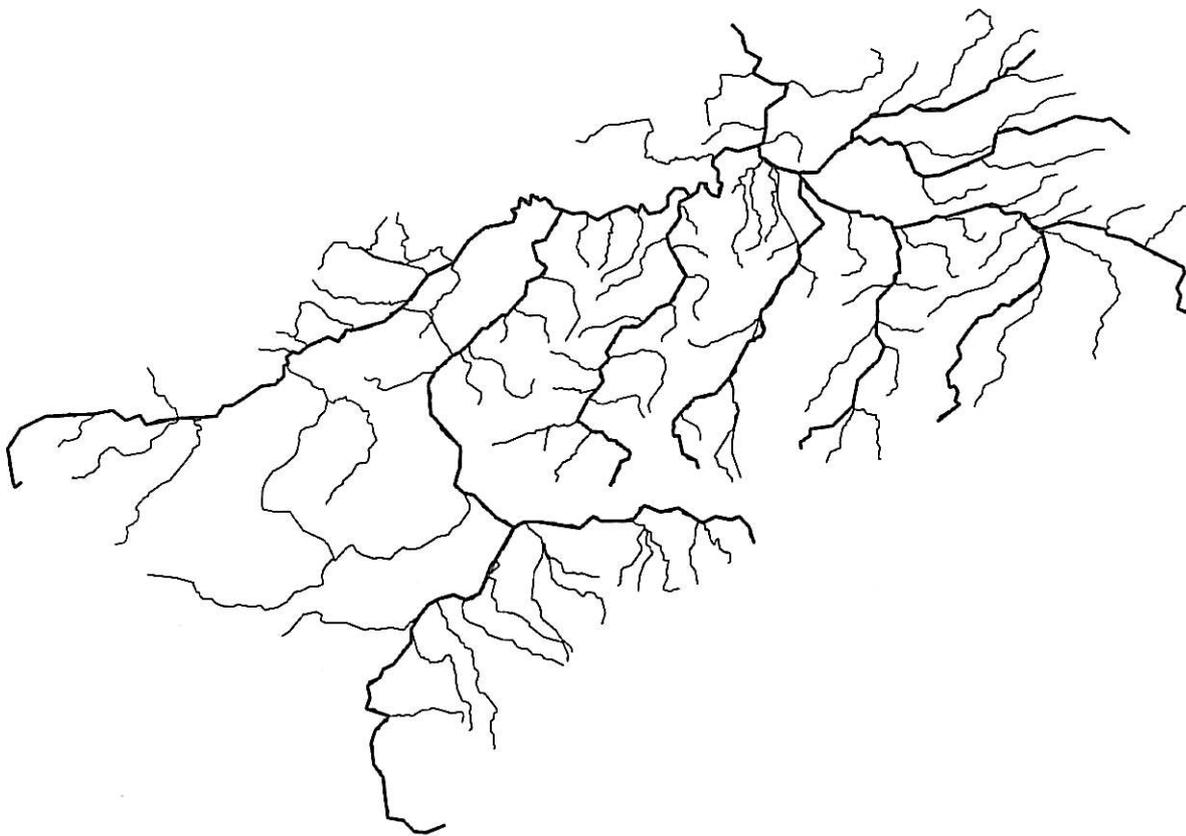


ULG / ULB / FUNDPN

PEGASE

PLANIFICATION ET GESTION
DE L'ASSAINISSEMENT DES EAUX

PRESENTATION GENERALE DU MODELE



Conférences professionnelles de l'agence de l'eau Artois-Picardie

4 Avril 1995

Planification et Gestion de l'Assainissement des Eaux

1. HISTORIQUE

L'application des législations régionale, nationale et européenne en matière de protection et de gestion des eaux de surface impose de nouvelles tâches aux administrations chargées de la Gestion des Eaux :

- définition d'objectifs de qualité pour les cours d'eau,
- établissement de programmes d'investissement en matière d'assainissement et d'épuration,
- délivrance d'autorisations de rejet pour les eaux usées industrielles,
- identification d'actions préventives au niveau de l'ensemble du bassin,
- mise en place de réseaux de mesure adéquats pour la surveillance de la qualité des eaux.

Pour réaliser efficacement ces tâches, l'Administration Régionale wallonne a souhaité s'équiper d'un outil lui permettant :

- 1° d'acquérir une vision *globale* de la qualité des eaux à l'échelle de la région,
- 2° d'orienter ses choix en matière de gestion par la prise en compte explicite des relations existant entre rejets, débits et niveaux de qualité des eaux de surface.

C'est pour répondre à cette demande que le programme **PEGASE** (**P**lanification et **G**estion de l'**A**ssainissement des Eaux) a été entrepris, deux actions y étant menées en parallèle.

La première vise à obtenir une appréciation générale de la qualité des eaux de surface, tenant compte des aspects physico-chimiques et piscicoles, sur la base d'un inventaire détaillé des données et mesures disponibles. Cette action a abouti à la mise au point d'un indice de qualité générale de l'eau, cumulant différents paramètres de qualité pour parvenir à une cotation synthétique des niveaux d'altération.

Le deuxième volet du programme concerne le développement d'un outil de calcul permettant de modéliser la qualité des eaux de surface, les objectifs visés étant :

- d'évaluer l'effet d'une réduction des émissions polluantes, à la source ou par épuration;
- de déterminer les actions nécessaires pour atteindre un objectif de qualité donné (localisation des stations d'épuration, type et efficacité des traitements à mettre en oeuvre, etc.), tout en utilisant au mieux le pouvoir auto-épurateur des cours d'eau;
- de prévoir l'évolution de l'eutrophisation en fonction d'actions ponctuelles ou globales;
- de positionner de manière optimale les points de mesure d'un réseau de surveillance.

D'une manière générale, le modèle PEGASE doit permettre de comparer des scénarios alternatifs afin de dégager des politiques optimales tant sur le plan technique que sur le plan économique.

Le principe général de PEGASE a été de développer d'emblée une approche globale à l'échelle d'un bassin d'une surface de l'ordre de plusieurs dizaines de milliers de km², tout en respectant les deux contraintes suivantes :

- 1° utiliser l'ensemble des connaissances disponibles pour représenter le fonctionnement de l'écosystème aquatique, sans entreprendre de nouvelles études.
- 2° offrir une approche intégrée rivière/bassin versant ce qui constitue une amélioration très significative par rapport aux modèles de rivières existants.

On trouvera ci-après une description synthétique de la méthodologie utilisée pour le développement du modèle PEGASE. Une description détaillée de la méthodologie peut être trouvée dans les divers rapports techniques d'avancement et de synthèse.

La méthodologie appliquée en Région wallonne est naturellement applicable à d'autres bassins. Des applications de PEGASE sont d'ailleurs actuellement en cours sur le Bassin de l'Agence de l'Eau Rhin-Meuse et, dans le cadre d'un programme européen, sur le Bassin de l'Escaut. Des différences apparaissent cependant en ce qui concerne les données d'entrée du point de vue du traitement de l'information (à travers un système d'information géographique - SIG) et du point de vue de format informatique des données générales. D'autres différences induisent également de légères adaptations de la méthodologie et des modifications du code de calcul du modèle mathématique.

Les résultats présentés dans ce résumé se réfèrent actuellement toujours à l'application de la méthodologie aux bassins de la Région wallonne.

2. METHODOLOGIE

PEGASE est avant tout un modèle de qualité des eaux à l'échelle d'un bassin hydrographique. Ses caractéristiques principales ont été déterminées à partir des objectifs à atteindre.

- *Evaluer l'effet d'une réduction des émissions polluantes en utilisant au mieux le pouvoir auto-épurateur des rivières.*
 - Le modèle utilisé doit bien rendre compte des processus de dégradation de la matière organique en rivière. PEGASE ne peut pas se contenter d'un modèle simple tel que le bien connu "Streeter-Phelps", mais doit modéliser réellement l'écosystème aquatique en tenant compte explicitement de phénomènes tels que la croissance bactérienne, la production primaire, ...
 - Il est nécessaire de connaître l'ensemble des apports dans la rivière, c'est-à-dire non seulement les apports urbains et industriels, mais également les apports diffus par le bassin versant. Ceci impose, par une démarche innovante, de sortir du cadre classique "modèle de rivière" pour développer un modèle **intégré rivière/bassin versant**, ce qui reprend deux concepts :
 - PEGASE ne travaille pas sur une rivière, mais sur un réseau de rivières (jusqu'à plusieurs centaines);
 - PEGASE détermine explicitement la relation émission-immission : pour tout point d'émission identifié par ses coordonnées, PEGASE réalise automatiquement l'identification de la rivière "réceptrice" et la détermination de la coordonnée curviligne du point d'impact sur cette rivière.
- *Prévoir l'évolution de l'eutrophisation*
 - Pour pouvoir prévoir l'évolution de l'eutrophisation, le modèle écologique doit inclure les organismes producteurs (algues).
 - Les variables calculées par le modèle doivent, en plus du carbone et de l'oxygène, inclure l'azote et le phosphore.
- *Acquérir une vision globale de la qualité des eaux à l'échelle d'une région.*
 - Ceci limite la précision de la représentation physique du milieu :
 - PEGASE travaille généralement sur un réseau de quelques centaines de rivières dont les plus petites ont un bassin versant de quelques dizaines de km²;
 - l'échelle pratique des informations avec lesquelles PEGASE travaille est généralement de 1 km² (mais elle peut être réduite si le bassin versant à considérer est plus petit).

Les objectifs que PEGASE se fixe (calculer la qualité de l'eau avec une certaine précision, mais sur une zone de plusieurs milliers de km²) imposent donc une collecte extrêmement importante de données. La collecte et la structuration de ces données sont donc un passage nécessaire et important pour pouvoir utiliser l'entièreté des fonctionnalités de PEGASE.

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

1. **Représentation du milieu physique**
 - caractérisation des rivières
 - calcul des bassins versants, ...
2. **Estimation des rejets**
 - rejets industriels, urbains et diffus
 - stations d'épuration
3. **Modélisation de l'écosystème aquatique**
 - simulations de situations passées, actuelles (validation) et futures
4. **Analyse des résultats**
 - comparaison de scénarios, ...

3. REPRESENTATION DU MILIEU PHYSIQUE

3.1. Caractérisation du réseau hydrographique

Une des premières tâches 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 : généralement 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, ...); 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, ...). Cette première caractérisation doit être 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 maillée pour pouvoir tenir compte des canaux.

3.2. Positionnement et cartes de base

Une méthode unique et systématique de repérage et de positionnement doit être utilisée. Le plus simple est d'employer une représentation kilométrique facilement repérable sur les cartes (coordonnées Lambert ou UTM). L'emploi d'un tel système de coordonnées, couramment utilisé par les instituts géographiques et les administrations, permet à n'importe quel utilisateur de localiser aisément les éléments géométriques.

Toutes ces informations peuvent être traitées soit dans de simples fichiers ASCII, soit, solution idéale, dans un Système d'Information Géographique (SIG) tel que ARC INFO.

3.3. Liste des cours d'eau

La liste complète des cours d'eau parcourant un territoire tel que la Région wallonne, le bassin Rhin-Meuse ou le bassin de l'Escaut en comporte plusieurs milliers. En fonction des objectifs initiaux de PEGASE, il est évidemment peu réaliste - et de plus tout à fait inutile - de vouloir traiter d'emblée l'ensemble des cours d'eau répertoriés. Dans un premier temps, un certain nombre (quelques centaines de cours d'eau) doivent être sélectionnés et décrits explicitement. A ce niveau de résolution, les plus petits bassins versants représentés couvrent des superficies inférieures à 50 km². Il faut toutefois noter qu'il n'y a pas d'obstacles conceptuels à accroître, après coup, le nombre de cours d'eau explicitement pris en compte, les programmes de calcul étant conçus et organisés pour fonctionner à partir d'une structure hydrographique arborescente reprenant un nombre quelconque de branches.

3.4. Trajet des cours d'eau

Les trajets des cours d'eau sont représentés, dans une forme discrétisée, par une suite ordonnée de points; cette discrétisation est faite par pas variables, les pas étant suffisamment petits pour que l'interpolation linéaire entre deux points puisse être considérée comme une bonne approximation du parcours moyen suivi par l'eau.

Le tracé de l'ensemble des rivières traitées dans PEGASE, pour la Région wallonne et pour le bassin Rhin-Meuse et pour le bassin de l'Escaut est représenté aux **figures 1 à 3**.

Ces données numériques permettent de calculer la longueur de chaque rivière de son point origine jusqu'à sa confluence et de positionner des points de référence en fonction de leur distance au point origine.

3.5. Altitude des cours d'eau

La pente des rivières est un des paramètres conditionnant les variables hydrodynamiques de l'écoulement et il est donc nécessaire d'inclure dans le modèle une représentation altimétrique. Deux méthodes peuvent être employées à cette fin, dépendant du bassin et des données disponibles :

1. on peut extraire ces altitudes d'un modèle numérique de terrain à mailles suffisamment fines (100 m au maximum). Cette méthode donne de bons résultats, sauf dans les plaines importantes. On associe alors à cette méthode, un forcing algorithmique propre à lever des indéterminations locales;
2. si aucun modèle numérique de terrain à maille fine n'est disponible ou si les pentes des rivières sont trop faibles pour pouvoir être extraites du Modèle Numérique de Terrain, des points caractéristiques du cours des rivières doivent être repérés, ainsi que leur altitude, de manière à pouvoir reproduire les différentes pentes caractéristiques des tronçons. Entre les points caractéristiques choisis, l'altitude du cours d'eau est calculée par interpolation linéaire en fonction de la coordonnée longitudinale.

Le cas des altitudes des plans d'eau créés par les barrages-écluses sur les rivières navigables ou les canaux doit être traité séparément.

D'autres données importantes pour la caractérisation des rivières d'un point de vue topographique ou hydrographique, sont présentées dans la note annexée présentant l'ensemble des données nécessaires.

3.6. Détermination des bassins hydrographiques

Une méthode de calcul automatique des bassins hydrographiques, par calcul des chemins de plus grande pente, a été mise au point pour PEGASE. Les données de base utilisées pour ce calcul sont la matrice des valeurs des altitudes du sol et les tracés numérisés des cours d'eau.

Compte tenu de la résolution spatiale nécessaire, une numérisation simplifiée de l'altitude du territoire par maille de 1 km x 1 km doit être réalisée, soit par la manipulation d'un modèle numérique de terrain soit, par digitalisation sur carte des altitudes.

A partir de ces calculs, trois types d'informations sont obtenues :

- 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 ont chacun été déterminés;
- 2° la surface des bassins hydrographiques, ainsi que l'évolution de cette surface 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, une routine de calcul permet l'identification automatique de la rivière "réceptrice" et la détermination de la coordonnée curviligne du point d'impact sur cette rivière.

Cette approche permet de calculer plus aisément les charges liées aux rejets diffus et n'impose pas d'utiliser une description détaillée des réseaux d'égoûts locaux (en particulier pour l'habitat dispersé non raccordé à une station d'épuration)

Il faut noter que la comparaison entre les surfaces des bassins hydrographiques calculées par cette méthode numérique (sans recours à la délimitation des contours de bassin versant) et les surfaces déterminées par les méthodes classiques (planimétrie) indique un excellent accord, les écarts étant généralement de l'ordre de 1 %.

3.7. Limites 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. Un fichier de base contenant la délimitation géographique des communes doit être utilisé, de manière à pouvoir superposer aux différentes bases de données déjà créées (altitude, tracés, bassins, etc.) des données supplémentaires fournies à l'échelle communale.

Grace aux routines d'identification automatique des bassins, ces éléments permettent d'effectuer les recouvrements entre communes (ou tout autre entité administrative) et bassins versants et d'obtenir par exemple, commune par commune, la répartition entre divers bassins versants de la population, de l'affectation des sols, etc.

3.8. Occupation des sols

L'occupation des sols est le facteur qui influence de la manière la plus significative les apports diffus vers le réseau hydrographique. Une représentation de l'occupation du sol est donc nécessaire, les divers types d'occupation étant regroupés en 6 catégories : forêts de conifères, forêts de feuillus, prairies, cultures, zones urbanisées, divers. Trois sources d'informations peuvent être utilisées :

1. la numérisation de cartes, à l'échelle idéale du km². Cette méthode a été utilisée pour la Région wallonne mais demande un travail de numérisation extrêmement important et permet difficilement une actualisation régulière.
2. l'utilisation des statistiques communales (cadastre, RGA, ...). Ces données, établies dans un but différent, donnent souvent des difficultés d'interprétation. De plus, si les communes ont une surface importante (Région wallonne), la résolution spatiale est un peu faible. Cette méthode a été utilisée pour le bassin Rhin-Meuse et le sera probablement pour le bassin de l'Escaut.
3. l'utilisation de l'imagerie multispectrale de télédétection. Cette solution serait a priori la solution idéale. Cependant, la quantité d'information à traiter (couverture de milliers de km² avec une maille de l'ordre de 20 m sur 20 m (soit 2500 valeurs par km²)) est un facteur limitant de cette méthode.

Les trois approches ont été comparées de manière concluante dans des zones limitées en Région wallonne.

A partir de la matrice d'occupation des sols, les programmes de calcul numérique des bassins hydrographiques permettent d'obtenir les surfaces des bassins hydrographiques affectées aux diverses catégories d'occupation, ainsi que l'évolution de ces couvertures en fonction de la coordonnée longitudinale des rivières. Un exemple d'évolution de la répartition forêts / prairies / cultures en fonction de la distance à la source est donné à la **figure 4**.

4. ESTIMATION DES REJETS

4.1. Apports et rejets dans le réseau hydrographique

Les **apports** sont définis comme les flux de pollution générés dans un bassin versant, de manière naturelle ou du fait de l'activité humaine. Certains de ces apports, comme ceux résultant du lessivage des sols, ne sont pas modifiables par des actions d'épuration, mais peuvent être influencés par des actions prises au niveau du bassin (par exemple : modification des pratiques culturales). Les apports générés par l'activité humaine peuvent en général être réduits par des actions d'épuration ou de contrôle à la source.

Les **rejets** représentent les flux de pollution parvenant au réseau hydrographique. En l'absence d'épuration, le rejet est égal à l'apport. S'il y a une action d'épuration, le rejet est égal à l'apport diminué de l'abattement de pollution réalisé. Cet abattement dépend de la filière d'épuration mise en oeuvre, et n'est pas identique pour tous les composés constitutifs de la charge polluante.

Pour les besoins de PEGASE, un inventaire et une évaluation des apports, des rejets et des capacités 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 de la région sont pris en considération : matières carbonées, azotées et phosphorées. Les apports et rejets d'autres types de composés (par exemple, métaux lourds, pesticides, etc.) ne sont pour l'instant pas traités par PEGASE.

Une **classification** cohérente des apports et des rejets a été établie en fonction, principalement, des diverses origines possibles, mais aussi des modes d'action pouvant être mis en oeuvre pour modifier ou traiter les apports. Cette classification a également tenu compte des possibilités de localisation spatiale des points d'émission (nombreuses données statistiques existantes, format, précision, ...).

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;
- 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;
- 3° les apports et rejets **diffus** : ce sont les apports auxquels sont attachés, par nature, des surfaces contributantes.

4.2. Classification des rejets

La classification adoptée dans PEGASE est actuellement la suivante :

- apports et 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.

- apports et rejets domestiques en égout, de type ponctuel : 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. La population concernée peut être classée en différentes catégories (par exemple, une population sédentaire, une population "hors domicile" (bureaux, etc.), une population touristique, la population des hôpitaux, ...) et donc varier au cours de l'année.
- apports et rejets domestiques non rejetés en égout, de type dispersé;
- apports et rejets directs d'élevage, de type dispersé : 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);
- apports provenant du lessivage des sols, de type diffus.

4.3. Quantification des rejets

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

- apports et rejets industriels : sur base des autorisations de rejets accordées, des données servant à l'établissement des taxes et redevances sur l'eau usée ou à partir des mesures de contrôle;
- apports domestiques : par l'utilisation du concept d'équivalent-habitant, en tenant compte des subdivisions entre population résidente, et, éventuellement, population hors domicile et touristique. La fraction des apports domestiques rejetés en égout est calculée par un coefficient moyen de raccordement au réseau d'assainissement, variable d'une commune à l'autre (dépendant des taux de raccordement communaux aux réseaux d'assainissement ainsi que du taux de collecte des stations d'épuration collective);
- apports directs d'élevage : sur base du cheptel recensé par commune;
- apports par les sols : une approche basée sur l'utilisation de fonctions d'apport a été adoptée pour PEGASE. La synthèse des données relatives au fonctionnement de plusieurs micro-bassins versants, caractéristiques des diverses natures et occupations du sol en Région wallonne, 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).

5. LES ETAPES DE LA MODELISATION

5.1. Calcul des débits

Le calcul des débits et de la description du transport des charges polluantes est relativement complexe si l'on souhaite reproduire en détail des phénomènes non-stationnaires tels que la propagation d'une crue ou l'évolution d'un rejet accidentel. Or l'objectif de PEGASE n'est pas d'obtenir une description fine des évolutions temporelles à court terme, mais bien de fournir une image de la qualité des eaux dans des conditions de débit caractéristique : étiage, débit moyen, régime de crue établi, et ce pour des temps caractéristiques de quelques jours ou plus.

Dans PEGASE, la modélisation des débits est donc réalisée à partir des mesures de débit effectuées aux stations de mesures hydrométriques ou à partir de catalogues de débits caractéristiques. A partir de ces mesures, 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.

Ces calculs permettent en général d'obtenir des valeurs très proches des valeurs mesurées, à condition de respecter impérativement deux règles simples :

- 1° les évaluations doivent porter sur des temps caractéristiques supérieurs ou égaux au temps caractéristique de transit de l'eau dans le bassin versant considéré;
- 2° les débits doivent naturellement être corrigés pour tenir compte des prélèvements nets (c'est-à-dire non accompagnés d'une restitution) ou des importations et exportations nettes entre les divers bassins versants.

Dans PEGASE, les surfaces des bassins versants, calculées en fonction de la distance à la source, sont directement utilisées pour réaliser ces calculs. Les résultats ainsi obtenus sont généralement en bon accord avec les valeurs mesurées : l'écart est de l'ordre de quelques pourcents, ce qui représente également l'ordre de grandeur de l'incertitude attachée à la mesure des débits. La **figure 5** fournit à titre d'exemple les débits moyens mensuels (année 1981) de la Semois mesurés à la station de Membre, et comparés aux débits calculés en ce point en utilisant le débit de la Meuse à Ampsin-Neuville comme débit de référence.

5.2. Estimation des paramètres géométriques

Pour les réseaux hydrographiques, les données géométriques relatives aux profils transversaux des cours d'eau ne sont généralement connus qu'en de très rares points, sauf pour les grandes rivières très largement canalisées. Or, la connaissance des largeurs des cours d'eau est indispensable pour pouvoir évaluer, en fonction du débit, la section mouillée et la vitesse d'écoulement.

Dans PEGASE, les largeurs sont estimées, soit à partir des données disponibles, soit sur base d'une approche géomorphologique analogue à celle introduite par HORTON (1932) et modifiée par STRAHLER (1957). Cette approche permet en effet d'établir, pour un réseau hydrographique relativement homogène, des relations statistiques entre la distance à la source et la largeur moyenne du cours d'eau.

5.3. Calcul des vitesses et des temps de transfert

Pour les situations stationnaires décrites par PEGASE, les relations entre les caractéristiques géométriques de la rivière (pente, rugosité, etc.) et les variables hydrodynamiques caractérisant l'écoulement (hauteur, section, vitesse, etc.) peuvent s'exprimer de manière relativement simple. Le modèle PEGASE utilise la formulation classique de MANNING, utilisant dans une première approche une valeur constante pour le coefficient de rugosité. La connaissance des débits, des largeurs 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.

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 complet 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.

5.4. Caractérisation des rejets

La méthode de quantification des divers apports et rejets a été brièvement exposée ci-dessus; les apports et rejets sont exprimés en charges carbonée, azotée et phosphorée. Toutefois, l'existence des processus de sédimentation et d'auto-épuration impose de subdiviser chacun de ces compartiments (carbone, azote, phosphore) en plusieurs sous-compartiments. Cette division doit tenir compte des différences de comportement physique (en particulier vis-à-vis de la sédimentation), chimique et biologique (biodégradabilité).

Pour obtenir une représentation suffisamment fine, les 12 sous-compartiments suivants sont pris en compte : 4 se rapportent à la charge en carbone organique¹ (dissous dégradable, dissous non dégradable, particulaire dégradable, particulaire non dégradable), 3 à l'azote organique (dissous dégradable, dissous non dégradable, particulaire dégradable), 2 à l'azote minéral (nitrates et ammoniacque), 2 au phosphore organique (dissous dégradable et particulaire dégradable) et 1 au phosphore minéral (orthophosphates).

Par composé "non dégradable", il faut entendre "non dégradable à court ou à moyen terme", c'est-à-dire n'étant pas significativement dégradé, dans le milieu aquatique, après des temps de l'ordre de quelques jours à quelques dizaines de jours.

5.5. Le modèle de qualité

Il ne peut être question, dans le cadre du présent document, de présenter une description détaillée de la structure du modèle PEGASE. On se limitera donc à présenter brièvement les différentes variables explicitement décrites par le modèle en citant, le cas échéant, les principaux processus où ces variables interviennent.

Variables physiques

Outre les variables hydrodynamiques explicitées ci-dessus (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, la concentration en matières en suspension et la transparence de l'eau.

¹ Une étude menée en parallèle devrait nous permettre d'affiner encore la subdivision carbonée pour porter à 6 le nombre de sous-compartiments. Nous ajouterons les compartiments de carbone dissous et particulaire très lentement biodégradables.

L'évolution de la température naturelle dépend principalement des échanges qui se produisent à l'interface eau/atmosphère (rayonnement, convection, évaporation). Ces processus ne sont pas décrits explicitement, la température naturelle étant 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 ultérieur 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 corrélant la charge particulaire aux débits. Cette variable intervient dans le calcul de la transparence de l'eau. Cette dernière résulte de quatre contributions : matières minérales en suspension, matières organiques particulaires, phytoplancton, végétaux benthiques (macrophytes).

Variables chimiques

Les variables représentatives de la qualité chimique des eaux de surface sont les suivantes :

- les concentrations en C, N et P associées à la matière organique dégradable, tant particulaire que dissoute;
- la concentration en C associée à la matière organique non dégradable, particulaire et dissoute;
- les concentrations en C, N et P associées à la matière organique particulaire dégradable sédimentée (par unité de surface);
- 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 mortalité des diverses biomasses). Les processus d'élimination sont, selon le compartiment considéré, soit uniquement la dégradation par les bactéries hétérotrophes (planctoniques ou du biofilm), soit uniquement la sédimentation, soit encore une combinaison de ces deux processus.

Pour l'ammoniacque et les orthophosphates, les sources peuvent également être externes 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 sédimentent en fonction de la vitesse du courant.

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.

Variables biologiques

En ce qui concerne l'activité biologique, 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 considéré comme constant : biomasse végétale phytoplanctonique, biomasse végétale benthique (macrophytes et phytobenthos), biomasse bactérienne autotrophe planctonique (bactéries nitrifiantes) et 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 : biomasse bactérienne du biofilm et 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 et la profondeur de l'eau, la température et 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 pour le phytoplancton, et sa décroissance est décrite par un taux de mortalité variable avec la température. La croissance de la biomasse nitrifiante dépend de la température et de la disponibilité en ammoniacque; sa décroissance est également décrite par un taux de mortalité variable avec la température. 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, selon le cas, 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 bien entendu une incidence directe sur les concentrations des diverses formes de C, N et P 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 que des biomasses bactériennes hétérotrophes (planctonique, du biofilm et benthique) et autotrophes. Bien entendu, un flux d'échange à travers la surface (réaération), fonction de la vitesse, de la profondeur et de l'écart à la saturation, est décrit par le modèle.

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

- . le transport par les masses d'eau;
- . les apports ou les effets de dilution 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.

6. RESULTATS DE LA MODELISATION

Les résultats de PEGASE consistent essentiellement en la sortie de l'évolution longitudinale des variables (environ une cinquantaine) calculées par le modèle (essentiellement carbone, azote, phosphore), rivière par rivière (le pas utilisé actuellement est de l'ordre de 1 km, mais il pourrait être raccourci sans problèmes).

Les simulations sont réalisées pour différentes simulations hydrométéorologiques (situation typique étiage, ...):

- pour simuler des situations passées, présentes ou futures (simulation d'un plan d'épuration, ...);
- pour comparer différents scénarios.

Les résultats peuvent être représentés de différentes manières :

- cartes générales avec codes de couleurs (voir **figures 6, 7 et 8** où l'on voit, pour la Région wallonne, des simulations du phosphore en régime d'étiage (situation 93, situation 2005 et comparaison entre les deux scénarios);
- évolutions longitudinales, rivière par rivière, des différentes variables (**figure 9**);
- impression sur papier des résultats (**tableau 10**);
- possibilité de faire des traitements statistiques des résultats (par exemple, pourcentage du réseau hydrographique où la concentration en phosphore est inférieure à $x \text{ g/m}^3$, ...).

Outre les résultats des concentrations en carbone, azote, phosphore et oxygène qui constituent le but même de PEGASE, toute une série de résultats annexes sont disponibles tels :

- l'évolution, rivière par rivière, des apports distingués en urbains, industriels ou diffus;
- les données oro-hydrographiques (bassins-versants km par km de rivière, occupation du sol, ...);
- le temps de transfert des masses d'eau;
- ...

7. CONCLUSIONS

L'objectif assigné de **PEGASE (PLANIFICATION ET GESTION DE L'ASSAINISSEMENT DES EAUX)**, à savoir le développement et la mise au point d'un outil de gestion de la qualité des eaux de surface, est actuellement rencontré.

Cet outil de calcul permet d'obtenir :

- une vision globale à l'échelle du bassin hydrographique;
- les situations hydrologiques de référence en tout point du réseau hydrographique;
- les niveaux de qualité actuels, évalués d'après les données existantes;
- un bilan par rivière des apports et des rejets;
- la relation explicite entre les rejets, les débits, et les niveaux de qualité en tout point du réseau hydrographique, compte tenu de l'ensemble des processus physiques, chimiques et biologiques d'auto-épuration; cette description concerne l'ensemble des paramètres de la charge carbonée, azotée et phosphorée;
- une représentation détaillée du fonctionnement de l'écosystème aquatique et de ses perturbations.

Il faut mettre en évidence l'aspect innovant de la démarche : **PEGASE** offre une **approche intégrée rivière/bassin**, ce qui constitue une amélioration très significative par rapport aux modèles de rivières existants. L'application de ce concept à l'échelle des bassins versants de plusieurs milliers de km² permet de traiter simultanément plusieurs centaines de cours d'eau.

Ainsi, le modèle **PEGASE** est à même de réaliser des simulations prévisionnelles de l'évolution de la qualité des eaux suivant différents scénarios de modifications des émissions, à l'échelle locale aussi bien qu'à l'échelle du bassin (mise en service de collecteurs ou de stations d'épuration, réduction des émissions diffuses, nouvelles implantations urbaines ou industrielles).

Il est également possible, au moyen de **PEGASE**, d'évaluer les actions d'épuration nécessaires pour atteindre les **objectifs de qualité** donnés, et de comparer les solutions alternatives dans ce domaine. A partir du coût estimé de ces actions d'épuration, il est donc possible d'établir le rapport coût/efficacité des solutions proposées (par exemple, en terme de coût par unité de longueur de cours d'eau améliorée).

En outre, **PEGASE** permet de tester différentes stratégies en vue de contrôler l'**eutrophisation** des eaux de surface, contrôle qui constituera dans les prochaines années un élément crucial de la gestion des eaux, tant en Région Wallonne que dans les autres régions de la Communauté Européenne.

Une autre application particulièrement intéressante de **PEGASE** concerne les **réseaux de mesures** de la qualité, soit pour apprécier l'intérêt de points de mesures existants, soit pour positionner le plus efficacement possible de nouveaux points de mesure.

La comparaison entre les résultats des simulations obtenues pour des situations hydrologiques caractéristiques d'une part, et les valeurs de la qualité des eaux mesurées en divers points du réseau hydrographique d'autre part, montre en général un excellent accord : toutes les tendances caractéristiques de l'état des cours d'eau sont rendues par le modèle.

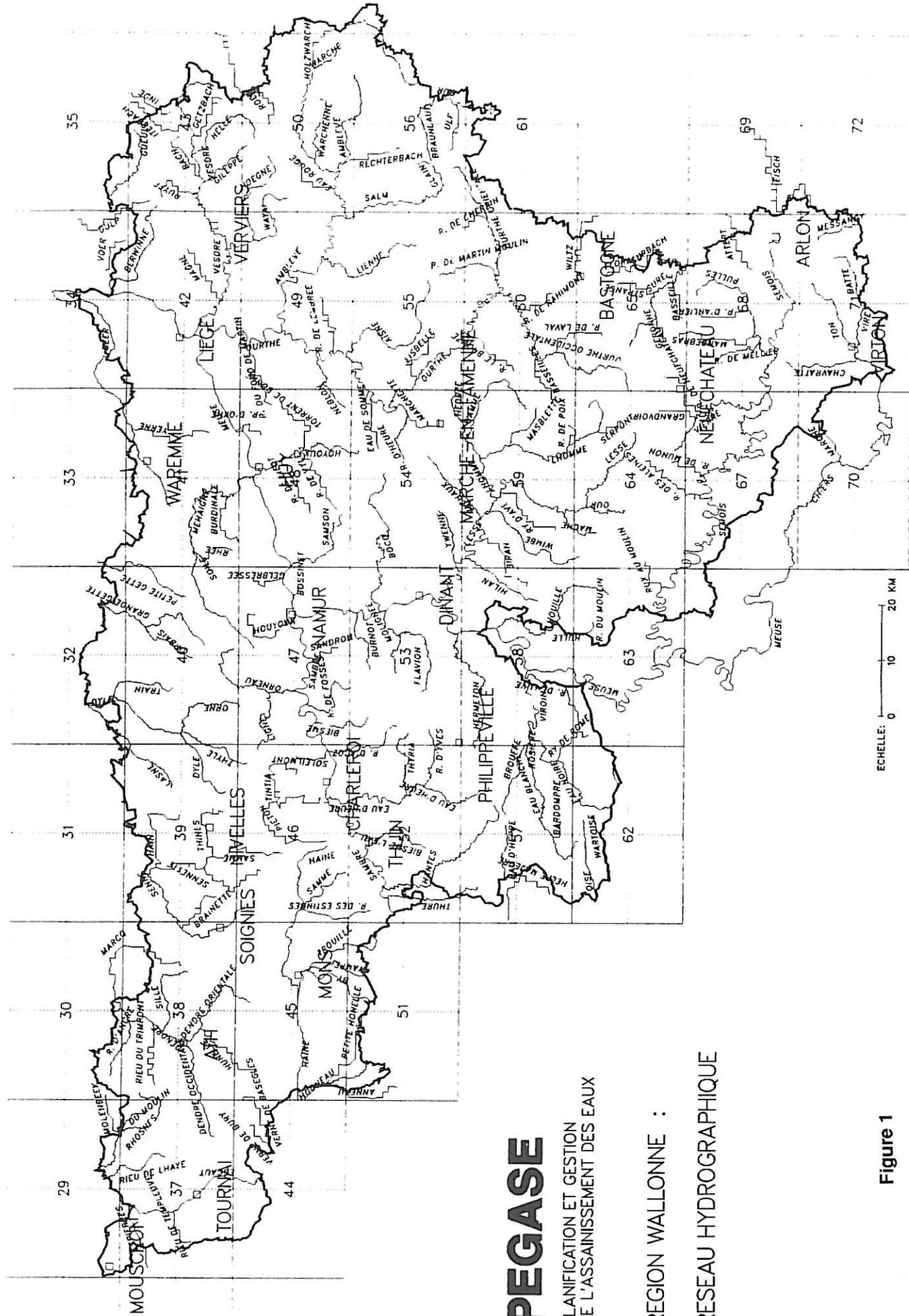
Ceci permet d'estimer que :

- tous les processus significatifs qui gouvernent la qualité de l'eau ont effectivement été incorporés dans le modèle;
- le mode de représentation de ces processus est adéquat.

Bien entendu, un certain nombre d'**améliorations** sont encore possibles. On peut penser par exemple à améliorer la représentation de l'activité des végétaux fixés (qui jouent un rôle important dans les tronçons de rivière à forte pente situés en amont), la prise en compte des processus anaérobiques et de la dénitrification (pour les tronçons extrêmement pollués).

Parallèlement, des améliorations devraient être apportées au niveau de certaines **données d'entrée**. Ceci concerne notamment la précision avec laquelle sont connus certains **rejets** industriels et certains rejets provenant des activités de l'agriculture et de l'élevage.

Enfin, l'utilisation de systèmes d'information géographiques pour la gestion des données et la présentation des résultats devrait donner un "plus" certain à PEGASE.



PEGASE

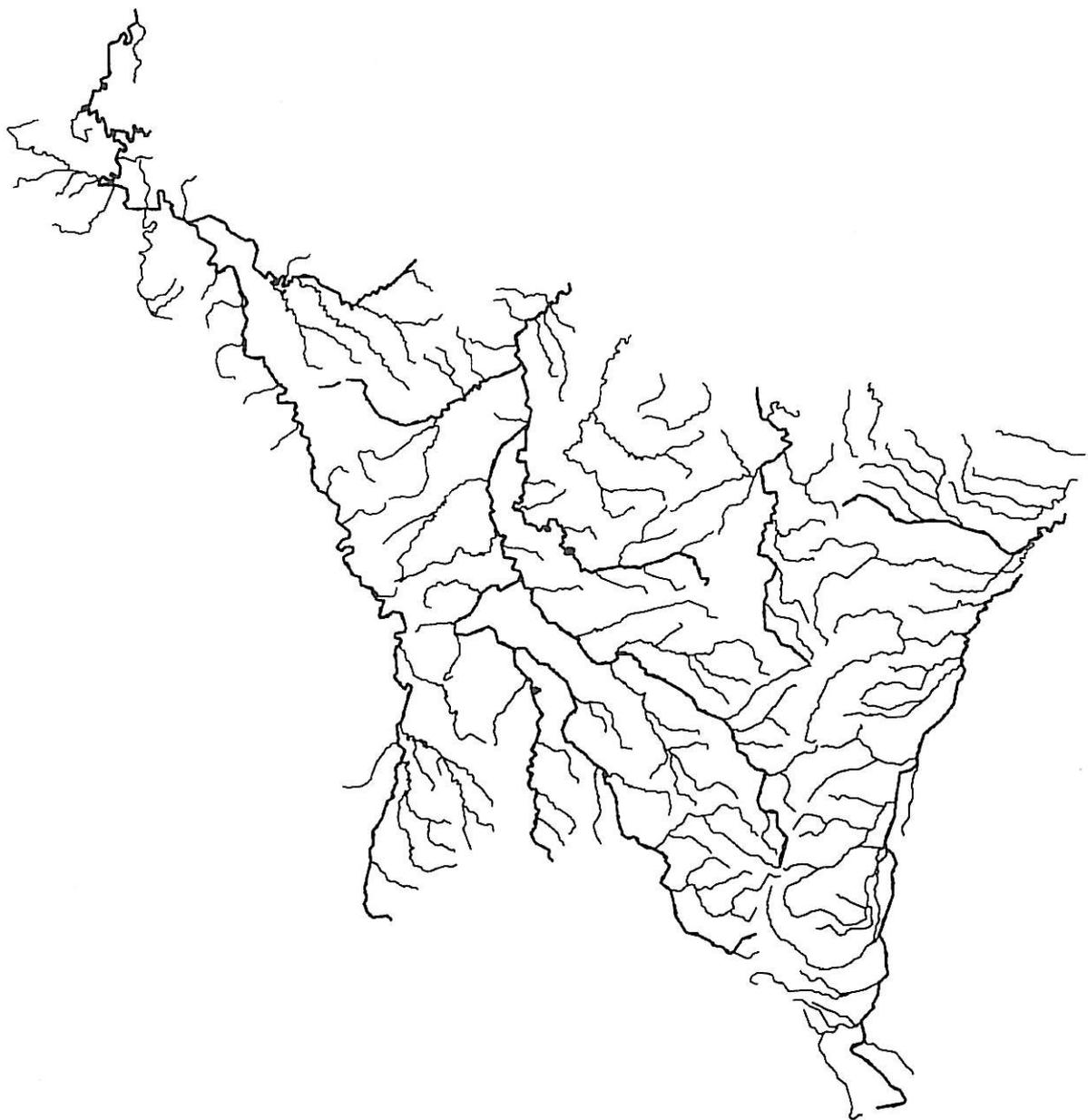
PLANIFICATION ET GESTION
DE L'ASSAINISSEMENT DES EAUX

REGION WALLONNE :
RESEAU HYDROGRAPHIQUE

Figure 1

MINISTERE DE LA REGION WALLONNE
ULG / ULB / FUNDPN

PEGASE RHIN MEUSE
Bassin RHIN MEUSE



hyam_ml

Figure 2 - Arcs des rivières sélectionnées sur le bassin Rhin-Meuse

LIFE PROJECT: Schelde/Escout Selected Rivers/Channels

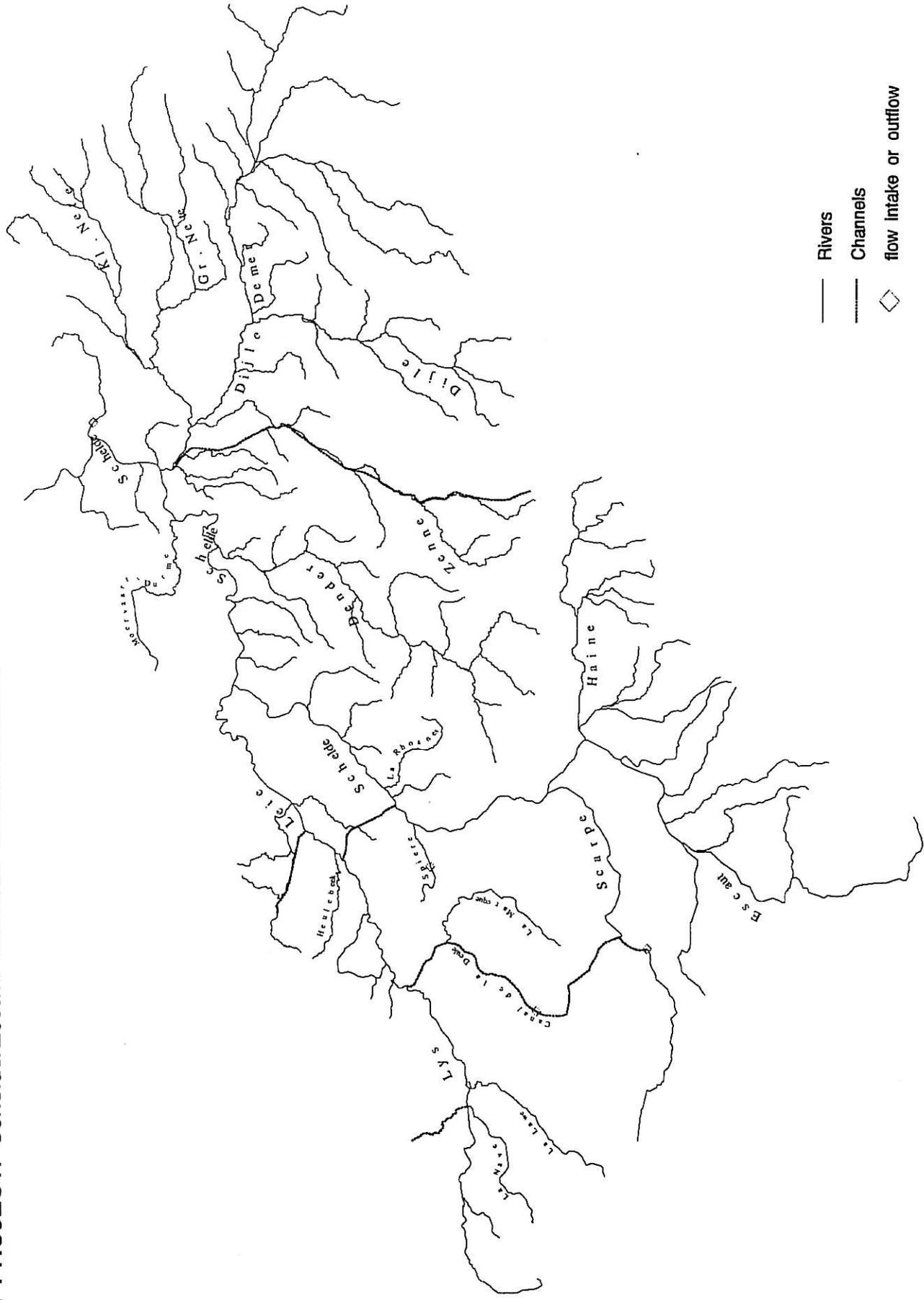
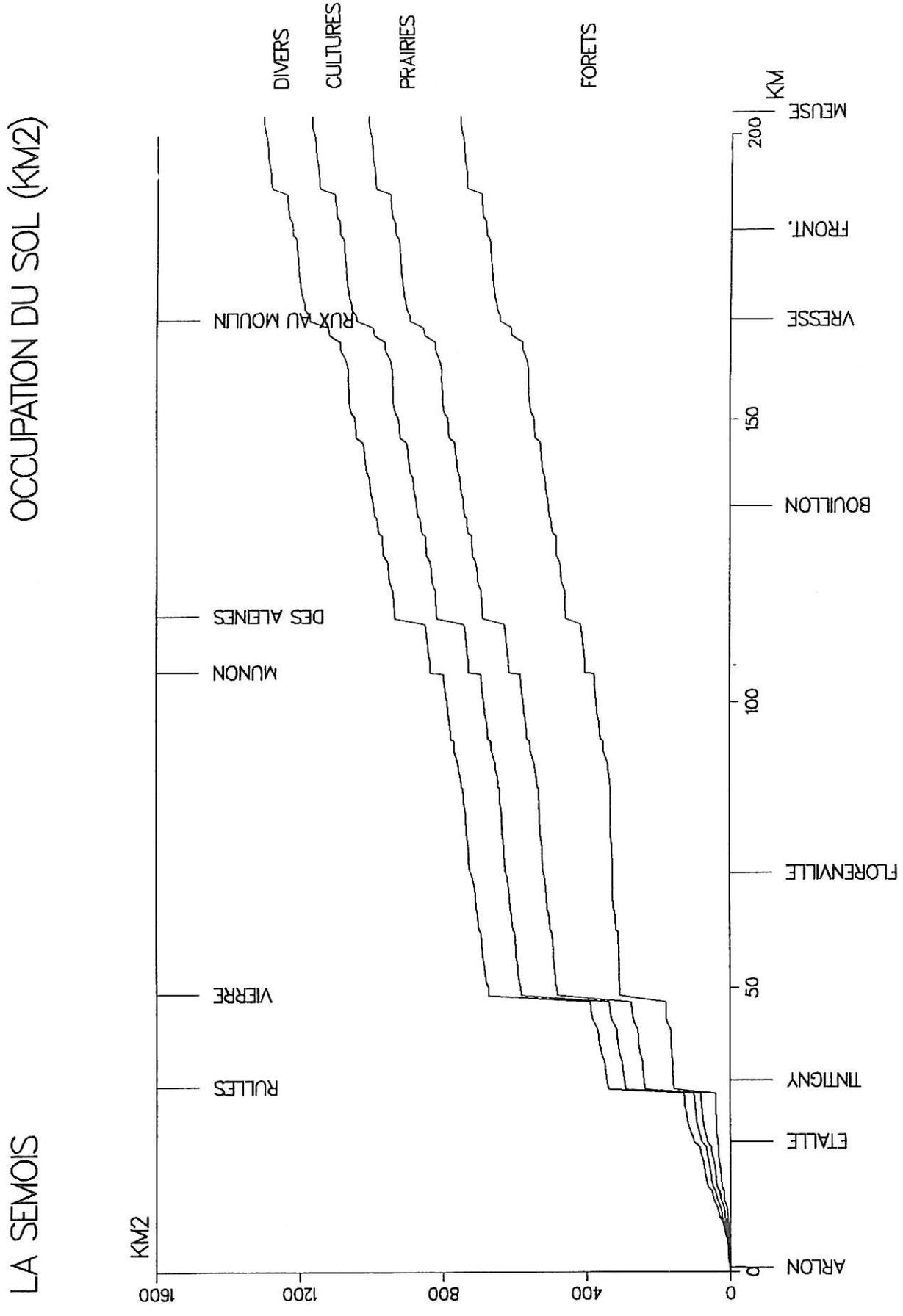


Figure 3



OCCUPATION DU SOL (KM2)

LA SEMOIS

Figure 4

PEGASE

debits mensuels de la Semois (Membre)

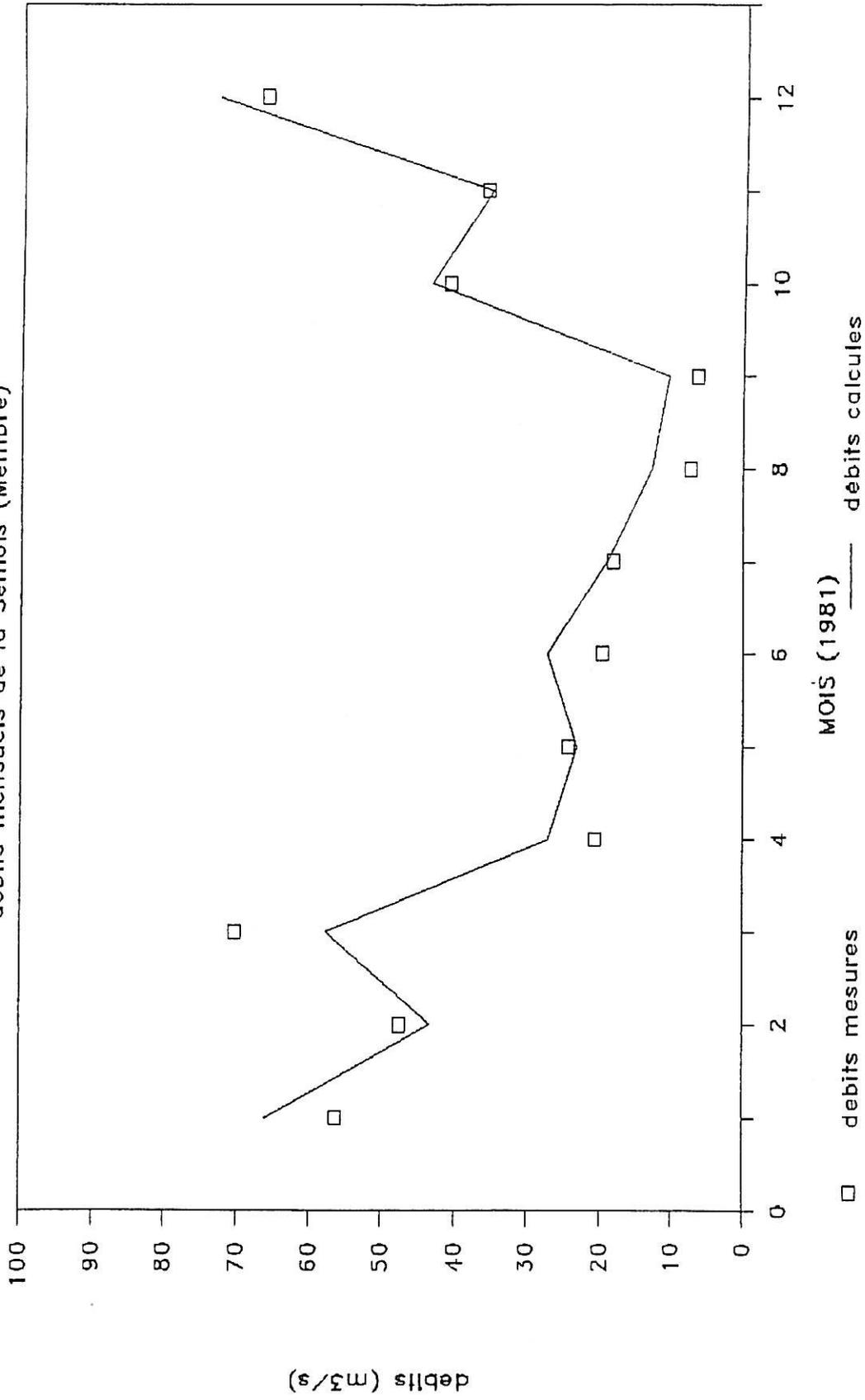
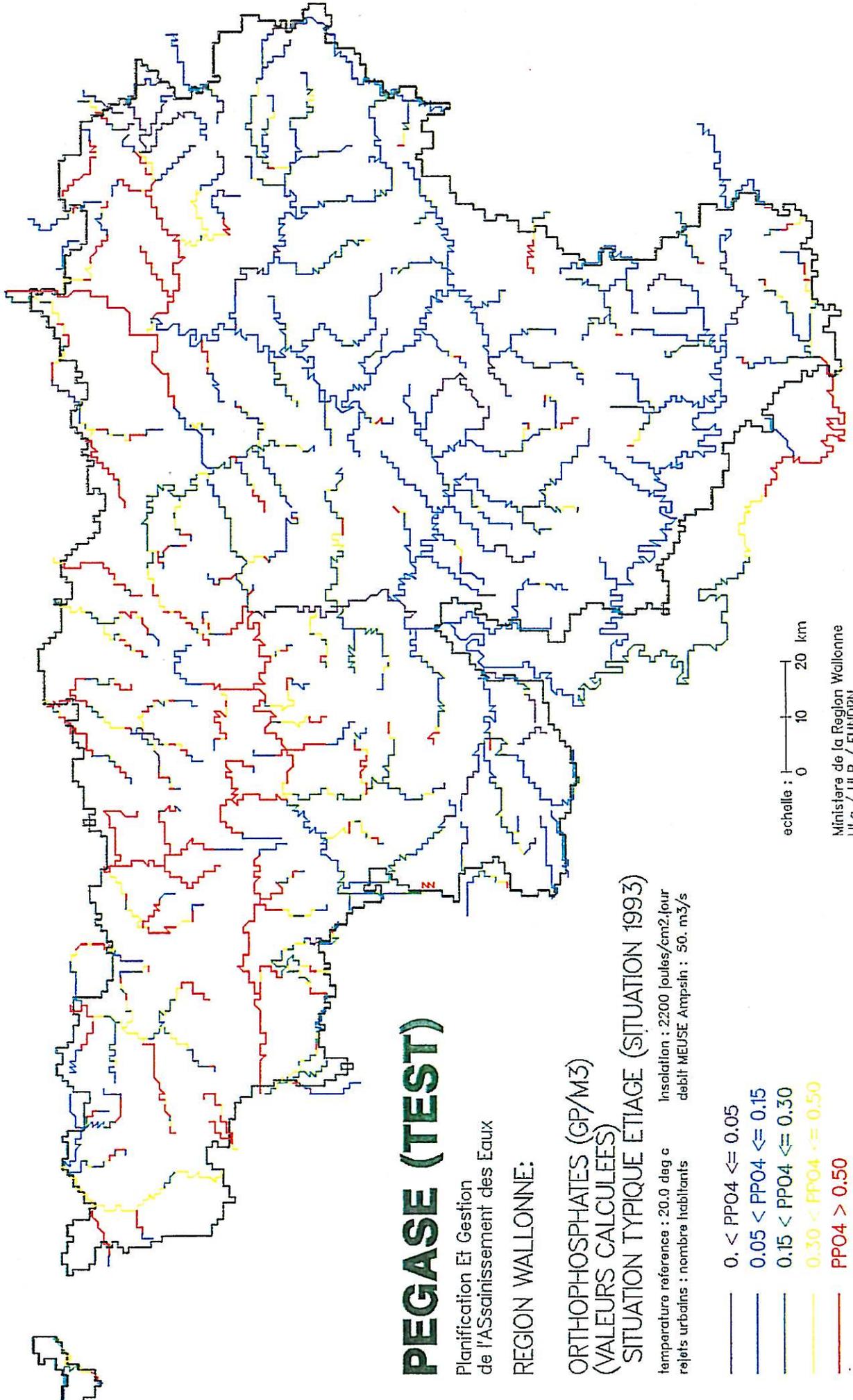


Figure 5



PEGASE (TEST)

Planification Et Gestion
de l'Assainissement des Eaux

REGION WALLONNE:

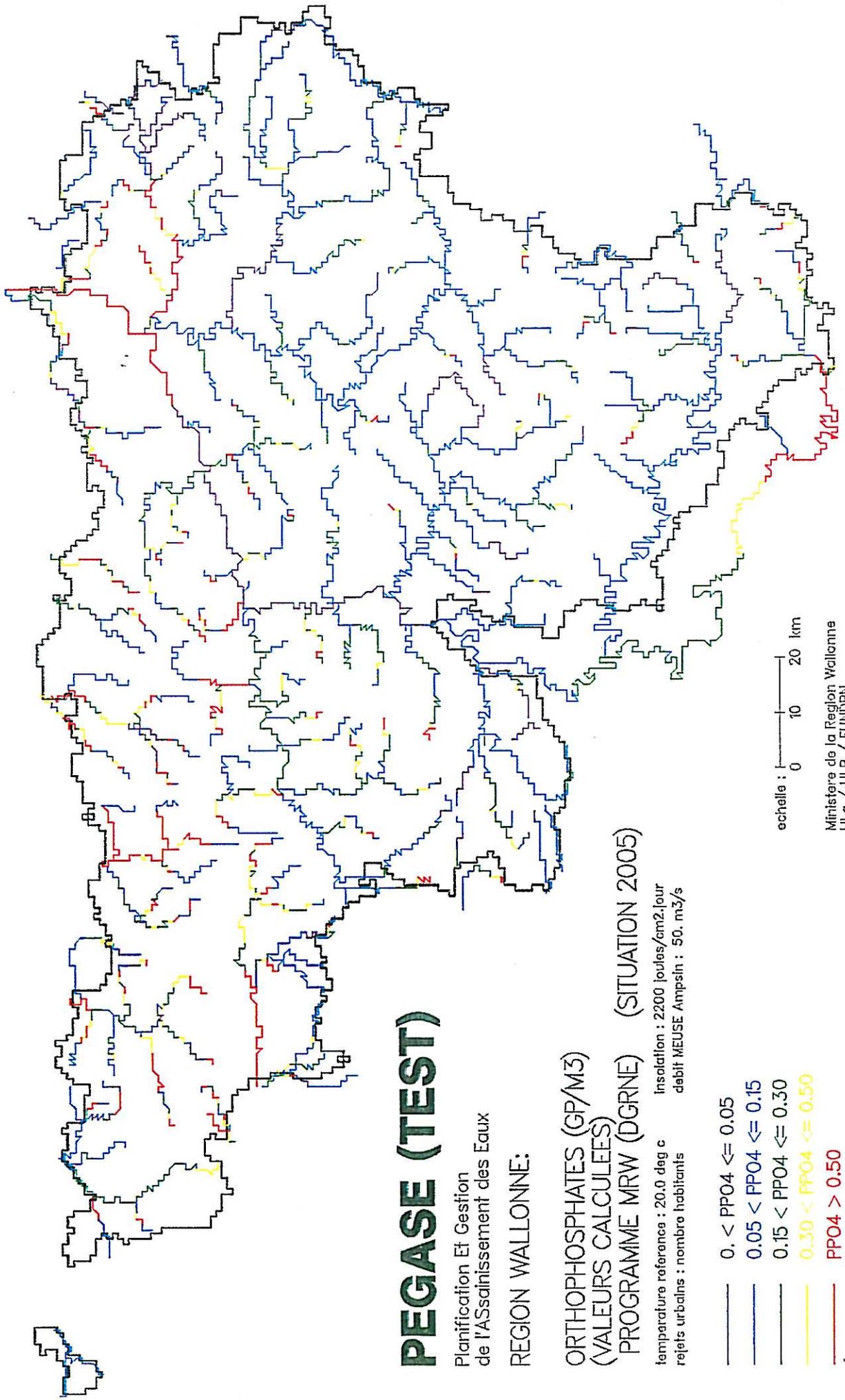
ORTHOPHOSPHATES (GP/M3)
(VALEURS CALCULEES)

SITUATION TYPIQUE ETIAGE (SITUATION 1993)

temperature reference : 20.0 deg c insolation : 2200 joules/cm2.jour
rejets urbains : nombre habitants debit: MEUSE Aimpstin : 50. m3/s

- 0. < PPO4 <= 0.05
- 0.05 < PPO4 <= 0.15
- 0.15 < PPO4 <= 0.30
- 0.30 < PPO4 <= 0.50
- PPO4 > 0.50

echelle : 0 10 20 km
Ministere de la Region Wallonne
ULg / ULB / FUNDP/N



PEGASE (TEST)

Planification Et Gestion
de l'Assainissement des Eaux

REGION WALLONNE:

ORTHOPHOSPHATES (GP/M3)
(VALEURS CALCULEES)

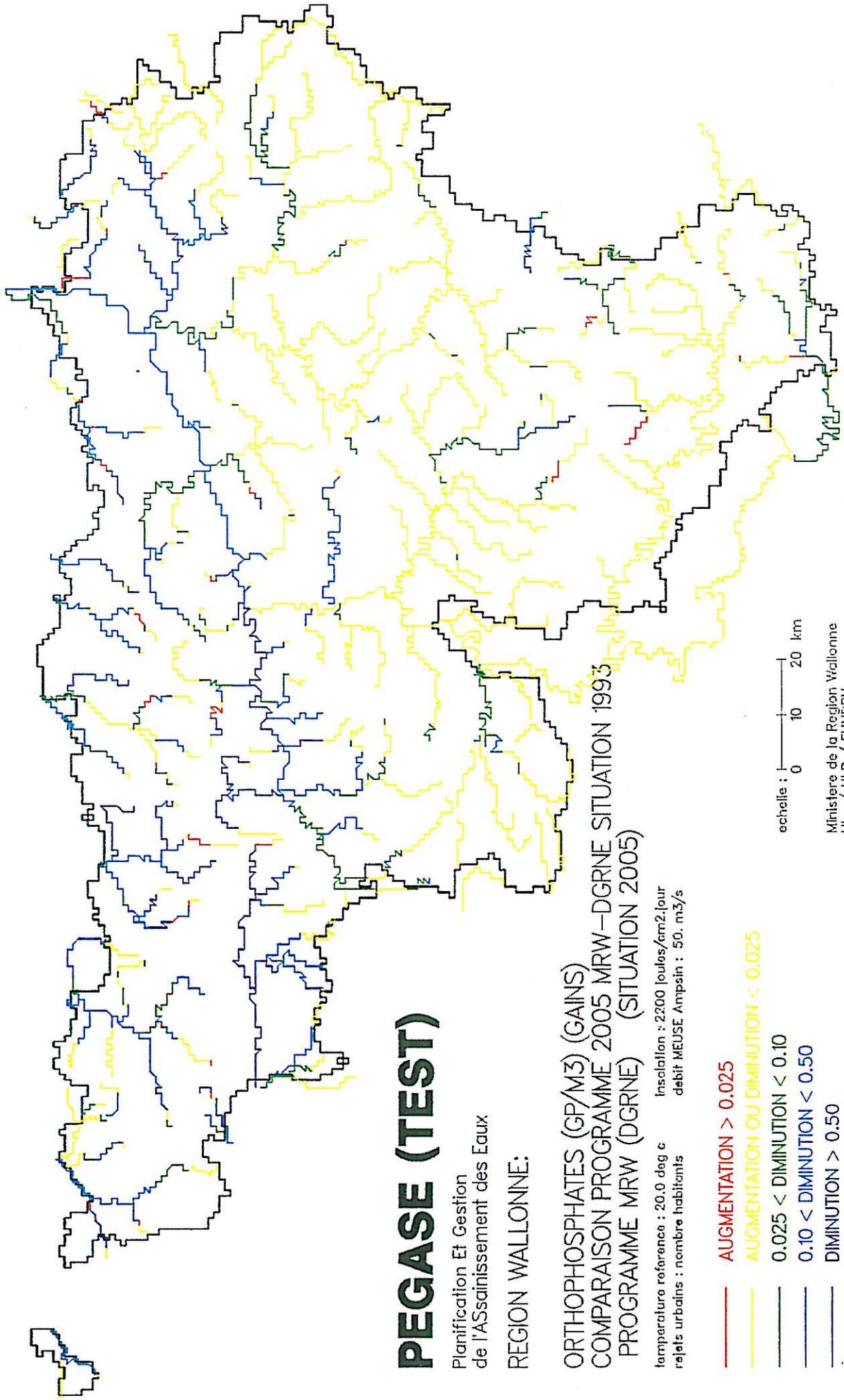
PROGRAMME MRW (DGRNE) (SITUATION 2005)

temperature reference : 20.0 deg c insolation : 2200 joules/cm2.jour
rejets urbains : nombre habitants debit MEUSE Ampsin : 50. m3/s

- 0. < PPO4 <= 0.05
- 0.05 < PPO4 <= 0.15
- 0.15 < PPO4 <= 0.30
- 0.30 < PPO4 <= 0.50
- PPO4 > 0.50

echelle : 0 10 20 km

Ministere de la Region Wallonne
ULg / ULB / FUNDPN



PEGASE (TEST)

Planification Et Gestion
de l'Assainissement des Eaux

REGION WALLONNE:

ORTHOPHOSPHATES (GP/M3) (GAINS)
COMPARAISON PROGRAMME 2005 MRW- DGRNE SITUATION 1993
PROGRAMME MRW (DGRNE) (SITUATION 2005)

temperatura referencia : 20.0 deg c Insolation : 2200 joules/cm2.jour
rejets urbains : nombre habitants debit MEUSE Ampsin : 50. m3/s

- AUGMENTATION > 0.025
- AUGMENTATION OU DIMINUTION < 0.025
- 0.025 < DIMINUTION < 0.10
- 0.10 < DIMINUTION < 0.50
- DIMINUTION > 0.50

echelle : 0 10 20 km

Ministere de la Region Wallonne
ULg / ULB / FURDP/RT

CONCENTRATIONS DANS LE RESEAU HYDROGRAPHIQUE
 LA SEMOIS

OXYGENE (G/M3)
 (SANS EPURATION)

SITUATION TYPIQUE ETIAGE

TEMPERATURE : 20.0 DEG C INSOLATION : 2200 JOULES/CM2.JOUR
 REJETS URBAINS : NOMBRE HABITA DEBIT MEUSE AMPSIN : 50. M3/S

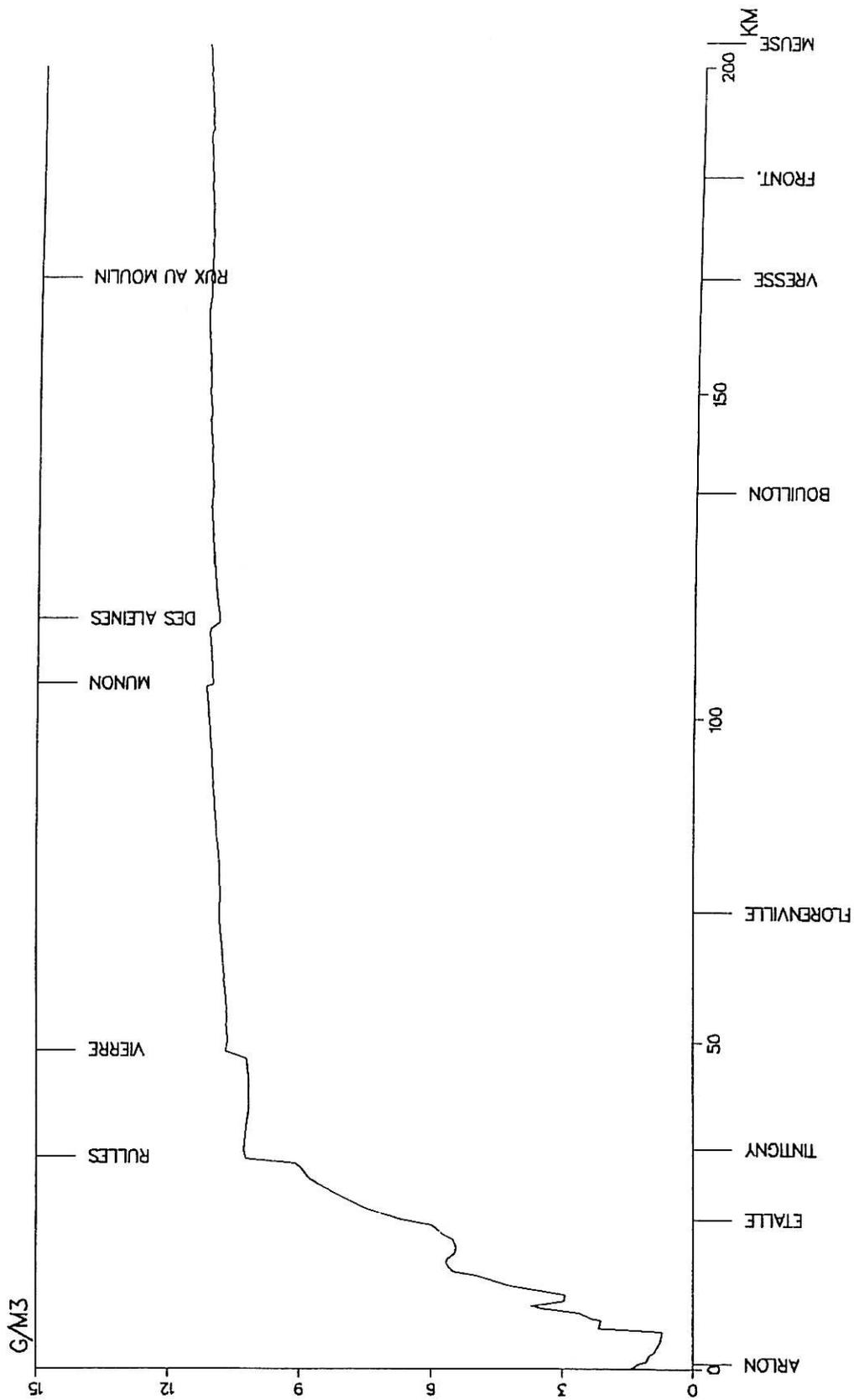


Figure 9

1PEGASE : Planification Et Gestion de l'Assainissement des Eaux

Evolution longitudinale des Concentrations

=====

-SITUATION TYPIQUE ETIAGE (AVEC EPURATION 1990)

annee : 1990
 mois : Aout
 Debit de référence : 50.00
 Temperature de reference : 20.00
 Insolation journaliere (J/cm2) : 2200
 Calculs faits avec epuration
 Rejets Urbains : Nombres d'habitants
 Rejets Industriels : Region Wallonne

Iriviere : L' AISNE

riv	xkm	bv	cda	cdna	cpa	cpna	no3	nh4	nord	norgn	norp	po4	porp	phy	bhet	baut	macro	ox2	oxmin	oxmax	ctot	aztot	phtot
1	.0	1	2.30	1.2	1.60	.80	.73	.02	.40	.10	.12	.04	.01	.10	.05	.03	0.	9.96	9.96	9.96	5.90	1.37	.15
1	.4	2	2.10	1.2	1.25	.66	.77	.04	.41	.10	.11	.05	.01	.08	.05	.02	0.	9.32	9.32	9.32	5.16	1.42	.13
1	1.3	3	1.90	1.1	.95	.53	.82	.06	.38	.10	.11	.05	.01	.06	.05	.02	0.	9.20	9.19	9.20	4.52	1.48	.12
1	2.4	5	1.85	1.1	.93	.52	.83	.06	.36	.10	.09	.05	.01	.06	.05	.02	0.	9.31	9.31	9.31	4.44	1.44	.12
1	3.6	6	1.70	1.1	.76	.45	.86	.07	.34	.10	.08	.05	.01	.05	.05	.02	0.	9.11	9.11	9.11	4.05	1.46	.11
1	5.4	10	2.72	1.2	2.40	1.26	.92	.47	.47	.13	.26	.15	.02	.09	.05	.02	0.	9.28	9.28	9.28	7.56	2.25	.26
1	5.6	11	2.56	1.2	2.15	1.15	1.08	.41	.48	.13	.26	.14	.02	.08	.05	.02	0.	9.00	9.00	9.00	7.02	2.37	.25
1	6.9	32	2.08	1.1	1.39	.75	1.19	.14	.45	.12	.24	.09	.01	.08	.05	.02	0.	9.17	9.17	9.17	5.28	2.17	.18
1	8.1	34	1.98	1.1	1.22	.69	1.19	.14	.45	.12	.20	.08	.01	.07	.05	.02	0.	8.87	8.87	8.88	4.97	2.10	.17
1	9.3	36	1.89	1.1	1.07	.64	1.19	.14	.42	.12	.17	.08	.01	.06	.05	.02	0.	8.74	8.74	8.75	4.68	2.05	.16
1	10.2	43	2.35	1.1	1.78	.99	1.16	.32	.46	.13	.22	.12	.02	.08	.05	.02	0.	8.82	8.81	8.83	6.25	2.30	.22
1	10.7	45	2.29	1.1	1.67	.95	1.17	.30	.45	.13	.21	.12	.02	.08	.05	.02	0.	8.69	8.68	8.70	6.04	2.26	.21
1	11.7	47	2.19	1.1	1.50	.89	1.20	.27	.43	.13	.18	.11	.02	.07	.05	.02	0.	8.56	8.55	8.57	5.71	2.21	.20
1	12.0	50	2.16	1.1	1.46	.87	1.18	.25	.42	.13	.17	.10	.01	.07	.05	.02	0.	8.59	8.59	8.60	5.63	2.16	.19
1	13.2	52	2.06	1.1	1.30	.81	1.21	.23	.40	.13	.16	.10	.01	.07	.05	.02	0.	8.50	8.49	8.51	5.30	2.12	.18
1	14.4	54	1.96	1.1	1.12	.73	1.23	.22	.38	.13	.14	.09	.01	.06	.05	.02	31.	8.41	8.40	8.42	4.94	2.09	.17
1	14.5	57	2.17	1.1	1.46	.89	1.29	.29	.42	.13	.17	.11	.02	.07	.05	.02	30.	8.51	8.43	8.60	5.66	2.30	.20
1	15.9	59	2.03	1.1	1.22	.79	1.34	.27	.40	.13	.16	.11	.02	.06	.05	.02	30.	8.92	8.00	9.83	5.18	2.30	.18
1	16.6	62	2.48	1.2	1.91	1.13	1.37	.45	.45	.15	.23	.15	.02	.07	.05	.02	28.	9.04	7.98	10.11	6.69	2.64	.25
1	17.1	63	2.89	1.2	2.50	1.44	1.40	.61	.49	.16	.28	.19	.02	.08	.05	.02	26.	8.98	7.82	10.03	8.04	2.94	.30
1	18.2	65	2.73	1.2	2.17	1.31	1.49	.54	.48	.16	.25	.18	.02	.08	.05	.02	27.	8.70	7.51	9.85	7.40	2.92	.28
1	18.3	67	2.68	1.2	2.09	1.27	1.55	.52	.48	.16	.25	.18	.02	.08	.05	.02	27.	8.71	7.53	9.82	7.22	2.95	.28
1	19.6	69	2.52	1.2	1.79	1.14	1.61	.46	.45	.16	.21	.16	.02	.07	.05	.02	27.	8.71	7.46	9.84	6.63	2.89	.25
1	20.8	83	2.32	1.2	1.52	.99	1.56	.36	.44	.15	.20	.14	.02	.06	.05	.02	28.	8.89	7.78	9.81	5.98	2.72	.22
1	21.3	84	2.28	1.2	1.44	.96	1.57	.34	.43	.15	.19	.13	.02	.06	.05	.02	3.	8.94	7.77	9.95	5.84	2.69	.22