

Modélisation intégrée du cycle de l'eau : méthodologie et perspectives

Communication présentée au colloque :
« Or bleu, indispensable, inodore et sans saveur »
Institut de mathématique de l'Université de Liège, le vendredi 3 décembre 2010

Jean François DELIÈGE

Bât. B53 Aquapôle, chemin des Chevreuils 3, 4000 Liège, Belgique

Adresse courriel : aquapole@ulg.ac.be

Site web de l'Aquapôle : <http://www.aquapole.ulg.ac.be>

Table des matières

1	Introduction	93
1.1	Contexte	93
1.2	Le cycle de l'eau	93
1.3	La qualité de l'eau	94
1.4	L'écosystème rivière	95
1.5	Les mécanismes de pollution de l'eau	96
1.6	La Modélisation	97
1.7	La Modélisation Intégrée	99
2	Contamination accidentelle des eaux	102
2.1	Eaux de Surface	102
2.2	Eaux souterraines	102
3	Présentation de quelques modèles intégrées	104
3.1	PEGASE	104
3.2	SALMON	106
3.3	MOHISE	108
3.4	MOHICAN	111
3.5	PIRENE/MOIRA	113
3.6	SEVEX	116
4	Modèles Conceptuels & Perspectives	119
4.1	Méthodologie Intégratrice	119
4.2	Modèle Opérationnel Orienté Accident Rivière	119
4.3	Modèle Orienté Accident Rivière et Bassin-Versant	120
4.4	Modèle Orienté Accident Rivière, Bassin versant et Eaux Souterraines	120
4.5	Modèle Complexe Multifonctionnel	120
4.6	Applications à la gestion des risques industriels	121
5	Conclusions	124
	APPENDICE I – RÉFÉRENCES	125
	APPENDICE II – GLOSSAIRE	127

Table des illustrations

Figure 1 Le cycle de l'eau (© Aquapôle)	93
Figure 2 Schéma de l'écosystème rivière	96
Figure 3 Substances toxiques dans le milieu aquatique © Environnement Canada	97
Figure 4 Couplage Externe.....	99
Figure 5 Modélisation Intégrée	100
Figure 6 Principe de fonctionnement de PEGASE	104
Figure 7 Domaine de mise en oeuvre de SALMON	106
Figure 8 Architecture du modèle intégré MOHISE	109
Figure 9 Architecture du modèle intégré MOHICAN	112
Figure 10 Schéma conceptuel des flux à l'échelle du bassin versant	114
FIGURE 11 Architecture du modèle intégré MOÏRA.....	115
Figure 12 Architecture de SEVEX.....	117

Table des Tableaux

Tableau 1 Fiche descriptive du modèle PEGASE	105
Tableau 2 Fiche descriptive du modèle SALMON.....	107
Tableau 3 Fiche descriptive du modèle MOHISE	110
Tableau 4 Fiche descriptive du modèle MOHICAN.....	113
Tableau 5 Fiche descriptive du modèle MOÏRA	116
Tableau 6 Fiche descriptive du modèle SEVEX.....	118

1 Introduction

1.1 Contexte

Les objectifs de la présentation « *Modélisation intégrée du cycle de l'Eau : Méthodologie et Perspectives* », réalisée dans le cadre des cycles de conférences de la « *Société Royale des Sciences de Liège* », sont entre autre de :

- Réaliser un bref rappel contextuel (cycle de l'Eau, Modélisation et Modélisation Intégrée) ;
- Présenter des Modèles Descriptifs et Physiquement Basés existant ;
- Investiguer la similitude des besoins de connaissance de la qualité (cf. paragraphe 1.3) de l'eau relativement aux problématiques :
 - Accident (impact court terme, impact long terme) ;
 - Changement Climatique (impact long terme) ;
- Proposer un modèle conceptuel opérationnel orienté quantité puis qualité de l'eau et capable de simuler par exemple les effets de la gestion anthropique, tant à court qu'à long terme (Changement climatique).

1.2 Le cycle de l'eau

Avant d'entrer dans le vif du sujet, rappelons brièvement les éléments du cycle de l'eau.

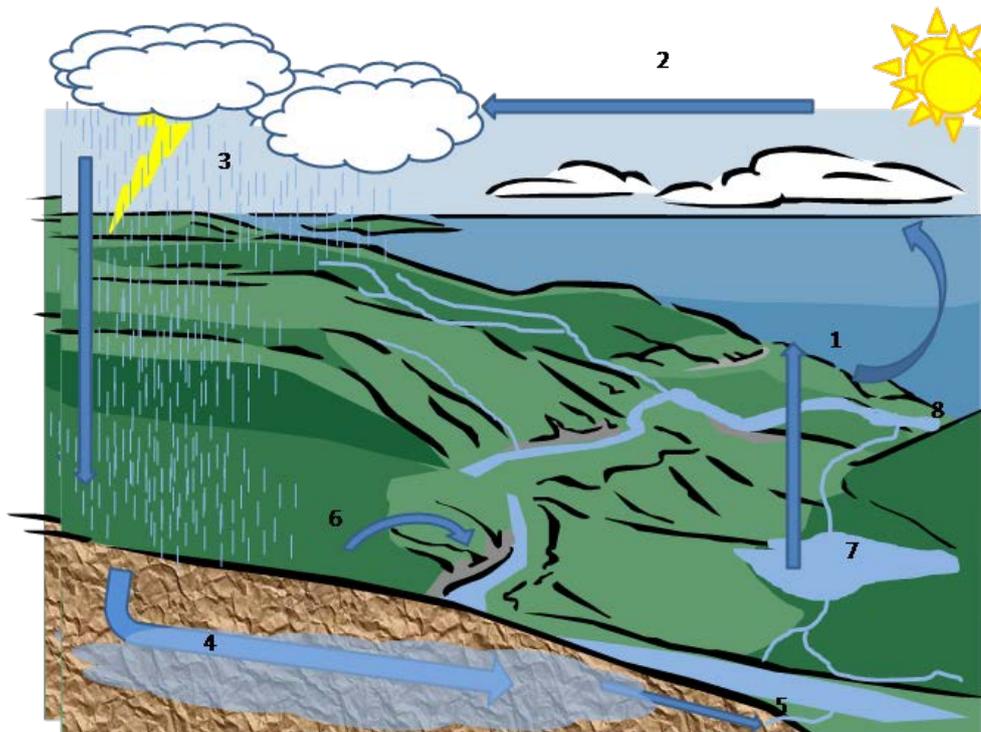


Figure 1 : Le cycle de l'eau ©Aquapôle

Le cycle de l'eau s'organise comme suit (voir Figure 1) :

1. Évaporation des mers, des rivières et des lacs et transpiration biologique des plantes (globalement appelés évapotranspiration);
2. Formation de nuages stockant l'eau sous forme gazeuse et transport par le vent (mouvements des masses d'air) ;
3. Précipitation au dessus des terres (pluie ou neige) ;
4. Une partie des pluies ou de la fonte des glaces s'infiltré dans la terre et séjourne dans les nappes phréatiques (infiltration et/ou percolation) ;
5. Le trop plein de la nappe ressort sous forme de source ;
6. Le reste des pluies ruisselle (ruissellement de surface ou écoulement hypodermique, dans la couche proche de la surface) pour rejoindre les rivières par les berges ;
7. Une partie de l'eau des rivières est stockée dans des lacs. Il y a éventuellement réalimentation des nappes ;
8. Le surplus retourne à la mer.

Les quantités respectives d'eau impliquée dans l'évapotranspiration, le ruissellement, l'écoulement hypodermique ou l'infiltration dépendent de la nature du sol, de sa couverture ainsi que de sa topologie, notamment sa pente. Un sol perméable (par exemple sableux) favorisera l'infiltration, tandis qu'un sol imperméable (p. ex. argile, ou sol bétonné) favorisera le ruissellement. Une couche sablonneuse sur une couche argileuse favorisera un écoulement hypodermique.

L'infiltration suppose un transfert de l'eau non modifiée à travers une couche de terrain, tandis que la percolation suppose un filtrage de l'eau et/ou une dissolution des couches traversées. L'eau percolée voit donc sa composition changer au cours de la percolation (p.ex. dissolution des sols calcaires).

Le ruissellement et l'écoulement dans les cours d'eau sont également responsables d'une érosion du sol, les éléments arrachés étant emportés par le courant. Ceci est particulièrement important en cas de fortes pluies (situation de « flash flood » et de crue).

1.3 La qualité de l'eau

La qualité d'une eau est caractérisée par les diverses substances qu'elle contient, leur quantité et leur effet sur les écosystèmes aquatiques et la santé humaine. Elle peut donc se définir par sa composition en sels et gaz dissous, en micro-organismes et matières en suspension. Ces substances peuvent être, soit d'origine « naturelle » (bicarbonates, sulfates, sodium, aluminium, fer,...), soit découler de la présence humaine (eaux usées) ou des activités industrielles et agricoles (substances toxiques, métaux, pesticides).

La qualité des eaux peut se définir par rapport à des situations de référence variées : pour les utilisateurs, la qualité de l'eau correspond aux exigences de certains usages. Dans ses usages (domestiques, agricoles, industriels ou autres) l'eau remplit de multiples fonctions. On peut distinguer, sans être exhaustif, l'eau pour la boisson, pour l'hygiène, pour l'irrigation, pour l'agro-alimentaire, pour l'énergie, pour le transport, pour les loisirs, pour les écosystèmes aquatiques, etc... C'est la concentration en les différents éléments qui

détermine la qualité d'une eau et permet de savoir si celle-ci convient à un usage particulier. Des critères de qualité de l'eau de surface adaptés aux principaux usages de l'eau sont généralement définis (souvent sous forme de « classes de qualité ») par les administrations ayant la gestion des eaux de surface dans leurs compétences.

1.4 L'écosystème rivière

Un écosystème rivière est alimenté essentiellement par le flux de matières en provenance de l'amont et apporté par le courant ; il reçoit également des apports "latéraux" (apports par les sols, rejets divers, ...). L'écosystème échange en outre de la matière à travers l'interface eau/air (essentiellement par des échanges gazeux). L'énergie est apportée essentiellement par le rayonnement solaire.

L'écosystème rivière est composé de la colonne d'eau, du fond et des berges. La Figure 2 ci-après montre une vue schématique de l'écosystème rivière.

L'eau contient :

- des substances dissoutes ;
- des substances particulières.

La distinction entre substances dissoutes et particulières est nécessaire. En effet, les substances particulières (matières en suspension) sont susceptibles de sédimenter et de se déposer sur le fond. Lors de crues importantes, ces matières particulières déposées sur le fond (sédiments) peuvent être remises en suspension, ce qui peut créer des variations de concentrations dans la colonne d'eau.

Les substances dissoutes et particulières présentes dans l'eau peuvent être réparties en substances inorganiques et substances organiques.

Les matières organiques résultent de processus biologiques (biosynthèses, biodégradations).

Dans la matière organique particulière, il est également important de distinguer d'une part la matière organique particulière vivante (organismes vivants, dont la quantité s'exprime en biomasses), d'autre part la matière organique particulière morte.

Dans l'écosystème aquatique, les matières organiques, vivantes ou mortes, proviennent de 2 sources différentes :

- la production « interne », par l'activité des différentes biomasses présentes dans l'écosystème aquatique ;
- les apports et les rejets par le bassin versant (production « externe »).

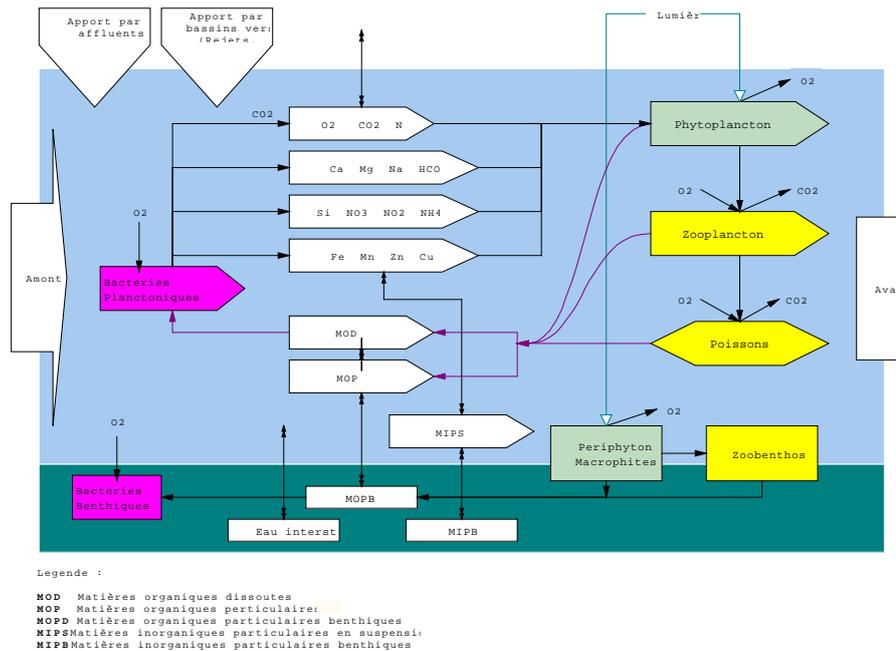


Figure 2 : Schéma de l'écosystème rivière ©Aquapôle

1.5 Les mécanismes de pollution de l'eau

L'eau emmène avec elle une série de polluants sous plusieurs formes:

- des polluants dissous,
- des polluants particulaires en suspension (dégradable ou non),
- des polluants flottants.

Les quantités respectives de polluants présents dans chaque compartiment ne sont pas fixes. En effet, selon les caractéristiques physico-chimiques des eaux, un polluant peut passer d'un état à un autre.

La pluie a pour effet de précipiter au sol les polluants de type poussières et aérosols, nuages de gouttelettes emportés par les vents. Ces polluants tombent sur la terre où, soit ils sont adsorbés par la végétation, soit ils ruissellent et rejoignent les lacs et les rivières, entraînant éventuellement une pollution de surface vers les lacs et rivières, soit ils s'infiltrent dans la terre et vont polluer en partie les nappes phréatiques (aquifères).

Des épandages de polluants (accidents, épandage d'engrais, ...) peuvent avoir un effet similaire, la répartition des quantités dans les différents compartiments (plantes, sols, sous-sols et eaux de surfaces) étant cependant assez différente.

Les rejets directs (accidents, rejets industriels, rejets urbains...) polluent également les cours d'eau, parfois durant de longues périodes. C'est notamment le cas d'une série de micropolluants (pas toujours dus à un rejet direct), comme les métaux lourds que l'on retrouve dans les cours d'eau, depuis la source de pollution jusqu'à la mer pendant de nombreuses années, via différents processus de rétention et de mobilisation dans les sols contaminés. D'autres rejets peuvent parfois aussi être la conséquence d'une surcharge de station d'épuration entraînant un rejet d'eau non traitée à la rivière (cas d'une pluie exceptionnelle).

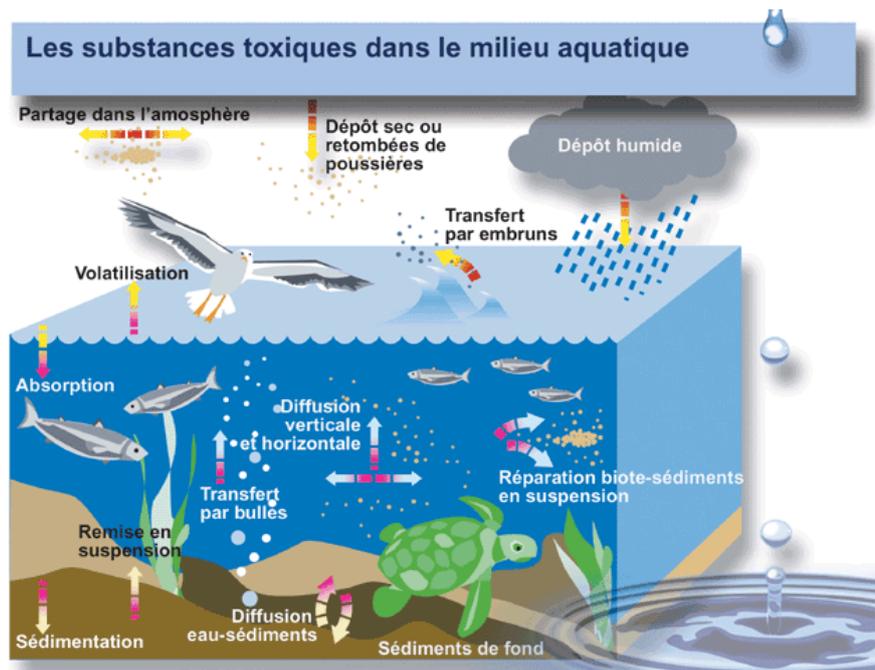


Figure 3 : Substances toxiques dans le milieu aquatique ©Environnement Canada

Les polluants, une fois dans l'eau ne s'évaporent généralement pas. Certains d'entre eux peuvent cependant évoluer par réaction chimique avec le milieu (cas des nutriments, des agents oxydables...) ou par action biologique de plancton, bactéries, plantes ou animaux (cas des matières organiques...). Certains polluants se déposent sur le fond, soit directement, soit agglomérés aux matières en suspension. Ils peuvent alors être remis en suspension lors de crues, et donc, se dissoudre partiellement dans l'eau à cette occasion, ressuscitant une pollution oubliée.

Les polluants peuvent également avoir un effet sur l'acidité de l'eau – mesurée par le pH (p.ex. pluies acides). Celle-ci aura une incidence sur la qualité de l'eau.

Les polluants peuvent altérer le goût, l'odeur et la couleur de l'eau. Ils peuvent rendre les poissons et les animaux moins fertiles, entraîner chez eux des malformations génétiques, endommager leur système immunitaire, accroître les cas de tumeurs et causer la mort de ces êtres vivants.

1.6 La Modélisation

Les phénomènes physiques, chimiques ou biologiques concernant le cycle de l'eau et la pollution peuvent être modélisés. Un modèle mathématique conceptuel lié à la représentation d'un système est construit de manière à prédire certains effets à partir des pressions exercées sur le système, des conditions imposées aux limites du système, ainsi que de conditions initiales données, dans le cas de modèles non-stationnaires ou transitoires.

Les modèles opérationnels sont des logiciels construits à partir du modèle mathématique, par programmation des formules établies et résolution numérique des équations mathématiques décrivant les phénomènes que l'on désire représenter. Ceux-ci peuvent

atteindre des niveaux de complexité tels que les ordinateurs usuels ne sont pas assez puissants pour les faire tourner.

Il n'est généralement pas possible de décrire un ensemble de phénomènes complexes avec un modèle unique. On parlera alors plutôt de modèles intégrés.

Dans cadre du cycle de l'eau, chaque compartiment est décrit par des modèles adaptés et spécifiques. On trouve notamment :

- Des modèles climatologiques ou atmosphériques qui estiment certaines conditions météorologiques comme la température, la pression, la nébulosité et la pluviométrie.
- Des modèles hydrologiques qui modélisent le ruissellement, les écoulements hypodermiques, l'infiltration et la percolation dans le sol. Ils permettent aussi de calculer des charges diffuses apportées par les sols, suite, notamment à des épandages de nutriments (engrais) sur des parcelles de terrain.
- Des modèles hydrogéologiques qui modélisent les aquifères (nappes phréatiques), ainsi que l'infiltration et les exurgences. Le transfert à travers les nappes étant généralement très lent ils sont généralement adaptés aux calculs à d'autres échelles de temps caractéristiques que celles des autres compartiments.
- Des modèles hydrauliques permettent de modéliser les débits, vitesses, hauteurs d'eau dans les cours d'eau, les retenues d'eau (naturelles ou artificielles), voire les mers. Ces modèles sont unidimensionnels (cas des rivières, en général), bidimensionnels (lacs, barrages en général) et même tridimensionnels (mers, estuaires etc...). On trouve toutefois des modèles de rivières 2D et 3D selon les besoins spécifiques de la modélisation (débordement de crues, recirculation thermique, ...).
- Des modèles « qualité » existent dans toutes les catégories citées ci-dessus, de manière à évaluer la qualité de l'eau et/ou de l'air par rapport à des charges polluantes, naturelles ou artificielles.

Tous ces modèles sont, en général, des modèles non-stationnaires (ou transitoires), qui permettent de calculer l'évolution des différentes variables modélisées dans le temps, soit sur plusieurs années, soit en cycles sur une année, une saison ou même une journée. Chaque processus modélisé possède son échelle de temps propre.

Bien qu'il ne soit pas possible de citer ici tous les types de modèles, ni toutes les méthodes utilisées pour la modélisation, retenons qu'il existe deux grandes familles de modèles, les modèles stochastiques (basés sur des statistiques) et les modèles déterministes (basés sur les équations de la physique/chimie/biologie). Il n'est cependant pas rare que des modèles déterministes fassent appel à des modules stochastiques pour pallier au manque de données, ou à la variabilité des phénomènes naturels.

Pour résoudre les équations des différents modèles, plusieurs méthodes numériques, analogiques ou hybrides peuvent être utilisées.

Dans les phénomènes liés aux mouvements des fluides, on considère soit l'approche eulérienne, dans laquelle on observe l'écoulement du fluide à partir d'un point fixe, soit l'approche lagrangienne, dans laquelle on suit le mouvement d'une particule de fluide. Des approches hybrides existent.

Cependant, tous les modèles disposent de paramètres ajustables, qu'il faut étalonner pour le domaine d'application. Cette calibration s'effectue généralement en faisant des simulations sur des situations de référence (années historiques...), pour lesquelles on dispose de mesures fiables sur les variables d'état calculées. Des méthodes inverses

d'ajustement de paramètres existent, mais souvent on a recours à des méthodes « essais-erreur », dans lesquelles on ajuste progressivement les paramètres jusqu'à minimiser la différence entre les valeurs calculées et les valeurs mesurées. Le caractère non-linéaire de certains processus modélisés limite parfois sévèrement le domaine de validité des jeux de paramètres des modèles.

Afin de mieux correspondre à la réalité, il est tentant de rendre le modèle plus complexe en augmentant, par exemple, le nombre de variables. Le modèle devient alors de plus en plus difficile à appréhender (augmentation du nombre de paramètres à calibrer, ...), sans compter le temps de calcul qui croît jusqu'à devenir incompatible avec les ordinateurs courants. Les modèles trop complexes ont alors tendance à représenter les processus modélisés de manière moins fiable.

1.7 La Modélisation Intégrée

Afin d'appréhender des systèmes d'une grande complexité, une approche retenue ces dernières années est de coupler les modèles compartimentaux entre eux, c'est-à-dire les faire tourner conjointement, tout en échangeant des informations entre eux, plutôt que de construire un modèle unique requérant un large champ d'expertise. En effet, chaque modèle peut conserver sa représentation fine des processus, tout en échangeant avec les autres modèles que les informations nécessaires. Chaque équipe responsable d'un ou plusieurs modèles conserve son expertise et participe à la création d'un modèle multi-compartimental qui améliore également les conditions aux limites des modèles compartimentaux.

On peut considérer deux formes de couplages:

- le couplage externe
- le couplage interne ou "Modélisation Intégrée"

Pour le couplage externe, les modèles sont indépendants, les résultats d'un modèle servent de données d'entrée pour le second, éventuellement suite à un traitement permettant d'ajuster (par interfaçage) la digitalisation spatio-temporelle des modèles. Ces données sont généralement échangées par fichiers et les simulations sont séquentielles. Ce type de couplage n'autorise pas les interactions bidirectionnelles explicites.

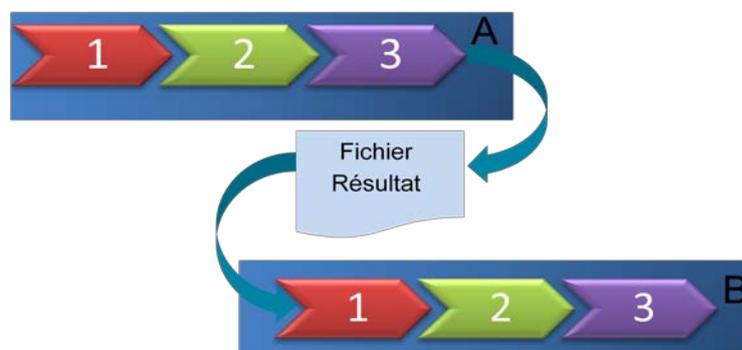


Figure 4 : Couplage Externe

Dans le cas de la modélisation intégrée, les modèles sont en dialogue direct, ils échangent, durant leur exécution et à chaque pas de temps, leurs informations en temps réel et dans les deux directions, si nécessaire. L'échange d'informations peut également être conditionnel, c'est-à-dire qu'il peut se faire dans un sens ou dans l'autre selon des conditions variant à chaque itération. Les modèles doivent idéalement tourner en même temps, soit sur des machines multiprocesseurs, soit sur des clusters de machines différentes.

La modélisation intégrée requiert une technologie particulière afin d'assurer des échanges optimaux, sans ralentir le modèle complet. Il en existe plusieurs (PVM, MPI, OpenMI...). Certaines méthodologies nécessitent l'accès aux codes sources, afin de pouvoir les modifier. Elles sont bien adaptées aux spécificités du couplage personnalisé. D'autres plus systématiques et/ou standards ne nécessitent que la description des liens. Elles sont alors mieux adaptées aux modèles commerciaux, mais n'autorisent pas la même souplesse et ne permettent pas les mêmes performances. Par ailleurs, elles demandent souvent le développement de modules complémentaires. Enfin, elles sont, à l'heure actuelle, peu adaptées à des modèles où la quantité d'information échangée est importante (milliers de nœuds/mailles).

Pour les modèles intégrés construits sur base de technologies intégratrices requérant l'accès aux codes sources, au départ, l'architecture des modèles intégrés était du type SPMD (Simple Program Multiple Data). Cependant, de plus en plus de modèles intégrés sont du type MPMD (Multiple Program Multiple Data). Ces derniers permettent la séparation des codes sources, seule la librairie d'échange de messages étant commune.

Dans ce type de modèle intégré, chaque modèle possède son espace mémoire propre, et les données sont échangées entre deux process par un échange de messages.

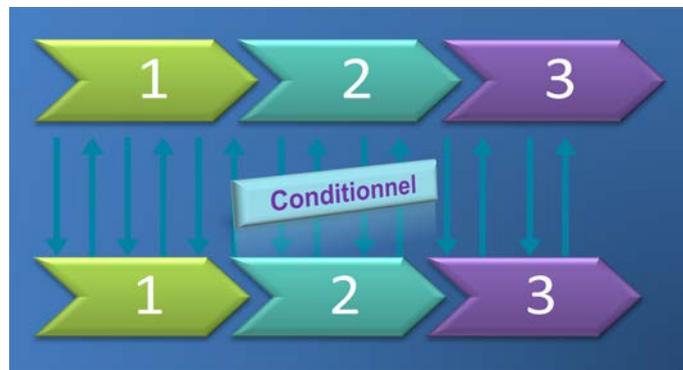


Figure 5 : Modélisation Intégrée

L'interface entre les différents process (modèle ou sous-modèle compartimental) nécessite la mise en forme de certaines données ou de certains calculs essentiels. Cela concerne au premier chef :

- L'adaptation des échelles spatiales : certains modèles ont plus ou moins de nœuds, des tailles de mailles parfois très différentes, certaines méthodes calculent des valeurs par mailles, alors que d'autres les utilisent aux nœuds.
- L'adaptation des échelles temporelles : les pas de temps doivent être adaptés au temps caractéristique du phénomène physique modélisé : l'ensoleillement varie

fortement en quelques minutes, tandis que l'infiltration des eaux prend parfois des décennies. La dégradation du carbone peut, elle, prendre plusieurs millénaires.

Une pratique courante consiste également en le couplage au système d'un module de visualisation de résultats, permettant de voir en temps réel l'évolution du calcul intégré, dans chaque module et aux interfaces.

L'architecture MPMD permet également de faire tourner les différents modèles en parallèle sur des machines multiprocesseurs, voire sur des clusters de machines.

Il est à noter que certains algorithmes (p.ex. le schéma d'intégration temporelle implicite) sont difficiles à coupler, et les modèles nécessitent parfois des modifications en profondeur pour maintenir l'efficacité et la stabilité des algorithmes numériques.

2 Contamination accidentelle des eaux

2.1 Eaux de Surface

En termes de gestion de crise, la dispersion des polluants dans les eaux de surface peut se révéler difficile à gérer, entre autre dans la mesure où les temps caractéristiques sont courts. E.g. un déversement dans un chenal menant directement aux cours d'eau peut apporter une charge polluante importante en quelques minutes. Une fois diluée, cette charge polluante va en quelques heures se disperser vers l'aval.

Cette pollution est par essence difficile à assainir, du moins pour une série de substances chimiques. Certaines substances auront tendance à se dégrader naturellement, et la dispersion aidant, la teneur en polluant finira par atteindre des niveaux acceptables sans nécessiter d'action d'assainissement particulière. D'autres, par contre vont s'accumuler par sédimentation et participer à une pollution à caractère endémique, nécessitant une intervention humaine.

Les données permettant d'évaluer le risque et les mesures à prendre sont nombreuses. Les nouvelles technologies de télédétection et de traitement des informations géographiques permettent aujourd'hui de générer des données difficilement accessibles par le passé :

- Cartes basées sur les images satellites identifiant les zones industrielles ;
- Cartes basées sur les images satellites identifiant les voies de communication terrestres (route, rail) avec estimation du charroi ;
- Cartes où les chemins de plus grande pente mènent des voies de communications aux rivières/lacs ;
- Carte des voies navigables avec le tonnage admissible pour le transport des produits dangereux ;
- Carte des zones inondables ;
- Cartes des pipe-lines et autres canalisations, aériennes et souterraines ;
- Différentes combinaisons des cartes précédentes déterminant des zones à risque, éventuellement selon plusieurs niveaux.

L'ensemble de ces données, ainsi que les données sur le rejet accidentel permettent alors d'orienter les développements des modèles de dispersion des polluants dans les eaux de surfaces afin de permettre, notamment:

- Le calcul de simulation de la dispersion des polluants pour un scénario de déversement ponctuel accidentel à un moment donné et le calcul de leur dégradation (modèle de qualité de rivières) ;
- Le calcul de la dispersion d'un rejet accidentel dans un lac, de la sédimentation et de la dégradation des polluants (modèle 2D ou 3D lacs/barrages).

2.2 Eaux souterraines

La modélisation de la contamination accidentelle des eaux souterraines est complexe et liée –en amont et en aval– à la dynamique des écoulements de surface. Les processus sont complexes et hétérogènes, leur modélisation requiert une grande expertise en terme de connaissance du milieu (données, sensibilité, échantillonnage,...) et sur les aspects numériques stricto-sensu (modèle 3D, ...). Les échelles spatiales et temporelles sont

également différentes des autres compartiments modélisés, générant des contraintes de couplage parfois difficiles à appréhender.

3 Présentation de quelques modèles intégrés

Ce chapitre décrit les modèles développés ou assemblés par l'Aquapôle qui ont un rapport avec l'hydrologie, l'hydrogéologie, l'hydraulique, la qualité des eaux et le transport. La plupart des modèles décrits sont des modèles intégrés, dont les composants sont réutilisables seuls ou dans de nouveaux modèles intégrés.

3.1 PEGASE

PEGASE (**P**lanification **E**t **G**estion de l'**A**ssainissement des **E**aux) est un modèle intégré bassin hydrographique/rivières qui permet de calculer de façon déterministe et prévisionnelle la qualité des eaux des rivières en fonction des rejets et apports de pollution pour des situations hydrologiques constantes ou non-stationnaires. C'est un outil opérationnel permettant d'orienter les choix des opérateurs publics et privés en matière de gestion des eaux de surface à l'échelle des bassins versants. PEGASE est utilisé par plusieurs administrations publiques européennes pour les aider à répondre aux demandes des directives cadre européennes (eau, nitrates...).

Le modèle est capable de prédire la diffusion de plusieurs dizaines de produits polluants (des charges en carbone, azote et phosphore apportées par les sols à des métaux lourds rejetés par l'industrie), et de calculer des indices basés sur des grandeurs écologiques classiques (oxygène dissous, chlorophylle a, Demande Chimique en Oxygène ...)

Les résultats du modèle peuvent s'exprimer sous forme de courbes de valeurs précises de concentrations ou de flux ou sous forme plus accessible de classes (cinq classes de « Excellent » à « Mauvais ») de grandeurs ou d'indices. Ces résultats sont accessibles sous forme de tracés longitudinaux (pour chaque rivière du réseau modélisé, soient plusieurs milliers de rivières ou de masses d'eau) ou sous forme de graphique non stationnaire en n'importe quel point de la digitalisation. Ils s'expriment également par des cartes 2D du réseau de rivière colorié en fonction de ces mêmes grandeurs, à des instants précis ou sous forme d'animations non stationnaires.

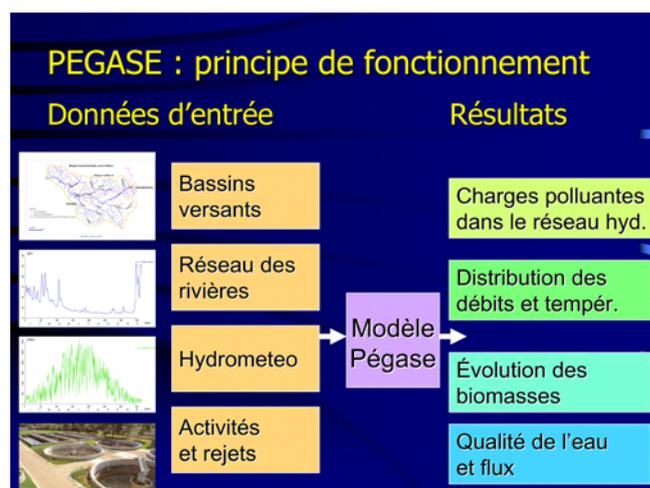


Figure 6 : Principe de fonctionnement de PEGASE

Le modèle comprend différents modules :

- Le sous-modèle hydrodynamique prend en compte la morphologie des cours d'eau, calcule les débits et les autres paramètres hydrodynamiques (vitesse de courant, hauteur d'eau...);
- Le sous-modèle thermique calcule la température de l'eau, se basant sur la température mesurée en des points discrets, l'altitude et les différents apports d'eau chaude (rejets thermiques, ...);
- Le sous-modèle rejets calcule les apports à la rivière des différents rejets éventuellement non stationnaires. Il traite les rejets urbains, les rejets industriels, les rejets de stations d'épuration et les rejets diffus;
- Le sous-modèle biologique calcule le développement de la biomasse planctonique (phytoplancton, zooplancton et bactérioplancton), la dégradation de matière organique etc... Les variables Carbone, Azote et Phosphore sont séparées selon leurs propriétés physiques, chimiques et biologiques;
- Le sous-modèle micropolluants calcule l'évolution des micropolluants rejetés, ainsi que leur sédimentation éventuelle;

Le bilan en oxygène de la colonne d'eau est évalué sur base du métabolisme de la biomasse planctonique, tout en tenant compte de la réaération de surface.

Tableau 1 : Fiche descriptive du modèle PEGASE

Nom	PEGASE
Auteurs	Aquapôle (CEME), FUNDP-URBO, ULB-STEP
Type	Qualité de rivières
Non-stationnaire	Oui
Cartes	Oui
Indices	Oui
Données Satellites	Affectation des sols
Côté Innovant	Couplable à d'autres modèles (MPI, OpenMI) Conforme à DCE 2000/60/CE
BDD Wallonie disponible	Oui (propriété SPW)
Autres BDD	Flandre, Meuse internationale, Escaut international...
Référence	http://www.aquapole.ulg.ac.be/index.php?pg=3000

3.2 SALMON

Le «Sea Air Land Modelling Operational Network» est un modèle intégré basé sur la technologie PVM (Parallel Virtual machine), permettant le calcul de la qualité des eaux d'un fleuve et de l'océan récepteur, en tenant compte des interactions avec la mer, l'atmosphère et les nappes dans la zone côtière. Il est le résultat d'un programme de recherche de la fondation IBM International et contribue à un très large programme scientifique international appelé *Land Ocean Interaction in the Coastal Zone*, lancé en 1993 par l'*International Geosphere Biosphere Program* et dont l'objectif est de déterminer à des échelles globales et locales les flux entre les eaux de surface, le sol, la mer, les nappes et l'atmosphère au niveau des zones côtières, la capacité de ces dernières à accumuler la matière dissoute et particulaire, ainsi que les effets des changements dus en partie à l'activité humaine sur la structure et le fonctionnement des écosystèmes côtiers.

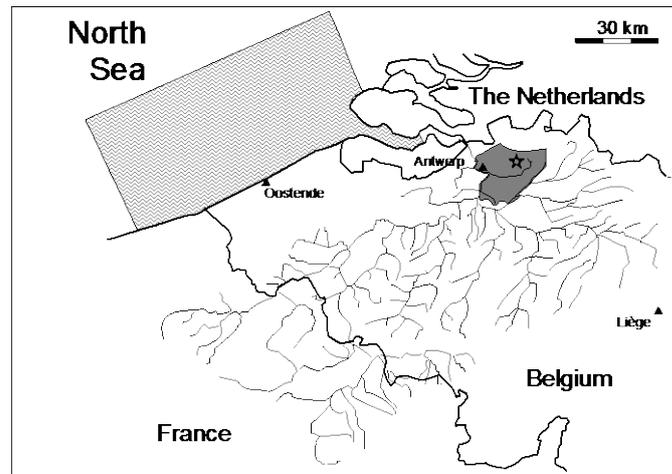


Figure 7 : Domaine de mise en œuvre de SALMON

SALMON est composé des modèles suivants:

- PEGASE pour la qualité des rivières, appliqué au d international de l'Escaut, décrit ci-dessus (paragraphe 3.1) ;
- Un modèle marin du GHER : un modèle tridimensionnel, non-stationnaire, baroclinique, non-linéaire et turbulent du système marin basé sur la théorie des volumes finis. Ses variables d'état sont le vecteur de vitesse 3D, la température, la salinité et l'énergie cinétique turbulente. Il contient également un modèle biologique du cycle de l'azote dans l'écosystème ;
- Un modèle d'hydrogéologie du LGIH¹ : SUFT3D est un modèle stationnaire et non-stationnaire tridimensionnel des aquifères confinés et non-confinés basé sur la méthode des éléments finis. Le flux souterrain modélisé peut dépendre de la densité (infiltration d'eau salée). Le transport de divers polluants dissous peut être calculé, à travers des matières poreuses saturées ou non. Les processus modélisés incluent l'advection, la diffusion, la dispersion, la dégradation linéaire, l'adsorption et les effets d'eau stagnante.

Il a été mis en œuvre sur le bassin versant de l'Escaut, la Mer du Nord et les aquifères anversois entre 1994 et 1998.

¹ Aujourd'hui, service d'hydrogéologie du secteur GEO³ du département ARGENCO de l'ULg

Les différents modèles ont d'abord été étalonnés séparément selon des données mesurées disponibles. Après validation, plusieurs simulations ont été réalisées :

- Une source de pollution continue dans une rivière : une source constante de 50 g/s d'un traceur a été placée dans la rivière « Groote Schijn », et le modèle a tourné pour une simulation de six mois avec les conditions hydro-météo mesurées en 1993. Cette validation montre que 98% de la pollution se retrouve dans la mer, 2% reste dans les rivières et une partie négligeable pollue l'aquifère ;
- L'injection temporaire et diffuse de traceur dans l'aquifère : une source de 700 g/s de traceur est introduite pendant 30 jours au sommet de l'aquifère, sur une zone de 500m sur 280m. Son impact est étudié par une simulation d'un an sur l'année 1993. La simulation montre que la rivière draine l'aquifère et donc le polluant. Une centaine de jours après le début de l'injection, les premières charges de polluant arrivent à la mer. Après un an, seulement $\frac{3}{4}$ de la pollution relâchée a atteint la rivière.
-

Tableau 2 : Fiche descriptive du modèle SALMON

Nom	SALMON
Auteur	Aquapole (CEME), GHER, HG-GEO ³ (LGIH)
Type	Modèle Intégré PVM
Non-stationnaire	Oui
Cartes	Oui
Indices	Oui
Données Satellites	Affectation des sols
Côté Innovant	Couplage Intégré Rivières-côtes-sous-sol Scénarios prédictifs Non-stationnaire Suivi de charge polluante
BDD Wallonie disponible	non
Autres BDD	Escaut, Mer du Nord, HG Anvers, ...
Référence	http://modb.oce.ulg.ac.be/backup/salmon/Welcome.html

3.3 MOHISE

MOHISE (**MO**dèle **H**ydrologique **I**ntégré de **S**imulation du cycle de l'**E**au) est un modèle intégré réalisé entre 1998 et 2002 par l'unité d'hydrologie et d'hydraulique agricole de la FUSAGx², GEOMAC-ULg³ et CEME-ULg⁴ pour le compte de service fédéral de la politique scientifique. Il faisait partie d'un plus vaste contrat de recherche impliquant également la KUL et l'IRM.

Les objectifs étaient :

- la planification à long terme (plus de 90 ans) des ressources en eau dans les bassins hydrographiques ;
- la simulation de l'effet des changements climatiques potentiels sur l'état des ressources en eau.

Pour réaliser ces objectifs, l'approche consistait en :

1. L'utilisation de trois modèles compartimentaux (sols, sous-sols et rivières) détaillés dont un modèle souterrain tridimensionnel, additionnés d'un module superviseur et intégrateur spécifique ;
2. L'utilisation de scénarios d'évolution météo et climatiques issus de modèles à l'échelle planétaire et ramenés à l'échelle locale ;
3. L'application de ces modèles aux bassins de la Gette, du Geer et de l'Ourthe ;
4. La comparaison des résultats et de la qualité de la modélisation entre les modèles :
 - (i) Modèle intégré MOHISE, développé par le consortium des équipes de l'ULg,
 - (ii) MIKE SHE utilisé par la KUL et
 - (iii) IRMB développé et utilisé par l'IRM/KMI.

Le modèle développé par le consortium ULg est composé des modules compartimentaux suivants:

- EPIC-MAILLE de l'unité d'Hydrologie et Hydraulique Agricole de GxABT (FUSAGx) pour le modèle sol est une évolution du modèle open source américain EPIC. Il s'agit en fait d'une part de l'adaptation du modèle EPIC aux conditions de l'Europe Continentale, et, d'autre part, d'une modification pour le faire fonctionner sur des mailles carrées plutôt qu'à l'échelle de la parcelle ou d'un bassin versant. Il prend en charge les calculs d'évapotranspiration, les variations d'accumulation de l'eau dans les zones non saturées, le ruissellement superficiel et les flux hypodermiques ainsi que le transfert par infiltration vers les aquifères. Ce module peut également prendre l'enneigement en compte ;

² Aujourd'hui faculté Gembloux Agro-Bio Tech (GxABT) de l'ULg

³ Aujourd'hui service d'hydrogéologie du secteur GEO³du département ARGENCO de l'ULg

⁴ Aujourd'hui unité R&D de l'Aquapôle de l'ULg

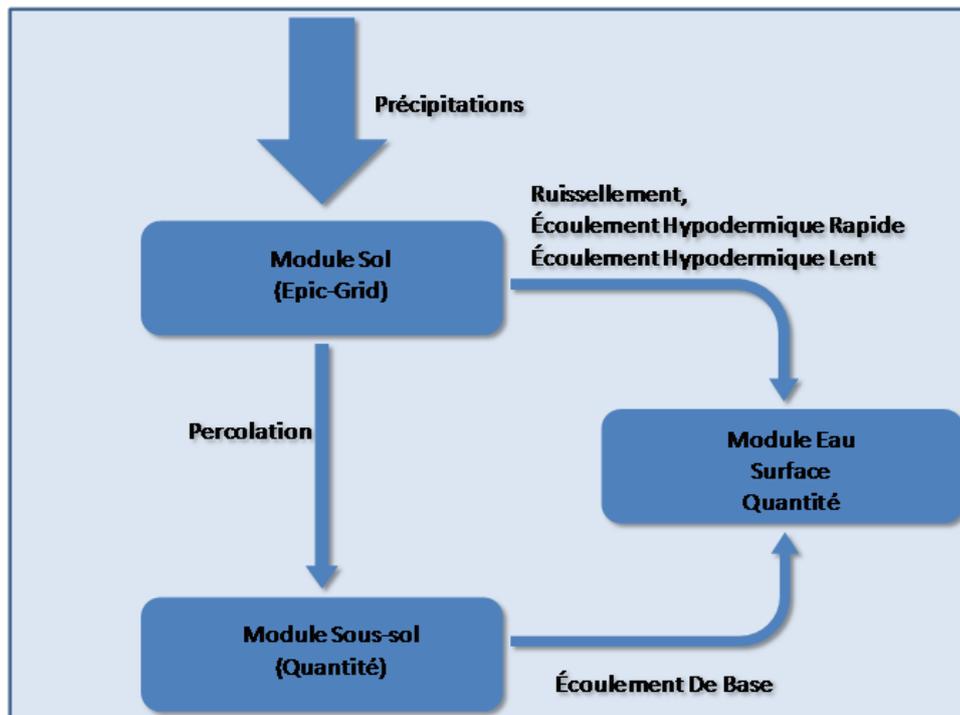


Figure 8 : Architecture du modèle intégré MOHISE

- SUFT3D de HG-GEO³ (LGIH) pour le modèle hydrogéologique a déjà été décrit comme modèle d'aquifères dans le modèle SALMON (paragraphe 3.2). Ce modèle basé sur les éléments finis présente des caractéristiques de puissance et flexibilité, mais il s'avère exigeant, tant en mémoire (disque et RAM) qu'en puissance CPU lorsque le nombre d'éléments croît.
- MODFLOW est un modèle open source du gouvernement américain (US Geological Survey) qui, dans le cadre de MOHISE, a été modifié par l'équipe d'hydrogéologues de GEO³. Ce modèle basé sur la méthodologie des différences finies ne fonctionne que dans les conditions de saturation totale. Il ne s'applique pas facilement aux conditions géologiques complexes, à cause de ses cellules rectangulaires. En revanche, il est moins consommateur de ressources que SUFT3D pour un même bassin.
- RIVER pour les débits de rivières est un modèle unidimensionnel développé par l'Aquapôle (CEME) pour calculer les débits, hauteur d'eau et vitesse de courant dans les cours d'eau (modèle quantité). Il résout les équations de Saint-Venant (équilibre de masses et moments) et prend en compte les apports d'eau latéraux (venant du modèle sol) ainsi que les débits de base (venant du modèle hydrogéologique).

Un module superviseur (MASTER) développé par l'Aquapôle en collaboration avec les autres équipes prend en charge les transferts de données entre les modules, ainsi que les adaptations nécessaires quant au pas de temps –des pas de temps différents pour le sol/eaux de surfaces (~1 jour) et pour le sous-sol (1 ou 10 jours selon le modèle utilisé : SUFT3D ou MODFLOW) – et à la discrétisation spatiale. Le couplage est unidirectionnel entre le modèle sol et le modèle hydrogéologique, ainsi qu'entre le modèle sol et le modèle de

rivières. Il est par contre bidirectionnel et conditionnel (en fonction de la différence entre la hauteur piézométrique et celle des rivières entre le modèle hydrogéologique et le modèle de rivière). En fonction de ces variables calculées respectivement par ces deux modules, le MASTER calcule dans quelle(s) direction(s) et quelle est l'intensité des transferts à réaliser.

Le modèle peut tourner en parallèle sur des machines multiprocesseur, chaque module utilisant le processeur qui lui est alloué, réduisant ainsi le temps de calcul total écoulé.

La calibration et la validation des modèles ont été effectuées sur des années historiques entre 1965 et 1995 sur trois bassins belges très différents quant à la dynamique du cycle de l'eau (caractéristiques spécifique) de ventilation des flux entre les différents compartiments) : Le Geer, la Gette et l'Ourthe.

Le modèle a ensuite été utilisé pour simuler des scénarios météorologiques liés aux changements climatiques en utilisant les données climatologiques résultant de trois modèles climatiques sélectionnés à partir d'une douzaines de modèles climatiques globaux à l'échelle planétaire et reconnus par le GIEC. L'impact sur les trois bassins a été évalué entre les années 2010 et 2099 (90 ans) par chacun des modèles.

Tableau 3 : Fiche descriptive du modèle MOHISE

Nom	MOHISE
Auteur	Aquapôle (CEME), HG-GEO ³ (LGIH), UHAGx
Type	Modèle Intégré MPI
Non-stationnaire	Oui
Cartes	Oui
Indices	Oui
Données Satellites	n/a
Côté Innovant	Planification des ressources à long terme Modélisation de l'effet des changements climatiques
BDD Wallonie disponible	Geer, Gette et Ourthe seulement
Autres BDD	Non.
Référence	http://www.aquapole.ulg.ac.be/projects/mohise/

3.4 MOHICAN

MOHICAN (*MO*dèle *H*ydrologique *I*ntégré pour le calcul des *C*rués et de l'*A*mplitude des Niveaux d'eau) est un modèle intégré réalisé par l'unité d'hydrologie et d'hydraulique agricole de la FUSAGx⁵, le LGIH-ULg⁶, le HACH-ULg et le CEME-ULg⁷ au profit du MET-SETHY entre 1996 et 2002.

Il s'agit d'un modèle hydrologique intégré basé sur la technologie d'échange de messages MPI. Il est de nature déterministe et concerne la simulation des crues pour le bassin de la Meuse et ses sous-bassins en Région Wallonne. L'outil possède une interface utilisateur de base, reliée à un système d'information géographique (SIG) ArcView et est constitué de :

- Un module superviseur pour la synchronisation et le contrôle des opérations
- Un modèle sol pour le ruissellement : EPIC-MAILLE-HORAIRE
- Un modèle d'eaux souterraines simplifié (utilisant une représentation de l'écoulement basée sur des réservoirs linéaires et générant des fonctions de transfert) : GROUND
- Un modèle hydrodynamique détaillé, modélisant les écoulements dans le lit mineur et le lit majeur, ainsi que leurs interactions : FLOOD ROOTING
- Un serveur de visualisation ArcView

EPIC-MAILLE-HORAIRE est une version d'EPIC-MAILLE (voir paragraphe 0) développée par l'unité d'Hydrologie et Hydraulique Agricole de GxABT (FUSAGx), permettant un pas de temps horaire pour la simulation du ruissellement et des apports diffus par le sol. Le modèle est distribué et utilise des mailles carrées de 1km², redécoupées elles-mêmes en entités homogènes du point de vue occupation du sol, pente moyenne, donnée météo et pédologie.

GROUND est un modèle simplifié basé sur la représentation des aquifères ou de parties d'aquifères par des réservoirs linéaires (« Fonctions de transfert »). A chaque aquifère ou partie d'aquifère sont associés un exutoire (ponctuel ou diffus linéairement réparti sur une section de rivière) et un groupe de fonctions de transfert analytiques assurant la description de l'écoulement (amortissement, déphasage, ...). Ce modèle n'est pas assez générique pour modéliser systématiquement toute zone pour toutes conditions hydrométéorologiques, mais permet de se doter d'une représentation du compartiment des eaux souterraines pertinent à certaines échelles ou pour certains bassins caractéristiques.

FLOOD ROUTING est un modèle unidimensionnel basé sur la théorie des volumes finis, développé par le HACH. Les inconnues hydrodynamiques sont situées au centre de gravité de chaque élément. Les données caractéristiques de section et de topographie sont données aux différents nœuds. Le modèle tient compte de conditions aux limites, ainsi que du stockage dans des lacs et barrages. Le modèle est doté d'un pas de temps adaptatif. Depuis, ce modèle a été amélioré et se décline en plusieurs versions constituant la suite logicielle WOLF [<http://www.hach.ulg.ac.be/cms/wolf>].

Le module Superviseur développé par l'Aquapôle en collaboration avec les autres équipes prend en charge les transferts de données entre les modules, ainsi que les adaptations nécessaires quant au pas de temps et à la discrétisation spatiale. Le couplage est unidirectionnel entre le modèle sol et le modèle hydrogéologique, ainsi qu'entre le modèle

⁵ Aujourd'hui faculté Gembloux Agro-Bio Tech (GxABT) de l'ULg

⁶ Aujourd'hui service d'Hydrogéologie du secteur GEO³ du département ARGENCO de l'ULg

⁷ Aujourd'hui unité R&D de l'Aquapôle de l'ULg

sol et le modèle de rivières. Il est par contre bidirectionnel et conditionnel (en fonction de la différence entre la hauteur piézométrique et celle des rivières entre le modèle hydrogéologique et le modèle de rivière). En fonction de ces variables calculées respectivement par ces deux modules, le Superviseur calcule dans quelle(s) direction(s) et quelle est l'intensité des transferts à réaliser.

Le module de visualisation développé par l'Aquapôle en utilisant la suite logicielle ArcView (langage « Avenue ») permettait de visualiser, pendant le calcul, les débits en rivières calculés par FLOOD ROUTING, ainsi que les débits aux exutoires MOHICAN selon un graphique temporel. Il est possible de générer des fichiers contenant les graphes générés par ce serveur. Ce module est piloté par le superviseur.

Une interface graphique a été développée par l'Aquapôle, afin de piloter de manière conviviale les différents modules. L'utilisateur peut ainsi construire des scénarios, lancer des simulations, visualiser les bilans flux et débits aux exutoires prédéfinis, envoyer des requêtes au serveur graphique, etc...

Les données météo utilisées sont les précipitations journalières et horaires, les températures maximales et minimales journalières et les rayonnements solaires globaux journaliers.

MOHICAN fut utilisé en 2004 pour une simulation prévisionnelle de l'effet d'éventuels bassins d'orage sur l'amplitude des crues de l'Ourthe. Il a été validé par comparaison des données mesurées et des résultats d'une simulation historique, sur l'année 1993.

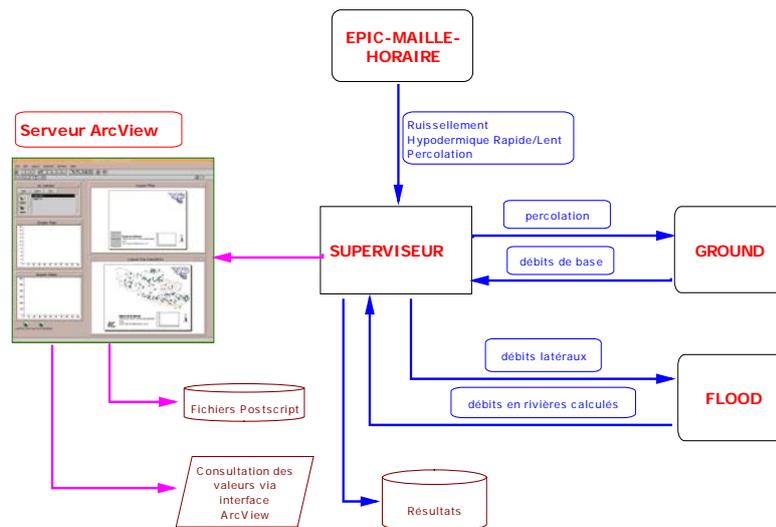


Figure 9 : Architecture du modèle intégré MOHICAN

Tableau 4 : Fiche descriptive du modèle MOHICAN

Nom	MOHICAN
Auteur	UHAGx, HG-GEO ³ (LGIH), HACH, Aquapôle (CEME)
Type	Modèle Intégré MPI
Non-stationnaire	Oui
Cartes	Oui
Indices	Oui
Données Satellites	Affectation des sols
Côté Innovant	Calcul de crues
BDD Wallonie disponible	Meuse (propriété SPW)
Autres BDD	
Référence	http://www.aquapole.ulg.ac.be/projects/mohican/

3.5 PIRENE/MOIRA

MOÏRA (**MO**dèle **I**ntégré pour les **R**essources **A**quatiques) et un modèle intégré issu du programme PIRENE (**P**rogramme **I**ntégré de **R**echerche **E**Nvironnement-**E**au), coordonné par le Centre Environnement de l'ULg et réalisé par 18 équipes scientifiques wallonnes entre 2001 et 2005 au profit de la Région Wallonne (visa 00/52161), pour répondre aux exigences de la Directive Cadre sur l'Eau (DCE) 2000/60/CE.

Indépendamment des autres tâches liées au programme Pirene, le modèle intégré développé est un modèle MPMD représentant le cycle de l'eau adapté à l'échelle de la région wallonne (Meuse et Escaut). Il a été conçu pour pouvoir comprendre et reproduire le fonctionnement du système de ressources en eau, évaluer l'incidence des différentes pressions anthropiques, ainsi que de simuler l'effet des politiques et des programmes d'action. Contrairement aux précédents modèles cités, MOIRA simule la qualité en plus de la quantité.

Le modèle a la particularité de pouvoir traiter la région wallonne dans sa globalité, comme de pouvoir traiter des zones localisées de manière plus précise.

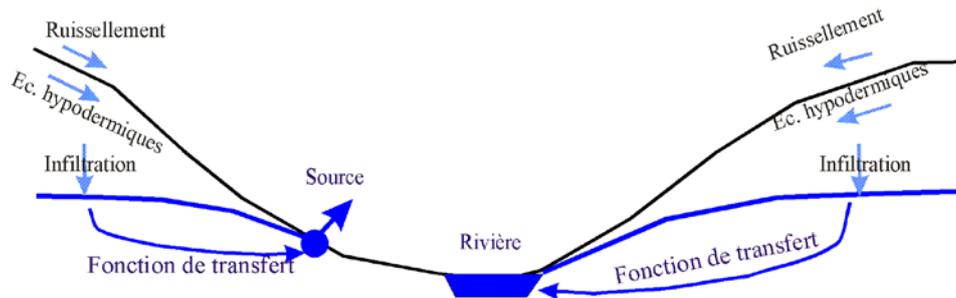


Figure 10 : Schéma conceptuel des flux à l'échelle du bassin versant

MOÏRA est composé des modules compartimentaux suivants:

- EPIC-Grid de l'unité d'Hydrologie et Hydraulique Agricole de GxABT (FUSAGx) pour le modèle sol est une évolution d'EPIC-Grid décrit comme module de ruissellement du modèle MOHISE (paragraphe 0) ;
- HG-FT de HG-GEO³ (LGIH) et Aquapôle (CEME), SUFT3D de HG-GEO³ ou MODFLOW de la FPMs, pour les eaux souterraines ;

HG-FT est une évolution du modèle GROUND utilisé dans MOHICAN (voir paragraphe 0) ; Cette évolution concerne principalement l'ajout des variables de modélisation de la qualité de l'eau dans les nappes ;

MODFLOW est un modèle hydrogéologique open source développé par le département américain de surveillance géologique (USGS). Il a été modifié par le service d'hydrogéologie de la faculté Polytechnique de Mons pour les besoins du programme Pirene et pour la modélisation de l'Escaut en Région Wallonne. Il s'agit d'un modèle basé sur la technologie des différences finies. Une base de données existe pour l'Escaut ;

SUFT3D est un modèle éléments finis tridimensionnel des aquifères déjà utilisé dans les modèles SALMON (paragraphe 3.2) et MOHISE (paragraphe 0) appliqués pour la modélisation de la Meuse en Région Wallonne. Il a été fortement modifié et amélioré pour les besoins de Pirene (structuration, transport,...). Une base de données du bassin de la Meuse a été développée ;

- FLOOD ROUTING est un modèle unidimensionnel basé sur la théorie des volumes finis, développé par le HACH. Il a été décrit ci-dessus dans le cadre du modèle MOHICAN (paragraphe 0) Il est utilisé dans MOIRA comme module rivières « quantité » ;

- PEGASE pour le module rivière « qualité » (voir paragraphe 3.1). Différentes améliorations ont été apportées au modèle PEGASE dans le cadre de Pirene, notamment la modélisation des matières en suspension, de la sédimentation et des micropolluants, mais aussi le calcul d'indices de qualité de type SEQ-Eau.

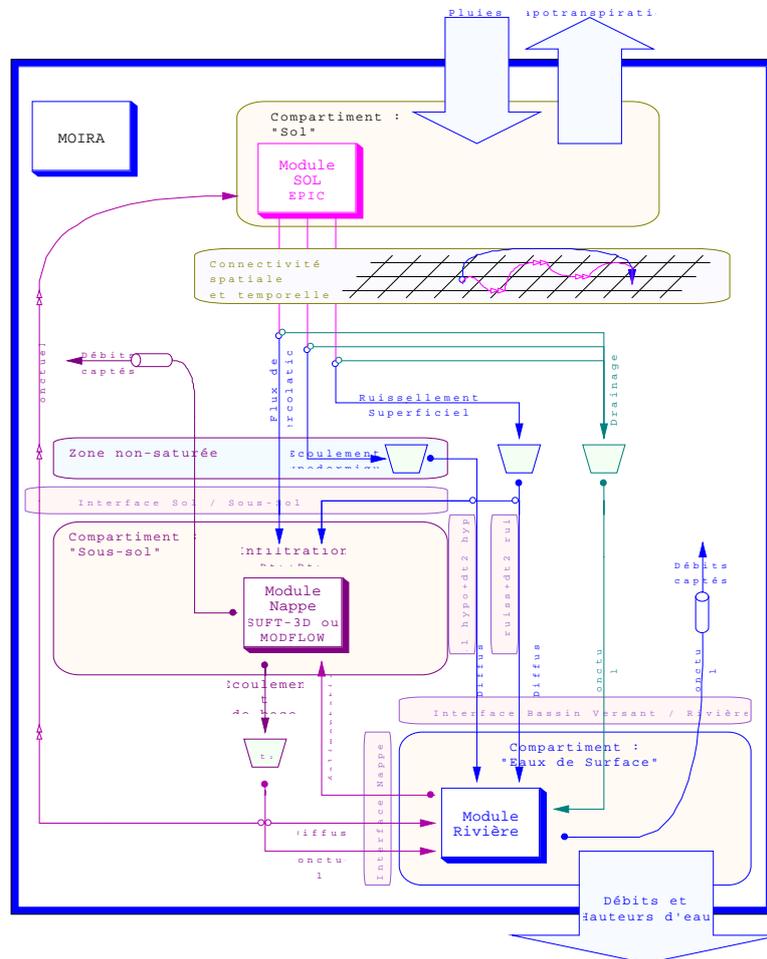


Figure 11 : Architecture du modèle intégré MOIRA

Le modèle (par l'intermédiaire du module superviseur) peut transférer les VARIABLES de quantité (ruissellement, flux hypodermiques rapides et lents, flux d'infiltration, débits latéraux ...) et de qualité (matières inorganiques particulières, matière organique, nutriments, micropolluants, ...) entre les différents compartiments. Les déphasages nécessaires (temps de transfert) sont aussi gérés par le superviseur.

Le modèle MOIRA a d'abord été validé sur les aspects quantitatifs (écoulement) sur des scénarios historiques (1993 et 2000), d'abord pour chaque module standalone, puis intégrés. Des validations ont été ensuite effectuées en ajoutant la qualité au modèle complet, en standalone puis en intégré pour les mêmes années.

Tableau 5 : Fiche descriptive du modèle MOÏRA

Nom	MOÏRA
Auteur	Aquapôle (CEME), UHAGx, HG-GEO ³ (LGIH), HG-FPMs, HACH
Type	Modèle Intégré MPI
Non-stationnaire	Oui
Cartes	Oui
Indices	Oui
Données Satellites	Affectation des sols
Côté Innovant	Micropolluants, matières en suspension, SEQ-Eau Conforme à DCE 2000/60/CE
BDD Wallonie disponible	Meuse, Escaut (partie RW) [propriété SPW]
Autres BDD	Non.
Référence	http://www.aquapole.ulg.ac.be/projects/moira/

3.6 SEVEX

Le projet SEVEX (**SE**VESO **EX**pert system) a réuni trois équipes universitaires (ULG, FPMs, UCL) à partir des années 90, afin de mettre au point une méthode permettant de calculer les zones à risques (effets d'incendies, d'explosions ou d'émissions de produits toxiques) autour des installations industrielles à risques majeurs par dispersion atmosphérique. Cette recherche, financée par la Région wallonne a permis le développement d'un système expert aujourd'hui commercialisé dans plusieurs pays par une société spin-off de l'UCL : ATM-PRO.

Il s'agit d'un modèle intégré comprenant un module « terme source », un module de calcul de champ de vent à méso-échelle et un modèle de simulation de la dispersion atmosphérique :

- SEVEX-SOURCE développé par la FPMs permet le calcul des flux de pollution gazeuse, liquide ou mixte, la vaporisation des aérosols ainsi que les phénomènes liés aux explosions (UVCE, BLEVE). Il en résulte une caractérisation des sources de pollution. Il contient aussi un module de dispersion gaussienne bidimensionnel simple.
- SEVEX-MESO développé par l'UCL est le module de simulation météorologique tridimensionnel. Il résout les équations simplifiées de Navier-Stokes pour l'atmosphère. Il prend en compte le relief et l'occupation du sol, ainsi que les transferts de chaleur convectifs et radiatifs entre le sol et l'atmosphère et la turbulence. Il en résulte une caractérisation tridimensionnelle des vents sur la zone étudiée.

- SEVEX-TOXIC est un modèle de dispersion lagrangien tridimensionnel des gaz, aérosols et particules toxiques ou irritants qui a été développé par l'Aquapôle (CEME) de l'ULg. Il utilise les résultats des deux modules précédents pour calculer la dispersion des toxiques.

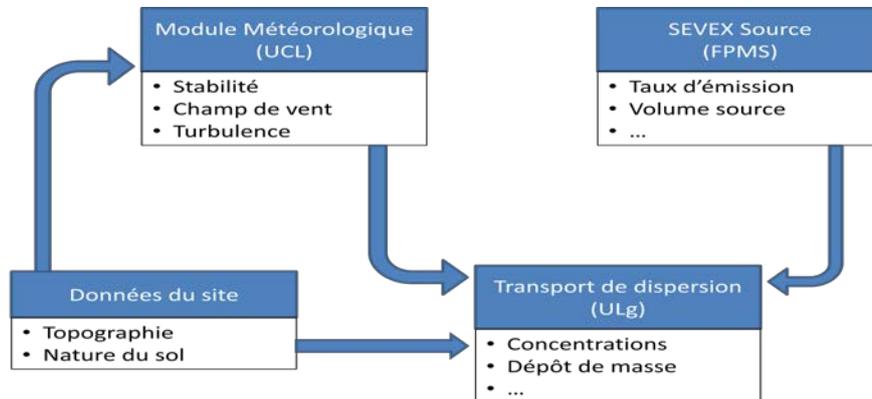


Figure 12 : Architecture de SEVEX

SEVEX est actuellement commercialisé en version PC consolidée par la société ATM-PRO. La société ATM-PRO commercialise également un certain nombre de services réalisés en utilisant le logiciel.

Il a été appliqué aux substances toxiques gérées dans les industries à risques (type SEVESO) en Région Wallonne (Ammoniac, Chlore, substances inflammables,...) mais aussi, ultérieurement, pour les radioéléments liés aux effets d'un accident sur une installation nucléaire.

Tableau 6 : Fiche descriptive du modèle SEVEX

Nom	SEVEX
Auteur	Aquapôle(CEME), FPMs, UCL
Type	Modèle intégré
Non-stationnaire	Oui
Cartes	Oui
Indices	n/a
Données Satellites	Affectation des sols, fonds de cartes
Côté Innovant	Conforme à la directive EEC SEVESO
BDD Wallonie disponible	Oui (propriété SPW)
Autres BDD	Oui (Outil commercial)
Référence	http://www.atmpro.be/product.php?item=sevex_view&onglet=genera

4 Modèles Conceptuels & Perspectives

Considérant les modèles passés en revue comme des ensembles d'éléments permettant de construire un ou plusieurs modèles complexes par couplage, les approches conceptuelles suivantes permettent de dégager diverses perspectives telles que :

- Une méthodologie intégratrice basée sur différentes solutions de gestion des communications ;
- Des modèles *Accidents* non-stationnaires orientés qualité à court terme ;
- Des modèles *Accidents et Changements Climatiques* non-stationnaires orientés qualité à long terme ;
- Un modèle ambitieux fonctionnant à court et long terme, doté d'une composante « aérosol ».

4.1 Méthodologie Intégratrice

La méthode de construction de modèles intégrés déployée par l'Aquapôle, et basée sur la communication entre modules compartimentaux à partir de l'échange de messages (PVM, MPI,...) permet la composition du modèle adéquat pour un problème déterminé (accident en rivière, accident sur terre, ...), avec les échelles spatiales (commune, région, ...) et temporelles (mois, année, ...) adaptées au problème posé. Les possibilités de composition de modèle sont nombreuses, et nous en présentons ici quelques exemples dont la pertinence nous semble avérée pour les différents cas de figure d'accidents. Ces modèles peuvent également se révéler pertinents pour d'autres problématiques, en relation ou non avec celle des accidents. Tous cependant procèdent de la même méthodologie, soit un couplage de modules quantités et qualités modélisant les différents compartiments à considérer.

La méthode de couplage permet aussi d'avoir accès aux résultats du calcul pendant la simulation, afin de visualiser ces résultats, ceci pourrait se faire à travers une interface Web, ou sous forme de communication directe (broadcasting, mail, ...).

Enfin, des modules additionnels et concomitants pourraient être couplés en vue de traiter les relations économiques, sociologiques, environnementales, etc...

4.2 Modèle Opérationnel Orienté Accident Rivière

Un premier modèle, calibré et validé en Europe du Nord, rapidement opérationnel en termes de données à fournir serait composé d'une version améliorée du modèle PEGASE utilisé seul. Une composante Accident direct en rivière doit être développée pour permettre au modèle de considérer le rejet fortement non stationnaire et permettre une définition simple et rapide du polluant, de l'endroit, ainsi que de la période où il a lieu.

Le module « micropolluants » de PEGASE, actuellement en développement, permettrait également de prendre en compte le transport, voire la dégradation de nouvelles substances chimiques émergentes.

4.3 Modèle Orienté Accident Rivière et Bassin-Versant

Un second modèle, rapidement opérationnel peut être construit en couplant le modèle PEGASE modifié comme décrit ci-dessus à un modèle sol.

Les caractéristiques de ce modèle intégré lui permettront de calculer la qualité –pour une pollution sur le bassin versant– des eaux de surfaces dans les quelques heures suivant un accident. Il permettra, grâce à un pas de temps court, de juger de l'évolution de l'expansion de la pollution dans les jours suivant l'accident.

Le modèle sol devrait également être apte à prendre en compte le transport, voire la dégradation de nouvelles substances chimiques visées.

4.4 Modèle Orienté Accident Rivière, Bassin versant et Eaux Souterraines

Un troisième modèle permettant l'évaluation de l'évolution de la qualité des eaux de surface et des aquifères sur un plus long terme pourrait être rendu opérationnel en réutilisant le modèle suivant :

le modèle intégré MOIRA pour le calcul des interactions surface/sol/sous-sol, composé de :

- Un modèle sol à déterminer (EPIC-Grid, SWAT,...)
- SUFT-3D ou MODFLOW pour les eaux souterraines
- RIVER ou autre pour les débits de rivières
- PEGASE pour la qualité des rivières

Les modifications de PEGASE et du modèle sol envisagées pour le modèle précédent (cf. section 4.3) sont également nécessaires dans celui-ci. Des données météorologiques historiques seraient utilisées en entrée du modèle sol, afin de déterminer l'impact d'une pollution accidentelle sur les ressources hydrogéologiques dans des conditions existantes.

Il faut également adapter le modèle hydrogéologique aux micropolluants ajoutés dans les autres modèles.

Il est à noter que ce modèle intégré présente également les caractéristiques nécessaires d'un modèle de prédiction des effets à long terme du changement climatique. Il pourrait être utilisé avec peu de modifications à cet effet.

4.5 Modèle Complexe Multifonctionnel

Enfin, un modèle plus ambitieux permettrait le calcul quantité et qualité à une échelle de temps à déterminer, appliqué sur un domaine dont l'extension spatiale et temporelle serait à définir, pour une finalité à préciser (accidents, changements climatiques, ...) ! Il serait également plus complet du point de vue des phénomènes à modéliser, car il pourrait comprendre une composante diffusion des aérosols. Il serait composé des modules compartimentaux nécessaires à l'atteinte des objectifs. On peut déjà accéder aux expertises liées à :

- PEGASE pour la qualité des rivières, modifié pour utiliser des mesures en temps réel (cf. section 4.1) ;

- MOIRA pour les débits, le sol et le sous-sol ;
- SEVEX pour la diffusion des aérosols ;
- Un modèle bidimensionnel, voire tridimensionnel de qualité des retenues d'eau (lacs, barrages) à développer (selon la pertinence).
On peut également intégrer de nouveaux modèles (existants ou à développer) pour des applications d'imagerie spatiale, des applications WEB, et de communication (broadcasting, diffusion, etc...)

La méthodologie intégratrice serait basée (selon la définition du modèle conceptuel) sur des communications inter-modules type MPI ou autres (à définir). Il pourrait également être développé pour une application service-WEB accédant aux données spatiales.

Ce modèle requiert un développement plus long que les précédents pour sa mise en œuvre, ainsi qu'une collaboration étroite entre les différentes équipes. En effet, le caractère ouvert d'un tel modèle permettrait à d'autres équipes que celles de l'Aquapôle pourraient entrer en jeu au niveau des développements, en apportant leur expertise propre.

4.6 Applications à la gestion des risques industriels

Afin de pouvoir répondre au mieux à des exigences de plateforme opérationnelle pour la gestion des risques industriels, les modifications suivantes sont envisageables pour les modèles décrits au chapitre 4.

Détection de zones par images satellites

Bien qu'il ne s'agisse pas de modifications du modèle à proprement parler, mais plutôt de la construction des bases de données, il serait possible d'utiliser l'imagerie satellite d'une manière plus avancée qu'elle ne l'est actuellement. En effet, outre les occupations de sol classiquement détectées sur photos satellites (industrie, agriculture, forêts, urbanisme...), des zones écologiquement sensibles pourraient être détectées automatiquement par satellite (p.ex. les zones ripisylves – formations boisées, buissonnantes et herbacées présentes sur les rives d'un cours d'eau dont le système racinaire, la fonge et les bactéries qui y sont associés constituent également une pompe épuratrice pour certains nutriments).

L'identification automatique pourrait se faire sur base d'une signature spectrale variant en fonction du temps (visible et radar), identifiée par calibration sur des zones connues de même type.

Par exemple, en fournissant les coordonnées géographiques d'une bande ripisylve à un logiciel à définir, celui-ci pourrait identifier toutes les zones du même type, avec un filtrage sur certaines caractéristiques : largeur minimale de la zone, longueur minimale, présence de rivière, largeur minimale de rivière ...

Une autre innovation pourrait résider dans une allocation des sols variant en fonction du temps (élevage/jachère). La variation de la signature spectrale des différentes zones permettrait d'identifier au cours du temps (échelle des saisons), les zones cultivées, et les zones laissées en jachère, ou des différences d'affectation comme les prairies destinées à la pâture et celles destinées à la production de foin.

Ce même type d'applications pourrait être destiné à la modélisation des changements climatiques en associant l'évolution identifiée par l'exploitation des images satellites avec des scénarios prospectifs d'aménagement du territoire.

Modification du modèle *PEGASE*

Les modifications potentielles à réaliser dans le modèle *PEGASE* afin de renforcer son opérationnalité dans le cadre de pollutions accidentelles ou endémiques se classent en deux catégories :

- Nécessaires (à implémenter absolument)
- Souhaitables (proposition d'implémentations à réaliser dans le cadre d'une exploitation opérationnelle dans un cadre à définir)

Modifications nécessaires

- Nouveaux polluants : les produits polluants à considérer lors d'un rejet accidentel doivent être ajoutés au modèle *PEGASE*. Par exemple :
 - Produits pétroliers
 - Chlore, Brome / produits chlorés (Javel,...) – dégradation ?
 - Iode / produits iodés – dégradation ?
 - Pesticides (900 molécules de base de produits phytosanitaires dont certaines se dégradent!!!!)
 - Alcools
 - Détergents / savons (autres que phosphates si existent et si dangereux?)
 - Solvants (trichloréthylène, tétrachloroéthylène)
 - Alkylphénols, chloroforme et acide chloroacétique : utilisation dans les produits lessiviels et désinfectants.
 - Dioxines (17 toxiques) : cristaux liposolubles, insolubles dans l'eau, liquide à plus de 300°C. Très stable, elle n'est pas biodégradable. Elle se disperse dans l'air et est stockée dans les sédiments. Elle peut être le sous-produit d'un incendie en présence d'acide sulfurique organique et de chlore. Pollution du sol, sous-sol, eau et air.
 - PCB (PolyChloroBiphényle – 209 composés aromatiques organochlorés dont 12 toxiques) : liquides très stables plus ou moins visqueux insolubles dans l'eau, liposolubles. Véhiculés par l'eau, puis rapidement stockés dans les sédiments.
 - Chloroalcanes
 - Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (5 substances dangereuses prioritaires)
 - Acides
 - Peintures
 - Colles
 - Médicaments / résidus médicamenteux
 - Substances radioactives
 - Groupement sous LDNA ? (Liquide Dense Non Aqueux)
 - ...
- Création d'une BDD associée avec les caractéristiques des polluants (facilitation du choix par l'utilisateur du polluant et des modes de dispersion)
- Sous-modèle de dispersion (transport, dilution, sédimentation) des polluants dans les eaux
- Adaptation du sous-modèle rejets au cas de rejets fortement non-stationnaires et définition des données

- Mode prévisions lorsque les données s'arrêtent (données statistiques selon prévision sèche, humide, mixte, ...)
- Obtention des données hydrauliques en temps réel.

Modifications souhaitables

- Interface ergonomique pour l'assemblage des données d'un modèle accident :
 - type de polluant
 - évolution des quantités rejetées
 - localisation
- Implémentation des rejets par temps de pluie (pollution plus importante par ruissellement/infiltration, dilution plus importante) ;
- Ajout d'un index "risque" permettant de visualiser de façon synoptique le niveau de risque (localisation spatiale/temporelle de risque majeurs) ;
- Implémentation de la variation temporelle des affectations des sols ;
- Implémentation de la remise en suspension/dissolution des polluants sédimentés (long terme) ;
- Identification des seuils d'alerte ;
- Définition d'un modus operandi de diffusion de l'information.

5 Conclusions

La méthode de construction de modèles intégrés déployée par l'Aquapôle, et exploitant la communication entre modules compartimentaux basée sur l'échange de messages (PVM, MPI,...) permet la composition du modèle adéquat pour un problème déterminé (accident en rivière, accident sur terre, ...), avec les échelles spatiales (commune, région, ...) et temporelles (mois, année, ...) adaptées au problème posé.

Les équipes de l'Aquapôle disposent de l'expertise acquise au travers de leur participation aux développements de plusieurs modèles intégrés dédiés à des problématiques spécifiques dans le domaine de l'eau. Pour ce faire, elles apportent également leur contribution en fournissant plusieurs modules compartimentaux, éléments parmi d'autres des modèles intégrés. La prévision des effets d'une pollution accidentelle et sa prévention font partie des problématiques parfaitement adaptées à la modélisation intégrée tout en autorisant la réutilisation de certains modèles compartimentaux existants.

Les possibilités de composition de modèles sont nombreuses, et nous en avons présenté ici quelques exemples dont la pertinence nous semble avérée pour les différents cas de figure d'accidents.

De plus, certains de ces modèles peuvent également se révéler pertinents pour d'autres problématiques. Tous cependant procèdent de la même méthodologie, soit un couplage de modules quantités et qualités modélisant les différents compartiments à considérer.

L'assemblage de ces modèles prend la forme de développements informatiques plus ou moins complexes qui sont à mener conjointement par les équipes propriétaires des modèles. Ces développements doivent s'accompagner d'une campagne d'étalonnage et de validation du ou des modèles ainsi assemblés et de validation des données acquises et structurées en bases de données relationnelles alimentant les nouveaux modèles.

Une extension des modèles existants permettrait de composer ainsi de nouveaux modèles des plus pertinents pour le but suivi par exemple, le rejet accidentel de polluant affectant les eaux de surface ou souterraines. Il en résulterait, par la même occasion, un modèle potentiellement utilisable, notamment, pour simuler les effets à long terme du réchauffement climatique.

La méthode de couplage originale et opérationnelle permet aussi d'avoir accès aux résultats du calcul pendant la simulation, afin de visualiser ces résultats, ceci pourrait se faire à travers une interface Web, ou sous forme de communication directe (broadcasting, mail, ...).

APPENDICE I – REFERENCES

Ir. J.S. SMITZ, Ir. E. EVERBECQ, Ir. J-F. DELIEGE, Pr. J.C.J. NIHOUL, Pr. F. RONDAY, Dr. J-M. BECKERS, Dr. E.J.M. DELHEZ, Dr. M. GREGOIRE, Pr ; A MONJOIE, Pr. A. DASSARGUE, Ir. G. CARABIN, Ir. S. BROUYERE, Pr. P-A. DE MARNEFFE, Ms. C. GHIOT, Ir. O. DUCHENE, Mr. P. BAULER,

SALMON Sea Air Land Modelling Operational Network Final Report, ULg Dec-1999.

E. EVERBEQ, J-F. DELIEGE, T. BOUROUAG, M. MARKATOS,

PIRENE – Elaboration du module ‘Qualité des eaux de surface’ et Elaboration du modèle Intégré MOIRA, ULg-CEME 31-Mars-2004

M. BOUROUAG, J-F. DELIEGE, E. EVERBECQ, A. GRARD, J. SMITZ,

PIRENE, Travaux de l’équipe de modélisation, Rapport final, ULg-CEME Avril 2007

Prof. S. DAUTREBANDE, Ir. F. COLLARD, Prof. A. MONJOIE, Ir. O. TROMME, Prof. A. LEJEUNE, Prof. M. PIROTTON, Ir. P. ARCHAMBEAU, Ir. S. ERPICUM, Ir. J. SMITZ, Ir. J-F. DELIEGE, Ir. E. EVERBECQ, Lic. J-P. DZISIAK, Lic. T. BOUROUAG,

Marché de service pour la réalisation d’extensions au modèle global de simulation hydrologiques MOHICAN, Rapport Final, Mai 2002

J.S. SMITZ, S. DAUTREBANDE, J. FEYEN, G.R. DEMAREE, A. MONJOIE & A. DASSARGUES,

Integrated modelling of the Hydrological cycle in relation to global climate change, article of Final Reports on Global change and sustainable development, BelSPO SPSD I, 2001.

G. CARABIN, S. BROUYERE, A. DASSARGUES, A. MONJOIE, C. SOHIER, S. DAUTREBANDE, J-F. DELIEGE, J. SMITZ,

The new integrated hydrological model MOHISE : construction, implementation and results, article présenté à Wageningen, NL au International Workshop on Catchment-scale Hydrological Modelling and Data Assimilation, Sep-2001.

Pr. S. DAUTREBANDE, C. SOHIER, Pr. J. FEYEN, K. CHRISTIAENS, L. FEYEN, Dr. G.R. DEMAREE, E. ROULIN, D. GELLENS, A. CHEYMOL, Pr. A. MONJOIE, Pr. A. DASSARGUE, G. CARABIN, S. BROUYERE, O. SELS, J.S. SMITZ, E. EVERBECQ, J-F. DELIEGE, M.T. BOUROUAG,

Integrated Modelling of the Hydrological Cycle in Relation to Global Climate Change Final Report, Research contract CG/DD/08, FUSAG, KUL, IRM, ULG 2002

T. BOUROUAG, J-F. DELIEGE, J-P. DZISIAK, E. EVERBECQ, F. RONDAY,

SEVEX Les industries à risques majeurs en region Wallonne, Rapport de Synthèse Volume 4, ULG-CENV, Nov. 1992

J-F. DELIEGE, J.P. DIZISIAK, E. EVERBECQ, T. BOUROUAG, J. SMITZ,

SEVEX Analyse de sensibilité et validation du modèle de dispersion 3-D, ULG-CENV, Nov. 1991

SMITZ, J. & EVERBECQ, E.,

Accidental releases of radionuclides in waterways. CEE-OECD workshop on recent advances in reactor accident consequence assessment. Rome, 25-29 January 1988

F. RONDAY, E. EVERBECQ, T. BOUROUAG, J-F. DELIEGE, J-P. DZISIAK, C. DELVOSALLE, LEVERT, J.M., BENJELLOUN, F., SCHAYES, G. & CASTEL-BRANCO, J.,

The SEVEX project : An integrated numerical model for the dispersion of gas in a complex terrain. 8th International Loss Prevention Colloquium, Antwerpen, 19-23 June 1995, Elsevier, 12 pp

C. GHIOT, P. BAULER, J-M. BECKERS, E.J.M. DELHEZ, G. CARABIN, A. DASSARGUES, J-F. DELIEGE AND E. EVERBECQ

Sea Air Land Modeling Operational Network. Hydroinformatics'98, 24-26 August 1998.

J. SMITZ, E. EVERBECQ, J.F. DELIEGE, J.P. DESCY, R. WOLLAST, J.P. VANDERBORGHT ,

PEGASE, une méthodologie et un outil de simulation prévisionnelle pour la gestion de la qualité des eaux de surface. Tribune de l'eau, Ed. CEBEDOC, vol 50/4, n°588, pp73-82, 1997

J.C.J. NIHOUL

Modèles Mathématiques et Dynamique de l'Environnement., Ed. Ele, Liège , 1977

D. BLANCHON

Atlas mondial de l'eau, Ed. Autrement, 17/02/2009

UNESCO

Glossaire International d'hydrologie,

<http://webworld.unesco.org/water/ihp/db/glossary/glu/aglu.htm>

Prof. A. MUSY

Cours « Hydrologie générale », HYDRAM, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Février 2005. <http://hydram.epfl.ch/e-drologie/>

Environnement Canada

La Pollution de l'eau, <http://www.ec.gc.ca/eau-water/default.asp?lang=Fr&n=06F1403C-1#pollution>

ATM-PRO <http://www.atmpro.be/>

APPENDICE II – GLOSSAIRE

API	Application Programming Interface : Une interface définissant un certain nombre de services à l'usage de la programmation logicielle
AIL	Service d'Algorithmique et Ingénierie du Logiciel de l'ULg http://www.montefiore.ulg.ac.be/services/ail
ARGENCO	Architecture, Géologie Environnement et Constructions, département de la faculté des sciences appliquées de l'ULg http://www.argenco.ulg.ac.be
BDD	Base de données
BLEVE	Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion
CEME	Centre d'Étude et de Modélisation de l'Environnement (équipe actuellement intégrée à l'unité R&D de l'Aquapôle), ULg http://www.aquapole.ulg.ac.be
CENV	Centre Environnement de l'Université de Liège
DCE	Directive Cadre sur l'Eau http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=CELEX:32000L0060:EN:NOT
FPMs	Faculté Polytechnique de l'Université de Mons http://www.fpms.ac.be
FUNDP	Faculté Universitaire Notre-Dame de la Paix à Namur http://www.fundp.ac.be/
FUSAGx	Faculté Universitaire des Sciences Agronomiques à Gembloux, faculté de l'ULg. Actuellement dénommée Agro-Bio Tech http://www.fsagx.ac.be
GALILEO	Système de satellites de positionnement global européen
GEO	Group on Earth Observation : Groupe d'experts coordonnant les efforts internationaux pour construire le GEOSS
GEO ³	Secteur du département ARGENCO, regroupant les compétences relevant de la géotechnologie, l'hydrogéologie et la géophysique appliquée http://www.argenco.ulg.ac.be/geo3.php
GEOSS	Global Earth Observation System of Systems : Infrastructure publique interconnectant divers systèmes de surveillance du climat. Elle est supervisée par le GEO

GEOMAC	Département de Géoressources, Géotechnologies et Matériaux de constructions de l'ULg. Aujourd'hui devenu GEO ³
GHER	GeoHydrodynamics and Environment Laboratory est un groupe de recherché de l'ULg dédié aux études et modélisations environnementales et marines de la faculté des sciences de l'ULg http://modb.oce.ulg.ac.be/
GIEC	Groupe Intergouvernemental d'Experts sur le Climat
GMES	Global Monitoring for Environment and Security : initiative européenne pour l'établissement d'une capacité d'observation de la terre
GxABT	Gembloux Agro-Bio Tech, faculté des sciences agronomiques et de l'ingénierie biologique de l'ULg http://www.fsagx.ac.be
HACH	L'Unité d'Hydrologie, Hydrodynamique Appliquée et Constructions hydrauliques fait partie du département ARGENCO de l'ULg http://www.hach.ulg.ac.be/cms/
HG	Hydrogéologie
IRM / KMI	Institut Royal Météorologique de Belgique (Uccle) http://www.meteo.be
KUL	Université Catholique de Louvain http://www.kuleuven.be
LDNA	Liquide Dense Non Aqueux
LGIH	Le Laboratoire de Géologie de l'Ingénieur, d'Hydrogéologie et de prospection de l'ULg. Son activité est aujourd'hui reprise par le service d'hydrogéologie de GEO ³
MET	Ministère de l'Équipement et des Travaux du Service Public Wallon http://met.wallonie.be
MOHICAN	Modèle Hydrologique Intégré pour le calcul des Crues et de l'Amplitude des Niveaux d'eau
MOHISE	Modèle Hydrologique intégré de Simulation du cycle de l'Eau
MOIRA	Modèle Intégré pour les Ressources Aquatiques
MPI	Message passing Interface – Une API permettant à plusieurs processus de dialoguer par échange de messages

Open MI	Open Modelling Interface : Interface de couplage intégré de modèles http://www.openmi.org
PCB	Polychlorobiphényle
PEGASE	Planification Et Gestion de l'ASSainissement des Eaux
SUFT3D	Saturated/Unsaturated Flow and Transport in 3D
PVM	Parallel Virtual Machine – Une API Permettant à plusieurs machines et éventuellement plusieurs systèmes opérationnels de communiquer par échange de messages
R&D	Recherche et Développement
SALMON	See Air & Land Modelling Operational Network
SETHY	Service d'Études Hydrologiques du SPW
SEVEX	Seveso Expert System
SPW	Service Public de Wallonie http://spw.wallonie.be
STEP	Service de Statistique et Études Prospectives de l'ULB http://www.ulb.ac.be/be/step.html
SWAT	Soil and Water Assessment Tool : Modèle sol open source créé pour l'USDA. Il en existe de nombreuses déclinaisons
UHAGx	Unité d'Hydrologie et Hydraulique Agricole de GxABT http://www.fsagx.ac.be/ha/
UCL	Université Catholique de Louvain-la-Neuve http://www.uclouvain.be/
ULB	Université Libre de Bruxelles http://www.ulb.ac.be
ULg	Université de Liège http://www.ulg.ac.be
URBO	Unité de Recherche en Biologie des Organismes de la FUNDP http://www.fundp.ac.be/facultes/sciences/departements/biologie/recherche/centres/urbo/
USGS	United States Geological Survey http://www.usgs.gov

UVCE	Unconfined Vapour Cloud Explosion
WACONDA H	Water Control Data for Hydrology

Aquifère – Formation perméable d'un point de vue lithologique où s'accumule l'eau et qui peut contenir celle-ci en quantités exploitables.

Bassin Versant – Espace géographique alimentant un cours d'eau et drainé par lui. Le bassin versant a pour axe le cours d'eau et pour limites la ligne de partage des eaux séparant des bassins versants adjacents. *Synonyme* : bassin hydrographique.

Conditions aux limites de Cauchy – Imposition aux limites du domaine d'une équation différentielle ou d'une équation aux dérivées partielles, à la fois de la valeur de la solution de l'équation et celle de la dérivée normale à la frontière.

Crue – Augmentation importante du débit d'un cours d'eau, qui se traduit par une augmentation de son niveau et, par conséquent, des débordements dans le lit majeur.

Débit – Volume d'eau écoulé pendant une période donnée, exprimé généralement en litres par seconde ou en mètres cubes par seconde, voire en kilomètres cubes par an.

Débit de base – Partie du débit d'un cours d'eau qui provient essentiellement des nappes souterraines, mais aussi de la vidange des lacs et de la fonte des glaciers, durant les périodes suffisamment longues où il ne se produit ni précipitation, ni fonte des neiges.

Débit réservé – Débit minimal qui doit être maintenu pour la sauvegarde des écosystèmes, généralement défini pour les cours d'eau en aval de grands barrages ou de prises d'eau.

Écoulement Hypodermique – Portion des précipitations infiltrées qui n'est pas descendue jusqu'à la nappe libre, mais qui passe de la surface du sol vers les cours d'eau en cheminant au dessous de la surface du sol.

Évapotranspiration – Ensemble de phénomènes comprenant à la fois l'évaporation sur la surface des eaux libres et la transpiration biologique, essentiellement des végétaux.

Exurgence – Apparition à l'air libre, sous la forme de source, d'un écoulement souterrain.

Hauteur piézométrique – Hauteur mesurée à partir d'un plan de référence, de la colonne de liquide qui s'établit dans un tube installé en sol saturé, dont la partie inférieure est en communication avec un point de ce sol.

Infiltration – Transfert de l'eau à travers les couches superficielles du sol, lorsque celui-ci reçoit une averse ou s'il est exposé à une submersion.

Karst – Formes de relief développées dans des roches solubles (calcaire, dolomie, gypse, etc.) par dissolution, précipitation et érosion.

Lit majeur – Partie d'une vallée occupée lors des crues. La limite externe du lit majeur correspond au niveau de la plus grande crue historique enregistrée. *Synonyme* : Lit d'inondation.

Lit Mineur – Chenal le plus bas au sein d'une vallée contenant l'écoulement permanent des eaux d'un cours d'eau.

Percolation – Passage lent d'un liquide se glissant à travers les interstices du sol sous l'effet de la gravité.

Résurgence – Réapparition à l'air libre d'une rivière souterraine.

Ruissellement – Frange d'eau qui, après une averse, s'écoule plus ou moins librement à la surface du sol. *Synonyme* : écoulement de surface.

Ripisylve – Bordure boisée d'un cours d'eau.