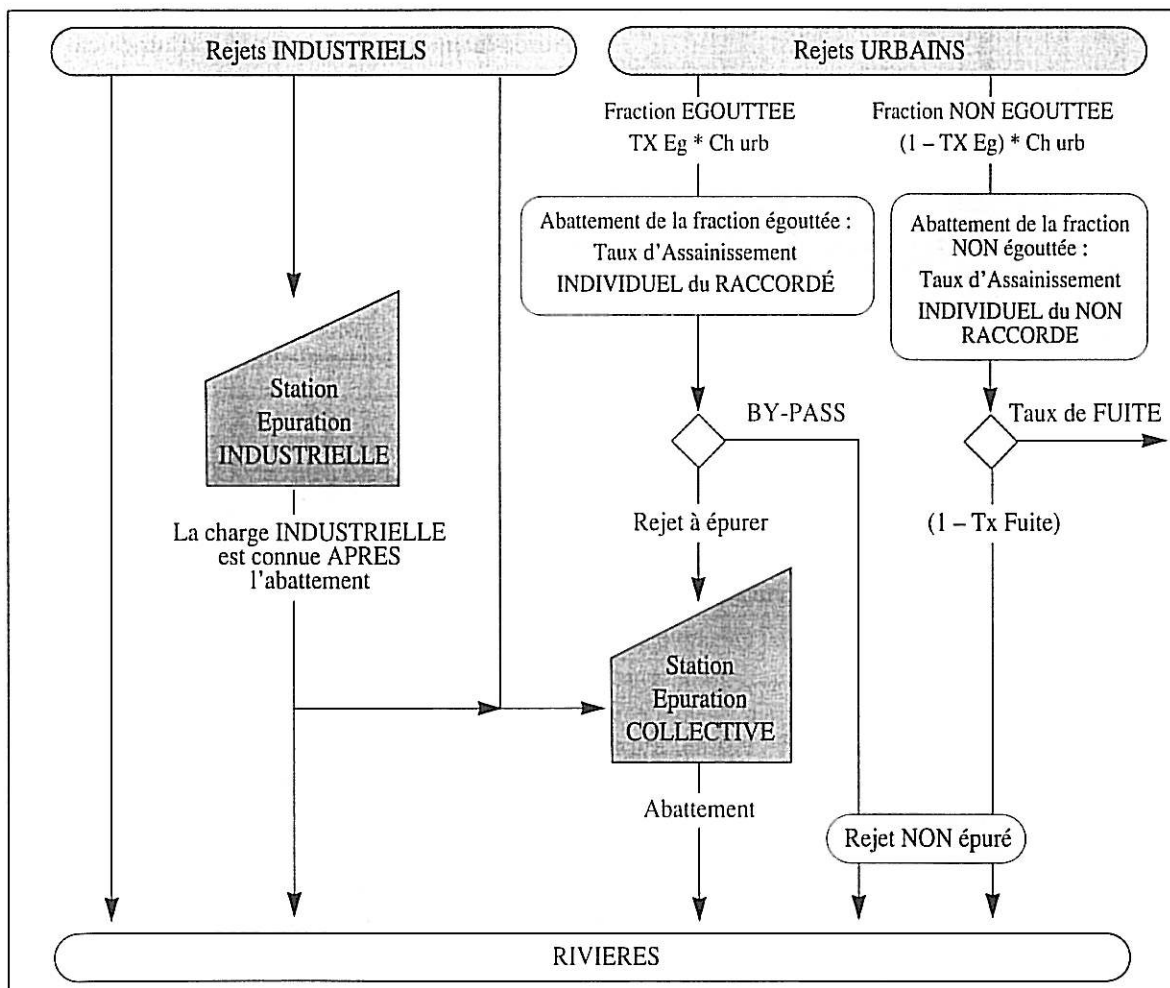
- les rejets domestiques non rejetés en égout, de type dispersé;
- les rejets directs d'élevage : la charge polluante émise par les animaux d'élevage, principalement les bovins, est pour la majeure partie déversée sur les sols agricoles, soit directement quand le bétail est en pâture, soit par épandage mécanique des fumiers et des lisiers quand les animaux sont à l'étable. Une partie de ces déjections animales est cependant rejetée directement en rivière ou en égout (par exemple, trop-plein des cuves de stockage); ces rejets sont de type dispersé.
- les apports provenant du lessivage des sols, de type diffus.

De façon très résumée, les divers apports et rejets peuvent être estimés à partir des données suivantes :

- rejets industriels : sur base des autorisations de rejets, sur base des redevances et taxes auxquelles l'industrie est éventuellement soumise et sur base de mesures ;
- rejets domestiques : par l'utilisation du concept d'équiva-

lent-habitant. La fraction des apports domestiques rejetés en égout peut être représentée par un taux moyen de raccordement au réseau d'assainissement, variable d'une commune à l'autre ;

- rejets directs d'élevage : sur base du cheptel recensé par commune et d'un taux de rejet ;
- apports par les sols : une approche basée sur l'utilisation de fonctions d'apport a été adoptée. La synthèse des données relatives au fonctionnement de plusieurs micro-bassins versants, caractéristiques des diverses natures et occupations du sol, a permis d'établir des fonctions d'apport pour la charge carbonée, azotée et phosphorée en fonction du type d'occupation (cultures, prairies, forêts). Ces fonctions d'apport sont des valeurs moyennes dans le temps (échelle de temps d'une semaine à un mois) et dans l'espace (pour des bassins versants dont la dimension est au moins égale à quelques kilomètres carrés) ;
- rejets des stations d'épuration : sur base des apports domestiques et industriels connectés à la station et des abattements de charge réalisés dans la station. Ceux-ci



- Tx Eg Taux d'égouttage (proportion de la population raccordée au réseau d'égouttage)
- Tx Ass Rac Taux d'assainissement individuel de la fraction RACCORDEE de la charge urbaine
- Tx Ass N Rac Taux d'assainissement individuel de la fraction NON RACCORDEE de la charge urbaine
- Tx fuite Taux de fuite appliqué à la fraction NON RACCORDEE de la charge urbaine
- Ch urb Cette fraction n'aboutit jamais au milieu (par exemple en raison de la distance trop élevée entre le point de rejet et le milieu, l'existence d'un puit perdant, ...)
- Charge URBAINE BRUTE (pollution potentielle)

peuvent être estimés soit sur base de mesures, soit en fonction du type de station et des traitements qui y sont réalisés.

Tenant compte de la relation point d'origine / point d'émission dans la rivière, la distribution des apports et rejets peut alors être établie pour tout point d'une rivière. A titre d'exemple, la figure 3 montre l'évolution longitudinale des apports d'azote total (situation d'étiage) pour la Dyle. On distingue la contribution des rejets industriels, des rejets urbains, des apports des sols et des rejets directs de l'élevage (bovins).

5. DESCRIPTION SUCCINCTE DU MODELE

PEGASE contient :

- un modèle hydrologique et hydrodynamique ;
- un modèle thermique ;
- un modèle de l'évolution de l'écosystème aquatique et de la qualité de l'eau.

Ces modèles sont de type non-stationnaire et peuvent également fournir des solutions quasi-stationnaires.

On se limite ici à présenter brièvement les différentes variables explicitement décrites par le modèle en citant les principaux processus représentés.

5.1 LES VARIABLES PHYSIQUES

Le modèle hydrologique et hydrodynamique est basé :

- sur la représentation des bassins versants : topographie via modèle numérique de terrain, types de sols, occupations des sols, structure topologique et tracé du réseau des rivières ;
- sur la représentation des caractéristiques physiques du réseau hydrographique : pentes du lit des rivières, largeurs, profondeurs, rugosité du fond, singularités locales.

La modélisation des débits est réalisée à partir de mesures de débit effectuées aux stations de mesures hydrométriques ou à partir de catalogues de débits caractéristiques.

A partir de ces données, les débits des rivières peuvent être calculés à l'aide des surfaces des bassins hydrographiques, affectées de corrections tenant compte des différences de pluviosité (variables avec l'altitude) et des caractéristiques propres des bassins.

Dans le cas des voies d'eau navigables dont les plans d'eau sont artificiellement maintenus, le calcul des variables hydrodynamiques se fait à partir d'un calcul de la ligne d'eau, les données de base étant les caractéristiques géométriques du fond et des berges, ainsi que les caractéristiques des barrages-écluses.

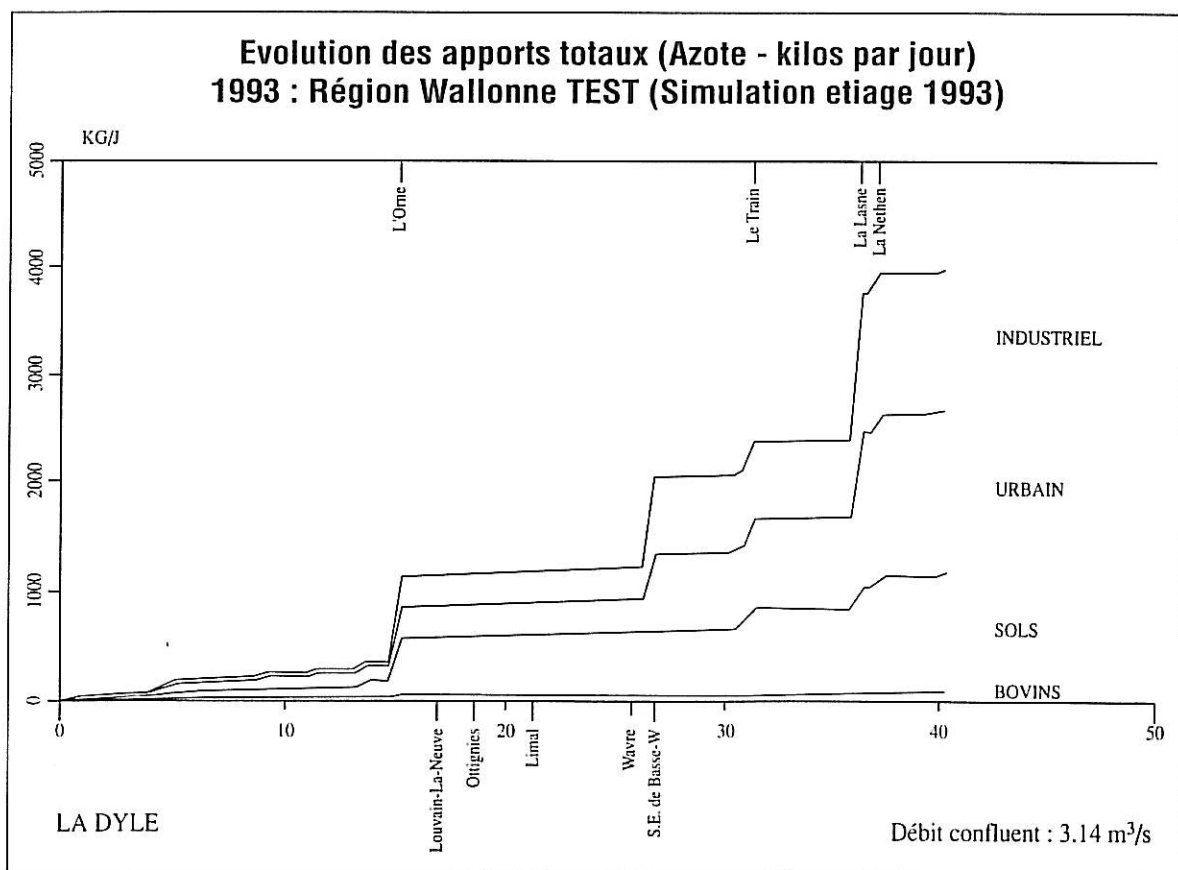


Fig. 3 – Région Wallonne-PEGASE (test)-Evolution des apports totaux (Azote - kilos par jours)
s1993 : Région Wallonne TEST (Simulation étiage 1993)

La connaissance des débits, des largeurs (soit connues explicitement, soit estimées sur base d'une relation statistique fonction de la surface du bassin versant de la rivière, selon l'approche géomorphologique introduite par HORTON et améliorée par STRAHLER) et des pentes permet de calculer, en tout point du réseau hydrographique, la vitesse moyenne de l'écoulement et d'obtenir le temps de transfert des masses d'eau entre deux points quelconques.

Outre les variables hydrodynamiques (débit, profondeur, section et vitesse moyennes), l'état physique des eaux est décrit par la température naturelle, l'échauffement par rapport à cette température naturelle, ainsi que la concentration en matières en suspension et la transparence de l'eau.

L'évolution de la température naturelle dépend principalement des échanges qui se produisent à l'interface eau/atmosphère (rayonnement, convection, évaporation). La température naturelle est représentée par un sous-modèle statistique dont la donnée d'entrée est une température générale de référence, la température des différents tronçons étant alors calculée en fonction de leur altitude. L'échauffement est déterminé à partir des rejets thermiques et le refroidissement sous l'effet des processus mentionnés ci-dessus est représenté par un coefficient d'échange linéaire.

Dans l'état actuel de développement du modèle, la concentration en matières minérales en suspension est représentée par un sous-modèle statistique basé sur la corrélation entre la charge particulaire en suspension et les débits. Cette variable intervient dans le calcul de la transparence de l'eau. La transparence de l'eau est calculée comme résultant de quatre contributions : concentration des matières minérales particulaires, concentration des matières organiques particulaires, biomasse du phytoplancton et biomasse des végétaux benthiques (voir ci-après).

5.2 QUALITÉ PHYSICO-CHIMIQUE DE L'EAU ET FONCTIONNEMENT DE L'ÉCOSYSTÈME AQUATIQUE

Les variables représentant la qualité physico-chimique des eaux de surface sont les suivantes :

- les concentrations en carbone, azote et phosphore associées à la matière organique dégradable, particulaire et dissoute;
- la concentration en carbone associée à la matière organique non dégradable, particulaire et dissoute;
- les concentrations en carbone, azote et phosphore associées à la matière organique particulaire dégradable sédimentée (concentration surfacique du fond);
- les concentrations en ammoniacque, nitrates et orthophosphates;
- la concentration en oxygène dissous : la valeur moyenne journalière et les valeurs minimum et maximum journalières sont calculées, de manière à déterminer l'amplitude de la fluctuation jour/nuit.

Pour le carbone, l'azote et le phosphore associés aux diverses formes de matières organiques, les sources sont soit **externes** (apports des sols et rejets), soit **internes** (excrétions et mortalités des diverses biomasses).

Les processus d'élimination de la matière organique représentés dans le modèle sont les processus de dégradation par les bactéries hétérotrophes (bactéries planctoniques et biofilm), la sédimentation de la matière organique particulaire et la dégradation par les bactéries dans les sédiments.

Pour l'ammoniacque et les orthophosphates, les sources sont externes (apports et rejets) ou internes : dégradation de l'azote ou du phosphore organique par les bactéries hétérotrophes planctoniques et du biofilm, dégradation de l'azote et du phosphore particulaires des sédiments sous l'action des bactéries benthiques. Le processus d'élimination est l'assimilation par les bactéries hétérotrophes planctoniques et par les biomasses végétales phytoplanctonique et benthique. Il s'y ajoute, pour l'ammoniacque, la nitrification, et pour les orthophosphates, l'adsorption sur la matière en suspension et la formation de complexes insolubles qui sont sujets à sédimentation.

Pour les nitrates enfin, les sources sont externes et internes (nitrification de l'ammoniacque), l'assimilation étant réalisée par les biomasses végétales phytoplanctonique et benthique. La dénitrification (transformation des nitrates en azote N_2 gazeux) est également représentée ; elle se produit dans la colonne d'eau lorsque la concentration en oxygène y est très faible et dans les sédiments.

En ce qui concerne les activités biologiques, les biomasses suivantes sont décrites par le biais de leur concentration en carbone, azote et phosphore, le rapport C/N/P caractérisant chaque biomasse étant dans le modèle considéré comme constant :

- la biomasse végétale phytoplanctonique ;
- la biomasse végétale benthique (macrophytes et phyto-benthos) ;
- la biomasse bactérienne autotrophe planctonique (bactéries nitrifiantes) ;
- la biomasse bactérienne hétérotrophe planctonique.

Deux biomasses complémentaires ne sont pas représentées directement, mais interviennent par le biais de leur activité, exprimée sous forme d'une vitesse de dégradation de la matière organique par unité de surface du fond :

- la biomasse bactérienne du biofilm ;
- la biomasse bactérienne des sédiments.

Le taux de croissance du phytoplancton est conditionné par l'intensité de la lumière incidente (donnée d'entrée à composante périodique), la transparence de l'eau, la profondeur de la rivière, la température, ainsi que la disponibilité en azote (NH_4^+ , NO_3^-) et en phosphore (PO_4^{3-}). La décroissance de la biomasse phytoplanctonique est calculée à partir d'un taux de mortalité et d'un taux de respiration (tous deux dépendant de la température) ainsi que d'un taux de sédimentation.

La biomasse végétale benthique est calculée à partir d'un sous-modèle statistique intégrant la pente du tronçon de rivière, la période de l'année et la charge en matière organique. Son taux de croissance dépend des mêmes variables que le taux de croissance du phytoplancton.

La croissance de la biomasse nitrifiante dépend de la température et de la disponibilité en ammoniacque.

Pour la biomasse bactérienne hétérotrophe planctonique, qui assure la dégradation de la matière organique détritique présente dans la colonne d'eau, le taux de croissance est fonction de la concentration en matière organique dégradable et de la température. Il lui est associé un taux de mortalité. L'activité bactérienne du biofilm et des sédiments est déterminée par la température et, respectivement, par la concentration en matière organique dégradable dans la colonne d'eau ou par le flux de matière organique se déposant sur le fond.

L'activité de ces différentes biomasses a une action directe sur les concentrations des diverses formes de carbone, azote et phosphore présentes dans le milieu, incidence qui est explicitement décrite par le modèle.

Pour l'oxygène, les termes de production résultent de l'activité des biomasses végétales planctonique et benthique; les termes de consommation sont liés à la respiration de ces mêmes biomasses végétales ainsi qu'à la respiration des biomasses bactériennes autotrophe et hétérotrophes (planctonique, du biofilm et benthique). Le flux d'échange d'oxygène à travers la surface (réaération) est fonction de la vitesse du courant, de la profondeur de la rivière et de l'écart à la saturation.

Les concentrations dans la colonne d'eau sont calculées en combinant :

- le transport par le courant;
- les apports par les affluents;
- les apports liés aux rejets ponctuels, dispersés et diffus;
- les différents processus internes de production et de consommation;
- les échanges avec l'atmosphère.

La structure des modèles est telle que la majorité des paramètres ont une signification physique ou biologique déterminée : ces paramètres peuvent donc être calibrés séparément par des mesures expérimentales particulières et ont donc des valeurs qui sont relativement universelles. PEGASE peut dès lors être utilisé et transposé avec peu de modifications et de calibrations pour différentes situations et différents réseaux hydrographiques.

6. UTILISATION DE PEGASE

PEGASE peut être utilisé de façon aisée par un utilisateur non-spécialiste, via une interface graphique conviviale.

Les données d'entrée et les résultats de sortie peuvent être gérés et visualisés par des programmes classiques de gestion

de données (EXCEL, Dbase, etc.) ou encore via un Système d'Informations Géographiques (SIG).

Le matériel informatique requis est une station de travail classique (minimum 32 Mb RAM), système d'exploitation type UNIX ou similaire. Le temps d'exécution du code de calcul dépend de l'ampleur du problème à traiter, mais n'est pas un facteur critique. A titre d'exemple, le temps de calcul nécessaire pour réaliser une simulation d'un domaine d'environ 20.000 km² et comportant une centaine de rivières est de l'ordre de quelques minutes de calcul.

7. EXEMPLES DE RÉSULTATS OBTENUS

Le premier des résultats fournis par la mise en œuvre de la méthodologie PEGASE est la structuration d'une base de données permettant la représentation cohérente des bassins versants, du réseau hydrographique et de l'ensemble des apports et rejets dans un domaine donné, avec les représentations spatiales correspondantes, le tout étant disponible sous format SIG.

Les résultats numériques calculés par PEGASE sont :

- la distribution des variables hydrologiques (débits) et hydrodynamiques (vitesses, hauteurs d'eau, largeurs, tension sur le fond) en tous points du réseau hydrographique pour différentes situations hydrométéorologiques caractéristiques ;
 - le bilan des apports et rejets, des productions et consommations dans chacune des rivières traitées ou par tronçons ;
 - la distribution spatiale et temporelle de la température naturelle et de l'échauffement en tous les points du réseau hydrographique ;
 - la distribution spatiale et temporelle des concentrations et biomasses (environ 60 variables) calculées par le modèle en tous les points du réseau hydrographique ou par tronçons.
- Les simulations sont réalisées pour différentes situations hydrométéorologiques (situation typique étiage, débit moyen, etc.) et permettent d'obtenir :
- la simulation de situations passées ou futures (simulation de plans d'épuration, ...) et la comparaison de différents scénarios ;
 - l'effet de l'implantation des stations d'épuration et l'effet des types de traitements ;
 - la simulation des autorisations de rejets industriels ;
 - l'évolution de l'eutrophisation.

Les figures 4, 5 et 6 montrent, à titre d'exemple, quelques résultats obtenus par PEGASE.

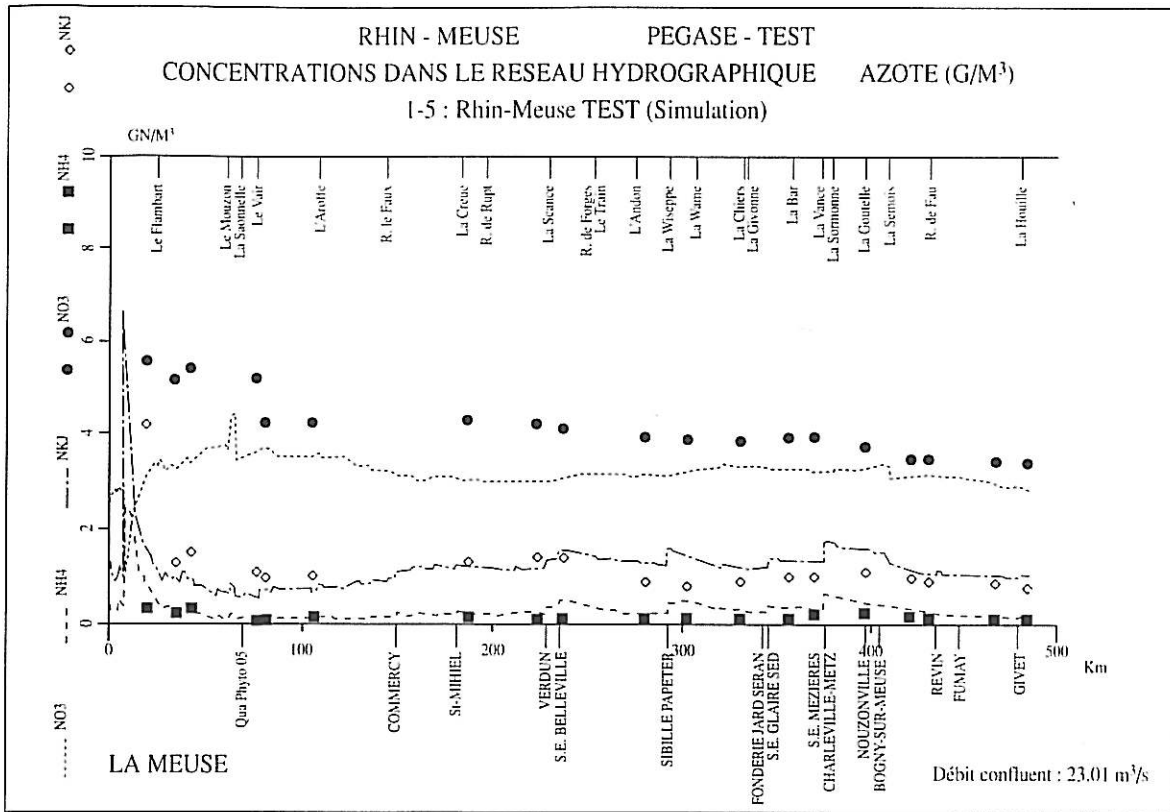


Fig. 4 - l'évolution longitudinale des concentrations en azote calculées (concentrations en ammoniacque NH_4 , en nitrates NO_3 et en azote Kjeldahl) dans la Meuse française en situation d'été. Sur la figure sont également reportées les valeurs des concentrations mesurées (centiles 90).

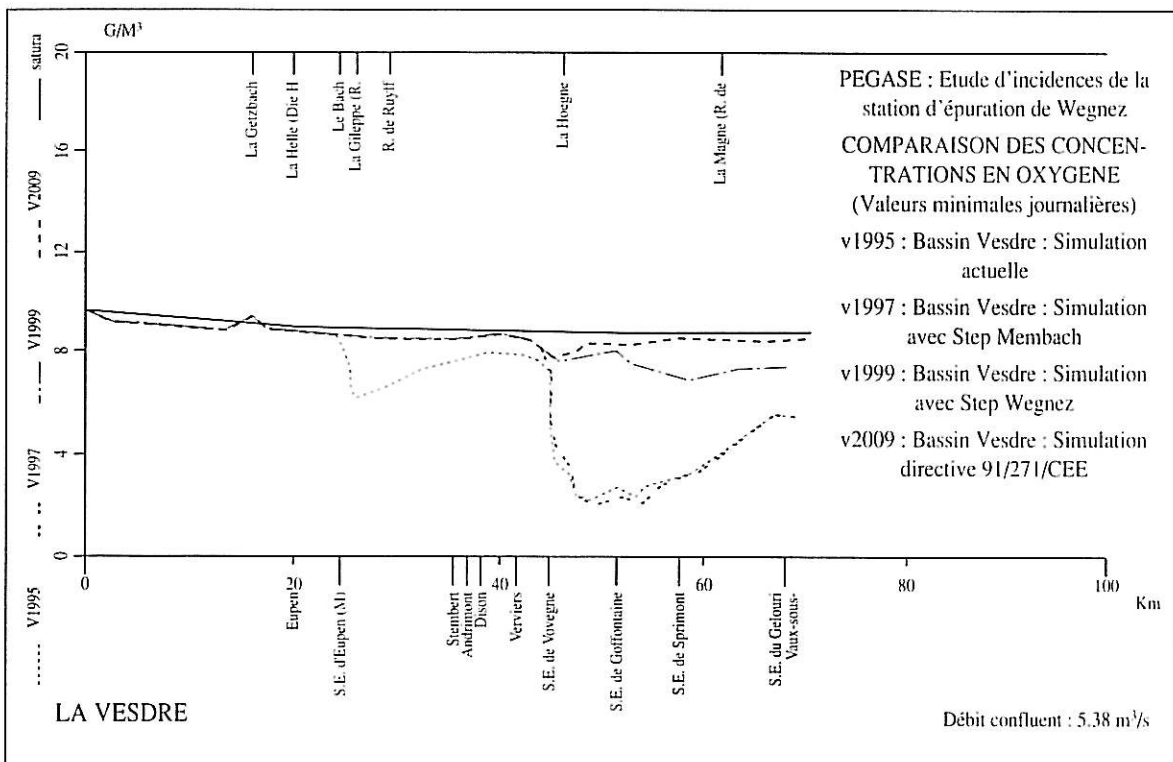


Fig. 5 - l'évolution longitudinale prévisionnelle des concentrations en oxygène dissous dans la Vesdre (Belgique) avant et après mise en fonctionnement prévue de 3 stations d'épuration (Membach, Wegnez, Goffontaine), ce qui permet d'évaluer les effets successifs des différentes phases d'un programme d'épuration.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient, pour leur participation au développement du modèle PEGASE :

- Le Ministère de la Région wallonne, Direction Générale des Ressources Naturelles et de l'Environnement
- L'Agence de l'eau Rhin-Meuse (France)
- La Vlaamse Milieumaatschappij de la Région flamande
- L'Agence de l'eau Artois-Picardie (France)
- Le Ministère de l'Environnement du Québec (Canada)
- Le Ministère de l'Environnement du Grand-Duché de Luxembourg.

INFORMATIONS COMPLÉMENTAIRES

Pour obtenir des informations complémentaires relatives au logiciel PEGASE, s'adresser à :

Centre d'Etude et de Modélisation de l'environnement
 Université de Liège – Sart Tilman B.5
 B-4000 LIEGE BELGIUM
 tel +32/4/366.23.53 fx +32/4/366.23.55
 e-m : cenv@ulg.ac.be

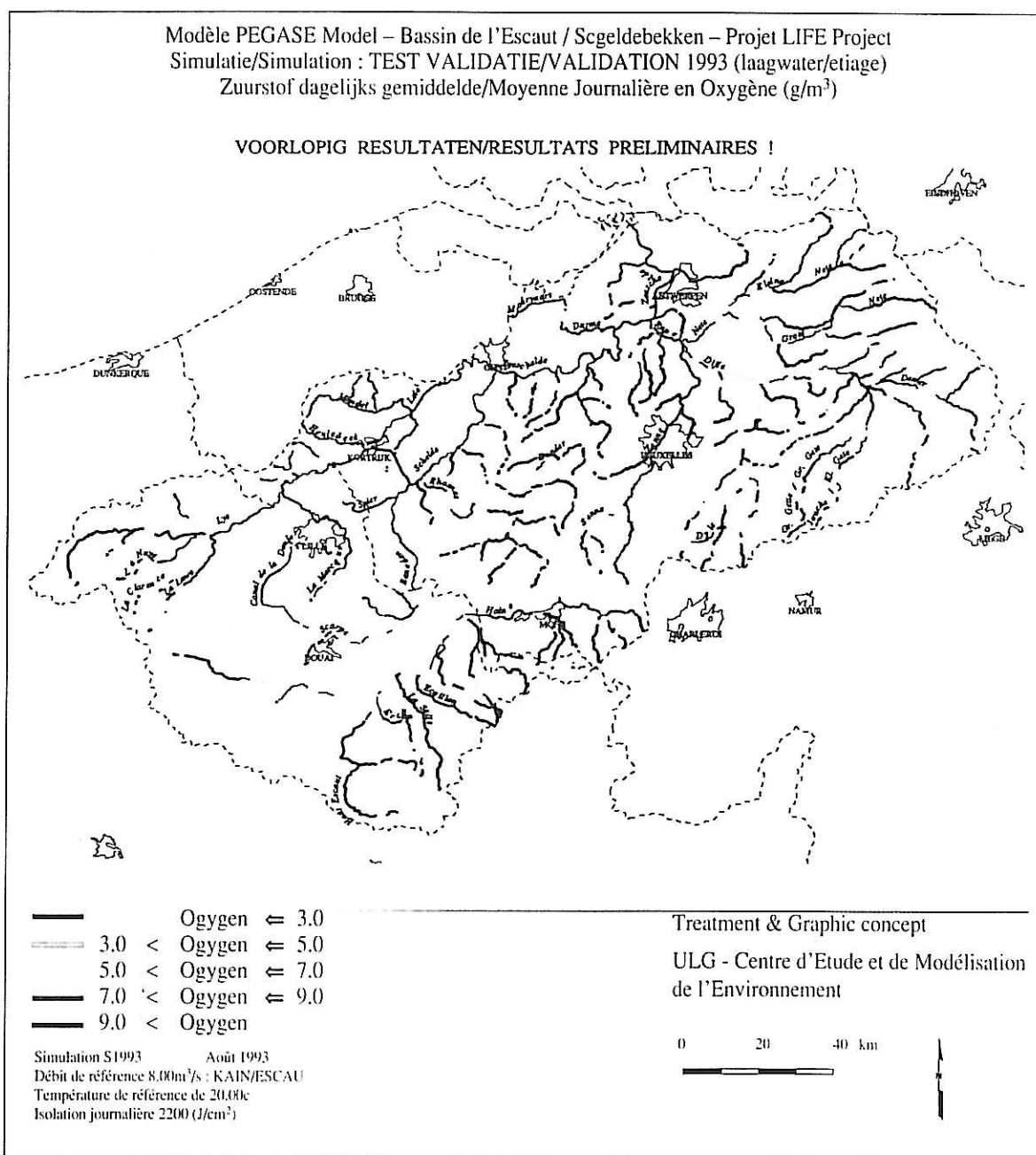


Fig. 6 – la carte globale des concentrations moyennes journalières en oxygène dissous des rivières du bassin de l'Escaut, en situation d'étiage année 1993 (résultats obtenus dans le cadre d'un programme LIFE co-financé par la Communauté européenne, l'Agence de l'eau Artois-Picardie, la Région wallonne et la Vlaams Milieumaatschappij).