



**Geo<sup>3</sup>-Hydrogéologie - Département ArGENCo**  
(Architecture, Géologie, Environnement & Constructions)  
Université de Liège



**Département de**



**Département de Géologie**  
Facultés Universitaires Notre-Dame de la Paix à Namur



**POLYTECH.MONS**



**Cellule d'Hydrogéologie - Département GFA**  
(Géologie Fondamentale et Appliquée)  
Faculté Polytechnique de Mons

### **Convention RW et SPGE – AQUAPOLE**

### **Caractérisation hydrogéologique et support à la mise en œuvre de la Directive Européenne 2000/60 sur les masses d'eau souterraine en Région Wallonne**

Délivrable D6.0

Note méthodologique relative à la modélisation hydrogéologique des masses d'eau souterraine RWM 011, RWM 012 et RWM 021 (aspects quantitatifs et qualitatifs)

**Auteurs** : G.Lorenzini, S.Brouyère, P.Orban, A.Dassargues

## TABLE DES MATIERES

<b><u>INTRODUCTION.....</u></b>	<b><u>4</u></b>
<b><u>1 DESCRIPTION DE L'APPROCHE REGIONALE DE MODELISATION DES EAUX SOUTERRAINES .....</u></b>	<b><u>5</u></b>
<b>1.1 LA PROBLEMATIQUE REGIONALE ET SES SPECIFICITES .....</b>	<b>5</b>
1.1.1 COMPLEXITE DES SYSTEMES GEOLOGIQUES ET HYDROGEOLOGIQUES ET HETEROGENEITE DU DEGRE DE CARACTERISATION .....	5
1.1.2 GESTION DES DONNEES SPATIALES ET NON SPATIALES .....	6
1.1.3 TEMPS CPU ET RAM POTENTIELLEMENT NECESSAIRES .....	7
<b>1.2 L'APPROCHE DE MODELISATION REGIONALE ET SES SPECIFICITES.....</b>	<b>7</b>
1.2.1 DECOUPAGE DU MODELE EN SOUS-DOMAINES ET INTERFACES .....	7
1.2.2 MODELES MATHEMATiques ET NUMERIQUES .....	9
1.2.2.1 Modèle conceptuel interfacé par Système d'Information Géographique .....	9
1.2.2.2 Modèles mathématiques par sous-domaines.....	10
1.2.2.3 Conditions limites internes et externes .....	11
1.2.3 GESTION DES DONNEES ET OUTILS DE MODELISATION .....	13
<b><u>2 OBJECTIFS DE LA MODELISATION DANS LE CADRE DU PROJET SYNCLIN'EAU.....</u></b>	<b><u>16</u></b>
<b>2.1 INTRODUCTION.....</b>	<b>16</b>
2.1.1 ATTENTES DE LA DGRNE – DESO VIS-A-VIS DE LA MODELISATION .....	16
2.1.2 POSSIBILITES ET LIMITES DE LA MODELISATION REGIONALE .....	17
<b><u>3 DESCRIPTIF DES TRAVAUX DE MODELISATION.....</u></b>	<b><u>19</u></b>
<b>3.1 INTRODUCTION.....</b>	<b>19</b>
<b>3.2 MODELE CONCEPTUEL.....</b>	<b>19</b>
3.2.1 DECOUPAGE EN SOUS-DOMAINES .....	19
3.2.2 CONDITIONS LIMITES EXTERNES ET INTERNES .....	20
3.2.3 SOLLICITATIONS .....	21
3.2.4 DISCRETISATION SPATIALE.....	21
<b>3.3 CALIBRATION – VALIDATION DU MODELE .....</b>	<b>22</b>
3.3.1 ECOULEMENTS .....	22
3.3.2 TRANSPORT.....	23
<b>3.4 DEFINITIONS ET TESTS DE SCENARIII AVEC LES MODELES CALIBRES .....</b>	<b>23</b>

3.5 PERSPECTIVES D'INTEGRATION ET DE PERENNISATION DES MODELES ..... 24

ANNEXE..... 25

## **Introduction**

Le projet Synclin'EAU porte principalement sur l'étude et la caractérisation hydrogéologique détaillée de différentes masses d'eau souterraine RWM-011, -012 et -021 en Région Wallonne, dans le cadre de la mise en œuvre de la Directive Cadre Européenne 2000/60 (DCE) et la Directive Fille Eau Souterraine (DFES). Les informations et nouvelles connaissances récoltées dans le cadre du projet offrent la possibilité de tester, valider et valoriser, pour la première fois de manière effective, l'approche de modélisation régionale « eau souterraine » développée par l'ULG – Hydrogéologie dans le cadre du projet PIRENE d'abord, et d'autres projets ensuite (AquaTerra, ISSEP...). Il restait cependant à mieux définir les attentes et besoins potentiels de la Région Wallonne vis-à-vis de ce qu'un outil de modélisation peut apporter en support à la mise en œuvre de la DCE.

Ce livrable constitue une note méthodologique dont l'objectif est triple:

1. clarifier les attentes potentielles de la RW du point de vue modélisation quantitative et qualitative ESO (Eaux Souterraines) dans le contexte DCE ;
2. au vu de ces attentes et besoins, préciser les possibilités, limites et résultats attendus à court, moyen et long termes, par application des outils de simulation numérique ;
3. décrire de manière plus précise le mode opératoire et le planning de la tâche de modélisation dans le cadre du projet.

La note méthodologique est organisée comme suit. Le premier chapitre fournit une description de l'approche régionale de modélisation des eaux souterraines, telle qu'elle a été développée par l'équipe d'Hydrogéologie de l'Université de Liège. Le deuxième chapitre décrit les objectifs de ces travaux de modélisation en partant des attentes potentielles exprimées par la Région wallonne. Le troisième chapitre propose une description plus précise du contenu et du planning des travaux de modélisation.

Ce livrable n'était pas prévu au planning initial de la convention Synclin'EAU. Sa rédaction a été proposée par l'équipe ULg-Hydrogéologie suite aux discussions menées lors du comité d'accompagnement du projet en août 2007, en vue de clarifier les objectifs du WorkPackage 6.

# **1 Description de l'approche régionale de modélisation des eaux souterraines**

## **1.1 La problématique régionale et ses spécificités**

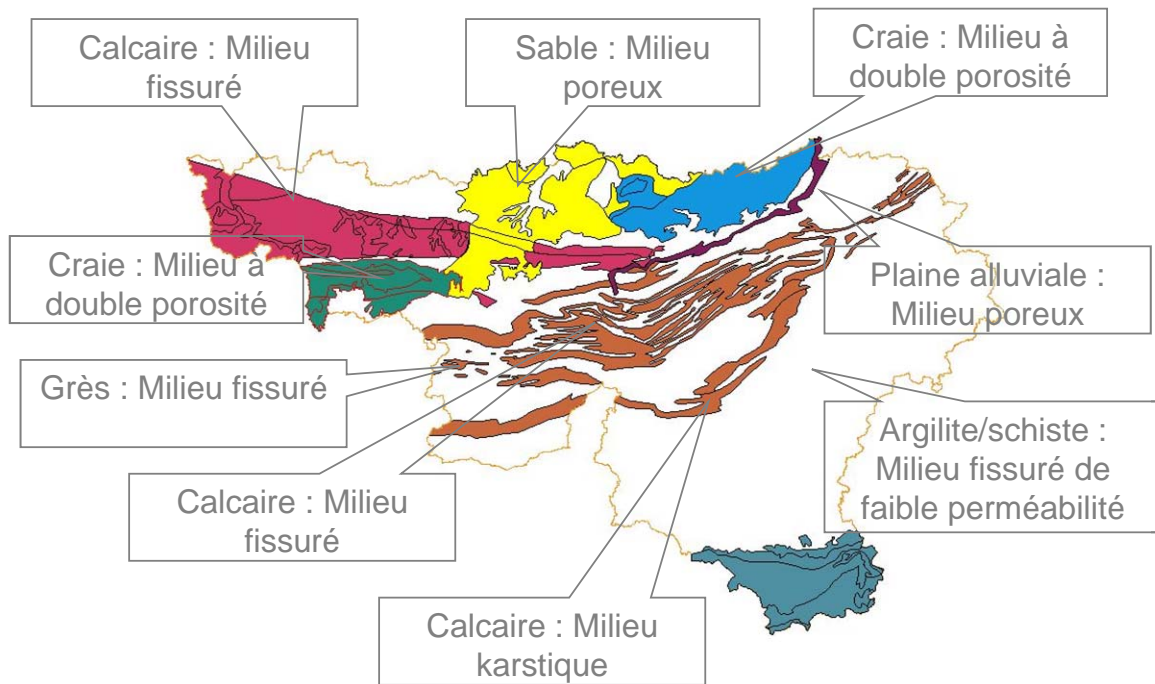
Pour fournir des résultats à la fois corrects et suffisamment détaillés, les approches de modélisation traditionnellement utilisées en hydrogéologie requièrent des discrétisations spatiales suffisamment fines pour pouvoir reproduire la variabilité des propriétés du milieu souterrain. Cette représentation numérique détaillée est également requise pour respecter certains critères de précision et de stabilité des calculs numériques. Dans le cas d'une modélisation régionale, une série de problèmes spécifiquement liés à l'échelle de travail se posent. Ils sont brièvement exposés et discutés ci-dessous.

### *1.1.1 Complexité des systèmes géologiques et hydrogéologiques et hétérogénéité du degré de caractérisation*

Lorsqu'on entreprend une modélisation à l'échelle régionale, c'est-à-dire ici l'échelle de la masse d'eau souterraine, la zone à modéliser est souvent caractérisée par une grande variété de contextes géologiques et hydrogéologiques, allant d'aquifères granulaires (par exemple les sables bruxelliens, les dépôts alluviaux de la Meuse, ...) aux bassins karstiques (calcaires éodévoniens, ...) en passant par des aquifères de fissures (calcaires, grès, ...) (Figure 1-1). Dans cet ensemble, il est fréquent que certaines entités géologiques soient nettement moins bien caractérisées que d'autres. Par exemple, on dispose généralement de peu d'information concernant les bandes schisteuses et argileuses car elles sont moins intéressantes d'un point de vue hydrogéologique. De même, et pour d'autres raisons, notamment la forte hétérogénéité géologique de ces systèmes, une caractérisation hydrodynamique précise des calcaires affectés de phénomènes karstiques est généralement difficile à réaliser.

Enfin, des difficultés subsistent pour décrire les processus de transport à l'échelle régionale, tant au niveau de l'acquisition de données, qu'au niveau des concepts mathématiques et numériques à considérer pour résoudre ces problèmes. Il est donc difficile de définir et d'utiliser une approche conceptuelle, mathématique et numérique unique pour tous ces contextes différents. Une approche flexible est donc préférable pour la modélisation.

# Variabilité des contextes géologiques



**Figure 1-1 : variété des contextes géologiques et hydrogéologiques en Région Wallonne**

## 1.1.2 Gestion des données spatiales et non spatiales

La réalisation de modèles hydrogéologiques nécessite l'acquisition d'un grand nombre de données, spatialement distribuées ou non. Il s'agit aussi bien de données d'entrée du modèle (géologie, topographie, réseau rivières...), que des données relatives aux sollicitations (pluie/recharge de la nappe, prélèvements d'eau souterraine effectués...), des mesures et observations utilisées pour calibrer et valider le modèle (hauteurs piézométriques, concentrations...), voire des données relatives aux propriétés hydrodynamiques et hydrodispersives du milieu souterrain (conductivités hydrauliques...). Toutes ces données acquises et collectées se trouvent sous divers formats, allant du document papier au fichier électronique, et elles sont souvent détenues par différents organismes. Il est donc nécessaire d'acquérir des outils adaptés à cette échelle de travail (banque de données, SIG, modules de transfert de données). Il est en particulier nécessaire de disposer d'outils efficaces pour la manipulation des données en vue de leur incorporation dans le modèle. Enfin, la méthodologie de développement du modèle doit avoir une flexibilité suffisante pour pouvoir faire des mises à jour quand des nouvelles données et informations sont disponibles.

### 1.1.3 Temps CPU et RAM potentiellement nécessaires

La résolution des équations mathématiques utilisées traditionnellement pour la modélisation des eaux souterraines (équation d'écoulement et équation d'advection-dispersion) peut conduire à de longs temps de calcul (plusieurs heures à plusieurs jours) et requérir un important espace mémoire (jusqu'au Gb sans doute) sur ordinateur. En particulier, la résolution de l'équation de transport de soluté par advection-dispersion nécessite d'utiliser des maillages fins et des pas de temps courts afin non seulement de caractériser avec le détail requis l'hétérogénéité du système mais aussi et surtout afin d'éviter les problèmes d'instabilité et de dispersion numérique (par construction, les résolutions spatiales et temporelles sont liées).

## 1.2 L'approche de modélisation régionale et ses spécificités

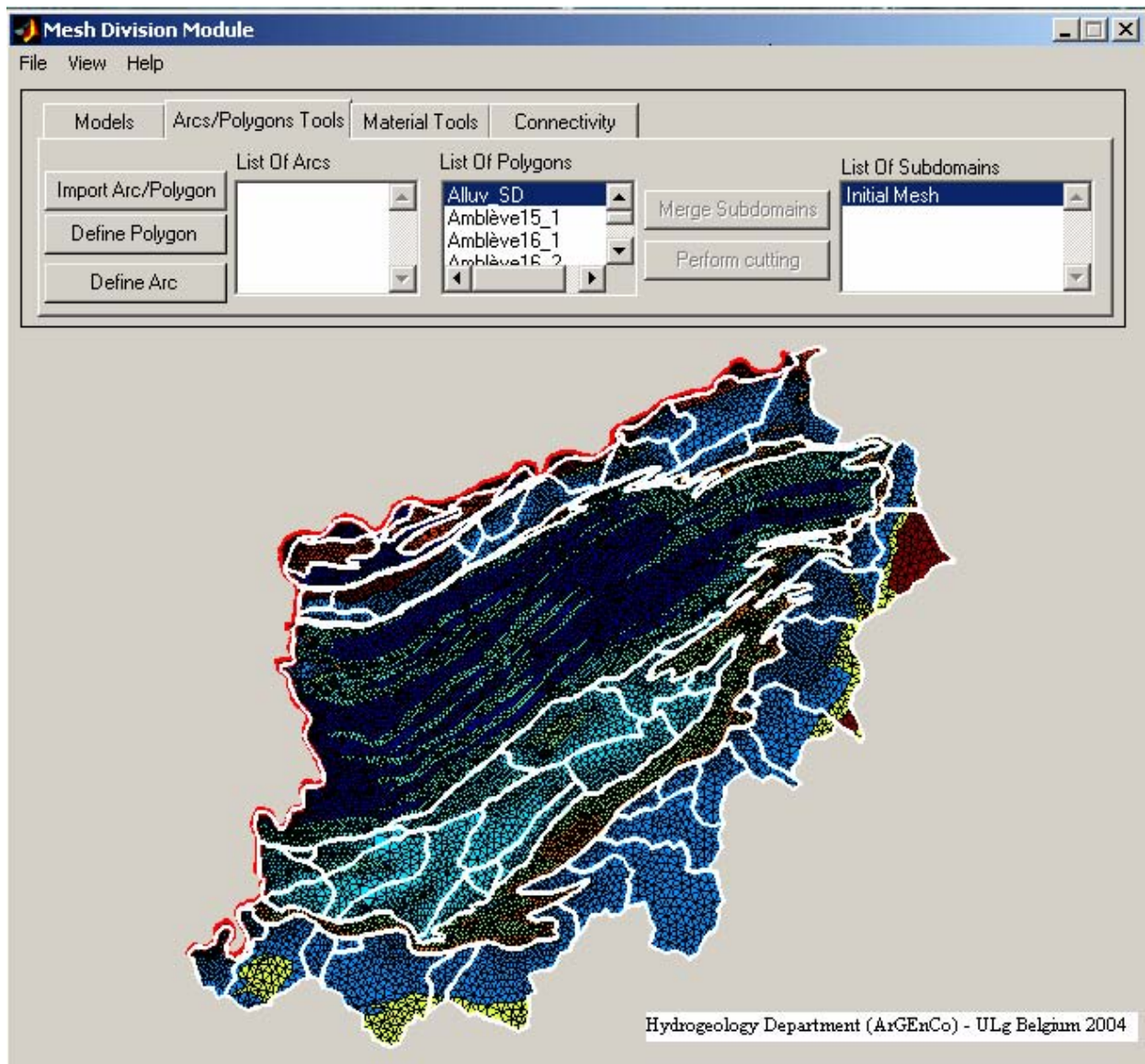
Partant des constats énoncés au Chapitre 1.1, l'équipe ULg-Hydrogéologie a développé, principalement dans le cadre des projets PIRENE et AquaTerra, une méthodologie et des outils pour réaliser cette modélisation régionale. Cette méthodologie permet en particulier de s'adapter à la variabilité des données disponibles, au degré de caractérisation et aux conditions hydrogéologiques. Des formalismes mathématiques de complexité variable ont été sélectionnés et programmés pour représenter les écoulements et le transport de solutés en milieu souterrain. L'approche permet en outre de passer d'une approche simplifiée à une approche plus complexe si de nouvelles informations deviennent disponibles (nouvelles études, extension du monitoring, ...). Cette approche a été implémentée au sein du code de calcul éléments finis SUFT3D.

### 1.2.1 Découpage du modèle en sous-domaines et interfaces

La première étape de l'approche développée consiste à découper la zone à modéliser (ici chaque masse d'eau) en sous-domaines représentant des unités hydrogéologiques séparées, soit parce qu'elles sont indépendantes d'un point de vue hydrogéologique, soit parce que leur « niveau de caractérisation » diffère. Aux contacts entre sous-domaines, des « interfaces » sont définies et permettent de simuler, sous la forme de conditions limites « internes », les échanges d'eau entre ces sous-domaines et d'établir des bilans par sous-domaine. Les interfaces entre sous-domaines sont également utilisées pour tenir compte implicitement de formations peu épaisses et peu perméables (ex : schistes du Pont d'Arcole), de manière à limiter le nombre d'inconnues et d'éviter la présence d'éléments géométriquement distordus au sein du maillage.

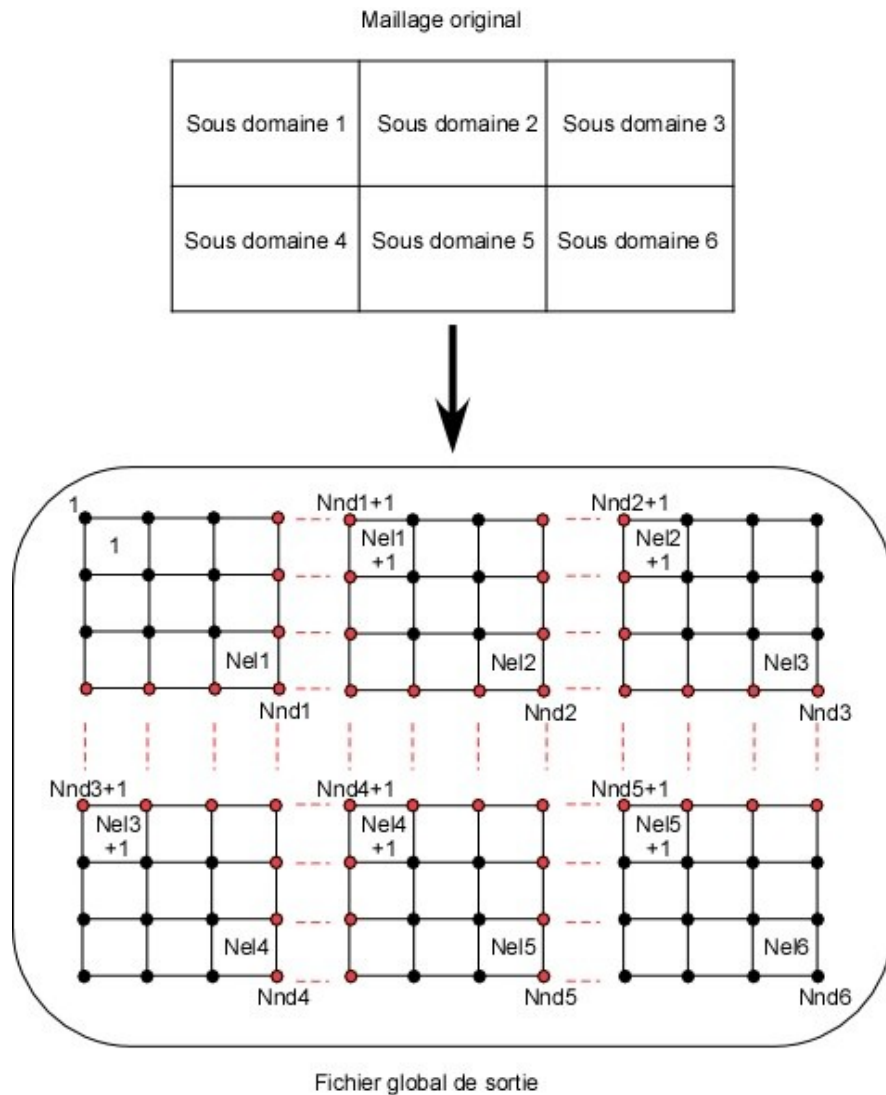
Le découpage en sous-domaines (Figure 1-2) a demandé le développement d'outils spécifiques d'interfaçage pour le code SUFT3D, permettant, sur base de critères simples, de

scinder un maillage original en différents sous-domaines et d'adapter la numérotation des nœuds qui sont dédoublés au niveau des interfaces (Figure 1-3).



**Figure 1-2 : Découpage en sous-domaines pour le modèle « Synclinorium de Dinant rive droite » lors du projet PIRENE**





**Figure 1-3 : Renumérotation du maillage global au sein de chaque sous-domaine**

## 1.2.2 Modèles mathématiques et numériques

### 1.2.2.1 Modèle conceptuel interfacé par Système d'Information Géographique

Comme mentionné précédemment, l'approche de modélisation doit être suffisamment souple pour pouvoir intégrer de nouvelles données et informations disponibles ultérieurement. L'ensemble des informations doivent être organisées en un modèle conceptuel souple, par Système d'Information Géographique (SIG). Ce modèle conceptuel doit être établi indépendamment de l'approche numérique considérée, du degré de discrétisation,.... Cela permet de ne pas refaire tout le travail si, ultérieurement, on veut changer de discrétisation ou d'approche numérique. Pour cela, la PGDB (Personal GeoDataBase) du projet Synclin'EAU constitue un excellent outil de gestion des données, auquel s'ajoutent les outils spécifiques de GMS (Groundwater Modeling System®) et l'interface graphique utilisée pour la génération du maillage et de tous les éléments associés.

### 1.2.2.2 *Modèles mathématiques par sous-domaines*

La flexibilité du code SUFT3D a été améliorée en permettant d'utiliser une résolution des équations d'écoulement et de transport plus ou moins raffinée, en fonction du degré de caractérisation et du contexte hydrogéologique au sein de chaque sous-domaine. Les différents modèles mathématiques retenus pour ces calculs sont présentés au Tableau 1.1. La description détaillée de ces différents modèles et des équations et paramètres qui leur sont associés est fournie dans le rapport final PIRENE de l'équipe ULg-Hydrogéologie de décembre 2004.

**Tableau 1.1 : Modèles mathématiques retenus en vue de la construction du modèle régional par masse d'eau**

		TRANSPORT		
		<i>Réservoir linéaire simple</i>	<i>Modèle de mixage distribué</i>	<i>Advection-dispersion</i>
ÉCOULEMENT	<i>Réservoir linéaire simple</i>	OK	Impossible	Impossible
	<i>Réservoir linéaire distribué</i>	OK	OK	Impossible
	<i>Écoulement en milieu poreux</i>	OK	OK	OK

Le modèle basé sur le « réservoir linéaire » suppose que les caractéristiques à la sortie du système aquifère sont liées linéairement au comportement moyen du réservoir, lequel est constitué d'une seule entité : le volume de mélange ou de mixage.

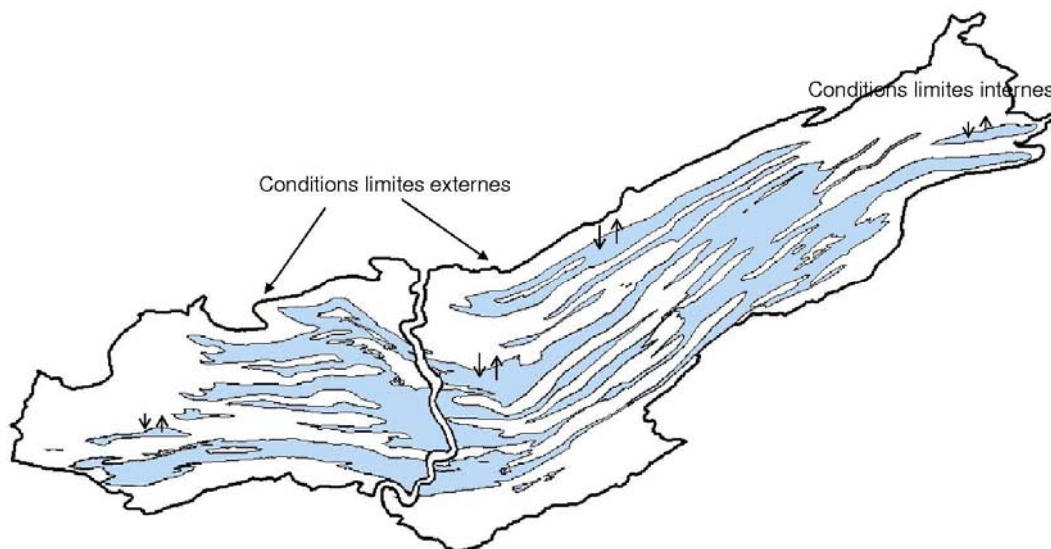
Dans la continuité entre le modèle réservoir linéaire simple et le modèle d'écoulement en milieu poreux hétérogène, le modèle réservoir linéaire distribué a également été retenu. Cette continuité garantit que, si des données ultérieures viennent compléter et améliorer la connaissance relative aux bassins provisoirement représentés de manière linéaire et simplifiée, sans toutefois être suffisamment détaillées pour permettre l'utilisation d'un modèle complet d'écoulement et de transport, on puisse sans problème passer à un mode de résolution plus précis, en l'occurrence celui du réservoir distribué.

Il faut remarquer que l'utilisation d'un modèle « simplifié » pour le calcul des écoulements entraîne de facto l'utilisation d'un modèle de transport de complexité inférieure ou égale à celle du modèle d'écoulement. Par exemple, si on emploie le modèle de réservoir linéaire simple pour représenter un bassin karstique, il n'est pas possible de calculer le transport en utilisant l'équation

d'advection-dispersion. En effet, la résolution simplifiée de l'écoulement ne fournit qu'un flux global à travers le réservoir ; il ne donne donc aucune information sur la distribution spatiale des flux d'eau à l'intérieur de ce sous-domaine. A contrario, si les données disponibles pour un bassin permettent un calcul relativement détaillé des écoulements mais pas du transport, on pourra imaginer d'appliquer l'équation d'écoulement en milieu poreux et de coupler à cela un modèle de réservoir linéaire pour le transport en retenant de l'écoulement le bilan en eau, c'est-à-dire l'évolution au cours du temps du volume d'eau présent au sein du sous-domaine et les flux calculés à travers ses frontières.

### 1.2.2.3 *Conditions limites internes et externes*

Les conditions limites dites « externes » sont celles appliquées aux frontières des masses d'eau et celles dites « internes » sont appliquées aux interfaces entre les sous-domaines (Figure 1-4). Chaque sous-domaine est susceptible d'échanger de l'eau et des solutés avec les sous-domaines voisins auxquels il est hydrauliquement connecté et avec les autres compartiments du cycle de l'eau (recharge pluviométrique, échanges avec les rivières, alimentation des sources, ...).



**Figure 1-4. Localisation des conditions limites dites « externes » et « internes » sur un exemple simplifié.**

De manière générale, les conditions limites externes sont de trois types :

- Les conditions de Dirichlet ou conditions de 1<sup>er</sup> type : La variable d'état (hauteur d'eau ou concentration) est imposée sur une portion de la frontière externe du modèle.

- Les conditions de Neumann ou conditions de 2<sup>ème</sup> type : La dérivée spatiale de la variable d'état (flux d'eau ou flux massique) est imposée sur une portion de la frontière externe du modèle.
- Les conditions de Fourier ou conditions mixtes ou conditions de 3<sup>ème</sup> type : une relation entre la variable d'état et sa dérivée (en l'occurrence généralement une relation linéaire) est imposée sur une portion de la frontière externe du modèle.

Les conditions limites « internes » sont définies au niveau des interfaces entre sous-domaines ; elles sont également de trois types :

- Les conditions de Dirichlet ou conditions de 1<sup>er</sup> type « dynamiques » : Le couplage des sous-domaines le long d'une telle frontière suppose une continuité (égalité) de hauteur piézométrique de part et d'autre de l'interface. Ce type de condition limite est qualifié de « dynamique » parce que, bien qu'on impose sa continuité de part et d'autre de l'interface, la charge hydraulique calculée peut varier au cours du temps et demeure une inconnue du problème (en quelque sorte, les deux sous domaines sont « recollés »). Une telle condition limite permet notamment de définir des limites « arbitraires » entre des bassins pour lesquels on souhaite calculer aisément des flux importés ou exportés (ex : échanges d'eau entre deux synclinaux calcaires connectés de type Hoyoux-Néblon ou entre deux bassins hydrogéologiques pouvant interagir hydrauliquement, de type Hoyoux – Samson).
- Les conditions de Neumann ou conditions de 2<sup>ème</sup> type imperméables: La portion d'interface entre les deux sous-domaines est supposée imperméable et aucun échange d'eau n'est calculé. La dérivée de la hauteur piézométrique, normale à la frontière, est donc nulle.
- Les conditions de Fourier ou conditions mixtes ou conditions de 3<sup>ème</sup> type « dynamiques » : le flux d'eau calculé au travers de l'interface entre les deux sous-domaines est fonction de la différence de charge hydraulique régnant de part et d'autre de cet interface, le couplage étant mathématiquement représenté par une équation de transfert de premier ordre. Une fois encore, cette condition limite est qualifiée de « dynamique » parce que même si une relation est imposée entre la différence de charge et le flux échangé, les charges hydrauliques restent à nouveau susceptibles de varier de manière concomitante au cours du temps.

### 1.2.3 Gestion des données et outils de modélisation

Dans le cadre du projet Synclin'EAU, l'utilisation conjointe de la banque de données hydrogéologiques (BDHydro) et de la Personal GeoDatabase (PGDB) a été adoptée pour le traitement et la gestion des données (Figure 1-5). La BDHydro permet l'encodage progressif et de manière organisée des données disponibles, leur analyse et traitement, ainsi que l'utilisation de requêtes pour extraire les informations nécessaires au développement du modèle mathématique. La BDHydro permet donc avant tout d'organiser de manière optimale les données de types tabulaire et numérique (évolutions piézométriques, historiques des débits captés, logs géologiques, ...). La PGDB permet la gestion de données cartographiques (polygones, polygones, points,...) selon un schéma prédéfini permettant une édition et des interactions aisées. La PGDB sert à représenter et organiser les informations spatiales localisées dans la BDHydro (positionnement des ouvrages, ...) grâce aux liens créés entre les deux gestionnaires de bases de données. Les deux outils (PGDB et BDHydro) servent ensuite à préparer une série de couches d'informations exportées vers le logiciel Groundwater Modeling System® (GMS) qui est un logiciel de pré- et post- processing couramment utilisé en hydrogéologie.

L'importation de toutes les informations et données nécessaires au sein de GMS permet ensuite l'élaboration et la gestion du modèle conceptuel en vue de développer ultérieurement le modèle numérique d'écoulement – transport par masse d'eau, à l'aide du code SUFT3D. A ce stade du développement du modèle conceptuel, aucune discrétisation n'est encore établie et aucun choix n'est fait en termes de types d'équations ou de méthodes de résolution adoptés pour les calculs.

Une fois la discrétisation définie et les fichiers d'entrée du code de calcul construits, le maillage préparé en utilisant GMS est utilisé par les différentes interfaces du code SUFT3D, qui ont continué à être développées depuis le projet PIRENE. Ces interfaces spécifiques sont utilisées pour la préparation des fichiers d'entrée du modèle, pour le découpage du maillage en sous-domaines (Figure 1-2) et pour expliciter les interactions avec les eaux de surface (Figure 1-6). Ensuite, les simulations des écoulements et du transport des contaminants sont réalisées. Les fichiers de sortie des simulations réalisées avec le code SUFT3D étant adaptés aux formats de GMS, les résultats peuvent être examinés au sein de ce logiciel. Ceci permet d'évaluer, d'un essai à l'autre, la qualité de la calibration obtenue par comparaison avec les observations et mesures disponibles et de présenter les résultats finaux, voire d'exporter ces résultats en vue de les traiter à l'aide du SIG.

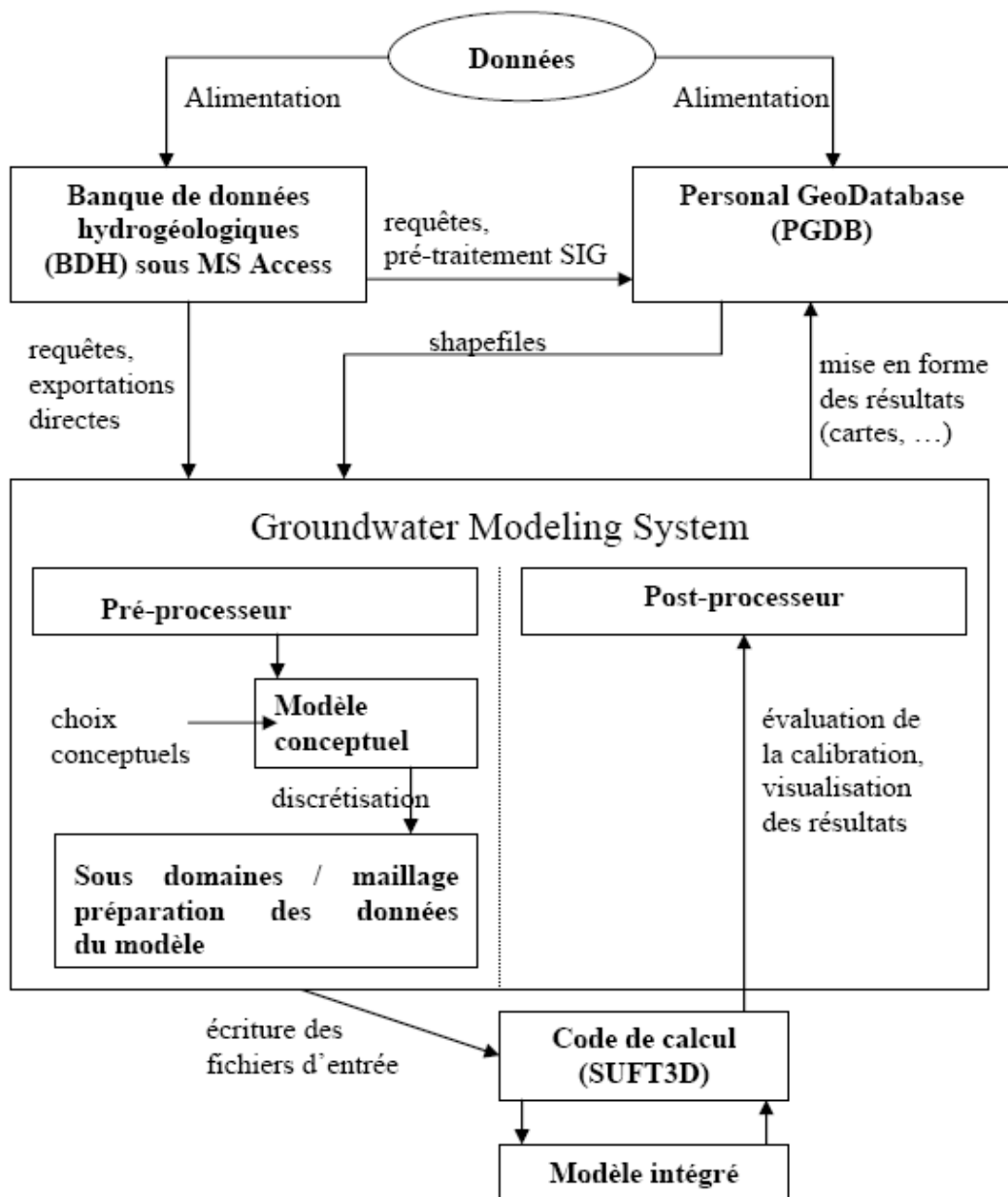


Figure 1-5 : Méthodologie générale développée en vue de la modélisation régionale de masses d'eau

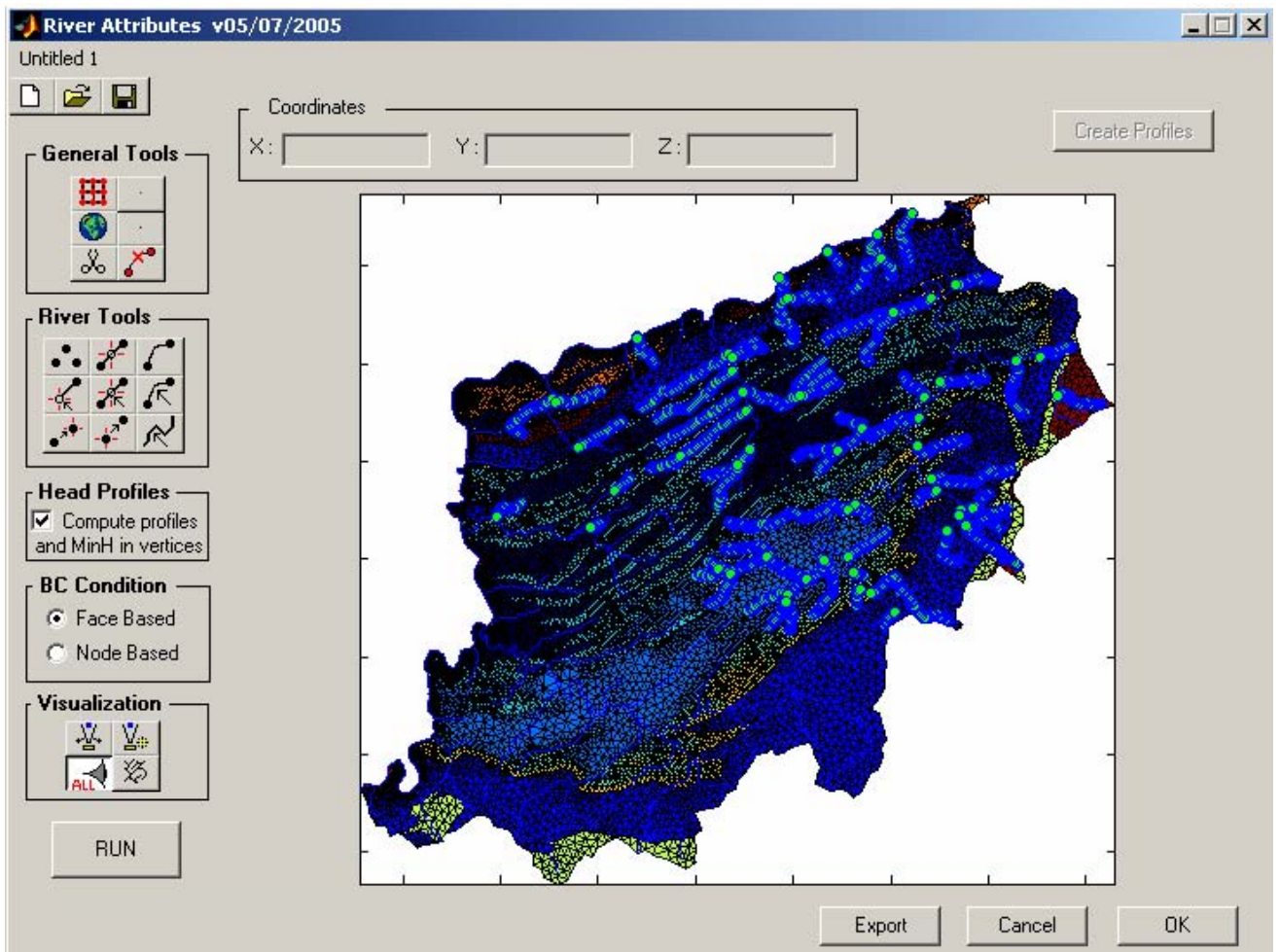


Figure 1-6 : Interaction des rivières avec les eaux souterraines pour le « Synclinorium de Dinant Droit » lors du projet PIRENE

## **2 Objectifs de la modélisation dans le cadre du projet Synclin'EAU**

### **2.1 Introduction**

L'objectif de ce chapitre est de clarifier les attentes potentielles (minimales et maximales) de la DGRNE – DESO (Directive des Eaux Souterraines) vis-à-vis de la modélisation prévue dans le cadre du projet Synclin'EAU et, sur cette base, de clarifier les objectifs et les limites envisagées pour ce même travail à court terme (i.e. objectifs à atteindre dans le cadre du projet proprement dit), à moyen et long terme (i.e. objectifs envisageables mais non contraignants) et ce qui restera en dehors du domaine d'application et d'utilisation de l'outil de modélisation.

Cette analyse repose sur une réunion tenue à la DGRNE le 2 octobre 2007, à laquelle ont participé des représentants de l'ULg – Hydrogéologie et la DGRNE – DESO.

#### *2.1.1 Attentes de la DGRNE – DESO vis-à-vis de la modélisation*

La Directive Cadre Européenne 2000/60 (DCE) impose aux Etats Membres d'atteindre à l'horizon 2015 un bon état quantitatif et qualitatif des eaux et de gérer ces eaux de manière intégrée à l'échelle des masses d'eau.

D'un point de vue quantitatif, les directives imposent que les niveaux des nappes garantissent certaines fonctions : alimentation des eaux de surface, zones humides et écosystèmes associés,... Des indicateurs doivent être établis pour pouvoir suivre l'évolution au cours du temps de cet état quantitatif. Un indicateur peut « simplement » être construit sur le suivi temporel de la piézométrie mais il est vraisemblable qu'un indicateur reposant sur l'évolution des réserves serait plus fiable et représentatif de l'état global de la masse d'eau. Idéalement, le modèle doit donc permettre de calculer l'évolution pluriannuelle du bilan hydrogéologique et du débit de base et il doit être à même de tester des scénarii ayant un impact global sur la ressource en eau souterraine, par exemple l'impact d'un nouveau captage sur l'état de la ressource, d'une diminution de la recharge suite au changement climatique, etc. Il doit donc permettre de simuler la redistribution des flux et le changement de la piézométrie régionale suite aux éventuels changements des sollicitations (infiltration, pompages,...) à cette même échelle.

D'un point de vue qualitatif, la problématique majeure concerne l'estimation et l'évolution de la qualité des eaux souterraines au sein de chaque masse d'eau, en particulier la problématique critique des teneurs en nitrates dans les eaux souterraines. Pour être utile, le modèle doit donc pouvoir calculer l'évolution, au cours du temps et au droit de « fenêtres cibles » que sont des zones « protégées », par exemple les zones de prévention, l'état qualitatif (nitrates) de la ressource en eau souterraine et de prédire l'effet sur cet état qualitatif de scénarii au niveau des intrants d'origine



agricole (et autres) définis à l'échelle régionale. Des résultats ne sont pas spécifiquement attendus quant au calcul de la qualité du débit de base des eaux souterraines, cette problématique n'étant pas jugée pertinente à l'échelle régionale.

Enfin, l'outil de modélisation devrait pouvoir être intégré par la suite dans l'optique de gestion intégrée des ressources en eau, à des modules de calcul « sols » et « eaux de surface ».

### *2.1.2 Possibilités et limites de la modélisation régionale*

Au vu de cette analyse, l'échelle de travail requise pour la modélisation est celle de la masse d'eau et, à ce titre, l'approche développée (cf. Chapitre 1.2) est pertinente puisqu'elle cible cette échelle de travail.

Pour les aspects quantitatifs, la modélisation sera réalisée sur base des conditions hydrogéologiques régionales. Elle permettra de simuler des tendances du point de vue des bilans et de leur variabilité interannuelle, l'allure piézométrique régionale, les interactions avec les eaux de surface voire des masses d'eau voisines. Plus spécifiquement, les résultats des simulations d'écoulement devront permettre d'affiner le calcul de bilans régionaux et de l'évolution des réserves d'eau souterraine (notamment dans l'optique d'utiliser ces résultats comme indicateurs de tendance d'un point de vue quantitatif) ainsi que mieux quantifier les flux échangés entre les eaux souterraines et les eaux de surface. Ceci inclut la possibilité d'évaluer l'impact sur la piézométrie régionale, la distribution des flux dans le bassin et donc sur les différents termes du bilan hydrogéologique de changements au niveau de la recharge pluviométrique, de l'augmentation des débits captés ou de l'exhaure des carrières..., sur base de scénarii définis de commun accord avec la DGRNE-DESO.

Pour les aspects qualitatifs, des calculs de tendances régionales à l'échelle des masses d'eau et sous masses d'eau souterraine pourront être réalisés pour les nitrates, à l'échelle pour laquelle il existe des données et des scénarii de lessivage vers les nappes (ex : approche EPIC-GRID). En particulier, des scénarii seront envisagés en terme de prévision des évolutions de concentrations afin de simuler l'efficacité de mesures agro-environnementales sur les inversions de tendances pour la qualité des eaux souterraines.

Des applications plus « locales » ne seront pas envisagées dans le cadre de ce projet, la modélisation restant régionale et n'ayant pas à ce stade pour vocation de contribuer à l'interprétation d'essais de pompage et de traçage au voisinage d'un captage ou la simulation de scénarii de pollution accidentelle en un point bien précis du bassin. Hors projet, il sera toutefois envisageable à moyen terme de développer, dans le code SUFT3D, la possibilité de raffiner

localement le maillage (au sein d'un sous-domaine) afin de réaliser des simulations plus locales. En particulier, la simulation autonome d'une masse d'eau et/ou d'un sous-domaine pourra être envisagée en utilisant pour la définition des conditions limites, des résultats fournis par le modèle régional, les conditions limites internes définies au niveau des interfaces étant alors « transformées » en conditions limites externes.

### **3 Descriptif des travaux de modélisation**

#### **3.1 Introduction**

Le planning global de la modélisation reste conforme à celui qui avait été annoncé dans le descriptif initial du projet. Cependant, dans un souci de clarté et de transparence, un timing plus détaillé est proposé à titre indicatif et non contraignant (cf. Tableau en annexe).

Comme prévu initialement, des livrables seront rédigés sous forme de rapport pour :

- la description du modèle conceptuel et la discrétisation des trois masses d'eau (RWM011, 012 et 021) concernées par les activités du WP6 (Délivrable D61, prévu au mois 36) ;
- pour la description des travaux de calibration et validation du modèle et des tests (Délivrable D62, prévu au mois 48).

Par ailleurs, il est également prévu que les modèles développés soient fournis à l'Unité de Modélisation de l'Aquapôle au mois 48 (Délivrable D63) en vue d'une intégration dans la structure du modèle intégré « MOIRA » issu du projet PIRENE, les adaptations spécifiquement nécessaires pour cette intégration (procédures informatiques d'échanges entre modèle, tests ...) n'étant toutefois pas du ressort de cette convention.

Le travail sera réalisé en parallèle sur les 3 masses d'eau (RWM011, 012 et 021), en testant en premier lieu les différentes hypothèses de travail sur la RWM021, qui est la plus étendue et qui présente quasi l'ensemble des unités hydrogéologiques et des problématiques définies pour les 3 masses d'eau (contextes géologiques et hydrogéologiques, types d'interactions avec les eaux de surface...).

#### **3.2 Modèle conceptuel**

##### *3.2.1 Découpage en sous-domaines*

L'échelle utilisée pour le modèle est la masse d'eau souterraine. Un modèle conceptuel sera donc établi par masse d'eau. Les différents modèles conceptuels seront ensuite découpés en sous-domaines, tenant compte de la géologie, plus précisément des unités hydrogéologiques (aquifère-aquitard-aquiclude) définies d'un point de vue cartographique au sein de la PGDB du projet, des

crêtes hydrogéologiques et du degré de caractérisation de la zone d'étude<sup>1</sup>. Par exemple, des synclinaux calcaires bien délimités seront définis comme un sous-domaine, les schistes du Pont d'Arcole seront considérés comme une interface car il s'agit d'une formation peu épaisse et peu perméable, la Meuse ne constituera plus une frontière « imperméable » entre les différents aquifères, une continuité de ces aquifères sera envisagée,....

### 3.2.2 Conditions limites externes et internes

Les conditions limites externes appliquées à chaque masse d'eau servent à prendre en compte ses échanges avec son « environnement ». Il s'agit principalement des interactions avec les autres compartiments du cycle hydrologique : la recharge pluviométrique des nappes (flux entrant) et les échanges avec les eaux de surface (échanges bilatéraux). Ces échanges seront intégrés comme suit :

- Recharge pluviométrique : condition de flux imposé (Neumann) sur la surface supérieure du modèle eau souterraine ; les valeurs de recharges considérées seront dans un premier temps celles calculées à partir des bilans hydrogéologiques réalisés dans la cadre du projet, mais les estimations plus élaborées obtenues avec le code EPIC-GRID à la base de la zone racinaire (Recharge nappe = Pluie – ETR – Ruissellement -Hypodermique) pourront également être utilisées<sup>2</sup> si elles sont mises à disposition, en particulier pour les simulations d'écoulement en régime transitoire et dans la perspective de l'utilisation des flux de nitrates également calculés avec EPIC-GRID (cf. suite).
- Echanges avec les eaux de surface : conditions de Fourier bidirectionnelles pour les échanges avec les cours d'eau, conditions de Fourier unidirectionnelles (drainage) pour les sources et émergences (concept à développer dans le SUFT3D sur base d'une extension de la condition limite de Fourier). Pour le calcul de ces échanges, le niveau de référence des rivières sera supposé constant (niveau du bief moyen).

---

<sup>1</sup> Il est toutefois à noter que dans le présent contexte, l'utilisation d'approches simplifiées sera fortement réduite puisqu'on part du principe qu'au terme des 3 premières années du projet Synclin'EAU, les masses d'eau RWM011, 012 et 021 seront censées être bien caractérisées.

<sup>2</sup> L'exploitation de ces résultats vont toutefois requérir une calibration / validation intégrée et l'échange de données hydrogéologiques sur tout le domaine de couplage, sans toutefois présumer de la faisabilité (temps et moyens) de ces opérations malgré tout souhaitables.

Les conditions limites externes peuvent également servir à conceptualiser et prendre en compte des échanges entre la masse d'eau modélisée et les masses d'eau qui l'entourent. En effet, les limites « administratives » des masses d'eau ne sont pas et ne peuvent pas toujours correspondre avec des limites hydrogéologiques intangibles (contacts imperméables, crêtes hydrogéologiques « stables » au cours du temps...). Il peut donc s'avérer nécessaire de définir une condition limite pour assurer qu'une certaine quantité d'eau peut être échangée entre la masse d'eau modélisée et ses voisines (par défaut, les conditions limites « naturelles » sont imperméables). S'il est supposé qu'un flux d'eau souterraine transite à travers une portion de frontière de la masse d'eau, cet échange sera, dans la présente approche, considéré par la prescription d'une condition de Fourier, en ajustant le niveau de référence et le coefficient de transfert de la condition limite de manière à reproduire la piézométrie et l'estimation du flux échangé sur la portion de frontière. Dans certains cas, il pourra s'avérer pertinent de revoir la limite du modèle (extension ou réduction) de manière à la définir en conformité avec des conditions limites « plus naturelles ». Cela pourra consister en une extension du modèle conceptuel jusqu'à une formation imperméable ou une limite de bassin hydrologique ou hydrogéologique proche. Ces adaptations seront justifiées au cas par cas dans la description du modèle conceptuel (Délivrable D61) et feront l'objet d'une discussion avec la DGRNE-DESO sur l'opportunité de redéfinir certaines portions de limites administratives des masses d'eau sur base de ces critères objectifs.

### 3.2.3 *Sollicitations*

Le nombre de prises d'eau en Région wallonne est considérable (plusieurs milliers). Certaines n'exploitent que des volumes très réduits d'eau souterraine et très souvent, les volumes réellement exploités ne sont pas connus (on ne dispose souvent que d'une estimation sur base des autorisations de prélèvement). De manière similaire à ce qui avait été fait dans le cadre du projet PIRENE, seuls les captages prélevant les volumes les plus importants seront intégrés dans les bases de données d'entrée du modèle, en veillant à intégrer entre jusqu'à 95 voire 99% des volumes prélevés réels totaux. Au cas par cas, certains petits captages pourront toutefois être intégrés, directement ou ultérieurement, en fonction de besoins et résultats attendus de cette modélisation.

### 3.2.4 *Discrétisation spatiale*

Une fois le modèle conceptuel défini, une discrétisation sur base des unités hydrogéologiques, du découpage en sous-domaines et des limites de la masse d'eau sera réalisée sur base de la génération d'un maillage éléments finis composé de mailles de grandes tailles (de quelques dizaines de mètres à quelques centaines de mètres). Cette opération de discrétisation

permettra d'obtenir un maillage 2D qui sera élevé en maillage 3D, a priori monocouche<sup>3</sup> (choix à confirmer par la suite). Le sommet de ce maillage correspondra au MNT interpolé entre chaque nœud, auquel on pourra éventuellement retrancher une certaine épaisseur pour des simulations utilisant les résultats d'EPIC-GRID<sup>4</sup>. Le niveau de base du maillage sera variable, calculé en fonction notamment des hauteurs piézométriques et des épaisseurs des aquifères si elles sont connues ou peuvent être estimées.

Tenir compte explicitement de toutes les singularités telles que le tracé des rivières et l'emplacement de tous les points de captages risquerait de conduire à un maillage très dense, voire comportant un grand nombre d'irrégularités (mailles très petites au voisinage de mailles très grandes...). Pour éviter cela, le maillage sera généré indépendamment de ces éléments particuliers. Les captages seront pris en compte comme des termes sources « volumique » définis au sein des éléments finis qui correspondent à leur localisation spatiale et le réseau de rivières sera pris en compte via des conditions de Fourier surfaciques appliquées aux faces supérieures des éléments finis plutôt que des conditions de Fourier nodales, avec un coefficient d'échange qui intègre, maille par maille, la surface réelle d'échange entre la rivière et le milieu souterrain.

### 3.3 Calibration – Validation du modèle

#### 3.3.1 *Ecoulements*

Le modèle devant être capable de reproduire la tendance piézométrique régionale, l'évolution interannuelle des bilans et le débit de base vers les eaux de surface, la fonction objectif de la calibration devra être construite de manière à refléter au mieux ces 3 aspects. Une première calibration sera réalisée en régime permanent, sur base des hauteurs piézométriques moyennes (sur une période à définir en fonction des données disponibles) et des bilans hydrogéologiques moyens calculés sur une dizaine d'années (cf. bilans calculés dans le cadre du projet).

La calibration du modèle sera affinée en régime transitoire (amplitude des variations piézométriques, évolution des débits de base, ...) avant toute simulation avec les recharges calculées par le code EPIC-GRID.

---

<sup>3</sup> Ce choix devra être confirmé. Il est possible que certaines particularités géologiques et hydrogéologiques amènent localement à utiliser un modèle multicouche (ex : la masse d'eau RWM011 comporte une couverture meuble importante et contenant une nappe superficielle).

<sup>4</sup> Ces hypothèses de travail devront toutefois faire l'objet d'une concertation avec les équipes participant à la mise en œuvre du modèle intégré.

### 3.3.2 *Transport*

Pour le calcul du transport, l'approche « mixing cell » sera privilégiée parce qu'elle présente plusieurs avantages : elle ne demande pas de connaître ou de déterminer des coefficients de dispersion hydrodynamique dans le milieu souterrain et elle est numériquement parfaitement stable. Le processus de dispersion n'est en fait pas totalement ignoré mais remplacé par une hypothèse de mélange sur un certain « sous-volume » du milieu poreux (correspondant au volume de contrôle associé à chaque élément fini du maillage). De toute manière, la problématique étant essentiellement celle de la pollution diffuse par les nitrates à l'échelle régionale, la dispersion de la source de pollution prend largement le pas sur la dispersion hydrodynamique des polluants dans la nappe. Et si même il fallait par la suite revenir à une approche plus classique (i.e. advection – dispersion), par exemple pour étudier une problématique plus locale de qualité de l'eau souterraine, la modularité du code le permettra sans le moindre effort supplémentaire concernant le développement de l'application, pour autant que les données permettant cette adaptation soient disponibles.

En matière de modélisation du transport des nitrates au sein des masses d'eau souterraines considérées, les modèles seront calibrés de manière à reproduire au mieux l'augmentation progressive au cours du temps des concentrations en nitrates dans les eaux souterraines. Pour ces simulations, les flux de nitrates estimés avec le code EPIC-GRID pourront être utilisés, moyennant leur mise à disposition par la Région wallonne.

### 3.4 Définitions et tests de scenarii avec les modèles calibrés

Tant du point de vue quantitatif que qualitatif, des scenarii visant à illustrer les capacités de la modélisation et à valoriser cet outil dans la perspective de la Directive Européenne sur l'Eau, seront définis, en temps utiles et de commun accord avec la DGRNE-DESO. Ces scenarii porteront par exemple sur :

- la simulation de nouveaux scenarii d'exploitation des ressources en eau souterraine dans les masses d'eau concernées et l'analyse de leur impact d'un point de vue quantitatif sur ces ressources ;
- l'évaluation de l'impact de l'exhaure des carrières sur la ressource ;
- l'évaluation de l'efficacité de mesures agro-environnementales visant à inverser les tendances nitrates observées et l'estimation du temps nécessaire pour observer ces inversions.

### 3.5 Perspectives d'intégration et de pérennisation des modèles

La modélisation développée à l'échelle des masses d'eau dans le cadre du projet Synclin'EAU aura avant tout pour objectif de tourner en « stand-alone », c'est-à-dire de manière totalement découplée de tout autre module de calcul de type sol ou rivière, en intégrant les données relatives à ces autres composantes du cycle de l'eau via les conditions limites.

Toutefois, en temps utiles (a priori durant la dernière année du projet), une attention toute particulière sera dédiée à l'identification des besoins conceptuels, numériques et informatiques nécessaires en vue d'une intégration des modules eau souterraine dans une structure de modélisation hydrologique intégrée. Cela demandera un réexamen approfondi des concepts, de la structure et de la nature des échanges entre modules de calculs et une analyse des adaptations à apporter au code de calcul et aux applications sur les masses d'eau (essentiellement dans la conceptualisation des conditions limites) pour atteindre ces objectifs. Ces travaux se feront en étroite collaboration avec l'Unité de Modélisation de l'Aquapôle (ir. J.-F. Delière).

Une réflexion sera également menée au cours de la dernière année concernant les moyens de pérenniser et d'assurer la « maintenance » des modèles développés au terme du contrat dans l'optique de leur utilisation « en stand-alone » comme outils de gestion des masses d'eau souterraine, en priorité à l'attention de la DGRNE mais aussi des autres acteurs du domaine de l'eau (SPGE, Aquawal...).



**Annexe**

**Chronogramme des activités**

	Q3/2007	Q4/2007	Q1/2008	Q2/2008	Q3/2008	Q4/2008	Q1/2009	Q2/2009	Q3/2009	Q4/2009										
Modélisation (délais convention)	[Blue shaded cells]																			
<b><u>MODELE CONCEPTUEL ET DISCRETISATION</u></b>																				
Prise en main des données relatives au projet																				
Préparation des couches d'information géographique en vue de la modélisation																				
Découpage en sous-domaines																				
Définition des conditions limites																				
Discretisation																				
Définition de la fonction objectif (base pour juger comment sera calibré le modèle)																				

	Q3/2007			Q4/2007			Q1/2008			Q2/2008			Q3/2008			Q4/2008			Q1/2009			Q2/2009			Q3/2009			Q4/2009								
<b><u>CALIBRATION</u></b>																																				
Écoulement permanent sur base des bilans et piézométrie régionale																																				
Écoulement transitoire																																				
Ajustement de tendance pour le transport																																				
<b><u>SCENARI</u></b>																																				
<b><u>RAPPORTS</u></b>																			31/10/2008 (D61)									31/10/2009 (D62 et D63)								