



HAL
open science

Prise en compte de l'hétérogénéité des surfaces continentales dans la modélisation hydrologique distribuée. Exemple d'application avec des données du haut-bassin de la Saône

J. Dehotin

► **To cite this version:**

J. Dehotin. Prise en compte de l'hétérogénéité des surfaces continentales dans la modélisation hydrologique distribuée. Exemple d'application avec des données du haut-bassin de la Saône. Sciences de l'environnement. Doctorat "Océan, Atmosphère, Hydrologie", INP Grenoble, 2007. Français. NNT : . tel-02590033

HAL Id: tel-02590033

<https://hal.inrae.fr/tel-02590033v1>

Submitted on 15 May 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Remerciements

Cette thèse a été une fabuleuse aventure qui a duré trois années. Elle a été rendue possible et soutenue par des personnes que je tiens à remercier ici. En premier lieu, je tiens à exprimer ma gratitude à Isabelle BRAUD, directrice de thèse au Cemagref de Lyon qui a encadré ce travail. Sa confiance, sa patience, sa bonne humeur, son expérience et sa motivation à progresser ont contribué à la réussite de cette thèse. C'était très agréable et j'ai été très enchanté de travailler avec toi Isabelle.

Je voudrais remercier Jean-Michel GRESILLON, et Michel LANG qui ont été successivement chef de l'Unité de Recherche Hydrologie Hydraulique du Cemagref de Lyon pour m'avoir accueilli au sein de l'unité et pour l'intérêt qu'ils ont manifesté pour mes travaux de recherche. Merci à l'ensemble des membres de l'unité HH du Cemagref de Lyon (tous les thésards, stagiaires, les permanents et non-permanents) pour la très bonne ambiance quotidienne qui règne au sein de l'unité. Merci également aux membres du service de documentation pour leur aide, leur disponibilité et leur bonne humeur (particulièrement Anne-Laure et Aline).

Je voudrais remercier tout particulièrement Emmanuel LEDOUX, directeur de recherche à l'école des mines de Paris pour sa participation très constructive à mes travaux de recherche. Ses conseils et recommandations ont été d'une aide précieuse pour la réalisation du modèle de nappe. Je voudrais le remercier aussi pour avoir accepté de participer à mon jury de soutenance. Toute ma gratitude à Philippe ACKERER, directeur de recherche au CNRS, Christian PUECH, directeur de recherche au Cemagref de Montpellier, Jérôme MONNIER, maître de conférence à l'Institut National Polytechnique de Grenoble et Samuel DEBIONNE, ingénieur de la société Hydrowide pour avoir accepté de participer au jury de ma soutenance de thèse. Merci aussi à Pierre CURMI, Lionel BARGEOT, Jérôme GOURMELON de l'ENESAD-CNERTA (Dijon) pour les aides et les conseils sur l'utilisation des données sol du programme IGCS-Bourgogne et sur l'utilisation de Clapas. Merci également à Raul VAZQUEZ, pour son aide pour la modélisation des écoulements souterrains avec MODFLOW et MIKESHE. Merci encore à Pierre et Samuel de la société Hydrowide pour leurs précieuses aides sur la programmation en C++ et sur l'utilisation de la plate-forme LIQUID. Merci à Kirmane HASSANI, que j'ai encadré pour son stage de master II. Son travail m'a été très utile pour la conception du SIG.

Merci à toute ma famille à Cotonou au Bénin pour son soutien permanent. Grand merci également à ma belle-famille pour son soutien. Mention spéciale à Guillaume et Pascale qui se sont déplacés à Lyon pour ma soutenance. Enfin merci à Marie-Liesse qui a vécu avec moi, une fin de thèse particulièrement animée. Merci de m'avoir si bien soutenu.

Résumé

Les modèles hydrologiques spatialisés sont des outils qui permettent de prendre en compte l'hétérogénéité des surfaces continentales et des données d'entrée dans la modélisation. Compte tenu de la diversité des échelles caractéristiques des processus hydrologiques et de la grande hétérogénéité des surfaces continentales, nous avons cherché à nous orienter vers des modélisations flexibles, qui puissent être adaptées à la question posée. Pour prendre en compte les hétérogénéités de l'espace, nous avons proposé un découpage du bassin versant en 3 niveaux. Le premier niveau consiste en un découpage en sous-bassins (REWs) organisés autour du réseau hydrographique. Un second niveau de discrétisation, appelé hydro-paysages, a été préconisé pour la prise en compte de l'hétérogénéité spatiale au sein des REWs. Nous avons proposé un cadre méthodologique pour le découpage en hydro-paysages, afin de prendre en compte non seulement l'hétérogénéité du paysage au sein des sous-bassins. Cette méthodologie permet aussi d'assurer l'adéquation entre l'échelle des données disponibles, l'échelle pertinente pour les processus à représenter et l'échelle de représentation ou unités de modélisation. Le troisième niveau permet d'obtenir les mailles finales de la modélisation après redécoupage éventuel des hydro-paysages en fonction de contraintes numériques. Un exemple sur le Haut-bassin de la Saône permet d'illustrer l'ensemble de la démarche. Dans la deuxième partie de la thèse, nous avons présenté les outils utilisés pour réaliser des modélisations hydrologiques 'à la carte'. Pour cela nous nous sommes appuyés sur la plate-forme de modélisation LIQUID qui a servi de support à notre travail. Afin de prendre en compte dans la modélisation, les mailles non structurées issues du découpage spatial proposé, nous avons développé un module de simulation des transferts latéraux dans la zone saturée. Il résout l'équation de Boussinesq 2D sur un maillage irrégulier mais conforme. Différents tests ont été réalisés pour valider l'approche. Nous avons enfin abordé, sur quelques exemples simples, la problématique du couplage de différents modules en partant de ce module saturé et en étudiant le couplage avec les écoulements dans la rivière et la zone non saturée.

Mots clés : Modélisation hydrologique spatialisée, découpage spatial, plate-forme de modélisation, équations de Richards, équations de Boussinesq, échanges nappe-rivière, couplage.

Abstract

Distributed hydrological models allow to take into account the land surface and input heterogeneities in the modelling. Land surface heterogeneity and hydrological processes span a large amount of spatial and temporal scales. Therefore, we tried to promote flexible hydrological models, able to be adapted to each problem. To take into account land surface heterogeneity, we proposed to discretize a catchment into three nested levels. The first level uses sub-catchments organised around the river network. The second level, called hydro-landscapes, was proposed to take into account sub-catchment scale heterogeneity. The third level allows to further discretize hydro-landscapes to take into account numerical constraints. For the delineation of REWs into homogeneous zones, we proposed a methodology which takes into account landscape heterogeneity, data resolution and the functional scale of hydrological processes included into the modelling. The whole methodology was illustrated using data from the upper Saône catchment. In a second step, we tried to build models corresponding to the proposed principles. We used a hydrological modelling framework called LIQUID. We developed a module solving the Boussinesq equation for 2D transfer in the saturated zone. It was adapted to unstructured meshes. Several tests were conducted to validate the approach. Finally, we have tackled the coupling of different processes (water transfer within the unsaturated and saturated zones and the river) through very simple examples.

Key words: Distributed hydrological modelling, spatial discretization, modelling framework, Richards equations, Boussinesq equations, Groundwater and river exchanges, coupling.

Table des Matières

CHAPITRE I "Introduction Générale" _____ 1

PREMIERE PARTIE : synthèse bibliographique et proposition d'une méthode de découpage spatial des bassins versants

CHAPITRE II "Découpage spatial dans les modèles hydrologiques distribués et problèmes d'échelles" _____ 8

II.1. Quel est l'objectif de la modélisation hydrologique ? _____ 9

II.2. Quelles sont les variables de sortie et quelles sont leurs résolutions spatiales ? 10

II.3. De quelles données mesurées dispose-t-on et à quelle résolution spatiale ? __ 11

II.3.1. L'échelle des observations _____ 11

II.3.2. Vers une plus grande compatibilité entre échelle des observations et échelle de modélisation ? _____ 14

II.3.3. La particularité des données sur la pédologie _____ 15

II.3.4. Synthèse sur la résolution spatiale des observations _____ 17

II.4. Quels sont les processus hydrologiques actifs ou dominants sur un bassin versant, et quelles sont leurs échelles fonctionnelles? _____ 19

II.4.1. Les processus hydrologiques couramment modélisés _____ 19

II.4.2. Les processus hydrologiques et leurs échelles fonctionnelles _____ 20

II.5. Quelle méthode pertinente de représentation des processus hydrologiques, avec quelle finesse des mailles de modélisation? _____ 24

II.5.1. Quelles méthodes de représentation des processus ? _____ 25

II.5.2. Approches de découpage de l'espace utilisées dans les modèles hydrologiques existants _____ 27

II.6. Conséquences pour la définition des mailles de modélisation et la représentation des processus : proposition pratique. _____ 32

II.6.1. Quelle approche pour la discrétisation spatiale dans les modèles hydrologiques spatialisés ? _____ 32

II.6.2. Proposition pratique sur la structure des modèles hydrologiques spatialisés ____ 33

CHAPITRE III "Détermination des mailles de modélisation en hydrologie spatialisée: principes et méthodes utilisés pour le découpage spatial des bassins versants" _____ 36

III.1. Le premier niveau de discrétisation du bassin: le découpage en sous-bassins versants _____ 41

III.1.1. Découpage en REWS : rappel des principes de la méthode _____ 41

III.1.1.a) Détection et correction des zones de dépression du Modèle Numérique de Terrain _____ 42

III.1.1.b) Calcul de la pente et de la direction locale des écoulements _____ 43

III.1.1.c) Calcul des surfaces contributives par cellule _____ 44

III.1.1.d) Extraction du réseau de drainage _____ 44

III.1.1.e) Découpage en sous-bassins _____ 46

III.1.2. Intérêts et incertitudes de la méthode _____ 46

III.1.2.a)	Incertitudes liées à l'extraction du réseau hydrographique à partir d'un modèle numérique de terrain _____	47
III.1.2.b)	Incertitudes liées à la résolution spatiale des modèles numériques de terrain _____	48
III.1.3.	Le découpage en sous-bassins suffit-il pour modéliser les écoulements d'un bassin versant ? _____	50
III.2.	Le deuxième niveau de discrétisation du bassin versant : la discrétisation en zones homogènes ou en hydro-paysages. _____	51
III.2.1.	La notion d'hydro-paysage selon les échelles _____	52
III.2.2.	Principes de détermination des hydro-paysages par une méthode de classification paysagère _____	54
III.2.3.	Quels facteurs prendre en compte dans la définition des hydro-paysages ? _____	58
III.2.4.	Comment définir les zones de référence ? _____	60
III.2.5.	Comment faire la cartographie des zones homogènes ? _____	62
III.2.5.a)	Définition de la fenêtre de voisinage, caractérisation de chaque pixel de l'image des facteurs et caractérisation des zones de référence. _____	62
III.2.5.b)	Procédure de cartographie et résultats de la classification _____	64
III.2.5.c)	Amélioration de la précision de la cartographie, et gestion de la résolution des unités cartographiques de sortie _____	67
CHAPITRE IV	"Application de la procédure de découpage spatial au Haut-bassin versant de la Saône" _____	68
IV.1.	Description du bassin versant et présentation des données disponibles _____	70
IV.1.1.	Généralités sur le bassin versant _____	70
IV.1.2.	Les données disponibles. _____	70
IV.2.	Définition des objectifs de la modélisation et choix des représentations des processus _____	74
IV.2.1.	Hétérogénéité des données d'entrée. _____	75
IV.2.2.	Représentation de l'infiltration et des transferts de l'eau dans les sols _____	76
IV.2.3.	Représentation du ruissellement et des transferts latéraux dans les sols. _____	78
IV.2.4.	Représentation de l'évapotranspiration _____	80
IV.2.5.	Représentation des écoulements dans les nappes _____	81
IV.2.6.	Représentation des écoulements dans les rivières _____	82
IV.2.7.	Synthèse sur la modélisation retenue et comparaison avec le modèle ECOMAG83 _____	83
IV.3.	Découpage spatial du bassin versant _____	87
IV.3.1.	Découpage en sous-bassins versants _____	87
IV.3.1.a)	Effet de la résolution du MNT et de l'extraction automatique du réseau hydrographique sur la procédure de découpage spatial _____	87
IV.3.1.b)	Choix d'un découpage spatial en sous-bassins _____	90
IV.3.2.	Découpage du bassin versant en zones homogènes _____	92
IV.3.2.a)	Sélection des facteurs utilisés dans l'analyse paysagère (Etapes 3 et 4) _____	92
IV.3.2.b)	Définition des zones de référence (Etape 5) _____	96
IV.3.2.c)	Procédure de classification et résultats de la cartographie (Etapes 6 à 8) _____	99
IV.3.2.d)	Choix de la cartographie la plus cohérente avec les données d'entrée (Etape 9) _____	102
IV.3.3.	Comparaison des résultats de la classification avec les techniques habituelles de cartographie _____	105
IV.3.3.a)	Comparaison avec les méthodes basées sur le lissage cartographique _____	105

IV3.3.b)	Comparaison avec la technique de cartographie par reclassification	106
IV3.3.c)	Discussion des avantages et limites de la classification paysagère proposée	108
IV.3.4.	Délimitation des hydro-paysages (Etape 10)	109
IV.4.	Conclusion de la Partie (I)	111

DEUXIEME PARTIE : présentation des méthodes et des outils de conception utilisés

CHAPITRE V "Présentation des concepts et outils utilisés" 113

V.1.	Notion de plate-forme de modélisation	115
V.1.1.	Historique de l'utilisation des plates-formes de modélisation environnementale	115
V.1.2.	Le rôle de la programmation orientée objet dans le développement des plates-formes.	121
V.1.3.	Vers une utilisation plus importante de la notion de plate-forme en modélisation hydrologique spatialisée ?	126
V.1.4.	Quels défis pour l'utilisation des plates-formes en modélisation hydrologique ?	128
V.1.5.	Synthèse	132
V.2.	Présentation de la plate-forme de modélisation LIQUID	135
V.2.1.	Bref historique sur le développement de la plate-forme LIQUID	135
V.2.2.	Concepts utilisés dans le processus de développement de la plate-forme LIQUID	138
V.2.2.a.)	Présentation de l'architecture de la plate-forme	138
V.2.2.b.)	Présentation de la structure des modules au sein de LIQUID	142
V.2.2.c.)	Présentation de la méthode de gestion du temps au sein de la plate-forme	143
V.2.2.d.)	La notion de modèle au sein de la plate forme et la gestion des connexions entre modules.	145
V.2.2.e.)	Gestion des données au sein de la plate-forme LIQUID	146
V.3.	Gestion intégrée des informations : construction d'un SIG rassemblant les informations disponibles	148
V.3.1.	Les enjeux d'une gestion intégrée des données pour la modélisation hydrologique spatialisée	148
V.3.1.a.)	Diversité des données en modélisation hydrologique spatialisée, dans le contexte français.	148
V.3.1.b.)	Gestion des données en modélisation hydrologique spatialisée	152
V.3.2.	L'apport des SGBDR et des SIG dans la gestion et la structuration des données.	153
V.4.	Conception d'un SIG pour la gestion intégrée des données pour la modélisation hydrologique spatialisée.	158
V.4.1.	Présentation du schéma de données conçu pour la base de données du système d'information.	159
V.4.2.	Création de la base de données et son utilisation dans le contexte de la plate-forme LIQUID	161

TROISIEME PARTIE : prise en compte d'une géométrie irrégulière dans la modélisation hydrologique

CHAPITRE VI "Prise en compte d'une géométrie irrégulière dans la modélisation de la zone saturée du sol" _____ 166

VI.1.	Rappels sur la modélisation de la zone saturée du sol	168
VI.1.1.	Généralités sur les eaux et réservoirs souterrains	168
VI.1.2.	Identification et caractérisation des aquifères	169
VI.1.3.	Généralités sur la modélisation numérique de la zone saturée du sol	173
VI.1.3.a)	Utilisation des équations de Richards pour la modélisation de la zone saturée du sol	173
VI.1.3.b)	Utilisation de modélisations dites 'saturées' pour la simulation des transferts souterrains.	176
VI.1.4.	Les défis de la modélisation de la zone saturée avec un découpage spatial en éléments géométriques irréguliers.	178
VI.2.	Prise en compte de géométries irrégulières dans la modélisation de la zone saturée : proposition d'une méthode basée sur l'utilisation des volumes finis	180
VI.2.1.	Résolution numérique des équations de simulation des écoulements souterrains par la méthode des volumes finis	181
VI.2.1.a)	Généralités sur les méthodes numériques	181
VI.2.1.b)	Application de la méthode des volumes finis aux équations de Boussinesq.	183
VI.2.2.	Discretisation des flux à l'interface entre deux volumes de contrôle dans la méthode des volumes finis.	185
VI.2.2.a)	Les différentes méthodes d'estimation du flux à l'interface entre éléments du maillage	187
VI.2.2.b)	Les méthodes d'approximation du gradient aux noeuds	190
VI.2.3.	Schéma de discrétisation proposé pour la résolution des équations de transfert sur des maillages à géométries irrégulières et non structurées.	193
VI.2.3.a)	Schéma de discrétisation spatiale	193
VI.2.3.b)	Schéma d'intégration temporelle	195
VI.2.3.c)	Spécification des conditions aux limites	196
VI.2.3.d)	Construction et résolution du système linéaire	199

CHAPITRE VII "Mise en œuvre et vérification du module nappe" _____ 201

VII.1.	Architecture du module <i>BOUSS2D</i> et implantation dans la plate-forme LIQUID 203	
VII.1.1.	Description des objets au sein du module <i>BOUSS2D</i>	203
VII.1.2.	Fonctionnement des objets et du module <i>BOUSS2D</i>	206
VII.2.	Tests de vérification pour un aquifère uniforme et homogène	209
VII.2.1.	Test en charges imposées : sensibilité à la résolution du maillage	210
VII.2.2.	Test en charges imposées : sensibilité à la forme du maillage	213
VII.2.3.	Simulation d'un pompage : Comparaison avec des solutions analytiques	216
VII.2.4.	Simulation d'un pompage : comparaison avec des modèles existants	219
VII.3.	Tests de pompage en conditions naturelles	221
VII.3.1.	Prise en compte de l'hétérogénéité verticale par le modèle <i>BOUSS2D</i>	221

VII.3.2.	Prise en compte de l'hétérogénéité horizontale dans la simulation des transferts souterrains : exemple d'une discontinuité géologique _____	225
VII.4.	Discussion et commentaires _____	227
CHAPITRE VIII	"Assemblage d'un modèle hydrologique spatialisé, utilisant des mailles irrégulières et non-structurées et intégrant la zone non-saturée, la zone saturée et la rivière." _____	229
VIII.1.	Présentation des différents modules intégrés dans le modèle _____	231
VIII.1.1.	Module de simulation des écoulements dans la zone non-saturée (le module <i>FRER1D</i>) _____	231
VIII.1.1.a)	Description de la méthode de résolution numérique _____	232
VIII.1.1.b)	Description de l'architecture du module dans la plate-forme LIQUID _____	234
VIII.1.2.	Module de simulation des transferts dans la rivière (<i>RIVER1D</i>) _____	236
VIII.1.3.	Module de simulation des échanges nappe/ rivière (<i>GWRI</i>) _____	239
VIII.2.	Description du modèle et architecture du couplage entre les modules. _____	241
VIII.2.1.	Assemblage des modules <i>FRER1D</i> , <i>BOUSS2D</i> , <i>GWRI</i> et <i>RIVER1D</i> _____	241
VIII.2.1.a)	L'assemblage zone non-saturée et zone saturée _____	241
VIII.2.1.b)	Le couplage entre la zone saturée et la rivière _____	246
VIII.2.2.	Architecture et fonctionnement du modèle _____	247
VIII.3.	Evaluation du couplage entre la zone non-saturée et la zone saturée et tests en conditions réelles _____	248
VIII.3.1.	Analyse du couplage zone non-saturée et zone saturée _____	248
VIII.3.1.a)	Analyse du couplage zone non-saturée et zone saturée dans des configurations simplifiées _____	248
VIII.3.1.b)	Comportement du couplage zone non-saturée/zone saturée en conditions réelles _____	254
VIII.3.2.	Discussions et perspectives _____	258
	Conclusions et perspectives _____	259
	Bibliographie _____	259
ANNEXE I	"Présentation des données sol et des méthodes de spatialisation des unités de sol" _____	283
ANNEXE II	" la banque de données de la carte géologique de la France au 1/1000000^{ème}" _____	295
Annexe III	"Modèle Logique de Données (MLD) du Système d'Information Géographique conçu pour gérer les données nécessaires aux modèles hydrologiques spatialisés" _____	300

Liste des Figures

Figure 2. 1 : Représentation des échelles d’observations d’après Blöschl and Sivapalan (1995)	12
Figure 2. 2 : Deux images satellites d’un même endroit à une résolution de 1000m (à droite) et à une résolution de 200m (à gauche)	13
Figure 2. 3 : Exemple de stratégie d’observations multi-échelles. (a) échelle locale : mesures des conditions climatiques ; (b) échelle de la parcelle : mesures, par un dispositif aux quatre coins de la parcelle, des flux de surface, du bilan hydrique et des flux dans les sols ; (c) échelle du versant avec une quantification des flux latéraux ; (d) échelle du tronçon de réseau hydrographique et (e) non montré : échelle des sous-bassins versants. (Figure tirée de Reed et al, 2006).....	18
Figure 2. 4 : Exemple du dispositif expérimental déployé sur le bassin versant de la Donga (580 km ²) au Bénin dans le cadre du projet AMMA.	18
Figure 2. 5 : Echelles spatiales et temporelles caractéristiques des processus hydrologiques d’après un diagramme original de Blöschl et Sivapalan (1995). Les traits noirs correspondent aux résultats de Skoien et al. (2003). Figure tirée de Skoien et al. (2003)	21
Figure 2. 6 : Structure d’un sol de type limoneux obtenue par observation à différentes échelles. En haut à gauche : photographie d’un profil de sol de largeur environ 1m. En haut au milieu : tomographie aux rayons X de l’horizon A, largeur environ 0.1m, resolution 0.5 mm/pixel, les couleurs grisées sont proportionnelles à la densité sèche avec les pores apparaissant en couleur sombre. En haut à droite : Micor-tomographie aux rayons X, largeur, 0.01m, resolution 0.04 mm/pixel. Les pores sont en couleur sombres. En bas : interprétation des observations en terme d’unités fonctionnelles du sol. En bas à gauche : 2 horizons de sol. En bas au milieu : agrégats denses (gris), matrice du sol sans structure (blanc) et quelques macropores (noir). En bas à droite : pores (gris) et matrice poreuse (blanc). Figure tirée de Vogel et Roth (2003).	22

Figure 2. 7 : Illustration des composants et du fonctionnement de MikeSHE (sources : www.dhi.fr).....	28
Figure 2. 8 : Exemple de découpage spatial d'un bassin versant en utilisant des courbes de niveau (Source : Grayson et al, 1992a).....	30
Figure 2. 9 : Exemple de découpage spatial d'un bassin versant en TINs (Source : Ivanov et al, 2004)	30
Figure 2. 10 : Exemple de découpage d'un bassin versant en sous-bassins versants.	31
Figure 3. 1 : Diagramme de la procédure proposée pour le découpage spatial des bassins versants.	39
Figure 3. 2 : Illustration des deux premières étapes du découpage spatial.....	40
Figure 3. 3 : Directions d'écoulement suivant la méthode <i>d8</i>	43
Figure 3. 4 : Découpage d'un bassin versant en sous-bassins selon l'ordre de Strahler : à gauche, ordre de Strahler 1 ; au centre, ordre de Strahler 2 ; à droite : ordre de Strahler 3.....	46
Figure 3. 5 : Diagramme schématisant la démarche proposée pour la détermination des hydro-paysages (les numéros correspondent aux différentes étapes présentées ci- dessus).....	57
Figure 3. 6 : Création de l'image brute à cartographier.....	60
Figure 3. 7 : Différentes formes de voisinage possibles pour la caractérisation des pixels	63
Figure 3. 8 : Description schématique du principe de classification.....	66
Figure 4. 1 : Localisation du haut-bassin de la Saône à l'amont de la station de Lechatelet.	69

Figure 4. 2 : Réseau hydrographique et stations de mesure de débit.....	72
Figure 4. 3 : Schéma de données des bases de données sol du programme IGCS (source http://sol.ensam.inra.fr/BdSolLR/Asp/Diaporama.asp).....	72
Figure 4. 4 : Carte de pente issue du MNT à 200m	73
Figure 4. 5 : Occupation des sols re-classifiée en 9 classes (Corine Land Cover).....	73
Figure 4. 6 : Carte lithologique au 1/1000000 ^{ème} (BRGM)	73
Figure 4. 7 : Carte hydrogéologique du bassin versant de la Saône. (Source : RNDE).....	82
Figure 4. 8 : Schéma de la modélisation retenue.....	84
Figure 4. 9: Schéma du modèle ECOMAG (tiré de Motovilov et al., 1999b).....	86
Figure 4. 10 : Comparaison du nombre de sous-bassins (en haut) et de leurs surfaces moyennes (en bas), entre un découpage basé sur un réseau hydrographique extrait automatiquement (à droite) et un découpage basé sur un réseau existant (à gauche)	89
Figure 4. 11 : Découpage spatial de la Saône en sous-bassins versants d'ordre 1 (a), d'ordre 2 (b) et d'ordre 3 (c). Découpage réalisé à partir d'un modèle numérique de terrain à 200m de résolution et d'un réseau hydrographique existant.....	91
Figure 4. 12 : Image des combinaisons de facteurs d'organisation spatiale des processus à modéliser	95
Figure 4. 13 : Cartographie des zones de référence sur le bassin versant de la saône (pour la légende, voir Tableau 4.4).....	97
Figure 4. 14 : Illustration de la procédure de classification.....	99
Figure 4.15 : Carte des zones homogènes (a,c,e) et des distances de classification(b,d,f), pour des tailles de voisinage de 3km (a,b), 2.2 km (c,d) et 1.4km (e,f). (pour la légende, voir Tableau 4.4).....	101

Figure 4. 16 : Fréquence cumulée (sur l'axe des ordonnées) des surfaces des unités cartographiques (sur l'axe des abscisses) pour les trois tailles de fenêtre de voisinage choisies, illustrant l'effet de la taille de la fenêtre de voisinage sur la finesse des plages cartographiques des zones homogènes. Les traits verticaux marquent la surface médiane pour chaque taille de voisinage.	104
Figure 4. 17 : Résultats de la cartographie par la technique de lissage, pour des fenêtres d'homogénéisation avec une surface égale à 6.25 km ² (a) et une surface de 1.6 km ² (b).....	106
Figure 4. 18 : Résultat de la cartographie par la technique de reclassification. Chaque pixel correspond à une des 46 combinaisons de facteurs.....	107
Figure 4. 19 : Découpage du bassin versant en hydropaysages. Les différentes couleurs correspondent aux différents sous-bassins. Les hydro-paysages à l'intérieur des sous-bassins sont matérialisés par les traits noirs.	110
Figure 4. 20 : Troisième niveau de découpage : Re-découpage des hydropaysages en mailles convexes.	110
Figure 5. 1 : Exemple de composants pour une représentation simplifiée d'un système environnemental complexe.	117
Figure 5. 2 : Structure générale d'une plate-forme de modélisation	119
Figure 5. 3 : Présentation de l'architecture de la plate-forme OMS (Source: Kralisch et al., 2005).....	121
Figure 5. 4 : Illustration de la notion d'Objet.	123
Figure 5. 5 : Exemple d'architecture de base d'une plate-forme de modélisation	125
Figure 5. 6 : Illustration des incertitudes liées à l'interpolation temporelle lors du couplage de deux modèles.	130
Figure 5. 7 : Exemples d'illustration de problèmes des couplages spatiaux : problèmes de frontières (a) et problèmes de superposition de composants (b).....	131

Figure 5. 8 : Illustration des éléments constitutifs de la plate-forme LIQUID	139
Figure 5. 9 : Illustration de la composition d'un module au sein de LIQUID	142
Figure 5. 10 : Fonctionnement du scheduler : Chaque module (A et B) y place à chaque exécution l'heure de sa prochaine exécution.	144
Figure 5. 11 : Illustration d'une description statique d'un modèle avec des modules connectés entre eux.....	146
Figure 5. 12 : Description d'une vue dynamique d'un modèle avec les échanges dans le temps entre modules. Ici, le module input (Gauges) provoque une interruption du module sol (Soil) lorsque son état change.....	146
Figure 5. 13 : Organisation de la banque ADES	150
Figure 5. 14 : Schéma logique de données de BDCarthage.	155
Figure 5. 15 : Exemple d'un schéma conceptuel du référentiel des entités hydrogéologiques (BDRHF).....	156
Figure 5. 16 : Schéma conceptuel de données de DONESOL.	157
Figure 5. 17 : Les entités d'entrée du schéma de données proposé.....	159
Figure 5. 18 : Schéma de données des entités liées aux stations de mesures.....	160
Figure 5. 19 : Illustration de la diversité des informations du SIG	162
Figure 6. 1 : Illustration d'un domaine aquifère avec des mailles à géométries non- structurées et irrégulières.....	185
Figure 6. 2 : Illustration d'une interface entre deux éléments du domaine à modéliser... 185	
Figure 6. 3 : Illustration de la méthode d'approximation du flux au milieu de l'interface (FM) sur un maillage non-structuré.	194
Figure 6. 4 : Exemple d'interface entre une maille et les limites du domaine.....	197
Figure 7. 1 : Illustration des principaux objets du modèle <i>BOUSS2D</i> . (a) exemple de maillage utilisé (b) Objets correspondants à la trace AA' du maillage.	204
Figure 7. 2 : Diagramme de classes du modèle <i>BOUSS2D</i>	205

Figure 7. 3 : Configuration de l'aquifère homogène pour les tests en condition de charge imposée à l'amont et à l'aval.	210
Figure 7. 4 : Gauche : maillages utilisés; Centre : cartes piézométriques ; Droite : graphes $h(y)$ calculés (points) et solution analytique (trait plein) pour les deux maillages utilisés.....	211
Figure 7. 5 : Gauche : Maillage ; Centre : cartes piézométriques ; Droite : courbes $h(y)$ calculées (points) et théoriques (trait plein) pour les différents maillages. (a) grille régulière, (b) maillage hexagonal (nid d'abeille), (c) maillage non-orthogonal, (d) maillage avec des éléments non structurés et irréguliers.	215
Figure 7. 6 : Configuration de l'aquifère pour les essais de pompage en milieu homogène. (a) Maillage utilisé (b) Profil de l'aquifère suivant la trace AA'.	217
Figure 7. 7 : (a) Comparaison des profils de dépression (1D) à la fin du pompage (<i>suivant la trace AA'</i>) entre le modèle <i>BOUSS2D</i> , les modèles de référence (<i>MODFLOW</i> et <i>MIKE SHE</i>) et la solution analytique de Theis. (b) Carte des équipotentielles, produite avec les résultats du modèle <i>BOUSS2D</i> après 4h de pompage.....	218
Figure 7. 8 : Evolution du profil de dépression après 120h (a), 360h (b) et 720h (c), et évolution de l'erreur relative en fonction du temps (d).....	219
Figure 7. 9 : Configuration de l'aquifère multi-couches. (a) Maillage utilisé (b) Profil de l'aquifère suivant la trace AA'.	222
Figure 7. 10 : Evolution du profil de dépression après 4h (a), 600h (b) et 1080h (c), et évolution de l'erreur relative en fonction du temps (d).....	223
Figure 7. 11 : Configuration de l'aquifère ayant une discontinuité horizontale marquée.(a) Structure du maillage, (b) Vue en profil suivant AA'.	225
Figure 7. 12 : Cartographie des surfaces piézométriques à 3 jours (a), 30 jours (b) et 60 jours (c) en plage de couleur (gauche) en isopièzes (droite). Sur la figure (c), on ne voit plus la trace du pompage.	226
Figure 7. 13 : Exemple d'un maillage dit de Kershaw. (La projection du point A et du point B sont à l'extérieur des mailles auxquelles appartiennent A et B).	228

Figure 8. 1 : Illustration des processus hydrologiques intégrés dans le prototype de modèle hydrologique réalisé.....	230
Figure 8. 2 : Découpage vertical des sols, proposé par Ross (2003).....	233
Figure 8. 3 : Schéma illustrant les interfaces du module <i>FRER1D</i>	235
Figure 8. 4 : Exemple de réseau ramifié (a) pouvant être modélisé par <i>RIVER1D</i> et exemple de sa géométrie suivant la trace AA' (b).	236
Figure 8. 5 : Illustration de l'interface du module <i>RIVER1D</i>	238
Figure 8. 6 : Coupe en travers d'un brin de rivière utilisé par le module de simulation des échanges nappe/ rivière.....	240
Figure 8. 7 : Illustration des relations entre la zone saturée et la rivière : (a) la nappe alimente la rivière (b) la rivière alimente la nappe et (c) la nappe et la rivière sont déconnectées.	240
Figure 8. 8 : Illustration des interactions entre la zone saturée et la zone non-saturée. Recharge verticale (a) et transferts latéraux dans la zone saturée (b).	242
Figure 8. 9 : Illustration des échanges entre le module non-saturé et le module saturé...	243
Figure 8. 10 : Déroulement temporel du couplage entre la zone saturée (ZS) et la zone non-saturée (ZNS).....	245
Figure 8. 11 : Configuration des mailles saturées et des brins de rivière pour la simulation des échanges nappe/ rivière.....	246
Figure 8. 12 : Schéma global du modèle et description des échanges entre les modules utilisés.....	247
Figure 8. 13 : (a) Domaine de simulation pour le <i>scénario 1</i> , avec neuf mailles régulières. (b) Profil vertical de la matrice de sol suivant la trace (AA'). La zone saturée est initialement à l'équilibre, et une partie de la zone non-saturée est soumise à un forçage pluviométrique.....	249
Figure 8. 14 : Distribution initiale de la pression dans le profil de sol du module <i>FRER1D</i> , pour le <i>scénario 1</i>	250

Figure 8. 15 : Evolution de la position de l'interface zone saturée/ zone non-saturée dans le module <i>FRER1D</i> pour le <i>scénario 1</i>	251
Figure 8. 16 : Evolution du niveau piézométrique dans le module <i>BOUSS2D</i> pour le <i>scénario 1</i>	251
Figure 8. 17 : Domaine de simulation pour le <i>scénario 2</i> , avec neuf mailles régulières (a) et profil vertical de la matrice de sol suivant la trace (AA').	252
Figure 8. 18 : Evolution du niveau piézométrique dans le module <i>FRER1D</i> pour le <i>scénario 2</i>	253
Figure 8. 19 : Evolution du niveau piézométrique dans le module <i>BOUSS2D</i> pour le <i>scénario 2</i>	253
Figure 8. 20 : Localisation de l'aquifère de la Haute Saône (coloris bleutés) et re-découpage des hydropaysages (mailles) au sein de sous-bassins (autres coloris).....	254
Figure 8. 21 : Scénario de forçage pluviométrique utilisé pour l'a mise en œuvre du couplage en conditions réelles	255
Figure 8. 22 : Evolution du niveau piézométrique de trois groupes de mailles suite à l'épisode pluviométrique simulé (1) mailles à l'aval du domaine, près de la Saône, (2) mailles à l'aval du domaine, près de l'Ognon et (3) mailles à l'amont du domaine..	256
Figure A1. 1 : Modèle des données de la base de données géographique des sols (Source : INRA)	286
Figure A1. 2 : Modèle Conceptuel de la base de données DONESOL.....	292
Figure A2. 1 : Carte des principales formations géologiques du bassin versant de la Saône amont.	296
Figure A2. 2 : Carte lithologique simplifiée du bassin versant de la Saône amont	298
Figure A2. 3 : Carte des principaux accidents structuraux sur le bassin versant étudié...	299
Figure A3. 1 : Modèle Logique de Données (MLD) du Système d'Information Géographique développé dans le cadre de cette thèse.....	300

Liste des Tableaux

Tableau 4. 1 : Statistiques sur les sous-bassins extraits de manière automatique pour trois résolutions du MNT.....	88
Tableau 4. 2 : Statistiques du découpage en sous-bassins en utilisant le réseau hydrographique existant, pour trois résolutions du MNT.....	88
Tableau 4. 3: Les différents facteurs et leurs classes associées	95
Tableau 4. 4: Description des zones de référence définies	98
Tableau 4. 5 : Statistique sur les surfaces des unités cartographiques, suivant les tailles de voisinage utilisées.....	102
Tableau 4. 6 : Comparative des différentes techniques de cartographie	108
Tableau 7. 1 : Paramètres hydrodynamiques de l'aquifère à modéliser	209
Tableau 7. 2 : Comparaison des statistiques sur les écarts entre solutions numériques et solution analytique pour un maillage fin et un maillage grossier.....	213
Tableau 7. 3 : Erreur Relative (RE), Erreur quadratique Moyenne RMSE et Erreur maximum en fonction du maillage utilisé.	214
Tableau 7. 4 : Comparaison des erreurs des modèles BOUSS2D, MODFLOW et MIKE SHE:.....	218
Tableau 7. 5 : Paramètres de sol pour les différentes couches	222
Tableau 7. 6 : Evaluation des écarts entre le modèle <i>BOUSS2D</i> et les modèles MODFLOW et MIKE SHE : cas des aquifères multi-couches.	223

CHAPITRE I "Introduction Générale"

Les enjeux relatifs à l'aménagement du territoire, aux changements climatiques, ainsi que l'émergence de notions comme le développement durable et la protection de l'environnement ont eu un impact considérable sur la pratique de la modélisation en hydrologie. La prise en compte des changements d'occupation du sol, de l'aménagement du paysage et du changement climatique est de plus en plus importante dans la gestion de la ressource en eau tant au niveau quantitatif que qualitatif. La seule prévision du débit à l'exutoire d'un bassin versant n'est plus suffisante pour répondre aux nouvelles questions qui dérivent des enjeux cités ci-dessus. C'est le cas par exemple, des questions relatives à la prévision des inondations, à l'impact de nouveaux aménagements sur les écoulements, aux transports de sédiments et de polluants sur un bassin versant. Une description détaillée de la dynamique hydrique du bassin, ainsi qu'une évaluation précise et spatialisée des flux en plusieurs points de ce bassin sont alors nécessaires. Les hydrologues s'intéressent donc à la simulation, en tout point des bassins versants, des diverses composantes du cycle de l'eau tels que le débit, les flux d'évapotranspiration et ses composantes (interception des pluies par la végétation, évaporation du sol, transpiration de la végétation), les flux de recharge des nappes etc.. Du point de vue de la modélisation hydrologique, la prise en compte des enjeux cités ci-dessus (changements d'occupation de sol, changements climatiques etc.) nécessite une représentation explicite de l'hétérogénéité du milieu au sein des modèles hydrologiques. Dans ce contexte, les modèles hydrologiques spatialisés sont d'un grand intérêt dans la mesure où ils permettent justement de prendre en compte explicitement l'hétérogénéité du milieu et son impact sur les écoulements au sein des bassins versants. Ils offrent aussi la possibilité de simuler des variables de sorties spatialisées. Les modèles hydrologiques spatialisés peuvent être également utilisés pour tester différentes hypothèses sur le fonctionnement hydrologique des bassins versants. Ces tests peuvent servir à posteriori à l'élaboration de modèles simplifiés ou à créer des modèles de prévision pour des applications plus opérationnelles. L'évaluation des résultats de ces modèles peut être conduite non pas uniquement à

l'exutoire du bassin versant, mais peut être réalisée au niveau de stations intermédiaires et sur plusieurs variables de simulation. Ceci correspond à la méthode d'évaluation dite multi-objectifs (Mroczkowski et al, 1997; Beldring, 2002; Engeland et al, 2006; Varado et al, 2006).

Les modèles hydrologiques spatialisés ont suscité beaucoup d'espoirs quant à leur capacité à prendre en compte l'hétérogénéité des bassins versants. Ces espoirs sont renforcés par les possibilités offertes par les Systèmes d'Information Géographique (SIG), et surtout par la disponibilité croissante de données à haute résolution spatiale, grâce aux technologies issues de la télédétection (imageries satellitales, photos aériennes, drones...). En effet, sur les petits bassins versants, les discontinuités hydrologiques telles que les parcelles agricoles, les aménagements anthropiques, les haies etc. peuvent être représentées explicitement (Moussa et al., 2002; Carluer and de Marsily G., 2004; Branger, 2007). Les données à haute résolution spatiale sont alors d'une aide précieuse pour les identifier et les positionner. Cependant, dans le cas des grands bassins versants, une représentation détaillée de l'hétérogénéité spatiale du paysage n'est souvent ni possible ni pertinente. Des simplifications sont alors nécessaires. En effet, pour modéliser ces grands bassins versants, il est souvent difficile de disposer de tous les paramètres, à la résolution spatiale souhaitée ou nécessaire. De ce fait, la spécification des paramètres sur les grands bassins versants est une tâche souvent délicate, comportant encore plus d'incertitudes que sur les petits bassins versants. En pratique, un grand nombre des paramètres est souvent calibré, à travers la recherche de paramètres effectifs¹. Les paramètres effectifs sont évalués à partir de données mesurées ou observées. Pour ces raisons, la pertinence et l'utilité même de ces modèles sont souvent remises en question. Les principaux défauts des modèles hydrologiques spatialisés souvent cités, sont liés aux problèmes de sur-paramétrisation, aux incertitudes liées à l'estimation des paramètres et aux limites liées à la validation de ces modèles (Beven and Binley, 1992; Grayson and Moore, 1992; Beven, 2001; Bashford et al., 2002). Toutes ces questions relatives à la spécification des paramètres sont liées aux problèmes d'échelle et de changement d'échelle en hydrologie, abordés par Blöschl et Sivapalan (1995). Malgré des recherches actives sur ces questions, il s'agit là de sujets très ouverts et non encore élucidés. D'autres hydrologues mènent

¹ Les paramètres effectifs sont définis ici, comme les valeurs à l'échelle des mailles de modélisation des variables mesurées sur le terrain à des échelles locales.

également des recherches actives sur ces questions : (Becker et al., 1999a; Becker et al., 1999; Bergström and Graham, 1998; Beven, 2002a; Reggiani et al., 1998 ; 1999; 2000; 2001; 2005).

La spécification des paramètres pour la modélisation des écoulements sur les grands bassins versants est liée au choix d'une résolution spatiale adaptée pour les mailles de modélisation, afin de représenter l'hétérogénéité du paysage. Il s'agit d'un choix d'une très grande importance puisqu'il influence les flux calculés sur les bassins versants comme l'ont démontré plusieurs auteurs (Indarto, 2002). Ce choix devrait tenir compte des objectifs de modélisation, des données disponibles et des processus hydrologiques principaux à modéliser sur le bassin versant étudié. En effet, des objectifs de bilan hydrique à des échelles régionales et des objectifs de modélisation de crue ne nécessitent pas les mêmes discrétisations spatiales. De même, la résolution spatiale nécessaire pour représenter le ruissellement de surface n'est pas la même que celle dont on a besoin pour représenter la variabilité spatiale des régimes d'écoulement à des échelles régionales. Dès lors, on peut se demander s'il existe toujours une résolution spatiale unique et optimale pour représenter les différents processus hydrologiques au sein d'un même modèle. Par ailleurs, pour modéliser un processus hydrologique, on a souvent besoin de plusieurs sources de données spatialisées, disponibles à différentes résolutions. La représentation de l'hétérogénéité spatiale devrait donc être faite de manière à assurer une bonne cohérence entre les données et l'échelle fonctionnelle du processus. L'autre question qu'on est alors en droit de se poser est la suivante : existe-il une méthodologie suffisamment flexible pour représenter l'hétérogénéité du paysage de manière efficace en fonction du problème à résoudre, et des données disponibles ? La réponse immédiate à cette dernière question est qu'il n'existe pas encore aujourd'hui une méthodologie globale et intégrée pour la représentation de l'hétérogénéité au sein des modèles hydrologiques. Ces préoccupations se déclinent en pratique sous la forme du choix de modèles existants, (ou d'un couplage de modèles existants) le plus apte à répondre aux questions auxquelles on souhaite répondre. Les auteurs choisissent donc de profiter des avantages offerts par des modèles hydrologiques particuliers pour traiter la question qui les intéresse. Pourtant, dans ces modèles hydrologiques, les méthodes de découpage spatial correspondent aux hypothèses faites sur les processus hydrologiques qui y sont représentés. Ces hypothèses ne sont pas nécessairement généralisables à toute question à traiter. Les choix imposés par ces

modèles existants constituent souvent des limites à la représentation des processus avec d'autres méthodes ou à la représentation de processus hydrologiques, différents de ceux déjà inclus dans ces modèles. En attendant, les équations, que tout hydrologue peut appeler de ses vœux, qui décriraient les processus à des échelles intermédiaires comme le suggèrent Bashford et al, (2002), n'existent pas encore. Les recherches dans ce sens sont encore assez rares hormis les travaux de Reggiani et al, (1998; 1999; 2000; 2001; 2003; 2005) qui proposent des équations décrivant des processus hydrologiques à l'échelle des sous-bassins (REWs – Representative Elementary Watersheds). En s'appuyant sur cette approche, les travaux de Varado (2004) ont montré que la prise en compte de l'hétérogénéité spatiale au sein des REWs peut s'avérer nécessaire, par exemple si la structure des sols varie beaucoup dans un sous-bassin ou présente de forts contrastes dans la verticale. Il est alors nécessaire de disposer d'une méthodologie de description de l'hétérogénéité spatiale au sein des modèles hydrologiques, capable de garantir la compatibilité nécessaire entre les données disponibles et l'échelle fonctionnelle des principales composantes du cycle de l'eau sur le bassin versant étudié.

Dans la première partie de cette thèse, nous proposons une méthodologie globale de discrétisation spatiale des bassins versants. Elle permet, dès la procédure de discrétisation spatiale, de prendre en compte à la fois les données disponibles et leur résolution, mais aussi les échelles fonctionnelles des processus hydrologiques à modéliser. Elle est basée sur une représentation du paysage en plusieurs niveaux emboîtés. Le premier niveau est le découpage en sous-bassins versants qui s'appuie sur la structure du réseau hydrographique et un modèle numérique de terrain. En fonction des objectifs de modélisation, la variabilité spatiale des sous-bassins peut être représentée à travers un second niveau de discrétisation spatiale où les unités élémentaires sont des zones homogènes au sein des sous-bassins. Ces zones homogènes sont appelées hydro-paysages (Winter, 2001). Les hydro-paysages prennent en compte divers facteurs tels que la topographie, l'occupation des sols, la pédologie, etc. mais aussi des discontinuités hydrologiques telles que les haies, les talus, les barrages, etc.. Les contraintes géométriques liées aux méthodes numériques utilisées peuvent amener à un découpage des hydro-paysages en éléments plus fins, constituant un troisième niveau de découpage. Ces contraintes sont souvent liées à la convexité des mailles de modélisation, en général nécessaire pour la simulation numérique

de certains processus hydrologiques, lorsque des équations aux dérivées partielles sont utilisées. Les hydro-paysages ne seront utilisables directement comme mailles de modélisation que dans le cas de représentations simples de processus où des méthodes numériques de type différences finies, éléments finis, volumes finis, etc. ne sont pas utilisées. La procédure pour rendre convexe les hydro-paysages peut être réalisée avec des outils de traitement géométrique ou de modélisation de données géographiques existants. Nous n'allons donc pas détailler ce niveau de découpage dans cette thèse.

Dans le Chapitre (II), nous allons présenter une revue bibliographique sur la discrétisation spatiale et la représentation de l'hétérogénéité spatiale au sein des modèles hydrologiques distribués. Cette synthèse permettra d'introduire les bases de la méthodologie de discrétisation spatiale proposée dans le Chapitre (III) et résumée ci-dessus. Les différents niveaux de discrétisation spatiale retenus (découpage en sous bassins versants et détermination des zones homogènes) y sont décrits en détails. Une illustration de la technique proposée, s'appuyant sur les données disponibles sur le haut bassin versant de la Saône à l'amont de la station à Lechatelet (11700 km²), est présentée dans le Chapitre (IV). Le contenu de cette première partie a été synthétisé dans un article en cours de révision (Dehotin et Braud, 2007).

Un grand intérêt de l'approche de discrétisation proposée dans la première partie est de réduire les incertitudes liées à la paramétrisation des mailles de modélisation, par rapport à l'utilisation de mailles régulières. Elle limite au maximum l'existence d'une hétérogénéité à l'intérieur d'une même maille de modélisation. Du coup, cette approche est réellement pertinente lorsqu'elle est associée à une modélisation du bassin versant permettant à la fois de prendre en compte le plus fidèlement possible ce découpage, et d'adapter cette discrétisation à la finesse souhaitée pour la représentation des processus hydrologiques. On se trouve donc en face de deux défis majeurs. Le premier défi est relatif à l'outil de modélisation qui doit autoriser une telle flexibilité dans la modélisation des bassins versants. En effet, cette flexibilité nécessite de disposer d'un outil de modélisation qui offre aussi bien le choix des processus à représenter, que le choix des méthodes de représentation des processus hydrologiques selon divers niveaux de finesse. Le second défi est relatif aux méthodes de représentation des processus hydrologiques qui doivent permettre de prendre en compte des maillages irréguliers et non-structurés, issus de la

procédure de discrétisation présentée dans la première partie. En effet, les équations constitutives des processus hydrologiques sont souvent résolues en utilisant des méthodes numériques adaptées aux mailles régulières (grilles) ou structurées (TINs). Ceci limite la capacité des modèles à représenter fidèlement l'hétérogénéité du paysage au sein des modèles. Il est donc nécessaire d'intégrer dans la représentation des processus hydrologiques, l'utilisation de méthodes numériques permettant de prendre en compte des mailles non-structurées et irrégulières.

Concernant le premier défi relatif aux outils de modélisation, nous avons adopté l'approche proposée par Leavesley et al (1996), pronant l'utilisation de plates-formes de modélisation basées sur des composants modulaires. Nous avons donc fondé la modélisation du système hydrologique sur le développement d'une plate-forme où plusieurs processus hydrologiques et plusieurs méthodes de représentation de ces processus (conceptuelles ou à base physique) sont implémentés sous forme de composants appelés 'modules'. Ces modules sont indépendants, mais capables d'être assemblés en vue de la création de modèles. Nous proposons donc une approche de représentation des systèmes hydrologiques s'appuyant sur le découpage spatial proposé dans la première partie, et qui utilise des méthodes de représentation des processus hydrologiques tenant compte de l'échelle des données disponibles et de l'échelle fonctionnelle des processus. Un objectif de modélisation et un jeu de données nécessiteront alors une combinaison de processus (et donc de composants) pour la création d'un modèle spécifique. Une plate-forme de modélisation du nom de LIQUID est en cours de développement, parallèlement à cette thèse, et a servi de cadre pour l'évaluation de l'approche proposée pour la représentation des systèmes hydrologiques. Dans la deuxième partie de ce document (chapitre V), après une synthèse de l'historique et des concepts utilisés dans les plates-formes de modélisation, nous reviendrons en détail sur l'outil de modélisation utilisé pour la mise en œuvre de l'approche proposée.

La troisième partie est consacrée au défi relatif à la représentation des processus hydrologiques sur des mailles non-structurées et irrégulières. Dans le cadre de cette thèse, nous nous sommes concentrés sur la résolution numérique des équations constitutives des principaux processus élémentaires du cycle de l'eau, en utilisant des mailles irrégulières et non-structurées. Le système hydrologique considéré a pour objectif de répondre aux

questions de gestion des ressources en eau sur des bassins de taille moyenne à grande. Il est défini en détails au chapitre IV et inclut une représentation 1D des transferts dans la zone non saturée du sol et de l'évapotranspiration, 2D dans les nappes alluviales, 1D dans la rivière, ainsi que les interactions entre ces composantes. Le maillage est formé de polygones irréguliers et non-structurés. Sur la question de l'adaptation des méthodes numériques à de tels maillages, nous nous sommes concentrés dans cette thèse sur la simulation des transferts dans la zone saturée. A cet effet, nous avons développé le modèle **BOUSS2D** qui est un modèle de simulation des écoulements dans les aquifères libres fondé sur la résolution des équations de Boussinesq en deux dimensions (2D). Ce modèle utilise la méthode des volumes finis et permet d'utiliser un maillage quelconque (régulier ou non, et structuré ou non). Nous présentons la méthode numérique utilisée au chapitre VI, et une validation de l'approche au chapitre VII. Un module de simulation des échanges entre nappe et rivière (le module **GWRI**) a été développé, toujours dans le cadre de cette thèse. Ce module est basé sur la méthode de Miles (1985) pour la détermination des flux entre la rivière et la nappe. Développés en dehors de cette thèse, un module pour les transferts dans la zone non-saturée en une dimension, ainsi qu'un module de simulation des écoulements dans la rivière, en une dimension sont par ailleurs disponibles.

Dans le chapitre VIII, un prototype de modèle, basé sur ces différents processus a été créé afin de réaliser une première évaluation de l'approche proposée. Ce modèle est donc basé sur la combinaison des modules suivants : le module des transferts dans la zone non saturée (**FRER1D**), le module des transferts dans la zone saturée (**BOUSS2D**), le module des transferts dans la rivière (**RIVER1D**) et le module des échanges entre la nappe et la rivière (**GWRI**). L'implémentation informatique de ce modèle n'a pas été entièrement réalisée dans le cadre de cette thèse. Seul l'implémentation du couplage entre la zone non-saturée et la zone saturée a été réalisée dans le cadre de cette thèse. Néanmoins, pour initier l'évaluation de l'approche proposée, des simulations sur la base de scénarios d'écoulement simples ont été réalisées pour évaluer le couplage entre la zone non-saturée et la zone saturée. Une mise en œuvre de ce couplage sur un bassin versant réel et en utilisant le découpage spatial présenté dans la première partie a été également réalisée.

PREMIERE PARTIE :
SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE ET
PROPOSITION D'UNE METHODE DE
DECOUPAGE SPATIAL DES BASSINS
VERSANTS

CHAPITRE II "Découpage spatial dans les modèles hydrologiques distribués et problèmes d'échelles"

Le choix d'un découpage spatial dans une modélisation hydrologique spatialisée conditionne la manière de prendre en compte l'hétérogénéité spatiale dans la représentation et la simulation des principales composantes du cycle de l'eau sur un bassin versant. Le découpage spatial d'un bassin versant dépend naturellement de sa spécificité, de sa taille, etc.. Cependant, pour un bassin versant donné, le découpage spatial ne devrait pas être réalisé une fois pour toute. Il devrait pouvoir changer lorsqu'on modifie les objectifs de la modélisation ou lorsqu'on change de méthode de représentation des processus hydrologiques dominants. En effet, selon les processus hydrologiques à représenter et leur niveau de finesse, le découpage spatial requis ne devrait pas être le même. On n'a pas besoin de la même finesse de mailles pour représenter par exemple le ruissellement que pour la représentation de l'évapotranspiration. Le découpage spatial d'un bassin versant est donc tributaire de compromis entre plusieurs facteurs, mais aussi de considérations parfois contradictoires. Le choix de ce découpage spatial dépendra en effet des réponses apportées aux questions suivantes:

- ❑ Quel est l'objectif de la modélisation hydrologique ?
- ❑ Quelles sont les variables de sortie et quelles sont leurs résolutions spatiales?
- ❑ De quelles données mesurées dispose-t-on et à quelle résolution spatiale ?
- ❑ Quels sont les processus hydrologiques dominants sur le bassin versant étudié, et quelles sont leurs échelles fonctionnelles?
- ❑ Quelle méthode de représentation des processus hydrologiques serait pertinente, et avec quelle finesse pour les mailles de modélisation?
- ❑ Quel degré d'homogénéité est acceptable pour la définition des mailles de modélisation ?

Nous allons passer en revue les différentes questions ci-dessus, détailler leur importance dans le processus de découpage spatial en vue d'une modélisation hydrologique

spatialisée. Nous allons également présenter les enjeux spécifiques associés à chaque question. Ensuite, en se basant sur cette synthèse, nous présenterons les grandes lignes d'une méthodologie globale pour la représentation de l'hétérogénéité spatiale dans les modèles hydrologiques spatialisés.

II.1. Quel est l'objectif de la modélisation hydrologique ?

Cette question peut sembler triviale, mais en réalité les objectifs de la modélisation hydrologique spatialisée ne sont pas toujours clairement définis par les utilisateurs des modèles hydrologiques distribués dans leur démarche de modélisation. Refsgaard et al. (2005) identifient la définition des objectifs de modélisation comme la première étape parmi une liste de tâches à réaliser pour une modélisation respectant des critères d'assurance qualité. Les objectifs de la modélisation peuvent être : la détermination des composantes du bilan hydrologique d'un bassin versant ; l'évaluation des risques d'inondation ou de sécheresse à différents endroits d'un bassin versant ; la détermination de solutions pour limiter la pollution d'une rivière dans une zone donnée ou encore la recherche des processus hydrologiques dominants dans un bassin versant donné. Pour chacun de ces objectifs, différentes discrétisations spatiales seraient nécessaires, car aussi bien les processus hydrologiques à modéliser que les variables de sortie souhaitées varient selon les différents cas énumérés ci-dessus. En effet un découpage en sous-bassins peut être suffisant pour l'étude du bilan hydrologique d'un bassin versant. L'évaluation des risques d'inondation nécessite au contraire un découpage spatial assez fin en surface, autant pour prendre en compte une topographie suffisamment réaliste que pour représenter les processus hydrologiques de surfaces qui conditionnent l'inondation (ruissellement, infiltration, écoulements dans les lits mineurs et majeurs, etc.).

Les objectifs de modélisation conditionnent la finesse de représentation des processus hydrologiques nécessaires à une modélisation. Les méthodes de représentations des processus hydrologiques choisies conditionnent à leur tour la résolution spatiale requise pour les mailles de modélisation.

II.2. Quelles sont les variables de sortie et quelles sont leurs résolutions spatiales ?

La définition des objectifs de modélisation permet de préciser les variables de sortie souhaitées ainsi que les résolutions spatio-temporelles auxquelles elles sont attendues. Pour l'analyse du bilan hydrologique par exemple, les sorties habituelles sont le débit, l'évapotranspiration, la recharge de la nappe etc.. Dans le cas d'une étude sur le transfert de polluants par exemple, les sorties peuvent être le flux intégré sur une zone, les concentrations maximales de polluants sur une période donnée, le temps au-delà duquel un certain seuil de pollution serait dépassé etc.. Toutes ces variables de sortie peuvent être requises pour des pas de temps annuel, mensuel, journalier ou horaire, en différentes zones des sous-bassins ou seulement à l'exutoire du bassin versant (exemple : le débit).

En règle générale si l'on souhaite une résolution spatiale et temporelle grossière pour les variables de sortie, une représentation grossière de l'hétérogénéité spatiale au sein du bassin versant peut s'avérer suffisante. Néanmoins, il n'existe pas de règles précises pour définir une résolution spatiale appropriée pour la représentation de l'hétérogénéité, en fonction de celle des variables de sortie souhaitées.

Suivant que l'on souhaite des résultats synthétiques ou détaillés, grossiers ou fins, les méthodes de représentation des processus hydrologiques ne seront pas les mêmes. Donc la discrétisation spatiale requise est également influencée par les variables de sortie souhaitées, et leurs échelles spatiales et temporelles.

II.3. De quelles données mesurées dispose-t-on et à quelle résolution spatiale ?

Les données mesurées comprennent les données de forçage (pluie et autres forçages climatiques), les variables de sorties pour la validation ou le calage comme le débit, l'humidité du sol, le niveau d'eau dans les nappes, etc.. Elles comprennent également les descripteurs du paysage tels que l'occupation des sols, la géologie, la topographie, etc.. Ces descripteurs sont utilisés pour la détermination des paramètres des modèles et pour la définition des zones homogènes et/ou des mailles de modélisation. Une modélisation hydrologique spatialisée nécessite que toutes les données d'entrée, les paramètres et les données de vérification soient spécifiés, sous forme de valeurs moyennes, sur toutes les mailles de modélisation et sur toute l'étendue du bassin versant. Malheureusement, il y a rarement convergence entre la résolution des données mesurées ou observées et la résolution des mailles de modélisation. On doit alors distinguer l'échelle des observations, et l'échelle de la modélisation.

Dans ce paragraphe, nous nous intéressons seulement à la résolution spatiale, même si la résolution temporelle est tout aussi importante dans la démarche de modélisation (Skøien et al., 2003 ; Skøien and Blöschl, 2006), et peut notamment influencer le choix des méthodes de représentation des processus hydrologiques.

II.3.1. L'échelle des observations

Parlant des observations, Blöschl et Sivapalan (1995) distinguent (Figure 2.1):

- La zone d'extension des données (extent en anglais), où les données ont été collectées
- Le support des observations (support en anglais), c'est-à-dire la résolution spatiale à laquelle les données sont intégrées ou interpolées
- L'espacement (spacing en anglais), c'est-à-dire la distance dans le temps ou dans l'espace séparant les observations

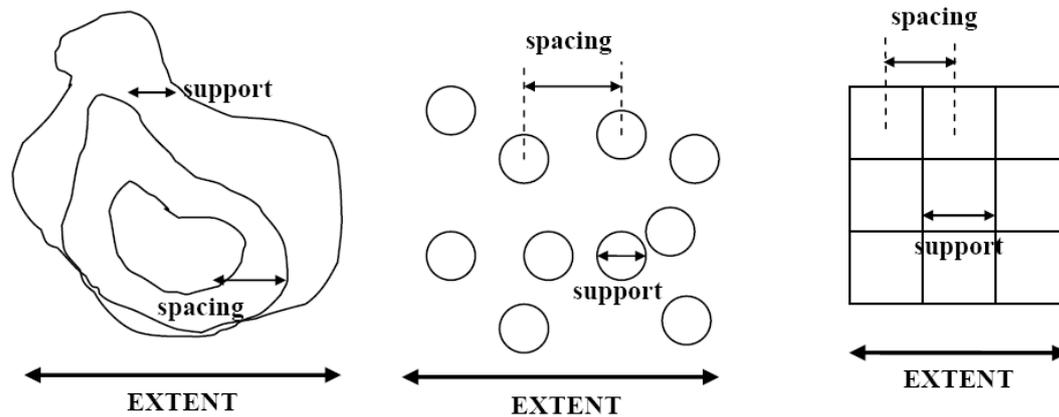
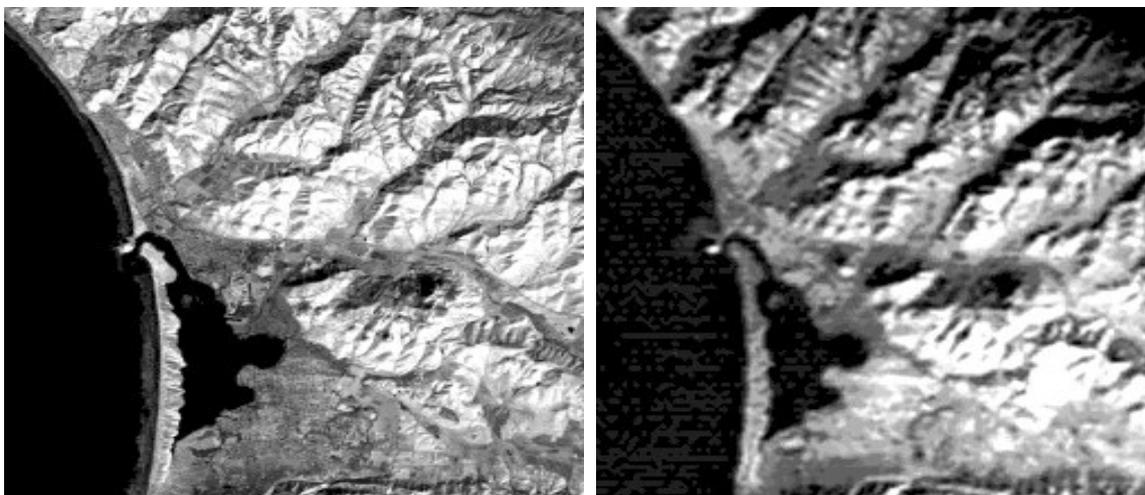


Figure 2. 1: Représentation des échelles d'observations d'après Blöschl and Sivapalan (1995)

Les observations in situ sont souvent ponctuelles. C'est notamment le cas de la plupart des données météorologiques traditionnelles (pluviométrie, données climatiques, évapotranspiration potentielle, etc.), des données hydrométriques (débit, hauteur d'eau, etc.) et des données piézométriques. Les données cartographiques sont souvent déjà des données comportant un certain niveau d'interprétation (par exemple, les images radar pour les pluies spatialisées, et des données provenant de l'imagerie satellitale en général). Selon la résolution, ces images traduisent déjà un niveau d'homogénéisation souhaité de l'image brute et le résultat est conditionné par le choix de la taille des objets qu'on veut y voir figurer. Par exemple, une image d'occupation du sol produite avec une résolution de 100m ne sera pas identique à celle produite à une résolution de 1000m (Fig 2.2). Les données spatialisées sur les sols sont généralement produites à partir des données de profils de sols, mesurées ponctuellement. Même si des techniques relativement sophistiquées sont mises en place par les spécialistes des sciences du sol pour étendre l'information ponctuelle en utilisant la structure spatiale des facteurs de pédogenèse etc., il y a encore beaucoup d'incertitudes sur ces données de sol et leur cartographie. De plus, suivant l'échelle, les informations sur le sol sont complètement différentes, notamment en ce qui concerne les propriétés hydrodynamiques. En effet, à grande échelle, les cartes pédologiques servent souvent à décrire des grands ensembles géologiques, alors qu'à des échelles régionales, ces cartes décrivent plus précisément différents types de sols. Au niveau local, les cartes pédologiques sont plus précises pour des applications en

hydrologie car elles décrivent des types de sol auxquels on peut réellement affecter des propriétés hydrodynamiques, contrairement aux plages cartographiques aux échelles supérieures qui comportent une grande variété de types de sols.



Source: <http://www.fas.org/>

Figure 2. 2 : Deux images satellites d'un même endroit à une résolution de 1000m (à droite) et à une résolution de 200m (à gauche)

Les données disponibles pour la modélisation hydrologique spatialisée étant encore largement dominées par des échelles d'observation ponctuelles, les techniques d'interpolation spatiale comme le krigeage sont souvent utilisées pour intégrer les données (mesurées ou observées) à l'échelle de la maille de modélisation. Mais ceci nécessite des hypothèses sur la structure géo-statistique des champs interpolés qui conditionnent la représentativité du résultat.

Néanmoins, les progrès récents en métrologie mais aussi en imagerie satellitale, évoqués dans le paragraphe suivant laissent espérer des progrès significatifs dans les années qui viennent, qui contribueront à réduire le fossé entre résolutions des observations et besoins de la modélisation.

II.3.2. Vers une plus grande compatibilité entre échelle des observations et échelle de modélisation ?

La modélisation hydrologique spatialisée a essentiellement besoin de données qui soient intégrées sur des surfaces plus ou moins grandes. C'est notamment le cas pour l'évapotranspiration qui est souvent obtenue comme le résidu du bilan hydrologique d'un bassin versant. De nouvelles techniques de mesure comme les scintillomètres fournissent des données non pas ponctuelles, mais moyennées sur une étendue spatiale pour la chaleur sensible et/ou pour des flux de chaleur latente le long de transects (Green et al., 2001). L'utilisation de ces mesures intégrées pour la validation des calculs effectués par des modélisations à l'échelle de petits bassins versants est prometteuse (Bsaibes, 2007). Toutefois, ces données n'existent pas encore à l'échelle de bassins versants plus grands.

Avec la disponibilité des données à haute résolution spatiale, grâce notamment aux techniques de la télédétection, les informations spatialisées sont directement disponibles à des résolutions très fines (exemple, occupation des sols, topographie, etc.). Les technologies utilisées en télédétection offrent donc également un grand espoir pour réduire l'écart entre résolution des données mesurées sur le terrain et résolution des données nécessaires aux modélisations hydrologiques spatialisées. En effet, les nouveaux capteurs sont de plus en plus capables d'acquérir des données à des résolutions très fines, fournissant des données avec des précisions impressionnantes. Leur utilisation pour mieux décrire et quantifier les chemins de l'eau devrait permettre des progrès importants en hydrologie dans les années qui viennent.

Néanmoins, il faut rester prudent dans l'utilisation de ces données de télédétection : certaines variables n'ont pas la même signification selon la résolution spatiale des images (exemple, la pente, l'indice foliaire, etc.). Le passage d'une information acquise à haute résolution (ex. l'échelle d'un arbre) à une information à plus faible résolution (ex. l'échelle de la forêt) n'est donc pas une chose aisée. La question fondamentale qui se pose, dans le cadre de l'utilisation de ces informations satellitaires dans la modélisation hydrologique distribuée, est alors la suivante : "Quelle résolution spatiale est requise pour la description

de l'hétérogénéité dans la représentation des processus hydrologiques ?". Cette question est une question ouverte (Puech, 2000).

Cependant, toutes les informations spatialisées nécessaires aux modèles hydrologiques ne sont pas accessibles par ces technologies (exemple, les informations de sub-surface, type de sol, etc.). En effet, les capteurs utilisés en télédétection échantillonnent uniquement la surface du sol et au mieux, les premiers centimètres de la surface continentale. Des informations spatialisées sur la géologie ou la pédologie sont difficilement accessibles par ces technologies. Une recherche multidisciplinaire entre les hydrologues (et plus généralement les spécialistes dans le domaine de l'environnement), les pédologues et les spécialistes des technologies de télédétection pourrait être d'un précieux secours pour faire avancer la recherche sur ces aspects.

II.3.3. La particularité des données sur la pédologie

Il existe un paradoxe dans les progrès réalisés grâce aux nouvelles techniques d'acquisition des données comme les techniques de la télédétection. Alors qu'on est capable de décrire avec une très grande précision la surface continentale, la connaissance du sous-sol ne progresse pas du tout à la même vitesse. Par exemple, il y a un manque considérable de connaissances sur la description des types de sol et des couches géologiques et hydrogéologiques. Ces informations sont pourtant d'une grande importance aussi bien pour la modélisation hydrologique que pour de nombreuses disciplines liées à l'environnement (ex : hydrogéologie, transferts de polluants, etc.).

Le support des observations pour décrire ces paramètres de sol est toujours ponctuel, avec les difficultés liées aux coûts des campagnes d'échantillonnage de sols. Afin de réaliser une cartographie à grande échelle, des hypothèses sur l'organisation spatiale des sols sont nécessaires. En pédologie, des techniques d'interpolation sophistiquées utilisant la géostatistique et la logique floue sont développées pour pallier cette difficulté de cartographie des sols. Cependant, beaucoup d'incertitudes entourent toujours ces méthodes (Favrot, 1989; Robbez-Masson, 1994; Lagacherie et al., 1995; Burrough et al., 1997; Lagacherie and Voltz, 2000; Lagacherie, 2002). Les données disponibles sur les sols sont pour ces raisons assez grossières et ne répondent pas en général aux attentes des

hydrologues qui souhaitent non seulement une cartographie des sols, mais aussi les paramètres hydrodynamiques associés. Même si le travail de d'Herbes et Valentin (1997) en fournit un contre-exemple, il y a de toute évidence une insuffisance dans la collaboration entre les hydrologues et les pédologues. L'initiative de Lin et al. (2006) de promouvoir « l'hydropédologie » comme une discipline créant une synergie entre l'hydrologie et la pédologie est à la fois prometteuse et révélatrice du besoin que cette collaboration revêt pour les sciences environnementales. Toutefois, cette initiative nécessitera du temps pour se concrétiser. Des progrès sont aussi attendus et souhaités sur la caractérisation des sols grâce à l'utilisation des techniques de la géophysique (profondeur des horizons des sols, description plus détaillée des hétérogénéités du sous-sol, évolution de l'eau de sub-surface). A l'heure actuelle néanmoins, la communauté d'utilisateurs des modèles hydrologiques spatialisés devra composer avec la pauvreté des informations relatives aux propriétés des sols. Cet aspect ne devrait pas être perdu de vue lorsque d'autres informations très détaillées sont combinées avec les données sur les sols.

II.3.4. Synthèse sur la résolution spatiale des observations

A partir de l'analyse faite ci-dessus, il est clair que les données nécessaires aux modélisations hydrologiques spatialisées sont rarement disponibles à l'échelle ou à la résolution spatiale requise. Afin d'éviter l'utilisation de données inadaptées et de limiter les incertitudes liées à la recherche de paramètres dits effectifs (souvent dénués de toute réalité physique), il peut être judicieux de modifier les méthodes de représentation des processus : en fonction de la précision des données disponibles, on pourrait très bien représenter des processus hydrologiques de manière simplifiée ou au contraire les représenter précisément en utilisant des équations constitutives adaptées.

Les méthodes de représentation des processus hydrologiques, et donc le niveau de détail requis pour décrire l'hétérogénéité spatiale des bassins versant sont affectés par la disponibilité des données d'entrée. Autrement dit, les données disponibles et leurs résolutions spatiales conditionnent ou tout au moins orientent le choix des méthodes de représentation des processus au sein des modèles hydrologiques.

La question des données disponibles pour la validation revêt aussi une importance cruciale pour la crédibilité de la modélisation hydrologique spatialisée. Certains auteurs commencent à proposer le concept d'observatoires multi-échelles, ce qui permettrait d'aborder les différentes phases de cette validation. Une illustration de ces concepts peut être trouvée dans Reed et al. (2006) (cf Figure 2.3). De plus il a largement été mis en œuvre dans le cadre des observatoires français de recherche en environnement, tels que l'observatoire CATCH (cf Figure 2.4 pour une illustration pour le bassin versant de la Donga au Bénin). Nous ne reviendrons pas, dans ce mémoire, sur cet aspect très important de la modélisation hydrologique : la validation des modèles, qui, faute de temps, n'a pas pu être approfondie dans le cadre de cette thèse.

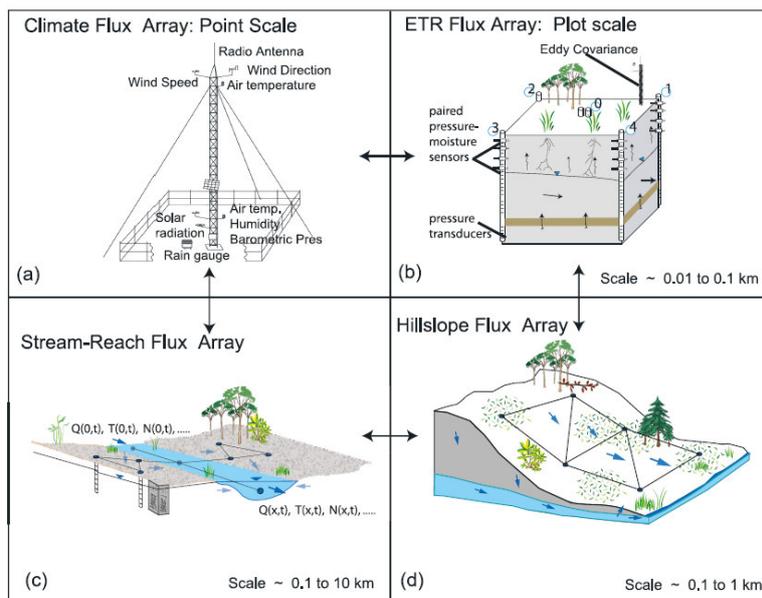


Figure 2. 3: Exemple de stratégie d’observations multi-échelles. (a) échelle locale : mesures des conditions climatiques ; (b) échelle de la parcelle : mesures, par un dispositif aux quatre coins de la parcelle, des flux de surface, du bilan hydrique et des flux dans les sols ; (c) échelle du versant avec une quantification des flux latéraux ; (d) échelle du tronçon de réseau hydrographique et (e) non montré : échelle des sous-bassins versants. (Figure tirée de Reed et al, 2006).

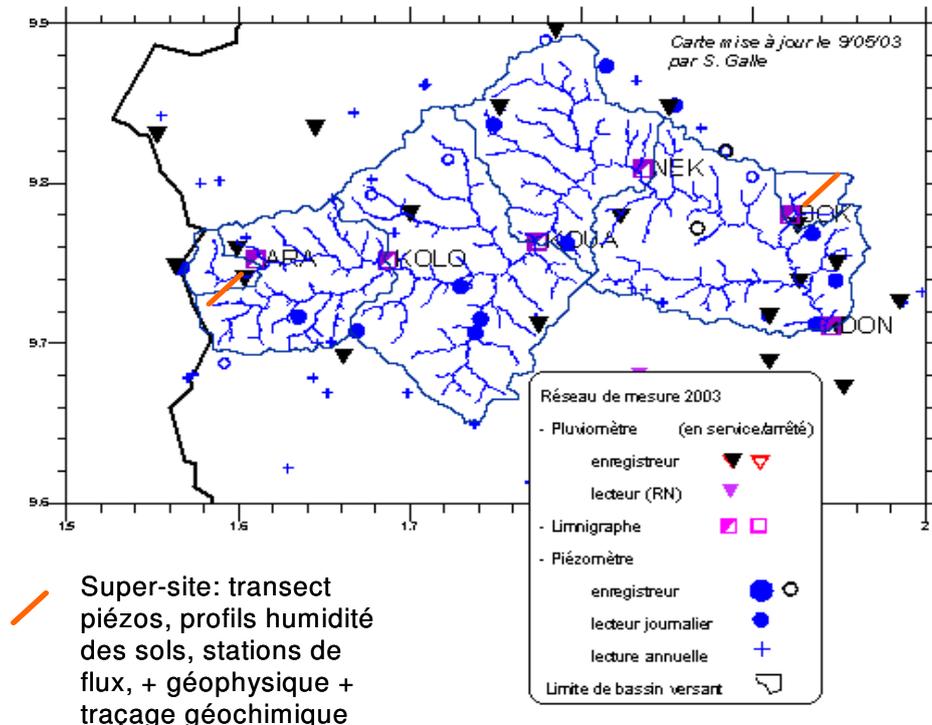


Figure 2. 4 : Exemple du dispositif expérimental déployé sur le bassin versant de la Donga (580 km²) au Bénin dans le cadre du projet AMMA.

II.4. Quels sont les processus hydrologiques actifs ou dominants sur un bassin versant, et quelles sont leurs échelles fonctionnelles?

II.4.1. Les processus hydrologiques couramment modélisés

Parmi les premiers modèles hydrologiques spatialisés, on trouve des schémas de type hortonien (Horton, 1933). Dans ces schémas, on considère que les principaux processus hydrologiques sont l'infiltration et le ruissellement. Au sein de ces modèles, le bassin versant est souvent découpé en surfaces dites 'isochrones', auxquelles sont affectées des temps de transfert (ou temps de concentration). La propagation de l'hydrogramme peut alors se faire en utilisant des équations de type onde cinématique. Il a fallu attendre la séparation des hydrogrammes grâce aux techniques de marquage isotopique pour se rendre compte que les schémas de type 'hortonien' n'étaient pas les seuls à contribuer au ruissellement puis à la formation des débits (Crouzet et al, 1970, cités par Gineste, 1997). En effet, on s'est rendu compte que les hydrogrammes étaient composés principalement des eaux présentes dans le sol avant les événements pluvieux (Grésillon, 1994 cités par Gineste, 1997). Les hydrologues ont alors pu prendre conscience de la complexité, selon l'échelle, des processus hydrologiques qui génèrent les écoulements sur un bassin versant. Beaucoup d'autres processus ont été identifiés comme prenant aussi une part active dans le fonctionnement des bassins versants. Parmi les plus courants, on peut citer de façon non exhaustive : l'évapotranspiration des plantes, l'interception par le couvert végétal, le ruissellement de surface, le ruissellement sur surface saturée, l'infiltration, les écoulements dans les rivières, les écoulements dans la zone saturée du sol, les échanges entre le milieu souterrain et la surface, la fonte des neiges, les écoulements latéraux ou hypodermiques, etc..

Les processus hydrologiques mentionnés ci-dessus ne sont pas actifs simultanément sur un bassin versant donné. L'importance d'un ou de plusieurs de ces processus hydrologiques dépend de la spécificité de chaque bassin versant (climat, contexte géologique, etc.). En effet, plusieurs auteurs ont montré que le ruissellement de type hortonien est important dans les écoulements sur les bassins versants du Sahel (Rodier et

al., 1984; Rodier, 1992; Nonguierma and Dautrebande, 1995). Par contre beaucoup d'auteurs se sont interrogés sur la réalité de ce mécanisme dans les zones humides (Ward, 1984), où les écoulements latéraux semblent prépondérants.

Les processus hydrologiques actifs sont donc variables d'un bassin versant à l'autre. Ils dépendent souvent de conditions particulières telles que le contexte climatique, géologique, hydrogéologique etc.. Il est donc important d'avoir une bonne connaissance des processus hydrologiques actifs (au travers d'études, d'observations, de connaissances empiriques, etc.) sur un bassin versant avant de choisir les processus à intégrer dans une modélisation hydrologique spatialisée de ce bassin.

II.4.2. Les processus hydrologiques et leurs échelles fonctionnelles

Beaucoup de recherches ont été menées sur la détermination d'échelles caractéristiques des processus hydrologiques. Blöschl et Sivapalan (1995) fournissent un guide pour la définition d'une discrétisation spatiale et temporelle appropriée pour différents processus hydrologiques, indépendamment d'un modèle hydrologique particulier. Cette classification des échelles spatiales et temporelles caractéristiques des différents processus hydrologiques a, depuis lors, largement été reprise dans la littérature. Récemment, les travaux de Skøien et al (2003) et Skøien and Blöschl (2006) ont essayé de confirmer la validité de ce schéma. Ils ont réalisé une analyse de séries de pluie, de lames d'eau écoulées, de niveaux d'eau de la nappe et d'humidité du sol, en utilisant les techniques de la géostatistique. Ils ont déterminé des échelles temporelles caractéristiques de l'ordre de la journée pour la pluie et du mois pour les écoulements. Ils montrent aussi que le niveau d'eau dans les nappes n'est pas stationnaire. Dans l'espace, ils montrent que la pluie présente des propriétés fractales sans échelle caractéristique clairement identifiée, alors que les écoulements seraient non stationnaires, mais aussi sans propriétés fractales. La Figure (2.5) tirée de leur article montre comment les résultats de leur analyse se reportent sur le diagramme original de Blöschl et Sivapalan (1995), confirmant la pertinence de ce dernier.

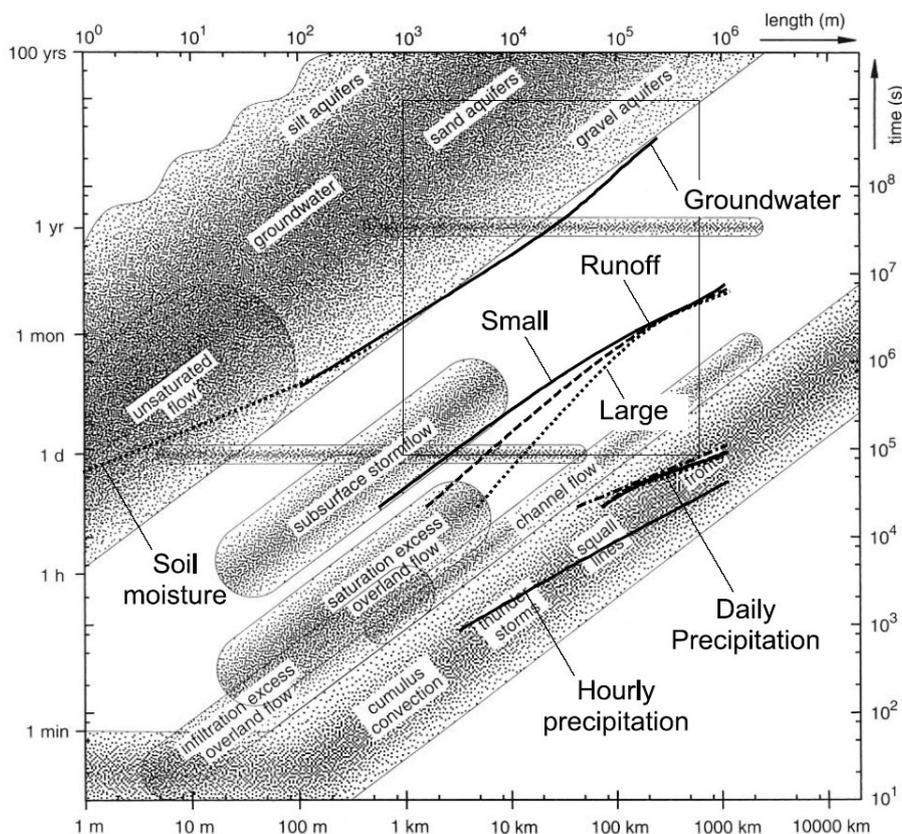


Figure 2. 5 : Echelles spatiales et temporelles caractéristiques des processus hydrologiques d'après un diagramme original de Blöschl et Sivapalan (1995). Les traits noirs correspondent aux résultats de Skoien et al. (2003). Figure tirée de Skoien et al. (2003)

La Figure (2.5) montre néanmoins que, pour un même processus, il existe quand même une gamme d'échelles spatiales et temporelles assez large, ce qui laisse malheureusement encore beaucoup de latitude pour le choix d'une échelle de discrétisation pertinente pour l'hydrologie.

Par ailleurs, l'expérience montre que les processus hydrologiques dominants ne sont pas nécessairement les mêmes quand on passe d'une échelle à l'autre. On peut observer des effets de seuil, par exemple sur le déclenchement du ruissellement en sortie d'un versant. En effet, les surfaces saturées sur un bassin versant peuvent se propager de proche en proche de l'amont vers l'aval où elles rejoignent la nappe en fond de vallée. A partir de ce moment, toutes les formations superficielles sont saturées, et tout ruissellement supplémentaire provenant de l'amont est alors connecté directement au réseau de drainage

principal. Dans ces cas, ce ne sont plus seulement les zones proches de ce réseau principal qui alimentent les crues, mais tout le bassin versant. Il s'en suit alors une montée rapide des crues (Cosandey and de Oliveira, 1996). Ce phénomène de seuil existe également à très fine échelle pour les transferts dans un sol, comme le montre la Figure (2.6) tirée de Vogel et Roth (2003). Selon l'échelle à laquelle on observe le sol, on peut voir apparaître différents niveaux d'organisation, qui auront une influence, elle aussi hiérarchisée, sur les processus hydrologiques : la structuration en horizons de sol, la distinction entre matrice du sol et macropores, puis entre pores et matrice poreuse. A l'échelle des bassins versants, différents auteurs ont aussi montré une évolution des processus dominants lorsque la taille des bassins augmente, qui se traduit par une diminution du coefficient de ruissellement avec l'augmentation de la taille du bassin (exemple, Bergkamp, 1998; Braud et al., 2001; Cerdan et al., 2004). Ces résultats traduisent également les effets de seuil en hydrologie mentionnés ci-dessus.

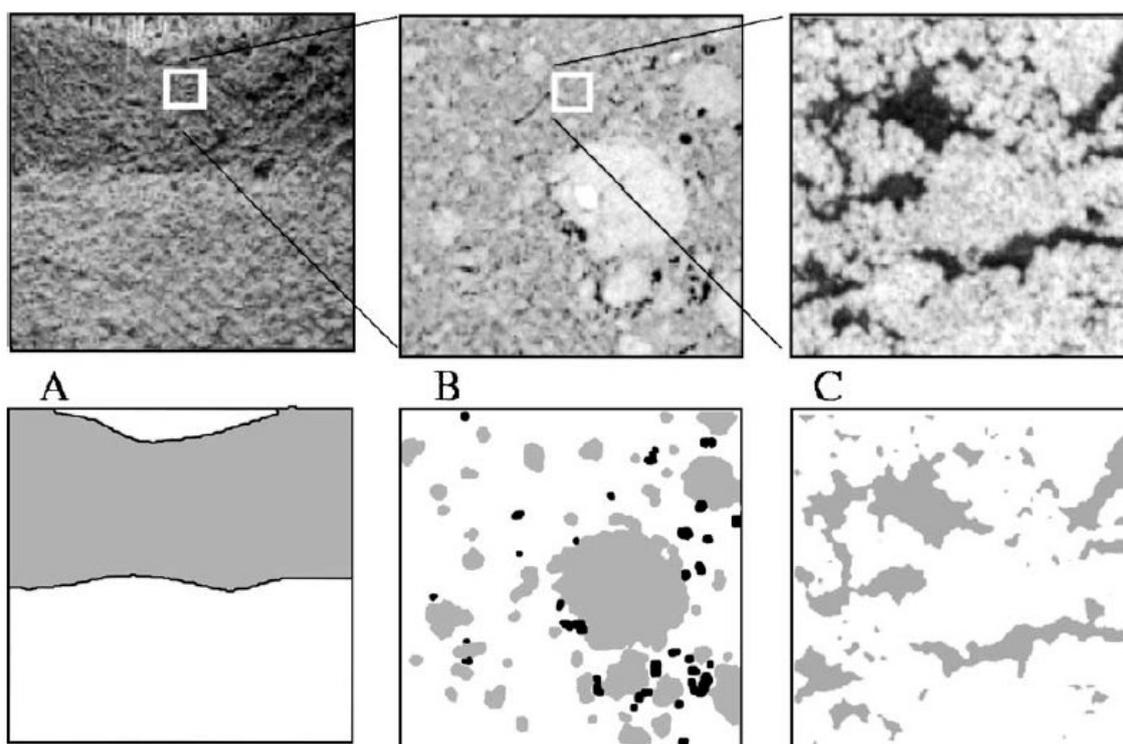


Figure 2. 6 : Structure d'un sol de type limoneux obtenue par observation à différentes échelles. En haut à gauche : photographie d'un profil de sol de largeur environ 1m. En haut au milieu : tomographie aux rayons X de l'horizon A, largeur environ 0.1m, resolution 0.5 mm/pixel, les couleurs grisées sont proportionnelles à la densité sèche avec les pores apparaissant en couleur sombre. En haut à droite : Micor-tomographie aux rayons X, largeur, 0.01m, resolution 0.04 mm/pixel. Les pores sont en couleur sombres. En bas : interprétation des observations en terme d'unités fonctionnelles du sol. En bas à gauche : 2 horizons

de sol. En bas au milieu : agrégats denses (gris), matrice du sol sans structure (blanc) et quelques macropores (noir). En bas à droite : pores (gris) et matrice poreuse (blanc). Figure tirée de Vogel et Roth (2003).

Beaucoup de facteurs peuvent expliquer l'influence de l'échelle dans les processus dominants. On peut citer l'existence de macropores, les écoulements préférentiels, l'influence locale de la topographie et la variabilité de l'occupation des sols, qui peuvent avoir un impact sur l'apparition de phénomènes à effets de seuil (voir des exemples dans Bergkamp, 1998; Zehe et al., 2005; Lehmann et al., 2006; Sidle, 2006).

En fonction des processus dominants à prendre en compte et de leurs échelles caractéristiques ou fonctionnelles, la discrétisation spatiale ne devrait pas être la même. Cette question ne devrait pas être occultée au moment du choix de la discrétisation spatiale pour une modélisation hydrologique distribuée. *Cependant, il n'existe pas encore une règle absolue de choix d'une échelle appropriée pour la représentation des différents processus hydrologiques. En principe, une large plage d'échelles (et non une échelle unique) devrait être pertinente pour la représentation d'un processus hydrologique particulier.*

II.5. Quelle méthode pertinente de représentation des processus hydrologiques, avec quelle finesse des mailles de modélisation?

La représentation d'un processus dans une modélisation hydrologique nécessite le choix de deux éléments complémentaires. Le premier est la résolution spatiale des mailles de modélisation et le second est le choix d'une méthode de conceptualisation du processus à représenter. Si nous empruntons le vocabulaire des sciences atmosphériques, le choix de la résolution spatiale des mailles de modélisation conduit à la séparation des processus représentés de manière explicite (c'est-à-dire pour lesquels l'évolution des variables d'état est calculée grâce à des équations physiques) de ceux qui sont paramétrisés² (c'est-à-dire pour lesquels les variables d'état correspondantes ne sont pas calculées par une équation d'évolution mais pour lesquels une représentation simplifiée est adoptée). En d'autres termes, en fonction de la résolution spatiale des mailles de modélisation, certains processus peuvent être représentés explicitement ou représentés de manière conceptuelle (ou paramétrisée). L'adoption de ce vocabulaire dans la littérature hydrologique serait de nature à limiter les discussions sur la nature conceptuelle ou à base physique des modèles hydrologiques. Certains processus pourraient donc être représentés de manière conceptuelle (ou paramétrisés) à une résolution et représentés de manière explicite (ou avec des équations physiques) à une autre résolution. Voyons maintenant comment nous pourrions appliquer ces principes aux différentes approches rencontrées dans la littérature.

² Dans ce contexte, le mot 'paramétrisation' ne devrait pas être confondu avec l'estimation de paramètres pour lequel ce mot est souvent utilisé en hydrologie. Il correspond à la conceptualisation dans le jargon utilisé en hydrologie.

II.5.1. Quelles méthodes de représentation des processus ?

Les équations physiques telles que les équations de Richards (infiltration, recharge de nappe etc.), les équations de Boussinesq (transferts dans la zone saturée), et les équations de Saint-Venant (écoulement de surface et dans les rivières) sont largement utilisées pour la simulation de différents processus hydrologiques. La plupart de ces équations ont été établies et/ou validées à petite échelle : échelle ponctuelle ou échelle du laboratoire. A ces échelles, la plupart des paramètres utilisés dans la résolution de ces équations (pente, conductivité hydraulique, rugosité de surface, etc.) peuvent être mesurés directement sur le terrain. A des échelles plus grandes, on suppose en pratique que la forme de ces équations reste toujours valide. On parle alors souvent dans la littérature de méthodes de modélisation ascendantes ou « réductionnistes » (Gottschalk et al., 2001): on part d'une connaissance à petite échelle et on essaie de l'étendre à des extensions spatiales plus grandes. On utilise alors des paramètres dits 'effectifs'. Ces paramètres sont définis traditionnellement par des méthodes dites d'agrégation ou de désagrégation, selon qu'on passe d'une petite échelle à une grande échelle ou vice versa (Blöschl and Sivapalan, 1995). L'objectif de ces techniques est l'identification pour les différents processus, des relations fonctionnelles entre une échelle et une autre (voir un exemple dans Viney et Sivapalan, 2004). Cette approche est remise en cause par plusieurs auteurs (Beven, 1995; Bashford et al., 2002), qui trouvent que la recherche de paramètres effectifs est un problème majeur en modélisation hydrologique. En effet ces paramètres effectifs sont souvent estimés par des méthodes statistiques plus ou moins complexes, qui nécessitent parfois de nombreux paramètres supplémentaires. Il y a donc des risques d'aggraver la sur-paramétrisation des modèles distribués. Par ailleurs, ces auteurs estiment que les problèmes de non-linéarité et de l'hétérogénéité spatiale rendent encore plus difficile la recherche de paramètres effectifs. Les auteurs suggèrent, soit de développer des méthodes de mesures adaptées aux mailles de modélisation, soit d'orienter les efforts sur la recherche des équations physiques décrivant les processus à des échelles moyennes (non ponctuelles ou intermédiaires). On parle alors dans la littérature d'approches descendantes (Klemes, 1986). Ces méthodes se fondent sur l'analyse des données disponibles dont on se sert pour proposer une modélisation (ou conceptualisation) de la relation pluie-débit

par exemple. L'objectif est souvent d'aboutir à des modèles parcimonieux, avec un nombre faible de paramètres, qui puissent être identifiés ou estimés à partir des données disponibles. On peut trouver deux applications intéressantes de ce concept dans Jothityangkoon et al (2001) et Eder et al. (2003). Ces auteurs ont proposé des modélisations pluie-débit à l'échelle annuelle, mensuelle et journalière, en augmentant progressivement la complexité de la modélisation proposée, jusqu'à ce qu'une simulation satisfaisante du comportement des bassins soit obtenue. Eder et al. (2003) ont de plus essayé de n'introduire que des paramètres qu'ils puissent estimer a priori à partir des données disponibles (comme par exemple, la taille des réservoirs sol estimée à partir d'informations fournies par une carte pédologique). Cette précaution peut permettre une transposition des résultats à d'autres bassins versants non jaugés, ce qui ne serait pas le cas si les paramètres étaient uniquement estimés par optimisation, en essayant de faire coller au mieux débits simulés et débits observés. Ces deux articles montrent que, selon le contexte climatique et les caractéristiques des bassins, des modèles très différents peuvent émerger d'une telle analyse. Jothityangkoon et al. (2001) travaillent sur un bassin versant situé en zone semi-aride, dominé par des épisodes pluvieux brefs et du ruissellement par excès d'infiltration (Horton, 1933). Leur modélisation s'appuie sur une cascade de réservoir de capacité d'infiltration variable. Eder et al. (2003) s'intéressent à un bassin versant alpin et ils introduisent progressivement les écoulements liés à la fonte des neiges et les écoulements latéraux pour reproduire le comportement de leur bassin d'étude.

Les approches ascendantes et descendantes présentées ci-dessus sont souvent opposées dans la littérature hydrologique. Une autre alternative proposée dans le cadre de cette thèse, est d'essayer de tirer profit des avantages de chacune de ces méthodes en développant des outils de modélisation modulaire qui permettent de changer la manière de représenter les processus selon la pertinence et la précision des données disponibles. La plupart des processus hydrologiques présentés dans le Paragraphe (II.4) peuvent en effet être représentés par des équations physiques mentionnées plus haut ou par d'autres équations plus empiriques. Par exemple, l'infiltration peut très bien être simulée avec les équations différentielles de type 'Richards' ou de manière plus simplifiée avec des équations de type 'hortonien' ou de type 'Green and Ampt' (1911) qui sont basées sur la notion de capacité d'infiltration. Il est évident que la détermination de l'infiltration par les

mécanismes basés sur la capacité d'infiltration n'a pas les mêmes exigences en terme de découpage spatial et de données à fournir que l'utilisation des équations de type Richards pour simuler ce processus.

II.5.2. Approches de découpage de l'espace utilisées dans les modèles hydrologiques existants

Dans les sciences atmosphériques, la relative homogénéité de l'atmosphère rend plus simple le choix d'une résolution spatiale et des processus à résoudre. En hydrologie, la tâche est plus compliquée, en raison de la complexité du bassin versant, de sa nature hiérarchisée autour d'un réseau hydrographique et de son hétérogénéité spatiale. C'est pour ces raisons que plusieurs méthodes de discrétisation spatiale (régulière ou irrégulière) sont proposées par différents auteurs pour gérer cette complexité du paysage et pour représenter les processus hydrologiques.

Beaucoup de modèles hydrologiques spatialisés proposent l'utilisation de grilles régulières où les équations physiques établies à l'échelle ponctuelle sont utilisées et où les paramètres effectifs sont à déterminer en fonction de la résolution de la grille utilisée. C'est le cas des modèles tels que MIKE-SHE (Abbott et al, 1986a, 1986b) dont le fonctionnement est représenté sur la Figure (2.7), LISFLOOD (Bates and De Roo, 2000), ECOMAG (Motovilov et al., 1999), TOKPAPI (Ciarapica and Todini, 2002), etc.. Certains auteurs sont opposés à cette approche, soutenant qu'en raison des équations utilisées l'approche est finalement plus conceptuelle que réellement physique (exemple, Gottschalk et al., 2001). Les paramètres nécessaires ne sont pas mesurables sur le terrain à l'échelle des mailles de modélisation (Beven, 2002b) et sont parfois dénués de toute réalité physique à l'échelle de modélisation. Le choix de la taille des grilles est rarement explicité et ne semble pas toujours tenir compte des processus à modéliser, mais semble plutôt conditionné par les contraintes liées à la résolution des données disponibles. Des exceptions peuvent néanmoins être trouvées dans les travaux de Beltring et al (1999) et de Motovilov et al. (1999) qui utilisent le modèle ECOMAG dans le cadre du projet NOPEX. Dans ces travaux, la taille des mailles de modélisation est déterminée par une analyse de la stationnarité des valeurs moyennes des données ponctuelles (humidité des

soils, niveaux de nappe) calculées sur des mailles de taille croissante. Les données ont été obtenues en s'appuyant sur une stratégie d'échantillonnage spécifique sous forme de grilles emboîtées.

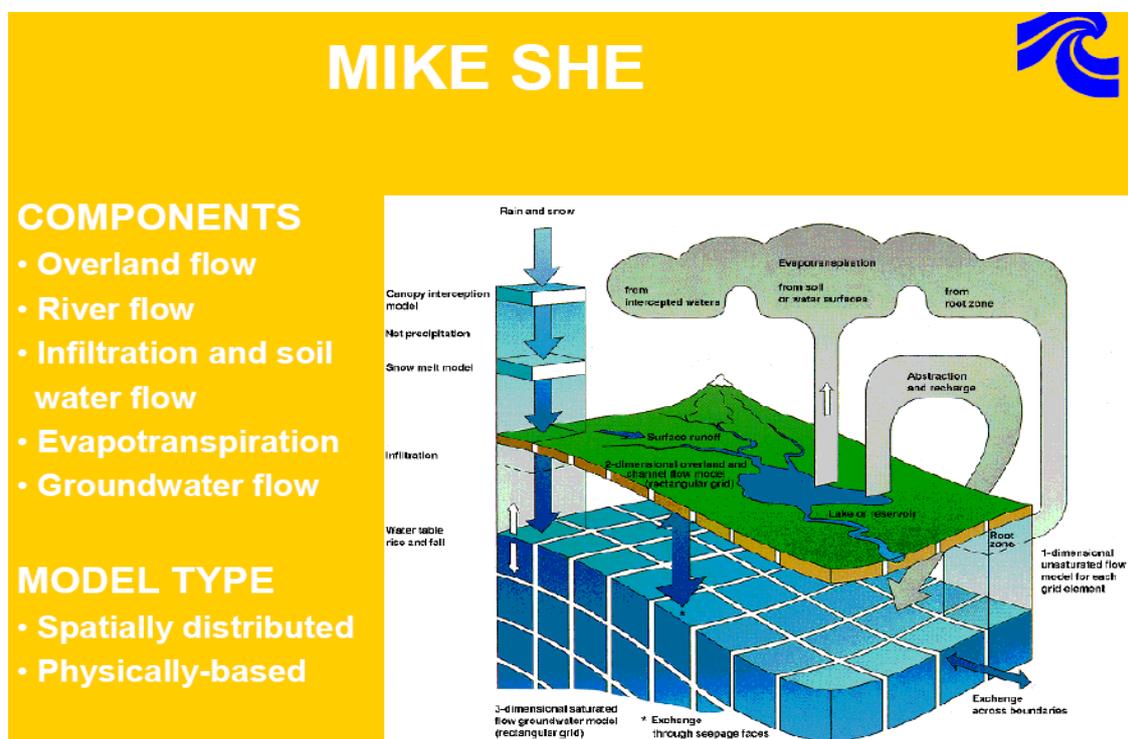


Figure 2. 7 : Illustration des composants et du fonctionnement de MikeSHE (sources : www.dhi.fr)

L'une des principales critiques à l'utilisation de grilles régulières est liée à la difficulté, dans ces représentations, de prendre en compte l'hétérogénéité du paysage. La tâche de paramétrisation est alors assez difficile puisque le paysage naturel n'est pas organisé en pixels et que les mailles carrées moyennent les hétérogénéités. Afin de contourner ces difficultés, plusieurs auteurs ont proposé différentes approches. Grayson et al (1992a) ont proposé une discrétisation spatiale des bassins versants, s'appuyant sur les courbes de niveau (Figure 2.8). Cette méthode de discrétisation a été utilisée dans le modèle THALES (Grayson et al., 1992a) et dans le modèle TOPOG (Vertessy et al, 1994). Plus récemment, des méthodes de discrétisation spatiale fondées sur l'utilisation des TINs (Triangular Irregular Networks) ont été proposées (Figure 2.9). La méthode de discrétisation en TINs offre un bon compromis entre précision et flexibilité de représentation de l'hétérogénéité comme le montrent les performances du modèle tRIBs (Ivanov et al, 2004). D'autres auteurs préfèrent utiliser des mailles de modélisation plus proches des éléments du paysage. Ainsi, la détermination de zones contributives à

l'écoulement dans un bassin versant s'appuie sur le concept de similarité hydrologique, et les zones correspondantes peuvent être déterminées par exemple par l'indice topographique (Beven et al., 1979). Dans ces zones contributives, on considère que les réponses hydrologiques du bassin versant sont similaires. Ce concept est utilisé dans le modèle TOPMODEL. D'autres auteurs utilisent la notion de 'Hydrological Response Unit' (HRU) (Flügel, 1995) qui a été utilisée dans le modèle SWAT (Neitsch et al, 2002). Les HRUs sont composées d'une combinaison unique de facteurs comme l'occupation des sols, le type de sol et le type de gestion des sols. L'un des inconvénients des HRUs est qu'ils fusionnent les unités de petites tailles avec de grandes unités, par le jeu de lissages cartographiques. Ceci est vraisemblablement à la base de pertes d'informations pouvant être importantes puisque, d'un point de vue hydrologique, les unités de petites tailles peuvent servir de support à certains processus hydrologiques importants (comme les zones humides, les ripisilves, les zones tampons, etc.).

Le concept de Surface Élémentaire Représentative (REA) proposé par Wood et al (1988), est un autre exemple de discrétisation spatiale. Ici, on recherche une échelle caractéristique au-delà de laquelle la localisation géographique des objets est négligée et gérée par des méthodes statistiques. Dans l'approche REW (Representative Elementary Watershed) proposée par Reggiani et al. (1998; 1999; 2000; 2001; 2005), le bassin versant est divisé en sous-bassins ou REWs (Figure 2.10) où on distingue, quelle que soit l'échelle, cinq zones (Saturée, non saturée, surface, Surface saturée et Rivière). Les cinq zones correspondent à divers processus hydrologiques. Les équations décrivant les processus hydrologiques sont formulées à l'échelle des sous-bassins et sont invariantes quelle que soit l'échelle. En revanche, les flux entre REWs et entre les différentes zones sont à définir pour chaque échelle. L'intérêt de cette méthode est de transformer le problème de formulation des processus à une échelle donnée en un problème de recherche de relations dites de fermeture à différentes échelles. On peut trouver des exemples de ces relations de fermeture et de formulation des flux entre zones ou REWs dans (Reggiani and Rientjes, 2005; Zhang et al, 2005). Toutefois, les travaux de Varado et al (2006) ont montré, sur un cas d'étude au Bénin où le modèle REW de Reggiani and Rientjes (2005) a été utilisé, qu'il pouvait être nécessaire de prendre en compte l'hétérogénéité au sein des REWs, spécialement dans la zone non saturée pour espérer reproduire correctement différentes

variables de sortie, à différentes échelles d'observation (débits, niveaux de nappe, humidité des sols).

En conclusion, il apparaît nécessaire de combiner les avantages de différentes approches de modélisation ascendantes ou descendantes, afin de tirer avantage des points fort de chaque approche, de manière à avoir une discrétisation spatiale compatible avec les processus à modéliser.

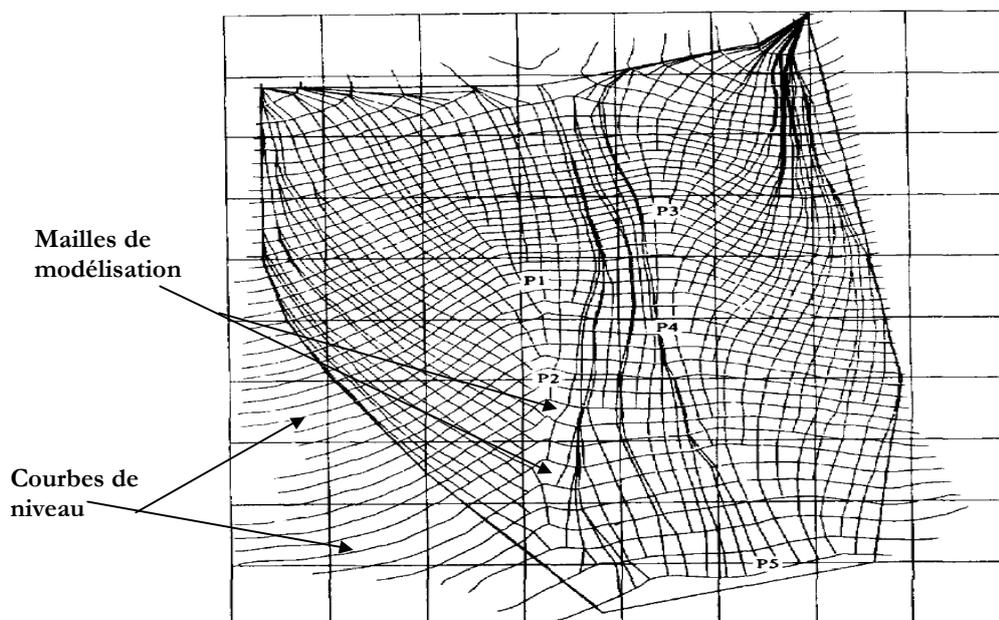


Figure 2. 8 : Exemple de découpage spatial d'un bassin versant en utilisant des courbes de niveau (Source : Grayson et al, 1992a).

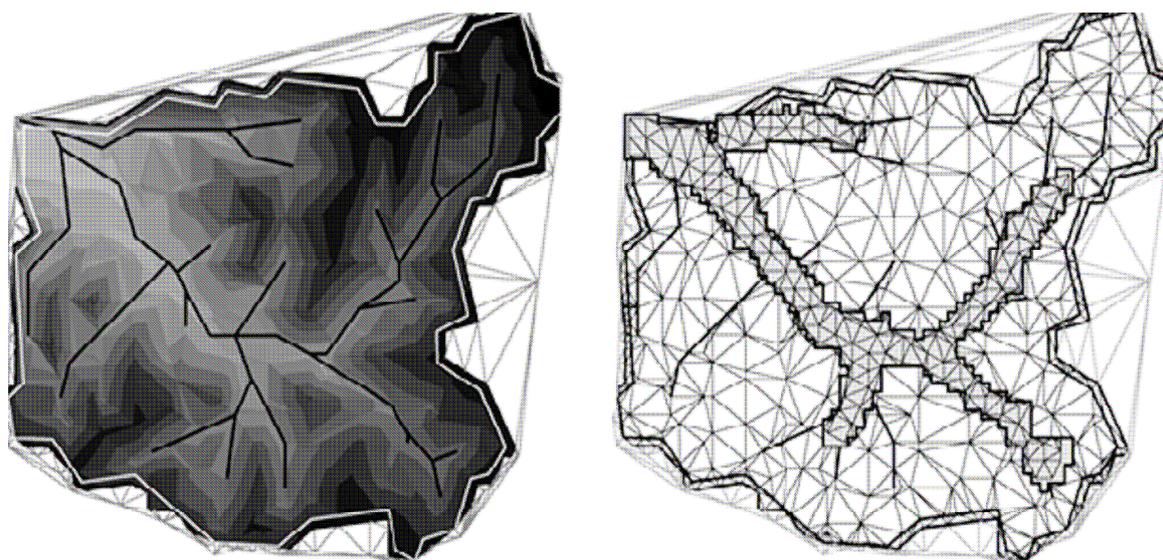


Figure 2. 9 : Exemple de découpage spatial d'un bassin versant en TINs (Source : Ivanov et al, 2004)

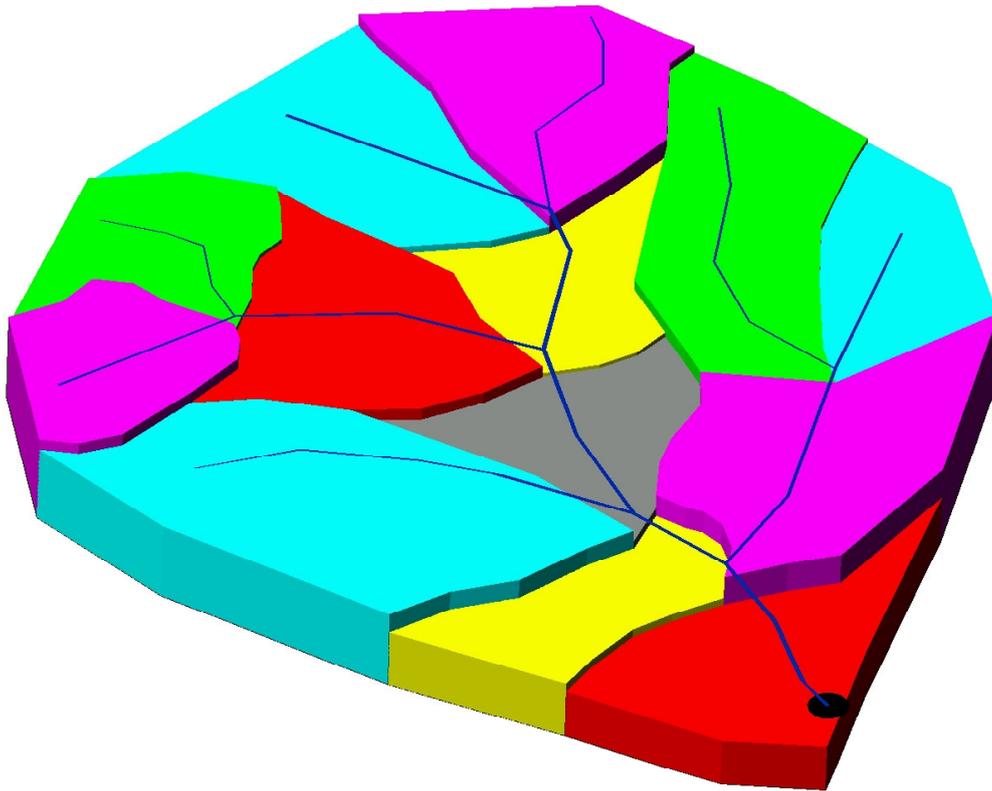


Figure 2. 10 : Exemple de découpage d'un bassin versant en sous-bassins versants.

II.6. Conséquences pour la définition des mailles de modélisation et la représentation des processus : proposition pratique.

II.6.1. Quelle approche pour la discrétisation spatiale dans les modèles hydrologiques spatialisés ?

La synthèse bibliographique précédente présente un tableau qui prouve la grande diversité des réponses apportées par la communauté hydrologique aux questions soulevées dans l'introduction de ce chapitre. On y trouve plusieurs propositions d'approche de discrétisation spatiale. Néanmoins, aucune méthode existante n'est suffisamment flexible pour permettre d'adapter la discrétisation spatiale des bassins versants en fonction des processus hydrologiques dominants et de leurs échelles fonctionnelles. En effet comme nous l'avons rappelé précédemment, il est difficile de définir une échelle unique qui permette de représenter explicitement tous les processus hydrologiques actifs. Ceci est d'autant plus vrai que les échelles fonctionnelles des différents processus ne sont pas toujours les mêmes. Dans la suite de ce travail, nous avons adopté les propositions de Leavesley et al (2002). Ils suggèrent que, pour un bassin versant donné et un problème de modélisation donné, on remplace la question "Quel modèle hydrologique est le plus approprié pour un objectif et un jeu de critères donné ?" par la question suivante : "Quelle combinaison de processus hydrologiques est la plus appropriée pour répondre à la question posée ?". Cette approche est cohérente avec l'approche descendante mentionnée précédemment, et aussi avec la reconnaissance de l'unicité de chaque bassin versant (Beven, 2003). Cette approche permet de construire un modèle spécifique pour des objectifs spécifiques. *Pour tenir compte des données disponibles, nous reformulons la question de Leavesley et al (2002) : "Quelle combinaison de processus hydrologiques est la plus appropriée pour répondre à la question posée ?", par la question suivante "Quelles combinaisons de processus hydrologiques et quelles méthodes de représentation de ces processus sont les plus appropriées pour*

répondre à la question posée, en tenant compte des données disponibles?". Cette démarche conduit naturellement à considérer l'utilisation d'un outil de modélisation hydrologique modulaire, multi-échelles, où les processus sont développés comme des composants indépendants qu'on peut assembler entre eux. Chaque processus est alors caractérisé par les différentes méthodes associées à une échelle de discrétisation à laquelle il peut être représenté et par ses possibilités de couplage avec d'autre processus. Une approche similaire a été adoptée dans le modèle MMS (Leavesley et al, 1996) qui est une plate-forme de modélisation environnementale dotée de modules de modélisation hydrologique. Cette approche se retrouve de plus en plus dans la littérature, et la notion de plate-forme est de plus en plus utilisée pour sa mise en œuvre (Argent, 2004; Kralisch et al, 2005; Krause et al, 2005).

II.6.2. Proposition pratique sur la structure des modèles hydrologiques spatialisés

Dans le cadre de cette thèse, nous proposons une représentation du système hydrologique basée sur la synthèse présentée dans les paragraphes ci-dessus. L'approche proposée est axée sur l'utilisation des méthodes existantes de représentation des processus hydrologiques et sur un outil de modélisation flexible et modulaire permettant d'associer différents processus pour la création de modèles. Cette approche permettrait de concevoir des modèles hydrologiques pertinents en fonction des objectifs de modélisation et des données disponibles. Concrètement, l'approche proposée s'appuie sur une démarche rigoureuse allant de l'analyse des données disponibles, à l'étude des processus dominants, au choix des méthodes de représentation des processus et au découpage spatial adapté aux échelles fonctionnelles des processus dominants. Une plate-forme sera utilisée pour implémenter les différents processus hydrologiques et pour créer des interfaces permettant le couplage de processus. On pourra alors procéder à l'assemblage des processus hydrologiques (chacun ayant été, autant que faire se peut, représenté avec ses échelles spatio-temporelles caractéristiques), pour la création de modèles particuliers, adaptés à des objectifs spécifiques.

La démarche ci-dessus nécessite une approche globale pour la discrétisation du bassin versant permettant de représenter l'hétérogénéité du paysage de manière efficace et cohérente avec les processus hydrologiques dominants à modéliser et les données disponibles. A cet effet, nous proposons une discrétisation spatiale du bassin versant selon trois niveaux emboîtés :

□ Le premier niveau de discrétisation est le sous-bassin, délimité grâce à un modèle numérique de terrain et à la structure hiérarchique du réseau hydrographique. Les sous-bassins peuvent être plus ou moins grands en fonction de l'ordre de Strahler minimal utilisé.

□ Si les sous-bassins sont grossiers pour les processus à modéliser, et en fonction des données disponibles, la variabilité spatiale au sein des sous-bassins versants peut être représentée à travers un second niveau de discrétisation : les hydro-paysages. Les hydro-paysages peuvent inclure différents facteurs tels que la topographie, l'occupation des sols, la pédologie, la géologie, etc., mais aussi les discontinuités hydrologiques comme les haies, les talus, les discontinuités géologiques, etc.. Il est à noter qu'en fonction de la taille des bassins versants, la méthode de détermination des hydro-paysages ne sera pas la même. Pour les bassins de petite taille (quelques km²), une description explicite des différents éléments du paysage est possible lorsque les données correspondantes sont disponibles. Pour les grands bassins, il est souvent impossible de représenter explicitement chaque objet du paysage. Des simplifications sont alors nécessaires pour adapter les hydro-paysages aux processus dominants. Nous allons proposer une méthodologie pour la détermination des hydro-paysages sur les grands bassins versants dans le chapitre suivant. Enfin, les hydro-paysages peuvent être discrétisés verticalement pour prendre en compte l'hétérogénéité verticale des sols.

□ En fonction des processus à représenter et des contraintes numériques liées à la résolution de leurs équations (exemple : la convexité des mailles), un troisième niveau de discrétisation peut être nécessaire pour obtenir des mailles de modélisation aptes à représenter de façon pertinente les processus hydrologiques choisis.

L'approche proposée ci-dessus conduit à l'obtention de mailles non structurées ayant des géométries irrégulières, avec des formes rarement utilisées en

hydrologie. L'avantage de ce type de découpage de l'espace est de mieux tenir compte de l'hétérogénéité des surfaces continentales. En revanche, leur géométrie complexe rend délicate l'utilisation des schémas numériques classiquement disponibles pour la résolution d'équations aux dérivées partielles (comme les différences finies). S'appuyer sur ce type de géométrie nécessite donc d'utiliser ou d'adapter les méthodes numériques (exemple les volumes finis) qui gèrent ce genre de géométrie, lors de la conception des modules de simulation des différents processus hydrologiques. Dans la troisième partie, nous illustrerons comment ce type de géométrie peut être géré pour la simulation de processus hydrologiques.

Dans le Chapitre (III), nous détaillerons les différentes étapes de la méthodologie de découpage spatial proposée: le découpage en sous-bassins puis la détermination des zones homogènes (ou hydro-paysages), avant d'en illustrer l'application à l'aide de données disponibles sur le Haut-bassin de la Saône au Chapitre (IV).

CHAPITRE III "Détermination des mailles de modélisation en hydrologie spatialisée: principes et méthodes utilisés pour le découpage spatial des bassins versants"

Comme nous l'avons mis en évidence dans le chapitre précédent, il n'est pas souvent facile d'obtenir une discrétisation spatiale qui soit compatible avec les processus hydrologiques dominants à représenter. En effet, comme nous l'avons souligné précédemment, les processus hydrologiques se caractérisent par une grande variété d'échelles fonctionnelles. Ceci devrait conduire en hydrologie spatialisée à des discrétisations spatiales différentes selon les processus hydrologiques à représenter (lesquels dépendent des objectifs de modélisation). Dans la littérature, il n'existe pas beaucoup de propositions méthodologiques sur la démarche à adopter pour assurer la compatibilité entre les mailles de modélisation (issues de discrétisations spatiales) et l'échelle fonctionnelle des processus à modéliser. Nous proposons une méthodologie globale de discrétisation du bassin versant permettant de représenter l'hétérogénéité du paysage de manière efficace et cohérente avec les objectifs fixés et les données disponibles.

Le diagramme de la Figure (3.1) décrit les différentes étapes de la procédure de découpage spatial proposée. Dans un premier temps, on définit les objectifs de la modélisation en fonction du (des) problème(s) à résoudre. Ensuite, on déduit de ces objectifs les processus hydrologiques à prendre en compte pour répondre aux questions posées. En fonction des données disponibles, on choisit les méthodes de représentation des processus à prendre en compte dans la modélisation. La confrontation avec les données réellement disponibles peut conduire à revenir sur les choix de représentation des processus hydrologiques si les

données nécessaires ne sont pas toutes disponibles. On peut même être amené à revenir sur les objectifs si ces derniers ne peuvent être atteints avec l'information disponible.

Une fois les processus et leur mode de représentation choisis, on peut aborder le choix de la discrétisation spatiale. Comme nous l'avons introduit dans le chapitre précédent, nous proposons de procéder par étapes, avec la possibilité d'utiliser trois niveaux de discrétisation spatiale emboîtés :

□ **Le premier niveau de discrétisation est le sous-bassin**, délimité à l'aide d'un modèle numérique de terrain et de la structure hiérarchique du réseau hydrographique (Figure 3.2 à gauche). Nous verrons que ce découpage peut être plus ou moins fin selon l'ordre de Strahler choisi, pour représenter le réseau hydrographique. Si ce premier découpage est compatible avec les méthodes retenues pour la représentation des processus, la procédure de discrétisation peut s'arrêter à ce niveau. Si au contraire, il est nécessaire de décrire les hétérogénéités à l'intérieur des sous-bassins, on passe à l'étape suivante.

□ **Le second niveau de discrétisation est constitué par les hydro-paysages**. Ce sont des zones homogènes conçues avec les données disponibles et dont la résolution spatiale doit être compatible avec l'échelle fonctionnelle des processus hydrologiques à modéliser. Ils permettent de prendre en compte l'hétérogénéité spatiale au sein des sous-bassins à partir du croisement de plusieurs couches d'informations géographiques de type surfacique (cartographie de paramètres classifiés ou continus) ou linéaire (limites de bassins-versants, d'aquifères, réseaux hydrographiques, réseaux routiers, réseaux de haies ou de fossés etc.). Les hydro-paysages, obtenus au bout de cette deuxième étape de discrétisation, tiennent compte des échelles fonctionnelles des processus hydrologiques à modéliser (Figure 3.2 à droite). Ils peuvent constituer le maillage final utilisé dans la modélisation si les méthodes numériques utilisées pour simuler la dynamique temporelle des processus hydrologiques le permettent. Sinon, on passe à la troisième étape de la procédure.

□ **Le troisième niveau de discrétisation permet de redécouper les hydro-paysages pour obtenir le maillage définitif.** Ce redécoupage peut être nécessaire pour que les mailles de modélisation respectent certaines contraintes géométriques. Ces dernières peuvent être imposées par les schémas numériques utilisés pour résoudre des équations constitutives décrivant les processus à modéliser (par exemple, la contrainte de convexité pour la résolution des équations différentielles avec certaines méthodes numériques). Il s'agira alors de raffiner ou re-mailler les hydro-paysages pour respecter ces contraintes et obtenir le maillage définitif. A ce niveau, il est aussi possible de représenter une certaine variabilité sous-maille, même si cela n'a pas d'incidence sur le découpage de l'espace. On peut en effet souhaiter tenir compte de la variabilité sous-maille de manière statistique, sans que la localisation géographique précise des entités soit nécessaire. Cette approche dite en « patches » ou « tiles » est couramment utilisée dans les modèles atmosphériques ou climatiques pour représenter différents types d'occupation des sols dans une maille du modèle (exemple, Koster et Suarez, 1992). Elle permet par exemple, d'obtenir des flux d'évapotranspiration comme moyenne pondérée des flux calculés pour les différents types d'occupation des sols (lacs, neige, sol nu, forêts, cultures, etc.). Cette méthode peut être utile pour représenter la variabilité des propriétés de sol à l'intérieur d'unités cartographiques de sols issues des cartes pédologiques (voir Chapitre IV).

Nous rappelons que l'approche de découpage proposée est applicable à des bassins versants de toute taille, et que néanmoins, sa mise en œuvre sera différente pour les bassins de petite taille et pour les bassins de tailles moyennes à grandes; notamment pour le deuxième niveau de découpage spatial (hydro-paysage). Pour les bassins de petite taille (quelques km²), une représentation explicite des différents objets du paysage (parcelles agricoles, réseau hydrographique, fossés, bandes enherbées, haies, talus, zones urbaines, routes, etc..) est possible, si les données correspondantes sont disponibles. Des modélisations s'appuyant sur ce type de description de l'espace ont d'ailleurs déjà été construites. On peut trouver des exemples chez Moussa et al. (2002), Carlier et De Marsily (2004), Branger (2007) pour les zones agricoles ou Rodriguez et al. (2005) pour les zones urbaines. Pour les bassins de taille plus importante, il devient illusoire de vouloir représenter explicitement chaque objet du paysage et des simplifications sont nécessaires.

Pour ce type de bassins, nous proposons une méthodologie particulière pour la définition des hydro-paysages.

Dans le Paragraphe (III.1), nous allons présenter en détail la procédure de découpage des bassins versants en sous-bassins versants (le premier niveau de discrétisation). Le Paragraphe (III.2) sera consacré au second niveau de découpage spatial, c'est-à-dire à la détermination des hydro-paysages. Le Chapitre (IV) sera consacré à une mise en œuvre complète de la procédure de découpage spatial résumée sur la Figure (3.1), à l'aide de données disponibles sur un bassin de grande taille : le haut-bassin de la Saône à Lechatelet (11 700 km²).

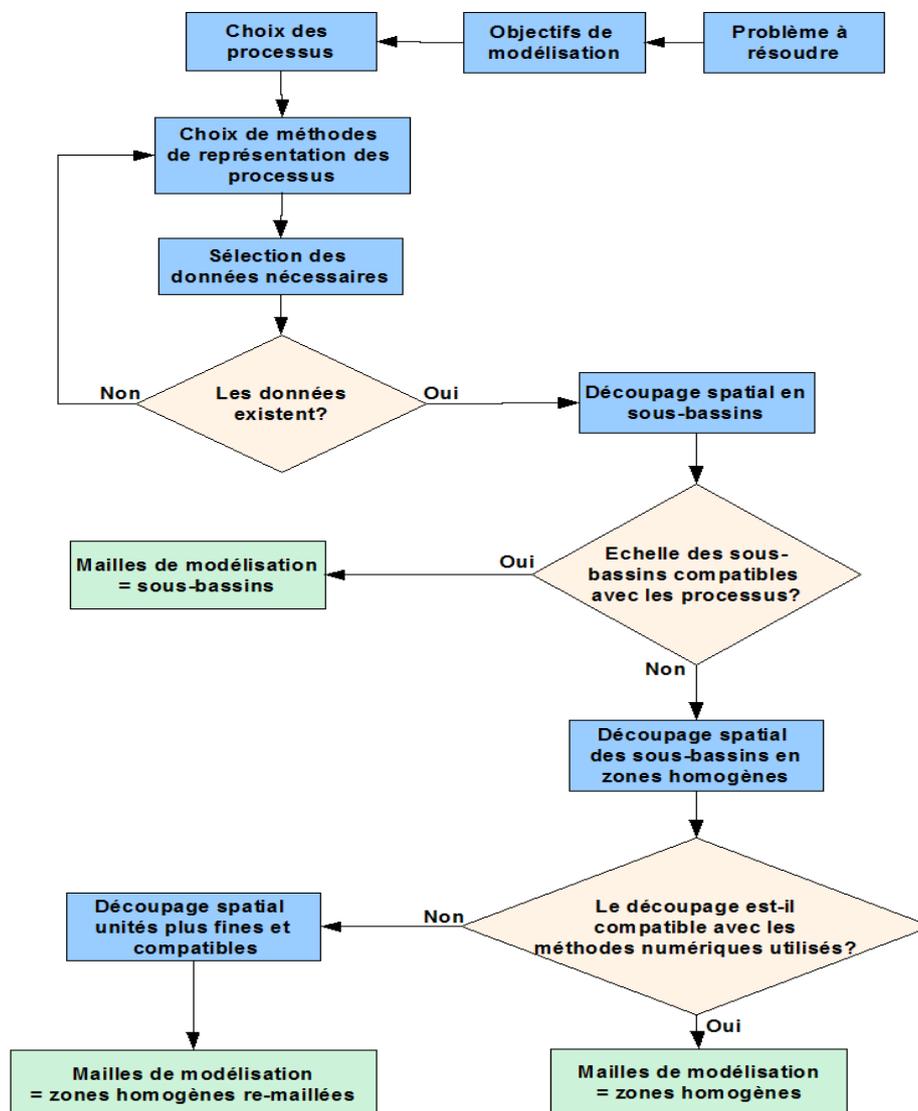


Figure 3. 1 : Diagramme de la procédure proposée pour le découpage spatial des bassins versants.

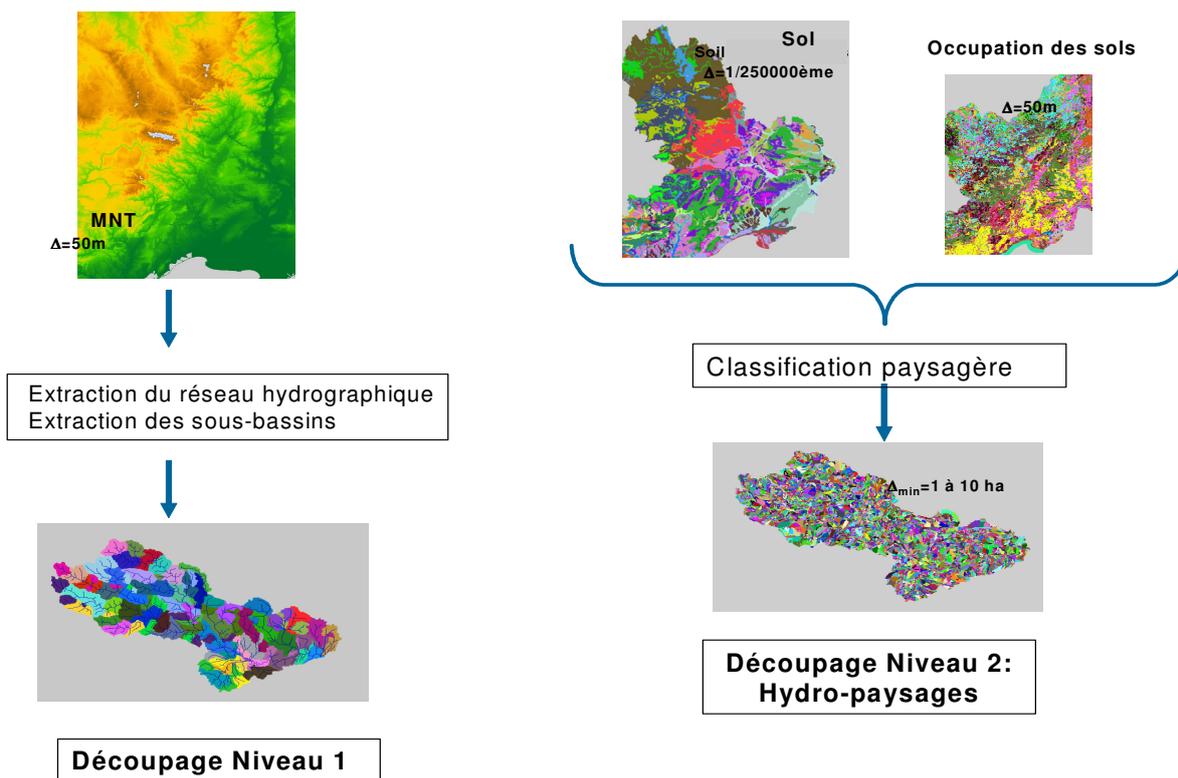


Figure 3. 2 : Illustration des deux premières étapes du découpage spatial

III.1. Le premier niveau de discrétisation du bassin: le découpage en sous-bassins versants

Le découpage d'un bassin versant en sous-bassins est utilisé en hydrologie depuis de nombreuses années. Les sous-bassins versants sont utilisés dans de nombreux modèles comme maille de modélisation élémentaire. C'est le cas du modèle Hydrotel (Fortin et al., 1995) avec ses Unités Hydrologiques Relativement Homogènes (UHRH), du modèle SWAT avec ses 'Hydrological Response units' (HRU) (Flügel, 1995), etc. Il a néanmoins été récemment « popularisé » par Reggiani et al. (1998, 1999) sous le terme de Representative Elementary Watersheds (REW). Au-delà du découpage spatial, l'intérêt suscité par ces travaux tient surtout au fait que les auteurs aient proposé une formalisation des représentations des processus hydrologiques sur ces entités. Ils préconisent une homogénéisation de l'approche pour les différents processus : écoulements dans les zones saturées et non-saturée, écoulement de surface et sur surface saturée et écoulement dans la rivière. Ces auteurs s'appuient sur une analyse du Modèle Numérique de Terrain (MNT) et du réseau hydrographique pour délimiter les sous-bassins. Nous allons adopter la même approche de découpage que celle proposée par Reggiani et al. (1998, 1999).

III.1.1. Découpage en REWS : rappel des principes de la méthode

Le découpage en REWs consiste à segmenter le bassin versant en unités élémentaires drainées par des brins de rivière. Les sous-bassins sont donc hiérarchisés autour du réseau hydrographique. On utilise en pratique des algorithmes d'analyse de Modèles Numériques de Terrain. On trouve dans la littérature plusieurs de ces algorithmes (Peucker and Douglas, 1975; Martz and Garbrecht, 1992). Nous utiliserons le programme TARDEM proposé par Tarboton (1997) qui présente un certain nombre d'avantages par rapport aux autres algorithmes. Tout d'abord, c'est un code de calcul libre, téléchargeable gratuitement sur le web³ et toujours maintenu par son auteur. Il est doté d'algorithmes performants pour la détermination des plans de drainage et pour l'extraction des réseaux

³ <http://www.engineering.usu.edu/cee/faculty/dtarb/tardem.html>

hydrographiques. Il offre également la possibilité d'intégrer un réseau hydrographique réel dans la procédure de découpage en sous-bassins. TARDEM permet de réaliser le découpage spatial en sous-bassins versants selon les étapes suivantes :

- ❑ Détection et traitement des zones de dépression du modèle numérique de terrain.
- ❑ Détermination de la direction locale des écoulements au niveau de chaque cellule du modèle numérique de terrain.
- ❑ Calcul des surfaces contributives de chaque cellule en terme de nombre de cellules drainées à travers une cellule donnée.
- ❑ Extraction de l'ensemble des brins du réseau hydrographique par diverses méthodes au choix.
- ❑ Délimitation des sous-bassins drainés par chaque brin du réseau en choisissant un seuil sur l'ordre de Strahler⁴ pour les brins du réseau hydrographique considéré.

III.1.1.a) Détection et correction des zones de dépression du Modèle Numérique de Terrain

Un modèle numérique de terrain comporte souvent des zones de dépression. Ces zones sont des zones d'accumulation non drainées, c'est-à-dire des pixels ne possédant pas d'exutoire. Ces zones peuvent avoir une existence physique liée à la topographie locale (par exemple, présence de lacs). Néanmoins, pour délimiter les sous-bassins, on considère que toutes les cellules du bassin versant sont connectées les unes aux autres, de l'amont vers l'aval. Ainsi tout point ou pixel du MNT doit avoir une direction d'écoulement. Autrement dit, il ne peut y avoir des pixels non drainés sur le MNT (en dehors de celui qui représente l'exutoire). Or, il est impossible d'attribuer des directions d'écoulement à des cellules appartenant à ces zones de dépression. C'est pour cette raison que, dans cette première étape, une routine (***flooding***) permet de détecter et de corriger ces zones. Tout se passe comme si on considérait la présence de telles zones comme le fait d'imprécisions ou comme des artefacts présents dans le modèle numérique de terrain en raison de la nature discrète des données altimétriques (Tarboton, 1999). Cette correction se fait en introduisant de très faibles variations d'altitude au niveau des cellules concernées de

⁴ L'ordre de Strahler est un numéro attribué à un brin de rivière en fonction de son importance par rapport aux autres brins du réseau hydrographique. C'est une classification d'un réseau hydrographique visant à hiérarchiser l'ensemble des brins de ce réseau. Ainsi, un brin n'ayant pas d'affluent a un ordre de Strahler égal à 1.

manière à garder le gradient local (amont-aval) de la pente. On recherche ensuite la direction permettant à l'eau de s'écouler. On dispose à l'issue de cette étape d'un MNT sans zone de dépression.

III.1.1.b) Calcul de la pente et de la direction locale des écoulements

Pour cette étape, le modèle numérique de terrain corrigé (sans zone de dépression) est utilisé pour créer une direction locale d'écoulement, pour chaque cellule. L'algorithme dit des "huit voisins" ou la méthode D8 a été utilisée. On considère qu'une goutte d'eau s'écoule d'une cellule vers l'une de ses huit (8) cellules voisines (Figure.3.3) suivant la ligne de plus grande pente. Il existe une nouvelle méthode (D^∞) proposée par Tarboton and Ames (2001) pour une détermination améliorée des directions locales d'écoulement. Suivant cette méthode, les directions locales d'écoulement peuvent être représentées avec des angles entre 0 et 2π . Les informations sur les pentes associées à chaque cellule sont obtenues à cette étape. Au niveau des zones plates, il est souvent difficile d'identifier les directions locales d'écoulement car les pentes des cellules dans ces zones sont faibles et très peu distinctes entre cellules. D'importantes erreurs peuvent donc être faites lors de la détermination des directions locales d'écoulement dans ces zones. Dans la littérature, plusieurs méthodes existent pour déterminer les directions d'écoulement dans ces zones. La routine de TARDEM permettant de déterminer ces directions (*d8*), utilise la méthode proposée par Garbrecht et Martz (1997). Cette méthode utilise des informations altimétriques autour de la zone plate (à l'amont et à l'aval) pour déterminer les gradients à imposer aux cellules de ces zones.

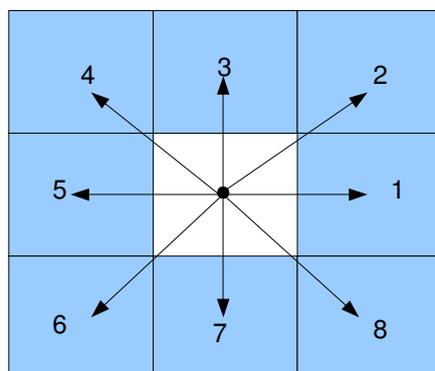


Figure 3. 3 : Directions d'écoulement suivant la méthode *d8*.

III.1.1.c) Calcul des surfaces contributives par cellule

La surface contributive d'une cellule est calculée en utilisant les directions locales d'écoulement déterminées dans le paragraphe précédent. La surface contributive d'une cellule est la surface totale drainée par cette cellule. C'est la somme de la surface totale des cellules à l'amont de la cellule considérée. D'autres informations peuvent être également extraites à ce niveau. On peut ainsi calculer, pour chaque cellule, la distance à la cellule drainée la plus éloignée, la longueur totale des différents chemins d'écoulements vers une cellule donnée ou encore l'ordre de Strahler associé à chaque cellule (à distinguer de l'ordre de Strahler du réseau hydrographique). La routine de TARDEM permettant de réaliser cette étape est appelée *aread8*.

III.1.1.d) Extraction du réseau de drainage

Le réseau hydrographique est extrait à partir des informations sur la direction locale des écoulements et la surface contributive de chaque cellule. La plus grande difficulté de cette étape est l'identification des cellules du modèle numérique de terrain appartenant au réseau hydrographique. La plupart des méthodes d'extraction du réseau de drainage à partir d'un modèle numérique de terrain utilisent des critères de seuil (subjectifs) relatifs à la densité de drainage ou à la surface drainée. Les critères de seuil souvent utilisés sont : (i) la surface drainée par les cellules avec une valeur minimale pour déterminer si le pixel est un pixel 'rivière' ou pas ; (ii) le couple surface drainée – pente moyenne des cellules où on considère d'abord un critère de surface permettant de sélectionner un lot de cellules faisant partie potentiellement du réseau hydrographique. Le critère de pente affine cette sélection en permettant de garder des cellules ayant des pentes favorisant l'établissement d'un régime d'écoulement pérenne. Il existe également d'autres méthodes basées sur des critères géomorphologiques. C'est le cas de la méthode proposée par Peucker and Douglas (1975) basée sur la notion de détermination de zones d'accumulation afin d'identifier les cellules appartenant au réseau hydrographique.

Toutefois, malgré les efforts de recherche entrepris, aucune méthode d'extraction automatique du réseau hydrographique ne permet de produire des réseaux parfaitement cohérents avec les réseaux de drainage réels. On a souvent des problèmes liés au décalage des brins dans l'espace par exemple à cause des incertitudes liées à la détermination des directions d'écoulement dans les zones plates. On a également des problèmes liés aux critères d'initiation des brins de rivière. On obtient soit des brins de rivières trop courts, soit trop longs par rapport aux rivières existantes.

Il existe dans TARDEM, un algorithme permettant d'utiliser les informations sur un réseau hydrographique existant pour forcer les directions locales d'écoulement et imposer les cellules appartenant au réseau de drainage. Nous utiliserons cet algorithme pour nous affranchir des incertitudes liées à la procédure d'identification des cellules appartenant au réseau de drainage, lesquels peuvent affecter considérablement le découpage spatial en sous-bassins. Cette étape est réalisée dans TARDEM avec la routine *gridnet*.

III.1.1.e) Découpage en sous-bassins

Les sous bassins (ou REWs) drainés vers chaque brin du réseau sont déterminés en utilisant un critère de découpage suivant l'ordre de Strahler des brins du réseau hydrographique. En fonction de l'ordre de Strahler choisi, on obtient un découpage en sous-bassins plus ou moins fin. Les informations sur le réseau hydrographique (extrait automatiquement ou existant) et sur la direction locale des écoulements sont aussi utilisées. Les brins de réseau dont l'ordre de Strahler sont inférieurs à l'ordre imposé par le critère seuil ne seront pas pris en compte. On peut ainsi disposer d'un découpage en sous-bassins plus ou moins fin en fonction du critère seuil choisi sur l'ordre de Strahler (Figure 3.4). La routine de TARDEM permettant de réaliser cette étape est appelée *subbasinsetup*.

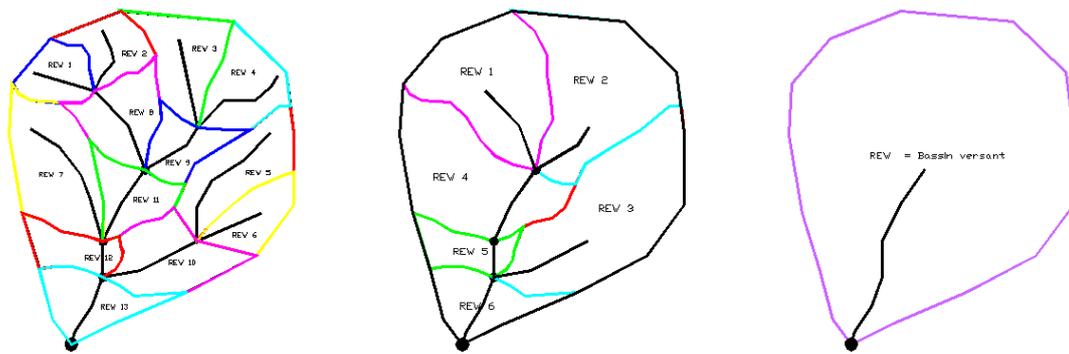


Figure 3. 4 : Découpage d'un bassin versant en sous-bassins selon l'ordre de Strahler : à gauche, ordre de Strahler 1 ; au centre, ordre de Strahler 2 ; à droite : ordre de Strahler 3.

III.1.2. Intérêts et incertitudes de la méthode

De manière générale, le mode de découpage en sous-bassins hérite des problèmes liés à l'utilisation des modèles numériques de terrain de type raster pour l'extraction de paramètres issus de la topographie. Ces incertitudes sont principalement liées d'une part, à l'extraction du réseau hydrographique et d'autre part à la résolution spatiale du modèle numérique de terrain.

III.1.2.a) Incertitudes liées à l'extraction du réseau hydrographique à partir d'un modèle numérique de terrain

Comme mentionné plus haut, beaucoup d'auteurs utilisent un critère de seuil sur la surface contributive de chaque cellule pour identifier celles qui forment le réseau hydrographique. La question qui se pose est de savoir comment choisir la surface seuil. La même question se pose pour les approches utilisant des critères de seuil sur la pente, sur la longueur maximale des chemins d'écoulement ou encore sur l'ordre de Strahler des cellules. Les structures de réseaux obtenues et les densités de réseaux pour des valeurs de seuil différents peuvent différer de façon significative. En pratique, on compare (souvent de façon visuelle) les réseaux obtenus en utilisant plusieurs critères seuils avec le réseau réel. On choisit la structure la plus proche du réseau réel et on corrige si besoin les directions locales d'écoulement. Bien souvent, ces modifications se font sans la correction des paramètres issus du MNT tels que la pente et les directions locales d'écoulement. Comme nous l'avons dit plus haut, la structure des réseaux hydrographiques issue des différentes procédures d'extraction automatique ne correspond pas souvent à la structure du réseau de drainage réel. On peut se retrouver alors avec des brins de rivière beaucoup plus longs ou beaucoup plus petits que ceux existants réellement. Parfois, on peut aussi retrouver des brins n'existant pas réellement ou des brins existants non représentés. Du coup, il existe de grandes incertitudes sur les paramètres caractéristiques des sous-bassins déterminés dans ces conditions.

Une alternative aux méthodes d'extraction automatique des réseaux hydrographiques est d'imposer un réseau hydrographique créé à partir d'une carte existante. Nous avons utilisé cette alternative pour limiter les incertitudes liées à l'extraction automatique des réseaux de drainage. En fonction de la précision des données disponibles, cette méthode garantit la conservation de la structure et de la densité du réseau hydrographique. De plus, elle prend en compte la rivière pour estimer les directions locales d'écoulement et tous les paramètres issus du MNT. Toutefois, cette méthode est tributaire de la qualité et de la précision des données disponibles sur la rivière. Il conviendrait de noter la difficulté d'identification exhaustive des bras temporaires du réseau hydrographique, particulièrement pour les grands bassins versants (aussi bien sur des cartes topographiques que sur le terrain).

III.1.2.b) Incertitudes liées à la résolution spatiale des modèles numériques de terrain

Cette fois encore, la méthode de découpage spatial à partir du modèle numérique de terrain hérite des incertitudes liées à l'extraction de paramètres issus de la topographie en utilisant un MNT au format RASTER. Plusieurs auteurs ont mis en évidence des incertitudes sur les principales variables tirées des modèles numériques de terrain. Heesom and Mahdjoubi. (2001) ont travaillé sur l'effet de la résolution spatiale sur les variables issues de la topographie telles que le volume, la surface, le périmètre et le profil en travers (Heesom and Mahdjoubi, 2001). D'après ces résultats, le changement de la résolution affecte la précision des variables issues du MNT. Kienzle (2004) qui a travaillé sur un thème similaire a écrit: "All computed variables tested (slope, aspect, plan and profile curvature and the wetness index) change with a change in grid cell size" ou encore "Flow directions in flat areas cannot be represented realistically from coarse DEMs".

Pourtant, on est souvent amené à dégrader la qualité des informations topographiques pour des raisons pratiques. En effet, les données d'origine, issues de MNT à haute résolution, sont très volumineuses, surtout lorsqu'on s'intéresse à des bassins versants de grandes tailles. Il est donc nécessaire de procéder à des réductions de données de façon à travailler sur ces grandes surfaces. Des techniques d'agrégation ou de ré-échantillonnage sont donc utilisées pour produire des données à plus faibles résolutions utilisables pour les calculs numériques. Armstrong et Martz (2003) ont travaillé sur l'effet d'échelle de l'agrégation sur des variables issues de la topographie. Ils ont utilisé un algorithme similaire à celui que nous avons présenté ci-dessus pour l'analyse du terrain. Ils ont analysé les changements dans la distribution spatiale et les propriétés statistiques de certaines variables issues de la topographie et utilisées en hydrologie distribuée (pente, périmètre et surface du bassin, réseau hydrographique, longueur totale de brins, ordre de Strahler maximal, densité de drainage et ratio de bifurcation). Ils concluent que la résolution provoque des "changements majeurs..., pouvant être très significatifs dans certains cas" sur le périmètre et la surface des bassins et sur la structure du réseau de drainage. Ils concluent également que les changements observés ne sont pas linéaires. Ils attribuent ces différences à la représentation lissée du relief, induite par les procédures d'agrégation. Les modèles numériques de terrain comportent donc des incertitudes qu'il

convient de garder à l'esprit dans la phase d'analyse des résultats de modélisations basées sur ce mode de découpage en sous-bassins.

Certains auteurs utilisent des analyses statistiques sur les résultats de simulations pour déterminer une résolution spatiale optimale permettant de représenter de façon satisfaisante les variables d'intérêt en hydrologie par comparaison avec des données issues d'images satellitaires (Horritt and Bates, 2001). D'autres auteurs, plus catégoriques sur les faiblesses du mode de représentation au format RASTER, proposent l'utilisation de méthodes basées sur des réseaux de triangles irréguliers (TINs) en utilisant les Systèmes d'Information Géographique. Ces auteurs suggèrent l'utilisation de ce type de réseau afin de garder les informations "importantes" à une forte résolution et de garder moins de précisions sur d'autres parties du terrain. Cette technique permet donc d'adapter la résolution spatiale aux objets qui nous intéressent dans le paysage, en retenant plus de points altimétriques dans les zones où se situent ces objets ; et moins de points dans les endroits où une grande précision n'est pas requise (Nelson et al, 1999). On maintient ainsi une résolution suffisante pour la modélisation hydrologique, tout en réduisant le nombre de nœuds de calcul. Ivanov et al. (2004) montrent par exemple qu'avec des TINs, on peut obtenir une même valeur moyenne de pente, avec seulement 10% des nœuds qu'il en faudrait avec une grille régulière pour atteindre la même valeur. Toutefois, l'utilisation des TINs pour le découpage en sous-bassins n'est pas encore très courant dans la littérature.

En conclusion de ce paragraphe, on peut dire qu'il est préférable d'utiliser un réseau hydrographique existant, si cette information est disponible, plutôt qu'une méthode d'extraction automatique (nous en verrons une illustration au Chapitre IV). Pour le calcul des paramètres issus du modèle numérique de terrain, une meilleure précision sera obtenue avec un MNT à haute résolution dont l'utilisation sera donc à privilégier, s'il est disponible. Dans le cas contraire, il faudra être conscient que les paramètres introduits dans la modélisation sont entachés d'erreurs importantes dont l'impact pourra être quantifié.

III.1.3. Le découpage en sous-bassins suffit-il pour modéliser les écoulements d'un bassin versant ?

Bien que plusieurs modèles hydrologiques utilisent le découpage en sous-bassins versants comme maille de modélisation élémentaire, ce niveau de discrétisation ne permet pas toujours de répondre aux nombreuses préoccupations de la modélisation hydrologique. En effet, avec un découpage en sous-bassins versants, les processus hydrologiques sont souvent représentés de manière simplifiée (exemple, évaporation, bilan d'eau vertical, etc.). On peut, par exemple, difficilement intégrer au sein de ces modèles les processus hydrologiques comme le ruissellement ou les transferts latéraux dans le sol. Il n'est quasiment pas possible de simuler des crues éclairs, des problèmes de transfert de polluants, etc.. De nombreux processus, notamment souterrains, ne suivent pas le découpage de surface en sous-bassins. Ils peuvent difficilement être intégrés dans ces modèles.

La thèse de Varado (2004), sur l'approche REW, montre l'importance de la prise en compte de l'hétérogénéité spatiale dans la simulation de certains composants du cycle de l'eau. Pour aller au-delà de la simple simulation des débits aux exutoires des sous-bassins versants, la prise en compte de l'hétérogénéité spatiale au sein des sous-bassins peut être d'une grande importance. Dans le paragraphe suivant, nous allons présenter une démarche de discrétisation spatiale des sous-bassins pour la représentation de l'hétérogénéité spatiale du paysage.

III.2. Le deuxième niveau de discrétisation du bassin versant : la discrétisation en zones homogènes ou en hydro-paysages.

Dans la littérature, plusieurs auteurs ont travaillé sur l'identification de zones homogènes ou plus généralement d'unités paysagères homogènes. Les objectifs de cette identification sont variés. En hydrologie, cette approche est souvent utilisée dans une démarche de spatialisation des modèles Pluie/Débit (HYDROTEL, GR, etc.). Ainsi, certains auteurs ont travaillé sur la détermination "d'ensembles paysagers fonctionnels en hydrologie " (Loyer et al, 1997) grâce à une approche typologique des facteurs régissant le ruissellement. Vine (1997) dans son étude sur l'apport de la télédétection pour l'étude des zones contributives aux écoulements, définit des objets hydrologiques (qui sont des facteurs du milieu naturel) qui permettent de délimiter des zones homogènes. Ces procédures d'identification de zones homogènes sont aussi utilisées dans d'autres disciplines des sciences environnementales. C'est notamment le cas en agronomie pour la délimitation des agro-paysages (Yongchalemchai, 1993), en écologie pour la délimitation des écorégions (Bergen et al., 2005) ou pour la délimitation d'éco-zones à une plus grande échelle. En pédologie cette procédure est utilisée pour la définition des pédopaysages (Bornand, 1989; Robbez-Masson, 1994; 1995; Lagacherie et al., 2001) et en foresterie pour la reconnaissance de peuplements forestiers (Bonin, 1999).

La notion d'hydro-paysages introduite par Winter (2001), correspond, en hydrologie la notion de zones homogènes. Les hydro-paysages sont une extension du concept de HRU (Hydrological Response Unit) (Flügel, 1995) ou du concept de REC (Representative Elementary Column) proposé par Haverkamp (2004). Comme mentionné dans l'introduction de ce chapitre, un hydro-paysage peut prendre en compte différents facteurs tels que la topographie, l'occupation des sols, la pédologie, la géologie, etc. mais aussi les discontinuités hydrologiques comme les haies, les talus, les discontinuités géologiques, etc. Les facteurs du milieu à considérer dépendent de l'objectif de modélisation et des processus hydrologiques représentés.

III.2.1. La notion d'hydro-paysage selon les échelles

Comme nous l'avons mentionné en introduction à ce chapitre, la problématique du découpage spatial en zones homogènes se pose plus sérieusement pour les bassins versants de taille moyenne à grande. En effet, pour les petits bassins versants, une information spatiale très détaillée est plus facile à obtenir, en particulier grâce aux techniques de la télédétection. On peut alors représenter explicitement les éléments du paysage dont le rôle est prépondérant sur le fonctionnement hydrologique du bassin versant et pour les processus hydrologiques à modéliser. De fait, les discontinuités hydrologiques comme les haies, les talus, etc. peuvent être représentées explicitement. Les hydro-paysages issus de l'analyse de données peuvent alors servir à modéliser finement un grand nombre de processus hydrologiques. On pourra en trouver une illustration dans Branger (2007), avec un exemple d'application à un petit bassin versant agricole breton. Ce travail s'appuie aussi sur les principes de découpage spatial énoncés au début du Chapitre (III).

Dans certains cas, on peut avoir besoin de simplifier les informations disponibles pour représenter par exemple, certains processus de manière simplifiée. C'est souvent le cas des grands bassins versant (mais pas seulement), où il n'est pas souvent possible de conserver une représentation explicite à grande échelle, des détails du paysage. De ce fait, la représentation de l'hétérogénéité spatiale du bassin versant dans des modèles hydrologiques nécessite des simplifications. Habituellement, cette simplification est réalisée par le biais d'un lissage cartographique des unités de trop petite taille. Souvent, ce genre de simplification ne tient compte ni des processus à modéliser, ni du fait que les unités hydrologiques de petite taille peuvent influencer considérablement les écoulements sur un bassin versant. Par ailleurs, il est parfois difficile, voire impossible, d'avoir toutes les informations à la bonne résolution. Alors que certaines informations peuvent être obtenues avec une grande précision (occupation des sols par exemple), d'autres ne sont disponibles qu'à des résolutions grossières (géologie et pédologie par exemple). L'utilisation des résolutions les plus fines comme base pour la modélisation suppose une démarche de désagrégation des données disponibles à des résolutions grossières. Cette démarche nécessite une bonne connaissance de la structure spatiale de ces données aux

échelles plus fines (ce qui n'est pas toujours possible dans le cas des données sur le sol par exemple). La simplification des données devrait être réalisée de manière à conserver dans le paysage des détails pertinents pour les processus hydrologiques à modéliser. Avec les outils classiques de cartographie, il est difficile de réaliser des simplifications cartographiques 'sélectives' qui permettent de garder dans la description de l'hétérogénéité des détails importants pour la modélisation. Généralement, on procède par seuillage de la superficie des unités cartographiques. Ceci qui a pour conséquence l'élimination des unités dont la taille est inférieure aux critères choisis.

Pour s'assurer de la compatibilité des processus à modéliser avec la finesse des hydro-paysages, il importe de suivre une démarche plus rigoureuse que la simple superposition de données cartographiques pour l'obtention des hydro-paysages. Cette démarche devrait d'une part, permettre de garantir la cohérence entre la résolution des données d'entrée et la finesse des hydro-paysages, et d'autre part permettre une représentation pertinente de l'hétérogénéité du paysage en fonction des processus hydrologiques à modéliser. En s'appuyant sur ce qui se fait déjà en hydrologie, mais aussi dans les autres disciplines, notamment en pédologie, nous proposons dans le Paragraphe (III.2.2) une méthodologie de détermination des hydro-paysages pour des bassins versants de grandes tailles, basée sur la notion de classification paysagère. Cette méthodologie pourrait être également utilisée pour les petits bassins où il y a une nécessité de simplification de l'hétérogénéité spatiale. La classification paysagère est une technique utilisée pour la cartographie des sols (Robbez-Masson, 1994; Robbez-Masson et al., 1995; Robbez-Masson et al., 1999). Cette approche peut permettre, comme on le verra, de définir des hydro-paysages adaptés aux objectifs de modélisation. On pourra définir ainsi des hydro-paysages à des résolutions plus ou moins détaillées en fonction de la finesse de la représentation des processus et des données disponibles.

III.2.2. Principes de détermination des hydro-paysages par une méthode de classification paysagère

La classification paysagère est une technique de cartographie permettant de délimiter, à partir d'images (ou de données RASTER), des zones homogènes. La démarche de délimitation des hydro-paysages proposée consiste, dans une première phase, à déterminer des zones homogènes en utilisant cette notion de classification paysagère. Dans la seconde phase, ces zones homogènes seront intégrées au sein des sous-bassins, en vue de délimiter les hydro-paysages (d'autres informations vectorielles peuvent y être ajoutées : rivière, discontinuités etc.). Le diagramme de la Figure (3.5) schématise les principales étapes de la méthodologie de détermination des hydro-paysages. Il illustre l'ensemble de la démarche proposée, depuis la définition des objectifs de modélisation jusqu'à l'obtention d'une discrétisation spatiale adéquate en vue d'une modélisation hydrologique spatialisée, passant par la méthode de classification paysagère. Le détail des dix étapes du diagramme de la Figure (3.5) est présenté ci-dessous.

- Etape 1) Définition des objectifs de modélisation
- Etape 2) Définition des processus hydrologiques à modéliser et de leurs méthodes de représentation d'une part, et sélection des données disponibles d'autre part.
- Etape 3) Identification des couches cartographiques (on parlera par la suite de facteurs) nécessaires à la simulation des processus et de la résolution requise. Parmi les couches (facteurs) disponibles celles qui sont déterminantes pour les processus hydrologiques à représenter seront retenues. Afin de préparer la procédure de classification qui est essentiellement basé sur une analyse d'images (format RASTER), on séparera les données vectorielles (décrivant des données linéaires, des données surfaciques ou des frontières) des données RASTER. Les données RASTER seront utilisées dans la procédure de classification pour déterminer des zones homogènes, alors que les données vectorielles (y compris les sous-bassins) seront utilisées ultérieurement dans la phase finale de détermination des hydro-paysages. Nous allons considérer que nous disposons à la fin de cette étape de p facteurs correspondant à p couches de données RASTER pour la procédure de classification.

- Etape 4) Avec les couches de données RASTER, on crée une carte combinant ces p facteurs. Les p couches de données (facteurs) retenues sont superposées afin de produire une carte combinée des p facteurs. Si chaque facteur est divisé en n_p classes, on obtient un maximum de $\prod n_j$ ($j \in [1, p]$) combinaisons de facteurs.
- Etape 5) Définition des zones de référence. Il s'agit de zones, sur le bassin versant à étudier, ayant des similitudes du point de vue du fonctionnement de certains processus hydrologiques (zones sujettes à du ruissellement sur surfaces saturées, par exemple). Il peut aussi s'agir d'endroits particuliers qu'on souhaite modéliser de manière spécifique (zones de karst, zones urbaines par exemple). Ces zones serviront de zones de référence ou zones d'apprentissage pour la cartographie. Les plages cartographiques finales seront toutes associées à une zone de référence définie préalablement.
- Etape 6) Choix d'une fenêtre de voisinage et d'un descripteur. Chaque point du paysage (pixel) est caractérisé en utilisant une description de la zone qui l'entoure. On parle de voisinage (Figure .3.6). Un point de l'espace est donc décrit par référence aux propriétés des points qui l'entourent. La fenêtre de voisinage peut être carrée, circulaire ou orientée suivant un axe d'anisotropie. Un descripteur sert à caractériser chacun des pixels de la carte des facteurs (à travers leur fenêtre de voisinage) et à caractériser les zones de référence. Ce sont des indicateurs statistiques permettant de décrire le champ spatial autour d'un point.
- Etape 7) Cartographie par classification paysagère. Elle consiste à analyser la composition du voisinage pixel par pixel sur l'ensemble de la carte des facteurs. Chaque pixel est affecté à une zone de référence en fonction de la distance qui sépare son descripteur de ceux des différentes zones de référence.
- Etape 8) Evaluation de la 'carte des distances', caractérisant la qualité de la cartographie de l'image de départ. La carte des distances est produite pixel par pixel et traduit la distance séparant les descripteurs des points du paysage (considérés dans leur voisinage) avec ceux des zones de référence auxquelles ces points ont été affectés. Elle sert dans la procédure de cartographie à identifier les zones où la classification n'est pas satisfaisante. On peut alors y identifier d'autres zones de référence pour améliorer la classification des pixels.
- Etape 9) Itération entre les étapes 5-8 jusqu'à l'obtention d'une cartographie cohérente avec l'échelle des données d'entrée et dont la carte des distances soit satisfaisante. On

peut, à chaque itération, soit rajouter une zone de référence dans les zones mal classées pour minimiser le contraste de la carte des distances, soit jouer sur la fenêtre des voisinages pour avoir des unités cartographiques plus ou moins fines.

□ Etape 10) Intégration des informations vectorielles pour la création des hypopaysages. Dans cette étape, les informations linéaires peuvent être intégrées ainsi que le découpage en sous-bassins versants. Cette étape peut être réalisée en utilisant les outils de traitements existants dans des SIG classiques. Les étapes 4 à 9 rentrent dans le cadre de la procédure de classification. L'étape 10 peut être réalisée avec des outils de traitement de données géographiques courants.

Dans les paragraphes suivants, nous allons donc nous intéresser aux étapes 3 à 9 afin de développer la méthode de classification paysagère permettant la détermination des zones homogènes. Dans le chapitre (IV), une illustration complète de ces différentes étapes est détaillée à l'aide du cas d'étude proposé. On revient néanmoins en détail sur ces étapes 3 à 9 dans les paragraphes suivants pour en affiner la description et le fonctionnement.

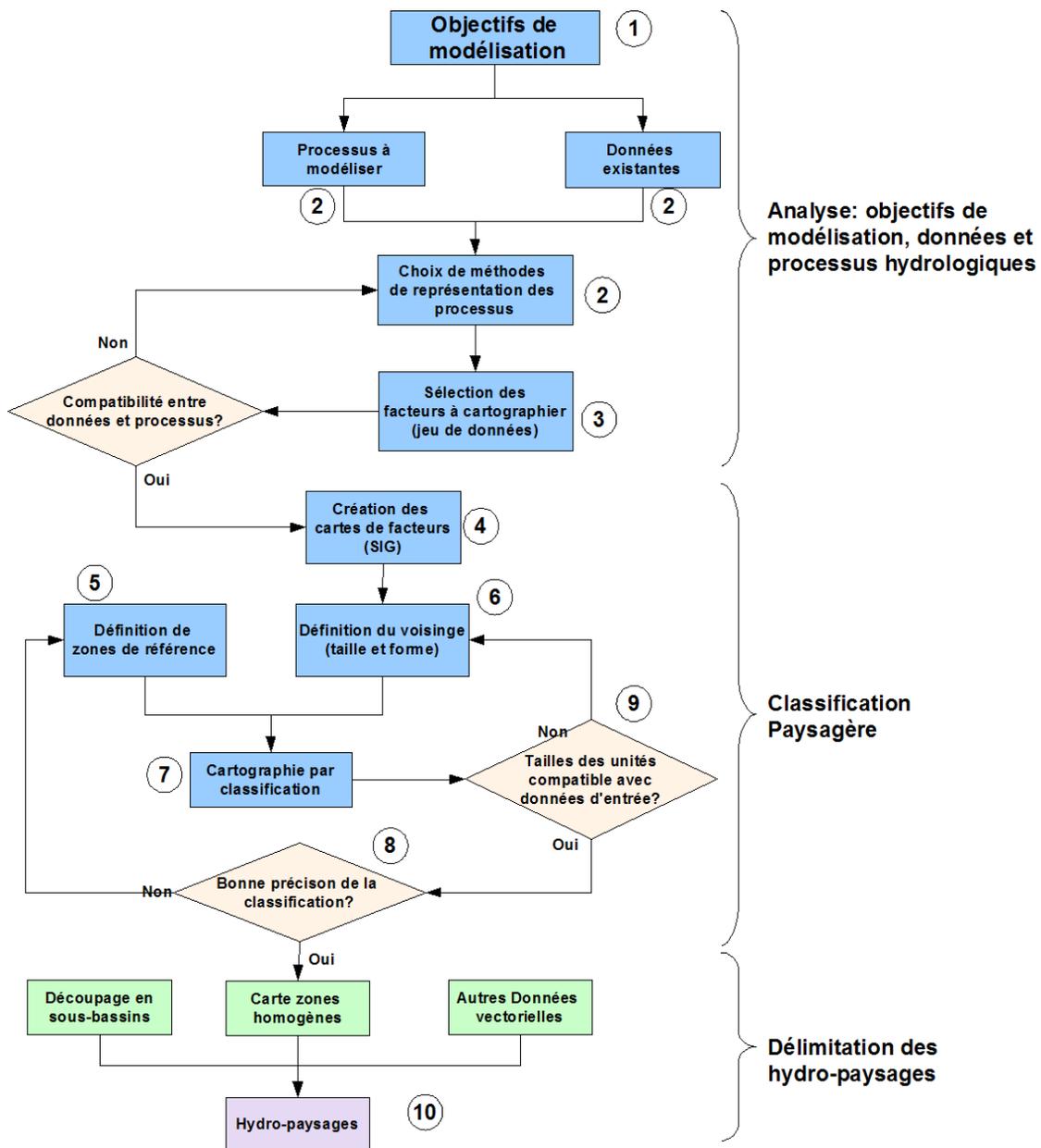


Figure 3. 5: Diagramme schématisant la démarche proposée pour la détermination des hydro-paysages (les numéros correspondent aux différentes étapes présentées ci-dessus).

III.2.3. Quels facteurs prendre en compte dans la définition des hydro-paysages ?

Il existe dans la littérature, différents points de vue sur la notion de paysage. De nombreux acteurs du milieu naturel définissent le paysage comme "un système producteur dont la construction est déterminée par les forces bio-physiques...Ce paysage objectif n'est ni ressenti ni forcément offert à la vue de l'observateur au sol..."(Robbez-Masson et al., 1999). D'autres auteurs proposent d'autres définitions du paysage, souvent en accord avec la spécificité de leurs disciplines.

Pour la définition des zones homogènes, les pédologues considèrent le paysage comme résultant de l'action de plusieurs facteurs : "...différentes composantes du milieu telles que la végétation, la faune, la géomorphologie, le relief, la pente, la couverture pédologique, les agglomérations, etc. interagissent dans le temps et dans l'espace pour constituer un paysage" (Robbez-Masson et al, 1999). Les agronomes définissent la notion 'd'agro-paysage' pour désigner un ensemble de parcelles et d'éléments du milieu dont l'organisation spatiale permet de définir un terroir. Les facteurs de différenciation des agro-paysages souvent utilisés sont : la végétation naturelle, l'espace boisé, les parcelles agricoles, le relief, le réseau hydrographique et différents états de surface (Girard, 2000). En écologie, les écorégions sont définies comme des étendues de terre ou d'eau contenant un assemblage géographique distinct de communautés naturelles. Bergen et al (2005) ont utilisé une méthode de classification utilisant des régions écologiques prédéfinies pour la détection de changements dans le paysage. Le principal facteur de différenciation utilisé a été des images satellites et des photos.

Ainsi on voit qu'il n'y a pas une définition unique de la notion de paysage. Chaque auteur définit le paysage comme résultant d'un ensemble de facteurs en rapport avec la spécificité de sa discipline. En hydrologie, comme nous l'avons vu dans l'introduction du paragraphe (III.2), certains hydrologues utilisent aussi la notion d'hydro-paysage pour caractériser des sous-bassins où des processus hydrologiques peuvent être considérés comme homogènes. C'est le cas dans certains modèles pluie/débit. Néanmoins, les facteurs du milieu souvent pris en compte par les auteurs dans ces analyses sont essentiellement des facteurs déterminants vis-à-vis de la dynamique hydrique de surface.

Ces facteurs regroupent couramment la pédologie, la pente, l'occupation du sol et la lithologie.

Nous proposons que le choix des facteurs soit fait en fonction de leur importance par rapport à l'ensemble des processus hydrologiques à modéliser et pas uniquement par rapport aux processus de surface. Ainsi, pour modéliser l'infiltration, la pédologie et l'occupation des sols sont des facteurs importants. Pour le ruissellement, la topographie, la pédologie, l'occupation des sols, l'indice topographique peuvent être considérés comme des facteurs prépondérants. La combinaison des facteurs à prendre en compte dans la détermination des hydro-paysages, devrait donc changer en fonction des processus à modéliser ainsi que de leur méthode de résolution. De cette manière les objectifs de modélisation conditionneront directement le découpage spatial en zones homogènes.

Une fois les facteurs nécessaires retenus, les couches de données au format RASTER sont superposées pour créer une carte de facteurs ou image brute (Figure 3.6). Il est à noter qu'en toute rigueur la procédure de classification peut s'arrêter si les données nécessaires aux simulations ne sont pas disponibles. On changera alors de méthode de représentation des processus et on recommencera.

Les données au format de grille qui ne sont pas à la résolution choisie seront rééchantillonnées (la résolution la plus fine sera gardée de préférence). Pour les données continues, il est nécessaire de les classer en n_p classes en utilisant les possibilités offertes par les outils de traitement géographique. Soulignons aussi que la contrainte d'une utilisation de données au format RASTER avec une résolution identique est source d'incertitudes. En effet, on est obligé de rééchantillonner certaines couches d'information pour avoir une homogénéité de la résolution des données. Cette contrainte n'est pas imposée par la méthodologie mais reste une contrainte technique, imposée par les outils disponibles pour réaliser des classifications paysagères. A la fin de cette étape, on dispose d'une carte composée de p facteurs (couches de données) qui influencent les processus hydrologiques à représenter. Cette carte peut être considérée comme caractéristique de l'organisation spatiale de la dynamique hydrique à représenter. Elle servira de base à la procédure de cartographie par classification.

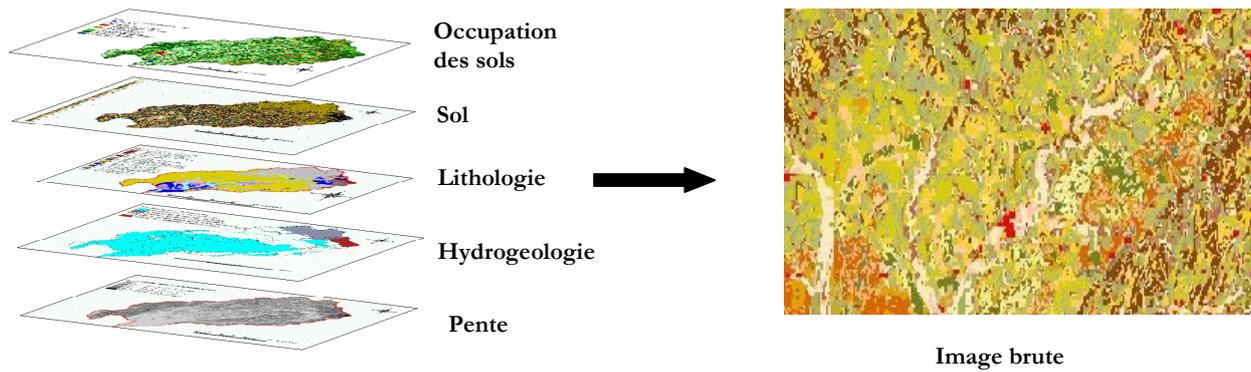


Figure 3. 6 : Création de l'image brute à cartographier

III.2.4. Comment définir les zones de référence ?

La notion de zones de référence a été empruntée à la classification des sols où Favrot (1989) a proposé la notion de secteur de référence pour la caractérisation des petites régions naturelles. Nous proposons d'étendre l'utilisation des zones de référence à l'hydrologie. Les zones de référence en hydrologie seraient alors considérées comme des zones ayant une certaine uniformité de fonctionnement par rapport aux processus hydrologiques à représenter.

Les zones de référence peuvent être obtenues par deux types d'approches. La première approche consiste à déterminer ces zones à partir d'une connaissance déterministe des zones du bassin versant où certains processus hydrologiques sont actifs (surfaces saturées, ruissellement de surface, etc.). Il s'agit d'une approche dite guidée par le but. Ainsi, si on veut tenir compte du relief comme facteur influençant le ruissellement, on pourra distinguer par exemple des zones à fortes pentes, des zones à pentes moyennes et des zones à faibles pentes. On choisira alors trois zones de référence correspondant aux trois catégories de pentes. Il peut aussi s'agir de zones présentant des propriétés particulières qu'on souhaite modéliser, comme par exemple les zones karstiques, les zones où se situent certains enjeux anthropiques particuliers (zones urbaines, zones agricoles, vigne etc.). On peut les prendre en compte en y définissant des zones de référence.

Dans une seconde approche, ces paysages de référence peuvent être extraits d'une analyse statistique (approche dite guidée par les données). Cette procédure peut-être utilisée lorsqu'on ne dispose pas d'informations de terrain ou d'expertises sur la zone d'étude. La combinaison de facteurs jugés pertinents ou reconnus importants dans les processus hydrologiques pourront servir à identifier des zones de référence. Par exemple, si la

lithologie, l'occupation des sols et la pente sont retenues comme facteurs importants pour caractériser l'hétérogénéité du milieu, une zone de référence peut être un champ spatial situé en 'zone de forêt sur un terrain argileux à forte pente' ou en 'zone de prairie sur un terrain alluvial à faible pente'. Pour modéliser le ruissellement, les zones de référence peuvent être des 'zones à fort indice topographique'.

La définition des zones de référence offre donc une grande flexibilité dans la prise en compte de zones d'intérêt ou de critères particuliers dans la caractérisation de l'hétérogénéité du paysage. De plus, le nombre de zones de référence n'est pas limité. En fonction de la complexité ou du niveau de détail souhaité, on peut définir plus ou moins de zones de référence. Toutefois, la définition des zones de référence requiert en toute rigueur une bonne connaissance du bassin versant à étudier. Dans le cas contraire, une analyse des différentes combinaisons de facteurs retenus peut servir à représenter des zones de référence qu'on améliorera par itérations successives. Dans le cadre d'une modélisation fine, il est recommandé de mener des études de terrain pour préciser la localisation de ces zones de référence.

III.2.5. Comment faire la cartographie des zones homogènes ?

La procédure de cartographie par classification paysagère est souvent qualifiée d'analyse contextuelle. En effet, elle consiste à analyser chacun des pixels de l'image des facteurs à cartographier (Figure 3.6), en tenant compte de son voisinage et à comparer leurs caractéristiques avec celles des zones de référence définies précédemment. L'étape de cartographie proprement dite est donc précédée d'une étape de caractérisation de l'ensemble des pixels de l'image des facteurs (considérés dans un voisinage également à définir) et d'une caractérisation des zones de référence. Dans le paragraphe suivant, nous allons développer en détail la démarche de cartographie pour la délimitation des zones homogènes sur un bassin versant.

III.2.5.a) Définition de la fenêtre de voisinage, caractérisation de chaque pixel de l'image des facteurs et caractérisation des zones de référence.

□ *Définition d'une fenêtre de voisinage*

'Le paysage est ce qui est autour de soi' (Robbez-Masson et al., 1999). Avec cette phrase, les auteurs semblent insister sur la nécessité de prendre en compte le contexte spatial dans la description d'un point du paysage. Dans la procédure de classification, chaque point est défini par un champ spatial qui l'entoure ou fenêtre de voisinage. Plus l'étendue du voisinage est faible, plus la caractérisation du point est fine.

La fenêtre du voisinage peut être carrée, en disque ou elliptique (Figure.3.7). Un voisinage de forme carrée est souvent utilisé. L'utilisation d'un voisinage de forme elliptique peut être motivée par la présence d'une anisotropie à prendre en compte. Dans ce cas, la fenêtre de voisinage peut être elliptique et orientée dans le sens de l'anisotropie. En fonction de la finesse de représentation et des objectifs, on définira une fenêtre de voisinage à utiliser pour caractériser chaque point du paysage. La taille de la fenêtre du voisinage conditionne la finesse de représentation des hétérogénéités. Tous les pixels de la carte des facteurs seront caractérisés en utilisant la fenêtre de voisinage.

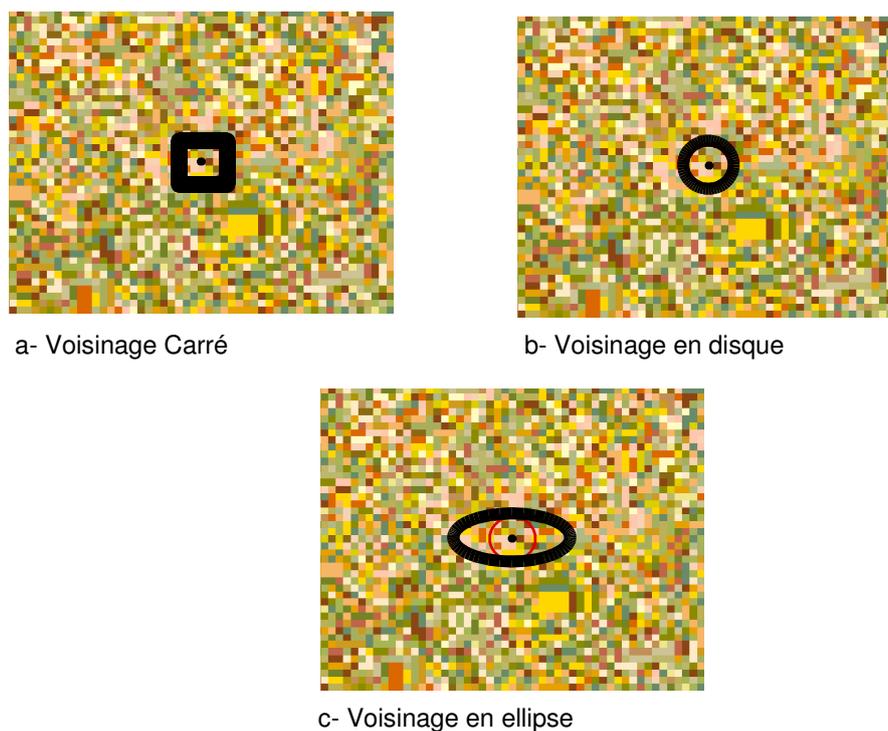


Figure 3. 7 : Différentes formes de voisinage possibles pour la caractérisation des pixels

□ *Caractérisation des pixels de la carte des facteurs et des zones de référence*

La caractérisation d'un pixel de l'image de facteurs est réalisée en utilisant un descripteur du voisinage défini précédemment et centré sur le pixel à caractériser. Les descripteurs sont des indicateurs statistiques permettant de décrire le champ spatial autour d'un point ou de décrire les zones de référence. Trois principaux types de descripteurs sont couramment utilisés :

- ✓ Le descripteur le plus synthétique résume l'information contenue dans le voisinage sous la forme d'un indicateur de position (exemple : mode) ou d'un indicateur de dispersion de la distribution statistique.
- ✓ Le descripteur le plus utilisé est celui de la "*composition du voisinage*". Ce descripteur est exprimé sous la forme d'un vecteur composé d'autant de variables que de catégories de l'image de facteurs. On parle alors de vecteur de composition ou d'histogramme de composition. Nous utiliserons ce descripteur dans l'application présentée au Chapitre (IV).
- ✓ Le descripteur le plus complet ou matrice de co-occurrence intègre la notion d'arrangement spatial. La matrice de co-occurrence consiste à rapporter dans un tableau la fréquence des types de contact entre cellules d'un même voisinage. Elle est toutefois difficile à mettre en œuvre.

Dans la Figure (3.7a), le voisinage est représenté par le carré noir. Le pixel central est le pixel à caractériser. Le descripteur est un histogramme. Dans la suite, pour plus de clarté du document, nous allons considérer l'histogramme de composition comme descripteur. Chaque couleur au sein du carré représente une catégorie de combinaisons de facteurs. L'histogramme caractéristique du pixel analysé est composé d'autant de classes que de catégories (ou de couleurs) de l'image brute. On compte ensuite le nombre de pixels de chaque catégorie (ou couleur) présente dans la fenêtre de voisinage, ce qui donne la valeur observée pour la classe de l'histogramme correspondante.

Les zones de référence sont aussi caractérisées avec le même descripteur (histogramme dans notre cas). Chaque zone de référence sera alors caractérisée par un histogramme unique, reflétant sa composition en catégories (ou couleurs) issues de la carte de facteurs. L'histogramme d'une zone de référence est construit en considérant toute l'étendue spatiale de la zone en question.

III.2.5.b) Procédure de cartographie et résultats de la classification

La procédure de cartographie repose sur l'analyse de l'histogramme (descripteur) associé aux pixels de la carte de facteurs à cartographier. Les zones de référence sont considérées comme des zones d'apprentissage. Chaque pixel est affecté à l'une de ces zones de référence. Pour choisir la zone de référence à laquelle un pixel sera affecté, on procède à une comparaison entre l'histogramme caractéristique du pixel et ceux des différentes zones de référence. Le pixel sera affecté à la zone de référence qui aura le descripteur le plus proche du sien. La comparaison entre les histogrammes se fait en minimisant la distance entre les deux vecteurs de composition des histogrammes comparés. Cette opération est dite opération de classification.

En pratique, soit p le nombre de catégories de l'image à classer, k le nombre de zones de référence. Le pixel à classer (i), est caractérisé par un vecteur de composition $N_i = [N_i(1), N_i(2), \dots, N_i(p)]$. Chaque zone de référence (r) est caractérisée par un histogramme de référence décrit par le vecteur de composition suivante : $N_{ref} = [N_{ref}(1), \dots, N_{ref}(p)]$. La classification du pixel (i) consiste à affecter à ce pixel la zone de référence qui minimise la valeur de la distance $d(N_i, N_{ref})$ entre le vecteur de composition du pixel i et chacun des vecteurs de composition des k zones de référence. Cette distance entre histogrammes

peut être évaluée en utilisant plusieurs types de métrique. Les principales distances utilisées en pratique sont : la distance de Cramer, la distance de Kolmogorov ou encore celle de Manhattan (Robbez-Masson, 1994).

- *Choix d'une métrique pour la comparaison des histogrammes des pixels à ceux des zones références*

La distance de Cramer prend en compte les différences entre les fréquences cumulées. Elle serait préférable lorsqu'on s'intéresse à la sensibilité de la classification par rapport à la précision des données d'entrée. La distance de Cramer est obtenue par la formule :

$$D_{cramer}(N_i, N_{ref}^r) = 0.25 \cdot \sum_{j=1}^p \left[\sum_{j=1}^p N_i(j) - \sum_{j=1}^p N_{ref}^r(j) \right]^2 \quad \text{Eq. 3.1}$$

La distance de Kolmogorov sert à évaluer si les deux histogrammes suivent la même loi de distribution. On cherche la plus grande différence entre les deux vecteurs de composition. Elle est calculée par la formule suivante :

$$D_{kolmogorov}(N_i, N_{ref}^r) = \text{Max}_{i=1}^p (|N_i(j) - N_{ref}^r(j)|) \quad \text{Eq. 3.2}$$

La distance de Manhattan a été souvent utilisée pour le développement de procédures de classification similaires et possède la réputation d'être robuste, car elle ne nécessite pas d'hypothèses sur la loi de distribution des observations (Robbez-Masson, 1994). Elle est calculée de la façon suivante :

$$D_{Manhattan}(N_i, N_{ref}^r) = \sum_{i=1}^p |N_i(j) - N_{ref}^r(j)| \quad \text{Eq. 3.3}$$

Il s'agit donc de la somme des valeurs absolues des différences entre les fréquences des observations catégorie par catégorie (ou couleur par couleur). Nous utiliserons, par la suite, cette distance de Manhattan pour les comparaisons entre histogrammes compte tenu de sa robustesse.

□ *Résultats du classement et qualité de la cartographie.*

La Figure (3.8) illustre cette comparaison entre l'histogramme caractérisant un pixel de l'image à cartographier et les histogrammes des différentes zones de référence. Que le pixel i appartienne au paysage de référence r signifie que le vecteur de composition associé au point i est plus proche du vecteur de composition de la zone de référence r que des vecteurs des autres zones de référence. On peut alors créer une carte 'd'iso-probabilité d'appartenance' à chacune des k zones de référence. Cette carte représente la cartographie des hydro-paysages du bassin versant. Cette carte est composée d'unités non structurées et irrégulières. On peut obtenir aussi une carte des distances représentant, pour chaque pixel, la valeur de la distance entre son vecteur de composition et celui de la zone de référence à laquelle il a été affecté. Cette dernière carte sert à évaluer la pertinence de la classification, et sert aussi de guide dans les itérations successives en vue d'améliorer le classement des pixels.

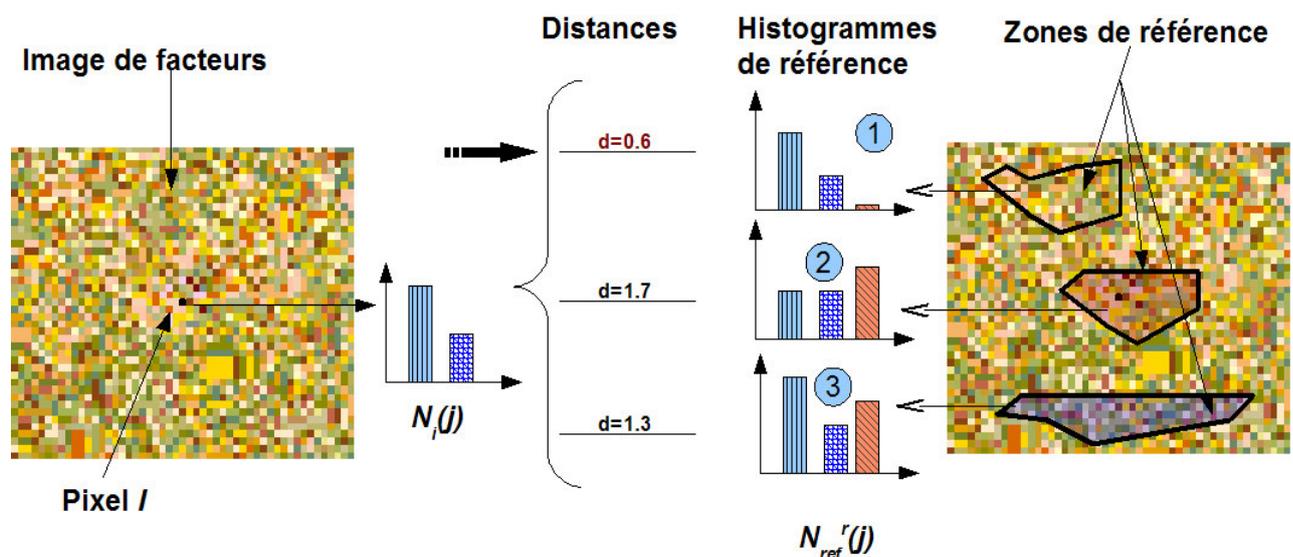


Figure 3. 8 : Description schématique du principe de classification

III.2.5.c) Amélioration de la précision de la cartographie, et gestion de la résolution des unités cartographiques de sortie

La finesse des plages cartographiques des zones homogènes doit être cohérente avec celle des données d'entrée. En pratique, la procédure de classification ne permet pas de gérer directement la finesse des plages cartographiques de sortie. La précision de ces plages cartographiques dépend de la taille de la fenêtre de voisinage choisie, mais aussi de la précision des données d'entrée. Il est alors nécessaire de réaliser un processus itératif jusqu'à l'obtention d'une finesse de ces plages cartographiques qui soit compatible avec celle des données d'entrée. Les principes de la cartographie stipulent qu'on ne doit pas avoir une résolution des unités cartographiques plus fine que celle des données d'entrée. La procédure itérative consiste à tester différentes tailles de voisinage puis de choisir celle qui permet d'obtenir des unités cartographiques en accord avec la résolution des données d'entrée. Une fois que la taille optimale des fenêtres de voisinage est choisie, la classification peut être améliorée par une seconde itération. Il s'agit alors d'ajouter, dans les zones les moins bien classées de la carte des distances, des zones de référence supplémentaires. Cette étape permet donc d'améliorer la précision de la cartographie, en minimisant les écarts entre les pixels de l'image des facteurs et les zones de référence choisies.

A la fin de cette étape de classification, une cartographie des zones homogènes du bassin versant étudié sera réalisée. La délimitation des hydro-paysages se fera en intégrant ces zones homogènes au sein du découpage spatial en sous-bassins réalisé dans le Paragraphe (III.1). On peut ajouter à ce niveau d'autres informations vectorielles pour contraindre d'avantage les hydro-paysages. Nous rappelons également que les hydro-paysages ne sont pas forcément utilisables comme mailles de modélisation. En fonction des processus hydrologiques à modéliser et des méthodes numériques utilisées, on peut être amené à redécouper ces hydro-paysages de façon à respecter différentes contraintes géométriques. L'illustration de l'ensemble de la procédure sera présentée dans le prochain chapitre. On y discutera aussi de quelques limites de l'approche proposée.

CHAPITRE IV "Application de la procédure de découpage spatial au Haut-bassin versant de la Saône"

Dans ce chapitre, l'ensemble de la procédure de découpage spatial présentée au Chapitre (III) sera illustré au travers d'un exemple sur le haut-bassin versant de la Saône (Figure.5.1), à l'amont de la station de Lechatelet (11 700 km²). Dans un premier temps, nous allons présenter les données disponibles, puis nous définirons les objectifs de la modélisation et les choix des méthodes de représentation des processus. Dans un deuxième temps, nous mettrons en œuvre, étape par étape, la procédure de discrétisation proposée au Chapitre (III) pour l'objectif de modélisation qui aura été spécifié.

Le choix du haut-bassin de la Saône en amont de la station de Lechatelet a été motivé par plusieurs éléments. Tout d'abord, ce bassin a servi de cadre d'étude à plusieurs travaux précédents et les données dont nous avons besoin étaient donc disponibles. On peut citer la cartographie des écoulements par utilisation de méthodes géostatistiques (Sauquet, 2000 ; Sauquet et al., 2000), le projet GEWEX Rhône (Ottlé et al., 2001) qui a permis l'évaluation de plusieurs modélisations hydrologiques sur le Rhône. Le projet GICC-Rhône (Leblois et al., 2004) a étendu les résultats de GEWEX-Rhône à l'analyse de l'impact du changement climatique sur le régime des rivières. Dans ce cadre, un autre modèle hydrologique spatialisé, le modèle ECOMAG (Motovilov et al., 1999b) a été mis en œuvre sur le haut-bassin de la Saône et une analyse de sensibilité aux paramètres du modèle a été menée à l'échelle régionale par approches multi-critères (Engeland et al., 2006). Cette application concernait l'évaluation spatialisée des différentes composantes du bilan hydrologique sur des échelles de temps annuelles, mensuelles et journalières. Nous avons donc considéré qu'il était intéressant de nous placer dans le même cadre de modélisation afin d'avoir la possibilité de confronter ultérieurement nos approches à ces

travaux antérieurs. Cet objectif d'intercomparaison n'aura pas été réalisé dans le cadre de cette thèse, mais cette dernière a permis la mise en place des outils et traitements qui pourront être utilisés pour la mener à son terme.

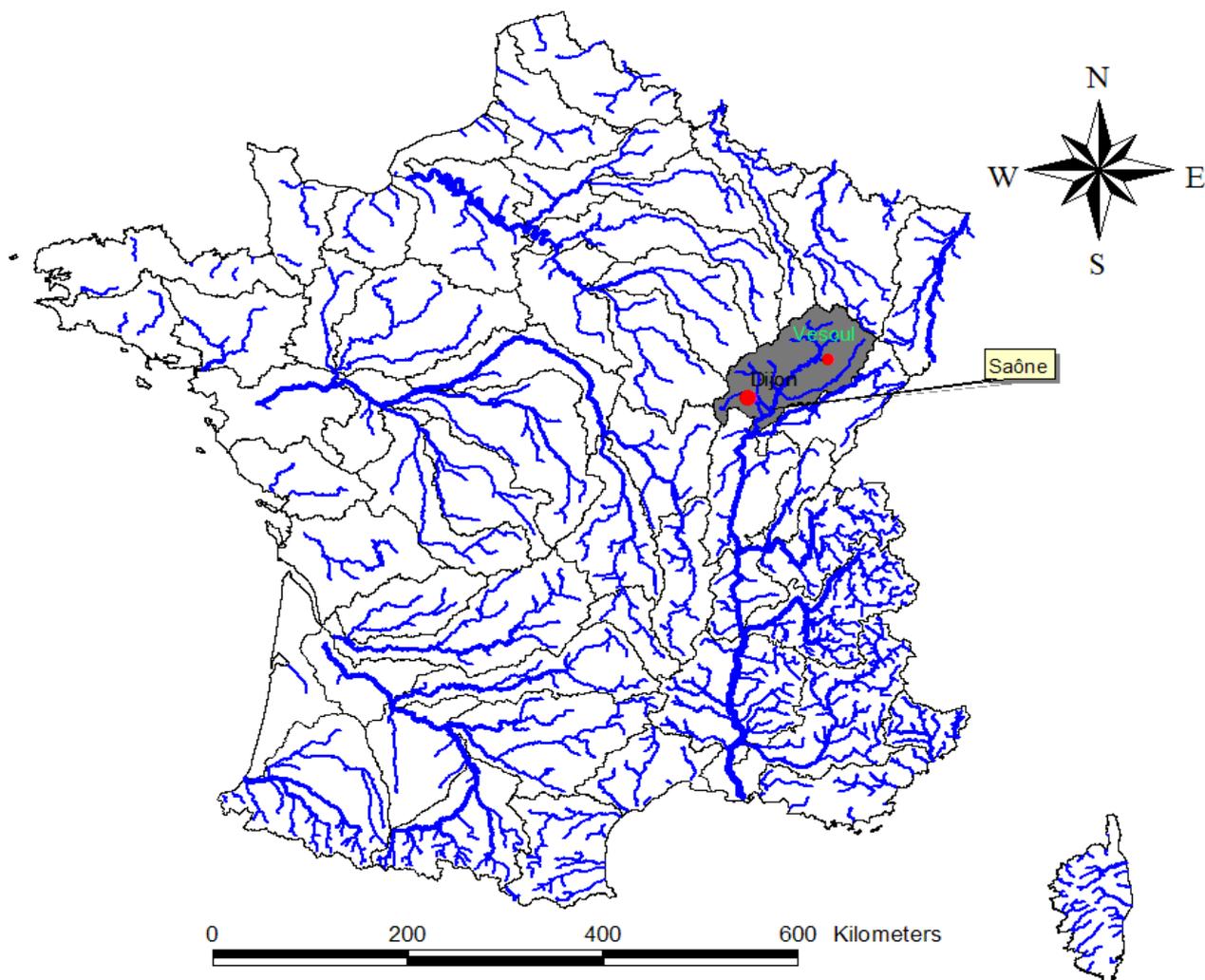


Figure 4. 1 : Localisation du haut-bassin de la Saône à l'amont de la station de Lechatelet.

IV.1. Description du bassin versant et présentation des données disponibles

IV.1.1. Généralités sur le bassin versant

La Saône prend sa source dans les montagnes des Vosges en Lorraine. L'altitude du bassin versant varie de 177m à l'aval du bassin à plus de 1215m à l'amont, dans les Vosges. La principale occupation des sols est constituée par un couvert végétal composé de forêts de feuillus, de terrains agricoles et de pâturages. Les terrains agricoles sont principalement situés au sud du bassin versant. Les zones urbanisées ne représentent que 2% de la surface totale du bassin. Le contexte géologique est caractérisé par une prédominance de terrains sédimentaires et alluviaux dans le Sud du bassin, et une prédominance de terrains granitiques au Nord du bassin. Le bassin versant est également marqué par une présence importante de terrains calcaires.

IV.1.2. Les données disponibles.

Les données disponibles sur le bassin versant étudié sont les suivantes :

- Données de précipitation (pluie, et neige) évapotranspiration potentielle, températures maximales et minimales, données fournies par Météo-France réparties sur des grilles de 8x8 km² pour la période 01/08/1981 – 31/07/1998, avec un pas de temps de 3h. Ces données sont issues d'analyses SAFRAN (Système d'Analyse Fournissant des Renseignements Atmosphériques à la Neige) (Durand et al., 1993).

- Données de débits journaliers de la banque de données HYDRO⁵ pour la période du 01/08/1981 au 31/07/1998 sur 22 stations. La localisation des stations de mesure de débit du réseau hydrographique est présentée sur la Figure (4.2). La taille des sous-bassins versants correspondants varie de 65 à 3700 km². Des séries de données piézométriques sont aussi disponibles sur le site du Réseau National De l'Eau (RNDE)

⁵ <http://www.hydro.eaufrance.fr/>

□ Modèles numériques de terrain (MNT) avec des résolutions de 100m, 200m et 1000m de l'IGN (Institut Géographique National). Différents paramètres peuvent être dérivés de ces MNT (la pente, l'orientation, etc.). La Figure (4.4) présente la pente issue du MNT à 200m.

□ Données d'occupation des sols issues de 'Corine Land Cover' fournies par l'Institut Français de l'ENVironnement (IFEN) avec une résolution de 500m (Fig 4.5). La base de données contient 44 classes d'occupation des sols organisées en trois niveaux (Bossard et al., 2001).

□ La base de données ECOCLIMAP⁶ de Météo-France qui contient une classification de l'occupation des sols à l'échelle globale avec une résolution kilométrique. Elle fournit aussi les paramètres décrivant l'évolution mensuelle interannuelle de la phénologie des types de couverture végétale (Masson et al., 2003).

□ Carte des sols fournie par l'INRA (Institut National de Recherches Agronomiques) à l'échelle 1/1 000 000^{ème} (Jamagne et al., 1995). Pour la région Bourgogne, nous disposons aussi d'une base de données sol plus précise à l'échelle 1/250 000^{ème}. Elle est issue du programme IGCS (Inventaire Gestion et Conservation des Sols) piloté par l'INRA au niveau national⁷, mais mis en œuvre par différentes instances au niveau régional (Sols et Territoires de Bourgogne⁸ pour les données dont nous disposons) : c'est la base de données DONESOL. La Figure (4.3) illustre la structure des données sol dans la base de données DONESOL. Une présentation plus détaillées sur cette structure de données sur le sol est présentée en Annexe (I).

□ Carte géologique à l'échelle 1/1 000 000^{ème} du BRGM (Bureau de Recherche Géologique et Minières). Cette carte décrit les principales formations géologiques du bassin étudié. La Figure (4.6) représente la lithologie des formations géologiques en présence. Des détails sur cette carte sont fournis en Annexe (II).

□ Carte du réseau hydrographique du bassin versant, proposée par l'IGN (Institut Géographique National), à travers la BDCarthage⁹ et fournie par l'Agence de l'eau à l'échelle 1/250 000^{ème} (Figure 4.2).

⁶ http://www.cnrm.meteo.fr/gmme/PROJETS/ECOCLIMAP/page_ecoclimap.htm

⁷ <http://www.gissol.fr/>

⁸ <http://www.igcs-stb.org/>

⁹ <ftp://ftp.rndc.tm.fr/>

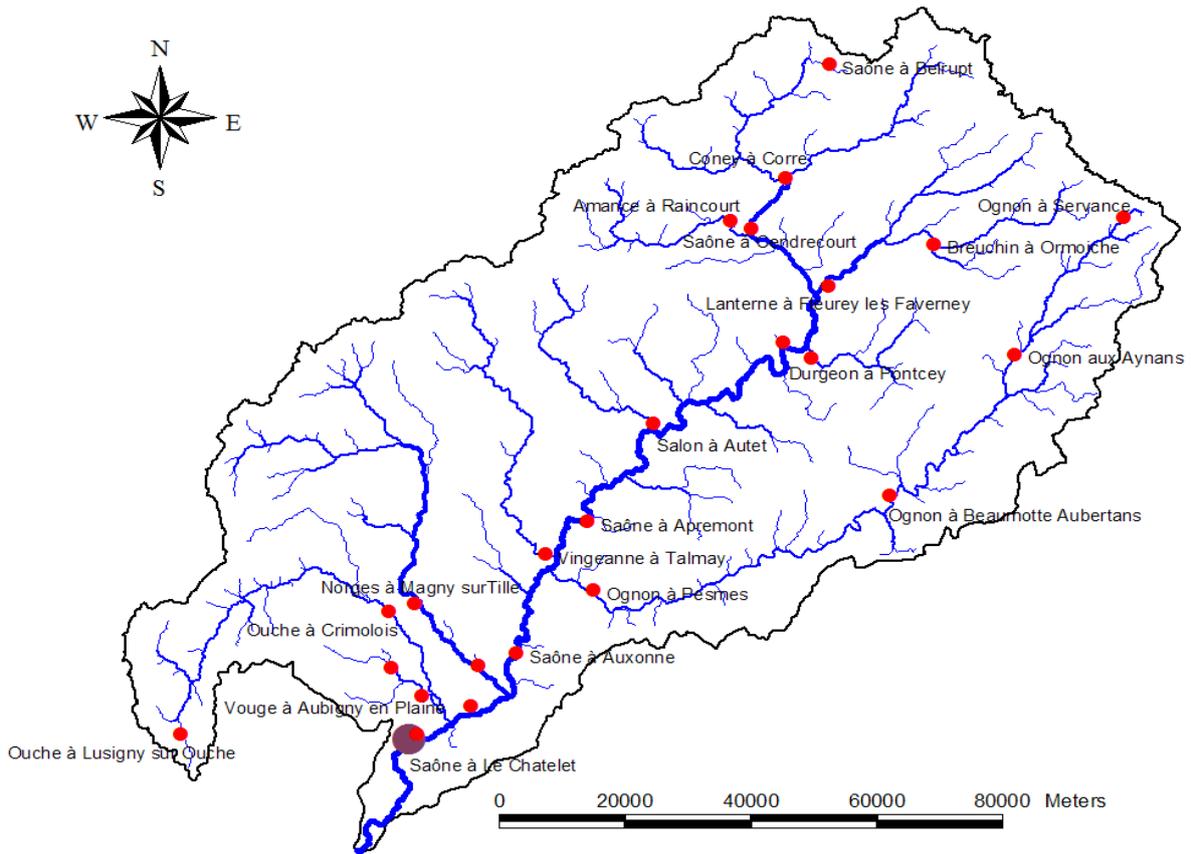


Figure 4. 2 : Réseau hydrographique et stations de mesure de débit

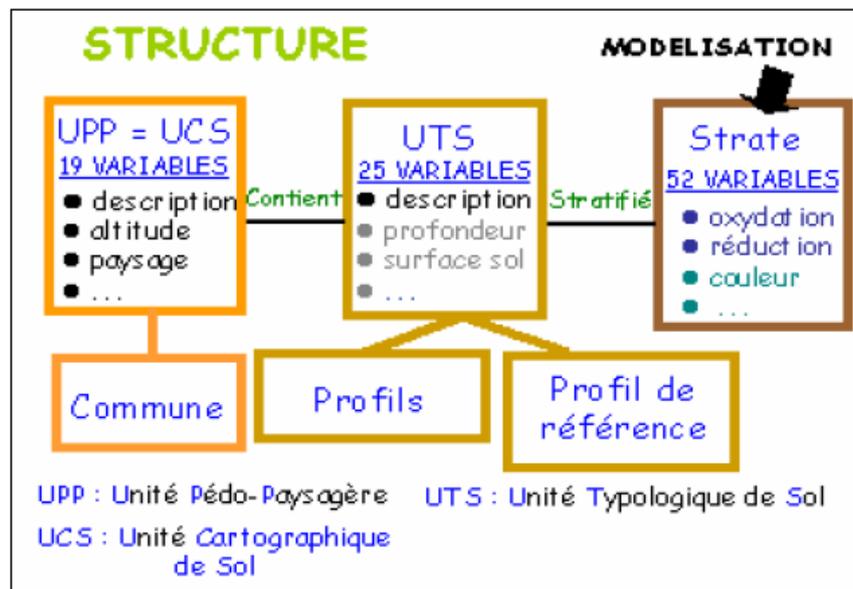


Figure 4. 3 : Schéma de données des bases de données sol du programme IGCS (source <http://sol.ensam.inra.fr/BdSolLR/Asp/Diaporama.asp>)

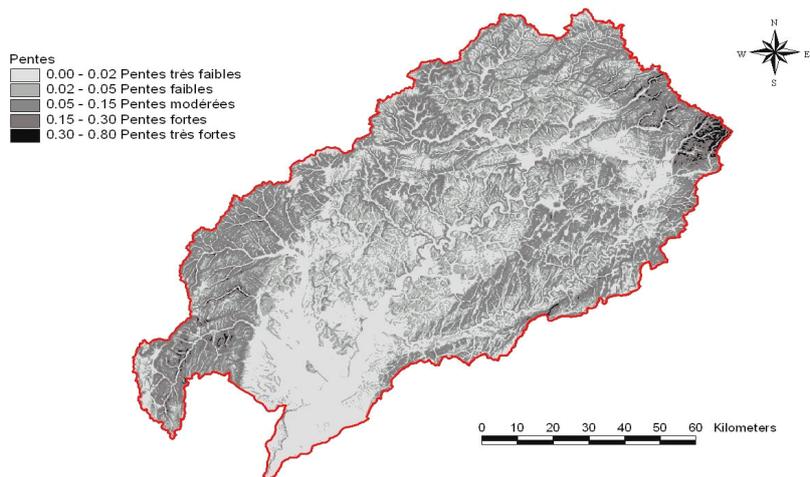


Figure 4. 4 : Carte de pente issue du MNT à 200m

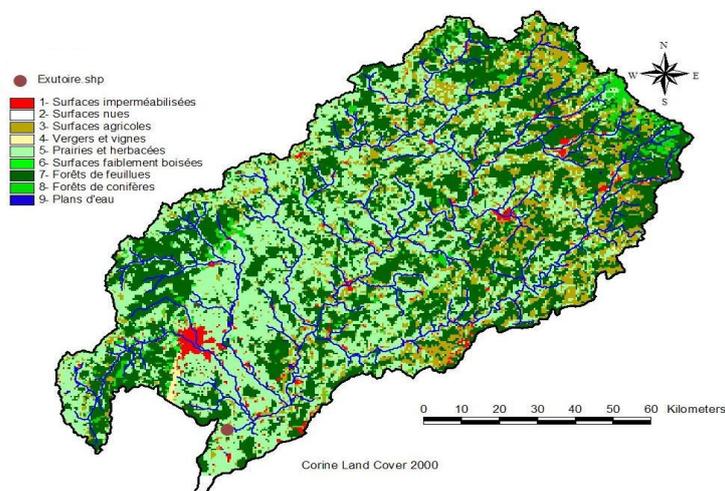


Figure 4. 5 : Occupation des sols re-classifiée en 9 classes (Corine Land Cover)

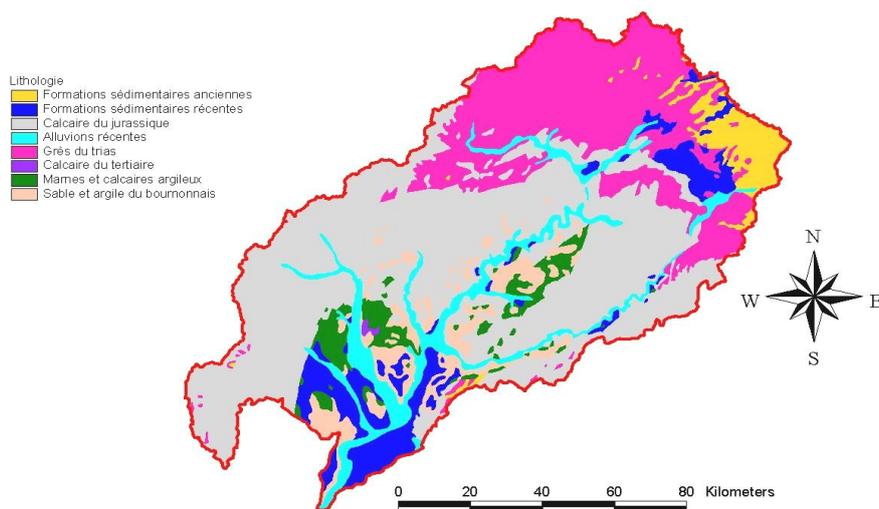


Figure 4. 6 : Carte lithologique au 1/1000000^{ème} (BRGM)

IV.2. Définition des objectifs de la modélisation et choix des représentations des processus

Avant de passer au découpage du bassin versant proprement dit, nous avons vu au Chapitre (III) (Figure 3.1) qu'il est d'abord nécessaire (i) de définir les objectifs de la modélisation ; (ii) de choisir les processus et les méthodes de représentation de ces processus à prendre en compte, en cohérence avec les données disponibles. C'est cette étape qui est détaillée dans ce paragraphe que nous terminerons en comparant le type de modélisation que nous aurons retenue avec celui du modèle ECOMAG, déjà utilisé sur le bassin.

Comme nous l'avons mentionné en introduction, nous reprenons ici les objectifs de modélisation des travaux menés antérieurement sur le haut-bassin de la Saône. Il s'agit donc de déterminer quel peut être l'impact de modifications de l'occupation des sols ou du climat sur les composantes du bilan hydrologique (les débits, les flux d'évapotranspiration, les flux de recharge de la nappe) sur ce bassin versant. Nous nous plaçons donc dans un contexte de simulations de long terme (quelques dizaines d'années) et les échelles temporelles visées pour les sorties sont les échelles annuelles, mensuelles et journalières. Du point de vue spatial, nous souhaitons disposer des sorties de ces simulations à l'échelle de sous-bassins dont la taille minimale est de l'ordre de grandeur du plus petit bassin jaugé, c'est-à-dire environ 50 km².

Les processus hydrologiques à représenter seront donc les suivants : infiltration et transfert dans la zone saturée et non saturée des sols, ruissellement, évapotranspiration, écoulement dans les nappes et le réseau hydrographique, ainsi que les interactions entre ces processus. A partir des données disponibles, nous allons maintenant évaluer quelles sont les représentations de ces processus hydrologiques que nous pouvons utiliser en cohérence avec la résolution des informations disponibles.

IV.2.1. Hétérogénéité des données d'entrée.

Les données disponibles sont caractérisées par une grande hétérogénéité des résolutions, mais cette situation est souvent rencontrée lorsqu'on cherche à mettre en œuvre une modélisation hydrologique spatialisée sur un bassin versant donné.

L'information météorologique disponible est grossière aussi bien dans l'espace (maille de 8x8 km²) que dans le temps (3 heures). Il ne sera donc pas possible de représenter les dynamiques rapides, notamment celles du ruissellement qui seraient liées à des épisodes pluvieux de type orageux. L'information topographique la plus fine est à une résolution de 100m, ce qui là encore n'autorise pas une représentation fine des processus de ruissellement. L'occupation des sols a une résolution de 500m. Les données sur les sols ont une échelle encore plus grossière de 1/1000000^{ème} (ce qui correspond à peu près à une résolution de 1km). A cette échelle, la terminologie est basée sur une simplification de la diversité spatiale de la couverture du sol à l'échelle du territoire français. Cette description n'a pas la précision qui permettrait d'isoler les types de sol selon leur texture ou selon leur comportement hydrodynamique. Comme nous le détaillons en Annexe (I), les Unités Cartographiques contiennent plusieurs types de sols (Unités Typologiques) dont la répartition spatiale n'est pas connue précisément. Ce premier tour d'horizon des données nous oriente vers des représentations plutôt simplifiées des processus hydrologiques que nous allons maintenant détailler.

IV.2.2. Représentation de l'infiltration et des transferts de l'eau dans les sols

Les transferts dans la zone non saturée des sols sont traditionnellement modélisés à l'échelle locale par l'équation de Richards (1931). Pour déterminer l'infiltration de l'eau dans le sol, on peut utiliser des approximations de cette équation comme la méthode de Horton (1933) ou l'équation de Philip (1957) qui décrivent l'évolution de la capacité d'infiltration du sol. On peut aussi utiliser l'approche de Green and Ampt (1911), qui représente l'infiltration comme l'enfoncement d'un front d'infiltration brusque entre la condition initiale et la saturation. De façon générale, ces approches nécessitent de connaître des informations sur la description des profils de sols : nombre et géométrie des horizons ou strates ainsi que, pour chaque horizon, des paramètres décrivant les propriétés hydrodynamiques des sols (courbes de rétention et de conductivité hydraulique, etc.). Ces paramètres sont directement liés au type de sol. Or comme le montre la structure des données sur le sol présentée sur la Figure (4.3), les unités cartographiques (UC) de sol disponibles peuvent être constituées de plusieurs unités typologiques (UT) de sol dont on ne connaît que les pourcentages de représentation au sein des UC (on ne connaît pas la localisation des UT au sein des UC). En l'absence de mesures de terrain, on peut proposer des valeurs de ces paramètres pour chaque UT grâce à des fonctions de pédo-transfert. Ces dernières permettent, à partir de relations statistiques établies sur des échantillons de sol, de relier les paramètres hydrodynamiques à la texture du sol (Clapp and Hornberger, 1978 ; Cosby et al., 1984) ou la structure des sols via une information sur la porosité (exemple : Rawls and Brackensieck, 1985 ; Wösten et al., 2001). En revanche, proposer des valeurs représentatives au niveau des UCs, en tenant compte des différents sols qui les composent, est plus délicat à cause de la non-linéarité des transferts dans la zone non saturée. Les travaux de Soria-Ugalde (2003) ont ainsi montré que les paramètres effectifs déduits d'une texture moyenne, ne conduisaient pas à des valeurs correctes pour les flux d'eau dans le sol agrégés au niveau de l'UC. En revanche, le flux à l'échelle des UCs, obtenu comme moyenne pondérée des flux issus de chaque UT, fournit une estimation plus exacte. Cette approche est donc à privilégier dans

notre cas. On peut aussi simplifier en retenant, comme sol représentatif pour l'UC, le profil de sol de l'UT majoritaire dans l'UC.

La signification physique des paramètres à l'échelle des unités cartographiques n'est plus la même que celle proposée au sein des équations de Richards ou de Green et Ampt qui ont été établies à l'échelle locale. Néanmoins, Reggiani et al. (2000) montrent que, moyennant certaines hypothèses simplificatrices, l'intégration de l'équation de conservation de la masse dans la zone non saturée à l'échelle des sous-bassins, conduit à une équation intégrée proche de l'équation de Green et Ampt. De même, les travaux de Haverkamp et al. (1998) ont montré qu'il était possible d'adimensionnaliser l'équation de Richards et d'en proposer une version indépendante de l'échelle avec des facteurs d'échelle ou d'adimensionnalisation dépendant de la texture et de la structure du sol, mais aussi des conditions initiales et aux limites. En nous appuyant sur ces travaux, nous considérons donc que, pour la modélisation de l'infiltration et des transferts dans les sols saturés et non saturés, nous pouvons utiliser l'équation 1D de Richards. Nous bénéficions par ailleurs des travaux de Ross (2003) et Varado et al. (2006) qui ont proposé et validé une méthode précise et rapide de résolution de l'équation de Richards, qui limite les temps de calcul par rapport aux méthodes classiques de résolution. Ceci autorise son utilisation sur de grandes surfaces et permet en outre de valoriser les informations sur les profils de sol, puisqu'on peut tenir compte de l'hétérogénéité verticale des sols. Pour la détermination des paramètres hydrodynamiques, nous pouvons nous appuyer sur les résultats de Manus (2007) qui a analysé la sensibilité des résultats de l'équation de Richards, sur la région Cévennes-Vivarais, selon les fonctions de pédo-transfert utilisées. Elle a montré que les fonctions qui incluaient une information sur la structure des sols fournissaient des résultats plus réalistes à l'échelle de la région, confirmant ainsi certains résultats de Mumen (2006) à l'échelle de la parcelle. Enfin, l'analyse de la sensibilité des résultats de l'équation de Richards à la variabilité des sols de la base de données Languedoc-Roussillon menée par Manus (2007) nous amène à penser qu'il faut aussi tenir compte de cette variabilité dans notre modélisation. C'est pourquoi nous appliquerons l'équation de Richards au niveau des hydro-paysages. La résolution de cette équation nous fournira, pour chaque hydro-paysage, les volumes d'eau infiltrés, le refus à l'infiltration (ponding), ainsi que les niveaux saturés et/ou le flux de recharge de la nappe.

IV.2.3. Représentation du ruissellement et des transferts latéraux dans les sols.

Lorsqu'on parle de ruissellement, on distingue généralement la production, c'est-à-dire la détermination des volumes disponibles pour l'écoulement, et le transfert, c'est-à-dire la manière dont cette eau est transmise jusqu'au réseau hydrographique, puis dans ce réseau.

Pour déterminer les volumes d'eau disponibles au ruissellement sur les unités de modélisation, on peut utiliser des approches empiriques qui fourniront un volume global, dit aussi pluie efficace durant un intervalle de temps donné. La pluie efficace peut être évaluée par des méthodes de type SCS-CN (Soil Conservation Service - Curve Number) qui affectent une valeur de coefficient de ruissellement en fonction du type de sol et de l'occupation des sols (exemple : Chow et al., 1988).

On peut aussi utiliser la méthode proposée par Chow (1964), qui considère que le ruissellement direct dans les cours d'eau peut être déterminé à partir d'une relation simple entre les hauteurs d'eau précipitées et les lames d'eau écoulées, exprimée de la manière suivante :

$$R = \frac{(P - 0.2S)}{(P + 0.8S)^2} \quad \text{Eq. 4.1}$$

R est le ruissellement; P est la hauteur totale de la pluie considérée; S est le paramètre de rétention ou pertes initiales, estimé en fonction du complexe hydrologique sol/couverture végétale/humidité du sol du bassin versant considéré.

La modélisation de l'infiltration présentée dans le paragraphe précédent nous permet aussi de disposer des quantités d'eau disponibles au ruissellement de surface (ponding). Soulignons que cette eau peut être générée, soit par du refus à l'infiltration (mécanisme de Horton), lorsque l'intensité de la pluie est supérieure à la capacité d'infiltration du sol, soit par un mécanisme de saturation de l'ensemble du profil de sol ou des strates supérieures du profil. On peut aussi obtenir des saturations partielles des profils de sol en profondeur lorsque les contrastes de conductivité hydraulique le permettent.

Il faut ensuite passer au transfert de ce ruissellement jusqu'au réseau hydrographique. Les mécanismes qui contrôlent les transferts d'eau à la surface du sol ont une échelle fonctionnelle qui est très locale. La représentation de l'écoulement peut se faire suivant

plusieurs approches. La première consiste à utiliser directement les équations de Saint-Venant ou ses approximations (équation de l'onde cinématique ou de l'onde diffusante). A titre d'illustration, l'équation suivante est l'équation utilisée pour l'approximation de l'onde cinématique

$$\frac{\delta A}{\delta t} + \alpha^{m-1} \frac{\delta A}{\delta x} = q \quad \text{Eq. 4. 2}$$

Avec

$$\alpha = 1.486 \frac{S^{0.5}}{N} = q \quad \text{et} \quad m = 5/3.N$$

A est la section en travers, S est la pente, N est le coefficient de rugosité et q est le débit d'apport latéral.

Ces équations utilisent les notions de rugosité, de résistance à l'écoulement et de pente qui sont très liées au support de l'écoulement (sa taille et son occupation de sol). La topographie locale à une forte influence dans ces modèles.

Si ces informations détaillées ne sont pas disponibles, on peut utiliser la méthode de l'hydrogramme unitaire qui suppose une hypothèse de linéarité entre la pluie efficace et l'écoulement.

L'équation permettant de simuler les débits de ruissellement peut être écrite sous la forme suivante :

$$Q_n = \sum_{i=1}^n P_i U_{n-i+1} \quad \text{Eq. 4. 3}$$

Q_n est le débit de ruissellement au temps $n.\Delta t$, P_i est la pluie efficace tombée sur le bassin versant entre $i.\Delta t$ et $(i+1).\Delta t$. U_j est la valeur de l'hydrogramme unitaire au temps $j.\Delta t$. Mais cette approche nécessite l'identification de l'hydrogramme unitaire et donc la disponibilité des données de pluie et de débit pour inverser l'Equation (4.3) (Chow et al., 1988). Cette approche n'est donc pas applicable pour des bassins non jaugés. Or, nous souhaitons mettre en œuvre une méthode utilisable en tout point du bassin. Nous pouvons envisager l'utilisation de fonctions isochrones ou encore la méthode de l'hydrogramme géomorphologique (Rodriguez-Iturbe et al., 1979).

Dans notre cas d'étude, les paramètres qui peuvent être tirés d'un MNT à 100m ou 200m sont trop grossiers pour modéliser le ruissellement de surface avec des équations de type

Saint-Venant. De plus, la résolution spatiale et temporelle des précipitations en entrée est trop grossière pour modéliser le ruissellement aussi finement. En revanche, nous avons vu que le choix de l'équation de Richards pour modéliser les écoulements d'eau dans la zone saturée et non saturée et l'infiltration nous permet de disposer de l'évolution temporelle du refus à l'infiltration (ou ponding). On peut utiliser l'une des méthodes citées plus haut pour réaliser le transfert de ce ruissellement jusqu'au réseau hydrographique (isochrones, hydrogramme géomorphologique). On peut aussi utiliser des hypothèses simplificatrices sur la manière dont les volumes sont transmis jusqu'au réseau hydrographique, en supposant par exemple un transfert instantané pour des tailles de sous-bassins versants suffisamment petites (quelques km²). Compte tenu des approches retenues, nous ne modélisons pas de transferts latéraux dans la zone superficielle du sol. De plus, ces transferts sont souvent mis en avant pour l'étude des épisodes de crues rapides (conceptualisations utilisées dans TOPMODEL, TOKAPI), que nous ne cherchons pas à représenter dans notre modélisation. En revanche, compte tenu de la taille du bassin et de la question qui nous intéresse, nous prendrons en compte les transferts dans les nappes alluviales (voir Paragraphe IV.2.5)

IV.2.4. Représentation de l'évapotranspiration

Nous ne disposons que d'une information sur l'évapotranspiration potentielle (ETP) avec une résolution spatiale de 8x8 km² et une résolution temporelle de 3h. Nous nous intéressons à des simulations de l'évapotranspiration à l'échelle de la journée. Il n'est donc pas utile (et les données climatiques correspondantes ne sont pas disponibles) de mettre en œuvre une modélisation de type Sol- Végétation-Atmosphère comme le modèle ISBA (Noilhan et Planton, 1989) ou le modèle SiSPAT (Braud et al., 1995). Nous pourrions utiliser une approche fondée sur l'évapotranspiration potentielle, mais simulant les trois composantes : interception des précipitations par la végétation, transpiration, évaporation du sol. L'approche proposée par Varado et al. (2006) répond à ces conditions. L'interception des précipitations peut être modélisée par un réservoir identique à ce qu'on trouve dans ISBA et SiSPAT. La partition de l'ETP entre le sol et la végétation s'appuie sur une équation de Beer-Lambert, fonction de l'indice foliaire. Enfin, l'extraction racinaire, peut être modélisée selon l'approche de Li et al. (2001) et prend en compte le

stress hydrique et un mécanisme de compensation entre couches de sol sèches et humides. Cette modélisation a enfin été couplée à l'équation de Richards mentionnée dans le Paragraphe (IV.2.2). Le calcul se fera alors pour les différents hydro-paysages. Les paramètres décrivant la végétation pourront être tirés de la base de données ECOCLIMAP (Masson et al, 2003).

IV.2.5. Représentation des écoulements dans les nappes

Une première analyse des informations disponibles dans le référentiel hydrogéologique disponible sur le site du RNDE⁶ montre qu'il y a plusieurs aquifères sur l'ensemble du bassin (Figure 4.7). La plupart des nappes existantes sont à surface libre. Une bonne moitié de la surface correspondante se situe dans des terrains calcaires, et l'autre moitié correspond à des nappes alluviales. La modélisation des zones karstiques est encore loin d'être formalisée. Nous nous limiterons donc à la prise en compte des nappes alluviales dans la modélisation. C'est le choix qui avait aussi été fait par le BRGM dans une modélisation antérieure de l'ensemble du bassin de la Saône (Leblois et al., 2004) avec le modèle MARTHE (Thiery and Amraoui, 2001). Ces nappes revêtent une grande importance pour les questions de ressources en eau puisqu'elles peuvent interagir fortement avec le réseau hydrographique et peuvent permettre de soutenir les étiages. Nous reviendrons plus en détails sur les modèles d'écoulement dans les nappes (Chapitre VI). Pour une problématique de type ressources en eau, une modélisation bidimensionnelle nous semble suffisante. L'équation de Boussinesq 2D fournit une bonne approximation pour une telle représentation. Les modèles de nappes utilisent traditionnellement un maillage à base carrée, comme c'est le cas pour les modèles MODCOU (Ledoux et al., 1989), MODFLOW (Harbaugh et al., 2000); MIKE_SHE (DHI, 2005), etc.. Cette modélisation est généralement couplée avec une modélisation des transferts dans la zone non saturée, s'appuyant sur le même maillage. Nous avons retenu une modélisation de la zone non saturée s'appuyant sur les hydro-paysages. Pour simplifier le couplage entre le module de nappe et le module de résolution de l'équation de Richards, nous avons fait le choix de prendre le même support pour les mailles de base du module de nappe (avec un redécoupage éventuel des hydro-paysages pour qu'ils respectent les frontières des aquifères, et éventuellement le réseau hydrographique). Ceci

nous obligera à adapter les méthodes numériques classiques à ce maillage irrégulier, mais évitera des interpolations spatiales potentiellement sources d'erreurs pour les échanges de flux entre zone non saturée et saturée. L'utilisation de maillages irréguliers devrait aussi faciliter le couplage entre nappe et rivière. Nous y reviendrons en détail dans la troisième partie du mémoire.

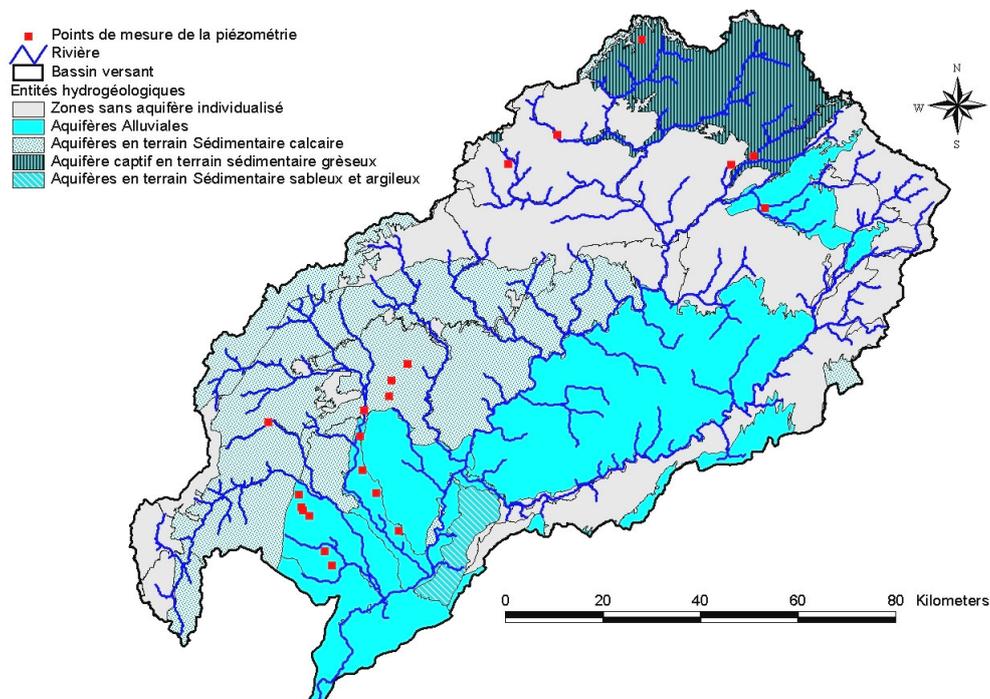


Figure 4. 7 : Carte hydrogéologique du bassin versant de la Saône. (Source : RNDE¹⁰)

IV.2.6. Représentation des écoulements dans les rivières

La simulation des écoulements dans les rivières peut s'appuyer sur deux types d'approche : physique ou simplifiée. Nous avons déjà évoqué les méthodes simplifiées pour le ruissellement (isochrones, hydrogramme géomorphologique). Au niveau des équations physiques, il y a trois classes de modèles, toutes basées sur les équations de Saint-Venant. A travers les modélisations en 3D et en 2D, le réseau hydrographique est discrétisé finement pour simuler avec précision les plaines d'inondation et les crues rapides (2D), ou pour simuler les vagues ou les chocs (3D). Ce type de modélisation 3D est souvent réservé à des études très fines sur des secteurs présentant des enjeux particuliers. Il ne correspond pas aux objectifs de modélisation que nous nous sommes

¹⁰ <http://www.rnde.fr/>

fixés et ne pourrait de toute façon pas être mis en œuvre dans notre cas, faute de données d'entrée correspondantes. Pour le transfert de l'eau dans le réseau hydrographique, on peut se contenter d'utiliser les équations de Saint-Venant 1D ou leurs approximations. Elle présente aussi l'avantage de pouvoir traiter des réseaux hydrographiques ramifiés et de prendre en compte des ouvrages. Ces derniers ne sont pas considérés dans ce travail et nous retiendrons une modélisation simple des transferts dans la rivière, s'appuyant sur une approximation de l'onde cinématique, sans prétention sur les plaines d'inondation, ni sur la dynamique des crues rapides.

IV.2.7. Synthèse sur la modélisation retenue et comparaison avec le modèle ECOMAG

En résumé, la modélisation que nous proposons s'appuie sur une discrétisation en hydro-paysages (éventuellement re-découpés pour respecter certaines frontières comme les aquifères ou les sous-bassins ou pour respecter des contraintes géométriques liées aux méthodes numériques utilisées) et des représentations des processus de complexité intermédiaire (Figure 4.8):

- ❑ L'infiltration et les transferts de l'eau dans le sol sont modélisés par l'équation de Richards 1D, en prenant en compte l'hétérogénéité verticale des profils de sol. Cette approche nous permet de simuler les flux d'eau dans le sol et donc d'envisager un couplage avec les écoulements dans la nappe.
- ❑ La résolution de l'équation de Richards nous fournit aussi les volumes d'eau disponibles pour le ruissellement. Les hydrogrammes correspondant seront transférés instantanément au réseau hydrographique, moyennant des tailles de sous-bassins de quelques km² et donc une description du réseau hydrographique assez fine.
- ❑ Les différentes composantes de l'évapotranspiration : interception, évaporation du sol et transpiration sont représentées. La transpiration est obtenue en sommant les extractions racinaires, elles-mêmes termes puits/sources dans les équations de Richards.
- ❑ Les écoulements dans les nappes libres alluviales sont représentés via l'équation de Boussinesq 2D, et les interactions avec la rivière seront prises en compte.

- Enfin, les écoulements dans la rivière sont simulés, sur réseau ramifié, par une approximation de type onde cinématique des équations de Saint-Venant.

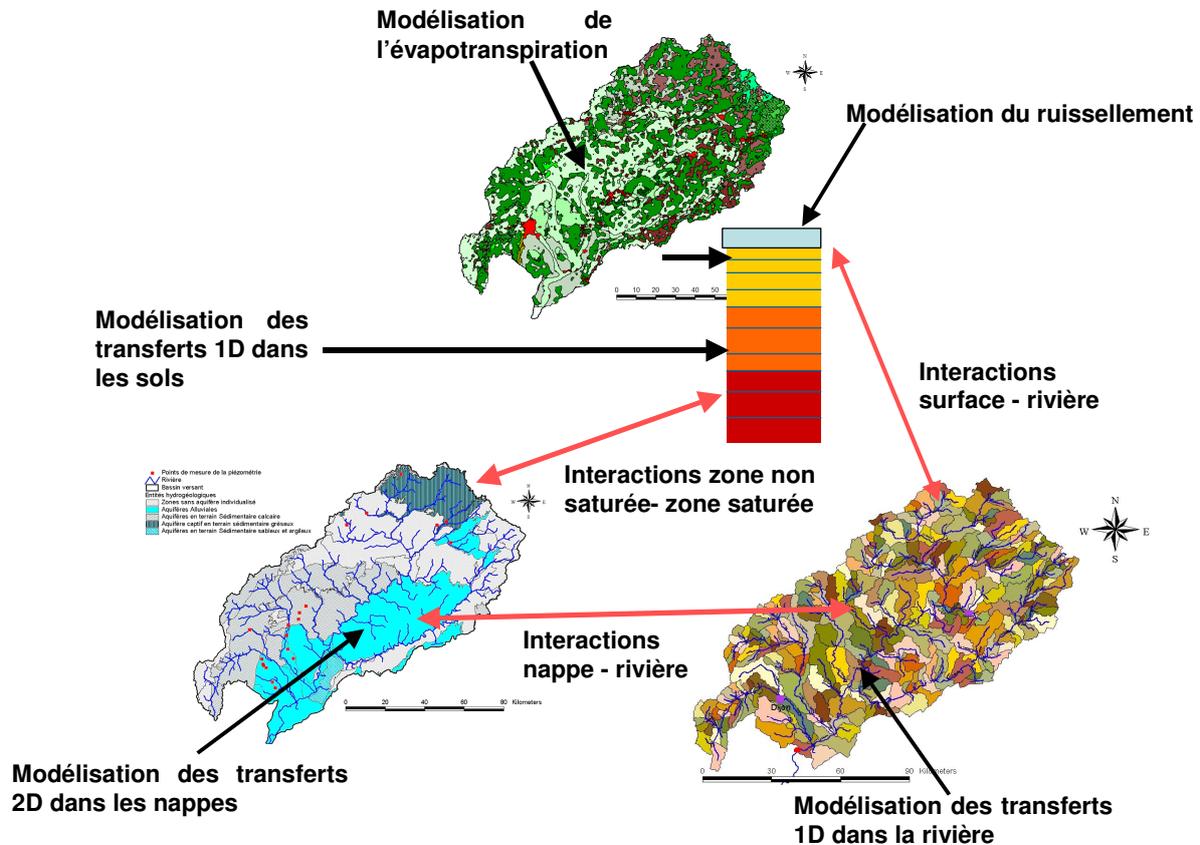


Figure 4. 8 : Schéma de la modélisation retenue

A titre de comparaison, la Figure (4.9) présente une schématisation des processus pris en compte dans le modèle ECOMAG, qui a aussi été utilisé sur le Haut-bassin de la Saône. Pour chaque unité de modélisation, une partie des précipitations peut être interceptée selon le modèle de Rutter. Le sol est divisé en 3 horizons : les horizons A et B dans la zone non saturée et l'horizon C pour la nappe. L'infiltration est calculée en utilisant une capacité d'infiltration différente pour chaque unité. Dans les horizons A et B, on distingue la zone capillaire où est puisée l'évapotranspiration et la zone non capillaire. Cette dernière se remplit quand la zone capillaire excède la capacité au champ. C'est le niveau d'eau dans cette zone non capillaire qui contrôle les transferts vers les horizons sous-jacents. Pour chaque horizon, des écoulements latéraux, régis par la loi de Darcy sont considérés. Ils sont transmis soit à la cellule amont soit au brin de rivière le plus proche. Le ruissellement de surface et les écoulements dans la surface sont représentés par l'approximation de l'onde cinématique.

Si on compare avec les choix que nous avons retenus, on constate que la représentation des transferts dans les sols est plus détaillée dans notre approche (discrétisation verticale selon les horizons de sol), de même que la représentation de l'évapotranspiration qui distingue la contribution des plantes et du sol nu. En revanche, nous ne considérons pas de transferts latéraux dans la zone superficielle du sol, mais uniquement dans la nappe. Les nappes ne sont pas modélisées explicitement dans ECOMAG et les résultats sur la Saône ont montré que le modèle avait du mal à simuler les bas débits, peut-être à cause de cette non prise en compte (Engeland et al., 2006). Ceci a motivé l'inclusion de cette composante dans notre modèle. La représentation du ruissellement que nous avons retenue est en revanche beaucoup plus grossière que celle d'ECOMAG (onde cinématique). Malgré des différences, les conceptualisations retenues dans les deux modélisations sont donc de complexités voisines et les mêmes processus sont pris en compte (sauf la neige qui est présente dans ECOMAG).

La discrétisation spatiale utilisée dans l'application de Engeland et al. (2006) s'appuie sur des mailles régulières de 2 km de côté. C'est donc au niveau de la discrétisation de l'espace que nous verrons apparaître les différences majeures. Mentionnons néanmoins que la version initiale d'ECOMAG (Motovilov et al., 1999a) reposait sur des unités de discrétisation quadrangulaires ou triangulaires tirées du croisement de couches SIG, avec un réseau hydrographique passant le long des arêtes de ces unités. La philosophie de discrétisation initiale était donc assez proche de celle que nous avons retenue.

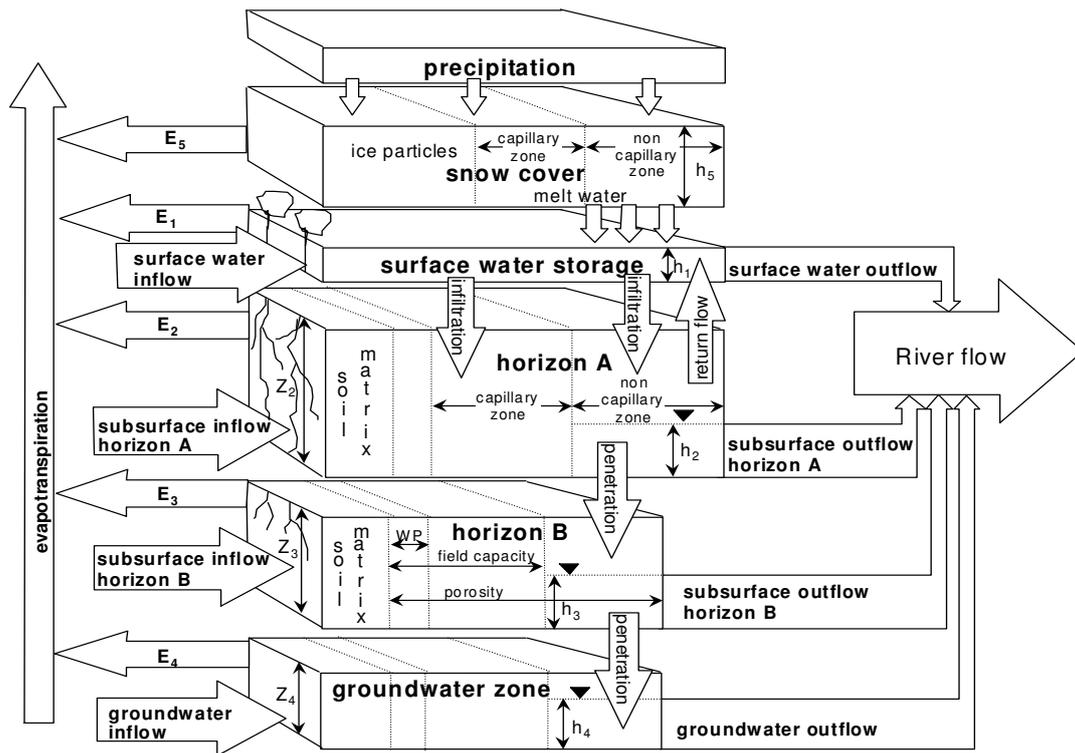


Figure 4. 9: Schéma du modèle ECOMAG (tiré de Motovilov et al., 1999b)

Pour atteindre nos objectifs de modélisation, nous avons souligné l'importance de la prise en compte de l'hétérogénéité spatiale, via les hydro-paysages pour bien évaluer les volumes d'eau infiltrés et ruisselés et via les sous-bassins pour décrire au mieux le réseau hydrographique. Nous allons maintenant détailler les étapes conduisant à ce découpage en sous-bassins et au découpage en hydro-paysages qui permettra la mise en œuvre de la modélisation.

IV.3. Découpage spatial du bassin versant

IV.3.1. Découpage en sous-bassins versants

La diversité des données topographiques (100m, 200m, 1000m) nous a permis de réaliser et comparer différents découpages en sous-bassins. Ces différents découpages pourront servir aux études sur la sensibilité des résultats de la modélisation au découpage spatial. Nous avons utilisé l'ensemble des données topographiques disponibles pour mettre en lumière les incertitudes liées à la procédure de découpage spatial en sous-bassins. On peut distinguer deux sources d'incertitudes : celles liées à la résolution spatiale du modèle numérique de terrain utilisé et celles liées à l'extraction automatique du réseau hydrographique.

IV.3.1.a) Effet de la résolution du MNT et de l'extraction automatique du réseau hydrographique sur la procédure de découpage spatial

Dans ce paragraphe, nous comparons les résultats, en termes de statistiques sur les sous-bassins, de deux méthodes d'extraction du réseau hydrographique qui peuvent être mises en œuvre dans TARDEM : une extraction automatique à partir des algorithmes standards et une extraction en forçant le réseau hydrographique à l'aide d'une information existante (réseau de la BD Carthage au 1/ 100 000^{ème}). Pour les trois résolutions du modèle numérique de terrain, nous comparons trois niveaux de découpage, en utilisant respectivement comme ordre de Strahler seuil les valeurs de 1, 2 et 3. Chaque ordre de Strahler seuil permet un découpage spatial en sous-bassins plus ou moins fin, et un niveau de densification du réseau hydrographique. Les Tableaux (4.1.) et (4.2) donnent respectivement les caractéristiques (nombre de sous-bassins, surface moyenne des sous-bassins, pente moyenne et longueur moyenne des brins de rivière) du réseau hydrographique extrait par extraction automatique et par forçage du réseau hydrographique existant.

Tableau 4. 1 : Statistiques sur les sous-bassins extraits de manière automatique pour trois résolutions du MNT

	Résolution 100 m			Résolution 200 m			Résolution 1000 m		
	Ordre1	Ordre2	Ordre3	Ordre1	Ordre2	Ordre3	Ordre1	Ordre2	Ordre3
Nombre de sous-bassins	796	190	40	627	152	36	870	192	47
Surface moyenne (km ²)	15	62,8	298,3	18,7	77,1	325,6	13,7	62,6	254,3
Longueur moyenne des brins (Km)	4	8,3	21,4	4,5	8,9	20,7	3,5	8,2	16,6
Pente Moyenne des brins (%)	0,6	0,21	0,03	0,5	0,2	0,05	0,5	0,2	0,08

Tableau 4. 2 : Statistiques du découpage en sous-bassins en utilisant le réseau hydrographique existant, pour trois résolutions du MNT

	Résolution 100 m			Résolution 200 m			Résolution 1000 m		
	Ordre1	Ordre2	Ordre3	Ordre1	Ordre2	Ordre3	Ordre1	Ordre2	Ordre3
Nombre de sous-bassins	341	81	21	341	81	21	322	73	21
Surface moyenne (km ²)	35	147,3	568,1	35	147,2	567,7	37,1	163,8	569
Longueur moyenne des brins (Km)	6,1	13,7	33,8	6,1	13,6	33,6	6,1	14,3	32
Pente moyenne des brins (%)	0,86	0,30	0,05	0,86	0,29	0,05	1	0,33	0,06
Surface minimale (km ²)	0,04	0,36	14,2	0,08	0,28	14	1	13	13
Surface maximale (km ²)	168,6	849	2331,7	176,5	855,2	2340	203	906	2406

Dans le cas de l'utilisation d'un réseau hydrographique extrait automatiquement, on remarque pour l'ensemble des paramètres, une grande instabilité des paramètres par rapport à la résolution spatiale (même entre les résolutions proches de 100 et 200m). C'est moins le cas lorsqu'on utilise un réseau hydrographique existant dans la procédure d'analyse du terrain. En effet, le nombre de sous-bassins obtenu en utilisant un réseau hydrographique existant est à peu près stable, quelle que soit la résolution du modèle numérique de terrain. Il en va de même pour la surface moyenne des sous-bassins, la longueur moyenne des brins de rivière, et la pente moyenne des brins de rivière qui sont

des paramètres utilisés directement dans la modélisation souhaitée. La Figure (4.10) illustre cette instabilité des paramètres lorsqu'on utilise un réseau hydrographique extrait automatiquement. Cette instabilité illustre les incertitudes qui peuvent être induites par la résolution du modèle numérique du terrain sur les paramètres issus du MNT, dans le cas d'extraction automatique de réseau hydrographique. Dans ce cas, la diminution de la résolution induit un nombre plus important de brins de réseau et donc une forte variation dans le nombre de sous-bassins en fonction de la résolution du MNT. En utilisant un réseau réel, le nombre de sous-bassins ne dépend plus de la résolution du MNT, puisqu'il est fixé par une carte de référence. Dans le cas d'utilisation d'un réseau existant, il y a une plus grande stabilité au sein des paramètres. Les variations observées sur les descripteurs géométriques (notamment la pente) peuvent être attribuées logiquement au lissage du MNT en fonction de la résolution.

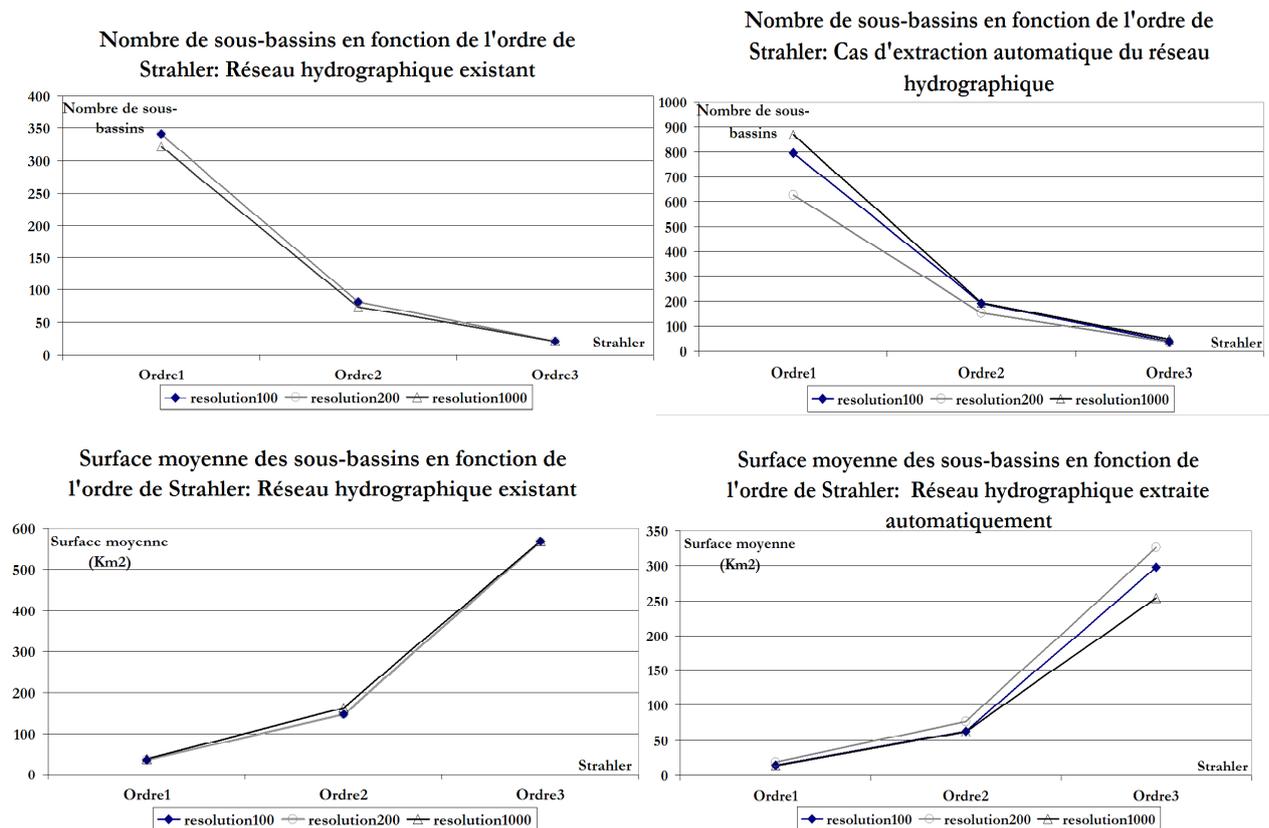


Figure 4. 10 : Comparaison du nombre de sous-bassins (en haut) et de leurs surfaces moyennes (en bas), entre un découpage basé sur un réseau hydrographique extrait automatiquement (à droite) et un découpage basé sur un réseau existant (à gauche)

IV.3.1.b) Choix d'un découpage spatial en sous-bassins

A partir de l'analyse faite avec les différentes résolutions, nous choisirons d'utiliser les découpages en sous-bassins basés sur les réseaux hydrographiques existants. Les objectifs présentés dans le Paragraphe (IV.2) et les données disponibles présentées dans le Paragraphe (IV.1) ont permis de dégager de manière qualitative les propriétés du découpage spatial pour atteindre les objectifs que nous nous sommes fixés. Idéalement, il faudrait faire plusieurs découpages afin de déterminer celui qui conduit au meilleur résultat en terme d'hydrologie. Mais cet objectif ne pouvant être atteint dans le cadre de cette thèse, nous avons choisi un découpage spatial de manière qualitative pour mener la suite de la démarche proposée. Ainsi, nous avons donc vu qu'il n'était pas utile de découper finement notre bassin versant, puisque ce découpage ne servira pas à modéliser des processus dont les échelles fonctionnelles sont fines. Par contre puisqu'on transfère le ruissellement instantanément dans la rivière, les sous-bassins ne doivent pas être trop grands, et le réseau hydrographique devra avoir une bonne précision. Au vu des résultats présentés dans le Tableau (4.2), on peut choisir indifféremment le découpage d'ordre 1, obtenu avec la résolution de 100m ou de 200m. Cependant, afin d'alléger la prochaine étape du découpage en zones homogènes, nous avons choisi de travailler avec le découpage spatial en sous-bassins produit avec une résolution de 200m. La Figure (4.11a) présente le découpage spatial en sous-bassins retenu pour la suite de l'analyse.

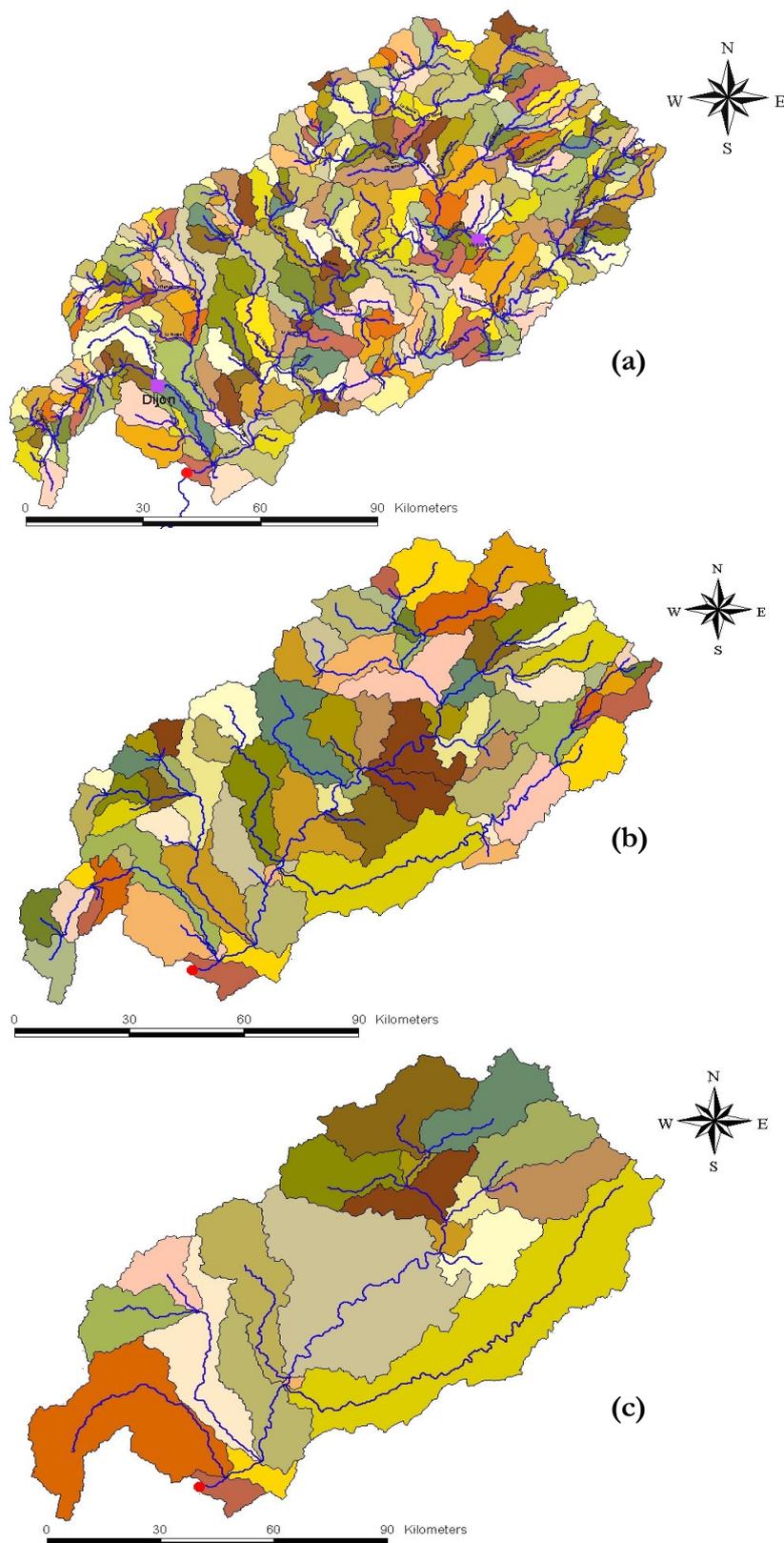


Figure 4. 11 : Découpage spatial de la Saône en sous-bassins versants d'ordre 1 (a), d'ordre 2 (b) et d'ordre 3 (c). Découpage réalisé à partir d'un modèle numérique de terrain à 200m de résolution et d'un réseau hydrographique existant.

IV.3.2. Découpage du bassin versant en zones homogènes

Dans ce paragraphe, nous détaillons les différentes étapes (3 à 9) décrites sur la Figure (3.5) du Chapitre (III). Ces étapes correspondent à la classification paysagère, et permettront d'obtenir des zones homogènes du point de vue des processus hydrologiques représentés. Le Paragraphe (IV.1) nous a permis de réaliser les étapes 1 et 2 de la Figure (3.5).

IV.3.2.a) Choix des facteurs utilisés dans l'analyse paysagère (Etapes 3 et 4)

Les facteurs à utiliser pour la création des zones homogènes doivent être ceux qui caractérisent la distribution spatiale des processus hydrologiques que nous avons choisis de modéliser.

L'infiltration et les transferts d'eau dans les sols sont fortement conditionnés par l'occupation du sol, la pente et les caractéristiques des sols sous-jacents (lithologie, pédologie, propriétés hydrodynamiques). L'évapotranspiration est aussi contrôlée par ces mêmes facteurs, l'occupation des sols et la définition des types de végétation conditionnant notamment la transpiration du couvert végétal. Pour représenter le ruissellement par la méthode de Chow (1964) par exemple, le type de sol et l'occupation du sol sont des facteurs importants. En utilisant des méthodes de représentation fondées sur les équations de Saint-Venant, la pente aurait été également prise en compte comme facteur très important. Une représentation des transferts latéraux rapides selon les concepts de TOPMODEL nous aurait amené à considérer, par exemple, l'indice topographique proposé par Beven et Kirkby (1979). Mais nous avons choisi de ne pas représenter explicitement le ruissellement. Les facteurs correspondant ne seront donc pas considérés dans la suite. Nous prendrons en compte une information sur les limites et types d'aquifères, ainsi que sur le réseau hydrographique (informations de type linéaire) dans un deuxième temps. Pour le moment, seules des informations de type surfacique sont prises en compte.

Nous avons donc identifié la pente, l'occupation des sols et les caractéristiques des sols comme facteurs conditionnant les processus que nous voulons représenter. Les propriétés des sols peuvent être approchées par une connaissance de la lithologie des sols ou en

utilisant directement une carte de pédo-paysages (cf programme IGCS mentionné précédemment). Les pédo-paysages sont déjà des éléments cartographiques qui sont obtenus par croisement de différentes informations géographiques. Ainsi, pour l'établissement de la carte de sols au 1/250 000^{ème} sur la région Bourgogne, la pente, l'occupation des sols et la lithologie ont été utilisées (Gourmelon, 2003). Les pédopaysages pourraient donc directement servir de base pour les hydro-paysages (cf Manus, 2007). Néanmoins, ils ne sont disponibles que sur un tiers du bassin versant qui nous intéresse (la région Bourgogne). La carte des sols de l'INRA au 1/ 1000000^{ème} pourrait être aussi utilisée. Dans l'Annexe (I), qui décrit la structure et le contenu des bases de données sol, nous illustrons comment la méthode de classification paysagère proposée peut être utilisée pour la généralisation spatiale d'une information (ici la carte des sols) disponible sur seulement une partie du bassin versant vers d'autres zones du bassin non renseignées.

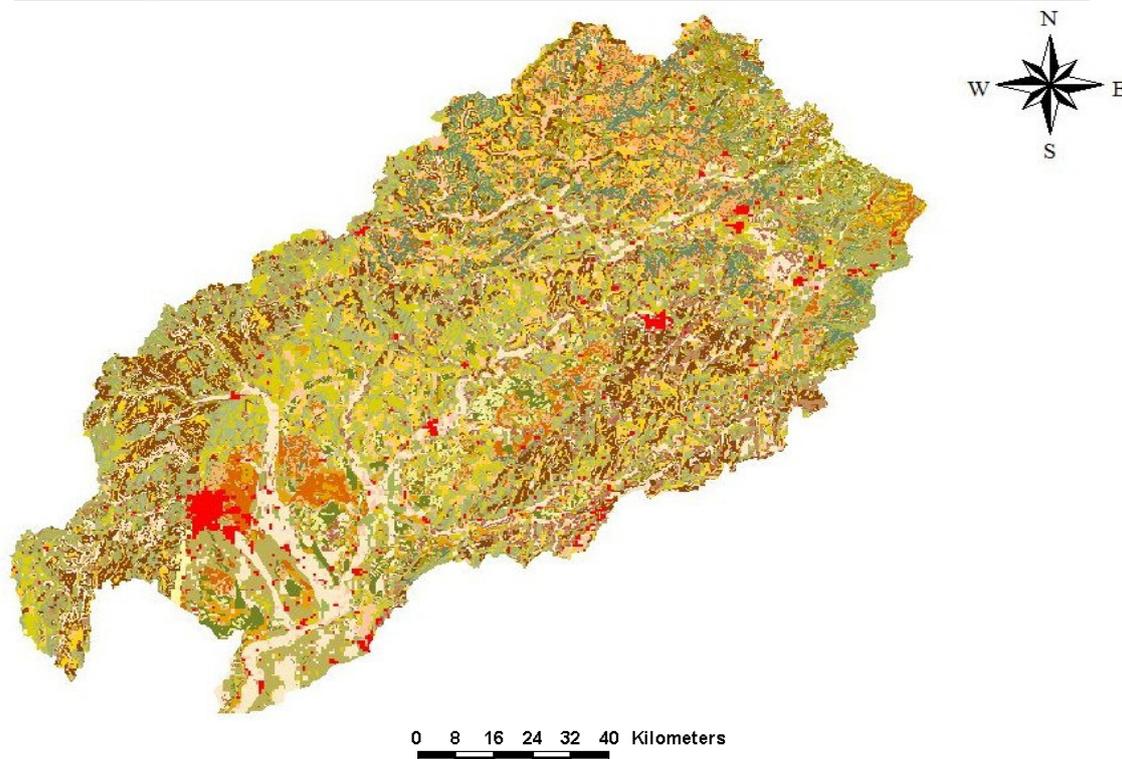
En conclusion, les facteurs retenus pour le découpage en zones homogènes sont : l'occupation des sols, la lithologie, et la pente. La carte originale d'occupation des sols a été reclassifiée en neuf (9) classes après regroupement de certaines zones, notamment les zones urbaines (Figure. 4.5), et certains détails sur les zones agricoles (voir aussi Table 4.3). Les pentes ont été regroupées en cinq grandes classes (Figure 4.4 et Table 4.3) à partir du MNT à 200m de résolution. Ces regroupements correspondent à la différenciation souhaitée au niveau des processus hydrologiques, notamment pour la simulation de l'évapotranspiration. De la même manière, la carte géologique au 1/1000000^{ème} a servi de base à la dérivation d'une carte lithologique simplifiée (Figure 4.6). Les formations géologiques ont été regroupées en fonction de leur âge, de la nature de leurs matériaux ainsi que de leurs comportements hydrodynamiques 'généraux' (Voir Annexe II). Les unités géologiques ont été regroupées en huit (8) classes. Les formations alluviales ont un rôle important dans les processus d'échanges entre les nappes et les rivières. Les formations calcaires sont parfois à la base de mécanismes particuliers d'écoulements souterrains (zones karstiques). La Table (4.3) résume les différentes classes des facteurs prises en compte.

Après ré-échantillonnage à la résolution de 200m (résolution que nous avons choisie pour réaliser le découpage spatial en sous-bassins), les différentes cartes ont été superposées

pour créer la carte de facteurs (Figure. 4.12), à partir d'un SIG (Etape 4). Cette image est composée de 221 combinaisons de facteurs (sur les $9 \times 5 \times 8 = 360$ combinaisons possibles), et servira de base à la cartographie des zones homogènes.

Tableau 4. 3: Les différents facteurs et leurs classes associées

Occupation des sols
Zones urbanisées (regroupe structures urbaines, infrastructures, sites de décharge etc.)
Terrain nu non irrigué
Zones agricoles (regroupe plantes annuelles, cultures complexe etc.)
Vignes et vergers
Pâturages
Zones partiellement boisées
Forêts de feuillues
Forêts de conifères
Plan d'eau
Pente (%)
Très faible pente (< 0.02)
Faible pente (0.02 – 0.05)
Pente modérée (0.05 – 0.15)
Pente forte (0.15 – 0.30)
Très forte pente (> 0.3)
Lithologie
Sédiments anciens
Sédiments récents
Calcaire
Alluvion
Grès
Calcaire du tertiaire
Marne et calcaire argileux
Sable et argile

**Figure 4. 12 : Image des combinaisons de facteurs d'organisation spatiale des processus à modéliser**

IV.3.2.b) Définition des zones de référence (Etape 5)

La définition des zones de référence est sans doute l'étape à la fois la plus délicate, et celle qui offre une grande flexibilité en fonction des objectifs de modélisation. Dans l'idéal, la définition des zones de référence devrait être précédée d'une étroite connaissance du bassin versant à étudier. La démarche devrait être similaire à celle de Peschke et al. (1999) pour la définition des facteurs qui contrôlent les excès d'infiltration et les zones propices au ruissellement sur surfaces saturées. Malheureusement, cette connaissance n'est souvent pas disponible dans les projets de modélisation, comme c'est le cas dans notre exemple. Les zones de référence ont été donc définies en analysant les différentes combinaisons de facteurs définis dans le paragraphe précédent. Pour identifier des grandes tendances sur les processus hydrologiques et leur localisation, nous avons produit une carte simplifiée de combinaisons de facteurs. Elle s'appuie sur une réduction du nombre de classes décrivant chaque facteur et donc sur une simplification de leurs liens avec les processus hydrologiques. La carte de pente a été regroupée en deux classes (faibles, fortes pentes). La lithologie a été regroupée en 4 classes (voir Annexe II pour le détail). Nous n'avons pas touché aux classes de la carte d'occupation des sols. Une fois les cartes de facteurs superposées, nous obtenons une carte de combinaisons des facteurs avec 46 classes sur les $2 \times 4 \times 9 = 72$ possibles (seulement 46 des 72 combinaisons possibles existent réellement). Ces simplifications ont permis d'obtenir une carte plus lisible. Nous y avons localisé des zones représentatives des 46 zones de référence en gardant les grands ensembles homogènes de chaque zone de référence (Figure. 4.13). Le Tableau (4.4) décrit les zones de référence définies.

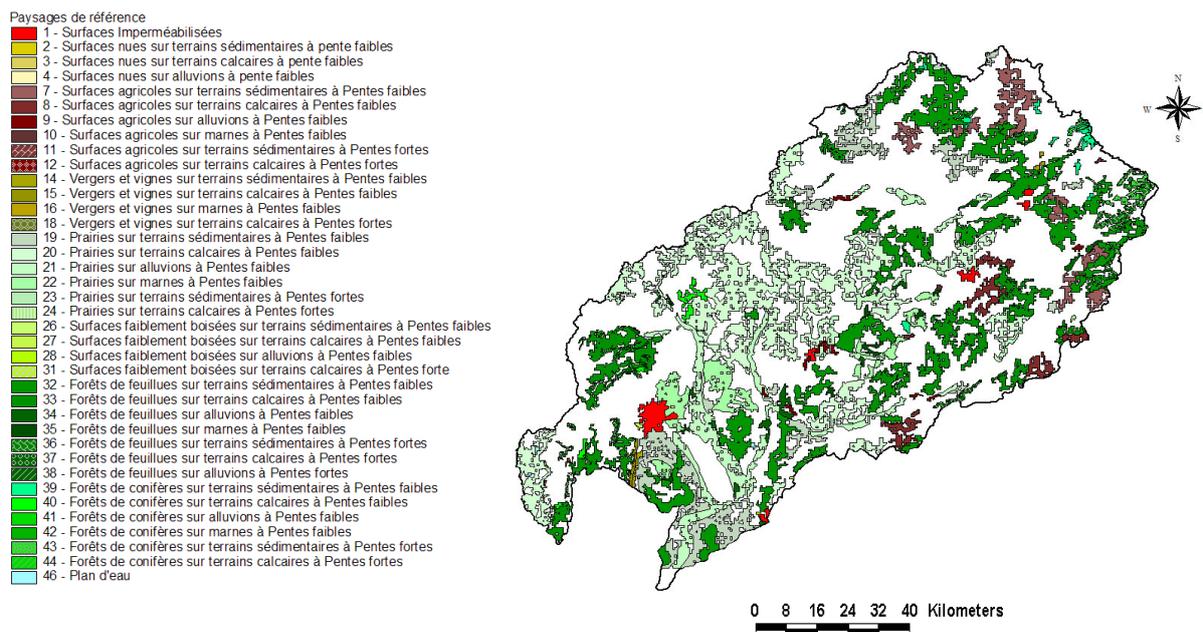


Figure 4. 13 : Cartographie des zones de référence sur le bassin versant de la saône (pour la légende, voir Tableau 4.4)

Tableau 4. 4: Description des zones de référence définies

Numéro	Nom de la zone de référence
1	Surfaces imperméabilisées
2	Surfaces nues sur terrains sédimentaires à pentes faibles
3	Surfaces nues sur terrains calcaires à pentes faibles
4	Surfaces nues sur alluvions à pentes faibles
5	Surfaces nues sur marnes à pentes faibles
6	Surfaces nues sur terrains calcaires à pentes fortes
7	Surfaces agricoles sur terrains sédimentaires à pentes faibles
8	Surfaces agricoles sur terrains calcaires à pentes faibles
9	Surfaces agricoles sur alluvions à pentes faibles
10	Surfaces agricoles sur marnes à pentes faibles
11	Surfaces agricoles sur terrains sédimentaires à pentes fortes
12	Surfaces agricoles sur terrains calcaires à pentes fortes
13	Surfaces agricoles sur alluvions à pentes fortes
14	Vergers et vignes sur terrains sédimentaires à pentes faibles
15	Vergers et vignes sur terrains calcaires à pentes faibles
16	Vergers et vignes sur marnes à pentes faibles
17	Vergers et vignes sur terrains sédimentaires à pentes fortes
18	Vergers et vignes sur terrains calcaires à pentes fortes
19	Prairies sur terrains sédimentaires à pentes faibles
20	Prairies sur terrains calcaires à pentes faibles
21	Prairies sur alluvions à pentes faibles
22	Prairies sur marnes à pentes faibles
23	Prairies sur terrains sédimentaires à pentes fortes
24	Prairies sur terrains calcaires à pentes fortes
25	Prairies sur alluvions à pentes fortes
26	Surfaces faiblement boisées sur terrains sédimentaires à pentes faibles
27	Surfaces faiblement boisées sur terrains calcaires à pentes faibles
28	Surfaces faiblement boisées sur alluvions à pentes faibles
29	Surfaces faiblement boisées sur marnes à pentes faibles
30	Surfaces faiblement boisées sur terrains sédimentaires à pentes fortes
31	Surfaces faiblement boisées sur terrains calcaires à pentes fortes
32	Forêts de feuillues sur terrains sédimentaires à pentes faibles
33	Forêts de feuillues sur terrains calcaires à pentes faibles
34	Forêts de feuillues sur alluvions à pentes faibles
35	Forêts de feuillues sur marnes à pentes faibles
36	Forêts de feuillues sur terrains sédimentaires à pentes fortes
37	Forêts de feuillues sur terrains calcaires à pentes fortes
38	Forêts de feuillues sur alluvions à pentes fortes
39	Forêts de conifères sur terrains sédimentaires à pentes faibles
40	Forêts de conifères sur terrains calcaires à pentes faibles
41	Forêts de conifères sur alluvions à pentes faibles
42	Forêts de conifères sur marnes à pentes faibles
43	Forêts de conifères sur terrains sédimentaires à pentes fortes
44	Forêts de conifères sur terrains calcaires à pentes fortes
45	Forêts de conifères sur alluvions à pentes fortes
46	Plans d'eau

IV.3.2.c) Procédure de classification et résultats de la cartographie (Étapes 6 à 8)

Pour réaliser la cartographie des hydro-paysages par classification paysagère, nous avons utilisé le logiciel CLAPAS, développé par Robbez-Masson (1994) et disponible sur <http://sol.ensam.inra.fr/Produits/Asp/ListeProduits.asp?Produit=Clapas> avec sa documentation. Il s'agit d'un exécutable qui fonctionne avec les SIG tels que Idrisi et Arcview3.x. CLAPAS propose plusieurs formes pour la description du voisinage : voisinage carré, circulaire, elliptique. Un voisinage carré de 3x3km² a été utilisé au cours de la première itération. Plusieurs descripteurs de champs spatiaux (voisinage et zones de référence) sont disponibles : moyenne, écart-type, histogramme de composition, matrice de co-occurrence, etc. Comme nous l'annonçons dans le chapitre précédent, l'histogramme de composition a été utilisé dans le cadre de cette illustration. La distance de Manhattan a été utilisée comme métrique de comparaison des histogrammes. Robbez-Masson (1994) a en effet montré qu'elle était plus robuste que les autres distances (Kolmogorov, Cramer) disponibles pour juger de la similarité entre deux vecteurs. La procédure de classification est illustrée sur la Figure (4.14).

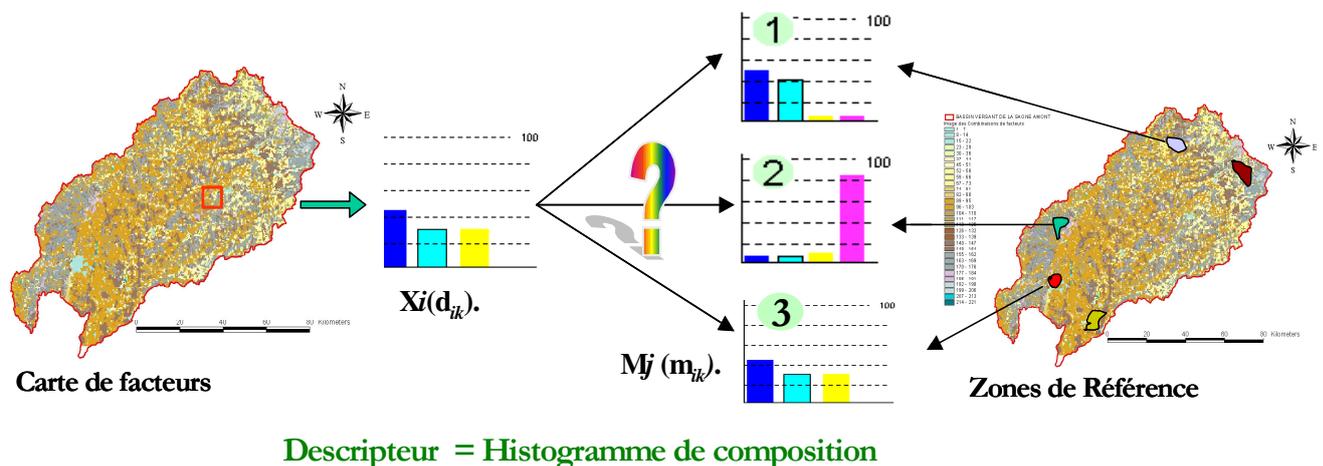


Figure 4. 14 : Illustration de la procédure de classification

Afin de gérer la finesse des zones homogènes, une procédure itérative (Étape 9), avec plusieurs tailles du voisinage a été adoptée. Les tailles de voisinage utilisées sont de 3x3km, 2.2x2.2km et 1.4x1.4 km, respectivement pour la première, la deuxième et la troisième itération. Les résultats des itérations sont présentés sur la Figure (4.15). La carte

des zones homogènes réalisée et la carte des distances résultant de la procédure y sont représentées. Le Tableau (4.5) présente les statistiques sur les surfaces des unités obtenues. On y voit, comme on s'y attendait, que les unités cartographiques sont de plus petite taille lorsqu'on diminue la taille de la fenêtre de voisinage. Sur les cartes de droite, les couleurs bleues révèlent les zones mal classées (pour lesquelles la valeur de la distance de Manhattan est la plus grande). On remarque que la réduction de la taille du voisinage permet d'améliorer la précision de la classification, comme en atteste les cartes de distance sur les Figures (4.15.b,d,f), puisque la surface de zones « bleues » diminue au profit des zones jaunes-orangées (bien classées). Les zones bleues qui demeurent correspondent à des zones situées dans les Vosges. Pour améliorer la classification, on pourrait essayer d'affiner les zones de référence dans cette région.

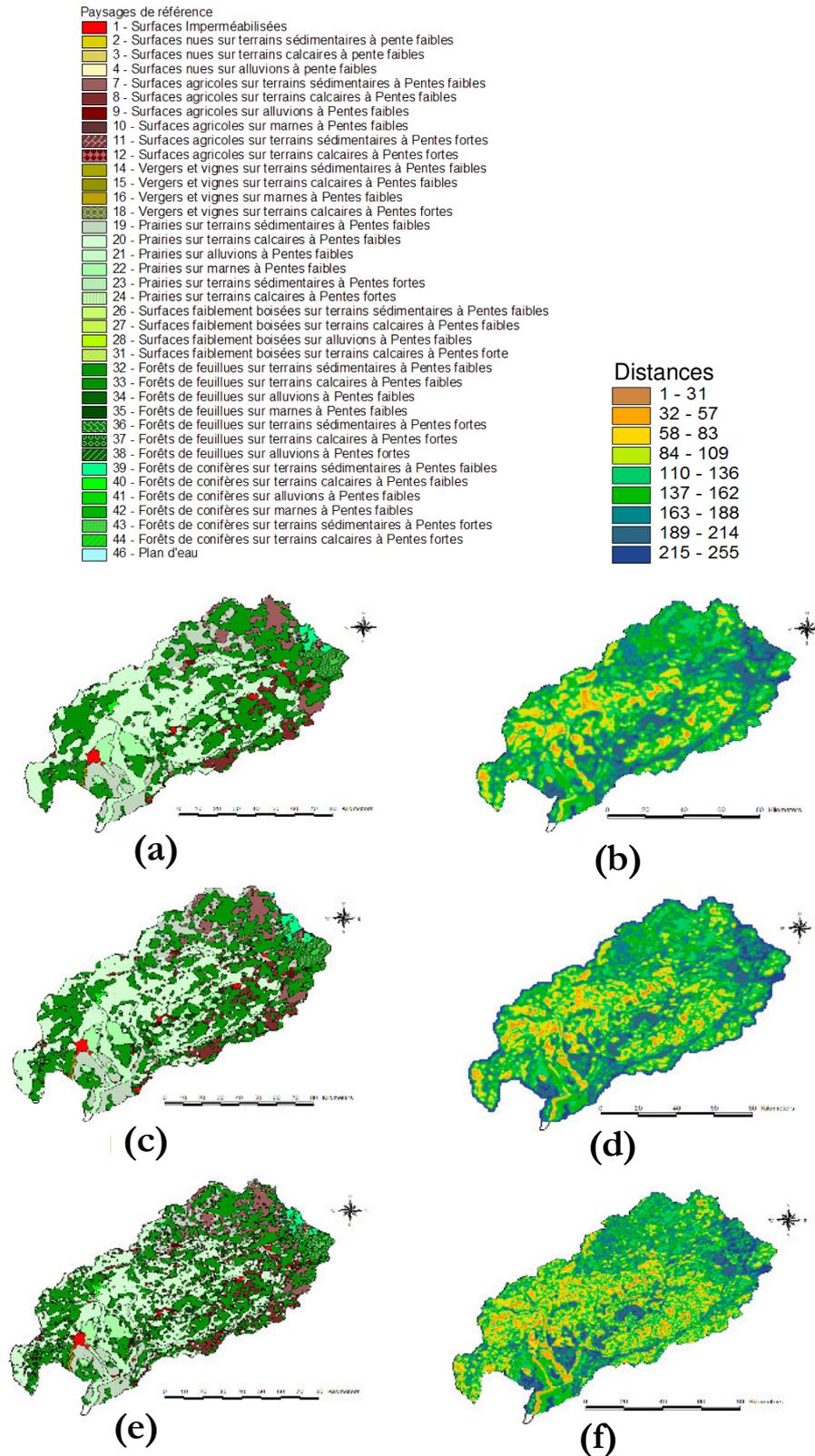


Figure 4.15: Carte des zones homogènes (a,c,e) et des distances de classification(b,d,f), pour des tailles de voisinage de 3km (a,b), 2.2 km (c,d) et 1.4km (e,f). (pour la légende, voir Tableau 4.4)

Tableau 4. 5 : Statistique sur les surfaces des unités cartographiques, suivant les tailles de voisinage utilisées

Taille de voisinage	Surface moyenne (km ²)	Ecart-type des surfaces (km ²)	% des unités ayant des surfaces inférieures à 1.6 km ²	% des unités ayant des surfaces inférieures à 6.25 km ²
Carte 1 (3km)	16	99	1	5
Carte 2 (2.2km)	9	70	2.5	9.6
Carte 3 (1.4km)	5	34	6	18.4

IV.3.2.d) Choix de la cartographie la plus cohérente avec les données d'entrée (Etape 9)

Les résultats ci-dessus posent légitimement la question du choix de la « meilleure » cartographie des zones homogènes. Les résultats de la cartographie montrent que plus la fenêtre de voisinage est faible, plus les plages cartographiques sont fines, comme le montre la Figure (4.16) qui décrit la fréquence cumulée des surfaces. Comme nous l'avons annoncé dans le chapitre précédent, nous utiliserons comme critère la cohérence entre la finesse des plages cartographiques produites et la résolution des données d'entrée. On choisira la carte dont les unités cartographiques sont les plus cohérentes avec la finesse des données d'entrée. Pour ce faire, nous allons procéder à l'analyse statistique de la distribution des surfaces des unités cartographiques. L'échelle des données d'entrée varie de 1/250000^{ème} à 1/1000000^{ème}. Les plages cartographiques ne peuvent donc pas être plus fines que la taille maximale des objets pouvant être représentés à ces échelles. Supposons que l'échelle de restitution souhaitée soit de 1/250000^{ème}. La plus petite surface représentable à l'échelle de 1/250000^{ème}, selon la loi du quart est de $(2.5 \times 2.5) / 4 = 1.6$ km². Si on souhaite une restitution au 1/500000^{ème}, la loi du quart indique que la taille des unités cartographiques doit être supérieure à $(5 \times 5) / 4 = 6.25$ km². La proportion d'unités cartographiques ayant une surface inférieure aux surfaces calculées avec la loi du quart est présentée dans le Tableau (4.5).

Un compromis entre précision de la classification (cartes des distances la plus « jaune » possible) et compatibilité avec les données d'entrée est nécessaire pour le choix de la cartographie la plus appropriée. La première carte (Figure. 4.15a) avec des unités

cartographiques ayant une surface moyenne de 16 km² semble grossière par rapport aux données d'entrée. La troisième carte (Figure. 4.15e) contient des unités cartographiques de tailles moyennes de 5 km². Cette finesse des unités cartographiques semble en adéquation avec les données d'entrées. Néanmoins, cette impression de précision s'avère erronée, lorsqu'on regarde le pourcentage d'unités cartographiques dont la taille est inférieure à 6.25 km² (critère de finesse). Dix-huit (18) pourcent des plages cartographiques ont une surface inférieure à 6.25 km²; et plus de six (6) pourcent de ces plages cartographiques ont une surface inférieure à 1.6 km². Cette cartographie est alors apparemment d'une précision supérieure à celle des données d'entrée. Finalement la cartographie de la Figure (4.15c) semble être un meilleur compromis, avec une surface moyenne des unités cartographiques de l'ordre de 9 km². Plus de quatre-vingt-dix (90) pourcents des plages cartographiques ont une surface supérieure ou égale à 6.25 km², et près de 97% des unités cartographiques ont une superficie supérieure à 1.6 km². Cette cartographie semble donc plus compatible avec la précision des données d'entrée. La procédure de cartographie itérative fournit donc une base efficace pour gérer la finesse des unités de cartographie en fonction des données d'entrée. Il faut retenir également que pour d'autres objectifs de modélisation et/ou d'autres méthodes de représentation des processus hydrologiques ne donneront pas le même résultat.

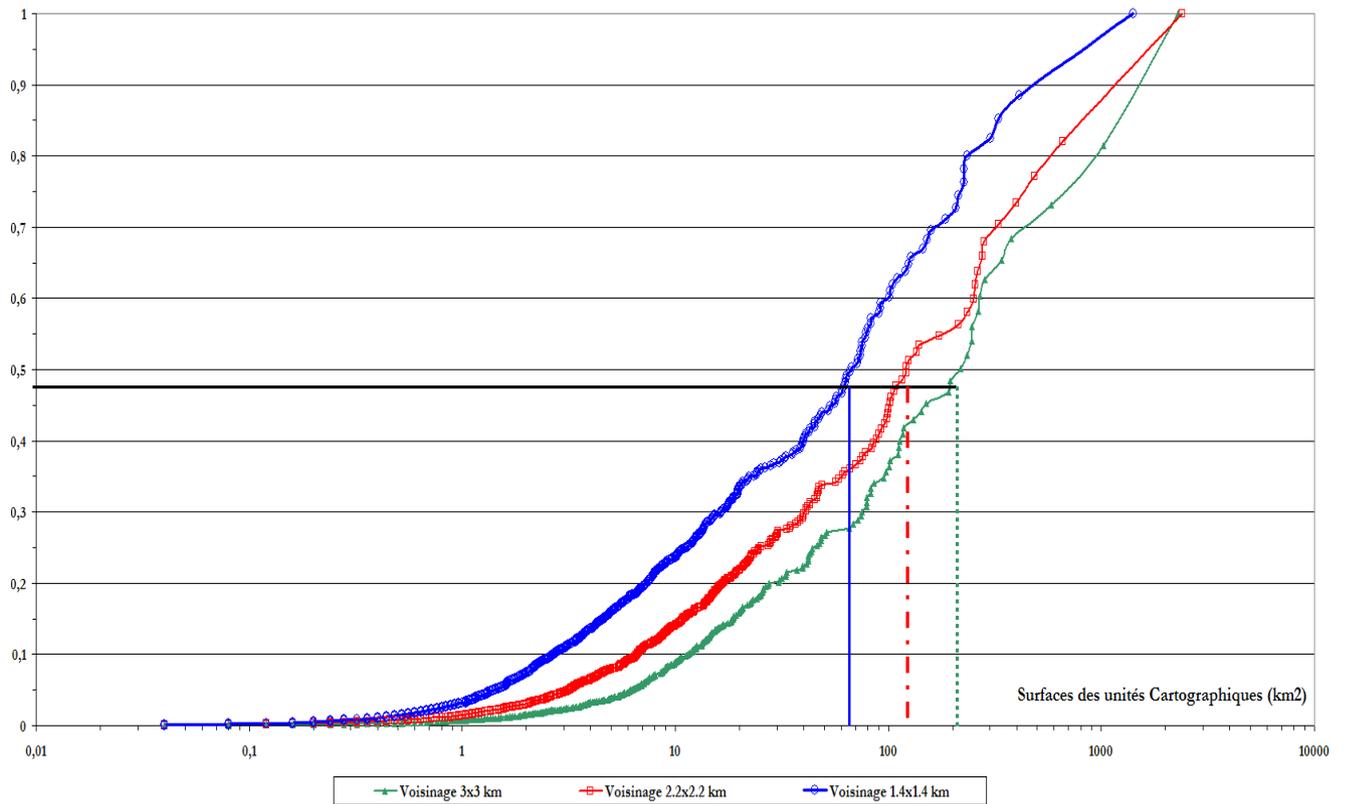


Figure 4. 16 : Fréquence cumulée (sur l'axe des ordonnées) des surfaces des unités cartographiques (sur l'axe des abscisses) pour les trois tailles de fenêtre de voisinage choisies, illustrant l'effet de la taille de la fenêtre de voisinage sur la finesse des plages cartographiques des zones homogènes. Les traits verticaux marquent la surface médiane pour chaque taille de voisinage.

IV.3.3. Comparaison des résultats de la classification avec les techniques habituelles de cartographie

Dans cette section, nous allons présenter les résultats de découpages spatiaux en zones homogènes, obtenus par des techniques traditionnelles de cartographie. Ces résultats seront comparés avec ceux obtenus par la méthode de classification paysagère que nous avons proposée. Dans cette comparaison, nous considérons les mêmes objectifs de modélisation et les mêmes données d'entrée. Les mêmes critères de cohérence entre unités cartographiques des zones homogènes et la résolution des données d'entrée sont également retenus. Les surfaces de 6.25 km² et de 1.6 km² sont donc retenues dans le cadre de ces comparaisons, comme surfaces seuils pour une bonne adéquation avec les données d'entrées. Une évaluation complète de l'intérêt de l'approche que nous proposons nécessiterait une analyse de l'impact du choix de l'une ou l'autre discrétisation sur les résultats d'une modélisation hydrologique. Nous construirons dans la troisième partie les outils qui nous permettront de le faire. Néanmoins, faute de temps, cette analyse de sensibilité n'a pas été réalisée dans le cadre de ce mémoire. Dans cette section, nous allons uniquement essayer de *juger de la capacité de la méthode proposée à représenter efficacement les hétérogénéités du paysage*.

IV3.3.a) Comparaison avec les méthodes basées sur le lissage cartographique

Pour déterminer les zones homogènes, des techniques de lissage sont couramment utilisées. Plusieurs logiciels de SIG implémentent des techniques de lissage cartographique (exemple ArcGis, Idrisi, Grass, etc.). Ces techniques consistent à simplifier l'information disponible sur une image brute (par exemple la carte des combinaisons de facteurs, créée dans le Paragraphe 4.3.2.a) en utilisant des critères de seuil (souvent de surface) sur les plages cartographiques de l'image brute. Nous allons utiliser la même image multi-variée que précédemment (Figure 4.12). Les seuils de surface utilisés dans le cadre de cette comparaison correspondent directement à la taille de 6.25 km² et de 1.6 km², correspondant aux critères retenus ci-dessus. Le résultat de cartographie est présenté sur la

Figure (4.17). Le Tableau (4.6) présente une synthèse sur les caractéristiques statistiques des surfaces des plages cartographiques pour chaque technique de cartographie utilisée. En utilisant une fenêtre d'homogénéisation de 6.25 km², la surface moyenne des unités cartographiques est de 255 km². La cartographie est très grossière. Lorsque cette fenêtre d'homogénéisation est de 1.6 km², la surface moyenne des plages cartographiques est de 32 km² et reste beaucoup plus grossière que la carte la plus grossière obtenue avec la classification paysagère (voisinage de 3 km).

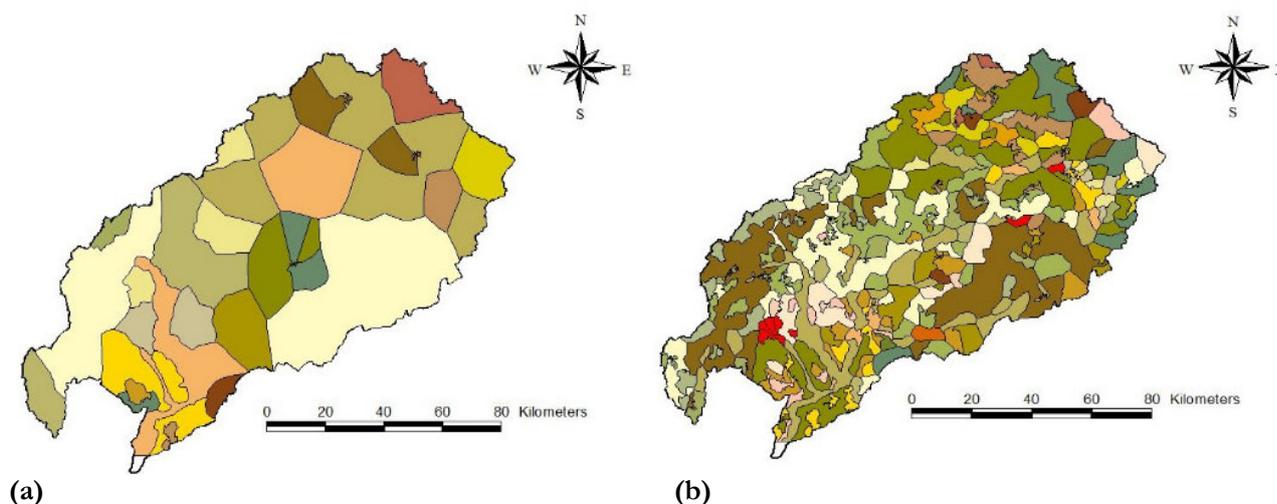


Figure 4. 17 : Résultats de la cartographie par la technique de lissage, pour des fenêtres d'homogénéisation avec une surface égale à 6.25 km² (a) et une surface de 1.6 km² (b).

IV3.3.b) Comparaison avec la technique de cartographie par reclassification

La technique de reclassification est une seconde technique de cartographie couramment implémentée dans les logiciels de SIG existants. Elle consiste à reclasser un pixel de l'image de base en utilisant une correspondance avec une valeur d'une classe prédéfinie de valeurs. Nous allons utiliser ici les mêmes classes de références que celles utilisées pour la classification paysagère dans le Paragraphe (IV.3.2) (voir le Tableau 4.4). La reclassification consiste à affecter les pixels appartenant aux 221 combinaisons de facteurs de la Figure (4.12) à l'une des 46 classes de référence. Cette technique est, dans une certaine mesure, comparable avec la technique de classification paysagère du Paragraphe (IV.3.2). La différence majeure est qu'il n'y a pas de prise en compte explicite du contexte

spatial du pixel à reclasser (pas d'utilisation de la notion de voisinage, mais une classification pixel à pixel). Le résultat de cette technique (Figure 4.18) montre une simplification limitée des unités cartographiques, dont la surface moyenne est de 111 km² avec 18% des unités cartographiques ayant une surface inférieure à 6.25 km². On observe à la fois beaucoup de plages cartographiques de grandes tailles, mais aussi un très grand nombre d'unités dont la surface est plus fine que la résolution des données d'entrée. La cartographie donne donc des résultats assez contrastés, en terme de la finesse des unités cartographiques.

Enfin, le Tableau (4.6) présente le pourcentage des 46 zones de référence choisies initialement que l'on retrouve finalement dans la cartographie. On note que la classification paysagère permet de les représenter à 78%, contre moins de 50% pour la reclassification et seulement 28% pour le lissage. La classification paysagère permet donc de mieux décrire l'hétérogénéité des hydro-paysages que les autres méthodes. Elle présente aussi l'intérêt de fournir une carte d'erreur (la carte des distances) qui peut être utilisée ultérieurement dans une analyse d'incertitudes.

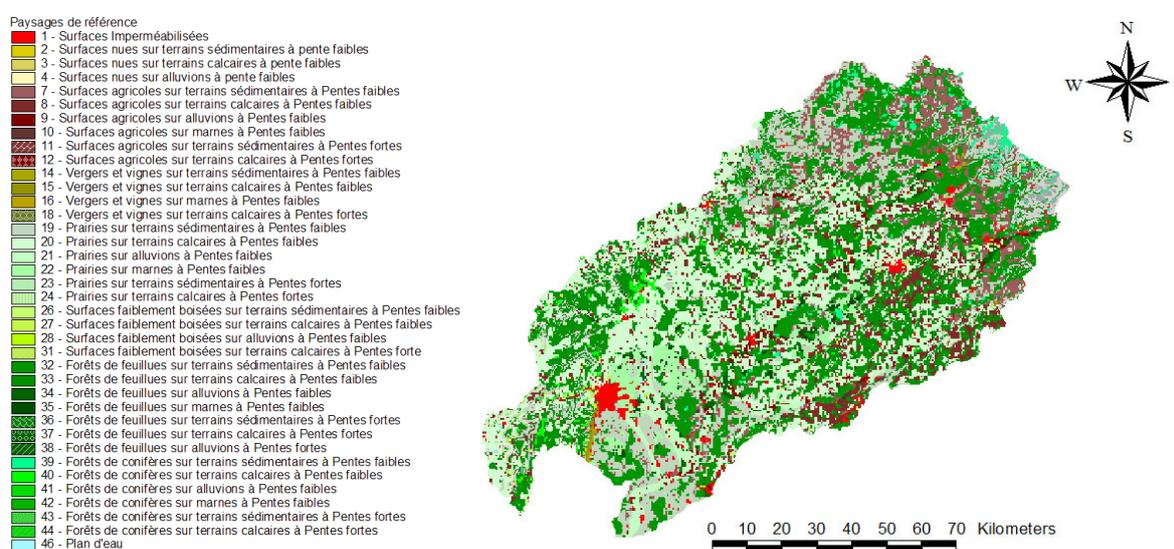


Figure 4. 18 : Résultat de la cartographie par la technique de reclassification. Chaque pixel correspond à une des 46 combinaisons de facteurs.

Tableau 4. 6 : Comparative des différentes techniques de cartographie

	Surface moyenne (km ²)	% des unités ayant une surface inférieure à 1.6 km ²	% des unités ayant une surface inférieure à 6.4 km ²	% de zones de référence représentées dans la cartographie
Technique de classification paysagère	9	2.5	9.6	76
Lissage cartographique (1.6 km ²)	14.6	0.4	6	28
Lissage cartographique (6.4 km ²)	14.6	0.4	6	28
Technique de cartographie par Reclassification	111	0.1	18	46

IV3.3.c) Discussion des avantages et limites de la classification paysagère proposée

Les résultats de l'intercomparaison du paragraphe précédent montrent que, parce qu'elles utilisent une surface seuil, les techniques de cartographie classiques, ne permettent pas de représenter efficacement les hétérogénéités des surfaces continentales, cohérentes avec les données d'entrée et les processus hydrologiques modélisés. Elles n'offrent pas de méthode pour prendre en compte les différences de résolution entre les sources d'informations et il n'y a pas de quantification des incertitudes sur la cartographie.

En revanche, la méthodologie de dérivation de zones homogènes présentée dans le chapitre III constitue une tentative pour obtenir une méthode permettant à la fois de conserver les détails des hétérogénéités du paysage de manière objective tout en restant pragmatique. Elle permet aussi une quantification des incertitudes sur la cartographie avec la carte des distances. Enfin, elle autorise une grande flexibilité sur la prise en compte des hétérogénéités (via le choix des zones de référence), tout en contraignant l'hydrologue à formaliser la modélisation dont il a besoin et les représentations des processus hydrologiques correspondantes.

Néanmoins, comme toute méthode de classification, la méthode proposée n'est pas exempte de choix un peu arbitraires. On peut citer la définition des classes dans les cartes de facteurs, la délimitation des zones de référence, le choix du descripteur de l'hétérogénéité spatiale la distance utilisée dans la classification. Une analyse complète de

sensibilité à tous ces éléments serait nécessaire, mais dépasse le cadre de cette thèse. Une autre des limites de la méthode est l'utilisation d'images au format RASTER, alors que de nombreuses couches SIG sont au format vecteur, et se trouvent dégradées si elles sont « rasterisées ». A contrario, une méthode fondée sur des images RASTER permet l'utilisation de couches d'informations continues (pente et indice topographique par exemple). Pour limiter les pertes d'informations sur les couches d'informations vectorielles, nous avons vu que la méthode de classification paysagère s'appliquait uniquement aux informations surfaciques. Les couches vectorielles décrivant des linéaires (limites de sous-bassins, limites d'aquifères, réseaux hydrographiques, réseaux routiers, etc) sont ensuite utilisées pour re-découper les plages cartographiques obtenues (Etape 10). Un autre point important à prendre en compte, notamment pour la représentation des transferts latéraux, est la connexité ou relation topologique entre hydro-paysages et/ou unités de modélisation, de même que la connexion avec les réseaux linéaires. Cette analyse peut être réalisée après la classification paysagère à l'aide des outils disponibles dans les SIG et intégrée à la modélisation hydrologique.

Mentionnons enfin que la méthode de classification paysagère présentée dans ce chapitre peut aussi servir pour spécifier les paramètres de sol ou d'occupation des sols, pour des modélisations s'appuyant sur des maillages réguliers, comme MIKE_SHE.

IV.3.4. Délimitation des hydro-paysages (Etape 10)

Dans cette phase, nous allons déterminer les hydro-paysages en intégrant les zones homogènes, et autres informations vectorielles dans le découpage en sous-bassins réalisé dans le Paragraphe (IV.3.1). Les informations vectorielles dont nous disposons sont les données sur les extensions des entités hydrogéologiques (Figure 4.7) et les données sur le sol, issues base de données de l'INRA au 1/1000000^{ème}. Plus de détails sur la structure de l'information sur les sols se trouvent en Annexe(I). Le croisement de ces données le sol et sur les entités hydrogéologiques sont intégrées avec les zones homogènes et le découpage en sous-bassins présenté sur la Figure (4.11a) permet d'obtenir le découpage des hydro-paysages (Figure 4.19).

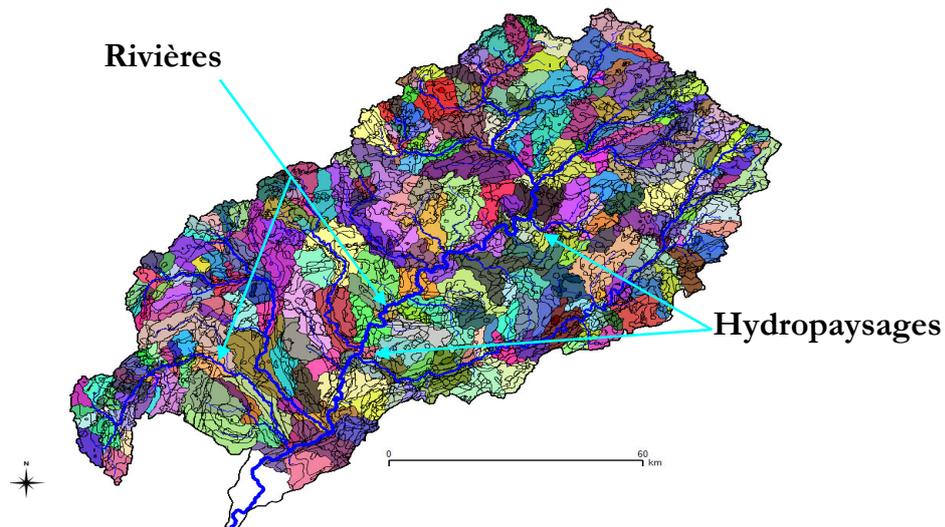


Figure 4. 19 : Découpage du bassin versant en hydro-paysages. Les différentes couleurs correspondent aux différents sous-bassins. Les hydro-paysages à l'intérieur des sous-bassins sont matérialisés par les traits noirs.

Les transferts dans la zone saturée étant simulés avec une méthode numérique nécessitant des mailles convexes, nous avons contraint le découpage en hydro-paysages de manière à respecter les contraintes de convexité. Ceci a donc nécessité un troisième niveau de découpage : Le redécoupage des hydro-paysages en éléments géométriques plus fins et convexes (Voir Figure 4.20). Sur la Figure ci-dessous, un maillage régulier a été utilisé pour contraindre les limites des hydro-paysages, pour des raisons pratiques. En toute rigueur, un algorithme de convexification devrait être utilisé pour produire le troisième niveau de découpage

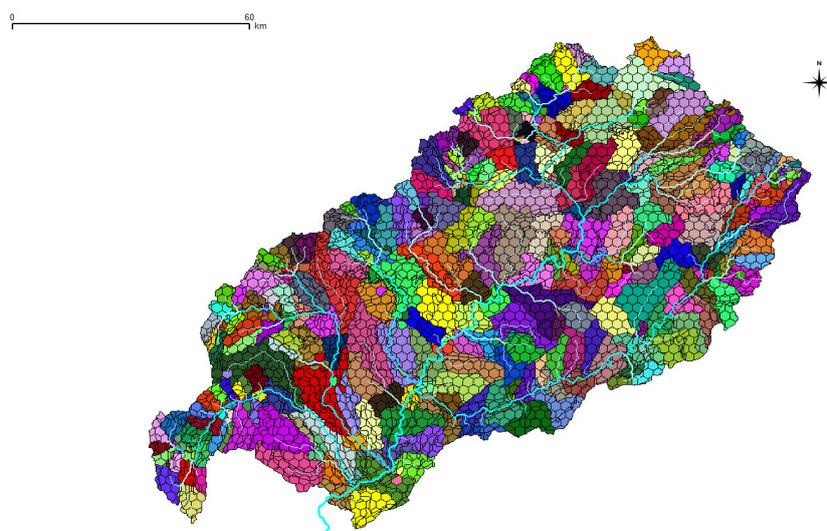


Figure 4. 20 : Troisième niveau de découpage : Re-découpage des hydro-paysages en mailles convexes.

IV.4. Conclusion de la Partie (I)

La première partie de ce mémoire a été consacrée à une tentative – encore imparfaite – de formalisation d'une méthodologie « rationalisant » le choix du découpage spatial d'un bassin versant en vue d'y conduire une modélisation hydrologique spatialisée.

L'analyse bibliographique du Chapitre (II) a montré que le découpage spatial final résultera d'un compromis entre objectifs de la modélisation, données disponibles et choix des représentations des processus hydrologiques pris en compte. Nous avons conclu ce chapitre en proposant une méthode de découpage spatial en 3 niveaux successifs :

- un premier découpage en sous-bassins versants, qui permet de tenir compte de l'organisation des paysages autour du réseau hydrographique, considéré comme l'élément premier d'organisation des écoulements sur le bassin
- un second niveau de découpage en hydro-paysages qui permet, le cas échéant, d'affiner la description des sous-bassins pour tenir compte, dans la modélisation, de l'hétérogénéité spatiale à l'intérieur de ces derniers
- un troisième niveau de découpage qui permet de redécouper ces hydro-paysages, considérés comme fonctionnels pour les processus hydrologiques, en fonction de contraintes numériques liées aux maillages ou encore pour prendre en compte une hétérogénéité « sous-maille » des hydro-paysages, mais sans expliciter la localisation géographique de ces éléments

Pour les bassins versants de petite taille, les différents objets, hydrologiquement pertinents, qui composent le paysage peuvent assez facilement être pris en compte explicitement et la définition des hydro-paysages est assez aisée. La thèse de Branger (2007) fournit une illustration de l'application de la méthodologie proposée pour un petit bassin versant agricole breton. En revanche pour les bassins versants de taille moyenne à grande, des simplifications dans la prise en compte des différents éléments du paysage sont nécessaires. Nous avons donc aussi essayé de formaliser, pour ces plus grands bassins, une méthodologie qui permette une définition objective des hydro-paysages, en explicitant les critères qui permettent d'aboutir à la cartographie finale. La méthodologie, décrite au Chapitre III, reprend les principes de la classification paysagère, s'appuyant sur des zones de référence. Ces dernières correspondent à des zones du bassin versant où on peut identifier des comportements hydrologiques particuliers que l'on souhaite

représenter. Leur nombre n'est pas limité et on peut donc, en fonction de leurs choix, affiner ou compléter la prise en compte des processus hydrologiques. Nous avons ensuite illustré, au Chapitre IV, l'application complète de la méthodologie, depuis la définition des objectifs de modélisation jusqu'au découpage spatial qui servira de base à cette dernière, en passant par le choix des processus pris en compte et de leur représentation. Une partie du contenu de cette partie a fait l'objet d'une publication en cours de révision (Dehotin et Braud, 2007).

L'étape suivante, qui fait l'objet des deux prochaines parties du mémoire, est maintenant de construire la modélisation que nous avons proposée, en s'appuyant sur les maillages non-structurés obtenus par notre méthode de découpage de l'espace. Pour respecter une certaine liberté de choix dans les processus pris en compte et leur conceptualisation, il est nécessaire de disposer d'outils souples, permettant cette construction « à la carte » de modèles. Nous allons donc, dans la deuxième partie (chapitre V), introduire les concepts sur lesquels s'appuient les plates-formes de modélisation, qui permettent cette souplesse et présenter plus en détail la plate-forme LIQUID, que nous avons utilisée dans notre travail. Dans la troisième partie, nous aborderons l'adaptation des méthodes numériques classiques pour prendre en compte une géométrie complexe. Nous illustrerons la démarche avec la modélisation des écoulements 2D dans les nappes (chapitres VI et VII). Enfin, nous aborderons, au chapitre VIII, l'assemblage des différents modules pour construire la modélisation souhaitée, en nous concentrant sur les couplages entre écoulements dans la nappe et dans la rivière et entre zone saturée et non saturée.

DEUXIEME PARTIE :
PRESENTATION DES METHODES ET DES
OUTILS DE CONCEPTION UTILISES

CHAPITRE V "Présentation des concepts et outils utilisés"

La démarche de découpage spatial des bassins versants proposée dans la partie précédente nécessite, comme nous l'avons décrit, un double effort pour être réellement opérationnelle. Le premier défi est relatif aux moyens mathématiques et numériques pour permettre l'intégration d'un découpage spatial réaliste dans la discrétisation de certaines équations. En effet, les méthodes numériques habituelles sont adaptées au découpage en mailles régulières alors que les unités élémentaires du paysage pertinentes du point de vue hydrologique sont irrégulières et non structurées. Il convient donc d'orienter les efforts dans le sens du développement (ou de l'utilisation) de méthodes numériques adaptées à ces unités irrégulières pour la discrétisation des équations constitutives des processus modélisés. Ainsi, on sera de plus en plus capable de représenter de façon réaliste le paysage et les processus qu'on souhaite y modéliser. Ces aspects seront abordés dans la troisième partie de ce document. Le second défi, auquel nous allons consacrer ce chapitre, est relatif à la gestion, au sein d'un même environnement informatique, des méthodes de représentation des processus, de manière à permettre le choix des processus à prendre en compte pour une modélisation donnée (Voir Figure 3.1).

On souhaite pouvoir créer, au sein d'un même environnement, des représentations différentes du système hydrologique en fonction des objectifs de modélisation, en couplant différents processus hydrologiques. Pour atteindre cet objectif, il est donc nécessaire de disposer, au sein d'un même outil de modélisation, de différentes méthodes de représentation d'un même processus, et de différents processus hydrologiques. La notion de plate-forme de modélisation nous paraît naturellement pertinente pour servir d'outil de base à ces développements. Elle doit, en effet, permettre une certaine modularité des différents processus hydrologiques et favoriser une certaine genericité des différentes méthodes de représentation d'un même processus hydrologique. La plate-forme de modélisation apparaît alors comme une boîte à outils permettant de créer des modèles sur-mesure pour répondre à des objectifs précis. Elle permet donc d'adapter les

modèles (et donc les processus à modéliser et leurs méthodes) aux objectifs et aux données disponibles en fonction de la spécificité des zones étudiées.

Les possibilités offertes par les avancées récentes en matière de développements informatiques, notamment avec la programmation orientée objet, ont ouvert un champ d'application très prometteur à la conception souple et flexible des systèmes environnementaux complexes. Différentes approches de modélisation basées sur ces notions de programmation orientées objet sont de plus en plus utilisées dans les modélisations environnementales. Cette notion de programmation orientée objet a servi de base au développement d'un outil de modélisation adapté à l'approche proposée : la plate-forme de modélisation LIQUID.

Dans ce chapitre, nous allons d'abord présenter une synthèse générale sur la genèse et le développement des plates-formes de modélisation ainsi que les défis auxquels il faudra faire face dans l'utilisation de cette notion pour répondre à nos objectifs. Les concepts et notions utilisés dans la plate-forme de modélisation LIQUID qui a servi de base à ce travail seront ensuite présentés en détails. Enfin, nous aborderons la question de la gestion des données d'entrée des modèles, qui représente une tâche importante et souvent délicate et fastidieuse en modélisation hydrologique. Nous présenterons la stratégie proposée dans le cadre de cette thèse pour la gestion des données nécessaires à la modélisation hydrologique spatialisée.

V.1. Notion de plate-forme de modélisation

V.1.1. Historique de l'utilisation des plates-formes de modélisation environnementale

Afin de représenter et simuler la complexité des systèmes naturels, les scientifiques ont commencé par modéliser certains des processus impliqués à l'aide de modèles indépendants. Au fur et à mesure de l'augmentation de la complexité des questions auxquelles ils souhaitaient répondre, notamment pour répondre aux préoccupations environnementales, les scientifiques sont passés de la représentation de processus isolés et spécifiques à la représentation d'un ensemble de processus intégrés. On parle alors de modélisation intégrée. Cette modélisation intégrée a pour but de représenter de manière simplifiée, le fonctionnement des systèmes naturels dans leur ensemble. Elle vise, autant que faire se peut, à représenter les systèmes naturels dans toutes leurs complexités, y compris les multiples rétroactions entre processus.

Ce besoin d'intégration s'est d'abord appuyé sur des modélisations existantes et on a assisté à l'émergence de la notion de couplage de modèles, qui est devenue aujourd'hui une question scientifique à part entière. Pour représenter un système naturel complexe, on fait communiquer deux ou plusieurs modèles existants, chacun décrivant des aspects souvent très précis et complémentaires du système à modéliser. Il s'agit souvent de modèles proches du point de vue de la thématique abordée. Les couplages de modèles sont beaucoup utilisés au sein de la communauté scientifique en général. Parmi de nombreux exemples trouvés dans la littérature, on peut citer en hydraulique, le couplage entre des modèles de simulation de réseaux d'assainissement et des modèles pour la modélisation des écoulements de surface (exemple : Schmitt et al., 2004). Toujours en hydraulique, des travaux existent sur le couplage d'un modèle de simulation des écoulements dans les cours d'eau en 1D avec un modèle de simulation des plaines d'inondation en 2D (exemple : Gejadze and Monnier, 2007¹¹). Le logiciel MIKE FLOOD

¹¹ <http://dassflow.gforge.inria.fr/applications.html>

(DHI, 2005) est aussi un exemple où ce type de couplage a été réalisé. Le couplage de la rivière avec la nappe est également couramment pratiqué (exemple : Poligot-Pitsch, 2002). Le modèle PROSE (Even, 1998) a été réalisé par un assemblage d'un modèle de simulation des écoulements dans les rivières, du transport de particules (par convection et dispersion) et un modèle décrivant le fonctionnement écologique d'un écosystème aquatique. Le modèle SENEQUE 3 (Ruelland and Billen, 2002; Bacq and Billen, 2003) est un exemple de couplage de modèle hydrologique avec un modèle de simulation du fonctionnement écologique au sein des réseaux hydrographiques. Il existe aussi des pratiques de couplage en hydrogéologie où des modèles de simulation de nappe sont souvent couplés avec des modèles de dispersion de polluants, pour les études de transferts de polluants (Equipe Cosivie, 2002; Kern, 2003). En simulation du climat, on utilise le couplage de modèles de circulation générale des masses d'air avec des modèles d'océan.

Pour répondre à ce besoin de couplage, on a vu apparaître, différentes plates-formes de couplages¹² ou coupleurs. Ces derniers ont essentiellement été créés pour favoriser le couplage de modèles existants, en essayant de toucher le moins possible aux codes existants. On peut citer, entre autres, le coupleur PALM¹³ (Lagarde et al., 2000 ; Buis et al., 2005), en cours d'évaluation dans le cadre du projet SEVE (Sol Eau Végétation Energie) qui a pour but de modéliser des surfaces continentales¹⁴ de façon intégrée. Elle, fait partie d'un type de plate-forme de couplage particulier, orienté plutôt vers les architectures distribuées. Dans cette plate-forme de couplage, un système est considéré comme l'exécution (plus ou moins concurrente) d'unités élémentaires indépendantes qui échangent des informations. On y propose des algorithmes de couplage assurant la synchronisation des opérations d'échange entre composants, ainsi que des outils de transformation de données (interpolation spatiale et temporelle). La plate-forme de couplage OpenMI (Open Modelling Interface) (Blind and Gregerson, 2005; Gregersen et al., 2005) a été développé dans le cadre du projet européen HarmonIT¹⁵. C'est une structure de couplage ou d'interopérabilité standardisée, de modèles existants. Dans cette plate-forme, divers modèles existants peuvent être intégrés comme composants, et connectés entre eux à travers une interface de type "Get value" (Gregersen et al., 2005).

¹² On définit ici une plate-forme de couplage comme un environnement informatique permettant d'assembler des modèles existants.

¹³ <http://www.cerfacs.fr/~palm/>

¹⁴ <http://www.cesbio.ups-tlse.fr/seve/index.php>

¹⁵ <http://www.harmonit.org/>

Une description détaillée de cette plate-forme de couplage peut-être trouvée sur le site internet <http://www.openmi.org/> ou dans la thèse de Branger (2007).

Pour certaines applications néanmoins, les scientifiques sont vite limités par les possibilités offertes par l'utilisation de ces outils de couplage de modèles existants. En effet, dans le domaine des sciences environnementales, la représentation des systèmes naturels pose un autre défi que celui du couplage pur et simple de modèles existants. Pour représenter la dynamique de certains systèmes naturels complexes, régis par différents processus, une approche pluri-disciplinaire est souvent incontournable. Il est nécessaire de reproduire ces divers processus et leurs interactions spatiales de façon totalement intégrée. Pour y parvenir, certains scientifiques ont ressenti le besoin de remettre en cause les modélisations existantes et de reformuler les hypothèses et les modélisations, en ayant d'emblée en mémoire l'intégration des différents processus et composants. La Figure (5.1) illustre un cas de représentation possible d'un système environnemental complexe avec divers processus dont l'étude relève de différentes disciplines indépendantes.

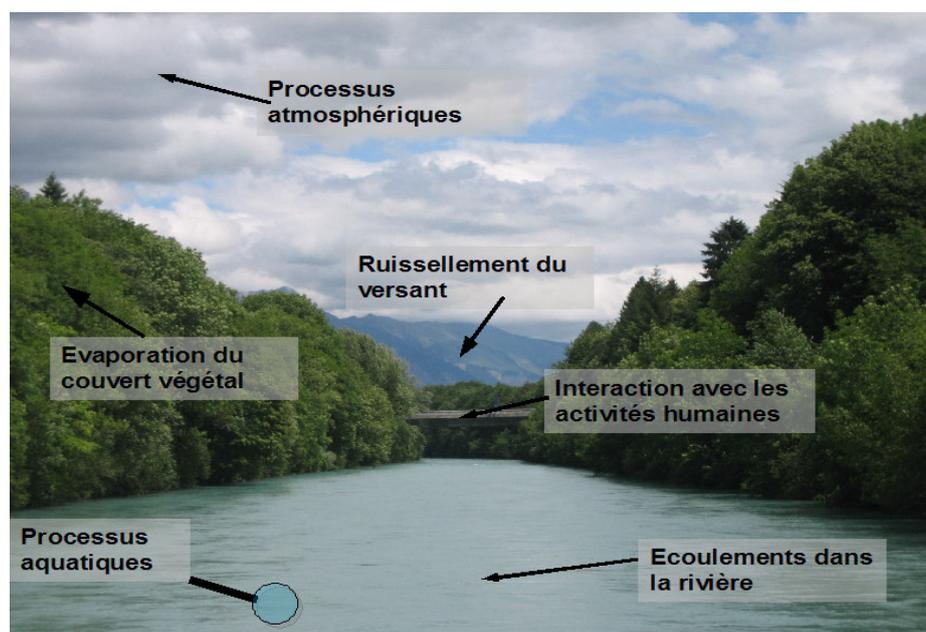


Figure 5. 1 : Exemple de composants pour une représentation simplifiée d'un système environnemental complexe.

Une représentation informatique réaliste d'un système environnemental tel que présenté sur la Figure (5.1) nécessite de réaliser : (i) une modélisation de chacun des processus adaptés à l'échelle du problème et aux paramètres disponibles sur le terrain, (ii) de prendre

en compte leurs fortes interactions dans le temps et dans l'espace. Il convient aussi de mettre l'accent sur ces interactions fortes entre composants afin d'approcher les modélisations des systèmes environnementaux réels où par définition tous les processus sont fortement liés. La nécessité d'adopter une approche pluri-disciplinaire pour représenter les systèmes naturels a contribué à l'émergence, en modélisation environnementale, des notions de *plate-forme de modélisation*, de *modularité*, de *généricité*, d'*extensibilité* et d'*interopérabilité* qui permettent d'apporter des réponses techniques aux besoins exprimés.

Nous définissons ici une '*plate-forme de modélisation intégrée*' comme un environnement de développement informatique qui permet l'assemblage de modules (composants élémentaires) développés en son sein, et dont les interfaces sont conçues pour faciliter le couplage avec d'autres composants de la plate-forme. Contrairement au couplage présenté précédemment, les composants sont donc développés ou intégrés (éventuellement à partir de modélisations existantes) dans l'environnement informatique de la plate-forme. Ceci permet d'assurer une meilleure homogénéité et cohérence entre les composants disponibles, pour garantir les principes de modularité, généralité, extensibilité et interopérabilité cités précédemment et que nous précisons ci-dessous.

La *modularité* est motivée par le besoin de mener de fronts des efforts dans la représentation de processus de façon spécifique, dans un contexte pluri-disciplinaire. Elle permet aussi aux différents développeurs de se concentrer sur leurs compétences tout en bénéficiant de celles des autres. Elle consiste à encapsuler un ou des processus au sein de composants indépendants, de façon à permettre leur ré-utilisabilité.

La *généricité* est recherchée pour favoriser l'indépendance des modèles développés. Elle permet aux modèles de pouvoir être utilisés dans différents contextes (ou même indépendamment de tout contexte). Cette notion répond à un besoin de capitaliser les efforts de développement.

L'*extensibilité* est liée à la possibilité d'étendre les fonctionnalités d'un modèle sans affecter son intégrité. Cette propriété permet d'améliorer les modèles, d'y ajouter de nouvelles

fonctionnalités ou de mettre à jour facilement les méthodes utilisées pour la représentation des processus.

L'*interopérabilité* est définie ici comme la capacité que possède un modèle dont les interfaces sont connues, à fonctionner avec d'autres modèles existants. Toutes ces notions concourent à la capitalisation, au sein d'un même environnement de développement ou plate-forme de modélisation, de plusieurs processus (ou modèles) construits indépendamment pouvant servir à réaliser des modèles intégrés multi-disciplinaires.

Une plate-forme de modélisation peut donc être définie comme un environnement de modélisation permettant de capitaliser des connaissances et compétences, en favorisant les transferts multidisciplinaires pour couvrir des thématiques différentes (Argent, 2004). Elle doit avoir une grande flexibilité afin de permettre à ses utilisateurs de concevoir des modèles adaptés à leurs objectifs, à travers l'assemblage de divers processus existants. D'un point de vue pratique, *une plate-forme de modélisation peut être considérée comme une entité possédant un noyau de connaissances et de méthodes (ou modules), à partir desquelles des modèles spécifiques seront créés. La figure (5.2) illustre la structure d'une plate-forme.*

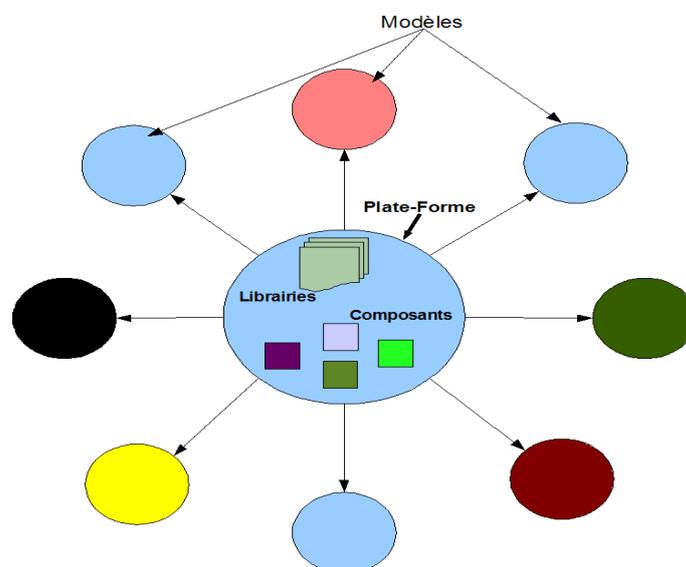


Figure 5. 2 : Structure générale d'une plate-forme de modélisation

Beaucoup d'initiatives de développement de plates-formes de modélisation (au sens de la Figure 5.2) existent dans la littérature. On peut citer les plates-formes orientées multi-

agents comme DIET Agents (Marrow et al., 2001; Marrow, 2003) ou la plate-forme ZEUS (Collis Jaron and Buskirk, 2000; 2000b). Ces plates-formes généralistes proposent des méthodologies et des outils pour la construction des systèmes multi-agents collaboratifs. La plate-forme ZEUS a été utilisée par exemple pour développer une autre plate-forme spécialisée du nom de OSIRIS (Fianyo, 2001; 2001; 2001c), dans le domaine de la gestion et de l'aide à la décision des systèmes d'irrigation. La plate-forme DIAS (Dynamic Information Architecture System) est aussi une plate forme généraliste ayant des champs d'applications très variés tels que l'armée, l'agriculture, la gestion etc. (Christiansen, 2000; Sydelko et al., 2001).

Dans le domaine des sciences environnementales, outre l'exemple d'OSIRIS cité ci-dessus, on trouve des initiatives comme la plate-forme SME (Spatial Modelling Environment) développée par l'université du Maryland aux Etats-Unis (Voinov et al., 2004). Cette plate-forme est constituée de bibliothèques de modules spécialisés en hydrologie et en écologie, et permet le couplage de divers composants dans un contexte spatial. La plate-forme TIME¹⁶ (The Invisible Modelling Environment) est un outil de développement de modèles dans le domaine de l'environnement développé en Australie (Rahman et al., 2003). Elle fournit une interface de développement de modèles basée sur l'utilisation de méta-données pour l'automatisation de nombreuses tâches dans le processus de création de modèles. Elle comporte un ensemble de composants pour le traitement des données spatiales, l'analyse de terrain, et la gestion des entrées et sorties, et un module permettant de connecter visuellement différents modèles (Murray et al., 2007). La plate-forme TARSIER (Watson and Rahman, 2004) est aussi une plate-forme de modélisation environnementale qui a été un précurseur de la plate-forme TIME dans laquelle elle a été intégrée. La plate-forme OMS (Object Modeling System) (David et al., 2002) a été développée conjointement par des universités américaines de l'USGC et l'USDA-ARS (universités du Colorado) et l'université Friedrich-Schiller de Jena (FSU) en Allemagne. Une description détaillée des principes utilisés et des composants de la plate-forme a été présentée par Kralisch et al, (2005). Cette plate-forme permet de construire des modèles indépendants, hiérarchisés et bien structurés dans le temps et dans l'espace.

¹⁶ <http://www.toolkit.net.au/cgi-bin/WebObjects/toolkit.woa/wa/productDetails?productID=1000015>

Des modèles existants peuvent être utilisés comme composants. La Figure (5.3) présente la structure de la plate-forme OMS.

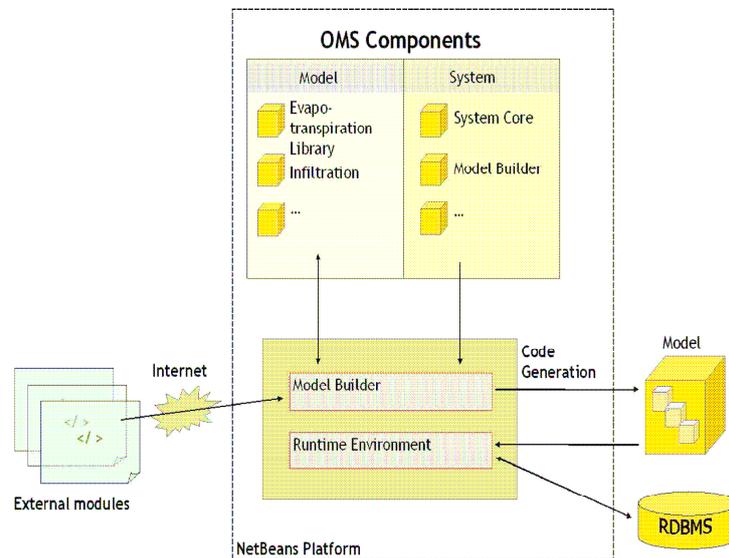


Figure 5. 3 : Présentation de l'architecture de la plate-forme OMS (Source: Kralisch et al., 2005).

La notion de programmation orientée objet a été adoptée par la plupart des plates-formes de modélisation environnementale récentes. Ce n'est certainement pas un hasard car cette méthode de développement intègre les notions de modularité, d'extensibilité de généricité et d'interopérabilité dans le processus de développement des plates-formes. Dans le paragraphe suivant, nous allons nous intéresser au rôle joué par l'avènement de cette méthode de développement dans l'essor des plates-formes.

V.1.2. Le rôle de la programmation orientée objet dans le développement des plates-formes.

La programmation habituellement utilisée dans le domaine scientifique est dite 'procédurale'. Elle est basée sur l'utilisation de routines ou procédures, sans liens particuliers, agissant sur les données (exemple la programmation avec les langages Fortran, le Basic, Pascal, etc.). Ce type de programmation s'avère rigide enclin à erreur lorsqu'il s'agit de gérer conjointement des données et des fonctions associées. Pour le développement des plates-formes de modélisation, l'utilisation de ce type de

programmation peut se révéler très fastidieuse, et poser des problèmes de maintenance. L'exemple de la plate-forme de modélisation MMS (Leavesley et al., 1996) développée avec le langage Fortran illustre la complexité d'utilisation qui résulte des langages procéduraux dans la conception de plates-formes. En effet, la plate-forme de modélisation MMS est l'une des rares plates-formes existantes, développées avec un langage de programmation de type procédural. La gestion des données y est très fastidieuse, et la mise à jour ou le développement de nouveaux composants sont très compliqués.

La programmation objet est un paradigme de programmation informatique basé sur la définition et l'assemblage de briques logicielles appelées "*objets*". C'est le langage Simula-67 (Développé au *Norwegian Computing Centre d'Oslo*, initialement par Ole-Johan Dahl et Kristen Nygaard) qui jette les prémises de la programmation objet dans les années 60, dans le cadre de la mise au point d'un langage de simulation. Les recherches sur l'intelligence artificielle se sont inspirées ensuite de ce type de programmation dans les années 70-80. Mais c'est réellement avec les langages Smalltalk-71 en 1972, puis Smalltalk-80 en 1983 (inspiré en partie de Simula), que la programmation par objets débute et que sont posés les concepts de base de celle-ci : *Objets, messages, encapsulation, polymorphisme, héritage* etc.

La notion d'objet joue un rôle central dans ce type de programmation. Un objet représente un concept, une idée ou toute entité du monde physique ou conceptuel, comme une voiture, une personne ou encore un élément ou un processus du milieu physique. Un objet est doté de variables (ou attributs) servant à le caractériser, de fonctions (ou méthodes) pouvant lui permettre de modifier la valeur de ses attributs, de procédures (ou opérations) pouvant lui être appliquées. La Figure (5.4) illustre la notion d'objet. La modélisation Objet consiste à définir et à qualifier les éléments à modéliser indépendamment de leur mise en œuvre. C'est ce que l'on appelle l'analyse orientée objet ou OOA (Object-Oriented Analysis). La conception orientée objet ou OOD (Object-Oriented Design) consiste à proposer des solutions techniques pour représenter, dans le système informatique, les éléments définis à l'issue de l'étape d'analyse (OOA). Une fois qu'un modèle de conception est établi, il est possible au développeur de lui donner corps

en utilisant un langage de programmation orienté objet (exemple : Java, C++, Visual Basic, etc.).

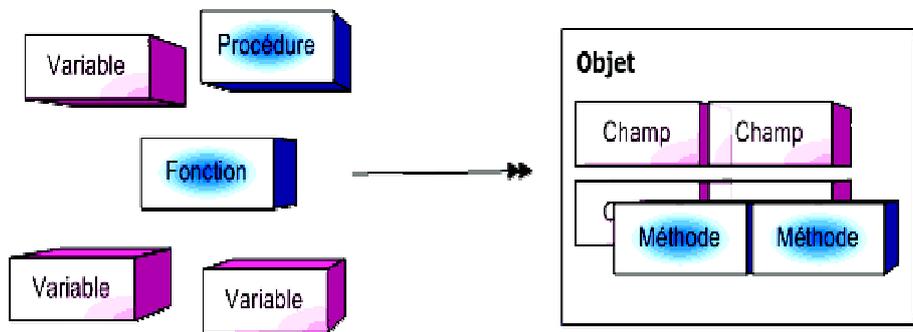


Figure 5. 4 : Illustration de la notion d'Objet.¹⁷

Il faudra attendre les années 90, pour que Rumbaugh, Booch et Jacobson s'unissent avec l'OMG (Object Management Group), un organisme destiné à standardiser des technologies objet, pour l'élaboration d'une nouvelle méthode, suffisamment générique, pour pouvoir s'appliquer à quasiment tous les contextes applicatifs. De cette collaboration est née un standard graphique de modélisation des données et des traitements : le langage UML (Unified Modeling Language). Ce standard UML, couplé avec le développement des outils de l'Atelier de Génie Logiciel (AGL) a largement contribué à l'extension de l'utilisation de la modélisation orientée objet dans les processus de développement de modèles. Il offre un cadre de réflexion et d'analyse, approprié à la modélisation orientée objet, et facilite la modélisation de systèmes autrement très compliqués à représenter. Grâce à ce langage, on peut en effet concevoir facilement un système complexe grâce à des outils graphiques, et différentes vues organisées en diagrammes (statiques, comportementaux et dynamiques).

La programmation orientée objet a des effets positifs sur les plates-formes de couplage. Elle a permis d'améliorer les méthodes de couplage informatique de modèles grâce à la possibilité d'encapsuler les modèles existants (y compris ceux qui ont été développés avec des langages procéduraux) comme des objets. L'utilisation de la notion de *wrapper*¹⁸ a contribué à faciliter les procédures de couplage de modèles existants. C'est notamment le cas dans OpenMI (Gregersen et al., 2005). On pourrait presque croire que, grâce au

¹⁷ Source : <http://hdd34.developpez.com/cours/artpoo/>

¹⁸ Un *wrapper* est un adaptateur qui permet de convertir l'interface d'un composant (ou d'un objet) en une autre interface compatible avec les interfaces d'autres composants.

développement de la notion de modularité au sein des plates-formes, le couplage de codes existants est devenu une tâche facile. Seulement, un certain nombre de problèmes demeurent. En effet, les codes qui ont été développés pour être autonomes ne sont pas forcément faciles à adapter pour être couplés avec d'autres composants. C'est notamment le cas lorsqu'on souhaite réaliser certains couplages spatiaux ou temporels (voir Paragraphe V1.4) ou lorsque différents composants calculent une même variable d'état ou des variables équivalentes. Une illustration de cette difficulté se trouve dans le travail de Messenger (2005) où un modèle hydrologique et un modèle TSVA (Tranfert Sol Végétation Atmosphère) calculent tous les deux une humidité du sol avec des méthodes différentes. Par ailleurs, l'apparition de la programmation objet n'a pas permis de réduire de beaucoup le temps de développement nécessaire au couplage de modèles existants. Par exemple, pour utiliser la plate-forme OpenMI, les composants doivent être rendus « OpenMI compliant », ce qui peut nécessiter des réorganisations/réécritures de codes significatives (exemple. Crooks et Prudhomme, 2006). De plus, dans l'approche consistant à utiliser des codes existants comme composants, il n'est pas souvent possible de faire une modélisation intégrée où il y ait de vraies interactions entre les composants (par exemple des connexions bidirectionnelles).

Au niveau des plates-formes de modélisation, le tableau n'est pas tout à fait le même. Un atout important de la programmation orientée objet est qu'elle intègre les notions de *modularité* (l'objet étant naturellement modulaire), d'*extensibilité* et de *généricité* des fonctionnalités dans le processus de développement des modèles. Pour cette raison, ce type de programmation offre une solution adaptée aux besoins de modularité, d'extensibilité, d'interopérabilité exprimé dans la première section de ce chapitre (paragraphe V.1.1). La programmation orientée objet offre donc une réponse adaptée aux besoins de flexibilité requis pour la modélisation de systèmes environnementaux. Les plates-formes de modélisation développées dans un environnement orienté objet définissent des interfaces pour la conception de modèles (composants) réutilisables et indépendants, leur permettant de pouvoir être assemblés avec d'autres modèles. La Figure (5.5) illustre un exemple d'architecture des plates-formes de modélisation dans un environnement de programmation de type orienté objet. Les composants (ou modèles)

qui implémentent l'interface préconisée par la plate-forme sont réutilisables et peuvent être assemblés de diverses manières dans le processus de création de modèles.

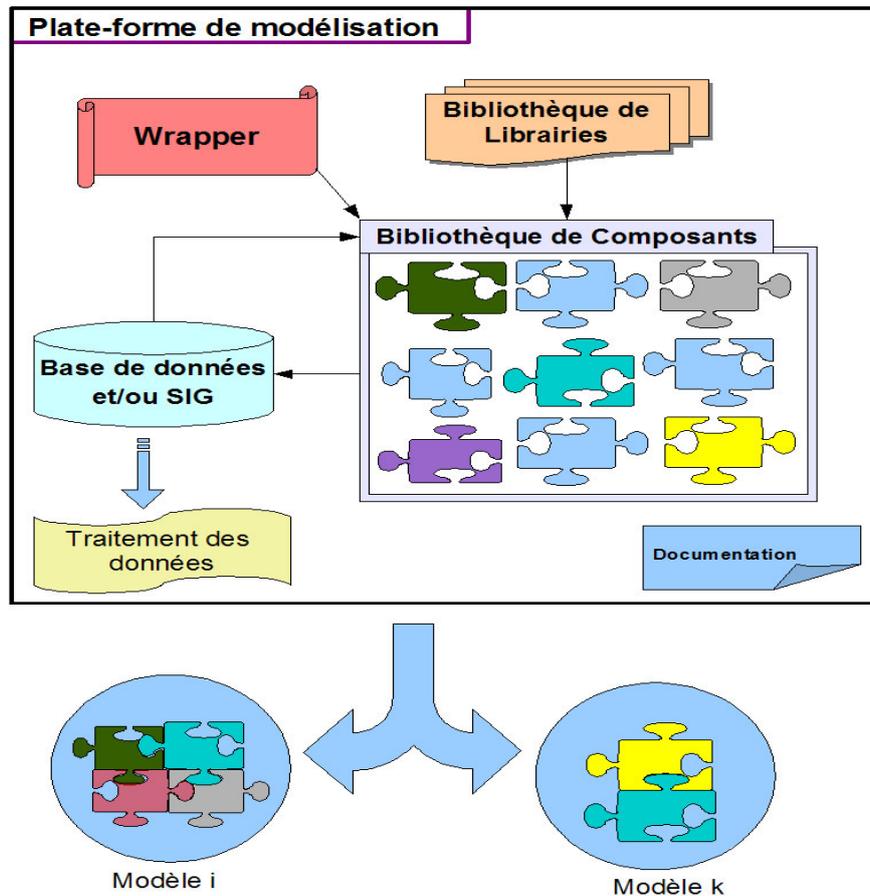


Figure 5. 5 : Exemple d'architecture de base d'une plate-forme de modélisation

Comme présenté sur la Figure (5.5), la philosophie adoptée par la plupart des plates-formes de modélisation environnementale consiste à encapsuler plusieurs processus indépendants comme composants, puis de les doter d'interfaces permettant de les assembler entre eux. Ce fonctionnement répond bien à une tendance répandue en modélisation environnementale où on a besoin de construire des modèles en fonction des objectifs (Voir paragraphe V.1.1). Il répond également à notre objectif, exprimé dans la première partie, d'adopter une approche de modélisation hydrologique basée sur la l'intégration « sur-mesure » des processus hydrologiques dans un modèle en fonction des objectifs visés. Dans le paragraphe suivant, nous allons faire un rappel sur l'utilisation des plates-formes en hydrologie de façon à introduire les défis spécifiques posés par l'utilisation des plates-formes en hydrologie spatialisée.

V.1.3. Vers une utilisation plus importante de la notion de plate-forme en modélisation hydrologique spatialisée ?

En hydrologie, comme dans d'autres disciplines, on a commencé par coupler des modèles existants pour répondre à des questions de plus en plus complexes. Les premiers couplages de modèles ont été réalisés dans le cadre de divers projets visant à coupler l'atmosphère et la surface continentale. On peut citer l'exemple du programme Gewex-Rhône mené par Météo-France, l'école des Mines de Paris (ENSM), le Cemagref, le CNRS, EDF et le BRGM (les travaux de couplage engagés dans ce projet sont maintenant repris dans le projet de plate-forme modulaire EauDyssée). Dans ce projet, le modèle hydrologique MODCOU (Ledoux, 1989) a été couplé avec le schéma de surface ISBA (Noilhan and Planton, 1989). On peut également citer le programme AMMA, où un couplage entre atmosphère et hydrologie a été aussi réalisé (Messenger, 2005) avec différents outils numériques tels que le modèle atmosphérique MAR (Modèle Atmosphérique Regional), le modèle hydrologique ABC (Cappelaere et al., 2003) et un modèle de Transfert Sol Végétation Atmosphère (TSVA). L'objectif était d'analyser les rétroactions entre la surface continentale et l'atmosphère. La plate-forme de couplage OpenMI a également servi de base au couplage entre plusieurs modèles hydrologiques existants, dans le but de représenter l'ensemble du cycle de l'eau (exemple, Crooks and Prudhomme, 2006 ; Graham and Bergström, 2006).

Comme dans la plupart des sciences environnementales, et pour les mêmes raisons que celles évoquées dans le Paragraphe (V.1.1), les notions de *plate-forme de modélisation* et de *modularité* ont fait leur entrée dans la modélisation hydrologique avec entre autres Leavesley et al (1996) et Leavesley (2002). La notion de plate-forme de modélisation en hydrologie n'est donc pas nouvelle. Les auteurs ci-dessus ont plaidé pour l'avènement de modèles réellement intégrés pour la gestion de la ressource en eau. L'USGS (US Geological Survey) a développé la plate-forme MMS (Leavesley et al., 1996), basée sur la richesse des connaissances des différents processus hydrologiques, et sur la recherche collaborative entre différentes unités de recherche. Le but était d'intégrer des modélisations hydrologiques au sein d'une approche globale de gestion des ressources en eau, aussi bien d'un point de vue qualitatif que quantitatif. La plate-forme MMS a été

l'une des premières plates-formes permettant de faire de la modélisation hydrologique. Elle comporte différents modèles, pour la simulation de la dynamique hydrique, de l'énergie et des processus biochimiques. Elle a donc un champ d'application qui va au-delà de l'hydrologie. En hydrologie, cette plate-forme propose uniquement l'utilisation soit d'une approche type TOPMODEL (Beven and Kirkby, 1979) soit du modèle PRMS (Carey and Simon, 1984).

L'utilisation de la programmation orientée objet pour la conception des plates-formes de modélisation offre des perspectives nouvelles en hydrologie. On a, en effet, la possibilité d'encapsuler¹⁹ différents processus hydrologiques au sein d'objets indépendants et de doter ces derniers de mécanismes leur permettant de dialoguer avec d'autres modules. On peut ainsi concevoir des modèles hydrologiques 'à la carte' en fonction des objectifs de modélisation, en couplant divers processus hydrologiques.

Plusieurs initiatives en hydrologie spatialisée vont déjà dans ce sens, notamment avec MIKE-SHE (DHI, 2005). Dans les dernières versions de ce modèle commercial, les processus hydrologiques sont implémentés en composants indépendants, dotés de mécanismes de couplage propres leur permettant d'être couplés avec d'autres composants du modèle. On peut donc choisir les processus hydrologiques à représenter ou même choisir, pour quelques composants, les méthodes de représentation des processus afin de réaliser une modélisation adaptée à des objectifs spécifiques. La plate-forme JAMS (Kralisch and Krause, 2006) est aussi une initiative récente permettant de faire de la modélisation hydrologique. Elle inclut différents processus hydrologiques et permet de simuler certains composants du cycle de l'eau. Les plates-formes TARSIER (Watson and Rahman, 2004), ICMS (Reed et al., 1999) maintenant intégrées dans la plate-forme TIME, la plate-forme MHYDAS²⁰, nouvelle version modularisée et programmée en langage orientée objet du modèle MHYDAS (Moussa et al., 2002; Tiemeyer et al., 2006) sont des plates-formes de modélisation servant à construire des applications en modélisation hydrologique.

¹⁹Encapsulation : Mécanisme consistant à rassembler les données et les méthodes au sein d'une structure en cachant l'implémentation de l'objet. L'encapsulation permet de garantir l'intégrité des données contenues dans l'objet.

²⁰ <http://www.umr-lisah.fr/mhydas/index.php?page=welc&lang=fr>

Toutefois, même si l'utilisation des plates-formes facilite la compatibilité entre composants (redéveloppés pour répondre aux critères de compatibilité), elle ne résout pas à elle seule les questions scientifiques posées par l'intégration de modèles. En effet, au-delà des préoccupations pratiques de l'interopérabilité entre les composants, le couplage de modèles pose un certain nombre de difficultés. Au nombre de celles-ci, figure le couplage dynamique de certains processus hydrologiques dans un environnement modulaire. On peut aussi citer les difficultés de couplages spatiaux entre modèles, indispensables en modélisation hydrologique spatialisée. Nous revenons plus en détails sur ces deux points dans le paragraphe qui suit.

V.1.4. Quels défis pour l'utilisation des plates-formes en modélisation hydrologique ?

Quelles que soient les plates-formes utilisées en modélisation hydrologique distribuée, le couplage et l'intégration de modèles restent des tâches délicates. Ces difficultés, comme nous le mentionnions dans la partie précédente, sont liées aux aspects spatiaux et temporels des couplages.

Au niveau temporel, lorsque les modèles à coupler sont fondés sur des équations dont les schémas de discrétisation temporels sont différents (explicite ou implicite par exemple), le couplage ne garantit pas souvent de bonnes performances numériques. Les critères de convergence (par exemple dans le cas d'équations différentielles) ne sont plus forcément respectés, ce qui implique des risques d'instabilité de l'assemblage. De plus, dans la plupart des couplages de modèles, les considérations pratiques liées aux codes sources prennent souvent le dessus sur les schémas numériques. En pratique, comme précisé ci-dessus, il n'est pas toujours possible de faire des rétroactions entre composants au cours d'une simulation, en raison des équations résolues et des méthodes numériques qui permettent de les résoudre. C'est notamment vrai pour les méthodes numériques où les critères de convergence sont liés au pas de temps utilisé. Un composant est souvent 'forcé' par les résultats d'un autre composant. Les algorithmes de couplage sont souvent utilisés pour adapter les sorties d'un composant avec les entrées de l'autre ou des autres composants, par le biais de transformations de données telles que les interpolations

spatiales ou temporelles (exemple le coupleur PALM). Beaucoup d'efforts ont été faits pour l'amélioration de ces algorithmes (exemple dans OpenMI). Toutefois, ce fonctionnement limite l'interopérabilité²¹ des composants (on ne peut pas toujours utiliser un composant dans plusieurs contextes). Par ailleurs, les notions de modularité et de stabilité numérique apparaissent souvent comme antinomiques. En effet, la modularité conduit plutôt à utiliser des itérations sur les conditions aux limites ou des valeurs des flux au pas de temps précédent. En revanche, pour une meilleure stabilité de l'ensemble, il est souvent préférable de ne résoudre qu'un seul système d'équations où l'ensemble des processus sont inclus. C'est le cas par exemple du modèle InHM (Integrated Hydrological Model) de VanderKwaak J. E. (1999) et de VanderKwaak J. E. and K. Loague (2001). Ce sont aussi les conclusions de Panday et al. (2004) qui ont comparé différentes méthodes d'implémentation d'un modèle intégré couplant écoulement de surface et de sub-surface. Par ailleurs, les rétroactions peuvent être également nécessaires pour représenter certains systèmes de manière réaliste, car les processus simulés sont rarement linéaires et les interpolations temporelles peuvent comporter d'énormes incertitudes (Figure 5.6). En effet, la dynamique temporelle entre deux pas de temps est souvent non linéaire pour la plupart des processus. Par exemple, le ruissellement et l'infiltration entre deux pas de temps ne suivent pas de lois précises, mais dépendent de facteurs extérieurs comme la pluviométrie. On ne peut donc pas évaluer avec certitude les variables d'état caractérisant ces processus entre deux instants, par une simple interpolation temporelle, sans prendre en compte la sollicitation extérieure que constitue par exemple la pluviométrie. Le couplage de deux modèles dont les échelles temporelles optimales ne sont pas les mêmes comporte donc beaucoup d'incertitudes. Ce problème est renforcé en hydrologie puisque nous avons vu au Chapitre (II) que les échelles temporelles caractéristiques des processus hydrologiques balayaient une gamme très large. Ceci se traduit au niveau des modèles de processus par des pas de temps très différents (par exemple entre la dynamique des nappes et celle des écoulements de surface). De plus, nous avons aussi vu au Chapitre (II) qu'un certain nombre de processus en hydrologie sont discontinus dans le temps car déclenchés par des phénomènes à seuil : le ruissellement de surface, les écoulements dans les cours d'eau temporaires. Le couplage des modèles représentant ces processus avec les

²¹ Je rappelle que l'interopérabilité est définie ici comme la capacité que possède un composant dont les interfaces sont connues, à fonctionner avec d'autres composants ou modèles existants.

autres posera donc forcément des problèmes non triviaux, nécessitant des solutions logicielles robustes.

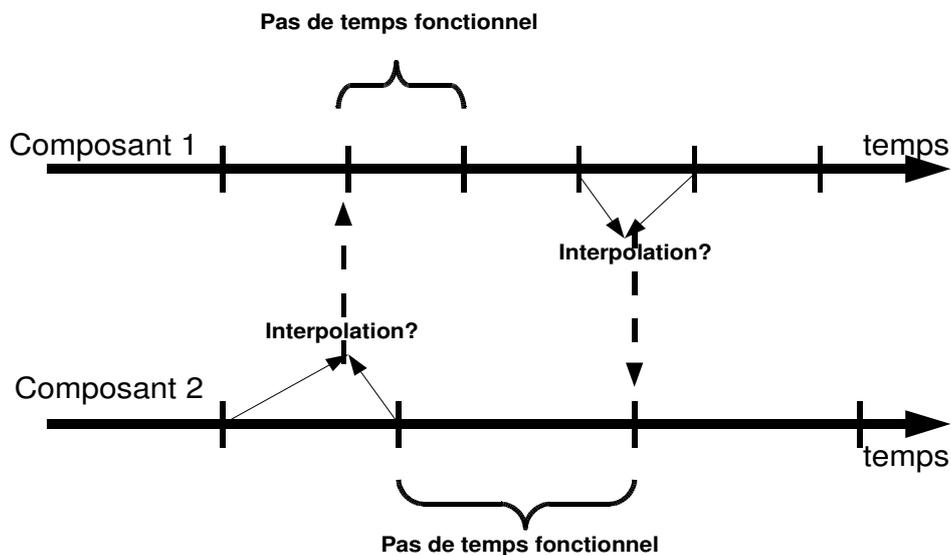


Figure 5. 6 : Illustration des incertitudes liées à l'interpolation temporelle lors du couplage de deux modèles.

Au niveau des couplages spatiaux, les deux types de difficultés que l'on peut rencontrer peuvent être résumés par les questions suivantes :

- Comment gérer ou qualifier l'interface entre deux modèles (composants) décrivant chacun une partie du domaine? (Exemple de la Figure.5.7a). Ce problème est traité sous le vocable de problèmes de frontières.
- Comment gérer le recouvrement spatial lorsque deux composants opèrent des simulations sur des domaines emboîtés ? (Exemple de la figure 5.7b).

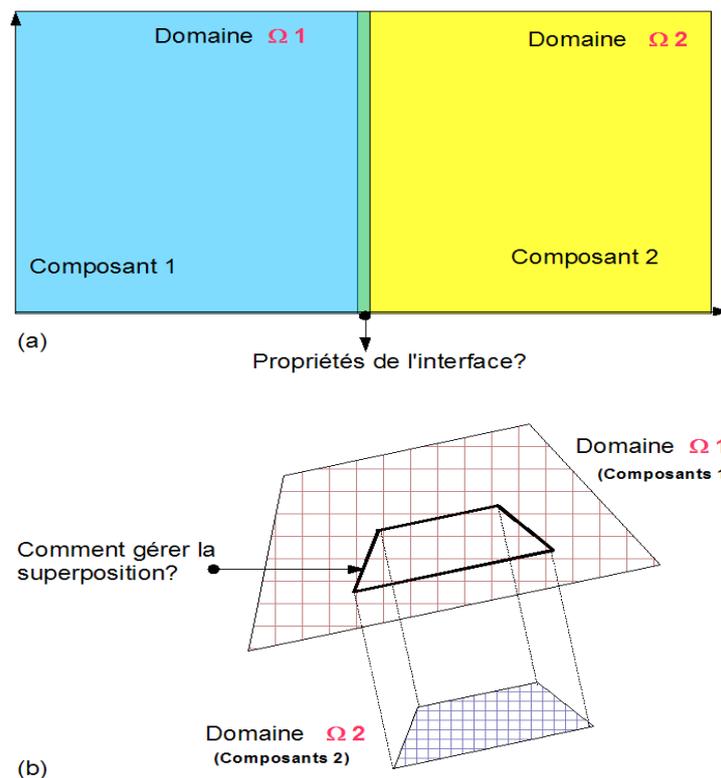


Figure 5. 7: Exemples d'illustration de problèmes des couplages spatiaux : problèmes de frontières (a) et problèmes de superposition de composants (b).

La résolution des difficultés évoquées ci-dessus est souvent très compliquée avec les plates-formes de couplage qui se contentent de faire communiquer des modèles existants. Toutefois, la tâche n'est pas impossible comme en témoignent Gregersen et al (2005) dans le cadre de la présentation de OpenMI. En fonction de la spécificité des modèles qu'on souhaite assembler, ces couplages ne sont pas toujours possibles sans un redéveloppement majeur du ou des modèles à assembler. Ceci nécessite d'avoir une excellente connaissance des codes des modèles à assembler. Pourtant, c'est souvent ce qu'on cherche à éviter lorsqu'on réalise des couplages de modèles existants. En ce qui

concerne les plates-formes de modélisation, le fait que les modèles soient redéveloppés, permet de réfléchir, dès leur conception, au couplage en prévoyant des méthodes et des interfaces adaptées. Les composants peuvent être également développés dans un souci d'interopérabilité de façon à offrir des choix de modèles différents à l'utilisateur. En hydrologie, l'hétérogénéité des surfaces continentales, telle que nous l'avons décrite dans la première partie de ce mémoire, pose des problèmes supplémentaires en terme de couplages spatiaux. On peut en citer plusieurs :

- la nécessité de faire communiquer des modélisations se déployant sur des surfaces ou des volumes (transferts dans les sols, ruissellement de surface, écoulement dans les nappes) avec des modélisations se déployant sur des linéaires (écoulement dans les réseaux par exemple)
- la nécessité, si on souhaite représenter de manière différente les objets composant la surface, de faire communiquer (c'est-à-dire d'échanger des flux d'eau) dans l'espace, des objets pour lesquels les modélisations peuvent être de nature très différente (équations aux dérivées partielles, modèles réservoir, etc.), conduisant à l'assemblage d'une représentation s'apparentant à un puzzle dans l'espace (par exemple des parcelles agricoles, des fossés, des talus, des zones habitées).

Là encore, ceci nécessite une architecture logicielle de la plate-forme de modélisation présentant une réelle souplesse ainsi que la nécessité de résoudre de nombreux problèmes numériques pour assurer la stabilité de l'ensemble et que l'assemblage reste conservatif.

V.1.5. Synthèse

Pour résumer ce parcours rapide dans le monde des plates-formes de modélisation intégrées nous retiendrons les éléments suivants. Afin de répondre à un besoin d'assemblage de différents processus pour aboutir à des modélisations environnementales intégrées, permettant de représenter les multiples interactions entre les différents processus impliqués, deux types d'approches, répondant techniquement au besoin, ont été et sont développés :

- Les plates-formes de couplage ou coupleurs, s'appuyant essentiellement sur des modélisations existantes. Une des contraintes est souvent de toucher le moins

possible aux codes patrimoines, ce qui conduit au développement d'interfaces entre les codes pour permettre les échanges d'informations entre les différents modèles, et les interpolations spatiales et temporelles requises. Ces coupleurs n'offrent en général pas de facilités pour le développement de nouveaux composants.

- Les plates-formes de modélisation intégrées, s'appuyant plutôt sur une remise à plat des concepts et une vision d'ensemble du système à modéliser. Outre les fonctionnalités identiques à celles des coupleurs, ces environnements de modélisation offrent donc en général des outils permettant de faciliter et homogénéiser les développements des composants, ainsi que des outils pour les assembler de différentes manières et constituer des modèles répondant à des objectifs donnés.

Nous avons vu aussi que leur utilisation en hydrologie pose des problèmes spécifiques de couplages temporels et spatiaux de composants ayant des dynamiques temporelles et des échelles spatiales caractéristiques très différentes.

Par ailleurs, dans la première partie, nous avons proposé une démarche de modélisation hydrologique des bassins versant fondée sur la question : "Quelles méthodes de représentation des processus hydrologiques sont les plus appropriées pour répondre à une question donnée en tenant compte des données disponibles?". Cette démarche suppose de disposer d'un outil suffisamment flexible et offrant suffisamment de choix pour adapter les processus hydrologiques et leurs méthodes de représentation aux objectifs de modélisation et aux données disponibles. Cet outil devrait pouvoir aussi offrir la possibilité de combiner des représentations plus ou moins fines d'un même processus dans une même modélisation (par exemple lorsqu'on change d'échelle ou lorsqu'on veut détailler la représentation de certains processus sur une partie du territoire). Dans cet esprit, les notions abordées dans le premier paragraphe de ce chapitre telles que modularité, genericité et interopérabilité sont d'une grande importance.

L'analyse bibliographique présentée dans la première partie de ce chapitre nous conduit naturellement à nous tourner vers les plates-formes de modélisation environnementales pour répondre aux critères du cahier des charges. En effet, les modélisations dont nous avons besoin, notamment pour prendre en compte les géométries irrégulières proposées dans la première partie, n'existent pas vraiment. Il nous faut donc de toute manière développer de nouveaux composants. Par ailleurs, nous souhaitons pouvoir prendre en compte, autant que faire se peut, les spécificités des couplages spatiaux et temporels rencontrés en hydrologie et rappelés plus haut. Lors du démarrage du projet, l'état d'avancement des projets actuels n'était pas suffisant pour répondre à nos besoins. Pour toutes ces raisons, une plate-forme de modélisation appelée **LIQUID** a donc été proposée par la société Hydrowide²², avec pour objectif d'intégrer les contraintes et besoins rappelés plus haut. Cette plate-forme doit aussi nous permettre de mettre en œuvre l'approche de modélisation des systèmes hydrologiques proposée dans la première partie. Au sein de la plate-forme **LIQUID**, les notions de modularité, de généricité, d'extensibilité et d'interopérabilité ont largement été mises à contribution pour le développement de composants dans la perspective d'une utilisation en fonction des objectifs de modélisation. Dans la section suivante, nous allons présenter en détail la plate-forme **LIQUID**, ses objectifs et la philosophie utilisée pour son développement, en soulignant comment ces concepts répondent à nos objectifs.

²² <http://hydrowide.com/index.php>

V.2. Présentation de la plate-forme de modélisation LIQUID

V.2.1. Bref historique sur le développement de la plate-forme LIQUID

La plate forme LIQUID est développée par la société en hydro-informatique HYDROWIDE²³ créée en 2005. Cette société coordonne le développement de la plate-forme et en assure la maintenance. Le développement de la plate-forme de modélisation hydrologique LIQUID a été initié à la suite des travaux menés au LTHE²⁴ dans le cadre du projet européen AgriBMPWater (Best Management Practices) et à la suite de la proposition des concepts du modèle hydrologique POWER (Planner Oriented evaluative Watershed model for Environmental and socio-economic Responses, Haverkamp et al., 2004). L'objectif au départ de l'outil de modélisation hydrologique POWER, comme son acronyme le préjuge, était de disposer d'un outil d'aide à la décision, pouvant servir à aborder la modélisation des ressources en eau tant d'un point de vue de la quantité que de la qualité. Au départ donc, il était question de développer un outil de modélisation orienté vers une utilisation en modélisation hydrologique spatialisée, avec une prise en compte des polluants et des pratiques agricoles (dates et lieu d'épandage de fertilisants ou de pesticides par exemple). Répondre aux questions posées par le projet AgriBMPWater supposait d'être capable de disposer d'une modélisation incluant les transferts d'eau et de solutés, mais prenant aussi en compte l'hétérogénéité des surfaces continentales de manière très détaillée, notamment pour être capable d'identifier les parcelles sur lesquelles il serait le plus efficace de modifier les pratiques agricoles. Le constat a alors été fait qu'il n'existait pas vraiment de modélisation permettant de répondre à ces questions et plus largement aux questions liées à l'impact des modifications anthropiques sur les ressources en eau. Les organismes partenaires du projet, à savoir le LTHE, le Cemagref et Hydrowide, se sont alors orientés progressivement vers une plate-forme de modélisation environnementale où la modélisation hydrologique spatialisée aurait une place importante.

²³ <http://hydrowide.com/index.php>

²⁴ *Laboratoire d'étude des Transferts en Hydrologie et Environnement*

L'objectif de la plate-forme était aussi de capitaliser les connaissances en modélisation hydrologique spatialisée à différentes échelles et d'intégrer les préoccupations qui avaient émergé lors de la réflexion entamée dans le cadre d'AgriBMPWater. On s'est donc dirigé vers une plate-forme modulaire, évolutive et permettant de créer des modèles en couplant divers processus hydrologiques. En effet, les avantages de modularité offerts par une plate-forme ont permis d'augmenter les ambitions du projet, aussi bien pour la représentation du cycle hydrologique dans son ensemble, que pour la modélisation des transferts de polluants au sein des bassins versants. L'exercice devient par conséquent pluri-disciplinaire, et inclut différents laboratoires de recherche, partenaires du Cemagref (l'équipe Hydrologie-Hydraulique, l'équipe de Pollution Diffuse), le LTHE et la société HYDROWIDE. Ces collaborations ont été formalisées et étendues au sein du plateau de modélisation SOMME²⁵ – Synergie Observation Modélisation en Modélisation de l'Environnement- du pôle régional Envirhonalp²⁶, auquel participent aussi des numériciens de l'équipe MOISE²⁷ du LJK-Grenoble²⁸ et des spécialistes de l'hydraulique (CNR, SOGREAH). Enfin, la notion de modularité facilite un développement indépendant de composants spécifiques par différentes équipes. La plate-forme se veut également évolutive, afin de favoriser une mise à jour facile des composants en fonction de l'évolution des connaissances dans les différentes disciplines.

Actuellement, les efforts de développement de la plate-forme de modélisation se poursuivent avec l'intégration de nouvelles fonctionnalités et/ou bibliothèques en fonction des besoins exprimés par les chercheurs. Plusieurs composants (que nous appelons ici modules) sont en cours de développement de manière à offrir plusieurs possibilités de création de modèles dans le domaine de la modélisation hydrologique spatialisée et plus largement dans les différents domaines de la modélisation des systèmes environnementaux. Dans le cadre de ce partenariat, plusieurs travaux de recherche ont permis des avancées significatives du projet. Les travaux de thèse de Varado (2004) et de Condappa (2005) ont permis de juger de la pertinence des concepts, notamment sur le découpage de l'espace, mais se sont appuyés sur des prototypes de modèles qui ont été intégrés par la suite à la plate-forme. La thèse de Branger (2007) constitue le premier

²⁵ <http://envirhonalp.obs.ujf-grenoble.fr/test/index.php?option=content&task=view&id=24>

²⁶ <http://envirhonalp.obs.ujf-grenoble.fr/>

²⁷ <http://www-lmc.imag.fr/MOISE/accueil.fr.php>

²⁸ <http://www-lmc.imag.fr/>

travail entièrement réalisé au sein de la plate-forme de modélisation LIQUID. Elle a permis de montrer l'intérêt des choix logiciels en terme de couplage temporel. Elle a aussi montré que les choix de la plate-forme permettaient aussi des couplages spatiaux de modules décrivant le fonctionnement d'objets différents (parcelles agricoles, parcelles drainées, haies/talus). Le premier prototype ainsi construit a aussi mis en évidence que la difficulté majeure réside bien dans les couplages spatiaux, notamment lorsqu'on travaille avec des géométries complexes et non structurées. Nous revenons plus en détails sur les principes de la plate-forme LIQUID dans ce qui suit.

V.2.2. Concepts utilisés dans le processus de développement de la plate-forme LIQUID

Comme mentionné dans le paragraphe précédent, les notions de pluri-disciplinarité, de modélisation collaborative ou de modularité ont fortement inspiré le développement de la plate-forme LIQUID. La pluri-disciplinarité des compétences a fait émerger la nécessité de mutualiser les développements. Les composants (appelés ici modules) sont développés indépendamment par des équipes différentes issues de laboratoires différents et mis à disposition des autres développeurs à partir d'un environnement de développement collaboratif.

Conformément à ce qui a été dit dans la première partie, le choix de la notion de plate-forme pour supporter la modélisation hydrologique répond à un besoin d'adapter les modélisations hydrologiques aux objectifs ainsi qu'aux données disponibles. La plate-forme LIQUID apporte pour cela la flexibilité nécessaire en permettant une modélisation du paysage sur mesure à partir des modules disponibles. Elle devrait aussi permettre une modélisation multi-échelles (en fonction des objectifs) sur un même territoire (par exemple, utilisation d'une modélisation plus détaillée sur une zone d'intérêt, tout en modélisant l'ensemble du bassin versant par une approche plus simple).

V.2.2.a.) Présentation de l'architecture de la plate-forme

La plate-forme LIQUID est développée avec le langage de programmation orientée objet C++, qui est un langage de programmation performant et multi plates-formes. Elle hérite donc des propriétés de modularité, d'extensibilité et de généricité supportées par la programmation orientée objet. Elle supporte les environnements Windows, Linux et Cygwin. L'architecture de la plate-forme LIQUID peut être divisée en cinq grande parties. Les *bibliothèques externes*, la *bibliothèque de modules* disponibles, la *bibliothèque de modèles* assemblés et déjà utilisables, le *module de gestion du temps* (appelé Scheduler) et une *bibliothèque de documentation*, comprenant à la fois de la documentation pour les développeurs et de la documentation pour les utilisateurs des différents modèles. La Figure (5.8) illustre la structure de la plate-forme LIQUID.

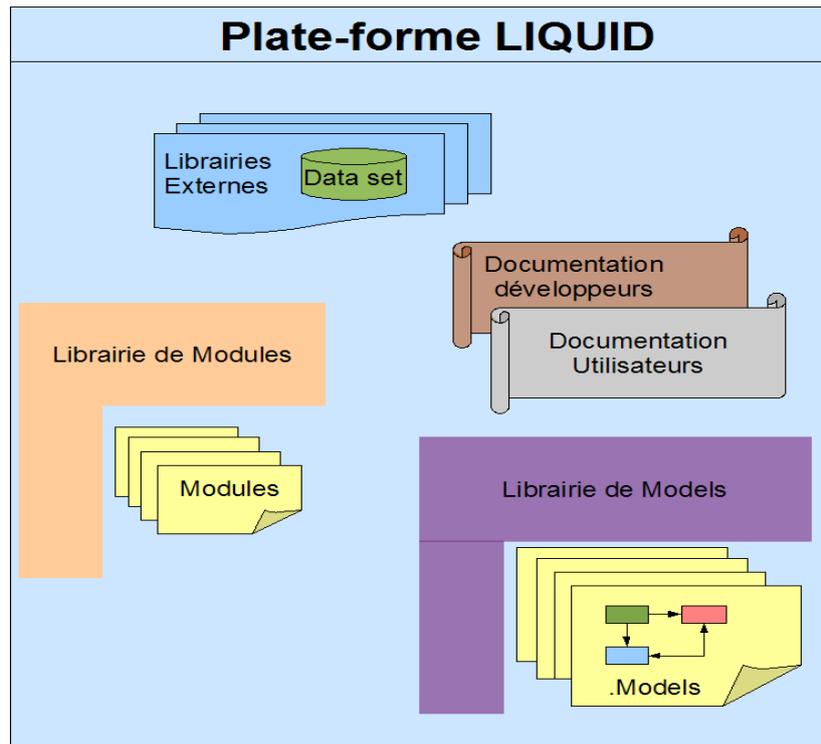


Figure 5. 8 : Illustration des éléments constitutifs de la plate-forme LIQUID²⁹

Les librairies externes comprennent des librairies scientifiques pour la résolution d'équations par des méthodes numériques classiques (exemple : Lapack, BLAS, ITL³⁰, MTL³¹), des librairies pour le traitement de données géométriques (exemple : CGAL³²), des librairies de traitement d'informations géographiques (exemple : GEOS³³), des librairies pour l'établissement de connexions avec des bases de données (exemple : OTL³⁴ etc.) et des librairies spécialisées dans le développement d'applications en C++ (exemple : BOOST³⁵). Cette liste évolue en fonction des besoins.

La librairie de modules (ou composants) regroupe les modules développés et déjà disponibles. Actuellement, on dispose des modules ci-dessous :

- Un module permettant de simuler les écoulements en zones saturées/ non saturées en une dimension (**FRERID**). Ce module résout l'équation de Richards 1D selon la méthode numérique de Ross (2003), validée par Varado et al. (2006). Cette méthode assure une résolution non itérative de ces équations et nécessite une discrétisation moins

²⁹ Source : Inspiré de HYDR(WIDE (2005)

³⁰ <http://osl.iu.edu/research/itl/>

³¹ <http://osl.iu.edu/research/mtl/>

³² <http://www.cgal.org/>

³³ <http://geos.refrations.net/>

³⁴ <http://otl.sourceforge.net/>

³⁵ www.boost.org

fine et est plus performante que les méthodes classiques telles que la méthode de Célia et al. (1990) (Martinez, 2007).

- Un module de simulation monodimensionnel des écoulements dans la rivière (**RIVER1D**). Il est fondé sur l'approche du module de rivière du modèle REW, proposé par Reggiani et Rientjes (2005) et utilisé par Varado (2004). Ce module calcule une équation de bilan de masse par tronçon de réseau hydrographique et les vitesses par une formule de type Manning-Strickler.

- Un module de simulation des écoulements dans la zone saturée en deux dimensions (**BOUSS2D**) et un module de simulation des échanges entre la nappe et la rivière (**GWRI**). Ces deux modules ont été développés au cours de cette thèse et détaillés dans les chapitres qui suivent.

- Pour la simulation de l'évapotranspiration et de ses composantes (évaporation du sol, interception, transpiration), on dispose d'une méthode simplifiée proposée par Varado et al. (2006) utilisant en entrée l'évapotranspiration potentielle (ETP). Différents modules ont été construits pour représenter les différents processus mis en jeu : un module de partition de l'évapotranspiration potentielle entre l'évaporation du sol, l'interception et la transpiration (**ETPART**), un module d'interception de la pluie par la végétation (**VEGINT**), un module d'extraction racinaire (**ROLI**) selon l'approche de Li et al. (2001) et un module de rotation des cultures (**CRLINPG**).

- En vue du couplage avec les modèles atmosphériques, un module de bilan d'énergie à deux couches (sol et végétation) est en cours de développement (**TSEB**) ainsi qu'un autre module d'extraction racinaire (**ROSISPAT**) qui reprend l'approche utilisée dans le modèle SiSPAT (Braud et al., 1995).

- Plusieurs modules, permettant de représenter l'influence de discontinuités hydrologiques sont aussi disponibles. Pour les parcelles drainées, trois modules décrivent respectivement, les transferts dans la zone saturée (**SIDRA**), le ruissellement de surface (**SIRUP**) et les transferts de pesticides (**SILASOL**) (Branger et al., 2006, 2007). Enfin, un module (**HEDGE**) simule l'impact des processus de transferts verticaux dans le sol en présence d'une haie arborée.

La librairie de modèles regroupe les modèles développés pour répondre à des objectifs précis. Ces modèles peuvent être utilisés pour résoudre des problèmes similaires à ceux pour lesquels ils ont été développés.

- Le premier modèle réellement intégré, développé avec la plate-forme, est le modèle **BVFT**, développé dans le cadre de la thèse de Branger (2007), pour le bassin versant de la Fontaine du Theil. Ce modèle intègre les modules **FRER1D**, **SILASOL**, **SIDRA**, **SIRUP**, **HEDGE** et un module d'interface spécialement conçu pour le calcul des flux latéraux dans la zone saturée (**WTI**). Une fois que le module de transfert dans la rivière **RIVER1D** y aura été ajouté, on disposera d'un outil visant à apporter des réponses à la question de l'influence des aménagements hydro-agricoles sur les transferts d'eau, puis à terme des produits phyto-sanitaires (Branger, 2007).

- Un modèle de bilan hydrique vertical, pouvant être déployé sur un ensemble de colonnes de sol est aussi disponible. Il intègre les modules **FRER1D**, **ETPART**, **VEGINT**, **ROLI**, et **CRLINPG** (ou **FRER1D** seul si on simule uniquement du sol nu). Il a été utilisé pour simuler les bilans hydriques sur le bassin versant de la Donga au Bénin dans le cadre du projet AMMA et pour étudier les mécanismes de génération du ruissellement sur la région Cévennes-Vivarais en fonction des caractéristiques (profondeur, propriétés hydrodynamiques) des sols (Manus, 2007 ; Braud et al., 2007).

- Dans le cadre de cette thèse, un modèle hydrologique distribué simplifié a été créé en vue d'illustrer la démarche de modélisation proposée dans la première partie de ce document. Il intègre un module de simulation des transferts verticaux dans la zone non-saturée (**FRER1D**), un module de simulation des écoulements horizontaux dans la zone saturée du sol (**BOUSS2D**), un module de simulation des écoulements dans la rivière (**RIVER1D**) et un module de simulation des échanges nappe-rivière (**GWRI**). On prévoit d'y adjoindre, comme pour le modèle précédent, les modules de simulation de l'évapotranspiration. Plus de détails seront donnés sur ce modèle dans la troisième partie.

V.2.2.b.) Présentation de la structure des modules au sein de LIQUID

Les modules, dans le contexte de LIQUID, désignent des composants indépendants permettant de simuler des processus hydrologiques, et développés dans le but de capitaliser les efforts de développement de codes de simulation de ces processus hydrologiques. Les différents processus hydrologiques (exemple : infiltration, ruissellement, transpiration, transfert de polluants, etc.) pourront être, à terme, représentés au sein de différents composants par différentes méthodes, à des échelles spatio-temporelles adaptées. Chaque module est applicable à des objets géographiques ayant une résolution spatiale et une résolution temporelle spécifiques. Les objets géographiques et le maillage sur lesquels s'applique le module sont construits au sein du module, lors de la phase de pré-traitement (voir plus loin). Par ailleurs, chaque module gère lui-même son pas de temps en fonction de sa propre dynamique et de ses variables d'état. Un module est composé de trois éléments principaux: un solveur, un pré-processeur et un schéma de base de données.

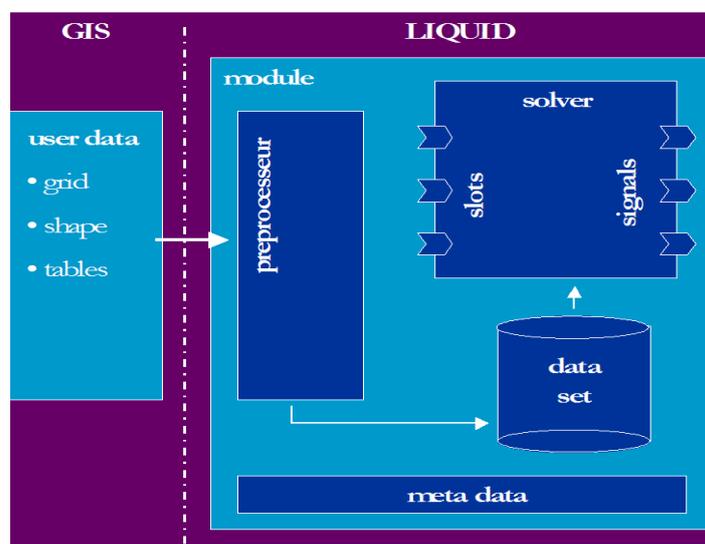


Figure 5. 9 : Illustration de la composition d'un module au sein de LIQUID³⁶

La Figure (5.9) illustre la composition d'un module au sein de la plate-forme LIQUID. Les éléments tels que le *solveur* et le *pré-processeur*, présents dans tous les modules, ont des rôles centraux dans le fonctionnement des modules.

³⁶ Source : HYDROWIDE (2005)

Le solveur constitue la partie centrale du module. C'est lui qui se charge de réaliser les calculs nécessaires au fonctionnement des modules (évaluation des variables d'état, résolution des équations, etc.). Il est créé avec un schéma conceptuel d'objets et de traitements précis. Le solveur est également doté d'un mécanisme de réponse aux sollicitations externes (**slots**) et d'un mécanisme d'émission de données vers d'autres modules (**signaux**). C'est donc le solveur qui réagit aux sollicitations extérieures venant d'autres modules. Il est donc le cœur du mécanisme permettant aux modules de se prêter à la modélisation dite 'comportementale' (Viallet et al., 2006).

Le schéma de données décrit la structure des informations (tabulaires et géographiques) que l'utilisateur devra fournir pour initialiser le solveur. Le Système de Gestion de Bases de Données *PostgreSQL*³⁷ et son extension spatiale *PostGIS*³⁸ sont adoptés pour le stockage et la manipulation des données. Des détails sur les aspects de gestion de l'information, spatiale ou non, seront présentés dans la section suivante.

Le pré-processeur se situe un peu entre les deux éléments ci-dessus. Il permet d'accéder aux données stockées dans la base de données (ou du SIG) grâce à une librairie d'accès aux données, d'effectuer les traitements nécessaires pour renseigner le schéma de données du solveur. C'est lui qui crée les instances du solveur et qui les initialise.

V.2.2.c.) Présentation de la méthode de gestion du temps au sein de la plate-forme

Le **scheduler** est une partie de l'architecture de la plate-forme LIQUID dédiée à la gestion de la dynamique temporelle des modèles. Il gère l'évolution temporelle du modèle par l'intermédiaire d'un mécanisme de type 'Timer'. Il est conçu comme une sorte d'agenda où chaque module vient insérer des actions différées à exécuter. Il faut rappeler que chaque module gère son propre pas de temps. A chaque exécution, chaque module prévoit la date de sa prochaine exécution en fonction de son état présent et des valeurs courantes des différents forçages. Si ces derniers changent avant la date prévue pour le prochain calcul, l'action programmée peut être annulée dans le scheduler et reprogrammée en tenant compte du nouveau forçage : c'est le mécanisme des

³⁷ <http://www.postgresql.org/>

³⁸ <http://postgis.refractory.net/>

interruptions. On peut avoir par exemple une interruption du module de transfert dans la zone non saturée par une modification de la pluie et ré-exécution immédiate. Notons que certains modules peuvent ne pas avoir de pas de temps propres, mais être complètement pilotés par les réactions aux sollicitations extérieures (par exemple, les modules **ETPART** ou **ROLI** qui ne se recalculent que lorsque leurs variables de forçage changent). A la date prévue par chaque module ou à chaque interruption, le scheduler active le solveur en exécutant son principal module de calcul intégré au sein d'une fonction *OnTimer*. Le scheduler coordonne ainsi l'ensemble des modules et leur ordre d'exécution grâce aux dates d'activation de chaque module et aux interruptions. La Figure (5.10) illustre le fonctionnement en *Timer* du scheduler. Le temps est représenté en date absolue du calendrier grégorien avec une prise en compte des années bissextiles. La représentation du temps est alors stable avec une précision constante de l'ordre de la nanoseconde sans perte de précisions lorsqu'on avance dans la simulation (Viallet et al., 2006).

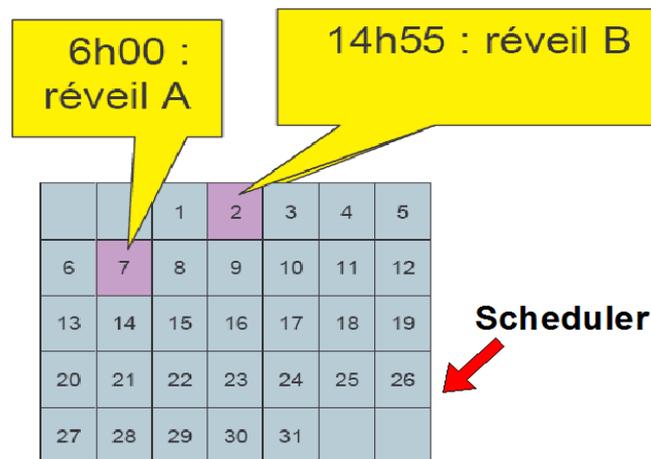


Figure 5. 10 : Fonctionnement du scheduler ³⁹: Chaque module (A et B) y place à chaque exécution l'heure de sa prochaine exécution.

Pour le couplage de modèles, cette gestion de la dynamique du système comporte entre autres avantages, celui d'éviter qu'un module impose aux autres modules sa dynamique. C'est ce qui permet d'éviter les interpolations temporelles entre modules et permet aussi de respecter la dynamique de chaque processus modélisé. Le principal inconvénient de cette approche est que certaines méthodes numériques comportent des risques d'instabilité avec le mécanisme des interruptions et l'utilisation de pas de temps variables.

³⁹ Source HYDROWIDE (2005)

Dans ce mécanisme où des piles d'appels sont gérées par un module indépendant, l'utilisateur a un contrôle effectif des schémas temporels de chaque module.

V.2.2.d.) La notion de modèle au sein de la plate forme et la gestion des connexions entre modules.

Comme nous l'avons expliqué plus haut, chaque module est doté de mécanismes de communication avec d'autres modules. La création d'un modèle dans la plate-forme LIQUID consiste à assembler différents modules, à définir les variables échangées et les mécanismes de réponse d'un module aux sollicitations des autres, etc.. La plate-forme LIQUID est basée sur la notion de modélisation comportementale (pushed-based), c'est-à-dire que le module réagit lui-même aux sollicitations extérieures en adaptant son comportement à cette sollicitation et met à disposition des autres modules ses variables internes à son propre rythme. Ce mécanisme est aussi retenu dans la plate-forme DIAS (Christiansen, 2000). En revanche, c'est un mécanisme inverse qui est utilisé dans la plupart des autres plates-formes comme OpenMI (pulled-based ou GetValue). Dans ce cas, un module provoque l'exécution des autres par une demande d'information (GetValue) et attend d'avoir obtenu cette information pour s'exécuter (exemple, Moore et al., 2005). Grâce aux mécanismes d'émission de signaux et d'activation de fonctions réceptrices (Slot), les modules peuvent adapter leurs réactions en fonction de la valeur du forçage : ces réactions peuvent être de type conditionnel : ré-exécution immédiate si la valeur change plus qu'un seuil préfixé, stockage de la valeur pour une utilisation future, etc. Nous verrons des exemples plus détaillés d'utilisation de ce mécanisme dans la troisième partie de ce mémoire. La conception d'un modèle nécessite alors la définition de deux vues complémentaires : une vue qui décrit la connexion statique entre les modules à coupler (exemple : Fig. 5.11) et une seconde vue dynamique décrivant l'enchaînement temporel des échanges entre modules (exemple : Fig. 5.12) et les réactions des différents modules aux sollicitations des autres modules.

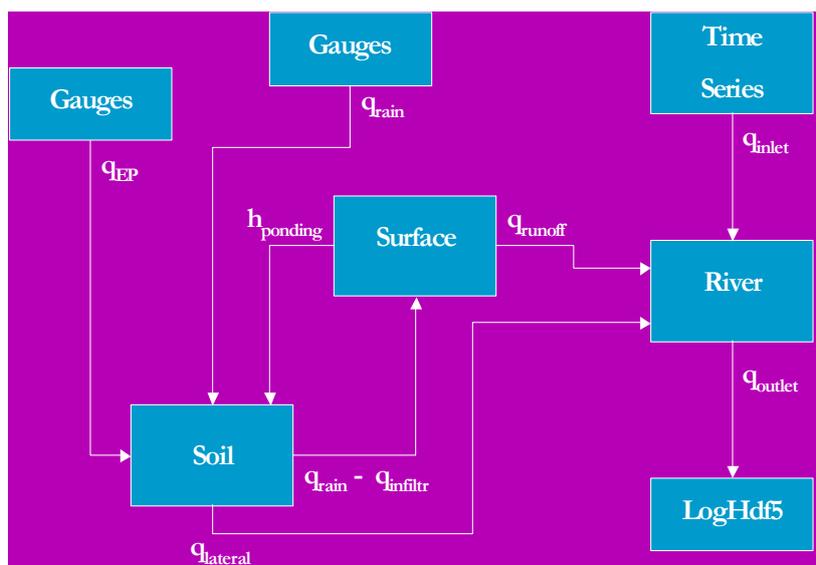


Figure 5. 11 : Illustration d'une description statique d'un modèle avec des modules connectés entre eux.

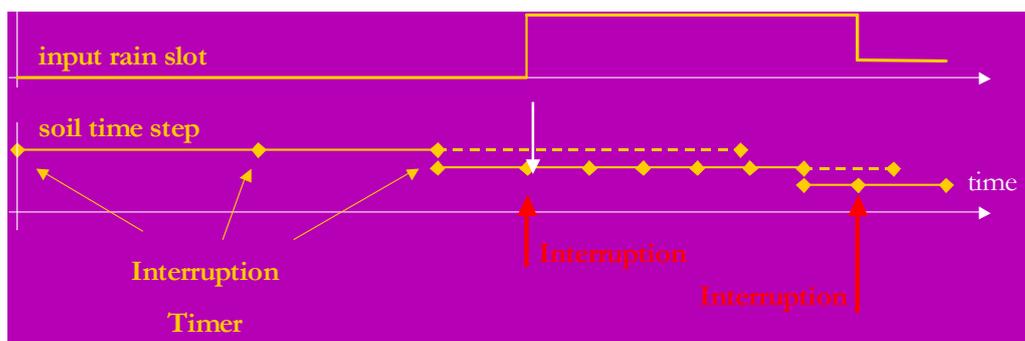


Figure 5. 12 : Description d'une vue dynamique d'un modèle avec les échanges dans le temps entre modules. Ici, le module input (Gauges) provoque une interruption du module sol (Soil) lorsque son état change.

V.2.2.e.) Gestion des données au sein de la plate-forme LIQUID

Comme nous l'annonçons dans la présentation de la structure des modules, la plate-forme LIQUID est capable de communiquer avec des sources de données diverses. Dans l'implémentation actuelle de la plate-forme, des connexions avec des bases de données PostgreSQL/PostGIS sont possibles grâce à l'utilisation de connexions ODBC (Object Data Base Connection).

Les différents modules ont chacun leur propre schéma de données, ce qui garantit une certaine autonomie des modules, requise pour respecter les contraintes d'interopérabilité des modules. Dans le cadre d'assemblages de différents modules et donc pour la création d'un modèle, le schéma de données que l'utilisateur est amené à renseigner regroupe

théoriquement l'ensemble des schémas de données des différents modules. Il peut en résulter des duplications de données, car certains modules peuvent avoir besoin d'informations identiques. Il y a aussi des risques d'incohérence entre données de même type, utilisées par des modules différents. Pour éviter des duplications de données et des risques d'incohérence entre données renseignées de manière indépendante, la création d'un modèle comporte aussi une phase d'harmonisation des données et une simplification des données à renseigner par l'utilisateur. Ces dernières sont regroupées dans des tables utilisateurs. Un programme en C++ permet de les récupérer et de les affecter aux différents modules constituant le modèle. Cette étape peut impliquer des traitements géographiques (intersection de géométries par exemple) assez complexes, qui sont effectués via des requêtes SQL sur les tables de données utilisateur. C'est aussi via ce programme que ce fait l'initialisation et la création des différents solveurs intervenant dans le modèle final. Toutes ces manipulations sont transparentes pour l'utilisateur qui doit uniquement renseigner les tables utilisateurs.

Néanmoins, même si tout est fait pour simplifier cette étape, la gestion des données d'entrée des modèles hydrologiques spatialisés n'est pas toujours aisée. Il s'agit souvent d'une tâche assez fastidieuse et prenant beaucoup de temps. Ceci est principalement dû au fait que les données proviennent de sources différentes et sont disponibles sous des formats différents. Dans le cadre de cette thèse, l'initiative a été prise de créer un Système d'Information Géographique (SIG) dédié à la gestion des informations nécessaires à la modélisation spatialisée des bassins versants. Ce SIG a été doté de fonctionnalités facilitant le remplissage des tables utilisateurs nécessaires à la modélisation hydrologique. Il a été également doté de fonctionnalités permettant d'extraire les informations nécessaires aux différents solveurs de la plate-forme LIQUID. Le paragraphe suivant aborde de façon détaillée la problématique de la gestion des données pour la modélisation hydrologique spatialisée ainsi que la solution SIG proposée dans le cadre de cette thèse.

V.3. Gestion intégrée des informations : construction d'un SIG rassemblant les informations disponibles

V.3.1. Les enjeux d'une gestion intégrée des données pour la modélisation hydrologique spatialisée

V.3.1.a.) Diversité des données en modélisation hydrologique spatialisée, dans le contexte français.

En modélisation hydrologique spatialisée, la mise en forme et la préparation des données est une étape importante. Les données sont caractérisées par leur très grande diversité, en raison de la complexité des bassins versants et des processus hydrologiques. On distingue globalement trois catégories de données utilisées pour la modélisation hydrologique : les données hydrologiques, les données météorologiques et les données sur le milieu physique à modéliser.

Les données hydrologiques sont souvent utilisées pour le calage et la vérification/validation des modèles. Elles peuvent aussi, dans certains cas, être utilisées pour initialiser des variables d'état des modèles hydrologiques. Les données hydrologiques regroupent les données sur les débits et les hauteurs d'eau dans les rivières, les mesures de piézométrie, les mesures de teneur en eau dans les sols, les mesures d'évapotranspiration, etc.. Elles sont fournies en France, par différents acteurs, essentiellement les services de l'Etat, les DIREN (Directions Régionales de l'ENvironnement), les services de prévision des crues, les Directions Départementales de l'Agriculture, les Agences de l'Eau etc. Elles peuvent être également produites par des organismes de recherche (Ex Cemagref, le LTHE, ou les universités) dans le cadre d'études ou dans le cadre de mise en place d'observatoires (exemple, Observatoire OHM-CV⁴⁰, le Programme AMMA⁴¹, etc.). Certaines sociétés comme l'EDF (Electricité de France) produisent également des données hydrométriques

⁴⁰ <http://www.lthe.hmg.inpg.fr/OHM-CV/index.php>

⁴¹ <http://amma.mediasfrance.org/data/>

dans le cadre de leurs activités. Au niveau international, des organismes tels que la FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations) et l'UNESCO (United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization) produisent des données hydrométriques sur différents pays. Ces données incluent parfois des données issues de réseaux entretenus par des organismes nationaux de ces différents pays. En France, la banque de données HYDRO (<http://www.hydro.eaufrance.fr/>) est une banque de données hydrométriques qui comporte un réseau de près de 3500 stations de mesures (quantitatives et qualitatives) gérées par différents organismes dans toute la France. Elle fournit des données sur les débits, les hauteurs d'eau, et est gérée par le Service Central d'Hydrométéorologie et d'Appui à la Prévision des Inondations (SCHAPI, service du Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable). La banque ADES (<http://www.ades.eaufrance.fr/>) est une banque de données qui rassemble des données quantitatives et qualitatives relatives aux eaux souterraines (piézométrie, mesure de qualité etc.). Elle regroupe des informations provenant des institutions (Figure 5.13) telles que les Agences de l'Eau, les DIREN, les Directions Régionales de l'Industrie et de la recherche (et industriels dans le cadre du suivi des Installations Classées et Sites Pollués); les DDASS : les données de la base SISE-EAUX, du ministère chargé de la Santé, base alimentée par le contrôle sanitaire, concernant les eaux souterraines captées pour la production d'eau potable (données uniquement sur les eaux brutes), les collectivités territoriales (conseils généraux, régionaux, syndicats de gestion d'aquifères, communes, communautés de communes, parcs naturels). ADES est produit par le Système d'Information sur l'Eau (SIE) qui a été conçu pour répondre aux besoins spécifiques des acteurs qui sont partie prenante en matière d'information environnementale publique dans le domaine de l'eau. Un portail d'accès aux sites internet fournisseurs des données sur l'eau a été conçu dans le cadre du SIE : <http://www.eaufrance.fr/>.

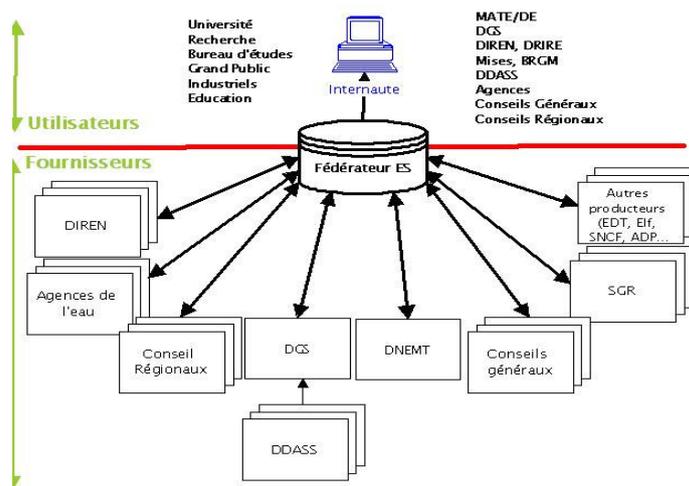


Figure 5. 13 : Organisation de la banque ADES⁴²

Les données météorologiques servent souvent de données de forçage climatique aux modèles hydrologiques. Elles regroupent les données de pluie, de température et d'humidité de l'air, de rayonnement, etc., mais aussi les données dérivées telles que les données d'évapotranspiration potentielle, etc.. En France, Météo-France est la principale institution productrice des données météorologiques (<http://www.meteofrance.com/>).

Les données sur le milieu physique sont nécessaires pour représenter 'numériquement' le système hydrologique à modéliser. Elles varient énormément en fonction des processus hydrologiques à modéliser, de leur complexité et de la finesse souhaitée pour la représentation des processus. Les données habituellement utilisées sont les données topographiques ou les données qui en dérivent, les données sur l'occupation des sols, les données sur les types de sols et les paramètres hydrodynamiques associés. On utilise également les données géométriques sur le réseau hydrographique et la morphologie des rivières. Les données hydrogéologiques sont de plus en plus intégrées dans la modélisation hydrologique pour prendre en compte les écoulements souterrains dans le cycle de l'eau.

Les données topographiques sont issues aussi bien de technologies récentes comme les mesures satellitales que de mesures in-situ par des levés topographiques. A l'échelle des bassins versants, les données topographiques sont souvent disponibles sous la forme de

⁴² source : <http://www.ades.eaufrance.fr/>

grilles régulières (MNT) ou de réseaux de triangles irréguliers (TIN). En France, l'Institut Géographique National (IGN) est la principale structure productrice de ces données à grande échelle (<http://www.ign.fr/>). Au niveau local, des relevés spécifiques existent dans le cadre de diverses études. Les données topographiques servent souvent à dériver d'autres informations qui sont utilisées en hydrologie spatialisée. C'est l'exemple de la pente, de l'indice topographique ou même du réseau hydrographique lorsque cette information n'existe pas par ailleurs.

Les données sur l'occupation des sols sont également très importantes en modélisation hydrologique spatialisée. Avec les techniques de la télédétection, elles sont de plus en plus disponibles à de très hautes résolutions. Les données sur l'occupation des sols sont souvent utilisées directement au sein des modèles hydrologiques, pour représenter l'hétérogénéité de surface ou pour dériver d'autres informations telles que l'indice foliaire dans les zones boisées, l'albédo du sol, etc. La base de données Corine Land Cover est une base de données qui représente l'occupation du sol au niveau européen. En France, l'Institut Français de l'ENVironnement (IFEN) est chargé d'en assurer la production, la maintenance et la diffusion (<http://www.ifen.fr/accueil.html>). Au niveau mondial, la FAO propose également des bases de données sur l'occupation des sols dans plusieurs pays. Pour compléter ces informations sur l'occupation des sols par des informations plus quantitatives, sur l'évolution de la végétation par exemple, on peut mentionner la base de données ECOCLIMAP⁴³ proposée par Météo-France, qui fournit, sur des grilles de 1x1 km², des évolutions inter-annuelles mensuelles d'indices foliaires ou de taux de couverture végétale. Enfin, on peut aussi citer l'initiative POSTEL⁴⁴, visant à mettre à disposition des communautés travaillant sur les surfaces continentales, un ensemble de produits dérivés de l'imagerie satellitale (indices foliaires, NDVI, taux de couverture par la végétation, rayonnements de courtes et grandes longueurs d'onde, albédo, température de surface, mais aussi précipitation, évapotranspiration, humidité des sols, hauteurs d'eau des principaux lacs ou cours d'eau).

Les données sur les sols peuvent être regroupées en deux catégories. Les données mesurées et les données dérivées de ces données mesurées qui sont produites par des

⁴³ http://www.cnrm.meteo.fr/gmme/PROJETS/ECOCLIMAP/page_ecoclimap.htm

⁴⁴ <http://postel.mediasfrance.org/fr/POSTEL/>

pédologues. Les données mesurées sont ponctuelles et décrivent souvent des profils de sol d'un point de vue granulométrique, porosité, densité, épaisseur des différents horizons, etc. Ces données sont utilisées ultérieurement pour dériver les informations sur les propriétés hydrodynamiques des sols, nécessaires à la modélisation hydrologique. On utilise en général des fonctions dites de pédo-transfert, qui sont dérivées de relations statistiques entre les caractéristiques du sol aisément disponibles (texture et éventuellement porosité) et paramètres décrivant les propriétés hydrodynamiques des sols (exemple, Clapp and Hornberger, 1978 ; Cosby et al., 1984, Rawls et Brackensieck, 1985). En raison de la validité ponctuelle des données mesurées sur les sols, elles sont rarement utilisées telles quelles en modélisation hydrologique où des informations spatialisées sur l'ensemble du bassin versant sont requises. La spatialisation des sols est entièrement réalisée par les pédologues qui produisent des cartes de types de sol. L'association des paramètres hydrodynamiques aux unités cartographiques est souvent réalisée en collaboration avec des pédologues ou des physiciens du sol. L'INRA (Institut National de la Recherche Agronomique) est la principale structure productrice de ces données en France (<http://www.inra.fr/>), grâce à son unité InfoSol. Cette structure pilote des programmes de gestion de base de données sur les sols. On peut citer entre autre les bases de données BDAT (Bases de Données Analyse des Terres)⁴⁵ et DONESOL (Base de données nationales des informations spatiales pédologiques)⁴⁶.

V.3.1.b.) Gestion des données en modélisation hydrologique spatialisée

Comme nous l'avons vu dans le paragraphe précédent, les données requises pour la modélisation hydrologique proviennent de sources très variées et sont produites par des structures dont les thématiques ne sont pas toujours très proches. Cette réalité a pour conséquence la manipulation délicate d'un grand nombre de données disponibles sous une multitude de formats et de structures.

La manipulation de ces données peut devenir très lourde et compliquée dans le cadre d'une modélisation hydrologique spatialisée. Elle nécessite parfois, pour certains modèles, un effort supplémentaire de programmation. Les utilisateurs sont souvent amenés à écrire

⁴⁵ <http://bdat.oreans.inra.fr/>

⁴⁶ <http://nmm.gissol.fr/outil/donesol/donesol.php>

des programmes spécifiques pour la lecture et l'extraction des données dont ils ont besoin. Ceci nécessite une très bonne connaissance de la localisation et de la structure physique des enregistrements et des modes d'accès à l'ensemble des fichiers. De plus, le fait que les données d'entrée puissent être de structures différentes amène à écrire plusieurs programmes pour créer les données nécessaires à l'utilisation de ces modèles. Dans le cas contraire, l'utilisateur est confronté à une manipulation manuelle des données dont il dispose pour répondre aux besoins de son modèle. Ceci est non seulement très gourmand en temps, mais aussi comporte des risques évidents d'erreurs.

Malgré la récurrence de ces problèmes liés à la gestion de l'information (spatiale et tabulaire) pour la modélisation hydrologique et l'apparition de méthodes de gestion de données de plus en plus performantes, il n'existe pas d'initiatives claires pour palier ce problème. Dans la plupart des modèles hydrologiques spatialisés, il existe des schémas de données propres à respecter ou des fichiers à formater d'une façon précise. Il s'agit souvent de structurer un système de fichiers d'une manière unique ou de renseigner un Système d'Information Géographique spécialement dédié. Ceci provoque sans surprise une perte de temps considérable dans les tâches de préparation de données mais aussi dans l'exploitation des résultats. Les seules initiatives qui se rapprochent de nos besoins sont les observatoires, où des données mesurées, issues de plusieurs champs disciplinaires sont regroupées dans une structure de données cohérente et intégrée. On peut citer l'exemple de la base de données AMMA où des informations sur la météorologie, la végétation, les sols et les données hydrologiques, sont intégrées au sein d'une même base de données (voir <http://amma.mediasfrance.org/data/>).

V.3.2. L'apport des SGBDR⁴⁷ et des SIG⁴⁸ dans la gestion et la structuration des données.

L'apparition des bases de données relationnelles dans les années 80, créées par CODD (1970), a changé fondamentalement l'approche de gestion des données dans plusieurs domaines. Elles offrent la possibilité de structurer les informations à travers des schémas

⁴⁷ *Systèmes de Gestion de Base de Données Relationnelles*

⁴⁸ *Systèmes d'Information Géographiques*

conceptuels (MCD) et des langages de manipulation des données standardisés (SQL, QEUL, etc.).

Les bases de données relationnelles permettent de décrire les données, ainsi que les liens entre elles, sans se soucier de la manière dont les données vont être gérées à l'intérieur des fichiers (on parle d'image logique ou de description conceptuelle des données). L'image conceptuelle est représentée par une table ou une relation. Les bases de données apportent une grande efficacité d'accès aux données, une centralisation et une grande cohérence des données. Elles favorisent une très grande structuration des données dont l'accès est géré par une batterie d'opérateurs d'algèbre relationnelle. L'algèbre relationnelle permet par exemple de sélectionner certains enregistrements d'une relation (ou table) satisfaisant une condition ou encore de regrouper des enregistrements de tables différentes. Etant donné que le modèle relationnel est basé sur la théorie des ensembles, l'algèbre relationnelle utilise les opérateurs classiques de manipulation des ensembles (union, intersection, différence et produit cartésien) et introduit des opérateurs propres aux bases de données (sélection, projection, jointure, division).

L'apparition des Systèmes d'Information Géographique et leur couplage avec les bases de données a ouvert une opportunité pour la gestion et la manipulation des données (spatiales et tabulaires) dans différents domaines. Différentes structures travaillent de plus en plus à une harmonisation des méta-données afin de favoriser l'échange de données, aussi bien en interne qu'avec l'extérieur. Dans cet esprit, le Ministère de l'Agriculture, par l'intermédiaire de l'Organisme International de l'Eau (OIEau⁴⁹), anime la standardisation des données sur l'eau. Le Service d'Administration Nationale des Données et Référentiels sur l'Eau (SANDRE⁵⁰) élabore le langage commun des données sur l'eau. À ce titre, il est chargé au sein du Système d'Information sur l'Eau (SIE) d'établir la normalisation des données afin de rendre compatible et homogène la définition et l'échange des données entre les producteurs, les utilisateurs et les banques de données. Cette initiative a vu le jour suite au constat selon lequel les données sur l'eau sont collectées par plusieurs organismes qui utilisent chacun leur propre schéma de données. Elle vise donc à faciliter l'échange des informations entre les acteurs de l'eau. Ce système a donné naissance à un

⁴⁹ <http://www.oieau.fr/>

⁵⁰ <http://sandre.eaufrance.fr/>

grand nombre de référentiels communs dont les principaux sont : le référentiel géographique des rivières (BDCarthage) et le référentiel des eaux souterraines (BDRHF). Ces référentiels sont basés sur des schémas de données relationnels. La Figure (5.14) présente le schéma logique de données du référentiel BDCarthage. La Figure (5.15) présente le schéma conceptuel de données du référentiel BDRHF.

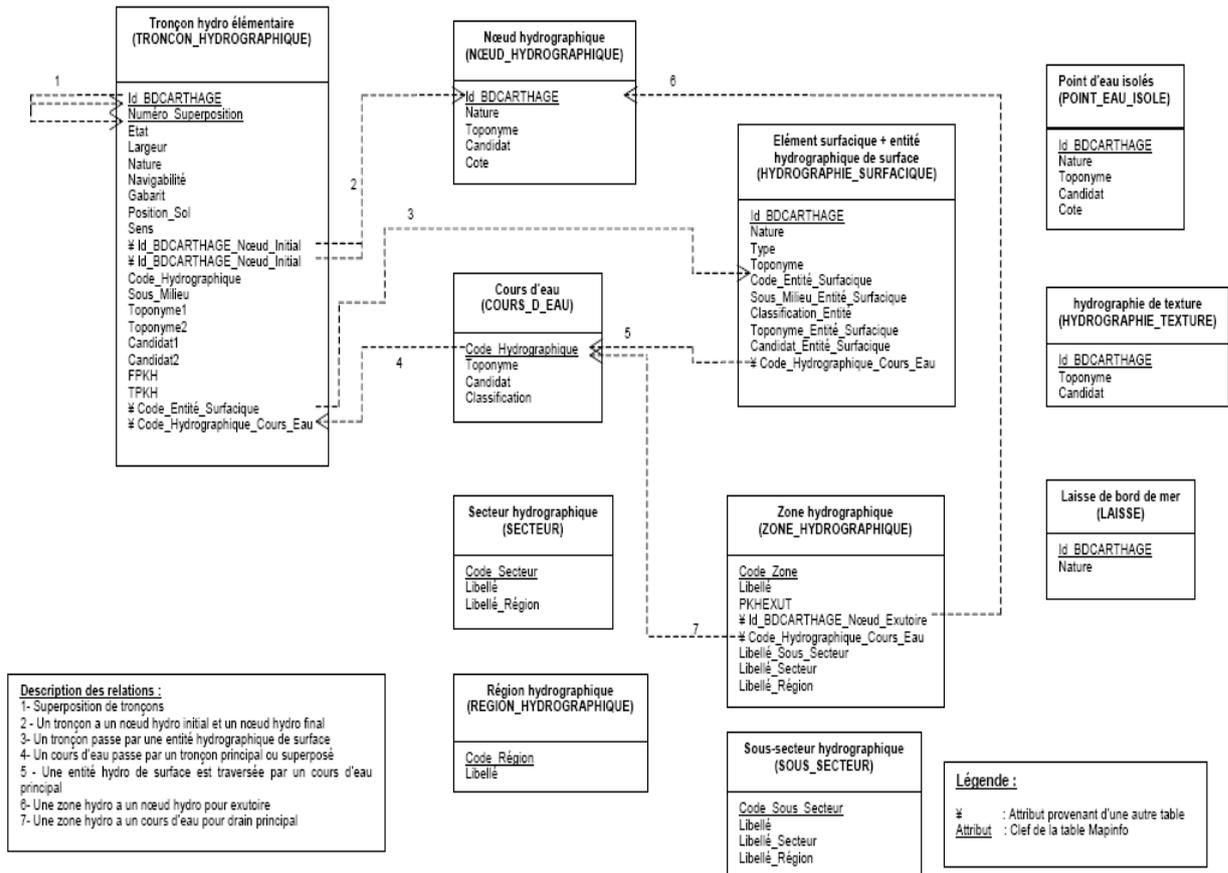


Figure 5. 14 : Schéma logique de données de BDCarthage¹¹.

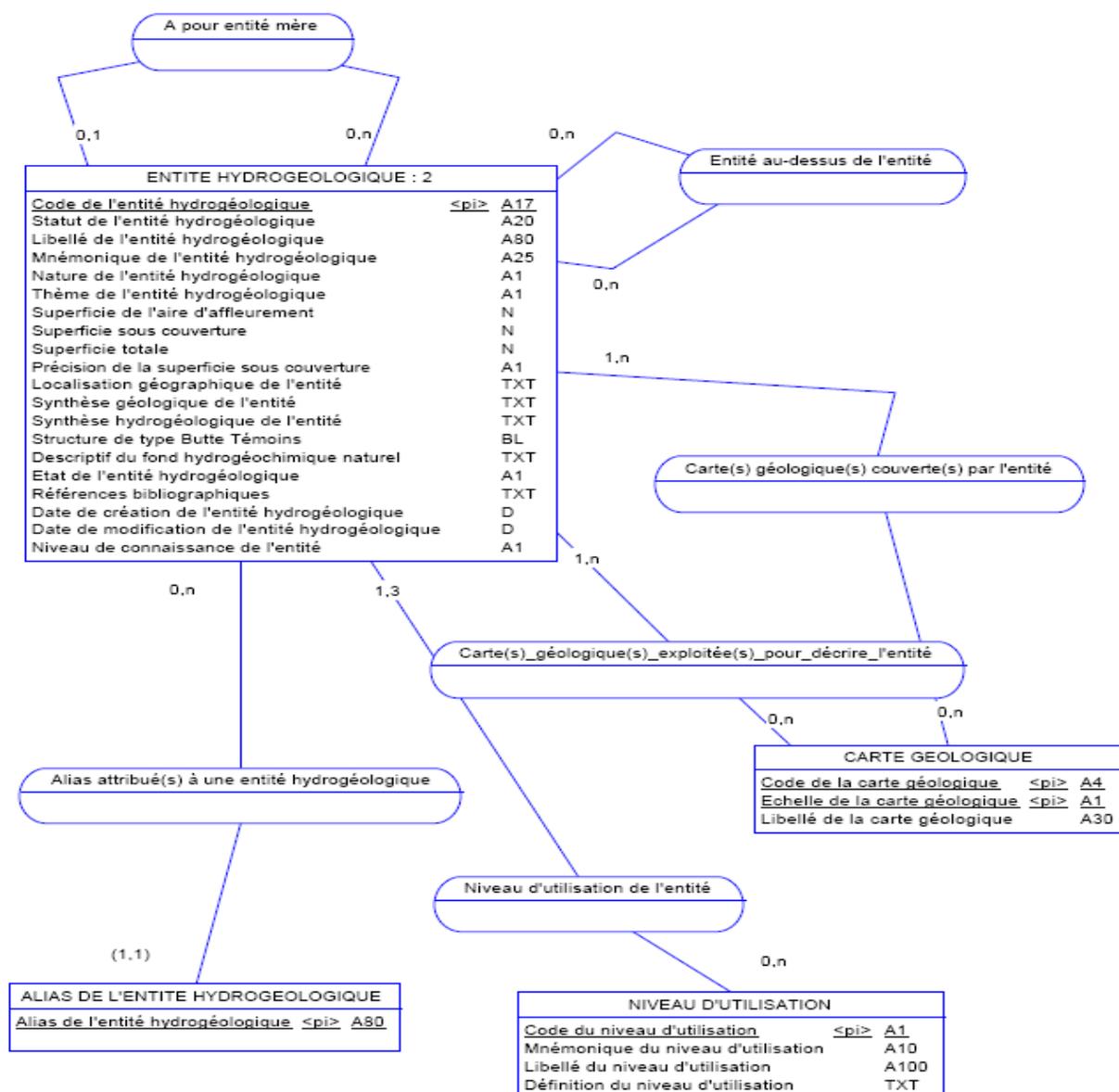


Figure 5. 15: Exemple d'un schéma conceptuel du référentiel des entités hydrogéologiques (BDRHF)⁵¹.

En dehors des données sur l'eau, ce type d'initiative existe également au niveau de l'information sur les sols. Le programme de base de données sur les sols DONESOL s'appuie également sur un schéma de données harmonisé pour la création de bases de données à des échelles régionales. La Figure (5.16) présente le schéma de données global des bases DONESOL.

⁵¹ Source : <http://sandre.eaufrance.fr/>

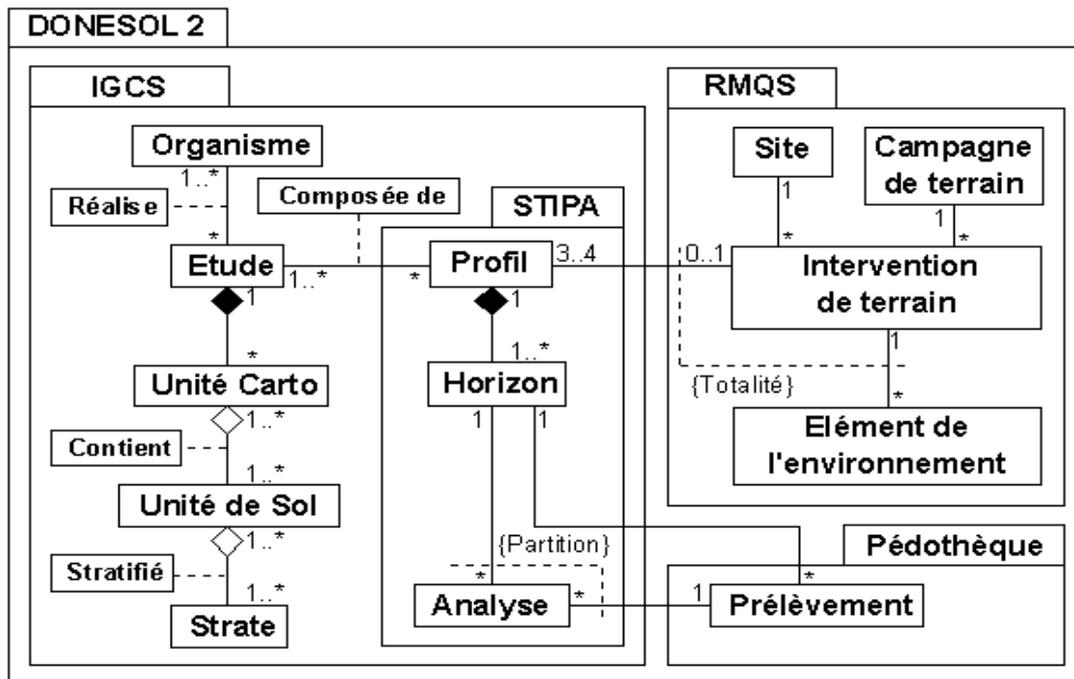


Diagramme de classes UML du système d'information INRA - DONESOL 2 [GROLLEAU, 2003]

Figure 5. 16 : Schéma conceptuel de données de DONESOL.

Dans le cadre de cette thèse, nous avons initié l'élaboration d'une base de données relationnelle intégrant l'information spatiale pour la modélisation hydrologique spatialisée. Ce travail a été réalisé dans le cadre d'un stage de master que j'ai encadré (Hassani, 2006). Dans le paragraphe suivant nous présenterons cette base de données.

V.4. Conception d'un SIG pour la gestion intégrée des données pour la modélisation hydrologique spatialisée.

Comme annoncé dans le paragraphe précédent, la motivation de la construction d'un système d'information dédié à la modélisation hydrologique spatialisée, est liée au besoin de gagner du temps dans la préparation et la mise en forme des données. Le système d'information permettra d'offrir une grande facilité pour la manipulation des données, et réduira donc considérablement le temps qui sera consacré à cette partie au cours des modélisations hydrologiques. Il s'agira de proposer une sorte de schéma de base de données générique et extensible, utilisable pour préparer de manière automatique les données d'entrée dans les modèles hydrologiques spatialisés.

Le système d'information conçu dans le cadre du stage de Hassani (2006) s'est basé sur les schémas de données existants au sein de différents organismes et est donc compatible avec les données provenant de ces institutions. Il a été développé avec le SGBD (Système de Gestion des Bases de Données) PostgreSQL. Ce SGBD a été utilisé en premier lieu parcequ'il est une solution libre (pas de problème de droits) ne nécessitant donc aucune licence. Il est doté d'un module d'administration « PgAdmin » interactif relativement facile à prendre en main. Il possède par ailleurs une extension permettant de gérer l'information spatiale : POSTGIS. Il apporte pour ces raisons, un grand avantage par rapport aux autres SGBDR (MySQL, Oracle, MSQ...) que nous aurions pu utiliser. C'est cette extension « PostGIS » qui lui confère le caractère d'une géoDatabase. Par ailleurs, PostgreSQL est le SGBDR utilisé actuellement pour alimenter les modules de la plate-forme LIQUID que nous utilisons.

V.4.1. Présentation du schéma de données conçu pour la base de données du système d'information.

Les schémas de données dont nous nous sommes inspirés pour concevoir le système d'information sont les suivants : la base de données DONESOL (pour les informations sur les sols), la base de données BICHE développée au Cemagref pour la gestion des données hydrométriques, la base de données BDRHF pour les entités souterraines. La base de données de Corine Land Cover a inspiré la représentation des données sur l'occupation des sols. Les schémas de données proposés et diffusés dans le cadre de la construction de ces bases de données ont été analysés et confrontés avec les données et paramètres requis pour la modélisation hydrologique spatialisée. Cette analyse nous a permis de dégager un schéma de données qui sera le cœur du système d'information que nous proposons.

Ce schéma de données sera présenté avec les principales entités qui le composent et leur liens avec les autres entités (tables). Parmi ces entités, l'entité 'zone' (Figure 5.17) tient une place centrale dans le schéma proposé car elle constitue une porte d'entrée facilitant le stockage multi-échelles d'informations spatiales diverses dans la même base de données.

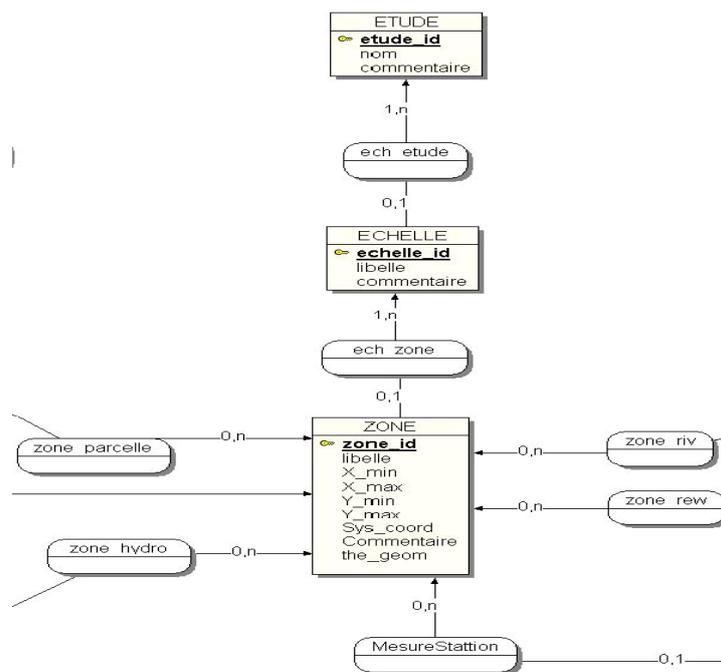


Figure 5. 17 : Les entités d'entrée du schéma de données proposé.

L'entité 'zone' est caractérisée par une fenêtre géographique carrée. Elle est reliée à une échelle d'une part, et différentes entités spatiales peuvent s'y retrouver. La notion de 'zone' comme entité d'entrée du modèle favorise également l'extensibilité de la base de données puisque les utilisateurs peuvent y raccorder des entités spatiales propres à leur modélisation. Dans le schéma actuel, les entités spatiales qui y sont raccordées sont les sous-bassins ou bassins (REW), les rivières, les parcelles, et les unités homogènes au sein des sous-bassins (hydro-paysages), et les stations de mesures des données hydrométriques.

A partir de chaque entité spatiale reliée à l'entité 'zone', des schémas de données spécifiques sont décrits en utilisant les schémas de données standardisés des principaux fournisseurs de données. Une illustration du schéma de données raccordé à l'entité 'station' est présentée sur la Figure (5.18). Il s'inspire du schéma de la base de données BICHE du Cemagref. L'intégralité du schéma de données du système d'information se trouve en Annexe (III).

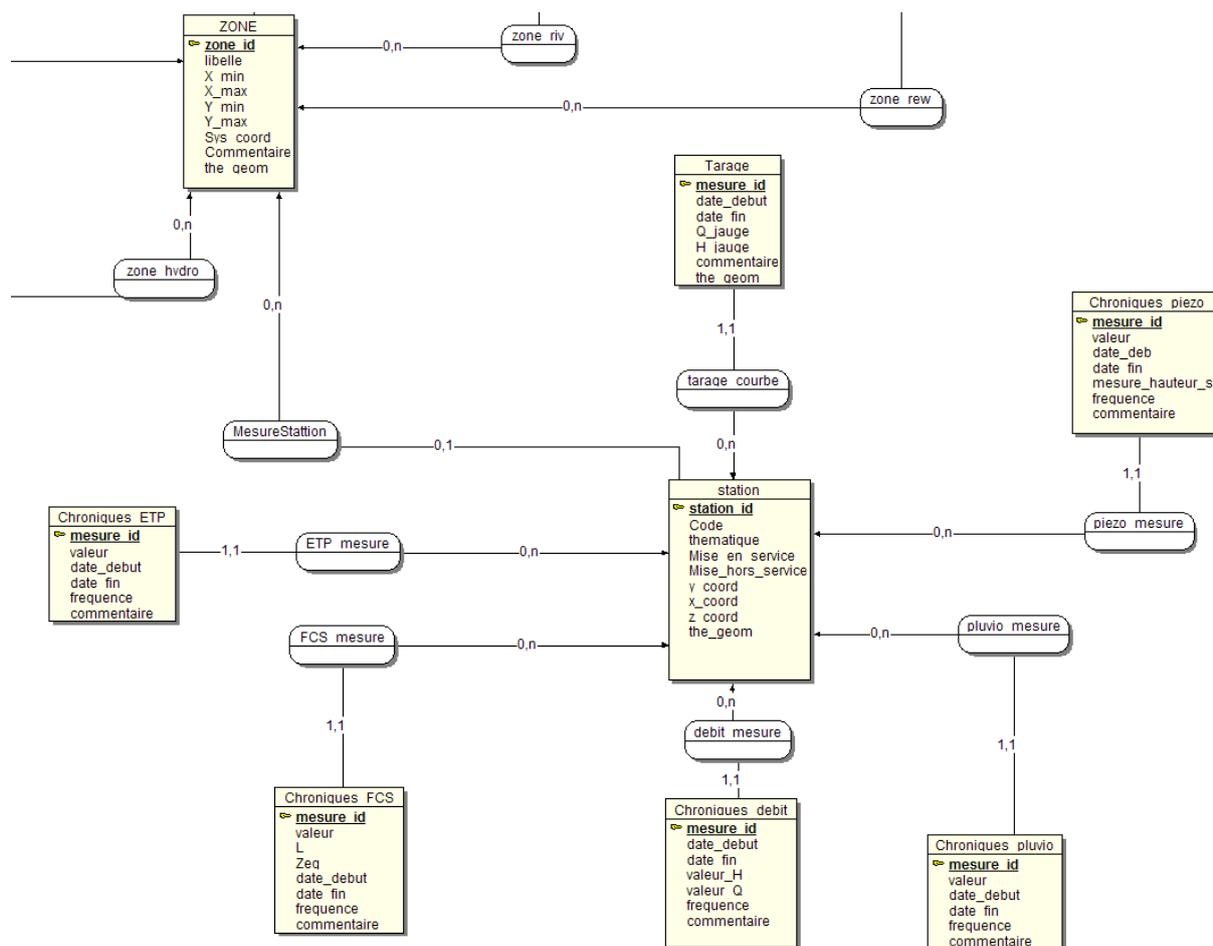


Figure 5. 18 : Schéma de données des entités liées aux stations de mesures.

V.4.2. Création de la base de données et son utilisation dans le contexte de la plate-forme LIQUID

Le schéma de données présenté dans le paragraphe précédent a servi à concevoir une base de données dans le SGBD PostgreSQL. La procédure classique consiste à passer d'un schéma conceptuel (tel que présenté ci-dessus) à un schéma logique, proche des entités (ou tables) à représenter dans la base de données. Le schéma logique créé est présenté en annexe (III). Les données du Haut-bassin de la Saône ont été utilisées pour tester sa pertinence. Un code en SQL a été écrit et peut être utilisé pour générer la base de données dans d'autres SGBD que PostgreSQL.

Deux systèmes de requêtes ont été proposés. Le premier sert au remplissage de la base de données. Le second système de requêtes a été créé pour permettre d'extraire de la base de données les informations nécessaires aux modules de la plate-forme LIQUID. La Figure (5.19) illustre la diversité des données qui peuvent être stockées par le système d'information. Des requêtes plus spécifiques ont été écrites pour extraire les données nécessaires aux solveurs utilisés dans le cadre de la modélisation hydrologique présentée dans la troisième partie de ce document.

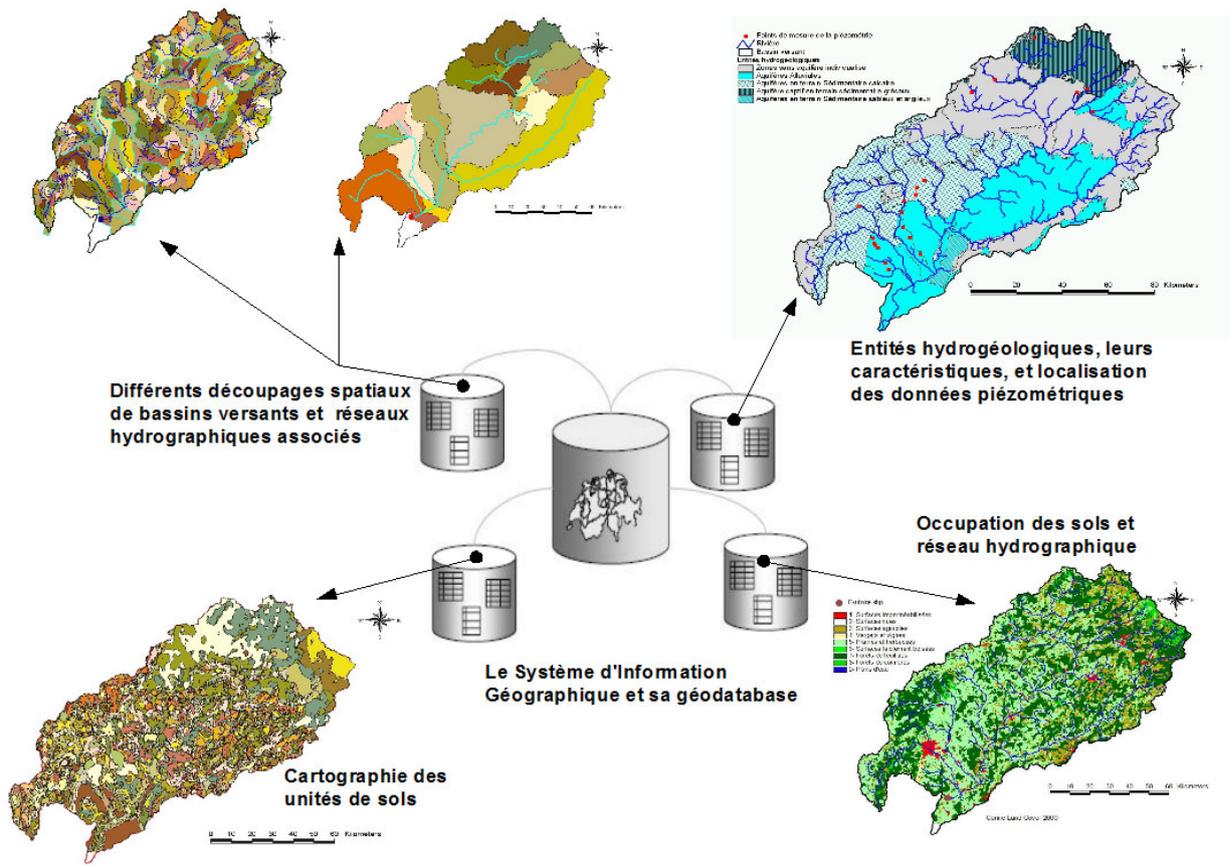


Figure 5. 19 : Illustration de la diversité des informations du SIG

TROISIEME PARTIE :
PRISE EN COMPTE D'UNE GEOMETRIE
IRREGULIERE DANS LA MODELISATION
HYDROLOGIQUE

Les deux parties précédentes ont permis de préciser notre approche de modélisation hydrologique spatialisée ainsi que les moyens dont nous disposons pour la mettre en œuvre. Cette approche de représentation des systèmes hydrologiques est basée sur une description objective de l'hétérogénéité spatiale. Elle devrait permettre de limiter les incertitudes liées à la paramétrisation des modèles (voir première partie). La démarche de discrétisation proposée amène à segmenter le bassin versant en éléments géométriques irréguliers et non-structurés. Cet effort de discrétisation serait vain si on n'était pas capable de prendre en compte de manière satisfaisante cette description de l'hétérogénéité dans la simulation des processus hydrologiques. Les méthodes existantes pour la discrétisation des équations constitutives des principaux processus hydrologiques utilisent souvent des maillages réguliers ou des réseaux de triangles irréguliers (TINs). L'utilisation de maillages irréguliers et non-structurés n'est pas très courante en hydrologie, et il n'existe pas beaucoup d'initiatives dans ce sens. Or, nous avons vu que l'approche que nous avons présentée dans la première partie conduit à des discrétisations aux formes très irrégulières. Nous écartons l'utilisation de maillages réguliers classiques (par exemple le choix d'une discrétisation spatiale avec un maillage carré) car nous considérons qu'il y aurait trop d'incertitudes supplémentaires liées à une dégradation de l'information sur l'hétérogénéité spatiale du milieu. Un maillage en triangles irréguliers permettrait de respecter les limites de ces formes irrégulières. Il fournirait un support sur lequel les méthodes classiques de résolution des équations qui régissent les processus hydrologiques pourraient être appliquées. Une discrétisation très fine en TINs serait très pertinente si la modélisation incluait une représentation détaillée du ruissellement de surface et de la topographie puisque les triangles sont les seules formes auxquelles il est possible d'attribuer une pente sans ambiguïté. Mais, l'utilisation de mailles triangulaires nécessiterait une discrétisation avec un nombre important de mailles, surtout près des discontinuités. Par ailleurs, un maillage en TINs nécessiterait aussi la mise en œuvre d'algorithmes de maillage plus ou moins compliqués pour la prise en compte des discontinuités. Dans le cadre de cette thèse, nous avons opté pour l'utilisation d'un maillage à géométries irrégulières et non-structurées, s'appuyant sur les hydro-paysages

déterminés dans le Chapitre (IV). Nos efforts sont donc orientés vers la recherche de méthodes numériques qui permettent l'utilisation des maillages plus généraux que les TINs (irréguliers et non-structurés), pour résoudre les équations décrivant les processus hydrologiques. Ceci, offrirait plus de flexibilité à la prise en compte de l'hétérogénéité spatiale décrite par hydro-paysages, dans la représentation des processus hydrologiques.

Conformément à ce qui a été dit dans la première partie (Chapitre IV), la modélisation du bassin versant retenue comprendra une représentation 1D de la zone non-saturée, une représentation 2D pour la simulation des transferts latéraux dans la nappe et une représentation 1D des écoulements dans les cours d'eau. Nous y adjoindrons la représentation de l'évapotranspiration, mais cet aspect n'a pas pu être abordé dans la thèse faute de temps. Pour simplifier la phase d'intégration des différents modules représentant la zone non saturée et les aquifères, nous avons fait le choix d'utiliser la même géométrie pour les deux systèmes⁵². Compte tenu du caractère exploratoire de l'intégration de modèles, ceci nous permettra de nous affranchir des interpolations spatiales entre maillages, qui auraient introduit des instabilités et des sources d'incertitudes supplémentaires. Le modèle issu de cette représentation est assez proche (hormis pour la composante ruissellement non incluse dans notre approche) du modèle SHE (Abbott et al., 1986a, 1986b), bien connu en hydrologie distribuée et qui a été le précurseur de MIKE SHE. La différence essentielle est liée au maillage utilisé : régulier à mailles carrées pour le SHE, irrégulier dans notre cas. Pour aller dans ce sens, des efforts ont été réalisés au sein de la plate-forme de modélisation LIQUID pour l'élaboration des modules nécessaires. Nous avons ainsi pu disposer d'un module de simulation des transferts verticaux dans la zone non-saturée utilisant ce type de maillage irrégulier. Un module de simulation mono-dimensionnelle des écoulements dans la rivière est également disponible au sein de la plate-forme et s'appuie sur une représentation de la rivière en tronçons homogènes, respectant la structure hiérarchisée du réseau hydrographique. La représentation 1D des processus hydrologiques sur des mailles irrégulières et non structurées ne pose pas de difficultés numériques particulières, contrairement à la représentation en deux dimensions des écoulements. C'est donc sur la prise en compte de cette géométrie irrégulière pour les écoulements latéraux 2D dans la zone saturée que seront focalisée les Chapitres (VI) et

⁵² avec un redécoupage éventuel pour respecter certaines contraintes liées aux schémas numériques, telles que la convexité des maillages

(VII) de cette troisième partie. Nous avons ainsi élaboré un module de simulation des écoulements latéraux dans la zone saturée (*BOUSS2D*) utilisant des maillages à géométries non-structurées et irrégulières. Un module de simulation des échanges entre la nappe et la rivière a été aussi développé (*GWRI*).

Dans le Chapitre (VI), nous allons présenter une analyse bibliographique détaillée qui débouchera sur les choix algorithmiques retenus pour la création du modèle de simulation des écoulements souterrains *BOUSS2D*. Le Chapitre (VII) présente l'implémentation du module dans la plate-forme LIQUID, et son évaluation à travers des comparaisons avec des solutions analytiques et des résultats de modèles existants. Enfin, le Chapitre (VIII) aborde la construction d'un premier prototype, dans la plate-forme LIQUID, du modèle que l'on souhaite assembler. Nous illustrerons le fonctionnement des modules couplés au travers d'exemples simplifiés représentatifs des conditions rencontrées lors d'une application en conditions réelles.

CHAPITRE VI "Prise en compte d'une géométrie irrégulière dans la modélisation de la zone saturée du sol"

La discipline qui s'occupe de l'étude des eaux souterraines est l'hydrogéologie. Elle met l'accent sur la relation entre les eaux souterraines et l'environnement géologique, c'est-à-dire les modes de transport de l'eau et des substances chimiques, l'accumulation de l'eau, etc. Les eaux du système souterrain sont liées au cycle hydrologique par différents processus : infiltration par la zone non saturée, apport souterrain par percolation et drainance, évaporation par la zone non saturée, interactions nappe et cours d'eau (et plus généralement eaux souterraines et eaux de surface). Les écoulements souterrains interviennent parfois dans l'hydrogramme de crue en soutenant le débit de base des cours d'eaux. En modélisation hydrologique, les écoulements souterrains sont pris en compte à l'échelle des bassins versants à cause de cette importance des eaux souterraines dans la description du cycle de l'eau, notamment lors des périodes d'étiage.

Une difficulté majeure dans la prise en compte des écoulements souterrains dans la modélisation hydrologique est liée au fait que les limites des bassins versants coïncident rarement avec celles des bassins hydrogéologiques. Malheureusement, les bilans dans la zone saturée devraient se faire au niveau de ces bassins souterrains. Les informations sur les bassins hydrogéologiques ne sont pas souvent disponibles, et lorsqu'elles le sont, elles sont difficilement exploitables. En effet, pour simuler correctement les écoulements souterrains dans des bassins hydrogéologiques dont les limites dépassent leur zone d'étude, les hydrologues se trouvent obligés d'étendre les limites de leurs zones d'étude. Pour limiter ces problèmes, dans plusieurs modèles hydrologiques, on considère la limite du bassin versant comme limite naturelle des systèmes aquifères. Ceci revient à dire que les conditions d'existence d'une nappe ne sont plus liées aux caractéristiques géologiques de l'aquifère qui héberge la nappe. Seules les conditions d'alimentation par infiltration

efficace à travers une formation superficielle plus perméable sont prises en compte. En d'autres termes, toute la quantité d'eau qui s'infiltré dans le sol peut rejoindre ou former une nappe même si les formations géologiques en présence ne peuvent pas servir de réservoir. Il est donc vraisemblable que cette description peut conduire à des erreurs dans la simulation des écoulements souterrains, et dans certains cas influencer les débits simulés dans les cours d'eau (nappes alluviales par exemple). L'existence d'une nappe en milieu souterrain n'est pas uniquement liée aux conditions d'alimentation effective à partir de la surface. Elle est également liée à la structure particulière des formations géologiques sous-jacentes qui peuvent servir de réservoir. Dans la nature, la répartition des formations géologiques pouvant héberger des nappes ne sont pas homogènes et elle est liée à l'histoire géologique du paysage. Le milieu souterrain est donc assez hétérogène. Il est alors extrêmement difficile d'identifier la présence ou l'absence de la nappe uniquement à partir des informations sur l'alimentation depuis la surface et/ou sur les caractéristiques hydrodynamiques des formations géologiques. L'intégration d'une information sur la localisation et l'extension des aquifères pourrait permettre d'améliorer les simulations du cycle de l'eau dans les modèles hydrologiques spatialisés.

On observe à l'heure actuelle une disponibilité croissante des informations sur la localisation et la description des entités hydrogéologiques (exemple le référentiel sur les eaux souterraines mentionné au Chapitre IV). Nous proposons d'intégrer cette information dans la description de l'hétérogénéité du bassin versant. Ces entités étant de nature irrégulière et très hétérogènes, leur prise en compte objective nécessite des méthodes adéquates de représentation de l'hétérogénéité du sous-sol dans les modèles de simulation des écoulements souterrains (maillage irrégulier et non-structuré par exemple). Ainsi, une zone saturée ne serait définie au sein des modèles hydrologiques spatialisés que lorsqu'il existe réellement un réservoir souterrain dont on connaît l'extension et les caractéristiques hydrodynamiques. Dans ce chapitre, nous allons détailler la solution numérique proposée. Elle permet de discrétiser et de résoudre les équations de transferts souterrains sur un maillage non structuré et irrégulier.

VI.1. Rappels sur la modélisation de la zone saturée du sol

VI.1.1. Généralités sur les eaux et réservoirs souterrains

Dans le milieu souterrain, coexistent trois types de formations géologiques en fonction de leur capacité à contenir de l'eau :

- Les formations dites perméables ou aquifères dans lesquelles l'eau se stocke et se mobilise facilement. Il s'agit souvent de formations géologiques sableuses, gréseuses, des alluvions ou des roches carbonatées (ex : la craie).
- Les formations dites imperméables ou aquicludes où l'eau est souvent présente, mais dans lesquelles son transfert est limité en raison de leur faible perméabilité.
- Les formations dites semi-imperméables ou aquitards qui sont intermédiaires entre les deux précédentes. L'eau n'y est pas mobilisable facilement, mais leur perméabilité est suffisante pour permettre des transferts d'eau appréciables à des échelles régionales (Deveughèle, 1992).

Les entités hydrogéologiques désignent un ensemble de formations géologiques souterraines où peuvent s'individualiser ou non des systèmes aquifères. Il s'agira d'un bassin sédimentaire avec ou sans aquifère individualisé. Un aquifère désigne donc « ...un massif souterrain de roches perméables comportant une zone saturée suffisamment conductrice d'eau pour permettre l'écoulement significatif d'une nappe souterraine et le captage de quantités d'eau appréciables. » (Margat et Castay, 1977). On désigne par nappe « l'ensemble des eaux comprises dans la zone saturée d'un aquifère dont toutes les parties sont en liaison hydraulique... » (Margat et Castay, 1977). Une nappe est donc liée à l'aquifère qui la porte.

On distingue deux types de nappes ; les nappes dites captives et les nappes qualifiées de libres.

- Les nappes captives sont confinées par une formation géologique peu ou pas perméable. Ce sont généralement des nappes profondes.

□ Les nappes libres désignent les nappes dont la surface piézométrique coïncide avec la surface libre de la nappe. Les nappes phréatiques sont les premières ‘nappes libres’ atteintes par les puits. Les nappes perchées sont des ‘nappes libres’ pouvant surmonter d’autres nappes libres qu’elles peuvent alimenter par drainance. Les nappes alluviales sont des ‘nappes libres’ constituées par les alluvions des rivières. Les eaux souterraines y sont en équilibre avec la rivière. C’est le lieu privilégié des échanges nappes et rivières où les grands flux issus des nappes libres rejoignent la rivière. (Castany, 1982).

VI.1.2. Identification et caractérisation des aquifères

L’identification des aquifères se fait grâce à des études hydrogéologiques précises. Ces études permettent de localiser les aquifères, d’identifier leur configuration (extension, dimensions et limites géologiques) et leur structure (caractéristiques physiques : granulométrie, faciès etc.). En France, un référentiel hydrogéologique permet de localiser les entités hydrogéologiques, ainsi que leur extension sur tout le territoire national.

Dans un aquifère, on distingue l’eau de rétention de l’eau gravitaire. L’eau de rétention est la fraction des eaux souterraines à la surface des grains, maintenues dans la matrice solide du réservoir. Cette partie des eaux souterraines n’est pas mobilisable. L’eau gravitaire est la fraction d’eau qui peut être libérée du réservoir par les forces de gravité. Elle est mobile et participe donc aux écoulements d’eau dans l’aquifère. Cette fraction gravitaire dépend des caractéristiques de la formation géologique hôte.

Les réservoirs souterrains sont caractérisés par leurs limites (conditions géologiques aux limites du réservoir), leur localisation dans le sous-sol (profondeur de l’imperméable servant de mur) et leur structure ou caractéristiques physico-chimiques. Ces caractéristiques physico-chimiques sont fonction de la formation géologique supportant le réservoir. Les réservoirs souterrains remplissent deux fonctions principales vis-à-vis de l’eau souterraine : une fonction de stockage ou capacitive, associée au concept de réserve d’eau ; et une fonction de conduite ou de propagation d’influences.

- La fonction de stockage du réservoir souterrain

Elle régit l'emmagasinement et la libération de l'eau gravitaire. La morphologie et l'interconnexion des vides du réservoir déterminent sa capacité de stockage. Ces caractéristiques de l'aquifère sont estimées à travers des analyses au laboratoire (analyses granulométriques et mesures de la porosité) ou des études sur le terrain (prospections géologiques, des analyses structurales des roches ou prospections géophysiques).

L'analyse granulométrique permet de disposer d'un certain nombre de paramètres granulométriques permettant de classer le réservoir suivant une classe lithologique précise, et d'évaluer sa fonction de stockage. Le paramètre des vides le plus important du réservoir est la porosité. Elle désigne la propriété du réservoir à stocker et à libérer de l'eau. En pratique, ce paramètre est peu utilisé en hydrogéologie, car le réservoir souterrain ne peut jamais être complètement vidé de tout son eau. Seule la fraction mobilisable peut être stockée/déstockée. On lui préfère le paramètre de porosité efficace.

□ La fonction conductrice (ou de transport) du réservoir souterrain

Elle régit le transport d'eau et la transmission d'influences. Cette fonction assure le transport de l'eau, la transmission de différences de pression ou de charge et les interactions physico-chimiques entre le réservoir et les eaux souterraines (Castany, 1982). Elle est imposée par la structure géométrique (conditions aux limites géologiques) et par les paramètres hydrodynamiques de l'aquifère. Le paramètre hydrodynamique qui conditionne l'écoulement de l'eau dans le milieu souterrain est le coefficient de perméabilité. La charge hydraulique permet de caractériser l'écoulement dans le milieu souterrain.

On définit la charge hydraulique comme la hauteur de la colonne d'eau au-dessus d'un niveau de référence (Dingman, 1994). Elle sera assimilée au niveau piézométrique de l'aquifère libre. Le gradient hydraulique est la différence de niveau piézométrique entre deux points de la surface piézométrique par unité de longueur.

Le coefficient de perméabilité mesure l'aptitude du réservoir à se laisser traverser par l'eau, sous l'effet du gradient hydraulique. Il est lié à la granulométrie de la formation géologique qui héberge l'aquifère. Il est défini par la loi de Darcy comme le volume d'eau gravitaire traversant une section orthogonale à la direction de l'écoulement, par unité de temps sous

l'effet d'un gradient hydraulique unitaire. La transmissivité régit le débit d'eau qui s'écoule par unité de longueur sous l'effet d'un gradient hydraulique unitaire. C'est le produit du coefficient de perméabilité par l'épaisseur de l'aquifère. La transmissivité permet de représenter les zones de productivité d'un aquifère. En pratique, elle est mesurée par des essais de pompage.

Un autre paramètre hydrodynamique important permettant de caractériser le complexe réservoir/eaux souterraines est la porosité de drainage ou le coefficient d'emménagement pour un aquifère confiné (Diskin and Simpson, 1978). Dans un aquifère à nappe libre, la porosité de drainage exprime, en pourcentage, le volume d'eau gravitaire que peut contenir un réservoir souterrain à l'état saturé. Dans un aquifère captif, ce paramètre est représenté par le coefficient d'emménagement. C'est le rapport du volume d'eau libéré ou emmagasiné par unité de surface de l'aquifère sur la variation de la charge hydraulique. Au laboratoire, la porosité efficace est mesurée sur un échantillon représentatif. Sur le terrain, les essais de pompage et les études sur les fluctuations de la surface piézométrique déterminent les paramètres de l'emménagement souterrain.

L'analyse de la description des entités hydrogéologiques permet d'évaluer (ou d'estimer) les paramètres hydrodynamiques des aquifères ainsi que les conditions aux limites qui seront de deux types : les limites géologiques et les limites hydrodynamiques. Les limites géologiques sont des limites fixes, étanches ou non, imposées par la structure hydrogéologique. Elles regroupent le substratum, le toit, les passages latéraux et éventuellement des accidents tectoniques tels que les failles, etc.. Les limites hydrodynamiques sont des frontières ouvertes à position variable dans l'espace et dans le temps et imposées par des conditions extérieures à l'aquifère. Il s'agit des limites à flux imposés (zones d'alimentation ou de débits sortants) et des limites à potentiel imposé (les plans d'eau de surface).

Les transferts d'eau au sein de l'aquifère, considéré comme un réservoir, sont pilotés par les gradients hydrauliques. Ces gradients sont dus aux flux d'eau aux limites de l'aquifère (percolation, drainance, recharge, etc.). Nous allons alors considérer un aquifère comme un réservoir qui réagit à des incitations extérieures à travers une propagation d'influences.

On distingue généralement trois types de réactions de l'aquifère suite aux sollicitations extérieures (Castany, 1982) :

- ❑ Un comportement hydrodynamique suite à un apport d'eau ou une variation de pression
- ❑ Un comportement hydrochimique suite à des échanges géochimiques avec les eaux d'infiltration
- ❑ Un comportement dit hydrobiologique traduisant le pouvoir d'auto-épuration naturelle des réservoirs.

Dans le cadre d'une modélisation hydrologique, nous allons considérer uniquement le comportement hydrodynamique. L'incitation pourra être induite par l'infiltration efficace, par des variations de charge hydraulique, par des flux de recharge à travers une rivière ou encore par des flux de drainance à travers un substratum semi-perméable. La réaction hydrodynamique de l'aquifère se traduira par une modification de sa surface piézométrique. L'approche utilisée pour la modélisation de cette surface piézométrique consiste à considérer les sources d'apport individuellement et à simuler l'évolution des charges hydrauliques en tout point de l'aquifère suite aux incitations extérieures. On utilisera, pour cette simulation, les équations de mouvement de l'eau dans un aquifère. Dans le paragraphe suivant, nous proposons une synthèse sur les méthodes numériques existantes pour la modélisation des écoulements souterrains.

VI.1.3. Généralités sur la modélisation numérique de la zone saturée du sol

Diverses approches de la modélisation de la zone saturée du sol existent dans la littérature. Elles sont souvent basées sur la résolution d'équations aux dérivées partielles décrivant le mouvement de l'eau dans un milieu poreux. On peut regrouper les diverses approches existantes selon deux types (Kao, 2002).

- La première approche consiste à utiliser les équations de Richards pour décrire de façon complète les zones saturées et non-saturées du sol. On parle de modélisation 'complète' ou 'non-saturée'.

- Dans la seconde approche, le système étudié est la nappe. C'est la modélisation dite 'saturée'. On combine l'équation de Darcy avec l'équation de conservation de masse pour déterminer la charge hydraulique en tout point du système. Plusieurs équations de simulation des écoulements saturés sont dérivées de cette formulation. C'est le cas des équations de Boussinesq en deux dimensions où une hypothèse simplificatrice sur la pente de la surface libre de la nappe a été introduite.

Dans ce Paragraphe, nous allons présenter une synthèse de ces deux types d'approche de modélisation des écoulements souterrains. Nous tenons à préciser que les notations utilisées dans ce Paragraphe (VI.1.3) sont celles tirées directement des références utilisées. Elles ne sont pas à confondre avec les notations du Paragraphe (VI.2).

VI.1.3.a) Utilisation des équations de Richards pour la modélisation de la zone saturée du sol

Cette approche est qualifiée de "modélisation complète". Le système considéré est l'ensemble de la matrice de sol incluant la zone non saturée et la zone saturée. L'équation de Richards est utilisée pour décrire ce système. Elle se fonde sur la combinaison de la loi de Darcy, étendue aux milieux non saturés, et de l'équation de conservation de masse ou équation de continuité. La résolution de l'équation de Richards permet de déterminer un

champ de pression de l'eau dans le sol et une répartition de la teneur en eau dans le sol. La position de la nappe est déterminée a posteriori à partir du profil de pression. Elle correspond à la position de la surface où la pression de l'eau dans le sol est égale à la pression atmosphérique. Il existe trois formes générales des équations de Richards (Celia et al., 1990):

Expression de l'équation de Richards fondée sur la pression :

$$C(H) \frac{\partial H}{\partial t} = \nabla \cdot K(H) \nabla H + \frac{\partial K}{\partial z} \quad \text{Eq. 6.1}$$

Expression de l'équation de Richards basée sur la teneur en eau :

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \nabla \cdot D(\theta) \nabla \theta + \frac{\partial K}{\partial z} \quad \text{Eq. 6.2}$$

Forme mixte de l'équation de Richards :

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \nabla \cdot K(H) \nabla H + \frac{\partial K}{\partial z} \quad \text{Eq. 6.3}$$

Dans ces trois équations, θ est la teneur en eau (L^3L^{-3}), H est la pression de l'eau dans le sol exprimée en hauteur d'eau (L), K est la conductivité hydraulique (LT^{-1}) et $C(H) = d\theta/dH$ est la capacité capillaire.

La principale difficulté d'utilisation des équations de Richards pour simuler les mouvements d'eau dans le sol est liée au passage dans la zone saturée. Pour cela, l'équation de Richards subit des réaménagements dans la plupart des cas. Ces différents réaménagements ont souvent pour but de rendre ces équations plus conservatrices de la masse dans la zone de transition saturé-non saturé. La forme mixte est souvent utilisée car elle est considérée comme plus conservative que les autres formes des équations de Richards (Celia et al., 1990) cité par Dogan and Motz (2005).

Compte tenu des difficultés numériques de résolution de l'équation de Richards, les premiers modèles la résolvant étaient des modèles 1D. Ainsi, Van Dam and Feddes (2000) ont utilisé les équations de Richards 1D pour simuler l'infiltration et le niveau d'eau dans la zone saturée. Ils ont fait l'hypothèse que les flux d'eau et de matières entre la zone non saturée et la zone saturée étaient essentiellement verticaux. La forme de l'équation de Richards qu'ils ont utilisée est la suivante :

$$C(H) \frac{\partial H}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K(H) \left(\frac{\partial H}{\partial z} + 1 \right) \right] + s(H) \quad \text{Eq. 6.4}$$

$C(H)$ est la capacité capillaire ($d\theta/dH$); H est la pression matricielle (L); $K(H)$ est la conductivité hydraulique (LT^{-1}); $s(H)$ est un terme source/puits ($L^3L^{-3}T^{-1}$).

Compte tenu des temps de calcul assez longs requis pour la résolution de cette forme de l'équation de Richards, Ross (2003) a proposé une méthode de résolution rapide et précise de l'équation de Richards en 1D. Elle permet la simulation des flux verticaux et la détermination du niveau de la zone saturée. L'équation de base utilisée est la suivante :

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K(H) \left(\frac{\partial H}{\partial z} + 1 \right) \right] + q_{ext} \quad \text{Eq. 6.5}$$

ou encore

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{\partial \Phi}{\partial z} + K \right] + q_{ext} \quad \text{Eq. 6.6}$$

θ est la teneur en eau (L^3L^{-3}), H est la pression matricielle, $K(H)$ est la conductivité hydraulique, q_{ext} est un terme source/puits ($L^3L^{-3}T^{-1}$), Φ désigne le flux du potentiel matriciel ou potentiel de Kirchhoff (L^2T^{-1}). Il s'agit de l'intégrale sur la pression de la conductivité hydraulique. Nous reviendrons sur cette méthode de résolution au Chapitre (VIII) puisque c'est celle qui a été utilisée pour le module de transfert dans la zone non saturée, présent dans la plate-forme LIQUID.

Dans les modèles HYDRUS 2D (Simunek et al., 2006) et SWMS_2D (Simunek et al., 1994), les auteurs ont utilisé l'équation de Richards sous la forme suivante :

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[K \left(K_{ij}^A \frac{\partial H}{\partial x_j} + K_{ij}^A \right) \right] + q_{ext} \quad \text{Eq. 6.7}$$

θ est la teneur en eau volumique; H représente la pression matricielle; q_{ext} représente un terme puits/sources par unité de volume ($L^3L^{-3}T^{-1}$), x_i et x_j représente les différentes directions de l'espace; K_{ij}^A est un élément d'un tenseur \mathbf{K}^A des coefficients de perméabilité (LT^{-1}) et K est la conductivité hydraulique à saturation estimée par la formule $K(h, x, z) = K_s(x, z) \cdot K_r(H, x, z)$. K_s est la conductivité hydraulique à saturation et K_r la conductivité hydraulique relative.

Enfin, on trouve des résolutions de l'équation 3D. Ainsi, pour mieux prendre en compte les spécificités de la zone saturée, certains auteurs préfèrent utiliser une forme modifiée des équations de Richards dans laquelle le terme de stockage est remplacé par une expression représentant les conditions d'écoulements saturés et non saturés. L'équation est sous la forme suivante (Dogan and Motz, 2005) :

$$\frac{\partial}{\partial x}(K_x(H)\frac{\partial H}{\partial x})+\frac{\partial}{\partial y}(K_y(H)\frac{\partial H}{\partial y})+\frac{\partial}{\partial z}(K_z(H)(\frac{\partial H}{\partial z}+1))+q_{ext}=\frac{\partial \theta}{\partial t}+S_w S_w \frac{\partial H}{\partial t} \quad \text{Eq. 6. 8}$$

$K_x(H)$, $K_y(H)$ et $K_z(H)$ sont les conductivités hydrauliques dans les directions x, y et z ; H représente la pression matricielle; q_{ext} est un terme puits/sources; θ représente la teneur en eau volumique ; S_w est le degré de saturation ; S_s est l'emmagasinement spécifique (L^{-1}).

Une dernière catégorie d'auteurs utilise des techniques de couplage avec des codes de calcul pour la zone saturée. Abbott et al (1986b) utilisent dans le modèle hydrologique MIKE SHE un couplage 1D (zone non saturée) et 2D (zone saturée) pour décrire les mouvements d'eau dans le sol. Le modèle de la zone saturée est basé sur les équations de Boussinesq avec des conditions aux limites variables dans le temps.

VI.1.3.b) Utilisation de modélisations dites 'saturées' pour la simulation des transferts souterrains.

Avec cette approche, le système considéré est uniquement la zone saturée du sol. Les écoulements dans la zone non saturée ne sont pas pris en compte au sein de cette approche (la recharge est spécifiée à travers des termes puits/sources). Le système est délimité au niveau supérieur par sa surface libre dont la position n'est pas connue a priori. Les équations mécanistes habituellement utilisées combinent l'équation de Darcy avec l'équation de continuité ou équation de conservation de la masse dans un aquifère hétérogène et anisotrope. L'équation de simulation des écoulements saturés, dans un repère cartésien peut être écrite sous la forme suivante :

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\mathbf{K} \frac{\partial h}{\partial x_i})=S_s \frac{\partial h}{\partial t}+q_{ext} \quad \text{Eq. 6. 9}$$

h représente ici la charge hydraulique (L); \mathbf{K} est le tenseur d'ordre 3 des conductivités hydrauliques à saturation; q_{ext} est un terme puits/sources ($LT^{-1}L^{-1}$); S_s (L^{-1}) est

l'emmagasinement spécifique ; x_i représente les différentes directions de l'espace (en repère orthonormé : x, y et z).

En pratique, plusieurs auteurs utilisent des hypothèses simplificatrices afin d'obtenir des équations plus faciles à résoudre. L'hypothèse de Dupuit est l'une des plus courantes. On suppose que la pente de la surface libre de la nappe est faible. L'écoulement est alors supposé strictement horizontal. Les équations de Boussinesq font partie de ce type d'équations où l'hypothèse de Dupuit est formulée. La forme générale des équations de Boussinesq en deux dimensions dans un aquifère hétérogène et anisotrope peut s'écrire dans un repère orthonormé de la façon suivante (Abbott et al., 1986b) :

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left(\mathbf{T} \frac{\partial h}{\partial x_i} \right) = S \frac{\partial h}{\partial t} + q \quad \text{Eq. 6. 10}$$

\mathbf{T} est le tenseur d'ordre 2 des transmissivités ; q est le flux de recharge verticale de la nappe par unité de surface (LT^{-1}) ; S (LL^{-1}) est le coefficient d'emmagasinement défini comme le produit de l'emmagasinement spécifique par l'épaisseur de la nappe ($S_s e$). x_i représente les directions de l'espace (L) en deux dimensions (x et y en repère orthonormé).

Enfin, une simplification courante des équations de Boussinesq consiste à supposer que le milieu soit isotrope et homogène. Plusieurs solutions analytiques existent pour la résolution de l'équation simplifiée obtenue, ce qui permet de modéliser les écoulements transversaux vers des ouvrages de drainage suivant une direction (1D). L'équation est de la forme suivante (Serrano and Workman, 1998; Hogarth et al., 1999; Parlange et al., 2000):

$$K \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial h}{\partial x} \right) = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad \text{Eq. 6. 11}$$

S_s est l'emmagasinement spécifique ; K est la conductivité hydraulique.

Certains auteurs relèvent les erreurs liées à l'approximation de Dupuit (Kao, 2002; Hunt, 2005). Selon ces auteurs, la grande limite de ces équations réside dans leur incapacité à simuler correctement les hauteurs de nappe dans les zones proches de structures drainantes comme les fossés et les rivières. En effet à proximité de ces éléments, la composante verticale de l'écoulement devient significative. Les erreurs d'estimation de la

hauteur de la nappe sont dues au fait que les phénomènes de suintement et d'écoulements verticaux n'ont pas été pris en compte dans cette équation.

En conclusion à ce paragraphe, on peut retenir qu'*il existe deux types d'approche pour modéliser les écoulements souterrains. Dans l'approche la plus complète, on modélise tout le système sol/sous-sol, tandis que dans l'approche saturée on ne modélise que la zone saturée du sol. Dans le cadre de cette thèse, comme nous l'avons annoncé en introduction, nous avons choisi de réaliser une modélisation saturée en 2D et de réaliser un couplage avec un modèle de simulation des transferts verticaux dans la zone non saturée/saturée du sol, disponible dans la plate-forme LIQUID.*

VI.1.4. Les défis de la modélisation de la zone saturée avec un découpage spatial en éléments géométriques irréguliers.

Comme nous l'avons vu dans le paragraphe précédent, il existe trois types de modèles de simulation des transferts souterrains : les modèles mono-dimensionnels (1D), les modèles bi-dimensionnels (2D) et les modèles tri-dimensionnels (3D). Le choix d'un type de modèle dépend de la complexité des cas d'études et de leurs échelles. Les modèles mono-dimensionnels sont souvent utilisés pour traiter des problèmes d'écoulements souterrains à des échelles très locales, comme les problèmes de drainage agricole par exemple. Ils ne permettent pas de prendre en compte l'hétérogénéité du milieu. Dans les modèles bi-dimensionnels, l'aquifère est considéré comme une surface continue en deux dimensions avec des écoulements essentiellement horizontaux. Ils sont souvent utilisés pour la simulation d'aquifères de grandes tailles ou de tailles intermédiaires où on ne s'intéresse pas aux dynamiques locales des transferts souterrains. Les modèles en trois dimensions permettent de prendre en compte la complexité du milieu souterrain. Ils sont utilisés pour les systèmes aquifères de petites tailles où on s'intéresse aux dynamiques locales. Ils sont aussi souvent nécessaires pour une simulation précise des transferts de solutés. Les modèles 3D sont très coûteux en temps de calcul lorsqu'ils sont déployés sur des aquifères de grandes tailles.

Seuls les modèles en 2D et en 3D sont généralement utilisés dans le cadre d'une modélisation hydrologique spatialisée car ils permettent de prendre en compte l'hétérogénéité spatiale. Quel que soit le type de modèle, la prise en compte de géométries complexes est souvent très difficile voire impossible dans certains cas. Les maillages utilisés sont souvent réguliers (grilles) ou des TINs (Triangular Irregular Networks). La prise en compte de géométries complexes nécessite souvent des outils mathématiques lourds et coûteux en temps (par exemple, méthode des éléments finis et méthodes de raffinement de maillage). Ce type de maillage limite la capacité des modèles existants à prendre en compte des géométries irrégulières et non-structurées. Les défis posés sont donc essentiellement d'ordre numérique. Face aux difficultés pour mettre en œuvre facilement des modèles 3D sur des aquifères de grandes tailles et aux difficultés des modèles 2D existants pour gérer les géométries irrégulières, nous proposons un nouveau modèle de simulation des transferts souterrains. Il permet de discrétiser les équations de transferts souterrains sur des géométries irrégulières et de gérer les discontinuités géologiques sans moyens mathématiques lourds. Nous avons utilisé pour cela une méthode des volumes finis qui offre un bon compromis entre temps de calcul et prise en compte de géométries complexes.

VI.2. Prise en compte de géométries irrégulières dans la modélisation de la zone saturée : proposition d'une méthode basée sur l'utilisation des volumes finis

Notre objectif est de proposer un système de modélisation saturée capable de simuler les niveaux d'eau dans des mailles de modélisation dérivées du découpage spatial proposé dans la première partie de ce document. Nous allons proposer une approche de modélisation des écoulements dans un aquifère libre. Ce choix est motivé par le fait que ce sont ces types d'aquifères qui interagissent le plus souvent avec les transferts de surface qui nous intéressent dans le cadre de la modélisation spatialisée. Nous allons donc utiliser la forme générale de l'équation décrivant les écoulements des fluides incompressibles dans un aquifère non homogène et anisotrope (Eq.6.9).

Nous supposons que l'aquifère est peu épais par rapport à son extension. Cette hypothèse sera vérifiée pour de nombreux aquifères à l'échelle des bassins versants de taille moyenne à grande. On peut donc considérer que l'écoulement dans l'aquifère est essentiellement en deux dimensions (2D). En intégrant l'équation (Eq. 6.9) selon la verticale, on obtient l'expression de l'équation régissant les écoulements dans la zone saturée en 2D (Equation (6.10) que nous rappelons ici) :

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left(\mathbf{T} \frac{\partial h}{\partial x_i} \right) = S \frac{\partial h}{\partial t} + q \quad \text{Eq. 6. 12}$$

Nous rappelons les notations utilisées : q est le flux de recharge verticale de la nappe par unité de surface (LT^{-1}); S (LL^{-1}) est le coefficient d'emménagement, défini comme le produit de l'emménagement spécifique par l'épaisseur de la nappe ($S_s \cdot e$). Il est aussi connu sous le nom de porosité de drainage. En pratique, la porosité de drainage est la quantité d'eau libérée par la variation élémentaire de la surface de la nappe. Ce concept permet de fermer le bilan hydrique à la surface de la nappe lors des fluctuations de surface. x_i représente les directions de l'espace en deux dimensions (x et y en repère orthonormé). \mathbf{T} est le tenseur d'ordre 2 des transmissivités. Les éléments de ce tenseur, T_{ik} (L^2T^{-1}) sont le produit de la conductivité hydraulique K_{ik} (éléments du tenseur \mathbf{K}

d'ordre 2) par l'épaisseur de la nappe e ($T_{ik} = K_{ik} \cdot e$). La transmissivité sert à caractériser la puissance des aquifères. En toute rigueur, c'est l'intégrale selon la verticale de la conductivité hydraulique sur l'épaisseur saturée. Dans le modèle que nous proposons, nous allons utiliser la formulation en intégrale afin de prendre en compte l'hétérogénéité verticale des sols. Nous reviendrons plus loin, dans ce document sur le calcul de la transmissivité au sein du modèle proposé. Nous utiliserons pour la suite, cette dernière expression (Eq.6.12) dans le module saturé proposé pour simuler les écoulements bi-dimensionnels dans la zone saturée.

VI.2.1. Résolution numérique des équations de simulation des écoulements souterrains par la méthode des volumes finis

VI.2.1.a) Généralités sur les méthodes numériques

Une alternative à la résolution analytique des équations différentielles partielles, largement utilisée est l'approximation numérique. Cette approche consiste à remplacer les variables continues par des variables discontinues définies pour chaque nœud de calcul. L'équation différentielle continue est alors remplacée par un nombre fini d'équations algébriques qui définissent à chaque pas de temps la répartition spatio-temporelle de la charge hydraulique. Ces équations peuvent être ensuite résolues par différentes méthodes numériques de résolution des systèmes d'équations.

L'Equation (6.12) fait partie du groupe des équations différentielles caractérisant les phénomènes de diffusion. Elle sert à décrire des problèmes aux valeurs initiales ou problèmes de Cauchy. Les solutions numériques adéquates pour résoudre ce type de problème ne sont pas forcément applicables aux équations de type hyperbolique utilisées notamment pour les problèmes de propagation d'ondes (Konikow, 1998). La résolution de ces équations nécessite donc de choisir une méthode d'analyse numérique adéquate. Ce choix devrait permettre d'éviter les problèmes relatifs à la stabilité numérique dans la résolution du système et à la propagation d'erreurs. Le choix d'une méthode d'inversion des matrices revêt également une grande importance dans la précision des résultats, dans le cadre de la résolution du système linéaire issu de la discrétisation de ces équations.

Deux grandes classes de méthodes de résolution numérique sont couramment utilisées pour la résolution des équations d'écoulements souterrains ci-dessus : la méthode des différences finies et celle des éléments finis. Toutes ces méthodes nécessitent le découpage de l'espace en mailles régulières ou non, formant des nœuds de calcul. La méthode des volumes finis est une troisième classe de méthodes d'analyse numérique souvent utilisée en ingénierie, mais rarement utilisée pour la simulation des écoulements souterrains.

Dans la méthode des différences finies, on utilise des approximations de la dérivée à partir de différences de charge entre deux points voisins pour discrétiser l'équation aux dérivées partielles. La méthode des éléments finis est basée sur l'utilisation d'une fonction de la variable dépendante et des paramètres de l'équation pour l'évaluation d'une formulation en intégrale équivalente. Dans la méthode des volumes finis, les intégrales de volume des termes de divergence sont remplacées par des intégrales de surface. Les termes de flux sont ensuite évalués aux interfaces entre les volumes. Chacune de ces approches comporte des avantages et des inconvénients, mais aucune d'entre elles ne se distingue vraiment des autres pour les problèmes d'écoulements souterrains (Konikow, 1998). La formulation mathématique de la méthode des différences finies est plus simple à mettre en œuvre et elle est facile à programmer, particulièrement pour les grilles régulières. La méthode des éléments finis nécessite souvent l'utilisation d'algorithmes mathématiques sophistiqués mais elle peut être numériquement plus précise que la méthode standard des différences finies (de Marsily, 1981). Un autre gros avantage de la méthode des éléments finis est sa capacité à garder une bonne précision sur les limites irrégulières de l'aquifères et sur les zones de discontinuité des paramètres (Konikow, 1998). Cependant, la spécification des paramètres et des données d'entrée est plus facile avec la méthode des différences finies qu'avec la méthode des éléments finis. La méthode des volumes finis a la réputation d'être conservative et robuste numériquement (Barth and Ohlbege, 2004) . Elle peut être mise en œuvre facilement sur des maillages non-structurés comme dans notre cas. Nous avons donc choisi d'utiliser la méthode des volumes finis pour résoudre l'équation différentielle permettant de simuler des écoulements dans la nappe (Eq. 6.12).

VI.2.1.b) Application de la méthode des volumes finis aux équations de Boussinesq.

Les schémas de discrétisation en volumes finis permettent de reformuler les lois de conservation sous une forme discrète (Pascal, 2002), en appliquant la forme intégrale des lois de conservation sur chaque volume de contrôle. On considère donc que le taux de variation de masse, dans un volume de contrôle donné, est égal au flux total de matière transitant à travers les limites du volume considéré (voir démonstration ci-dessous). En d'autres termes, les équations différentielles ne seront pas évaluées en tout point des polygones, mais uniquement aux limites des volumes de contrôle (qui sont ici des éléments surfaciques). Plusieurs auteurs ont prouvé l'existence, l'unicité et la convergence des schémas en volumes finis des équations de diffusion (exemple : Coudiere et al., 2000).

L'Equation (6.12) intégrée sur chaque unité de modélisation prend la forme suivante :

$$\iint_{V_i} S \frac{\partial h}{\partial t} dv = \iint_{V_i} \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\mathbf{T} \frac{\partial h}{\partial x_i} \right) dv + \iint_{V_i} q dv \quad \text{Eq. 6. 13}$$

V_i désigne les volumes de contrôle sur lesquels l'approximation sera réalisée (les mailles élémentaires : ici, ce sont des éléments surfaciques 2D).

A l'échelle des mailles de calcul, supposons les notations suivantes : h_i , niveau d'eau moyen du volume de contrôle V_i ; A_i , surface du volume de contrôle V_i ; S_i , la porosité de drainage du volume de contrôle V_i ; q_i est l'intégrale des termes sources/puits, sur l'ensemble du volume de contrôle V_i . On peut alors écrire :

$$h_i = \frac{1}{A_i} \iint_{V_i} h dv_i \quad \text{Eq. 6. 14}$$

$$q_i = \iint_{V_i} q dv_i \quad \text{Eq. 6. 15}$$

Le terme transitoire à gauche de l'équation (6.14) peut être remplacé par l'expression suivante :

$$\iint_{V_i} S \frac{\partial h}{\partial t} = S_i \frac{\partial h_i}{\partial t} \quad \text{Eq. 6. 16}$$

Avec $S_i = S \cdot A_i$ (L^3L^{-1}).

Le théorème de Green relie l'intégrale de surface d'un domaine fermé à la valeur de l'intégrale sur le contour défini par ce domaine. Il est basé sur le théorème de Stokes qui relie le flux du rotationnel d'un champ vectoriel à travers une surface avec la circulation du champ autour de celle-ci. Le théorème de Green est rappelé ci-dessous :

$$\iint_{D_i} \operatorname{div} \mathbf{A} \, dx dy = \int_{\Gamma_i} (\mathbf{A} \cdot \mathbf{n}) \, d\epsilon \quad \text{Eq. 6. 17}$$

D_i est un domaine quelconque ; \mathbf{A} est un vecteur quelconque ; Γ_i est le contour du domaine D_i ; \mathbf{n} est un vecteur normal au contour Γ_i dirigé vers l'extérieur et $d\epsilon$ est un intervalle élémentaire du contour Γ_i .

En appliquant le théorème de Green à l'expression de divergence de l'Equation (6.13), on obtient l'expression suivante :

$$S_i \frac{\partial h_i}{\partial t} = \oint_{\Gamma_i} T_{ik} (\nabla h)_{ik} \cdot \mathbf{n}_{ik} \, d\lambda + q_i \quad \text{Eq. 6. 18}$$

T_{ik} est la transmissivité à l'interface entre l'élément V_i et l'élément V_k ; Γ_i est le segment entre V_i et V_k .

Sous une forme discrète, l'Equation (6.18) devient :

$$S_i \frac{\partial h_i}{\partial t} = \sum \{ T_{ik} \cdot (\nabla h)_{ik} \cdot \mathbf{n}_{ik} \}_{F_{ik}} L_{ik} + q_i \quad \text{Eq. 6. 19}$$

L_{ik} est la longueur du segment entre V_i et V_k ; F_{ik} est un point du segment Γ_i . Le terme de divergence $T_{ik} (\nabla h)_{ik} \cdot \mathbf{n}_{ik}$ de l'Equation (6.19) est l'expression du flux entre un élément du maillage et ses différents voisins. $(\nabla h)_{ik} \cdot \mathbf{n}_{ik}$ est l'expression du gradient à l'interface entre V_i et V_k . Lorsque ce gradient est évalué au milieu de l'interface Γ_i , l'équation (6. 19) est une approximation de second ordre (Tukel, 1985; Murthy and Mathur, 1998). La discrétisation de l'Equation (6. 19) revient donc à rechercher une approximation numérique de ce gradient pour l'évaluation du flux entre les éléments du maillage. Il existe dans la littérature plusieurs méthodes pour l'approximation numérique de ce gradient. Dans le paragraphe suivant, nous allons en présenter quelques unes.

VI.2.2. Discrétisation des flux à l'interface entre deux volumes de contrôle dans la méthode des volumes finis.

Considérons que le domaine à discrétiser soit illustré par la Figure (6.1). Désignons par Ω ce domaine.

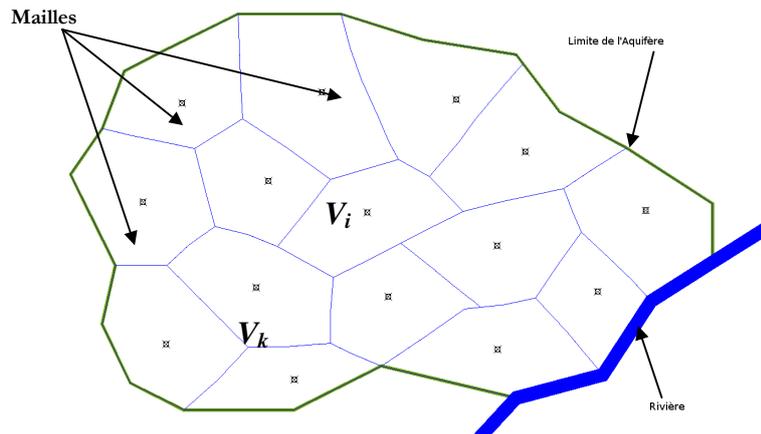


Figure 6. 1 : Illustration d'un domaine aquifère avec des mailles à géométries non-structurées et irrégulières.

Il est à noter que la géométrie des mailles du domaine doit être convexe. Cette condition est requise pour assurer la convergence du schéma numérique choisi pour la discrétisation du gradient. La figure suivante représente le détail d'une interface entre les volumes de contrôle (ou mailles) V_i et V_k . Nous utiliserons cet exemple pour illustrer les schémas d'approximation de flux proposés.

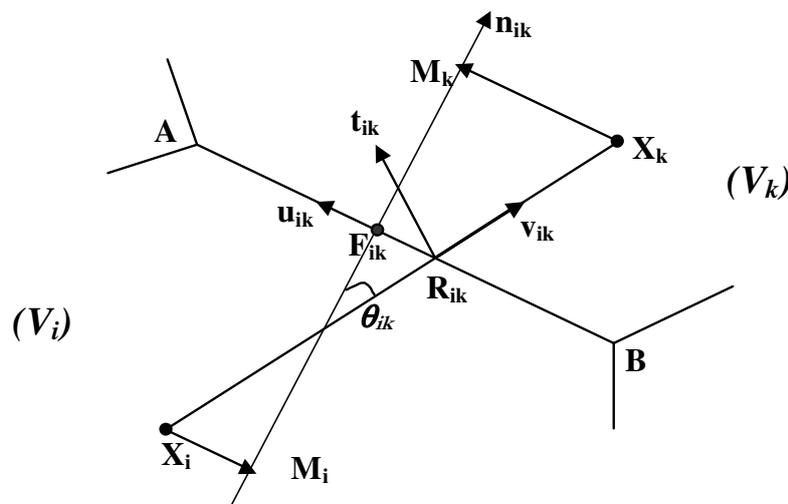


Figure 6. 2 : Illustration d'une interface entre deux éléments du domaine à modéliser

Les notations utilisées dans la suite de ce paragraphe sont résumées dans le Tableau (6.1).

Tableau 6. 1 : Liste des notations utilisées pour la discrétisation en volumes finis

α_i	Rapport $F_{ik}X_k/F_{ik}X_i$.
θ_{ik}	L'angle entre le segment $[x_i, x_k]$ et la normale à l'interface e_{ik} ;
A_i	La surface du volume de contrôle V_i (L^2) ;
d_{ik}	La distance séparant les centres des volumes de contrôle x_i et x_k (L);
d_{ni}	La distance entre la maille V_i et l'interface e_{ik} le long du vecteur v_{ik} (L) ;
e_{ik}	L'interface entre les volumes de contrôle V_i et V_k .
F_{ik}	Le centre de l'interface entre les cellules V_i et V_k .
F_{ib}	Le centre de l'interface entre les cellules V_i et les limites du domaine.
h_i	La charge hydraulique moyenne de la maille V_i (L) ;
h_k	La charge hydraulique moyenne de la maille V_k (L) .
h_b	La charge hydraulique aux frontières du domaine au niveau de la maille V_i (L) .
K_i	La conductivité hydraulique à saturation de la maille V_i (LT^{-1});
L_{ik}	La longueur de la surface d'échange entre V_i et chaque maille adjacente V_k (L).
Γ_i	Le contour du volume de contrôle V_i . $e_{ik} \in \Gamma_i$
m_k	Correspond au vecteur allant du point X_k au point M_k
M_i	Projection de X_i sur la perpendiculaire à l'interface e_{ik} , passant par le point F_{ik}
M_k	Projection de X_k sur la perpendiculaire à l'interface e_{ik} , passant par le point F_{ik}
$M_i M_k$	Le vecteur du point M_i au point M_k
n_{ik}	Le vecteur normal à l'interface e_{ik} de X_i vers X_k ;
N_{vi}	Le nombre de voisins au volume de contrôle V_i .
T_i	Transmissivité du volume de contrôle V_i (L^2T^{-1})
T_{ik}	Transmissivité de l'interface entre les mailles V_i et V_k (L^2T^{-1})
s_i	La vecteur allant du point X_i au point M_i
t_{ik}	Le vecteur perpendiculaire au segment $[x_i, x_k]$;
u_{ik}	Le vecteur parallèle à l'interface e_{ik} ;
V_i	Une maille ou volume de contrôle du domaine
V_k	Mailles adjacentes à V_i .
v_{ik}	Vecteur parallèle au segment $[X_i, X_k]$.
X_i et X_k	Centroïdes des volumes de contrôle i et k .

Comme nous l'annoncions dans le paragraphe précédent, l'expression $T_{ik} (\nabla h)_{ik} \cdot \mathbf{n}_{ik}$ de l'Equation (6. 19) est le flux à travers l'interface e_{ik} , entre les volumes de contrôle V_i et V_k . Plusieurs auteurs ont travaillé sur l'approximation de ce flux (Barth, 1994; Croft, 1998; Hermeline, 2000; Jayantha and Turner, 2001; 2003; 2005). D'une manière générale, l'approximation du flux repose sur la décomposition de l'expression du flux : on ré-écrit le vecteur normal à l'interface \mathbf{n}_{ik} avec le vecteur \mathbf{v}_{ik} qui relie les nœuds adjacents et le vecteur \mathbf{t}_{ik} perpendiculaire à \mathbf{v}_{ik} (voir Figure 6.2). Les méthodes d'approximation du flux peuvent être regroupées en deux catégories : l'approximation nœud à nœud et les techniques d'intégration de second ordre (Jayantha and Turner, 2001).

VI.2.2.a) Les différentes méthodes d'estimation du flux à l'interface entre éléments du maillage

L'approximation du flux dépend de la géométrie du maillage utilisé. Dans le cas des maillages dits *orthogonaux*, le segment de droite reliant les centres des volumes de contrôle est exactement perpendiculaire à l'interface entre les volumes de contrôle. L'angle θ_{ik} est nul. Les maillages dits *non-orthogonaux* sont des cas de maillage plus généraux où l'angle θ_{ik} n'est pas nul (c'est la cas sur la Figure 6.2). L'approximation du flux ($T_{ik} (\nabla h)_{ik} \cdot \mathbf{n}_{ik}$) revient à expliciter le terme de gradient à l'interface $(\nabla h)_{ik} \cdot \mathbf{n}_{ik}$ de l'Equation (6. 19). Nous présentons ici les trois principales méthodes d'approximation du gradient à l'interface utilisées dans la littérature (Jayantha and Turner, 2001).

□ *L'approximation nœud à nœud*

C'est la méthode la plus couramment utilisée, dans le cas des maillages orthogonaux. Le schéma de flux numérique utilisé est linéaire. A l'instant t , le gradient au point F_{ik} entre les volumes de contrôle V_i et V_k peut être évalué par la formule suivante :

$$(\nabla h)_{F_{ik}} \cdot \mathbf{n}_{ik} \approx (\nabla h)_{R_{ik}} \cdot \mathbf{v}_{ik} = \frac{h_{M_k} - h_{M_i}}{\|\mathbf{X}_i \mathbf{X}_k\|} \quad \text{Eq. 6. 20}$$

$\mathbf{X}_i \mathbf{X}_k$ est le vecteur allant du point X_i au point X_k . Ce schéma linéaire, proche des schémas en différences finies, est une approximation du premier ordre et souffre d'imprécisions dues aux erreurs d'arrondis. De plus, ce schéma ne converge que dans les cas où la

distance entre le centre des cellules n'est pas très grande. On parle de convergence conditionnelle (Eymard et al., 1997).

Dans le cas général des maillages non structurés et non-orthogonaux, ce schéma devient imprécis. Le vecteur flux n'est pas toujours normal à la surface d'échange entre les cellules, particulièrement en cas d'anisotropie. La composante tangentielle du gradient ne peut alors être négligée.

Deux techniques ont été introduites pour améliorer la précision de la méthode nœud à nœud. Ces deux techniques sont basées sur une évaluation précise du flux à l'interface ℓ_{ik} entre les volumes de contrôle V_i et V_k au milieu de l'interface (F_{ik}), indépendamment des propriétés du maillage. Cette stratégie permet des approximations de second ordre, plus précises (Jayantha and Turner, 2001). Toutefois, ces techniques nécessitent des schémas d'approximation de gradients aux nœuds des mailles pour le calcul des composantes tangentielles du gradient (voir paragraphe VI.2.2.b). Quatre schémas sont couramment utilisés pour le calcul du gradient à l'interface entre mailles. Ils sont basés sur des méthodes de reconstruction locale du gradient (voir paragraphe VI.2.2 b).

□ **Approximation du flux à travers un point représentatif de l'interface (FR)**

Le point représentatif est un point quelconque sur l'interface entre deux éléments du maillage (exemple, le point R_{ik}).

On peut décomposer le vecteur \mathbf{v}_{ik} suivant les directions des vecteurs orthogonaux \mathbf{n}_{ik} et \mathbf{u}_{ik} :

$$\mathbf{v}_{ik} = (\mathbf{v}_{ik} \cdot \mathbf{n}_{ik}) \cdot \mathbf{n}_{ik} + (\mathbf{v}_{ik} \cdot \mathbf{u}_{ik}) \cdot \mathbf{u}_{ik} \quad \text{Eq. 6. 21}$$

Le gradient à l'interface, au point F_{ik} , peut être écrit sous la forme :

$$(\nabla h)_{F_{ik}} \cdot \mathbf{v}_{ik} = (\mathbf{v}_{ik} \cdot \mathbf{n}_{ik}) (\nabla h)_{F_{ik}} \cdot \mathbf{n}_{ik} + (\mathbf{v}_{ik} \cdot \mathbf{u}_{ik}) (\nabla h)_{F_{ik}} \cdot \mathbf{u}_{ik} \quad \text{Eq. 6. 22}$$

Après ré-arrangement de l'expression ci-dessus, le gradient à l'interface (au point F_{ik}) peut être écrit sous la forme suivante :

$$(\nabla h)_{F_{ik}} \cdot \mathbf{n}_{ik} = \frac{(\nabla h)_{F_{ik}} \cdot \mathbf{v}_{ik}}{\mathbf{v}_{ik} \cdot \mathbf{n}_{ik}} - \frac{\mathbf{v}_{ik} \cdot \mathbf{u}_{ik}}{\mathbf{v}_{ik} \cdot \mathbf{n}_{ik}} (\nabla h)_{F_{ik}} \cdot \mathbf{u}_{ik} \quad \text{Eq. 6. 23}$$

En supposant enfin que la distance entre les points F_{ik} et R_{ik} soit très faible, $(\nabla h)_{F_{ik}}$ peut être remplacé par $(\nabla h)_{R_{ik}}$.

En posant $(\nabla b)_{R_{ik}} \cdot \mathbf{v}_{ik} = (b_k - b_i)$ et $(\nabla b)_{R_{ik}} = \alpha_{ik}(\nabla b)_i + (1 - \alpha_{ik})(\nabla b)_k$, avec $\alpha_{ik} = R_{ik} X_k / X_i X_k$, l'expression du gradient au niveau de l'interface peut donc s'écrire sous la forme suivante :

$$(\nabla b)_{F_{ik}} \cdot \mathbf{n}_{ik} = \frac{b_k - b_i}{\mathbf{v}_{ik} \cdot \mathbf{n}_{ik}} - \frac{\mathbf{v}_{ik} \cdot \mathbf{u}_{ik}}{\mathbf{v}_{ik} \cdot \mathbf{n}_{ik}} [\alpha_{ik} (\nabla b)_{v_i} + (1 - \alpha_{ik}) (\nabla b)_{v_k}] \cdot \mathbf{u}_{ik} \quad \text{Eq. 6. 24}$$

$(\nabla b)_i$ et $(\nabla b)_k$ sont les gradients aux nœuds, respectivement pour les volumes de contrôle V_i et V_k . L'approximation de ce type de gradient sera détaillée dans le prochain paragraphe. Ce schéma repose donc sur la faiblesse de la distance entre F_{ik} et R_{ik} . Dans le cas d'un maillage très irrégulier, comme ce sera probablement notre cas pour les volumes de contrôle, l'hypothèse d'une distance très faible entre les points F_{ik} et R_{ik} peut être inappropriée. Ceci entraînerait une approximation fautive du flux si on utilisait cette méthode. Nous n'utiliserons donc pas cette technique d'approximation.

□ *Approximation du flux à travers le milieu de l'interface (FM)*

En utilisant une approximation de la dérivée suivant la direction \mathbf{n}_{ik} , le gradient suivant cette direction peut s'écrire sous la forme suivante :

$$(\nabla b)_{F_{ik}} \cdot \mathbf{n}_{ik} = \frac{b_{M_k} - b_{M_i}}{\mathbf{v}_{ik} \cdot \mathbf{n}_{ik}} = \frac{b_{M_k} - b_{M_i}}{\|\mathbf{M}_i \mathbf{M}_k\|} \quad \text{Eq. 6. 25}$$

où les points M_i et M_k sont les projections des points X_i et X_k sur la normale à l'interface, passant par le centre de l'interface.

On peut aussi écrire, à partir d'un développement de Taylor :

$$b_{M_k} = b_k + (\nabla b)_k \cdot \mathbf{m}_k \quad \text{et} \quad b_{M_i} = b_i + (\nabla b)_i \cdot \mathbf{s}_i \quad \text{Eq. 6. 26}$$

On obtient alors la formulation du gradient à l'interface suivante :

$$(\nabla b)_{F_{ik}} \cdot \mathbf{n}_{ik} \approx \frac{1}{\|\mathbf{M}_i \mathbf{M}_k\|} (b_k - b_i) + \frac{1}{\|\mathbf{M}_i \mathbf{M}_k\|} [(\nabla b)_k \cdot \mathbf{m}_k - (\nabla b)_i \cdot \mathbf{s}_i] \quad \text{Eq. 6. 27}$$

Parmi les trois méthodes proposées ci-dessus, cette dernière technique nous paraît plus adéquate pour l'approximation des flux entre les volumes de contrôle. Elle sera donc utilisée pour l'approximation du flux dans la méthode proposée. Comme le montre l'expression du flux ci-dessus, cette technique nécessite l'évaluation du gradient $(\nabla b)_i$ aux nœuds. Nous présentons les différentes méthodes numériques d'approximation du gradient aux nœuds $(\nabla b)_i$ dans le paragraphe suivant.

VI.2.2.b) Les méthodes d'approximation du gradient aux noeuds

Il existe quatre méthodes principales d'approximation du gradient aux noeuds, dites reconstruction de type Green Gauss (Jayantha and Turner, 2001). Pour un volume de contrôle donné, l'égalité suivante peut être démontrée en utilisant le théorème de la divergence (Barth, 1994) cité par (Jayantha and Turner, 2001):

$$\int_{\delta v} (\nabla h)_{V_i} \cdot dv = \oint_{\Gamma_i} h \cdot \mathbf{n} \cdot d\lambda \quad \text{Eq. 6. 28}$$

Pour un volume de contrôle donné, le gradient au noeud est évalué à partir de la charge à son interface avec l'ensemble des voisins. Ceci conduit à l'expression suivante qui sera utilisée par toutes les méthodes de reconstruction de gradient présentées dans les prochains paragraphes :

$$(\nabla h)_{V_i} = \frac{1}{A_i} \sum_{N_{ii}} h_{F_{ik}} \cdot \mathbf{n}_{ik} \cdot L_{ik} \quad \text{Eq. 6. 29}$$

□ **Méthode de reconstruction de gradient utilisant un point représentatif (GRF)**

Dans l'expression précédente, la charge hydraulique $h_{F_{ik}}$ est remplacée par la charge hydraulique au niveau du point R_{ik} :

$$h_{R_{ik}} = \alpha_{ik} h_i + (1 - \alpha_{ik}) h_k \quad \text{avec} \quad \alpha_{ik} = R_{ik} X_k / X_i X_k \quad \text{Eq. 6. 30}$$

Le gradient de charge au point V_i peut s'écrire sous la forme suivante :

$$(\nabla h)_i \approx \frac{1}{A_i} \sum_{N_{ii}} [\alpha_{ik} \cdot h_i + (1 - \alpha_{ik}) h_k] \cdot \mathbf{n}_{ik} \cdot L_{ik} \quad \text{Eq. 6. 31}$$

Toutefois, cette approximation n'est pas de second ordre, donc n'est pas très précise surtout avec des géométries complexes.

□ **Méthode de reconstruction de gradient utilisant le milieu, adaptée à la méthode FM (GMF1)**

Dans cette méthode, la charge hydraulique au niveau de l'interface $h_{F_{ik}}$ est estimée en utilisant une approximation du gradient du flux suivant la direction \mathbf{n}_{ik} entre les volumes de contrôle V_i et V_k . En utilisant le théorème des triangles semblables, on peut écrire :

$$\frac{(1-\alpha_{ik})}{\alpha_{ik}} = \frac{M_i F_{ik}}{F_{ik} M_k} = \frac{X_i R_{ik}}{R_{ik} X_k} \quad \text{Eq. 6. 32}$$

En estimant la charge hydraulique au niveau du centre de l'interface comme suit :

$$h_{F_{ik}} = \alpha_{ik} h_i + (1-\alpha_{ik}) h_{M_k} \quad \text{Eq. 6. 33}$$

En exprimant h_{M_i} comme dans l'Equation (6.26), on obtient :

$$h_{F_{ik}} = \alpha_{ik} h_i + (1-\alpha_{ik}) h_k + \alpha_{ik} (\nabla h)_{V_i} \cdot \mathbf{X}_i \mathbf{M}_i + (1-\alpha_{ik}) (\nabla h)_{V_k} \cdot \mathbf{X}_k \mathbf{M}_k \quad \text{Eq. 6. 34}$$

$\mathbf{X}_i \mathbf{M}_i$ est le vecteur allant du point X_i au point M_i et $\mathbf{X}_k \mathbf{M}_k$ est le vecteur allant du point X_k au point M_k . Le gradient au nœud peut être estimé par l'expression suivante :

$$(\nabla h)_i \approx \frac{\Lambda_i^{-1}}{A_i} \sum_{N_{ii}} [\alpha_{ik} h_i + (1-\alpha_{ik}) h_k + (1-\alpha_{ik}) (\nabla h)_k \cdot \mathbf{m}_k] \cdot \mathbf{n}_{ik} L_{ik} \quad \text{Eq. 6. 35}$$

avec

$$\Lambda_i = \mathbf{I} - \frac{1}{A_i} \sum_{k=1}^{N_{ii}} \alpha_{ik} L_{ik} \mathbf{n}_{ik} (\mathbf{s}_i)^T \quad \text{Eq. 6. 36}$$

où \mathbf{I} est la matrice Identité.

Le terme $(\nabla h)_k$ est le gradient aux noeuds des mailles adjacentes.

□ **Méthode de reconstruction de gradient utilisant le milieu (GMF2), adaptée à la méthode (FR)**

Elle est adaptée à la méthode d'évaluation du flux à travers un point représentatif de l'interface. Dans cette méthode, on évalue le gradient au niveau de chaque nœud en évaluant le gradient au point R_{ik} de l'interface :

$$\nabla h_{R_{ik}} \cdot \mathbf{R}_{ik} \mathbf{F}_{ik} \approx h_{F_{ik}} - h_{R_{ik}} \quad \text{Eq. 6. 37}$$

Etant donné que la charge hydraulique au point R_{ik} peut s'exprimer par l'expression $h_{R_{ik}} = \alpha_{ik} h_i + (1 - \alpha_{ik}) h_k$ et que le gradient au même point peut s'écrire sous la forme $(\nabla h)_{R_{ik}} = \alpha_{ik} (\nabla h)_{V_i} + (1 - \alpha_{ik}) (\nabla h)_{V_k}$, la charge au point F_{ik} peut s'écrire :

$$h_{F_{ik}} = \alpha_{ik} h_i + (1 - \alpha_{ik}) h_k + [\alpha_{ik} (\nabla h)_{V_i} + (1 - \alpha_{ik}) (\nabla h)_{V_k}] \cdot \mathbf{R}_{ik} \mathbf{F}_{ik} \quad \text{Eq. 6. 38}$$

$\mathbf{R}_{ik} \mathbf{F}_{ik}$ est le vecteur allant du point R_{ik} au point F_{ik} . Le gradient au nœud peut être approché par l'expression suivante :

$$(\nabla h)_i \approx \frac{\Lambda_i^{-1}}{A_i} \sum_{N_{ii}} [\alpha_{ik} h_i + (1 - \alpha_{ik}) h_k + (1 - \alpha_{ik}) (\nabla h)_k \cdot \mathbf{R}_{ik} \mathbf{F}_{ik}] \cdot \mathbf{n}_{ik} L_{ik} \quad \text{Eq. 6. 39}$$

où

$$\Lambda_i = \mathbf{I} - \frac{1}{A_i} \sum_{k=1}^{N_{ii}} \alpha_{ik} L_{ik} \mathbf{n}_{ik} (\mathbf{s}_i)^T \quad \text{Eq. 6. 40}$$

Dans les deux dernières méthodes d'approximation du gradient aux nœuds, Λ_i est une quantité qui dépend uniquement de la géométrie des éléments du maillage et peut par conséquent être calculée au cours de la procédure de maillage. Pour l'évaluation du terme $(\nabla h)_{V_k}$, il est possible d'utiliser deux méthodes. La première (similaire à la méthode itérative de Gauss-Seidel) consiste à utiliser la dernière information de gradient disponible au niveau des volumes de contrôle voisins. La seconde méthode (similaire à la méthode de Jacobi) consiste à utiliser le gradient uniquement à partir du pas de temps précédent.

□ **Méthode de reconstruction de gradient utilisant la méthode des moindres carrés**

Dans cette méthode d'estimation de gradient, on détermine le gradient qui minimise le système matriciel suivant écrit pour chaque nœud avec ses mailles adjacentes.

Considérons la décomposition du gradient au noeud suivant la composante \mathbf{v}_{ik} exprimée ci-après :

$$(\nabla h)_{V_i} \cdot \mathbf{v}_{ik} = \left(\frac{\partial h}{\partial x} i + \frac{\partial h}{\partial y} j \right) \cdot (\Delta x_k \cdot i + \Delta y_k \cdot j) \approx h_k - h_i \quad \text{Eq. 6. 41}$$

En écrivant la relation ci-dessus pour chaque nœud du domaine, on obtient le système matriciel suivant :

$$\begin{pmatrix} \Delta x_1 & \Delta y_1 \\ \dots & \dots \\ \Delta x_m & \Delta y_m \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \partial h / \partial x \\ \dots \\ \partial h / \partial y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} h_1 - h_i \\ \dots \\ h_m - h_i \end{pmatrix} \text{ ou encore sous forme matricielle, } \mathbf{A} \cdot \mathbf{c} = \mathbf{d} \quad \text{Eq. 6. 42}$$

Les composants du gradient qui minimisent l'expression $\|\mathbf{A} \cdot \mathbf{c} - \mathbf{d}\|^2$ au sens des moindres carrés peuvent être déterminés en résolvant une équation de la forme suivante :

$$\mathbf{A}^T \mathbf{W} \cdot \mathbf{A} \cdot \mathbf{c} = \mathbf{A}^T \mathbf{W} \cdot \mathbf{d}$$

Plus de détails sur cette méthode peuvent être retrouvés dans (Jayantha and Turner, 2001; Jayantha and Turner, 2005).

VI.2.3. Schéma de discrétisation proposé pour la résolution des équations de transfert sur des maillages à géométries irrégulières et non structurées.

VI.2.3.a) Schéma de discrétisation spatiale

Comme nous l'avons montré dans la partie précédente, le schéma de discrétisation spatiale des équations de Boussinesq sur les volumes de contrôle se réduit à l'évaluation des flux entre les éléments du maillage utilisé (Figure 6.1). Pour cela, l'une des formulations du Paragraphe (VI.2.2.a) peut être utilisée. Nous proposons pour le calcul des flux entre volumes de contrôle, d'utiliser la méthode d'approximation du flux au milieu de l'interface (Equation 6.26) en raison de l'irrégularité de la géométrie de l'interface entre les volumes de contrôle. Au besoin, les volumes de contrôle seront redécoupés de façon à satisfaire les contraintes géométriques imposées par la méthode retenue (notamment une contrainte de convexité). Comme nous l'avons vu, cette méthode nécessite de calculer un gradient à l'interface des éléments du maillage. Ce gradient peut être estimé en utilisant l'une des méthodes du paragraphe (VI.2.2.b). Nous allons utiliser la méthode de reconstruction de

gradient GMF1 (Equation. 6.35) qui est adaptée à l'approximation du flux utilisée. Nous aurions aussi pu choisir la méthode des moindres carrés pour cette approximation du gradient. La Figure 6.3 illustre la méthode d'approximation du flux (FM) sur des mailles non structurées et irrégulières.

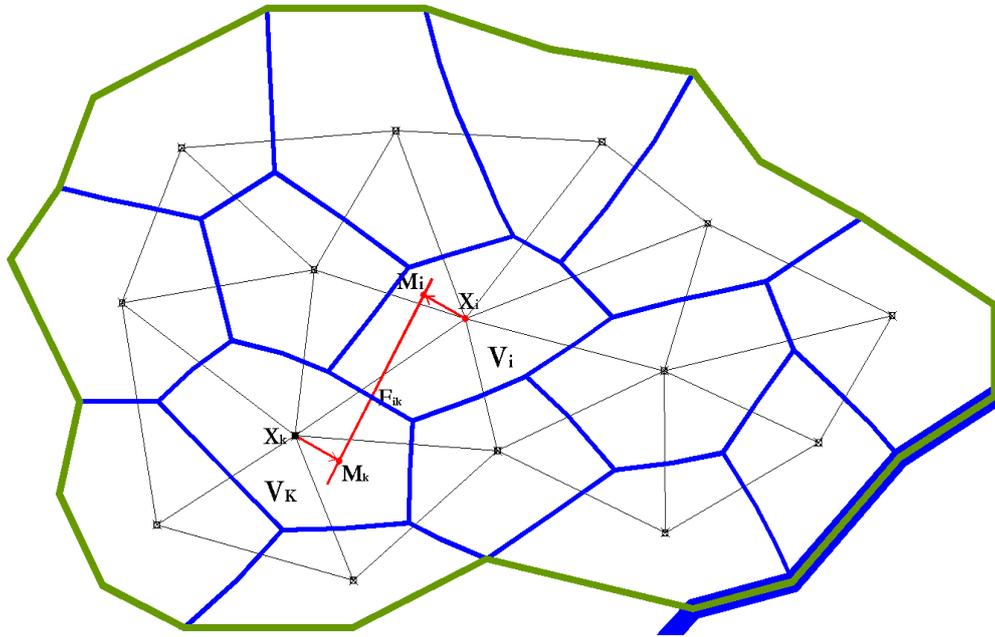


Figure 6. 3 : Illustration de la méthode d'approximation du flux au milieu de l'interface (FM) sur un maillage non-structuré.

VI.2.3.b) Schéma d'intégration temporelle

Le schéma d'intégration temporelle permet de représenter la dynamique du système aquifère dans son ensemble. Il consiste à subdiviser le temps en instants successifs, discrets, où on construit une approximation de la solution inconnue à un instant donné, en utilisant celle des instants précédents connus. En fonction du second membre, on distingue trois méthodes d'intégration temporelle : les méthodes explicites, les méthodes implicites et les méthodes semi-explicites. Dans les méthodes explicites, la solution à l'instant t_n est entièrement déterminée par des valeurs du second membre à des instants précédents (t_{n-1} ou $t_{n-1/2}$). Dans les méthodes implicites, la solution à l'instant t_{n+1} est déterminée avec des valeurs du second membre à l'instant t_{n+1} . Enfin, dans les méthodes semi-implicites, certains termes sont formulés de manière explicite et d'autres sont formulés avec des méthodes implicites. La stabilité numérique des méthodes explicites est liée au pas de discrétisation spatiale et temporelle. Elles sont inadaptées pour des problèmes où les processus simulés varient très vite (Numerical Recipes Software, 1992). Dans ce cas, les méthodes implicites sont mieux adaptées. Nous allons utiliser un schéma de discrétisation implicite pour éviter les risques d'instabilités liés aux méthodes explicites.

En remplaçant l'expression de l'Equation (6.30) dans l'Equation (6.22) et en utilisant l'expression d'approximation du gradient de l'Equation (6.38), l'équation de transfert dans la zone saturée, pour une maille intérieure du domaine de simulation, peut s'écrire sous la forme suivante :

$$\frac{S_i}{\Delta t} (h_i^{(t+1)} - h_i^t) = \sum_{p=t}^{N_{ni}} \frac{T_{ik}^t \cdot L_{ik}}{\llbracket \mathbf{M}_i \mathbf{M}_k \rrbracket} (h_k^{(t+1)} - h_i^{(t+1)}) + \sum_{p=t}^{N_{ni}} \frac{T_{ik}^t \cdot L_{ik}}{\llbracket \mathbf{M}_i \mathbf{M}_k \rrbracket} [(\nabla b)_k^{(t+1)} \cdot \mathbf{m}_k - (\nabla b)_i^{(t+1)} \cdot \mathbf{s}_k] + Q_i$$

Eq. 6. 43

Le gradient aux nœuds $(\nabla b)_i$ à l'instant $(t+1)$ est évalué suivant une méthode similaire à celle de Jacobi, où le gradient et la charge au pas de temps précédent (t) sont utilisés.

La transmissivité $T_{ik'}$ à l'interface entre les volumes de contrôle V_i et V_k , est évaluée par la moyenne harmonique entre la transmissivité de chaque maille T_i . Classiquement, dans les modélisations 2D des transferts dans les nappes souterraines, l'hétérogénéité verticale du sol n'est pas prise en compte (voir par exemple, DHI 2005, pour le modèle MIKE SHE). Nous proposons de lever cette limitation en prenant explicitement en compte cette hétérogénéité verticale dans le calcul de la transmissivité. La valeur de cette dernière pour chaque maille T_i , est calculée comme l'intégrale de la conductivité hydraulique sur toute l'épaisseur saturée :

$$T_i = \int K_j dz \quad \text{ou encore} \quad T_i = \sum_{j=1}^{N_j} K_j \cdot e_j \quad \text{Eq. 6. 44}$$

K_j est la conductivité de l'horizon j et e_j est l'épaisseur saturée de ce même horizon. N_j est le nombre de couches (horizons) Nous avons utilisé une évaluation explicite de la transmissivité, c'est-à-dire que la valeur de l'épaisseur de l'aquifère à l'instant précédent est utilisée pour ce calcul.

VI.2.3.c) Spécification des conditions aux limites

L'équation (6.43) est valable uniquement pour les nœuds intérieurs au domaine de simulation. En ce qui concerne les nœuds aux limites du domaine, ils peuvent être soumis à différentes conditions aux limites. Au niveau physique, on distingue trois types de conditions aux limites : les conditions aux limites à valeurs imposées ou conditions de Dirichlet, les conditions aux limites à flux imposés ou conditions de Neuman (exemple : limites à flux nul) et les conditions aux limites mixtes ou à valeurs dépendantes d'un flux. L'équation de transfert au niveau de ces mailles peut s'écrire sous la forme suivante :

$$S_i \frac{1}{\Delta t} (h_i^{(t+1)} - h_i^{(t)}) = \sum_{\Gamma_i} \left\langle T_{ik}^{t+1} (\nabla h)_{F_{ik}}^{t+1} \cdot \mathbf{n}_k \right\rangle \cdot L_k + \sum_{\Gamma_b} T_{ib}^{t+1} \cdot (\nabla h)_{F_b} \cdot \mathbf{n}_{ib} \cdot L_{ib} + Q_i^{t+1} \quad \text{Eq. 6.45}$$

F_{ib} est le centre du segment appartenant à la limite du domaine et à la maille courante V_i ; L_{ib} est la longueur du segment de la limite; N_{ib} est le nombre de segments de la maille courante à la limite du domaine; \mathbf{n}_{ib} est le vecteur normal sortant au milieu de l'interface entre la maille V_i et la limite du domaine (voir Figure 6.4) :

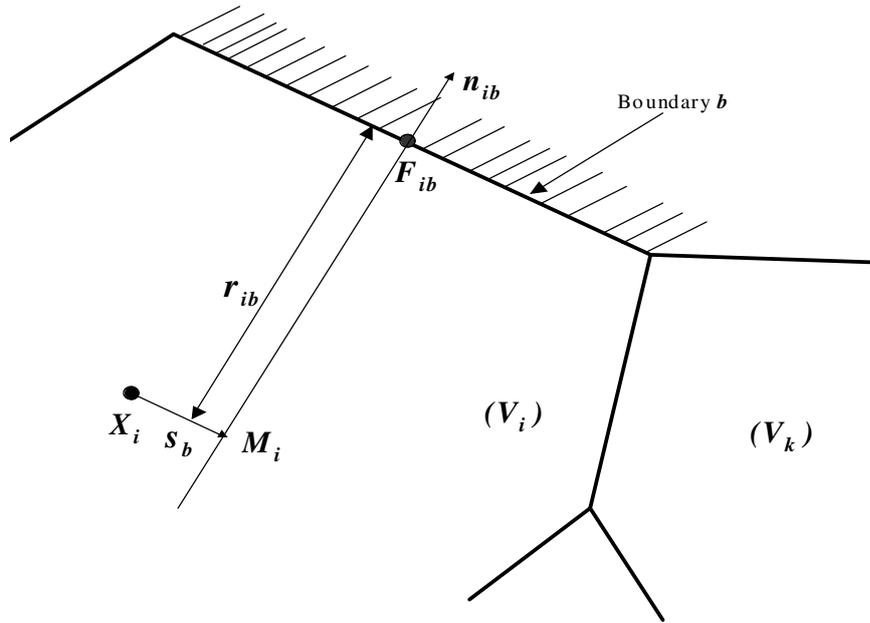


Figure 6.4 : Exemple d'interface entre une maille et les limites du domaine.

□ **Cas des conditions aux limites à charge imposée aux limites du domaine.**

Les flux aux frontières du domaine dépendent de la charge hydraulique imposée à la limite de sa maille. Comme dans l'Equation (6.25), le gradient à l'interface peut être évalué en utilisant l'expression suivante :

$$(\nabla h_{F_b}) \cdot \mathbf{n}_{ib} \approx \frac{1}{\|\mathbf{r}_{ib}\|} (h_b - h_{M_i}) \quad \text{Eq. 6. 46}$$

La charge hydraulique h_{M_i} peut être remplacée par son expression de l'Equation (6.26). Le gradient ci-dessus devient alors :

$$(\nabla h_{F_b}) \cdot \mathbf{n}_{ib} \approx \frac{1}{\|\mathbf{r}_{ib}\|} [h_b - h_i + (\nabla h)_i \cdot \mathbf{s}_b] \quad \text{Eq. 6. 47}$$

Le gradient au nœud $(\nabla h)_i$ peut être exprimé par l'expression :

$$(\nabla h)_i \approx \frac{\Lambda_i^{-1}}{A_i} \sum_{n=1}^{N_{ni}} [\alpha_{ik} h_i + (1-\alpha) h_k + (1-\alpha_{ik})(\nabla h)_k \cdot \mathbf{m}_k] \cdot \mathbf{n}_{ik} L_{ik} + \frac{\Lambda_i^{-1}}{A_i} \sum_{b=1}^{N_b} h_b \mathbf{n}_{ib} L_{ib} \quad \text{Eq. 6. 48}$$

L'équation de transfert pour les nœuds à la frontière du domaine peut alors s'écrire :

$$\begin{aligned} \frac{S_i}{\Delta t} (h_i^{(t+\Delta t)} - h_i^t) &= \sum_{k=1}^{N_{ni}} \frac{T_{ik}^t \cdot L_{ik}}{\|\mathbf{M}_i \mathbf{M}_k\|} (h_k^{(t+\Delta t)} - h_i^{(t+\Delta t)}) \\ &+ \sum_{k=1}^{N_{ni}} \frac{T_{ik}^t \cdot L_{ik}}{\|\mathbf{M}_i \mathbf{M}_k\|} [(\nabla h)_k^{(t+\Delta t)} \cdot \mathbf{m}_k - (\nabla h)_i^{(t+\Delta t)} \cdot \mathbf{s}_k] + \sum_{b=1}^{N_b} T_i \frac{1}{\|\mathbf{r}_{ib}\|} [h_b - h_i + (\nabla h)_i \cdot \mathbf{s}_b] \cdot L_{ib} + q_i \end{aligned} \quad \text{Eq. 6. 49}$$

□ **Cas des conditions aux limites à flux imposé**

Supposons qu'un flux q_b soit injecté aux limites du système. L'équation de transfert pour les mailles aux limites peut être écrite de la manière suivante :

$$\begin{aligned} \frac{S_i}{\Delta t} (h_i^{(t+\Delta t)} - h_i^t) &= \sum_{k=1}^{N_{ni}} \frac{T_{ik}^t \cdot L_{ik}}{\|\mathbf{M}_i \mathbf{M}_k\|} (h_k^{(t+\Delta t)} - h_i^{(t+\Delta t)}) \\ &+ \sum_{k=1}^{N_{ni}} \frac{T_{ik}^t \cdot L_{ik}}{\|\mathbf{M}_i \mathbf{M}_k\|} [(\nabla h)_k^{(t+\Delta t)} \cdot \mathbf{m}_k - (\nabla h)_i^{(t+\Delta t)} \cdot \mathbf{s}_k] + \sum_{b=1}^{N_b} q_{ib} \cdot L_{ib} + q_i \end{aligned} \quad \text{Eq. 6. 50}$$

VI.2.3.d) Construction et résolution du système linéaire

La discrétisation des équations de transfert pour chaque noeud du système permet d'obtenir un système d'équations de N_{ni} éléments à N_{ni} inconnues, sous la forme :

$$\mathbf{A} \cdot \mathbf{h} = \mathbf{b}$$

\mathbf{A} est une matrice carrée $N_{ni} \times N_{ni}$; \mathbf{h} est le vecteur des N_{ni} charges hydrauliques (b_i) des éléments du domaine ; \mathbf{b} est le vecteur des N_{ni} seconds membres. Compte tenu de l'irrégularité du maillage et du nombre quelconque de voisins associés à une maille donnée, il s'agit ici d'un système matriciel creux dont la résolution nécessite des méthodes numériques adaptées.

□ Méthode de résolution adoptée dans cette thèse

La résolution du système linéaire a été effectuée en utilisant une méthode itérative. Plus précisément, la méthode du Gradient Conjugué Stabilisé BI-CGSTAB proposée par Van der Vorst (1992) a été utilisée en raison de son efficacité prouvée dans la résolution des systèmes linéaires creux. La librairie de résolution des systèmes linéaires ITL⁵³ a été utilisée dans le cadre de cette thèse.

Dans ce chapitre nous avons présenté une approche de résolution de l'équation de Boussinesq sur des mailles non-structurées et irrégulières, basée sur la méthode des volumes finis. Cette approche a servi de base à la conception d'un modèle de simulation des écoulements souterrains. Dans le prochain chapitre nous allons présenter l'implémentation informatique et la vérification de ce modèle.

⁵³ <http://osl.iu.edu/research/itl/>

CHAPITRE VII "Mise en œuvre et vérification du module nappe"

La méthode de résolution proposée dans le chapitre (VI) a été utilisée pour développer un modèle de simulation en deux dimensions (2D), des écoulements dans la zone saturée du sol : le modèle **BOUSS2D**. Il permet de simuler les transferts dans les aquifères libres. L'implémentation de ce modèle dans la plate-forme LIQUID (dont il forme un composant ou module) est présentée dans la première partie de ce chapitre. Une fois le module implémenté, nous avons réalisé différents tests de vérification afin de valider l'algorithme utilisé et en quantifier la précision. Pour cela, nous nous sommes basés sur des configurations simplifiées d'aquifères.

Les tests effectués pour la vérification du module peuvent être divisés en deux parties. Dans un premier temps, l'exemple d'écoulements souterrains a été choisi de manière à pouvoir faire des comparaisons avec des solutions analytiques et des modèles de référence. Deux exemples ont été choisis à cet effet. Le premier est un test de pompage réalisé sur un aquifère homogène. Le second exemple choisi est celui des écoulements dans un aquifère où une charge hydraulique est imposée sur les limites du domaine. Dans les deux cas, des solutions analytiques existent et nous ont servi de référence pour évaluer la convergence et la précision de l'algorithme de résolution utilisé. Nous avons aussi évalué la capacité de la méthode choisie à prendre en compte les maillages irréguliers et/ou non-structurés pour ces différents scénarios testés.

Dans la seconde partie, les vérifications présentées utilisent des aquifères ayant des configurations proches des conditions naturelles. Les résultats sont comparés avec ceux de modèles standards considérés comme des modèles de référence. Plus précisément, la capacité du modèle à gérer des aquifères multi-couches a été testée par une comparaison avec un modèle en trois dimensions. La capacité du module à gérer un maillage à géométries complexes, et à gérer des discontinuités a été aussi testée et quantifiée.

Les performances du modèle ont été évaluées qualitativement à travers des comparaisons graphiques, ainsi que quantitativement avec l'utilisation de critères d'évaluation statistiques. Les critères d'évaluation utilisés sont les suivants : l'écart moyen quadratique, (*RMSE* pour Root Mean Square Error), l'erreur relative (*RE* pour Relative Error) et l'erreur maximum (*ME* pour Maximum Error).

Le critère *RMSE* est évalué avec l'expression suivante :

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_i^n (h_i - h^{ref})^2}{n}} \quad \text{Eq. 7.1}$$

1

où h_i représente la charge hydraulique calculée par le modèle et h^{ref} la charge hydraulique de référence ; n est le nombre de mailles du domaine.

L'erreur relative est calculée grâce à la formule :

$$RE = \frac{1}{n} \sum_n \left| \frac{h_i - h^{ref}}{h^{ref}} \right| \quad \text{Eq. 7.2}$$

où h_i représente la charge hydraulique calculée par le modèle et h^{ref} la charge hydraulique de référence.

L'erreur maximum (*ME*) est la différence maximum entre la charge hydraulique calculée (h_i) par le modèle et la charge hydraulique de référence (h^{ref}). Elle est évaluée par la formule : $ME = \text{Max} (|h_i - h^{ref}|)$.

Dans un premier temps nous avons comparé les résultats du modèle avec les solutions analytiques. Les comparaisons entre les résultats du modèle et ceux des modèles existants ont été réalisées afin de positionner les résultats de notre modèle par rapport à des modèles de référence, lorsque des solutions analytiques des scénarios étudiés existent. Mais une telle comparaison est surtout intéressante avec des configurations d'écoulements où il n'existe pas de solution analytique. Pour cette comparaison, les modèles de modélisation hydrogéologique MODFLOW (McDonald and Harbaugh, 1988) et le module saturé du modèle hydrologique MIKE_SHE (Abbott et al., 1986a, 1986b) ont été utilisés. Les simulations avec les modèles MODFLOW et MIKE_SHE ont été réalisées

par Raoul VAZQUEZ (Centro de Investigación y Tecnología Agroalimentaria de Aragón, Zaragoza, Espagne) lors d'un séjour de 3 mois à l'UR Hydrologie-Hydraulique du Cemagref de Lyon (Vazquez, 2007).

VII.1. Architecture du module *BOUSS2D* et implantation dans la plate-forme LIQUID

VII.1.1. Description des objets au sein du module *BOUSS2D*

Comme nous l'avons annoncé dans l'introduction, la solution de discrétisation des équations de Boussinesq proposée dans le chapitre précédent, a servi à créer un modèle de simulation des écoulements souterrains dans des aquifères libres : le modèle *BOUSS2D*. Conformément à ce que nous avons proposé au Chapitre (IV), la discrétisation de l'espace fait intervenir les objets suivants, qui serviront de base à la conception orientée objet du module :

- L'objet '*Colonne*' (*CColonne*) représente une colonne de sol, dont la géométrie irrégulière en surface correspond à celle de la zone non saturée au-dessous (cf Chapitre IV et Figure 7.1). L'ensemble de l'aquifère est divisé en un ensemble de colonnes sur lesquelles sont résolues, de manière implicite, l'ensemble des équations discrétisées (chapitre VI).
- L'objet '*Interface*' (*CInterface*) représente une interface entre deux colonnes. C'est sur cette interface que sont effectués les calculs du flux entre deux colonnes. Il faut noter qu'une colonne de sol possède autant d'interfaces qu'elle a de colonnes de sol voisines.
- L'objet '*Horizon*' (*CHorizon*) correspond à la discrétisation du sol en horizons de sols ou strates, caractérisés par leur épaisseur, et leur type de sol.
- L'objet '*Sol*' (*CSoil*) permet de caractériser les propriétés hydrodynamiques d'un sol au travers d'un certain nombre de paramètres caractéristiques tels que la conductivité hydraulique à saturation et le coefficient d'emménagement spécifique.
- L'objet '*Solver*' (*CSolver*) existe dans tous les modules de la plate-forme LIQUID. Il sert de « moteur » au module, en permettant de lancer les simulations, de résoudre les

équations pour chaque pas de temps, de calculer le nouveau pas de temps, de recevoir les signaux provenant d'autres modules, et d'émettre les résultats des calculs vers les fichiers de sortie ou vers d'autres modules.

La figure (7.1) illustre les objets modélisés lors de la conception du module **BOUSS2D**.

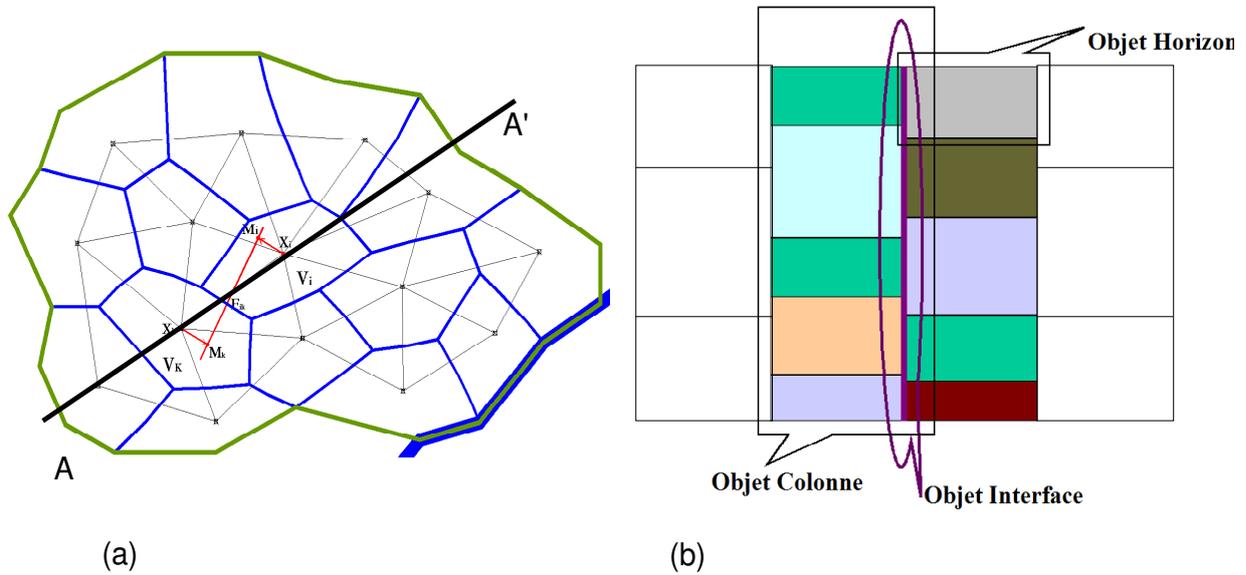


Figure 7. 1 : Illustration des principaux objets du modèle **BOUSS2D**. (a) exemple de maillage utilisé (b) Objets correspondants à la trace AA' du maillage.

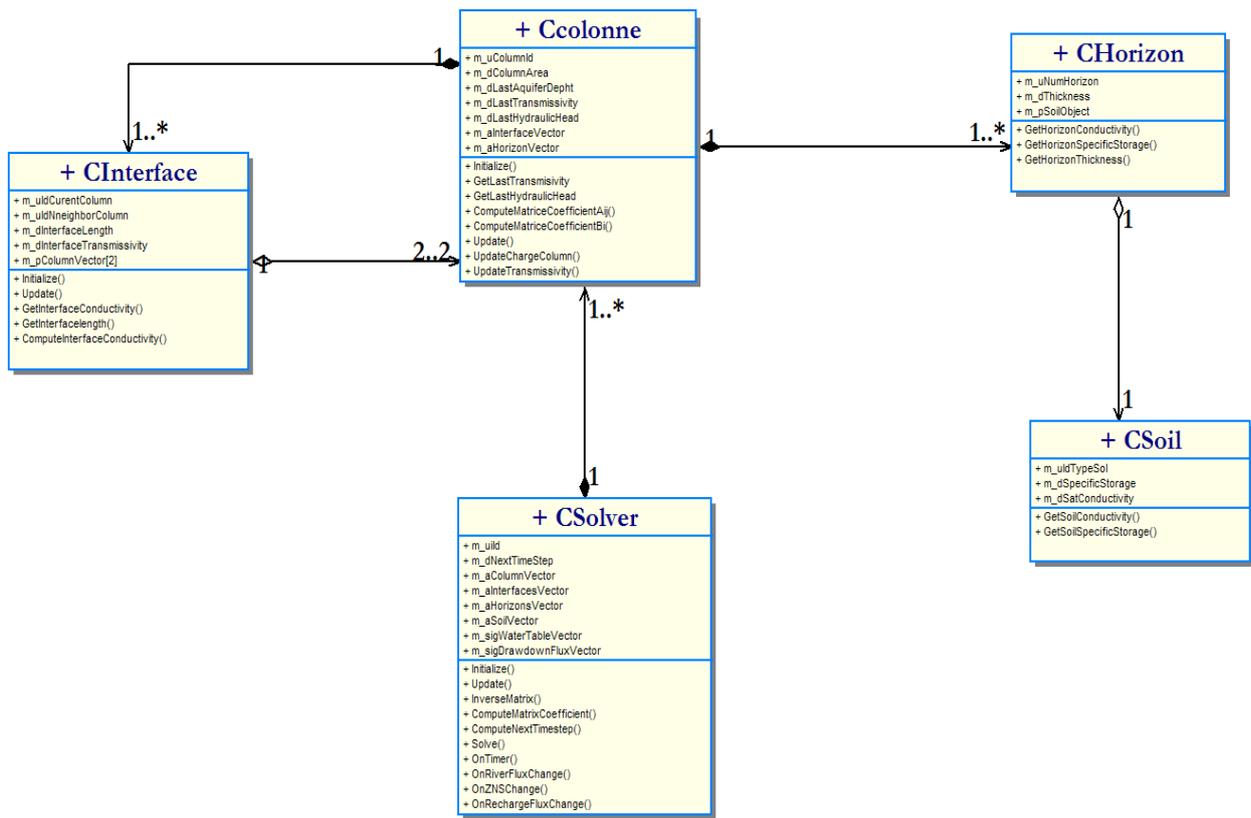


Figure 7. 2 : Diagramme de classes du modèle *BOUSS2D*.

L'analyse du système aquifère, des données nécessaires à la discrétisation des équations de Boussinesq et de la structure des données sur le sol ont permis de proposer un diagramme de classes, pour la modélisation orientée objet. Ce diagramme est présenté Figure (7.2). Il s'appuie sur les objets identifiés précédemment. Chaque objet (classe) dispose de propriétés et de méthodes lui permettant d'interagir avec les autres objets du module.

VII.1.2. Fonctionnement des objets et du module *BOUSS2D*

Chaque objet présenté sur la Figure (7.1) est doté d'attributs permettant de décrire son état ou ses caractéristiques et de fonctions lui permettant de répondre à des sollicitations extérieures (soit pour mettre à jour ses variables internes ou soit pour renvoyer des valeurs).

L'objet ***CSoil*** décrit les paramètres hydrodynamiques des types de sols associés aux différents horizons. Les principaux paramètres de l'objet ***CSoil*** sont la conductivité hydraulique (*m_dSoilConductivity*) et l'emmagasinement spécifique (*m_dSpecificStorage*). ***CSoil*** est aussi doté de fonctions lui permettant essentiellement de renvoyer les valeurs de ses paramètres hydrodynamiques (*GetSoilConductivity()* et *GetSpecificStorage()*).

L'objet ***CHorizon*** décrit les horizons de la colonne de sol. Il est associé à un objet ***CSoil*** (*m_pSol*) permettant d'associer des paramètres hydrodynamiques spécifiques aux horizons. Il est caractérisé aussi par son épaisseur (*m_dThickness*) et son numéro d'ordre dans le profil de sol (*m_uiNumHorizon*). Il est doté de fonctions élémentaires pour le renvoi des paramètres du sol qui lui sont associés (*GetHorizonConductivity()* et *GetHorizonSpecificStorage()*).

L'objet ***CColonne*** est caractérisé par un profil composé d'un vecteur d'objets ***CHorizon*** (*m_aHorizonVector*). Il est aussi caractérisé par sa surface (*m_dColumnArea*), et sa charge hydraulique (*m_dLastHydraulicHead*), la transmissivité (*m_dLastTransmissivity*) et l'épaisseur saturée (*m_dLastAquiferDepth*), qui sont des variables transitoires calculées à chaque pas de temps. Il est aussi composé d'objets ***CInterface*** (*m_aInterfaceVector*) permettant les échanges entre objets ***CColonne***. Les objets ***CColonne*** sont dotés de

fonctions pour l'initialisation et la mise à jour de leurs variables transitoires telles que la Transmissivité, (*Initialize()* et *Update()*) et de fonctions leur permettant de calculer les coefficients nécessaires à l'inversion de la matrice.

L'objet **CInterface** sert à caractériser l'interface entre deux objets **CColonne**. Il sert à calculer la transmissivité d'interface entre deux colonnes de sol. Il est caractérisé par un vecteur de l'objet **CColonne** permettant d'identifier les colonnes auxquelles il est associé (*m_aColumnVector*). Il est aussi doté d'une variable caractérisant la longueur de l'interface (*m_dInterfaceLength*), d'une variable caractérisant la transmissivité de l'interface (*m_dInterfaceTransmissivity*), de fonctions permettant de mettre à jour sa transmissivité (*UpdateTransmissivity()*) et d'une fonction de renvoi de sa transmissivité à d'autres objets (*GetInterfaceTransmissivity()*).

L'objet **CSolver** sert à gérer le fonctionnement spatial et temporel du module. Il comporte plusieurs instances des objets décrits dans le paragraphe précédent. Ceci lui permet de représenter le système à modéliser avec les objets décrits ci-dessus et avec l'organisation spatiale de ces objets entre eux. Ces objets sont représentés au sein de l'objet **CSolver** par des vecteurs de variables correspondants aux instances des objets **CColonne** (*m_aColumnVector*), **CInterface** (*m_aInterfacesVector*), **CHorizon** (*m_aHorizonVector*) et **CSoil** (*m_aSoilVector*). L'objet **CSolver** comporte des variables lui permettant de gérer le déroulement de la simulation en paramétrant son prochain pas de temps de calcul (*m_dNextTimeStep*). Des fonctions de base de **CSolver** permettent l'initialisation, la mise à jour de tous les objets du module (*Initialize()*, *Update()*). La fonction *Solve()* permet d'effectuer l'ensemble des calculs nécessaires à la mise à jour de la charge hydraulique dans tout le système. La fonction *OnTimer()* est une fonction générique permettant de gérer l'évolution temporelle du module en activant son pas de temps. Au niveau des interfaces avec d'autres modules, l'objet **CSolver** est le lieu où sont stockés les mécanismes permettant les échanges de variables avec d'autres modules (signaux et slots). Les signaux servent à émettre des valeurs (charges hydrauliques ou flux) après la mise à jour des charges hydrauliques calculées (exemple : *m_sigWaterTableVector* ou *m_sigDrawdownFluxVector*). Ces signaux peuvent être reçus par les modules tels que des modules de simulation des échanges entre la nappe et la rivière et des modules de

simulation des écoulements dans la zone non saturée du sol. Des fonctions de l'objet **CSolver** (Slot) permettent aussi d'utiliser des recharges provenant d'un module de simulation de la zone non-saturée (*OnFluxChange()*) ou de la rivière (*OnRiverFluxChange()*). Plus de détails sur les mécanismes d'échanges entre modules seront donnés dans le Chapitre (VIII).

Après avoir créé le modèle BOUSS2D à partir des objets présentés ci-dessus, nous allons évaluer la précision et les propriétés de convergence de l'algorithme de résolution des équations de Boussinesq que nous avons implémenté. Nous allons également évaluer sa capacité à gérer des maillages irréguliers et non structurés. Dans les paragraphes suivants, nous allons nous appuyer sur des scénarios d'écoulements simplifiés pour tester la robustesse de la solution numérique proposée.

VII.2. Tests de vérification pour un aquifère uniforme et homogène

Dans ce paragraphe, nous avons simulé un aquifère homogène, isotrope et horizontal dont les caractéristiques sont présentés dans le Tableau (7.1) :

Tableau 7. 1 : Paramètres hydrodynamiques de l'aquifère à modéliser

Paramètres	Valeurs
Extension de l'aquifère	$210m \times 210m$
Résolution des mailles	$10m$
Altitude de la surface	$Z_0 = 0m$
Altitude du mur de l'aquifère	$Z_{fond} = -60m$
Charge hydraulique initiale	$h_0 = -30m$
Conductivité hydraulique	$K = 2.10^{-5}ms^{-1}$
Coefficient d'emmagasinement spécifique	$S = 0.15 (m/m)$
Porosité	$n = 0.45$

On considère que le mur de la formation aquifère est horizontal et totalement imperméable. Deux types de simulation (regroupant quatre tests) ont été menés pour la vérification des résultats du modèle. Le premier type consiste à imposer aux limites du domaine (à l'amont et à l'aval) des charges imposées et à analyser les résultats du modèle après avoir atteint le régime d'équilibre. Les deux premiers tests permettront donc de vérifier la sensibilité du modèle **BOUSS2D** à la résolution du maillage utilisé et à la forme des mailles. Dans le second type de test, nous allons simuler deux tests de pompage à débit constant. Le premier test de pompage a des caractéristiques permettant d'effectuer une comparaison avec une solution analytique. Pour le deuxième test, seules des comparaisons avec les modèles de référence sont possibles.

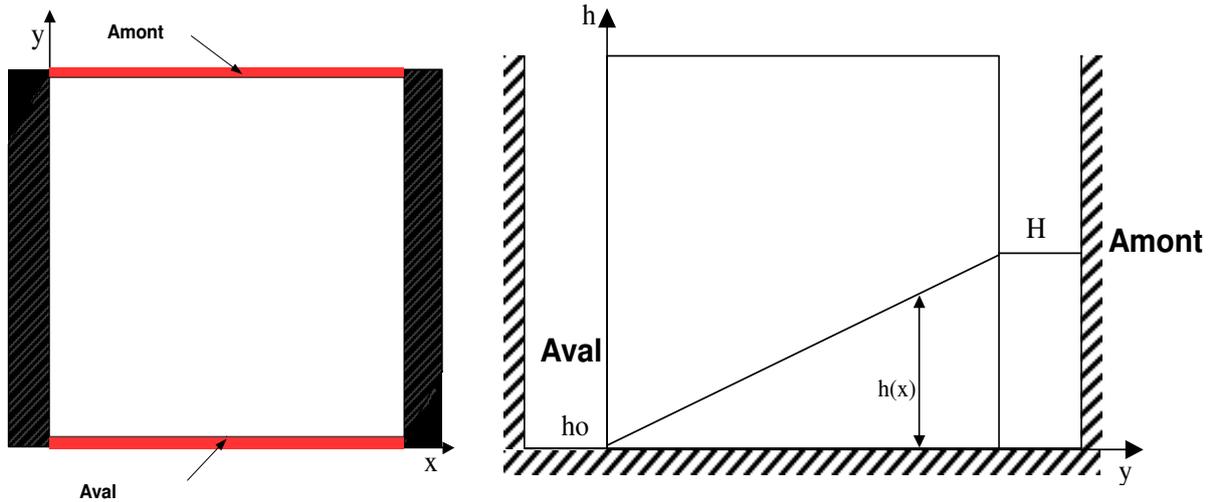


Figure 7. 3 : Configuration de l'aquifère homogène pour les tests en condition de charge imposée à l'amont et à l'aval.

VII.2.1. Test en charges imposées : sensibilité à la résolution du maillage

A l'amont et à l'aval du domaine, on applique respectivement les charges de $21m$ et de $0m$ au début des simulations. On simule l'évolution du système jusqu'au régime permanent. Les conditions aux limites peuvent être résumées comme ci-après :

$$h_0 = h(x, 0) = 0m$$

$$h(x, 21) = 21 m$$

$$\Delta h = 0 \text{ sur } [0, 210m] \times [0, 210m]$$

$$\frac{\partial h}{\partial x}(0, y) = \frac{\partial h}{\partial x}(210, y) = 0 \text{ (Condition de flux nul).}$$

A l'équilibre, la solution de ce problème peut être obtenue grâce à l'équation de Laplace :

$$\nabla^2 h = 0 \tag{Eq. 7.3}$$

3

En tenant compte des conditions aux limites, l'équation de Laplace ci-dessus peut alors être écrite de la manière suivante :

$$\frac{d^2 h}{d y^2} = 0 \quad \frac{d h}{d y} = \frac{(H - h_0)}{210} = 0.1 \tag{Eq. 7.4}$$

4

La solution exacte de l'Equation (7.4) est donnée par l'équation ci-dessous.

$$h(y) = y * 0.1$$

Eq. 7.5

L'écoulement est plan, c'est-à-dire invariant dans toute translation perpendiculaire à la direction amont-aval.

Nous avons utilisé dans ce test, deux maillages non orthogonaux avec des mailles de différentes résolutions (l'une grossière et l'autre plus fine) pour évaluer l'effet de la résolution spatiale sur la simulation des écoulements souterrains dans le modèle *BOUSS2D* ainsi que pour vérifier la convergence de notre algorithme. La surface moyenne des éléments des deux maillages sont respectivement de 900 m² pour la maille grossière et de 105 m² pour la maille fine (soit environ un facteur de 9 entre les deux résolutions). La figure (7.4) présente pour les deux maillages : à gauche, les maillages utilisés ; au centre : les cartes piézométriques ; à droite : les valeurs $h(y)$ calculées ainsi que la solution analytique (trait plein). Cette figure montre que les résultats du modèle sont satisfaisants, avec un profil de dépression s'ajustant parfaitement à la solution de l'équation de Laplace $h(y) = 0.1y$.

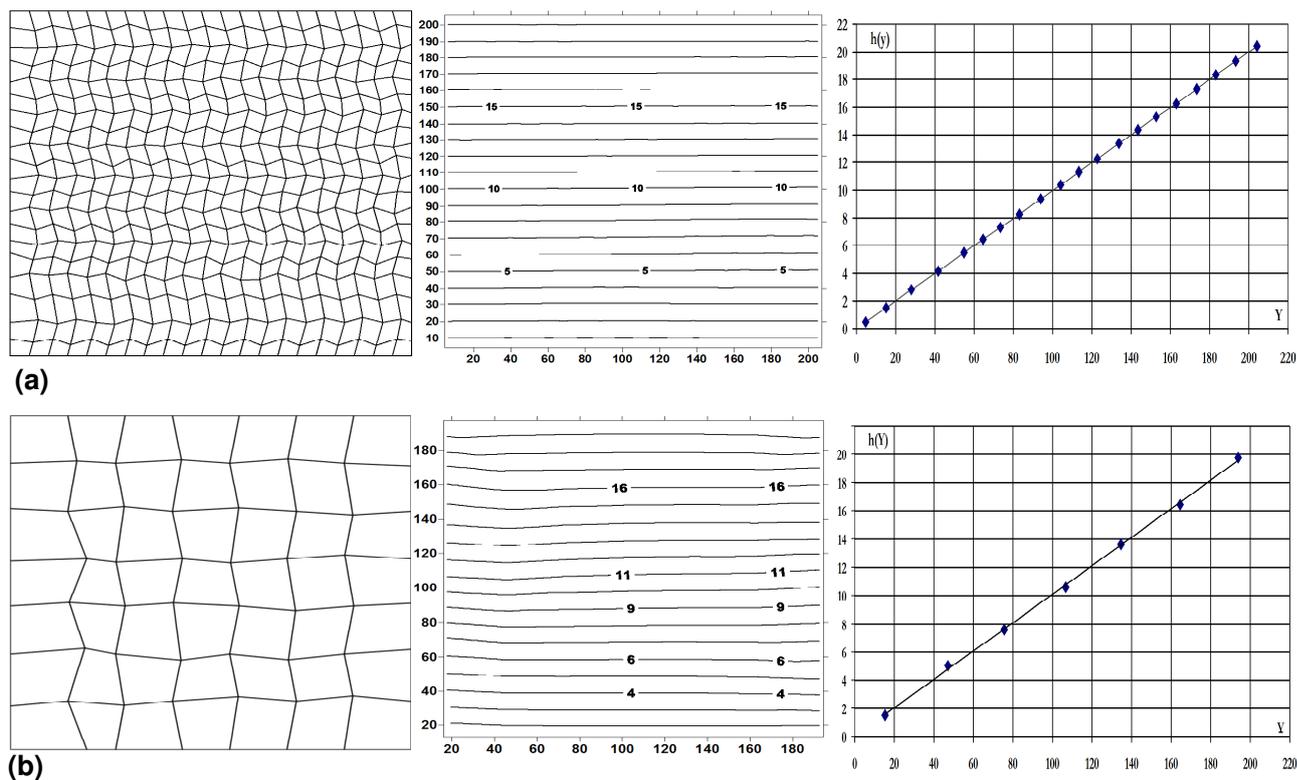


Figure 7. 4 : Gauche : maillages utilisés; Centre : cartes piézométriques ; Droite : graphes $h(y)$ calculés (points) et solution analytique (trait plein) pour les deux maillages utilisés.

Le Tableau (7.2) présente les résultats de la comparaison entre la solution numérique (**BOUSS2D**) et la solution analytique. Les résultats montrent d'abord que, dans les deux cas, les résultats obtenus s'ajustent bien à la solution analytique attendue pour le problème étudié (Figure 7.4 - Droite). Dans le Tableau (7.2), les erreurs relatives sont en-dessous de 1%. Ces résultats montrent également que plus le maillage est fin et plus les résultats convergent vers la solution exacte, conformément à ce qui est attendu. En effet, tous les critères d'évaluation des erreurs présentés dans le Tableau (7.2) montrent que la solution obtenue avec un maillage fin génère de meilleures performances pour les différents critères utilisés. Ceci montre que le modèle **BOUSS2D** est sensible à la résolution des mailles utilisées, même si les résultats présentés sur la Figure (7.4) pour un maillage relativement grossier paraissent satisfaisants.

Tableau 7. 2 : Comparaison des statistiques sur les écarts entre solutions numériques et solution analytique pour un maillage fin et un maillage grossier.

	RE (%)	ME (m)	RMSE (m)
Maillage fin (Fig.7.4a)	0,0995	0,0024	0,0009
Maillage Grossier (Fig.7.4b)	1,6851	0,0679	0,0044

VII.2.2. Test en charges imposées : sensibilité à la forme du maillage

Dans ce test, les charges imposées à l'amont et à l'aval de l'aquifère sont les mêmes que dans le test précédent ($H=21m$, $h_0=0m$). Nous avons utilisé différents types de maillage afin de tester la capacité du modèle **BOUSS2D** à prendre en compte des mailles non structurées et irrégulières dans la simulation des écoulements souterrains. Quatre types de maillage, représentant des niveaux de complexité différents, ont été testés : un maillage carré, un maillage hexagonal (ou en nid d'abeille), un maillage non orthogonal (distordu) et un maillage complètement non structuré avec des mailles irrégulières (Figure 7.5, colonne de gauche).

Avec les mêmes conditions aux limites que dans le test précédent, la solution pour la charge hydraulique en régime permanent est donnée par l'Equation (7.5). Les écoulements sont plans comme précédemment et les isolignes parallèles. La Figure (7.5) présente les résultats obtenus avec les différents maillages proposés : au centre, les cartes d'isopièzes et à droite, la courbe $h(y)$ calculée (points) ainsi que la solution analytique en trait plein. Les résultats graphiques montrent qu'avec tous les types de maillage, les résultats obtenus coïncident avec les résultats théoriques.

Ceci est confirmé par les statistiques présentées dans le Tableau (7.3), qui compare les résultats de **BOUSS2D** par rapport aux résultats exacts respectivement pour les mailles

formées de grilles régulières, irrégulières et non structurées. Cette évaluation est faite en utilisant les différents critères présentés en introduction de ce chapitre. On remarque qu'indépendamment des formes des mailles utilisées, les critères sont très satisfaisants pour l'ensemble des maillages. Pour des mailles carrées on remarque que les résultats obtenus sont exactement égaux avec les résultats de la solution analytique attendue. Ceci pourrait s'expliquer par le fait que la solution numérique proposée coïncide avec la solution analytique de l'Equation (7.5). Pour les autres mailles, on peut également noter que les résultats sont assez proches de la solution analytique avec des erreurs relatives de moins de 0.1%. On peut alors souligner qu'il n'y a pas de diminution des performances pour des maillages fortement non structurés. Ceci prouve ainsi la capacité du modèle **BOUSS2D** à utiliser des mailles de diverses formes pour simuler les écoulements souterrains.

Tableau 7. 3 : Erreur Relative (RE), Erreur quadratique Moyenne RMSE et Erreur maximum en fonction du maillage utilisé.

Type de maillage	RE (%)	RMSE (m)	ME (m)
Mailles carrées	0	0	0
Mailles non orthogonales	$6,698 \times 10^{-1}$	$6,224 \times 10^{-2}$	$2,411 \times 10^{-3}$
Mailles hexagonales	$6,777 \times 10^{-3}$	$2,018 \times 10^{-2}$	$2,210 \times 10^{-2}$
Mailles non-structurées	$7,628 \times 10^{-1}$	$3,344 \times 10^{-2}$	$9,298 \times 10^{-2}$

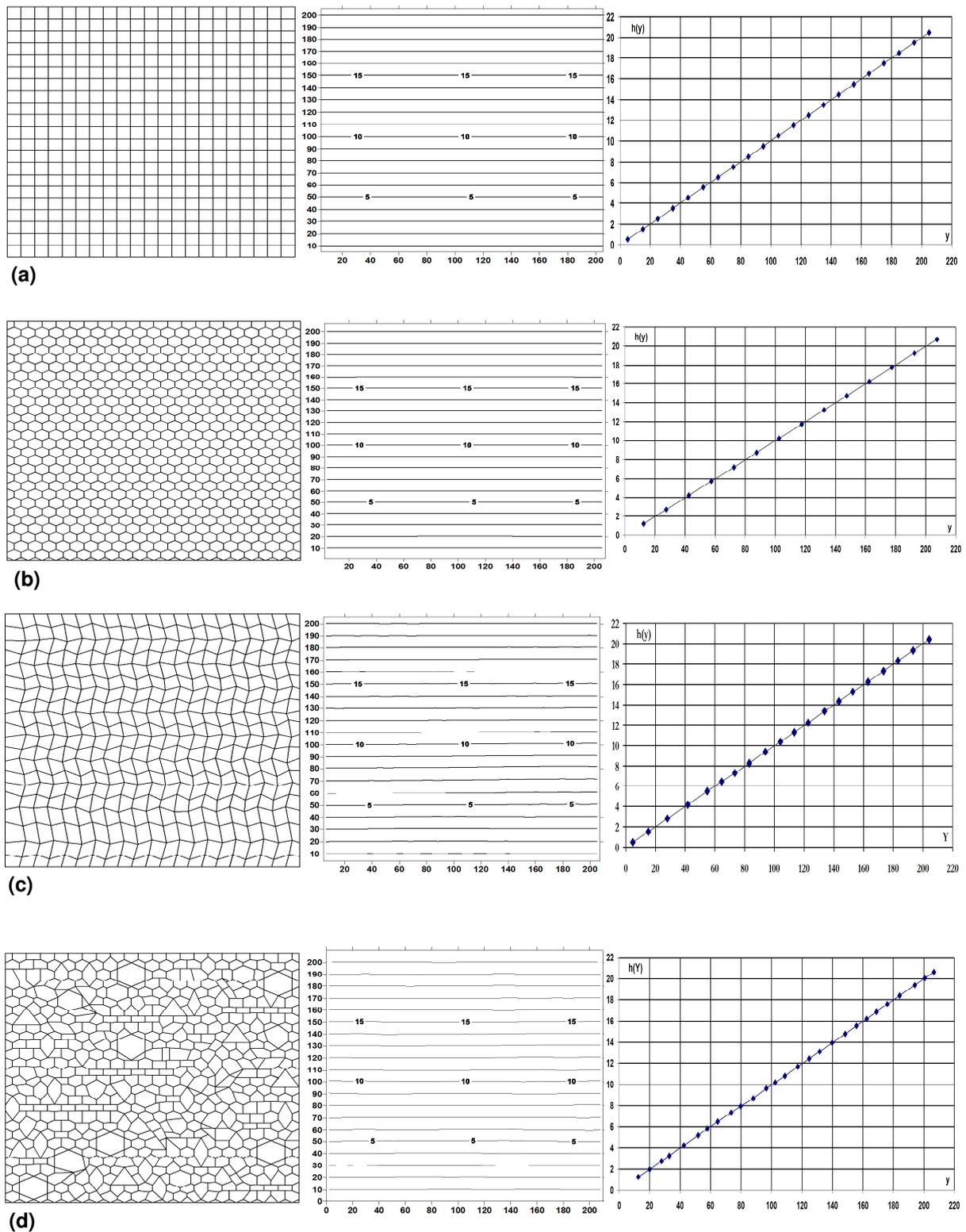


Figure 7. 5 : Gauche : Maillage ; Centre : cartes piézométriques ; Droite : courbes $h(y)$ calculées (points) et théoriques (trait plein) pour les différents maillages. (a) grille régulière, (b) maillage hexagonal (nid d'abeille), (c) maillage non-orthogonal, (d) maillage avec des éléments non structurés et irréguliers.

VII.2.3. Simulation d'un pompage : Comparaison avec des solutions analytiques

Considérons un aquifère où les hypothèses suivantes sont vérifiées :

- Le puits de pompage atteint le fond de l'aquifère.
- Le diamètre du puits est proche de zéro; il n'y a donc pas de stockage dans le puits.
- L'aquifère a une extension infinie (gradient constant aux limites du domaine).
- L'aquifère est horizontal, plan et imperméable (non-leaky) aux limites supérieures et inférieures.

Lorsque les conditions ci-dessus sont réalisées, il existe des solutions analytiques aux écoulements induits par ce genre de problème. Puisque l'aquifère est isotrope et homogène, une solution de type radial peut être utilisée. La solution de Theis (1935) est la plus populaire de ces solutions. Le rabattement $\Delta b(x)$ dû au pompage peut être exprimé avec la formule suivante :

$$\Delta b(x) = \frac{-Q}{4\pi T} \left[-E_i\left(-\frac{x^2 S}{4 T t}\right) \right] \quad \text{Eq. 7.6}$$

T et S sont respectivement la transmissivité et le coefficient d'emmagasinement de l'aquifère (m^2s^{-1} et sans unité), x est la distance du puits au point où le rabattement est observé (m), t est le temps depuis le début du pompage (seconde), et $E_i(u)$ est la fonction exponentielle intégrale (encore appelée " fonction de Well " par les hydrogéologues).

Afin de tester le module de nappe par rapport à cette solution analytique (solution de Theis), nous avons choisi de simuler un essai de pompage où les conditions énoncées ci-dessus sont remplies. La Figure (7.6) représente la configuration de l'aquifère pour le test de pompage en milieu isotrope et homogène. On suppose que le puits a un diamètre proche de zéro et qu'il atteint le fond du mur de l'aquifère. La durée du pompage est de 4 heures ; ce qui est suffisamment court pour respecter la condition de gradients constants aux limites du domaine. On peut donc considérer cet aquifère comme ayant une extension infinie.

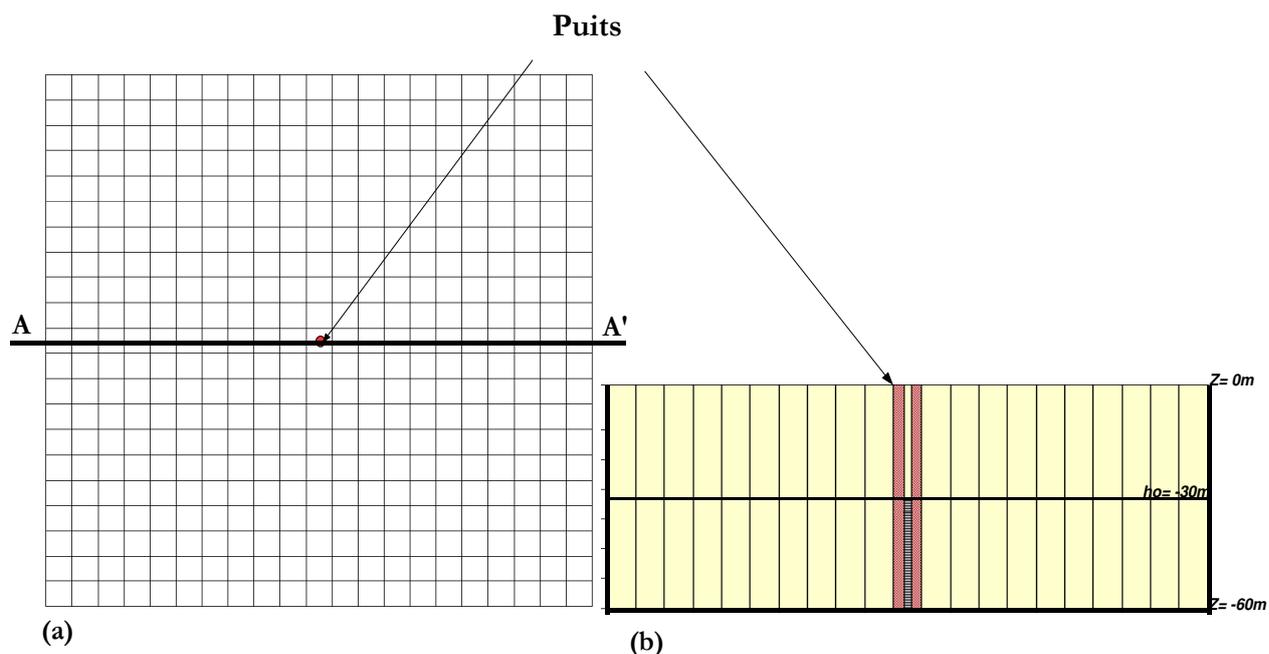


Figure 7. 6 : Configuration de l'aquifère pour les essais de pompage en milieu homogène. (a) Maillage utilisé (b) Profil de l'aquifère suivant la trace AA'.

Les conditions étant réunies pour considérer que les hypothèses ci-dessus sont valables, une comparaison avec la solution analytique pour les résultats du pompage peut donc être envisagée. Le profil de dépression de la surface piézométrique obtenu par la simulation a donc été comparé avec celui obtenu grâce à la solution analytique en utilisant les mêmes conditions. Cette comparaison ne prend pas en compte les valeurs de la solution de Theis au niveau du puits. Les résultats ont également été comparés avec ceux de modèles de référence, à savoir MODFLOW et le module saturé de MIKE SHE en utilisant la même configuration d'aquifère.

La Figure (7.7) montre la comparaison, selon une radiale entre le profil de dépression calculé par les 3 modèles, ainsi que la solution analytique de Theis (Figure 7.7.a). A droite, on montre la carte des isopièzes calculées par **BOUSS2D** au bout de 4h (Figure 7.7.b). Ces figures montrent que le module **BOUSS2D** s'ajuste bien aux résultats de la solution analytique et à ceux des modèles de référence (MODFLOW et MIKE SHE). La Figure (7.7.b) montre que les isopièzes issues des résultats de **BOUSS2D** sont parfaitement radiales. Ce qui est en accord avec la solution analytique attendue.

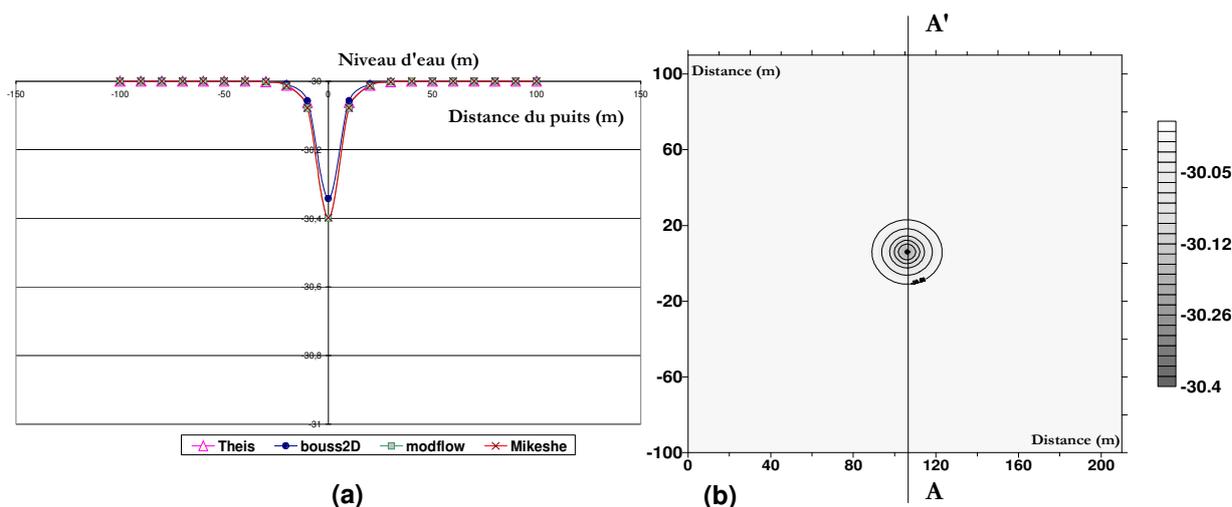


Figure 7. 7 : (a) Comparaison des profils de dépression (1D) à la fin du pompage (suivant la trace AA') entre le modèle *BOUSS2D*, les modèles de référence (MODFLOW et MIKE SHE) et la solution analytique de Theis. (b) Carte des équipotentiels, produite avec les résultats du modèle *BOUSS2D* après 4h de pompage.

Les erreurs des différents modèles (*BOUSS2D* et les modèles de référence) par rapport à la solution analytique de Theis prise comme référence sont résumées dans le Tableau (7.4). Ce tableau illustre les bonnes performances du modèle *BOUSS2D* par rapport aux modèles de référence (MODFLOW et MIKE SHE). Les erreurs par rapport à la solution analytique sont du même ordre de grandeur que celles des modèles de référence (exemple : Erreurs relatives de l'ordre de 10^{-3} %). On note par ailleurs une meilleure performance du modèle *BOUSS2D* par rapport aux modèles de référence pour les critères de comparaison utilisés. Cette différence peut être expliquée par les différents schémas numériques utilisés pour la résolution des équations de transferts.

Tableau 7. 4 : Comparaison des erreurs des modèles *BOUSS2D*, MODFLOW et MIKE SHE:

	RE (%)	ME(m)	RMSE (m)
BOUSS2D	2,197E-03	0,0041	0,00149
MODFLOW	7,134E-03	0,01716	0,00551
MIKESHE	6,315E-03	0,01618	0,00516

VII.2.4. Simulation d'un pompage : comparaison avec des modèles existants

Dans ce paragraphe, l'aquifère utilisé est le même que dans le paragraphe précédent. La durée du pompage est, cette fois, de 2 mois. Toutes les conditions listées dans le précédent paragraphe ne sont plus remplies. En particulier, celle de gradient constant aux limites du domaine n'est pas remplie. Nous comparons les résultats des simulations avec ceux obtenus en utilisant les modèles de référence, MODFLOW et MIKE SHE.

La Figure (7.8) compare l'évolution du profil de dépression en fonction du temps pour les trois modèles. Globalement, les valeurs de rabattement simulées avec le modèle *BOUSS2D* sont assez proches de celles obtenues avec les modèles MODFLOW et MIKE SHE.

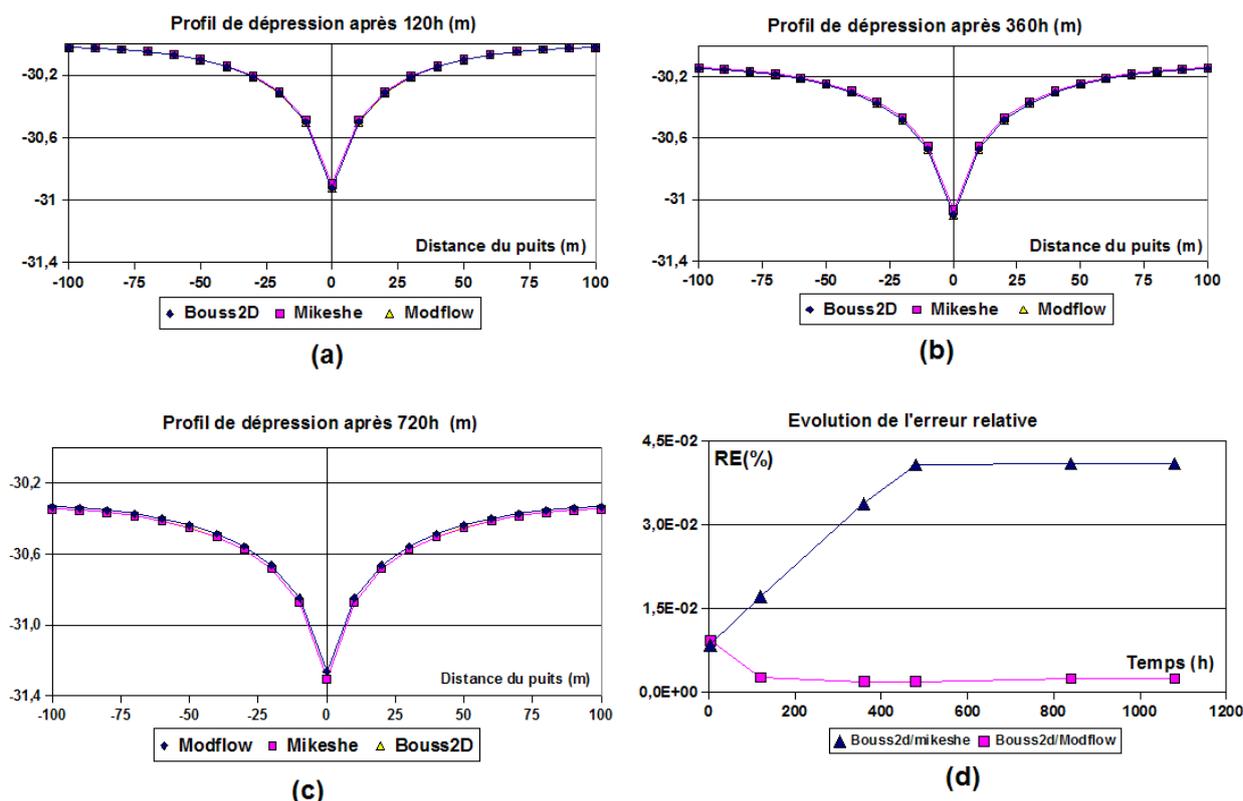


Figure 7. 8 : Evolution du profil de dépression après 120h (a), 360h (b) et 720h (c), et évolution de l'erreur relative en fonction du temps (d).

La Figure (7.8.d) présente l'évolution temporelle de l'erreur relative entre les résultats du modèle **BOUSS2D** et ceux des différents modèles de référence. On remarque une stabilisation assez rapide (environ 200h) de l'erreur relative par rapport à MODFLOW, alors que cette stabilisation est plus longue avec MIKE SHE (environ 500h). Par ailleurs, l'erreur relative est beaucoup plus faible par rapport à MODFLOW que MIKE SHE. Il y a donc une meilleure convergence des résultats entre **BOUSS2D** et le modèle MODFLOW.

Dans ce paragraphe, nous avons évalué le modèle BOUSS2D par rapport à des modèles analytiques et par rapport à des modèles de référence (MODFLOW et MIKE SHE). Nous avons utilisé un aquifère homogène et isotrope. Les scénarios utilisés sont : un essai de pompage et un test en régime permanent suite à l'imposition de charges hydrauliques constantes aux limites du domaine de simulation. Pour chaque scénario, différents maillages ont été utilisés afin de tester la capacité du modèle à prendre en compte des maillages non-structurés et irréguliers. Les résultats ont montré une bonne conformité entre les valeurs calculées par le modèle BOUSS2D et ceux issus aussi bien des modèles analytiques que des modèles de référence. Dans le paragraphe suivant, nous allons augmenter le niveau de complexité des scénarios, en prenant des exemples proches de ce qui peuvent être rencontrés en milieux naturels.

VII.3. Tests de pompage en conditions naturelles

En utilisant le même aquifère, nous avons procédé à d'autres tests en intégrant des conditions proches de certaines situations rencontrées en milieux naturels. Plus précisément, nous avons testé la capacité du modèle **BOUSS2D** à prendre en compte les couches géologiques et leurs discontinuités dans la simulation des écoulements souterrains. Dans un premier test, une simulation de pompage a été effectuée avec un aquifère multi-couches. Dans le second test effectué, l'aquifère homogène et isotrope comporte une discontinuité géologique particulière.

VII.3.1. Prise en compte de l'hétérogénéité verticale par le modèle BOUSS2D

Bien que **BOUSS2D** soit un modèle en deux dimensions où la surface piézométrique est considérée comme une surface d'eau libre, le modèle possède la capacité de prendre en compte l'hétérogénéité verticale du milieu. Ceci se fait à travers des profils de sol attribués à chaque maille. Cette fonctionnalité est originale par rapport aux modèles standards bi-dimensionnels qui ne considèrent que des aquifères homogènes verticalement. Pour les aquifères multi-couches, on utilise souvent des simulations avec des modèles 3D.

Dans le test suivant, nous avons simulé un pompage dans un système aquifère multi-couches afin d'étudier la capacité du modèle **BOUSS2D** à prendre en compte l'hétérogénéité verticale du sol. Nous avons utilisé pour cela un système aquifère qui a la même extension que celui utilisé dans les sections précédentes, avec un maillage en grille régulière de $10m$ de résolution. L'aquifère possède une hétérogénéité verticale matérialisée par une succession de trois couches successives (voir Figure 7.9) : du haut vers le bas, le profil est constitué d'une couche sableuse de $40m$ d'épaisseur, suivie d'une couche de sable fin d'une épaisseur de $10m$ et enfin d'une couche argileuse de $10m$ d'épaisseur. La charge hydraulique initiale du système est de $h_0 = -30m$. Les paramètres de sols utilisés pour les différentes couches sont résumés dans le Tableau (7.5). Mentionnons que nous avons choisi des conductivités hydrauliques à saturation décroissante avec la profondeur, pour

éviter la formation d'aquifères confinés, qui ne sont pas pris en compte par le modèle **BOUSS2D**. Le pompage simulé a duré 1 mois (600h). Ensuite, l'évolution du système a été simulée au-delà de l'arrêt du pompage jusqu'à l'équilibre en régime permanent.

Tableau 7. 5 : Paramètres de sol pour les différentes couches

Couches	type de sol	K [ms ⁻¹]	S _y [--]	n [--]
1	Sable (sand)	5.5x10 ⁻⁴	0.30	0.30
2	Sable fin (fine sand)	4.0x10 ⁻⁵	0.32	0.35
3	Argile (silt)	5.0x10 ⁻⁷	0.20	0.42

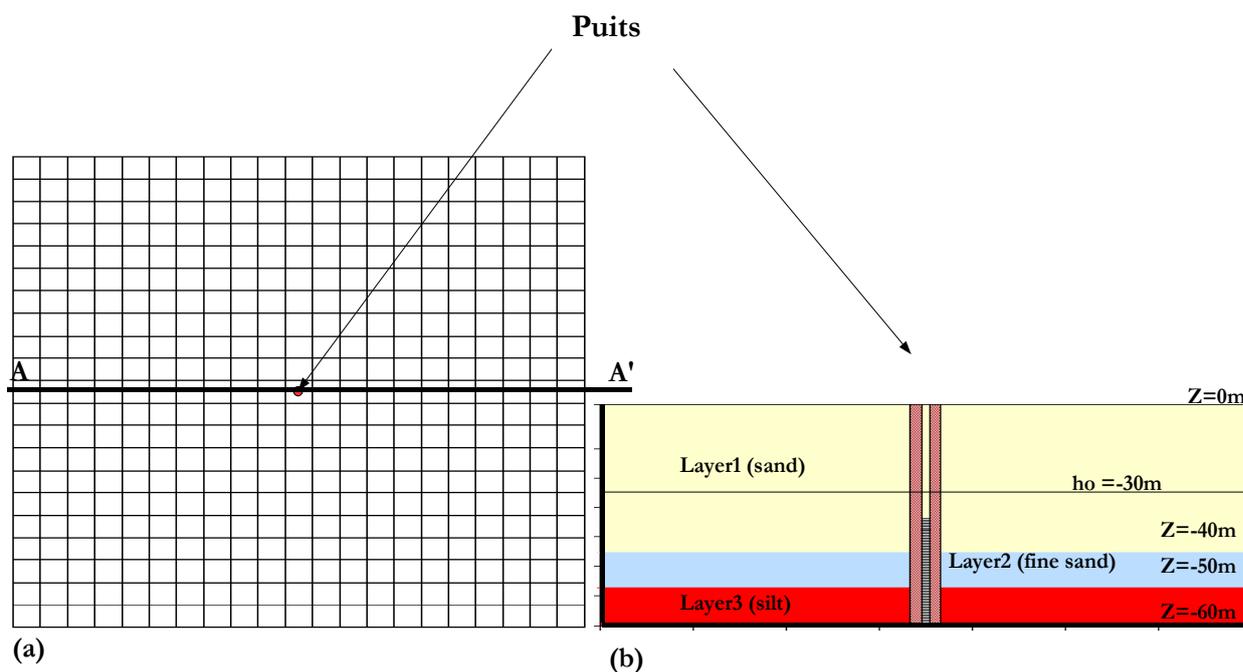


Figure 7. 9 : Configuration de l'aquifère multi-couche. (a) Maillage utilisé (b) Profil de l'aquifère suivant la trace AA'.

Les résultats des simulations ont été comparés à différents modèles en trois dimensions pris comme référence. Il s'agit toujours des modèles MODFLOW et MIKE SHE. Nous allons évaluer les résultats du modèle **BOUSS2D** en utilisant les critères de comparaison présentés en introduction de ce chapitre (RMSE, RE, et ME). Ces derniers sont présentés dans le Tableau (7.6). On y remarque que les résultats des comparaisons entre le modèle **BOUSS2D** et les modèles de référence sont satisfaisants pour l'ensemble des critères de comparaisons. L'erreur relative entre **BOUSS2D** et MODFLOW est de l'ordre de 0,02% et de l'ordre de 0,03% entre **BOUSS2D** et MIKE SHE. Ceci atteste donc de la robustesse de la solution proposée pour la prise en compte de l'hétérogénéité verticale dans le modèle **BOUSS2D**. On remarque aussi que le modèle **BOUSS2D** se rapproche plus

comme dans les exemples précédents, de la solution de MODFLOW que de celle de MIKE SHE. Ceci est vrai sur l'ensemble des critères d'évaluation, comme en atteste les valeurs du Tableau (7.5). Sur la Figure (7.10.d), on observe un retour à l'équilibre du système au bout de 1080 heures de simulation (45 jours).

Tableau 7. 6 : Evaluation des écarts entre le modèle *BOUSS2D* et les modèles MODFLOW et MIKE SHE : cas des aquifères multi-couches.

	RMSE (m)	ME (m)	RE (%)
Ecarts avec MIKE SHE	0,01134	0,00037	0,03096
Ecarts avec MODFLOW	0,00657	0,00023	0,01866

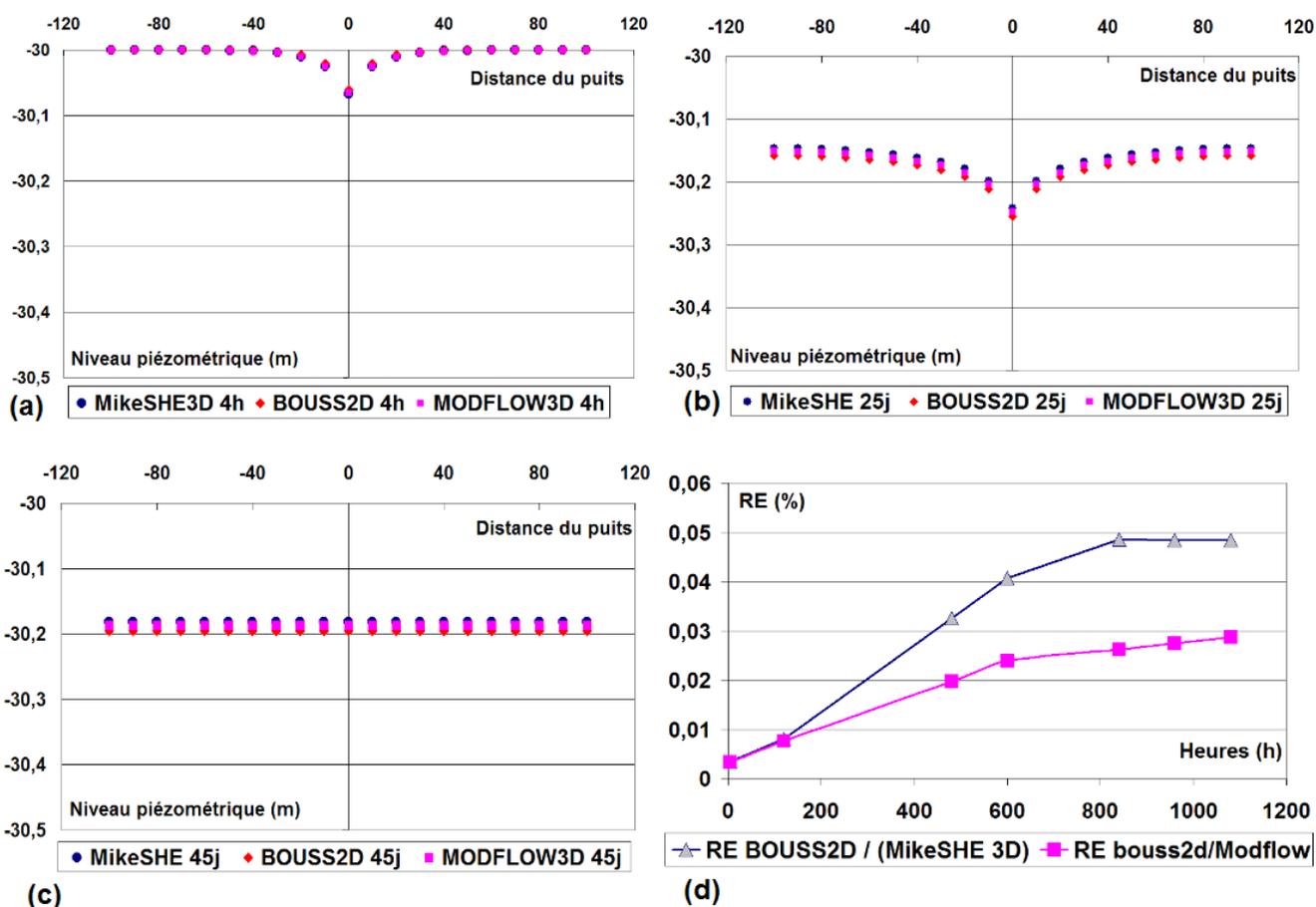


Figure 7. 10 : Evolution du profil de dépression après 4h (a), 600h (b) et 1080h (c), et évolution de l'erreur relative en fonction du temps (d).

La Figure (7.10) présente l'évolution selon une radiale du niveau piézométrique à différents instants. Elle montre que les simulations du modèle **BOUSS2D** sont satisfaisantes par rapport à celles des modèles en trois dimensions. La comparaison entre les profils de dépression de la surface piézométrique entre les modèles de référence et le modèle **BOUSS2D** (Figure 7.10a-c) montre en effet que les résultats de **BOUSS2D** sont assez proches des résultats des deux modèles de référence, bien qu'ils ne représentent pas explicitement les écoulements dans les trois couches. La Figure (7.10.d) montre une comparaison des erreurs relatives du modèle **BOUSS2D** par rapport aux modèles **MODFLOW** et **MIKE SHE**. Les écarts observés sont de l'ordre de 0.05% au maximum. La Figure (7.10.d) montre aussi que les écarts sont plus importants au début des simulations et semblent se stabiliser au cours du pompage. L'écart maximum est observé avec le module saturé de MIKE SHE comme pour les cas analysés précédemment.

Ainsi, on a pu voir dans ce paragraphe que le modèle BOUSS2D, bien qu'étant un modèle 2D, permet de simuler de manière satisfaisante les fluctuations du niveau de nappe dans une matrice de sol hétérogène (verticalement et horizontalement). Toutefois, le modèle BOUSS2D ne saurait être utilisé comme un modèle 3D, puisqu'il est basé sur l'hypothèse de la faiblesse de la perte de charge verticale (contrairement à un modèle 3D).

VII.3.2. Prise en compte de l'hétérogénéité horizontale dans la simulation des transferts souterrains : exemple d'une discontinuité géologique

Le domaine présenté sur la Figure (7.11) représente un aquifère homogène et isotrope ayant les mêmes caractéristiques hydrodynamiques que celui utilisé dans le Paragraphe (VII.2). L'aquifère contient néanmoins une discontinuité horizontale très marquée avec une très faible conductivité, et une forme quelconque au milieu du maillage régulier adopté. La simulation d'un pompage au milieu du domaine a pour but de tester la capacité du modèle *BOUSS2D* à prendre en compte l'hétérogénéité horizontale du milieu poreux dans la simulation des transferts souterrains.

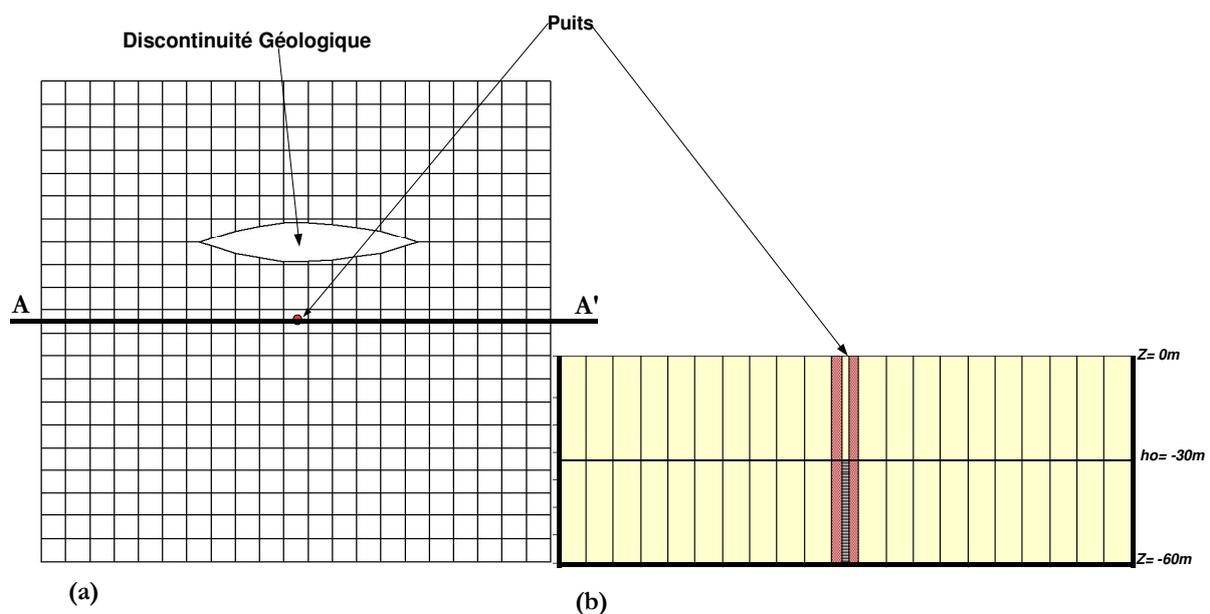


Figure 7. 11 : Configuration de l'aquifère ayant une discontinuité horizontale marquée.(a) Structure du maillage, (b) Vue en profil suivant AA'.

La durée totale de la simulation est de 2 mois (dont un mois de pompage). La Figure (7.12) montre les résultats de la surface piézométrique à des pas de temps différents après le début du pompage. On y voit clairement que les lignes de courant contournent effectivement l'obstacle imperméable, dont le niveau d'eau n'a pratiquement pas changé au bout de deux mois de pompage.

A défaut de pouvoir réaliser dans les mêmes conditions ce test avec d'autres modèles existants, nous ne présentons pas de comparaison des résultats obtenus avec d'autres modèles.

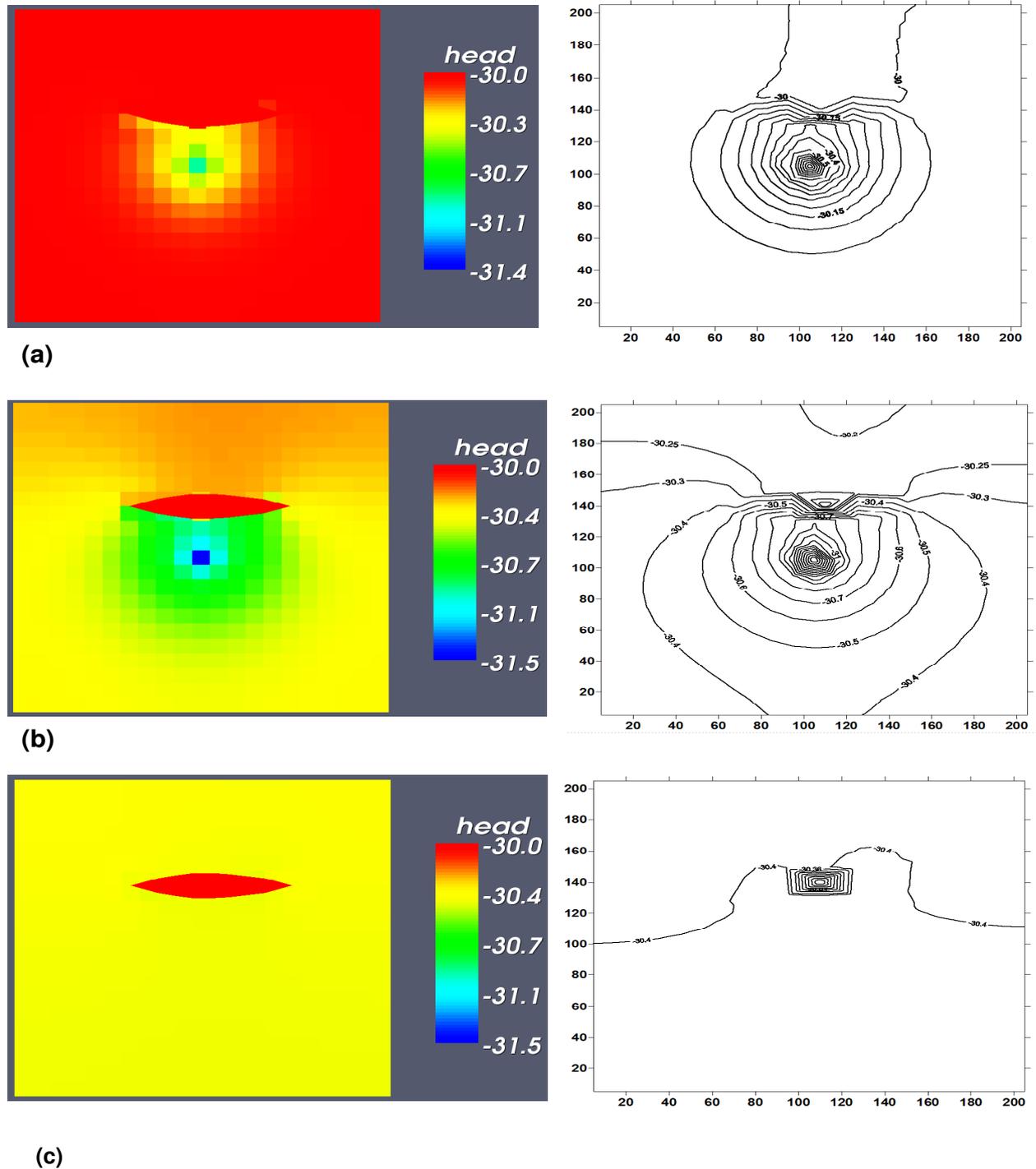


Figure 7. 12 : Cartographie des surfaces piézométriques (m) à 3 jours (a), 30 jours (b) et 60 jours (c) en plage de couleur (gauche) en isopièzes (droite). Sur la figure (c), on ne voit plus la trace du pompage.

VII.4. Discussion et commentaires

Dans ce chapitre, nous avons évalué les résultats du modèle **BOUSS2D** en utilisant des scénarios d'écoulements souterrains simples. Les résultats ont été comparés avec des modèles analytiques et avec les modèles MODFLOW et MIKE SHE pris comme modèles de référence. Les résultats ont montré que les résultats du modèle **BOUSS2D** étaient proches de ceux des modèles de référence. On a démontré également la capacité du modèle **BOUSS2D** à gérer des maillages irréguliers et non-structurés. Avant d'apporter des éléments de commentaire, il faut rappeler que le modèle **BOUSS2D** permet de prendre en compte des mailles non-structurées, mais exclusivement convexes. Cette contrainte est nécessaire pour assurer l'exactitude de la solution numérique proposée. La méthode d'approximation du gradient proposée (FM) introduit une contrainte supplémentaire liée aux projections des centres des mailles (ou des points représentatifs du maillage). Les points projetés sur la droite perpendiculaire passant par le milieu de l'interface entre deux mailles doivent demeurer à l'intérieur de la maille. Cette condition n'est pas toujours remplie (même si c'est rare) pour des maillages où les mailles sont néanmoins convexes. C'est notamment le cas du maillage de Kershaw (Figure 7.13). L'utilisation de la méthode de reconstruction des gradients par moindres carrés (Loudyi et al, 2007) permettrait de prendre en compte ce type de maillage. Néanmoins, dans la publication de Loudyi et al (2007), seuls des maillages quadrangulaires sont considérés. Il faudrait donc combiner les deux approches dans une perspective d'amélioration du modèle **BOUSS2D**, afin d'élargir le type de géométries admissibles pour la résolution.

Indépendamment du cadre dans lequel il a été développé, ce modèle offre de nombreux avantages dans les études des écoulements souterrains. Le maillage (sous réserve de respecter les contraintes de convexité et de projection, mentionnées plus haut) peut être irrégulier et non structuré. Ceci permet de décrire plus fidèlement le milieu souterrain à modéliser, notamment dans les zones de discontinuité, en utilisant des maillages réalistes, sans être obligé de faire des simplifications géométriques importantes. Ce modèle permet donc une prise en compte plus aisée des conditions aux limites du domaine, sans que l'utilisateur soit obligé de déployer des méthodes de maillage complexes pour prendre en compte les hétérogénéités du milieu souterrain.

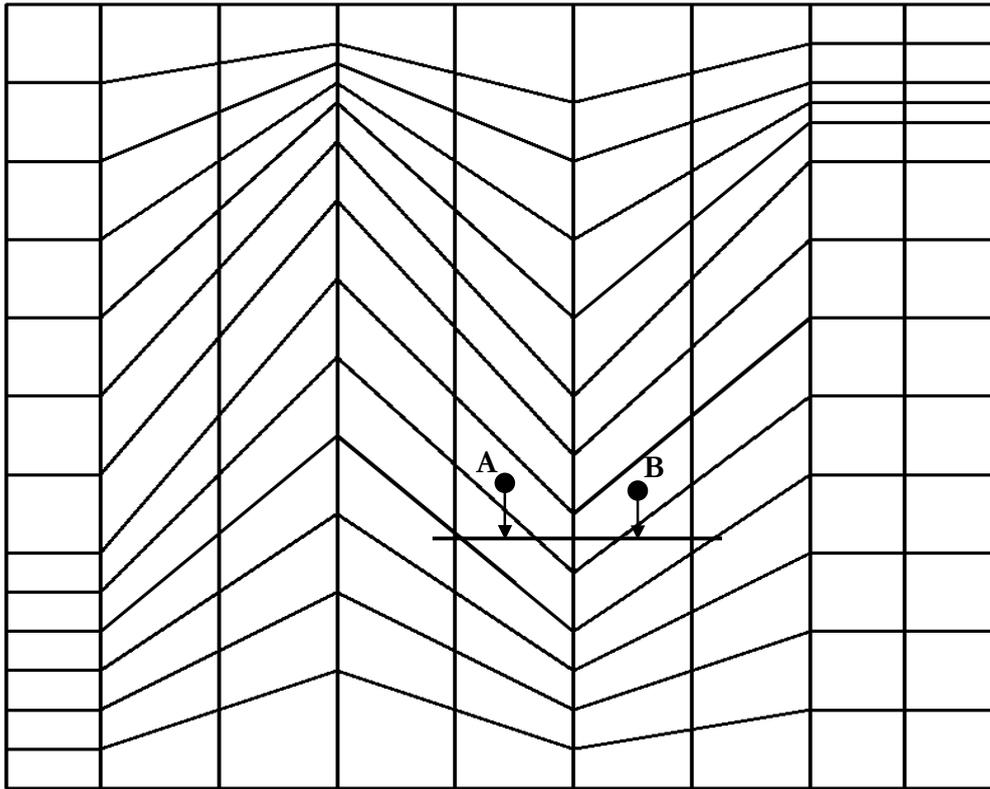


Figure 7. 13 : Exemple d'un maillage dit de Kershaw. (La projection du point A et du point B sont à l'extérieur des mailles auxquelles appartiennent A et B).

Dans le chapitre suivant, nous allons développer un modèle hydrologique spatialisé simplifié, basé sur le module BOUSS2D pour la simulation des transferts dans la zone saturée du sol. Un module de simulation des transferts dans la zone non-saturée du sol capable prendre en compte des géométries quelconques sera utilisé, ainsi qu'un module de transferts des écoulements dans la rivière.

CHAPITRE VIII "Assemblage d'un modèle hydrologique spatialisé, utilisant des mailles irrégulières et non-structurées et intégrant la zone non-saturée, la zone saturée et la rivière."

Afin de réaliser une première évaluation de l'approche de modélisation proposée dans cette thèse, nous avons initié la construction d'un modèle hydrologique simplifié, s'appuyant sur les trois processus hydrologiques principaux que sont les écoulements dans la zone non-saturée du sol, les écoulements dans la zone saturée et les écoulements dans la rivière. Les processus hydrologiques tels que le ruissellement sur surface saturée, l'évapotranspiration, l'extraction racinaire et les écoulements de sub-surface ne seront pas intégrés dans la version du modèle qui sera présentée dans ce chapitre. Ces processus seront intégrés par la suite dans une autre version du modèle présenté. Les écoulements dans la zone non-saturée ont été modélisés avec le module **FRER1D** de la plate-forme LIQUID (voir Chapitre V) qui est un module de simulation des transferts d'eau dans les sols en une dimension (1D). Ce module permet, entre autres, de simuler l'infiltration dans le sol et de localiser l'interface entre la zone saturée et la zone non-saturée. Même si la simulation reste monodimensionnelle, ce module est capable de prendre en compte un flux latéral provenant d'un autre module (Branger, 2007). Les écoulements dans la zone saturée sont simulés en utilisant le modèle bi-dimensionnel développé dans le cadre de cette thèse (**BOUSS2D**). Nous rappelons que la zone saturée désigne, ici, un aquifère pérenne sur un bassin versant. Pour le modèle de simulation des transferts dans la zone saturée, la condition à la limite supérieure du modèle de transfert dans la zone saturée correspond à un flux de recharge évalué à partir des flux à l'interface zone non-saturée/zone-saturée du module non-saturé. Le module de simulation des écoulements dans la rivière (**RIVER1D**) permet de propager le débit de l'amont vers l'aval. Dans le prototype de modèle que nous proposons, le forçage du module **RIVER1D** est réalisé

avec les échanges entre la zone saturée et la rivière uniquement. Cette configuration devrait permettre d'analyser l'importance de ces échanges sur les écoulements dans les cours d'eau. Les échanges entre la zone saturée et la rivière sont simulés par le module **GWRI** mentionné au chapitre V. La Figure (8.1) illustre les différents processus utilisés pour réaliser le prototype de modèle ainsi que les interactions entre processus. Nous présenterons les différents modules utilisés, et leur fonctionnement. Dans le Paragraphe (VIII.2), la méthodologie utilisée pour réaliser le couplage est décrite. Malheureusement, l'implémentation informatique de l'ensemble du modèle n'a pu être réalisée dans le temps imparti à cette thèse. Seul le couplage entre la zone non-saturée et la zone saturée a été réalisé. Nous présenterons donc, dans la dernière partie du chapitre, une mise en œuvre de ce couplage entre le module de transfert dans la zone non-saturée et celui de la zone saturée. Elle permettra, dans un premier temps, d'analyser, avec des configurations simplifiées, l'apport du couplage entre la zone non-saturée et la zone saturée dans la simulation des transferts dans le sol au sein de l'approche proposée. Puis, une mise en œuvre utilisant un découpage de l'espace issu de données réelles (voir Chapitre IV) permettra d'évaluer le comportement du couplage entre la zone non-saturée et la zone saturée pour des conditions réalistes.

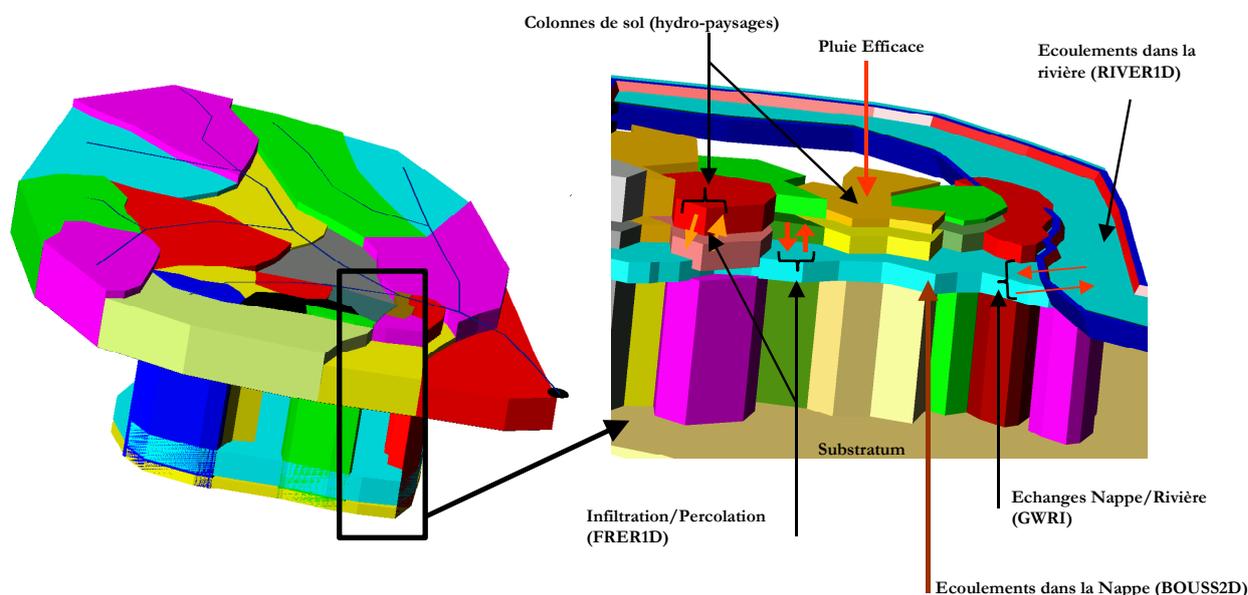


Figure 8. 1 : Illustration des processus hydrologiques intégrés dans le prototype de modèle hydrologique réalisé.

VIII.1. Présentation des différents modules intégrés dans le modèle

VIII.1.1. Module de simulation des écoulements dans la zone non-saturée (le module *FRER1D*)

La zone non-saturée du sol est caractérisée par une évolution permanente de sa teneur en eau et de sa pression matricielle en fonction des forçages tels que la pluie, l'évaporation, etc.. Les écoulements verticaux sont souvent majoritaires dans la zone non-saturée du sol, en raison du rôle joué par la gravité au cours de l'infiltration de l'eau dans le sol. Pour cette raison, nous avons choisi d'utiliser une modélisation en une dimension pour la zone non-saturée du sol. Nous avons utilisé, le module *FRER1D* disponible au sein de la plateforme *LIQUID*. Le module *FRER1D* (Fast Richards Equations Resolution in 1D) résout l'équation de Richards en 1D (Equation 8.1) dans la zone saturée/non saturée du sol. Il utilise la méthode numérique proposée par Ross (2003). C'est une méthode non itérative qui peut utiliser des pas d'espace plus grands que les méthodes standard telles que la méthode de Célia et al. (1990). C'est donc une méthode rapide qui peut être utilisée sur un grand nombre de colonnes.

$$\frac{\delta \theta}{\delta t} = \frac{\delta}{\delta z} \left[K(\Psi) \left(\frac{\delta \Psi}{\delta z} - 1 \right) \right] + q \quad \text{Eq. 8.}$$

1

Ψ (m) est la pression matricielle dans le sol, θ ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$) est la teneur en eau volumique, K ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) est la conductivité hydraulique, z (m) est la profondeur, et t (s) est le temps. q (s^{-1}) est un terme puits/source pouvant être un flux d'extraction racinaire, un flux latéral dans la zone saturée du sol ou la somme de ces deux flux.

Ce module *FRER1D* permet de simuler l'infiltration de l'eau dans une colonne de sol en réponse à un forçage climatique (pluie et évapotranspiration potentielle). Il a été évalué dans le cadre des travaux de Varado (2004) et Varado et al. (2006). Il est capable de gérer les écoulements verticaux aussi bien dans des sols non saturés que saturés, homogènes qu'hétérogènes. Nous allons présenter très brièvement la méthode numérique utilisée dans ce module ainsi que son architecture dans les paragraphes suivants.

VIII.1.1.a) Description de la méthode de résolution numérique

La résolution de l'équation de Richards nécessite la spécification de deux courbes fonctionnelles : la courbe de rétention et la courbe de conductivité hydraulique. Ces dernières sont exprimées à l'aide du modèle de Brook et Corey (1964) :

$$\frac{\theta}{\theta_s} = \left(\frac{\Psi}{\Psi_e}\right)^{-\lambda} \quad \frac{K}{K_s} = \left(\frac{\theta}{\theta_s}\right)^\eta \quad \text{si } \Psi < \Psi_e$$

$$= 1, \quad = 1, \quad \text{si } \Psi \geq \Psi_e$$
Eq. 8. 2

θ_s ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$) est la teneur en eau à saturation, Ψ_e (m) est la pression d'entrée d'air, K_s est la conductivité hydraulique à saturation ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$). λ et η sont des paramètres de forme du modèle. L'utilisation des équations de Brooks et Corey (1964) permet une formulation analytique du potentiel matriciel du flux ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$) ou potentiel de Kirchhoff (Equation 8.3), ce qui simplifie la résolution numérique. Néanmoins, d'autres modèles, comme le modèle de Van Genuchten (1980) peuvent être utilisés (Ross, 2006). Le potentiel de Kirchhoff correspond à l'intégrale de la conductivité hydraulique et constitue la base de la méthode numérique proposée par Ross (2003). La formulation explicite du potentiel de Kirchhoff est présentée ci-dessous.

$$\phi = \int_{-\infty}^{\Psi} K(\Psi) d\Psi \quad \phi = \frac{K_s \Psi}{1 - \lambda \eta} \quad \text{si } \Psi < \Psi_e$$

$$\phi = \frac{K_s \Psi_e}{1 - \lambda \eta} + K_s (\Psi - \Psi_e) \quad \text{si } \Psi \geq \Psi_e$$
Eq. 8. 3

Pour la discrétisation verticale de la colonne de sol, nous pouvons distinguer plusieurs horizons aux propriétés hydrodynamiques différentes (c'est-à-dire avec des valeurs différentes pour les paramètres des courbes de rétention et de conductivité hydraulique). Ces horizons sont ensuite découpés en n couches (ou cellules), d'épaisseurs différentes (Δx_i) comme illustré sur la Figure (8.2). La résolution de l'équation (8.1) nécessite d'évaluer l'expression du flux à l'interface entre les différentes cellules de la discrétisation spatiale représentée sur la Figure (8.2).

Pour estimer les flux à l'interface entre deux cellules, Ross (2003) propose l'expression suivante fondée sur un développement d'ordre 1 en série de Taylor :

$$q_i^\sigma = q_i^0 + \sigma \left(\frac{\delta q_i}{\delta S_i} \Delta S_i + \frac{\delta q_i}{\delta S_{i+1}} \Delta S_{i+1} \right) \quad \text{Eq. 8.4}$$

q_i^σ est l'estimation du flux entre l'interface i et l'interface $i+1$ au temps de calcul ; q_i^0 est le flux entre l'interface i et l'interface $i+1$ au pas de temps initial ; S est le degré de saturation. Le flux entre les interfaces i et $i+1$ ne dépend que des valeurs du degré de saturation des cellules situées de part et d'autre de cette interface. L'introduction de l'Equation (8.4) dans l'Equation (8.1) discrétisée sur chaque maille, permet d'aboutir à un système matriciel tridiagonal de la forme suivante :

$$a_i \Delta S_{i-1} + b_i \Delta S_i + c_i \Delta S_{i+1} = d_i \quad \text{Eq. 8.5}$$

Les inconnues sont les variations du degré de saturation (ΔS_i). Les coefficients a_i , b_i et c_i sont fonction des dérivées partielles des flux par rapport au degré de saturation. Il faut noter que, lorsqu'une cellule est saturée, le degré de saturation devient constant et le terme de gauche de l'Equation (8.1) est nul. On substitue alors à la variation du degré de saturation, la variation du potentiel de Kirchhoff comme variable d'état.

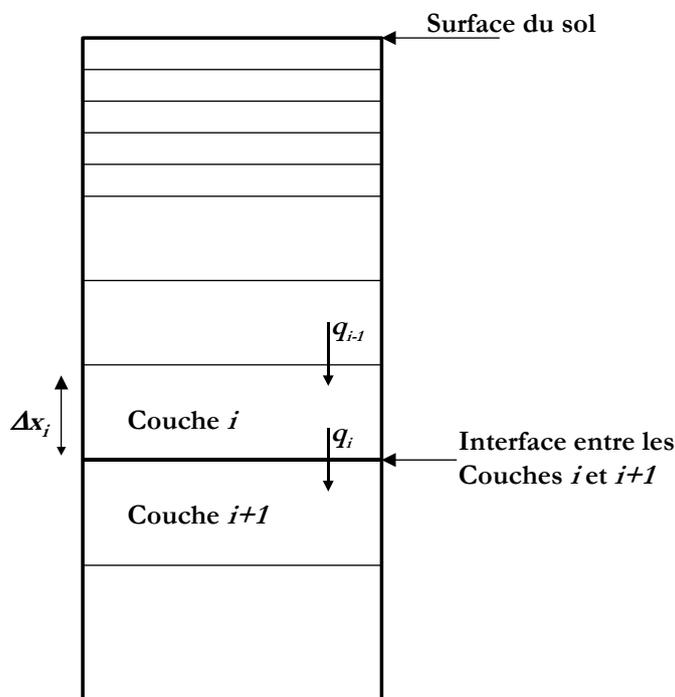


Figure 8. 2 : Découpage vertical des sols, proposé par Ross (2003)

L'application des conditions aux limites à la surface des colonnes permet de calculer le flux à la surface de ces colonnes. La donnée de l'évapotranspiration potentielle permet de calculer l'évaporation de la colonne de sol. Cette dernière est inférieure ou égale à la valeur potentielle, selon la capacité du sol à répondre à la demande atmosphérique. Lorsqu'il pleut, on calcule le flux d'infiltration vers les couches plus profondes. Si la pluie excède la capacité d'infiltration du sol, une lame d'eau peut se former à la surface (ponding en anglais). L'évolution de cette hauteur d'eau est gérée par une équation supplémentaire. De plus amples détails sur la méthode numérique utilisée peuvent être trouvés dans Ross (2003) ou Varado et al (2006).

VIII.1.1.b) Description de l'architecture du module dans la plate-forme LIQUID

Le module **FRERID** a été développé en dehors de cette thèse. Il est capable de prendre en compte des forçages climatiques (pluie, évapotranspiration, etc.) ou d'autres forçages liés à d'autres modules tels que l'extraction racinaire et un flux latéral dans la zone saturée. Il a été doté de signaux lui permettant d'émettre, vers d'autres modules, les variables telles que les pressions matricielles calculées au niveau de chaque cellule (*m_sigWaterPressure*) et la position de l'interface entre la zone non-saturée et la zone saturée (*m_sigWaterTableHeight*). Ce dernier signal va nous intéresser particulièrement pour le couplage entre la zone non-saturée et la zone saturée (voir Paragraphe VIII.2). Le module **FRERID** est également doté de mécanismes de réponse aux sollicitations extérieures telles que la pluie (*OnRainChange()*), l'évapotranspiration (*OnETChange()*) et l'extraction racinaire (*OnRootExtractionChange()*). La fonction *OnSatLateralFluxChange()* permet d'intégrer les termes puits/sources provenant, par exemple, des fluctuations du niveau de nappe dues aux transferts dans la zone saturée. La Figure (8.3) illustre l'interface du module **FRERID** pour les échanges de données avec d'autres modules.

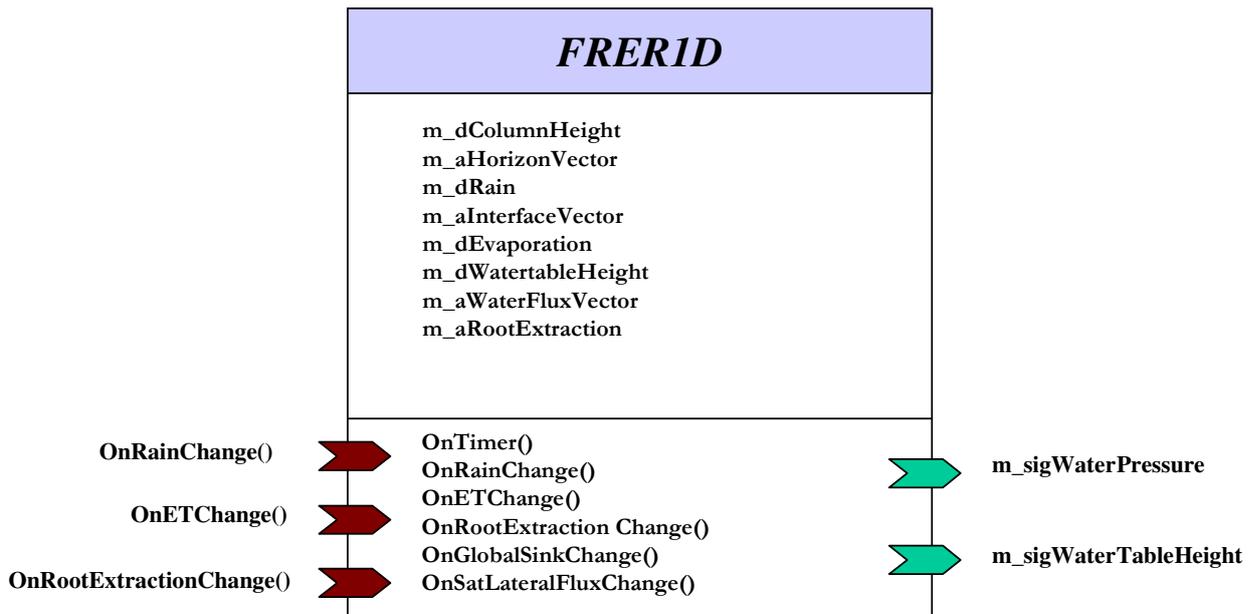


Figure 8. 3 : Schéma illustrant les interfaces du module *FRER1D*

VIII.1.2. Module de simulation des transferts dans la rivière (*RIVER1D*)

Les écoulements dans le réseau hydrographique sont simulés de manière simplifiée en utilisant l'approximation de l'onde cinématique issue des équations de Saint-Venant 1D. Le module *RIVER1D* disponible dans la plate-forme LIQUID permet de propager le débit de l'amont vers l'aval des bassins versants en utilisant cette approximation. Il a été développé par Branger (2007b), indépendamment de cette thèse. Ce module simule les écoulements dans une rivière, avec une géométrie simplifiée (sections symétriques trapézoïdales).

On considère un réseau ramifié et une géométrie simplifiée des brins de rivière de ce réseau (Figure 8.3). Un bief est défini, entre autres, par sa largeur au fond ou largeur au radier (l), sa largeur au miroir (l_m), sa section mouillée (s) son périmètre mouillé (P) et une pente et le coefficient de frottement de Manning.

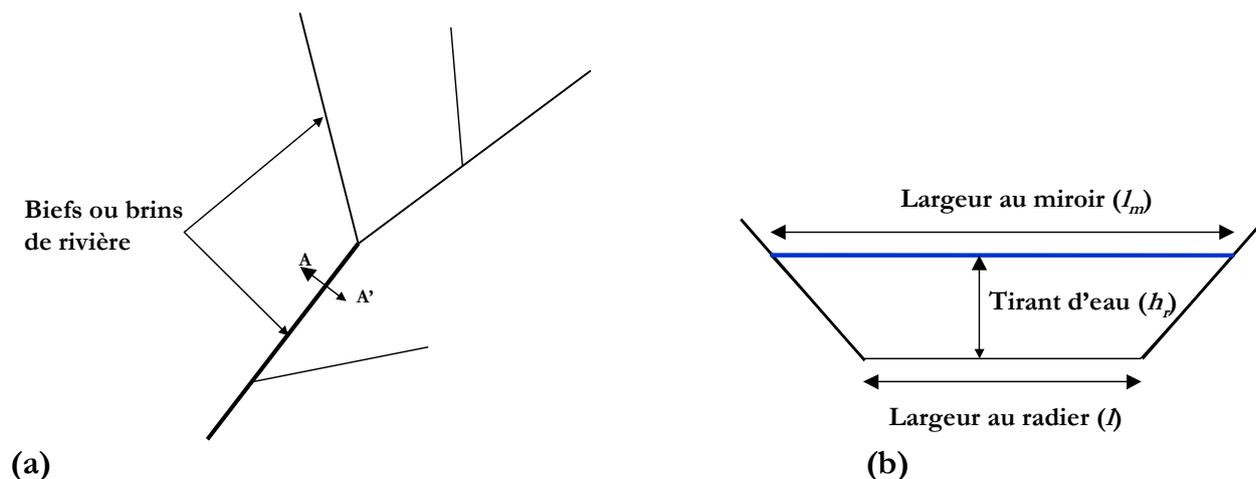


Figure 8. 4 : Exemple de réseau ramifié (a) pouvant être modélisé par *RIVER1D* et exemple de sa géométrie suivant la trace AA' (b).

L'équation de l'onde cinématique à résoudre s'appuie sur une combinaison entre l'équation de continuité (Equation 8.6) et l'équation dynamique (Equation 8.7) (Branger, 2007b) :

$$\frac{\delta S_m}{\delta t} + \frac{\delta (VS_m)}{\delta x} = q_{\text{apports}} \quad \text{Eq. 8.6}$$

$$\frac{\delta V}{\delta t} + V \frac{\delta V}{\delta x} + g \frac{\delta h_r}{\delta x} + g(j-i) = 0 \quad \text{Eq. 8.7}$$

S_m est la section mouillée (L^2), V est la vitesse moyenne (LT^{-1}), h_r est le tirant d'eau (L), i est la pente moyenne du radier du brin (sans unité), j est la perte de charge due aux frottements (sans unité), g est l'accélération de la pesanteur (LT^{-2}), x est l'abscisse le long du bief, t est le temps (T) et q_{apports} ($L^3T^{-1}L^{-1}$) est le terme des apports latéraux par mètre linéaire de bief.

Les pertes de charge dues aux frottements sont calculées en utilisant la formule de Manning. L'approximation de l'onde cinématique se fait en assimilant l'écoulement à une succession d'états permanents uniformes. Cette hypothèse permet d'obtenir une relation simple pour la vitesse (Equation 8.8) utilisée pour la résolution de l'équation de continuité :

$$V = \frac{1}{n} \sqrt{i R_H^{2/3}} \quad \text{Eq. 8.8}$$

R_H est le rayon hydraulique (L). L'équation de continuité intégrée sur un bief s'écrit donc sous la forme suivante :

$$\frac{\Delta S_m}{\Delta t} = \frac{Q_{in} + q_{\text{apports}} - Q_{out}}{L} \quad \text{Eq. 8.9}$$

L est la longueur du brin de rivière (L), Q_{in} est le débit entrant à l'amont du brin (L^3T^{-1}), Q_{out} est le débit à la sortie du brin de rivière (L^3T^{-1}). Il est égal au produit de la section mouillée par la vitesse dans le brin ($Q_{out} = S_m \times V$). La résolution de cette équation est réalisée en utilisant l'algorithme de Runge-Kutta au quatrième ordre (Press et al., 1992).

Le module **RIVER1D** est disponible au sein de la plate-forme LIQUID. Il a été doté d'interfaces adéquates pour le couplage avec le sol adjacent aux brins (écoulements de surface et de sub-surface). Le module **RIVER1D** dispose notamment de signaux pour renvoyer, à chaque pas de temps de calcul, ses variables transitoires telles que le débit à l'exutoire du réseau (*m_sigOutlet*), le débit des brins de rivière (*m_sigReachDischarge*), la section mouillée des brins de rivière (*m_sigReachWettedSection*), la vitesse dans les brins de rivière (*m_sigReachFlowVelocity*) et le tirant d'eau dans chaque brin de rivière (*m_sigReachFlowDepth*). Ce dernier signal sera utilisé par le module **GWRI** pour simuler les échanges entre la rivière et la zone saturée. Le module **RIVER1D** est également capable de réagir aux sollicitations externes telles que les forçages climatiques (*OnRainChange()* et *OnETChange()*) et les apports le long du brin de rivière : *OnLateralSurfaceFluxChange()* pour le ruissellement de surface et *OnLateralSubSurfaceChange()* pour les apports de sub-surface (incluant notamment les échanges avec la zone saturée). La Figure (8.4) illustre l'interface du module **RIVER1D**.

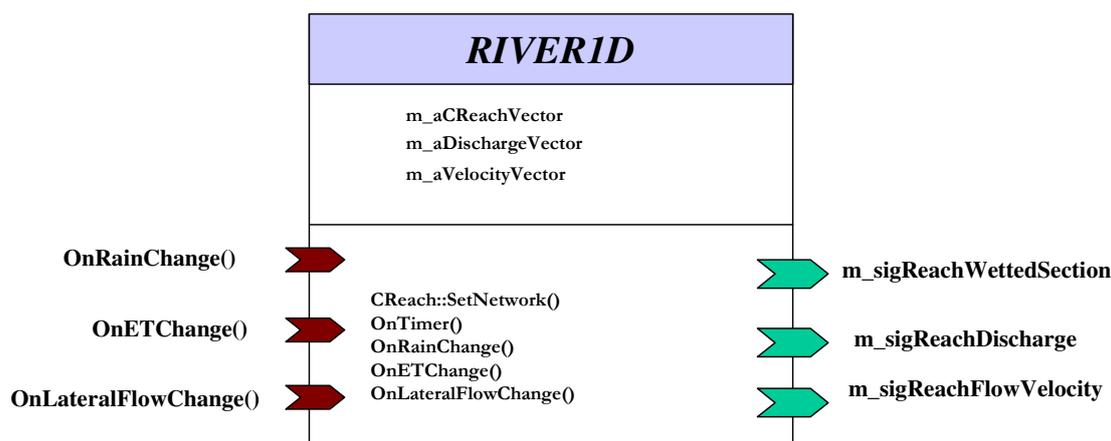


Figure 8. 5 : Illustration de l'interface du module RIVER1D

VIII.1.3. Module de simulation des échanges nappe/rivière (*GWRI*)

Les transferts d'eau entre les rives connectées à la zone saturée du sol et la rivière ont une influence sur les débits dans la rivière à la fois en période de basses eaux et de hautes eaux. C'est pourquoi nous avons souhaité prendre en compte ces transferts dans le modèle proposé. Ces échanges entre la nappe et la rivière ont été modélisés par un module spécifique (*GWRI*: GroundWater–River Interface).

Il existe plusieurs approches pour modéliser les échanges entre les cours d'eau et la zone saturée du sol (Razack, 1995; Sophocleous, 2002). Dans le module *GWRI*, le couplage zone saturée/rivière a été réalisé en utilisant une approche simplifiée à l'échelle des biefs, basée sur les équations de Miles (1985). Considérons la Figure (8.6) décrivant un profil en travers d'une rivière à géométrie simplifiée, comme dans le module de simulation des écoulements dans les rivières. Ces équations relient le flux à l'interface entre la rivière et une zone saturée à la perte de charge entre la nappe et la rivière (Equation 8.10).

$$Q_u = C_m \cdot K_s \cdot \Delta h \quad \text{Eq. 8. 10}$$

Q_u est le flux entre la rivière et la zone saturée ($L^3T^{-1}L^{-1}$) ; Δh est la perte de charge entre la rivière et la nappe (L) ; K_s est la conductivité hydraulique du fond de la rivière (LT^{-1}) ; C_m est le coefficient de Miles, calculé par la formule suivante :

$$C_m = \frac{5 \cdot [0,25 (W_s + W_b) + H_w + s]}{D_i + H_w + s} \quad \text{Eq. 8. 11}$$

W_s et W_b sont respectivement la largeur au miroir (L) et la largeur au radier (L) du brin de rivière, H_w est le tirant d'eau dans la rivière ; D_i est la distance (L) entre le fond de la rivière et l'imperméable de la zone saturée ; s est la distance de suitelement (Voir Figure 8.5). Les différentes configurations géométriques entre la rivière et la nappe, prises en compte dans le module *GWRI*, sont présentées sur la Figure (8.7). Seuls les cas où la nappe et la rivière sont connectées génèrent un flux dans le module *GWRI* (Figure 8.7a et 8.7b).

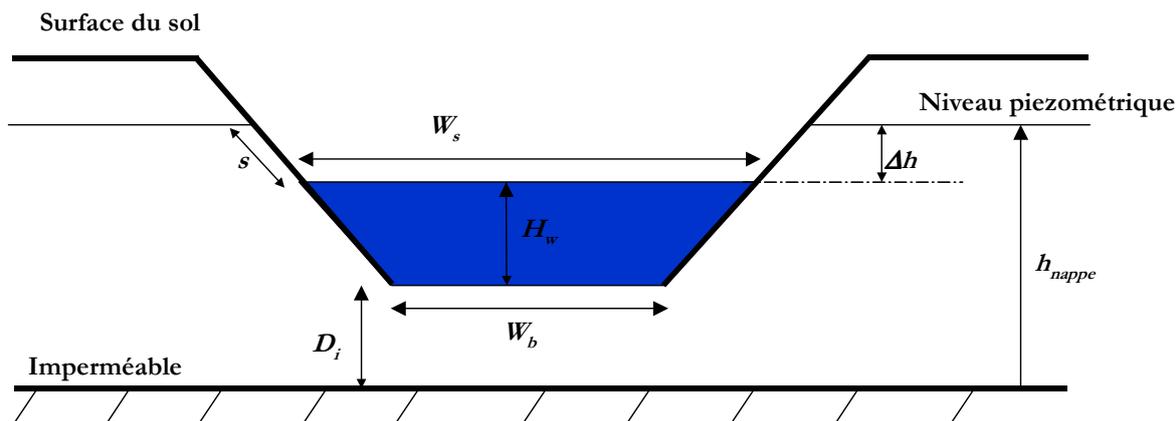


Figure 8. 6 : Coupe en travers d'un brin de rivière utilisé par le module de simulation des échanges nappe/rivière

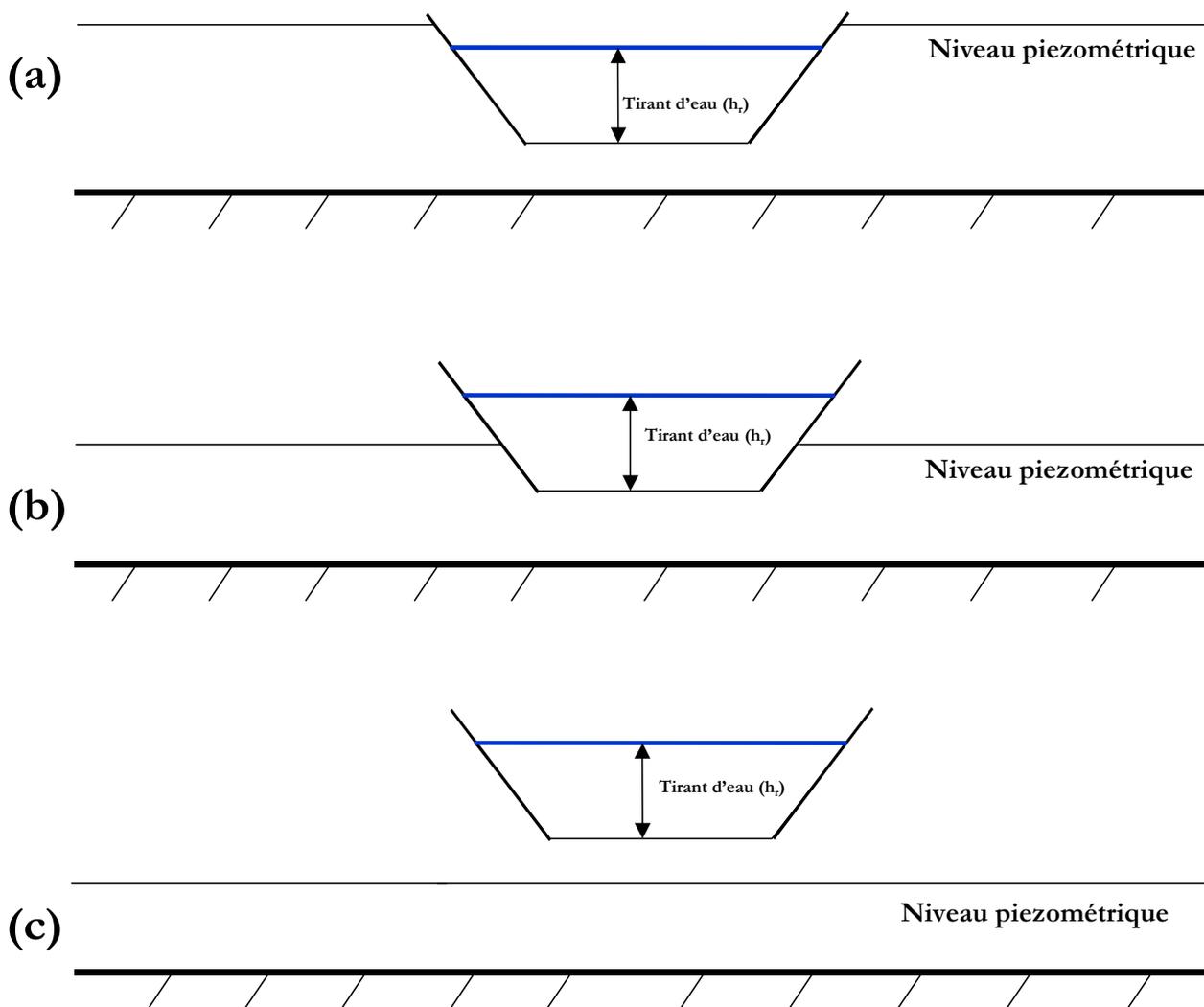


Figure 8. 7 : Illustration des relations entre la zone saturée et la rivière : (a) la nappe alimente la rivière (b) la rivière alimente la nappe et (c) la nappe et la rivière sont déconnectées.

VIII.2. Description du modèle et architecture du couplage entre les modules.

VIII.2.1. Assemblage des modules *FRER1D*, *BOUSS2D*, *GWRI* et *RIVER1D*

VIII.2.1.a) L'assemblage zone non-saturée et zone saturée

Les interactions entre les modules de transfert dans la zone non-saturée (*FRER1D*) et saturée (*BOUSS2D*) ont été réalisées avec une méthode simplifiée consistant à évaluer les termes puits/sources des équations constitutives des écoulements dans chaque zone à partir des écoulements dans l'autre zone. Une des difficultés de cette intégration est liée au fait que les deux modules modélisent tous les deux la zone saturée du sol. En effet, les fluctuations de la zone saturée induisent une modification des conditions d'écoulement dans la zone non-saturée à l'interface saturée/non-saturée. Un rabattement (ou une augmentation) du niveau piézométrique à la suite d'écoulements latéraux a pour conséquence un abaissement (ou une remontée) de l'interface saturée / non saturé dans le module non-saturé. Il nous a paru pratique d'avoir un domaine de simulation fixe dans le temps pour le module de transfert dans la zone non-saturée allant de la surface du sol jusqu'au niveau imperméable. L'influence des fluctuations de la surface piézométrique à l'intérieur de ce domaine est alors traduite en terme de flux latéraux pour le module non saturé. L'autre option, qui est celle retenue dans le modèle MIKE SHE (DHI, 2005), aurait été de disjointre les deux domaines, saturé et non-saturé, et d'avoir une frontière entre les deux, correspondant à la position de la surface saturée. Cette dernière est alors directement utilisée comme condition à la limite du module non saturé et fluctue au gré des variations du niveau de la nappe. Ceci se traduit par un domaine de modélisation de la zone non saturée évolutif qui perd ou gagne des cellules selon l'évolution du niveau de la nappe. Dans la configuration que nous avons retenue, les écoulements dans la zone non-saturée permettent de calculer les flux de recharge de la nappe. De la même manière, les fluctuations du niveau de la nappe, converties de manière adéquate en flux latéraux, sont également intégrées dans le second membre de l'équation de simulation des transferts dans la zone non-saturée pour prendre en compte les écoulements latéraux dans la zone

saturée (Figure 8.9). La Figure (8.8) illustre la méthode de couplage entre la zone saturée et la zone non-saturée utilisée.

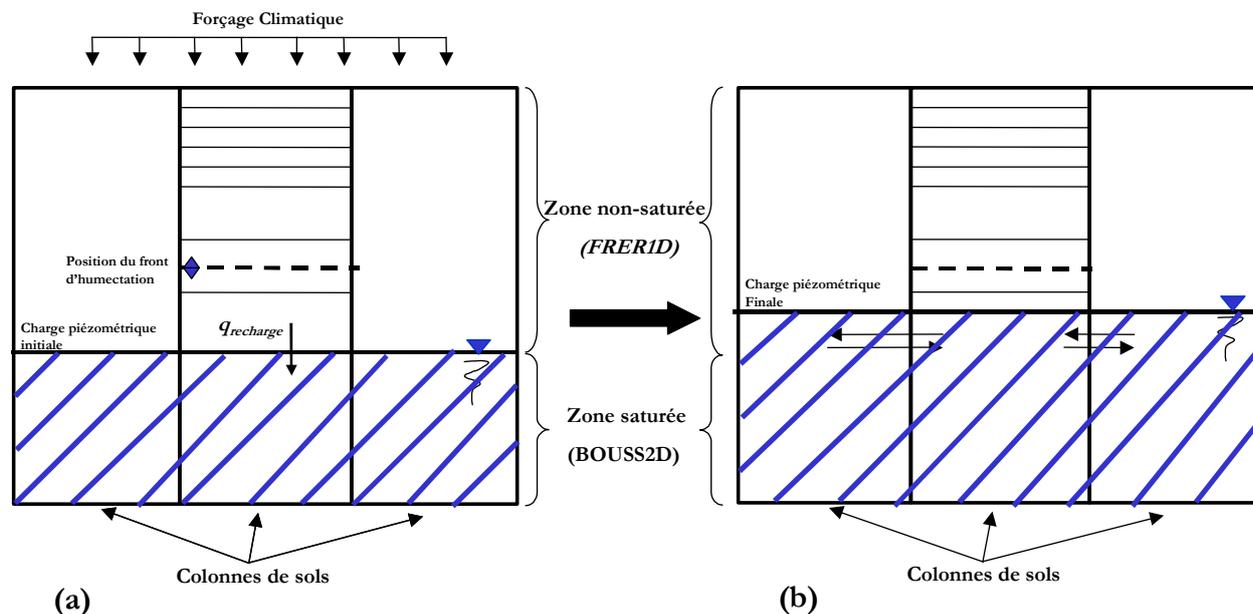


Figure 8. 8 : Illustration des interactions entre la zone saturée et la zone non-saturée. Recharge verticale (a) et transferts latéraux dans la zone saturée (b).

Comme nous l'avons annoncé ci-dessus, le couplage a été réalisé de manière simple. Le module **BOUSS2D** simule les transferts latéraux dans zone saturée en utilisant un flux de recharge calculé à partir de la position de l'interface entre la zone saturée et la zone non-saturée. Ce flux est calculé au sein du module non-saturé **FRER1D** ($q_{recharge}$ sur la Figure 8.9). Le calcul de ce flux de recharge est réalisé en utilisant la distribution de la teneur en eau dans la zone saturée. Il dépend donc des conditions d'alimentation en surface et du type de sol. L'expression suivante a été utilisée pour calculer le flux de recharge.

$$q_{recharge} = \eta_d \frac{\Delta h_{frer1d}}{\Delta t} * A$$

η_d est la porosité de drainage (L^3L^{-3}), estimée par la différence entre la teneur en eau à saturation et la teneur en eau à la capacité au champ. Sa valeur doit être la même que celle utilisée dans le module **BOUSS2D**. A est la surface projetée de la maille de calcul (L^2). La perte de charge Δh_{frer1d} (L) est la différence entre la valeur courante et la valeur précédente de la charge piézométrique calculée par le module **FRER1D**. Le flux de recharge renvoyé au module **BOUSS2D** est ensuite intégré en second membre de l'équation permettant de simuler les transferts dans la zone saturée.

Après le calcul des transferts latéraux dans la partie saturée par le module **BOUSS2D**, ce dernier envoie au module **FRER1D** la valeur courante du niveau piézométrique. Ce niveau piézométrique est utilisé par le module **FRER1D** pour évaluer le flux latéral ($q_{latéral}$ sur la Figure 8.9) qu'il devra intégrer dans son calcul au prochain pas de temps (description explicite du flux). Le flux latéral est calculé à partir du niveau piézométrique renvoyé par le module saturé et de la dernière position de l'interface zone non-saturée / zone saturée dans le module non-saturé. L'expression suivante a été utilisée pour le calcul du flux latéral.

$$q_{latéral} = \eta_d \frac{(h_{bous2d}^t - h_{frer1d}^{t-1})}{\Delta t} * A$$

Les fluctuations de la charge piézométrique, dues aux transferts latéraux dans la zone saturée, sont pris en compte par le module non-saturé **FRER1D** en intégrant dans le second membre de son équation de transfert, un flux latéral correspondant à la dynamique latérale dans la zone saturée. En résumé, le mécanisme utilisé consiste à envoyer au module **BOUSS2D** un flux de recharge calculé par le module **FRER1D**. Ce dernier reçoit un niveau de nappe calculé par le module **BOUSS2D** pour estimer les flux latéraux dus aux écoulements dans la partie saturée.

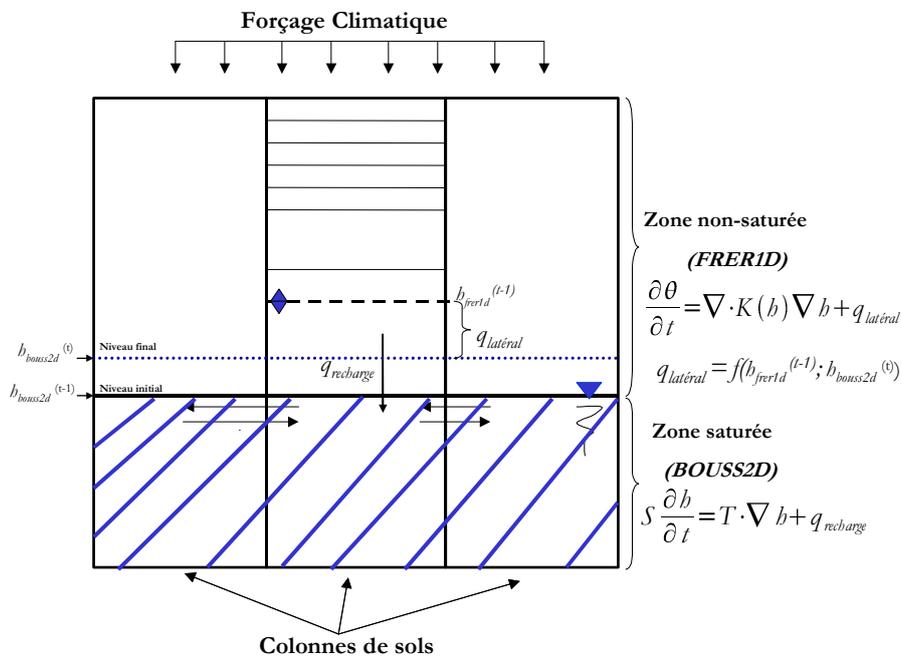


Figure 8. 9 : Illustration des échanges entre le module non-saturé et le module saturé.

Au niveau temporel, comme nous l'avons vu ci-dessus, le flux latéral pris en compte par le module **FRERID** n'est utilisé qu'au pas de temps suivant. Cette situation peut engendrer des erreurs à l'interface entre la zone non-saturée et la zone saturée ou plutôt des incohérences entre les hauteurs de nappe calculées par les différents modules. La principale source de ces erreurs est liée à l'utilisation de la notion de porosité de drainage dans la zone saturée. Cette porosité correspond au volume d'eau gravitaire libéré suite à une variation unitaire du niveau piézométrique. Elle permet de prendre en compte le volume d'eau réellement mobilisable pour les transferts dans la zone saturée. Elle peut être estimée par la différence entre la teneur en eau à saturation et la teneur en eau à la capacité au champ. Puisque cette notion de porosité de drainage n'existe pas dans le module de simulation des transferts dans la zone non-saturée, nous avons introduit un paramètre d'ajustement pour calculer l'estimation du flux latéral ($q_{\text{latéral}}$) à prendre en compte dans la zone non-saturée afin que les calculs dans les deux modules soient cohérents.

La Figure (8.10) illustre le déroulement temporel du couplage entre la zone-saturée et la zone non-saturée. On rappelle que, dans la plate-forme LIQUID, chaque modèle gère lui-même son pas de temps. Les interactions se font par des mécanismes d'interruption (voir Chapitre V). Le flux de recharge à l'instant t est pris en compte au même instant par le module saturé. Le flux latéral, introduit dans les équations de la zone non saturée, pour que le module **FRERID** prenne en compte la dynamique latérale, est utilisé au pas de temps $t+1$. Ceci engendre alors un décalage temporel du niveau piézométrique dans le module non-saturé. Ce décalage a été géré en utilisant des pas de temps fins au cours des épisodes de recharge. Cela ne permet pas d'éviter le décalage, mais le limite. Nous verrons dans le Paragraphe (VIII.3.1) l'importance de ce décalage dans la dynamique zone non-saturée/ zone saturée.

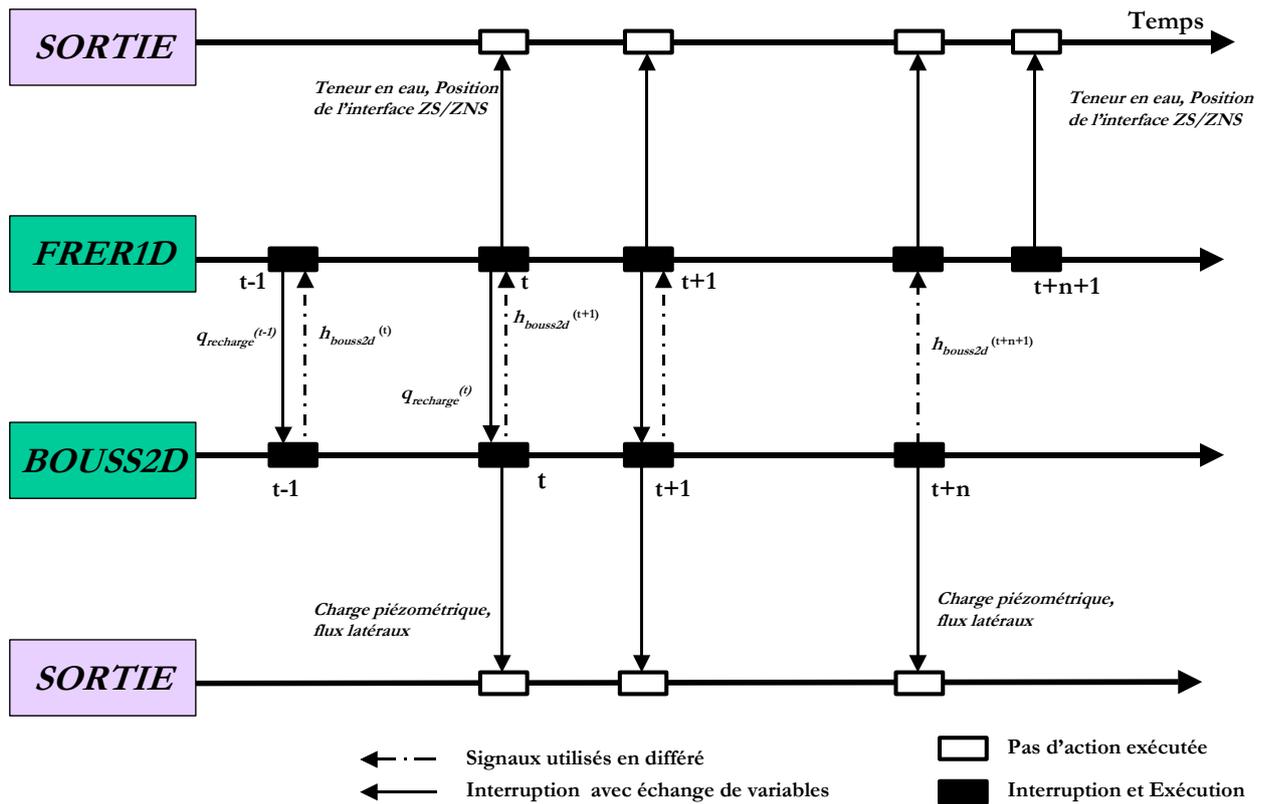


Figure 8. 10 : Déroulement temporel du couplage entre la zone saturée (ZS) et la zone non-saturée (ZNS).

VIII.2.1.b) Le couplage entre la zone saturée et la rivière

Les échanges entre la zone saturée et la rivière influencent les écoulements dans les cours d'eau. Ils peuvent être à l'origine ou soutenir, des crues dans les cours d'eau connectés à des aquifères alluviaux ou soutenir les débits d'étiage. Le module **GWRI** présenté dans le Paragraphe (VIII.1.3) est utilisé pour simuler les échanges entre la nappe et la rivière. Ce module sert d'interface entre la rivière et la nappe et se connecte donc aux deux modules. Les modules **BOUSS2D** et **RIVER1D** sont utilisés respectivement pour les écoulements dans la nappe et dans la rivière. Les flux d'échange entre la nappe et la rivière sont calculés entre les différents brins de rivière du module **RIVER1D** adjacents aux mailles du module **BOUSS2D** comme l'illustre la Figure (8.11). La perte de charge Δh nécessaire au calcul du flux (Equation 8.10) est évaluée par la différence de charge entre la charge piézométrique et la charge au fond de la rivière : $\Delta h = (h_{BOUSS2D} - h_{RIVER1D})$. Ces charges sont fournies respectivement par le module **BOUSS2D** et le module **RIVER1D**.

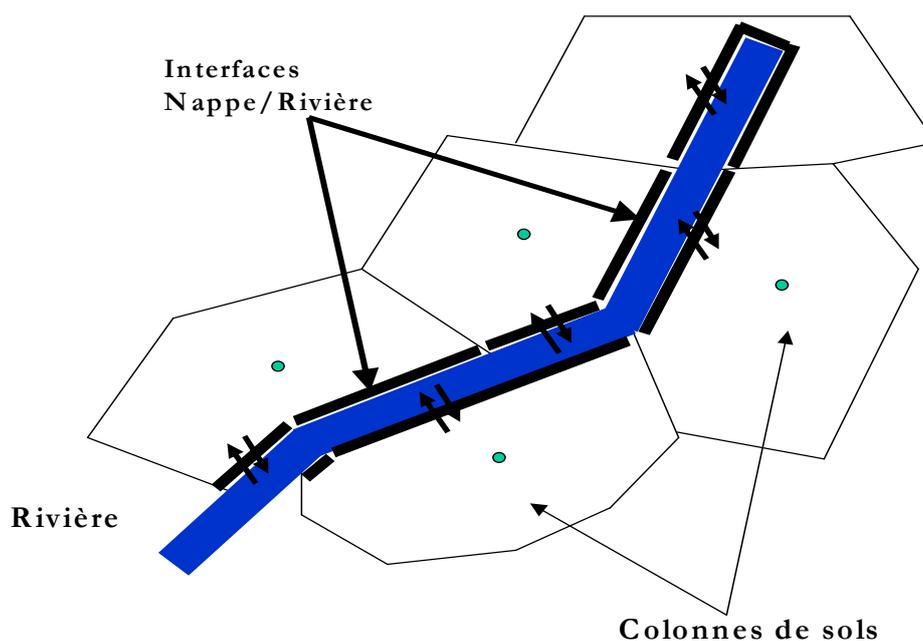


Figure 8. 11 : Configuration des mailles saturées et des brins de rivière pour la simulation des échanges nappe/rivière.

Comme l'illustre la Figure (8.11), chaque interface d'échange est caractérisée par un brin de rivière unique et une maille (appartenant au module saturé) unique.

Au niveau temporel, le module **GWRI** calcule, à chaque pas de temps, le flux d'échange en considérant que l'écoulement entre deux pas de temps suit un régime permanent. La dynamique temporelle du module **GWRI** s'apparente alors à une succession d'écoulements en régime permanent. Le couplage temporel se fait de manière interactive. A chaque changement de hauteurs d'eau dans les mailles saturées adjacentes à la rivière ou dans les brins de rivière, ce module est activé pour le calcul des flux d'échange.

VIII.2.2. Architecture et fonctionnement du modèle

L'implémentation de l'approche de couplage des différents modules présentés dans le paragraphe précédent a permis de concevoir le modèle de bassin versant. Une vision statique des échanges entre les modules est présentée sur la Figure (8.12).

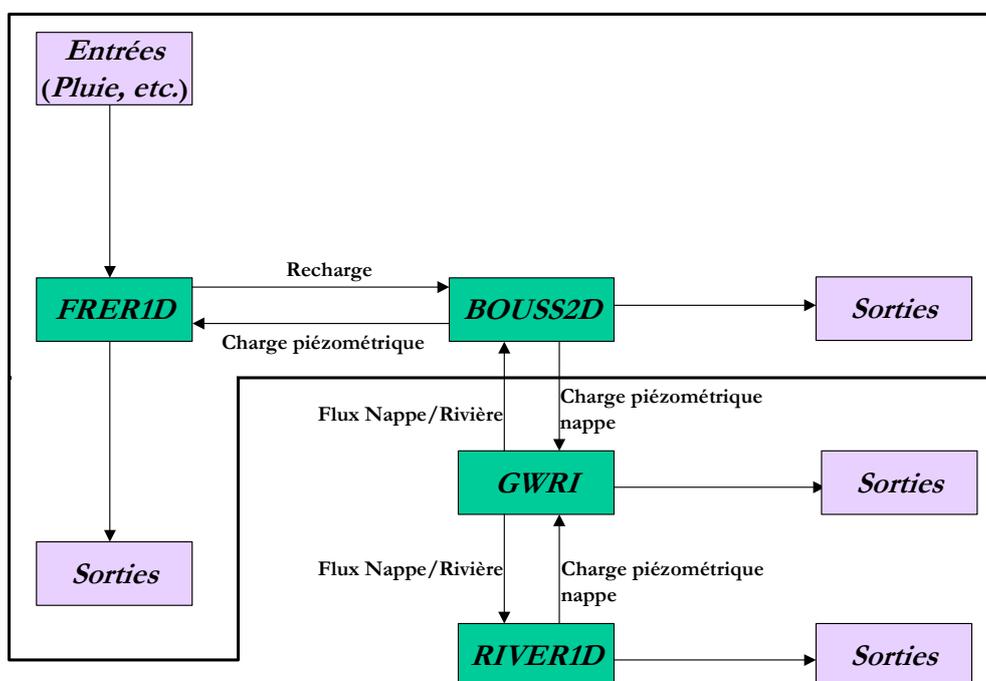


Figure 8. 12 : Schéma global du modèle et description des échanges entre les modules utilisés.

Comme mentionné dans l'introduction de ce chapitre, seul le couplage entre la zone non-saturée et la zone saturée a pu être réalisé et incorporé à ce mémoire de thèse (partie encadrée en noir sur la Figure 8.12). Le reste du couplage est toujours en cours et sera réalisé au-delà du mémoire de thèse.

VIII.3. Evaluation du couplage entre la zone non-saturée et la zone saturée et tests en conditions réelles

Comme l'avons annoncé dans le paragraphe précédent, nous n'avons pas pu, dans le cadre de cette thèse, finir l'assemblage du modèle proposé suivant l'architecture décrite sur la Figure (8.12). Nous avons seulement pu réaliser le couplage entre la zone non-saturée et la zone saturée. Il convient de préciser que pour évaluer pleinement l'approche de modélisation proposée dans la première partie, l'assemblage complet doit être fait. Ce travail se poursuivra donc au-delà de cette thèse. Nous avons néanmoins réalisé, sur le couplage que nous avons pu mener à bien, quelques scénarios d'écoulement pour évaluer et surtout montrer la vraisemblance des résultats et la pertinence du couplage zone non-saturée/zone saturée, dans le cadre du découpage proposé. Pour cela, différents scénarios d'écoulement ont été considérés. Le premier type de scénario consiste à analyser les résultats du couplage en utilisant des configurations d'écoulement et des mailles simples (Paragraphe VIII.3.1.a). Ce premier type de scénario permettra de valider la dynamique globale et les mécanismes d'échange proposés. Dans le Paragraphe (VIII.3.1.b), nous allons tester le comportement du couplage sur un bassin versant en conditions réelles, avec le découpage spatial proposé dans le chapitre (IV).

VIII.3.1. Analyse du couplage zone non-saturée et zone saturée

VIII.3.1.a) Analyse du couplage zone non-saturée et zone saturée dans des configurations simplifiées

Dans ce paragraphe, nous allons soumettre le couplage zone non-saturée/zone saturée à des scénarios de base sur des cas simples pour analyser la dynamique globale du couplage réalisé. On considère, pour l'ensemble des scénarios présentés dans ce paragraphe, un domaine fermé, constitué de mailles régulières carrées de $35m \times 35m$. Ces mailles sont considérées comme des colonnes de sol ayant les propriétés hydrodynamiques suivantes : $K_s = 2.10^{-5} m s^{-1}$, Porosité = 0.312, Porosité de drainage = 0.132). Le module non-saturé (**FRER1D**) a été initialisé en supposant un profil de pression matricielle en équilibre hydrostatique, avec une croissance de la pression de la surface jusqu'au bas de la colonne

(Figure 8.14). Le module saturé a alors été initialisé avec le niveau piézométrique correspondant. Chaque module gère son propre pas de temps (en fonction des forçages et des contraintes propres à chaque module) mais contraint l'autre module à s'interrompre lorsque ses variables d'état changent (voir Figure 8.10).

□ **Scénario 1** : Une nappe en équilibre et une zone non-saturée soumise à un forçage climatique (pluie).

On simule, sur une partie du domaine de simulation, une pluie de $2\text{mm}/h$ environ pendant une durée de 24 heures. Le niveau initial dans la zone saturée est uniforme pour l'ensemble des mailles ($-0,5501\text{ m}$). La recharge due à la pluie au niveau des mailles qui ont subi un forçage climatique induit un gradient de charge dans la zone saturée où un écoulement latéral est initié. Ce scénario a pour but de vérifier l'influence de la zone non-saturée dans la dynamique de la zone saturée.

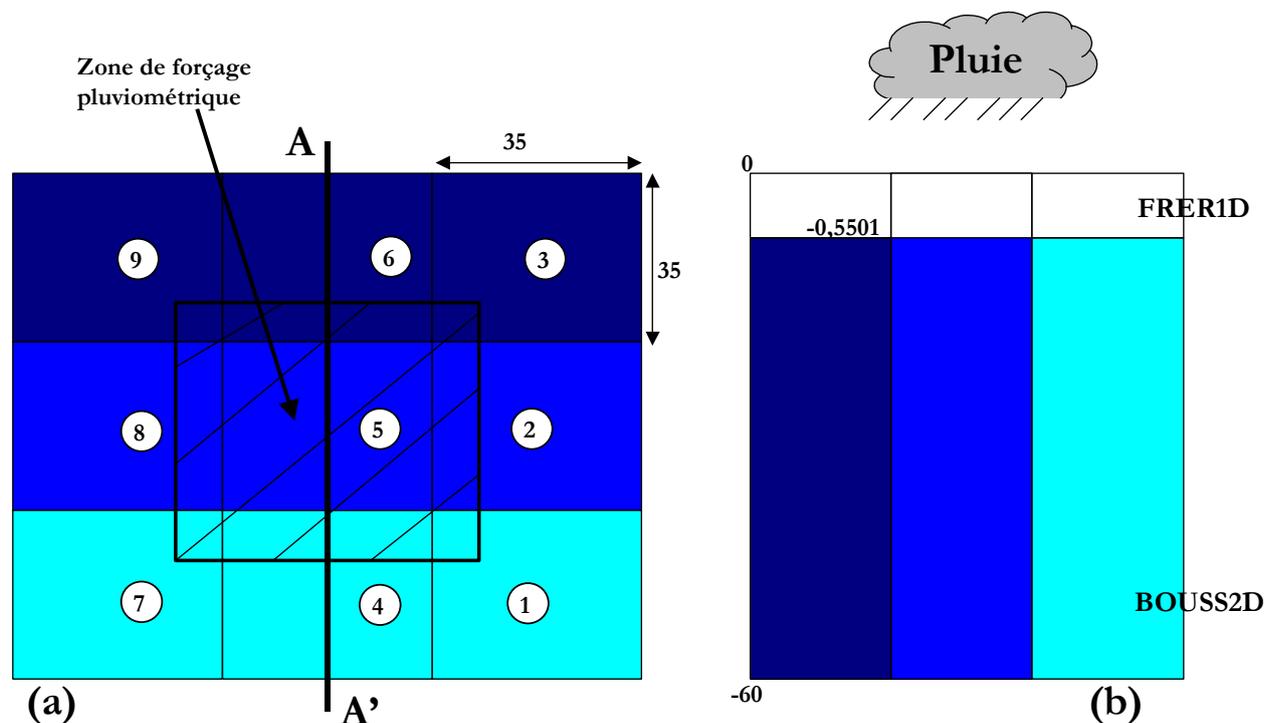


Figure 8. 13 : (a) Domaine de simulation pour le *scénario 1*, avec neuf mailles régulières. (b) Profil vertical de la matrice de sol suivant la trace (AA'). La zone saturée est initialement à l'équilibre, et une partie de la zone non-saturée est soumise à un forçage pluviométrique.

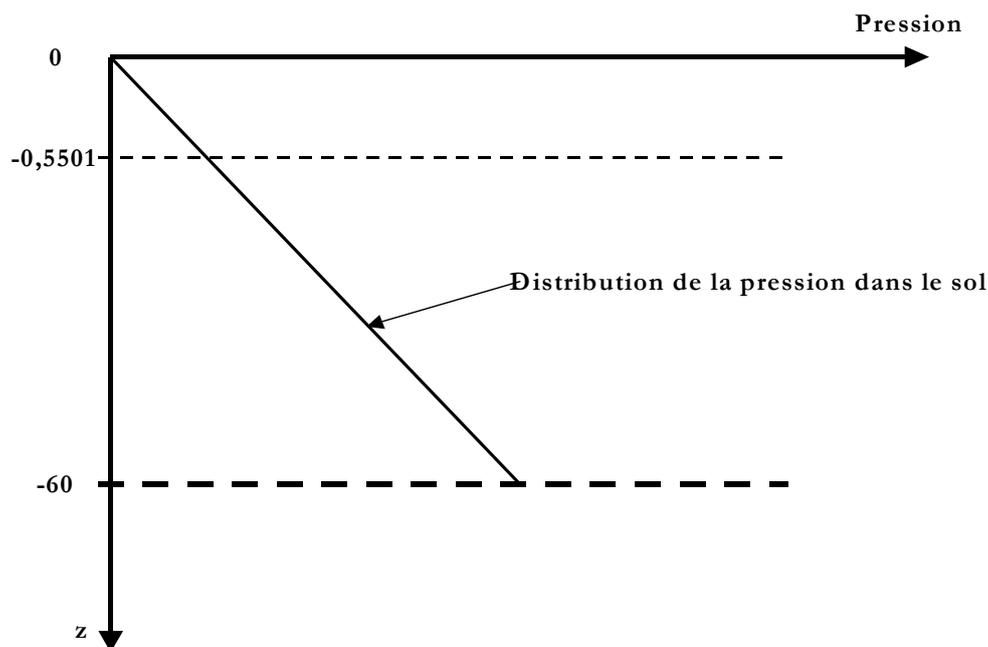


Figure 8. 14 : Distribution initiale de la pression dans le profil de sol du module FRER1D, pour le scénario 1.

Les résultats de la Figure (8.15) montrent que la dynamique attendue est bien reproduite par le couplage. Dans le module non saturé (*FRER1D*), on peut observer une augmentation importante de la charge piézométrique dans la maille soumise au forçage le plus important, puis un écoulement latéral qui permet au bout de 18 jours de stabiliser la position entre la zone non-saturée et la zone saturée (Figure 8.15). Dans le module *BOUSS2D*, cette dynamique se traduit par une recharge de la maille qui reçoit de la pluie sur toute sa surface (maille 5 de la Figure 8.13), puis un écoulement latéral qui permet au système d'évoluer vers un nouveau niveau piézométrique d'équilibre (Figure 8.16) qui est le même au niveau des deux modules (-0,55m).

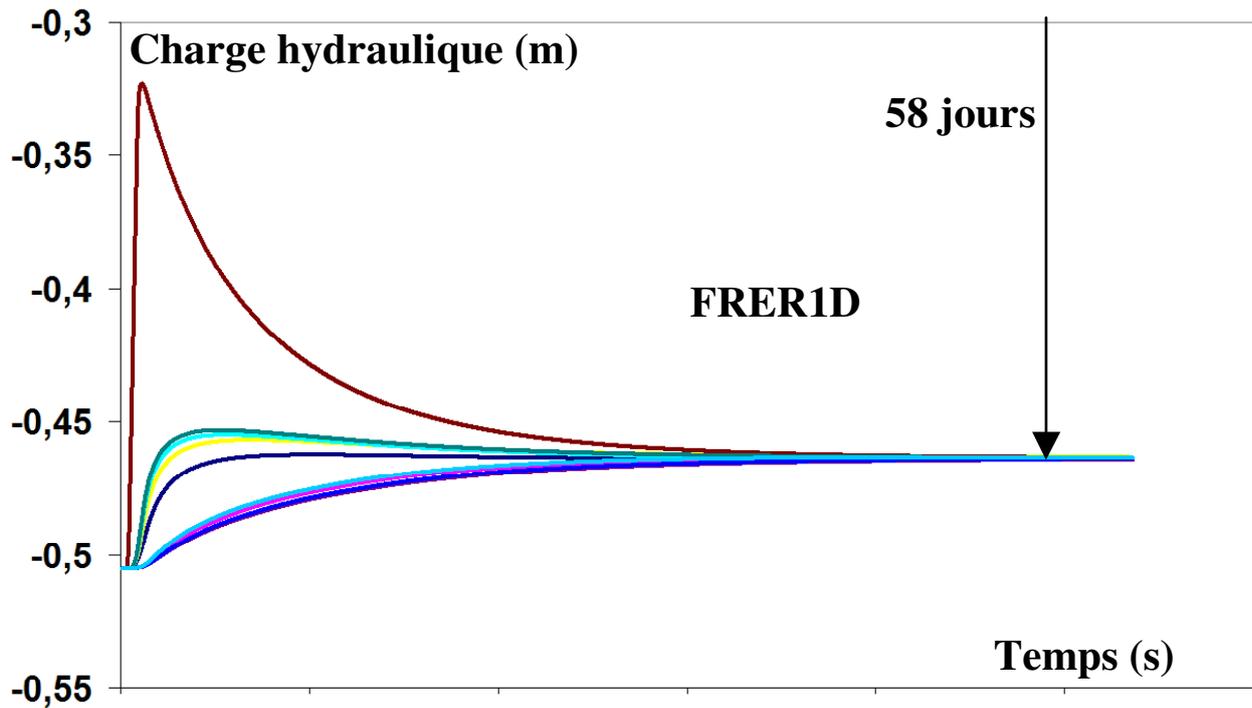


Figure 8. 15 : Evolution de la position de l'interface zone saturée/ zone non-saturée dans le module *FRER1D* pour le *scénario 1*.

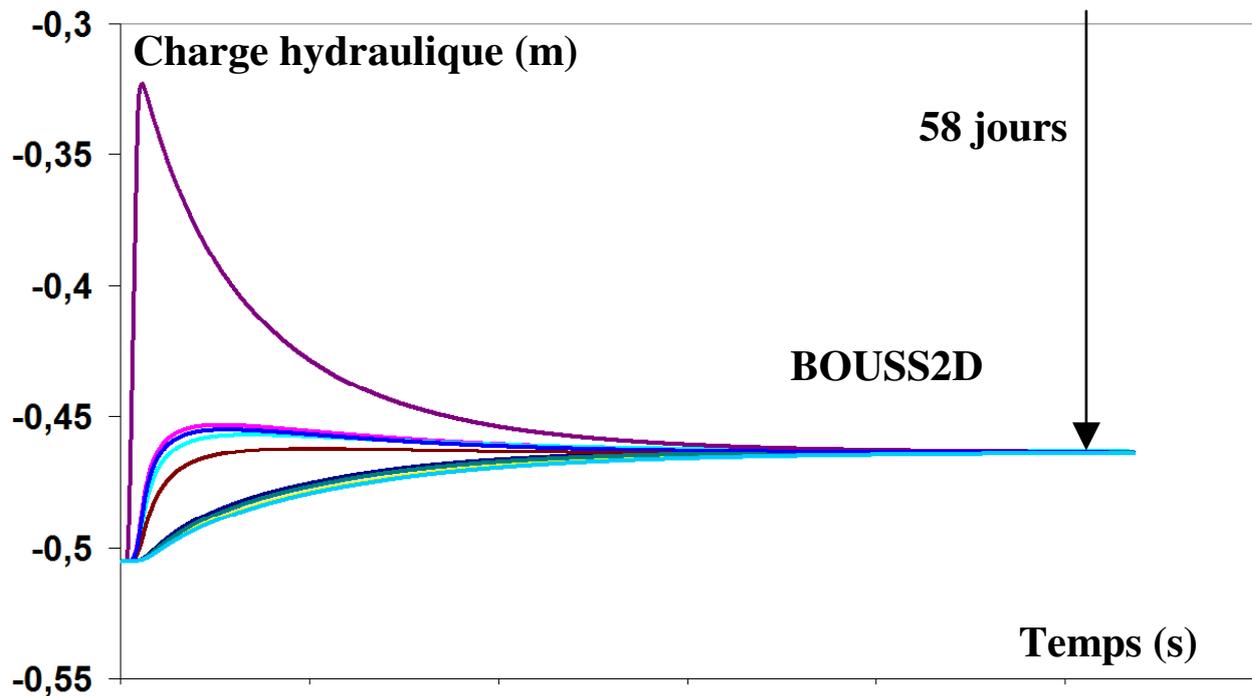


Figure 8. 16 : Evolution du niveau piézométrique dans le module *BOUSS2D* pour le *scénario 1*.

On peut donc dire que la dynamique globale (recharges/écoulements latéraux souterrains) est bien reproduite par le couplage réalisé.

□ **Scénario 2** : La zone saturée est soumise à un gradient et la zone non-saturée n'est pas soumise à un forçage climatique. Le niveau initial de la surface piézométrique est fixé de manière à créer un gradient de charge dans la zone saturée (Figure 8.17). Le couplage est réalisé pour analyser la dynamique d'écoulement dans la zone non-saturée résultant de ce gradient hydraulique. Ce scénario a pour but d'analyser l'influence d'un écoulement souterrain de base sur la dynamique de la zone non-saturée.

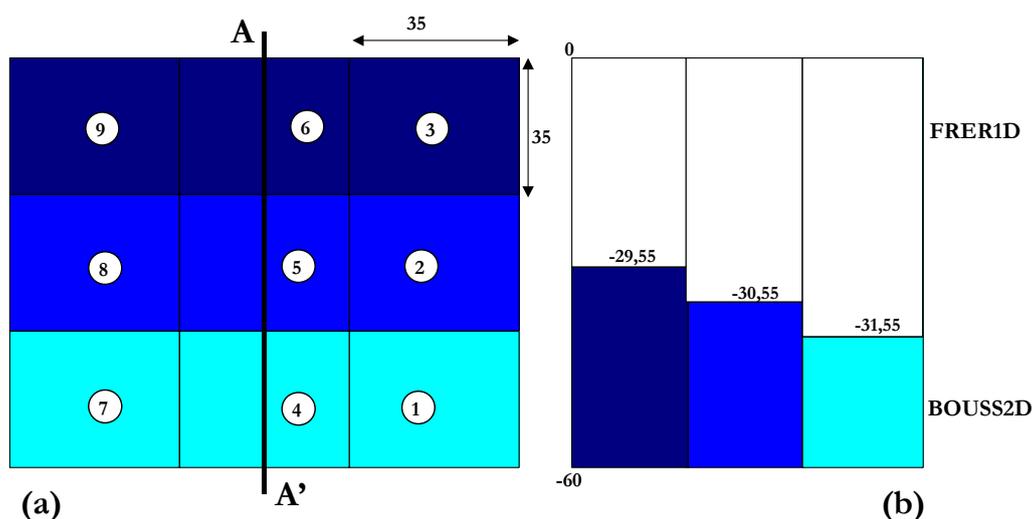


Figure 8. 17 : Domaine de simulation pour le scénario 2, avec neuf mailles régulières (a) et profil vertical de la matrice de sol suivant la trace (AA').

Ce scénario conduit à un écoulement dans la zone saturée (*BOUSS2D*) qui devrait se stabiliser au bout d'un certain temps de simulation. Le couplage permet au module de simulation des transferts dans la zone non-saturée de prendre en compte les transferts latéraux dans la zone saturée pour ajuster ses conditions aux limites. En l'absence d'autres forçages, ces dernières se traduisent par une stabilisation du niveau de nappe dans le module saturé ainsi que de la position de l'interface entre zone saturée et zone non-saturée dans le module *FRER1D*. L'interface entre la zone non-saturée et la zone saturée devrait, dans le module *FRER1D*, converger vers le niveau piézométrique simulé par le module saturé.

Les résultats de la Figure (8.18) montrent que le couplage permet d'obtenir, au niveau de l'interface zone saturée/zone non-saturée du module non-saturé (*FRER1D*), une dynamique comparable à celle de la surface piézométrique simulée dans le module saturé (*BOUSS2D*). On observe au niveau des deux modules, une stabilisation de la surface piézométrique vers la même valeur.

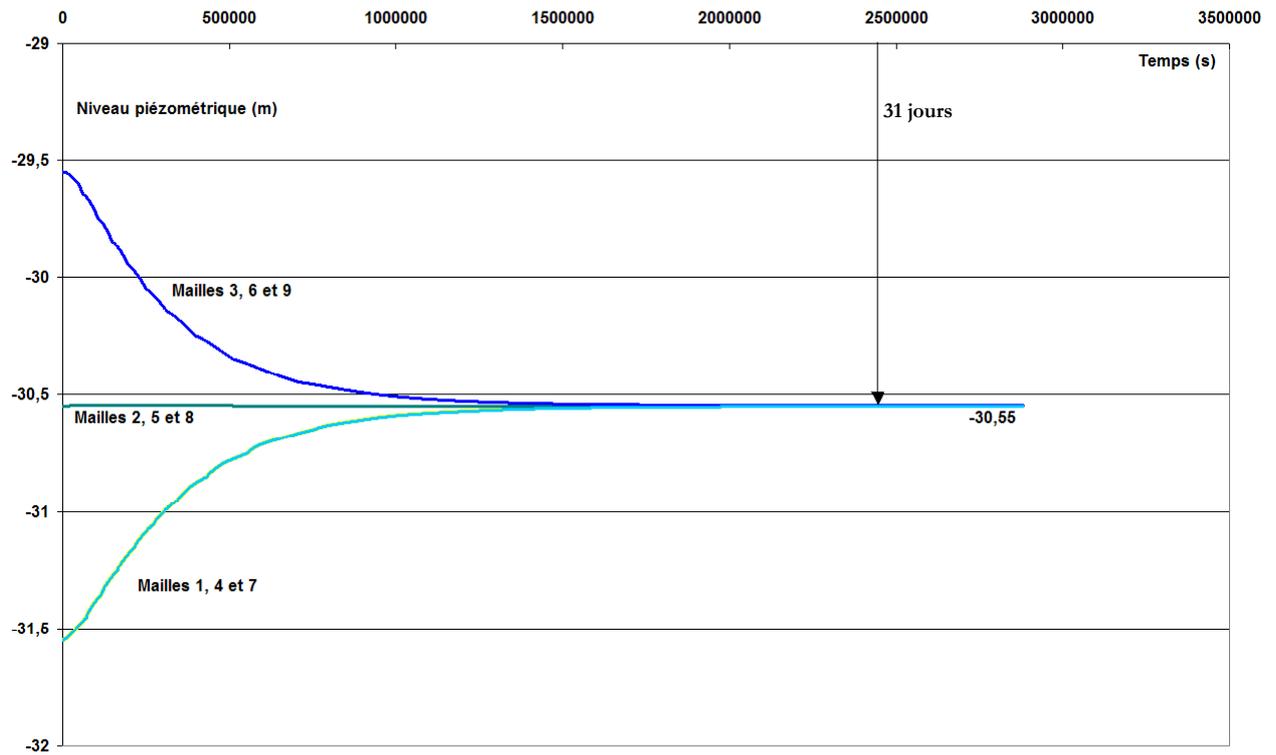


Figure 8. 18 : Evolution du niveau piézométrique dans le module *FRER1D* pour le scénario 2.

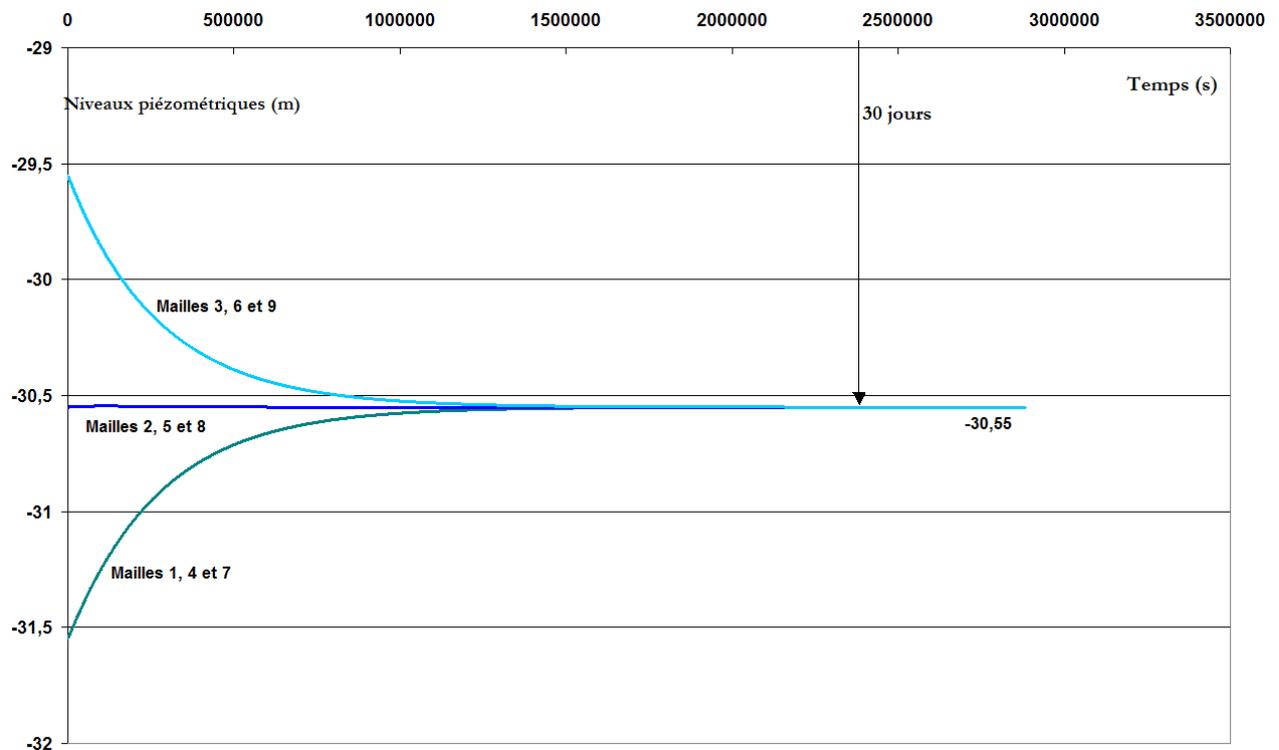


Figure 8. 19 : Evolution du niveau piézométrique dans le module *BOUSS2D* pour le scénario 2.

VIII.3.1.b) Comportement du couplage zone non-saturée/zone saturée en conditions réelles

Dans ce paragraphe, nous allons évaluer le fonctionnement du couplage en conditions naturelles. Pour cela, nous avons utilisé le découpage spatial du bassin versant de la Saône, irrégulier et non structuré (Figure 4.20), présenté dans le Chapitre (IV). Nous avons testé le fonctionnement du couplage sur deux aquifères de tailles différentes : l'aquifère de la Haute-Saône (160 km²) et celle du Dijonnais (30 km²). Ce sont des aquifères libres avec une prédominance de formations géologiques très perméables. L'aquifère de la Haute Saone se situe entre la Saône et l'Ognon et celle du Dijonnais à l'est de Dijon (Voir Figure 8.20).

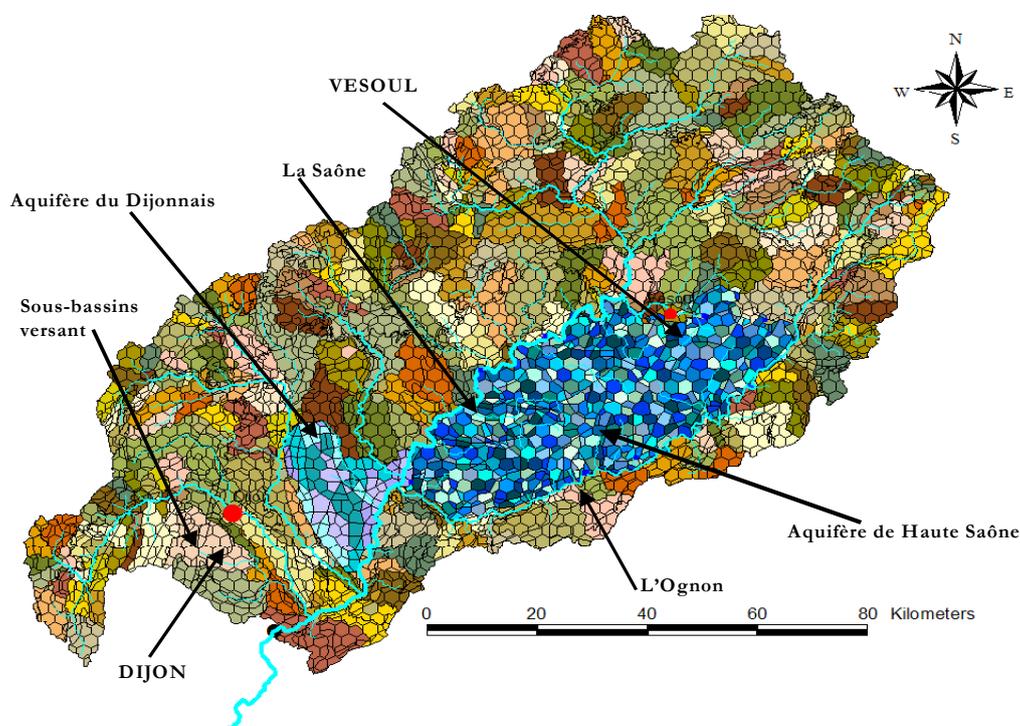


Figure 8. 20 : Localisation de l'aquifère de la Haute-Saône (coloris bleutés), de l'aquifère du Dijonnais (coloris violacés) et re-découpage des hydroscapes (mailles) au sein de sous-bassins (autres coloris).

□ Scénario 3 : Aquifère de la haute Saône

Dans ce premier scénario, nous avons considéré la zone saturée comme un aquifère homogène ayant des propriétés hydrodynamiques proches du type de sol utilisé dans le Paragraphe (VIII.3.1.a) : $K_s = 2.10^{-5} \text{ m s}^{-1}$, Porosité = 0.312, Porosité de drainage = 0.132. Le niveau piézométrique initial est constant sur l'ensemble des mailles du domaine et égal

à $-1,55$ m. On simule un forçage pluviométrique sur une partie du domaine (voir Figure 8.21) et on analyse l'évolution du niveau piézométrique, les délais de propagation de la recharge aux mailles n'ayant pas subi de forçage etc.. La pluviométrie utilisée est de 6mm/h pendant une durée de dix jours. Nous allons analyser, à l'aide du couplage réalisé, les temps au bout desquels l'influence de cette pluie atteint les mailles à l'aval du domaine près de la Saône et près de l'Ognon.

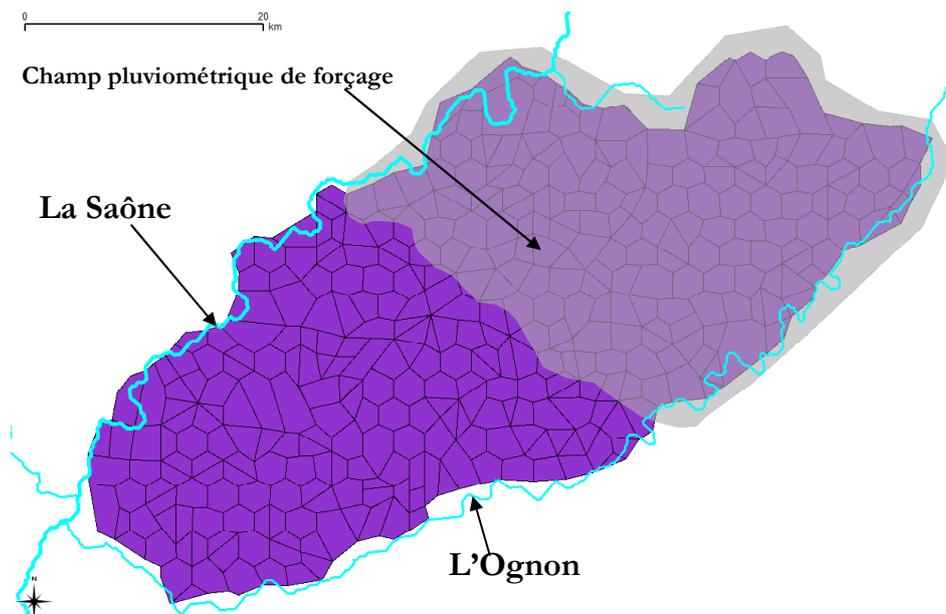


Figure 8. 21 : Scénario de forçage pluviométrique utilisé pour la mise en œuvre du couplage en Haute Saône.

La Figure (8.22) illustre la dynamique observée au niveau des mailles à l'amont (zone où il y a eu un forçage pluviométrique) et les mailles à l'aval (à l'aval de la Saône et de l'Ognon). On peut remarquer que, pour le scénario simulé, l'influence de la recharge amont sur les niveaux piézométriques à l'aval de l'aquifère se fait de façon très lente. On observe une élévation du niveau piézométrique durant l'épisode pluvieux, puis son rabattement après la fin de l'épisode pluvieux. La recharge totale à l'équilibre est très faible (inférieure à 1mm) malgré une pluviométrie exceptionnelle. On note également un retour à l'équilibre très lent.

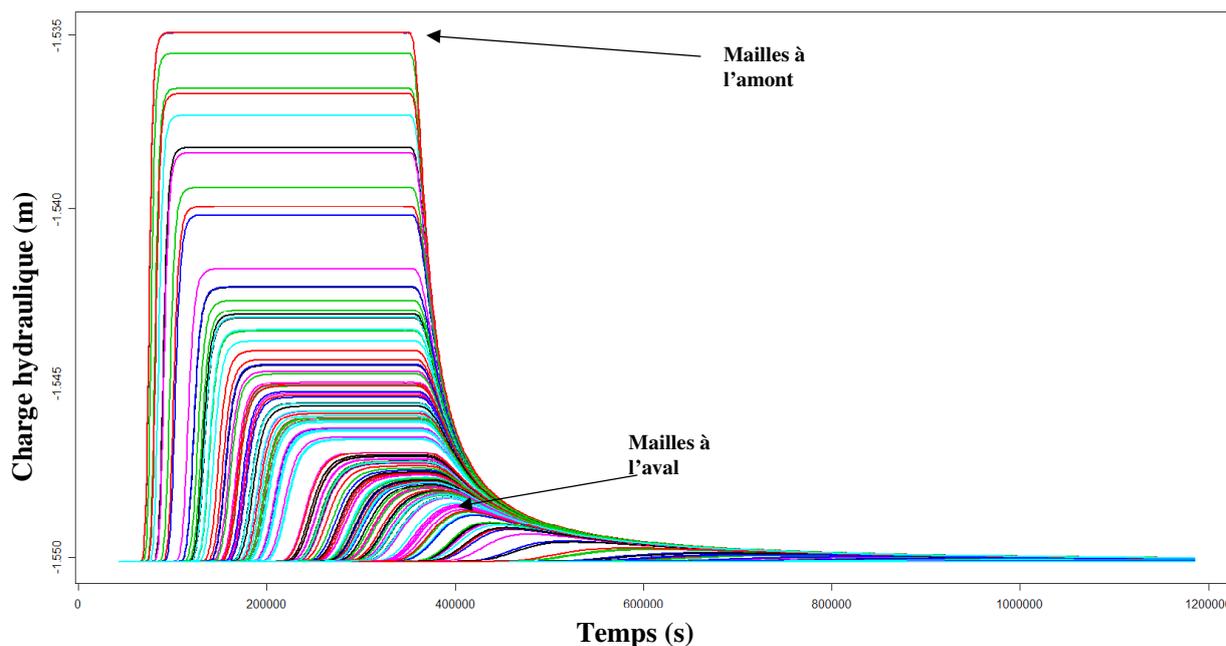


Figure 8. 22 : Evolution du niveau piézométrique des mailles suite à l'épisode pluviométrique simulé. Les mailles à l'aval du domaine sont près de la Saône et de l'Ognon et les mailles à l'amont du domaine sont celle ayant subit un forçage climatique.

□ Scénario 4 : Aquifère du Dijonnais

Dans ce scénario, nous avons considéré la zone saturée comme un aquifère homogène ayant des propriétés hydrodynamiques proches du type de sol utilisé dans le scénario 3 : $K_s = 2.10^{-5} m s^{-1}$, Porosité = 0.312, Porosité de drainage = 0.132. Le niveau piézométrique initial est constant sur l'ensemble des mailles du domaine et égal à $-1,55 m$. Comme dans le scénario précédent, on simule un épisode pluvieux sur une partie du domaine (voir Figure 8.23). La différence avec le scénario précédent réside uniquement dans la taille du domaine de simulation moins importante, et des unités de modélisation plus fines. La pluviométrie utilisée est de 150mm en 24h (soit 6mm/h pendant une durée de 24h). Cette pluviométrie correspond à un épisode pluvieux exceptionnel dans la région.

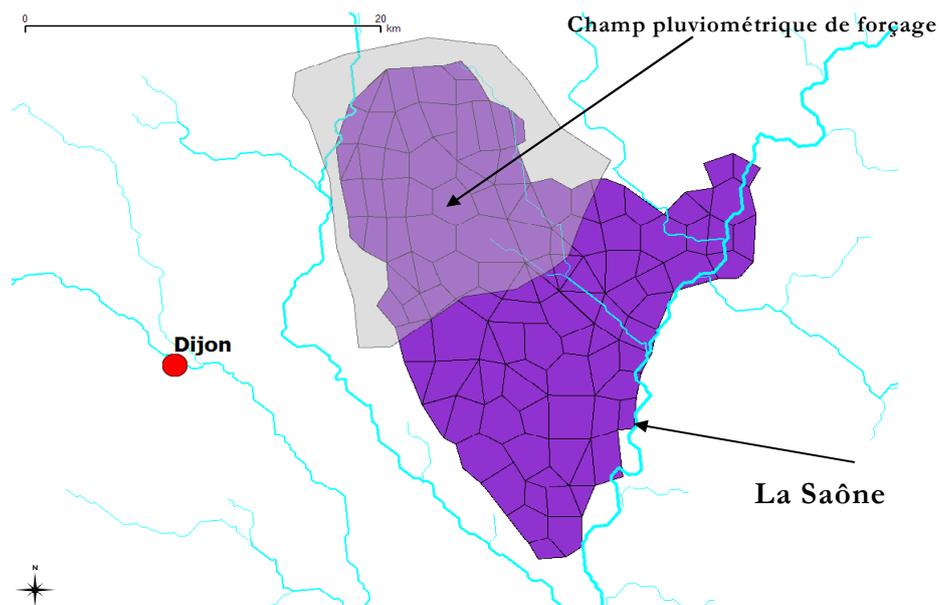


Figure 8. 23 : Scénario de forçage pluviométrique utilisé pour la mise en œuvre du couplage dans le Dijonnais.

Les résultats (Figure 8.24) montrent également que la dynamique globale du système est représentée. On observe une recharge de la nappe, limitée aux cellules ayant subi le forçage climatique puis un écoulement latéral qui induit une baisse du niveau piézométrique dans ces cellules, et une montée du niveau piézométrique dans les autres mailles. On remarque aussi le niveau assez faible de la recharge totale à l'équilibre du système.

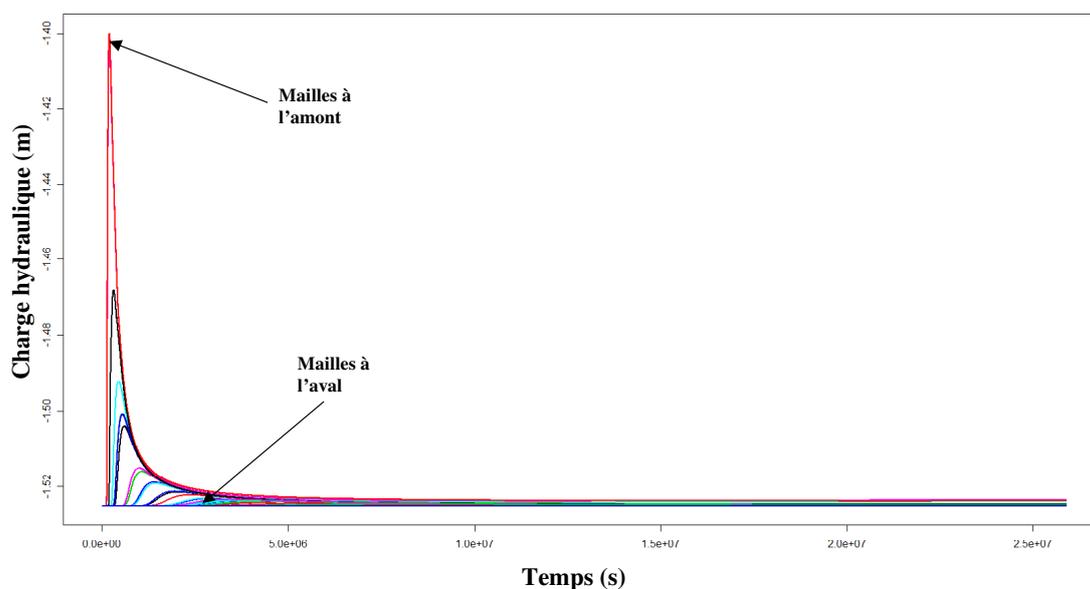


Figure 8. 24 : Evolution du niveau piézométrique des mailles suite à l'épisode pluviométrique simulé sur l'aquifère du Dijonnais.

VIII.3.2. Discussions et perspectives

Dans le travail présenté, le couplage entre les modules de transfert dans les zones non saturée et saturée, a été abordé de manière directe entre les deux modules. De manière globale, les résultats présentés dans le précédent paragraphe montrent qu'il est possible de représenter les écoulements dans le sol avec l'approche proposée. Ces résultats montrent également qu'il est nécessaire d'affiner le couplage entre la zone non-saturée et la zone saturée. Nous n'avons pas pu, dans le cadre de cette thèse, examiner en détails le bilan de masse global du système. Il conviendra de le faire en détails pour valider le module de calcul d'échange. Il faudrait aussi analyser de manière approfondie le lien entre la porosité de drainage, utilisée dans le module saturé et la variation de la teneur en eau dans le module non-saturé. Les incohérences liées au schéma temporel des flux latéraux intégrés au module **FRERID** pourraient être corrigées en changeant le schéma d'intégration temporel de l'un des modules.

Pour réaliser le couplage, on peut imaginer la construction d'un module d'interface, sur le modèle du module **GWRI**, pour les interactions nappe/rivière. Ce module d'interface, pourrait permettre de répondre de manière plus pointue aux enjeux du couplage et d'affiner la représentation des transferts dans cette zone. Introduire une interface spécifique permettrait, pour le calcul des flux à échanger, que le module ait accès aux géométries des différents modules, ainsi qu'aux caractéristiques des sols. On pourrait donc certainement y implémenter des mécanismes de calcul des flux plus sophistiqués que ceux que nous avons utilisés.

Nous n'avons pas pu réaliser dans le cadre de la thèse le modèle hydrologique complet, basé sur l'architecture proposée au début de ce Chapitre, dans le Paragraphe (VIII.2.2). Cette réalité a limité les possibilités d'évaluation de l'approche proposée, notamment pour comparer les résultats obtenus avec des données réelles. Il est alors nécessaire de poursuivre, au-delà de cette thèse, le développement du modèle proposé afin d'avoir une évaluation plus globale et plus poussée de l'approche de représentation de l'hétérogénéité au sein des bassins versants.

Conclusions et perspectives

Synthèse du travail réalisé

Les principes relatifs à la modélisation hydrologique spatialisée, qui ont sous-tendu le travail de thèse présenté dans ce mémoire, sont les suivants :

- pouvoir développer des modélisations hydrologiques adaptées au problème à traiter et aux données disponibles
- pouvoir prendre en compte l'hétérogénéité des surfaces continentales de manière cohérente avec les processus hydrologiques et la résolution des données disponibles pour construire les modélisations souhaitées

Dans la première partie du travail de thèse, nous avons essayé de formaliser les principes objectifs permettant de guider le choix d'une discrétisation de l'espace, compatible à la fois avec la question à traiter, les échelles caractéristiques des processus hydrologiques pris en compte et la résolution des données disponibles. L'analyse bibliographique du Chapitre (II) nous a permis de montrer que le découpage spatial final du bassin versant résultera d'un compromis entre objectifs de la modélisation, données disponibles et choix des représentations des processus hydrologiques pris en compte. Nous avons donc proposé une méthode de découpage spatial en trois niveaux successifs (sous-bassins, hydropaysages et mailles de modélisation) pour décrire l'hétérogénéité spatiale des bassins versants. Une description détaillée de la méthode de détermination de ces différents niveaux de découpage a été présentée dans la première partie, ainsi qu'une application pratique sur le bassin versant de la Saône. Cette méthodologie permet de déboucher sur un découpage spatial qui est fonction des objectifs de modélisation et des données disponibles. Ce découpage peut produire des unités élémentaires ayant des géométries non-structurées et irrégulières.

Dans la deuxième partie du mémoire, nous avons cherché à voir quelle pouvait être la manière la plus pertinente pour mettre en œuvre les objectifs rappelés ci-dessus. Nous avons donc introduit les plates-formes de modélisation hydrologique, qui, après analyse

de l'existant, nous sont apparues comme les plus aptes à permettre la souplesse et la modularité requises pour construire des modélisations « à la carte » en fonction des objectifs et des données disponibles. Nous avons présenté la plate-forme de modélisation LIQUID, utilisée dans le cadre de ce travail, qui offre d'intéressantes perspectives pour une bonne prise en compte des différences d'échelles spatiales et temporelles des différents processus hydrologiques. Le travail présenté dans la troisième partie du mémoire illustre les possibilités offertes par la plate-forme en ce domaine.

En effet, la troisième partie du mémoire nous a permis de montrer, à partir de l'exemple d'un module de transfert d'eau en 2D dans la zone saturée, qu'on pouvait utiliser les géométries irrégulières et non structurées issues de la première partie comme base pour la résolution d'une équation aux dérivées partielles, à partir d'une adaptation de la méthode des volumes finis. Nous avons décrit la méthode de résolution retenue et la validation du modèle ainsi construit par comparaison avec des solutions analytiques et des codes de référence. Cette comparaison a montré d'une part le bon comportement des algorithmes retenus et d'autre part que l'utilisation de géométries irrégulières n'induisait pas de perte de précision par rapport à l'utilisation de maillages réguliers. Nous avons aussi illustré la capacité du modèle à prendre en compte les hétérogénéités (verticales et horizontales) des sols dans la modélisation. Enfin, dans le dernier chapitre de la troisième partie, nous avons abordé le couplage de différents modules développés dans la plate-forme pour aboutir à un premier prototype de modèle tel que défini dans la première partie. Compte tenu du temps disponible, nous n'avons pu réaliser que quelques tests élémentaires visant à montrer le bon comportement du couplage entre la zone non-saturée et la zone saturée au sein de la plate-forme LIQUID. Même si ces premiers résultats sont encourageants, les modalités de couplage, notamment entre modules de transfert dans la zone non saturée et saturée, doivent être approfondies pour vérifier qu'elles sont bien cohérentes (vérification des bilans de masse globaux par exemple). Plusieurs manières d'aborder la question peuvent aussi être testées, afin de déterminer laquelle est la plus performante. Ce premier travail devra aussi être complété par une application dans des conditions plus proches de conditions réelles.

Perspectives

Lors de l'élaboration du sujet de thèse, nous espérons pouvoir tester les idées sur le découpage spatial et les concepts de modélisation hydrologique spatialisée « à la carte » sur le Haut-bassin de la Saône et proposer une analyse de sensibilité des simulations des régimes hydrologiques à des modifications de l'occupation des sols. Si l'objectif d'un découpage spatial s'appuyant sur la méthodologie proposée dans la première partie a pu être atteint, l'application de la modélisation construite n'en est qu'à son balbutiement. Pour mener à bien le travail dans sa totalité, il faudrait aborder les étapes suivantes :

- ❑ Finalisation de la construction du prototype de modèle suivant l'architecture proposée dans le Chapitre VIII (incluant les transferts 1D dans la zone non saturée du sol, les transferts 2D dans les nappes alluviales, les écoulements 1D dans les rivières ainsi que les interactions entre ces processus).
- ❑ Intégration des processus tels que l'évapotranspiration et une représentation simplifiée du ruissellement de surface.
- ❑ Mise en œuvre de la modélisation hydrologique proposée sur l'ensemble du Haut-Bassin de la Saône et évaluation des résultats des simulations.
- ❑ Spécification de l'ensemble des paramètres du modèle sur l'ensemble des unités de modélisation. Ceci inclut notamment un travail important de spatialisation des propriétés de sol. Nous avons abordé cet aspect au Chapitre IV (Annexe I) en utilisant la méthode de détermination de zones homogènes pour étendre une information sur la cartographie des sols à haute résolution aux zones où cette information n'était pas disponible. L'étape suivante est d'affecter des paramètres hydrodynamiques (courbes de rétention et de conductivité hydraulique) aux différents types de sols identifiés. On peut, pour cela, utiliser des fonctions de pédo-transfert, qu'il faudrait, idéalement, adapter à la zone d'étude, car on sait que l'utilisation de valeurs tirées de la littérature est pleine d'incertitudes. Une autre catégorie de paramètres à renseigner sont, pour la simulation de l'évapotranspiration, tous les paramètres liés à la végétation (taux de couverture, évolution de l'indice foliaire, profondeurs racinaires, etc.). Là encore des tables existent, mais leur utilisation conduit, encore une fois, à pas mal d'incertitudes. Enfin, il faut aussi pouvoir

spécifier les paramètres relatifs à la description du réseau hydrographique qui, bien que schématique, doit rester cohérent avec la physique des écoulements.

□ Une fois un jeu de paramètres affecté aux différentes unités de modélisation, on peut passer à la comparaison des résultats de simulation de long terme (avec le forçage SAFRAN sur une dizaine d'années) aux mesures existantes sur le débit et la hauteur de nappe. Une analyse de sensibilité aux valeurs des paramètres serait aussi requise pour connaître ceux qui ont une influence majeure sur les simulations.

□ En fonction des résultats obtenus, on pourrait être amené, à ce stade, à caler certains des paramètres du modèle. A ce niveau, on retiendrait une méthode parcimonieuse, qui permet de conserver la variabilité spatiale des paramètres et de caler un facteur multiplicatif de l'ensemble (Engeland et al., 2006). Pour prendre en compte les incertitudes sur les paramètres, on peut utiliser des méthodes multi-objectifs (Bastidas et al., 1999 ; Gupta et al., 1999 ; Engeland et al., 2006) qui permettent de prendre en compte des effets de compensation sur la simulation de différentes variables objectifs.

Cette longue liste montre bien que le travail présenté dans la thèse n'est qu'un premier pas sur un chemin qui s'avère encore long. Nous espérons néanmoins que le travail présenté dans ce mémoire, parce que nous avons fait l'effort de formaliser et d'explicitier des choix réalisés en modélisation hydrologique, permettra d'aborder de manière plus sereine et objective la modélisation hydrologique spatialisée. Nous pensons aussi que le travail présenté ici illustre de manière convaincante les potentialités de la plate-forme de modélisation hydrologique LIQUID. Le modèle que nous avons souhaité assembler a posé de nouveaux défis, pas nécessairement pris en compte dans les spécifications initiales de LIQUID. On peut mentionner l'utilisation de schémas implicites pour la résolution d'un module de transfert, les couplages spatiaux sur géométrie irrégulière et le traitement pertinent de la connectivité entre éléments. Néanmoins, sans remettre en cause les choix de base, ces défis ont pu être pris en compte, moyennant quelques évolutions de la plate-forme. Il faudra maintenant continuer à travailler pour permettre la valorisation, notamment via des comparaisons avec des données réelles, du potentiel de cet outil.

Bibliographie

Abbott, M. B., J. C. Bathurst, J. A. Cunge, P. E. O'Connell and J. Rasmussen: "An introduction to the European Hydrological System -- Systeme Hydrologique Europeen, "SHE", 1: History and philosophy of a physically-based, distributed modelling system." J. Hydrol. **87**(1-2), 45-59, 1986a.

Abbott, M. B., J. C. Bathurst, J. A. Cunge, P. E. O'Connell and J. Rasmussen: "An introduction to the European Hydrological System -- Systeme Hydrologique Europeen, "SHE", 2: Structure of a physically-based, distributed modelling system." J. Hydrol. **87**(1-2), 61-77, 1986b.

Argent, R. M.: "An overview of model integration for environmental applications-components, frameworks and semantics." Environ. Modell. Software **19**(3), 219-234, 2004.

Armstrong, R. and L. Martz: "Topographic parameterization in continental hydrology: a study in scale." Hydrol. Processes **17**(18), 3763-3781, 2003.

Bacq, N. and G. Billen: "Modélisation de la qualité de l'eau des grands sous-bassins amont Eure / Oise / Marne / Seine-Amont. Modèle SENEQUE 3.1 (Piren-Seine)." Rapport PIREN-Seine 2003, 2003.

Barth, T.: "Aspects of unstructured grids and finite volume solvers for the Euler and Navier-Stokes Equation." Lecture Notes presented at the VKI lectures series, 1994.

Barth, T. and Ohlbeger: "Finite volume methods: Foundation and analysis." Encyclopedia of computational mechanics, 57, 2004.

Bashford, E. K., K. Beven and C. P. Young: "Observational data and scale dependant parametrizations: explorations using a virtual hydrology reality." Hydrol. Process. **16**, 293-312, 2002.

Bastidas, L. A., H. V. Gupta, S. Sorooshian, W. J. Shuttleworth and Z. L. Yang: "Sensitivity analysis of a land surface scheme using multicriteria methods." Journal of Geophysical Research **104**(D16), 19481-19440, 1999.

Bates, P. D. and A. P. J. De Roo: "A simple raster-based model for flood inundation simulation." J. Hydrol. **236**(1-2), 54-77, 2000.

Becker, A., G. Blöschl and A. Hall: "Special Issue: Land surface heterogeneity and scaling in hydrology. Preface." J. Hydrol. **217**(3-4), 169-170, 1999a.

Becker, A. and P. Braun: "Disaggregation, aggregation and spatial scaling in hydrological modelling." J. Hydrol. **217**(3-4), 239-252, 1999b.

Beldring, S.: " Multi-criteria validation of a precipitation-runoff model." J. Hydrol. **257**, 189-211, 2002.

Bergen, K. M., D. G. Brown, J. F. Rutherford and E. J. Gustafson: "Change detection with heterogeneous data using ecoregional stratification, statistical summaries and a land allocation algorithm." Remote Sensing of Environment **97**(4), 434-446, 2005.

Bergström, S. and P. L. Graham: "On the scale problem in hydrological modelling." J. Hydrol. **211**, 253-265, 1998.

Beven, K.: "Linking parameters across scales: subgrid parametrisations and scale dependent hydrological models." Hydrologic Processes **9**, 507-525, 1995.

Beven, K.: "How far can we go in distributed hydrological modelling?" Hydrology and Earth System Sciences **5**(2), 1-12, 2001.

Beven, K.: "Towards an alternative blueprint for physically-based digitally simulated hydrological modelling system." Hydrol. Processes **16**, 189-206, 2002a.

Beven, K.: "Towards a coherent philosophy for modelling the environment." Proc. R. Soc. London A **458**, 2465-2484, 2002b.

Beven, K.: "On environmental models of everywhere on the GRID." Hydrol. Processes **17**, 141-174, 2003.

Beven, K. and A. Binley: "The future of distributed models: model calibration and uncertainty prediction." Hydrol. Processes **6**, 279-298, 1992.

Beven, K. and M. J. Kirkby: "A physically-based variable contributing area model of basin hydrology." Hydrol. Sci. Bull. **24**, 43-69, 1979.

Blind, M. and J. B. Gregerson: "Towards an Open Modelling Interface (OpenMI) the HarmonIT project." Advances in Geosciences **4**, 69-74, 2005.

Blöschl, G. and M. Sivapalan: "Scale issues in hydrological modelling: a review." Hydrol. Processes **9**(3-4), 251-290, 1995.

Bonin, M.: "Définition et identification d'objets sur une image à haute résolution spatiale: application à la différenciation de types de châtaigneraies avec CLAPAS." Journée " la télédétection à très haute résolution spatiale" CEMAGREF Montpellier, 8, 1999.

Bornand, M. B., D. Arrouays, D. Baize and M. Jamagne: "Cadre méthodologique d'une cartographie régionale des sols à l'échelle du 1/250 000." Science du sol **27**, 17-20, 1989.

Bossard, M., J. Feranec and J. Otahel: "Corine Land Cover technical guide - Addendum 2000," Technical report N°40, European Environment Agency, Copenhagen, Denmark 2000, 2001.

Branger, F.: "Utilisation d'une plate-forme de modélisation environnementale pour représenter le rôle d'aménagements hydro-agricoles sur les flux d'eau et de pesticides - Application au bassin versant du Theil." Thèse de Doctorat: Université Joseph Fourier Grenoble I, Grenoble France, 2007.

Branger, F.: "River1D: module simplifié d'écoulement en rivière." Documentation de module dans la plate-forme LIQUID. CEMAGREF HHLY., 8p, 2007b.

Braud, I., A. C. Dantas-Antonino, M. Vauclin, J. L. Thony and P. Ruelle: "A Simple Soil Plant Atmosphere Transfer model (SiSPAT).Development and field verification." Journal of Hydrology **166**, 213-250, 1995.

Braud, I., M. Vauclin and A. C. and Dantas-Antonino: "A stochastic approach to study the influence of the spatial variability of soil hydraulic properties on surface fluxes temperature and humidity." Journal of Hydrology **165**, 283-310, 1995.

Braud, I., A. Vich, J. Zuluaga, L. Fornero and A. Pedrani: "Vegetation influence on runoff and sediment yield in the Andes region: observation and modelling." Journal of Hydrology **254**, 124-144, 2001.

Brooks, R. H. and A. J. Corey: "Hydraulic properties of porous media." Hydrol. Paper 3, Colo. State Univ., Fort Collins, CO., 1964.

Bsaibes, A.: Etude d'une approche multi-locale d'estimation spatiale de l'évapotranspiration. Cas d'un bassin versant agricole hétérogène en région méditerranéenne. Ecole doctorale Terrer, Eau, Espace. Formation doctorale: Sciences de l'Eau et de l'environnement continental. Montpellier, Université de Montpellier II, 227 pp., 2007.

Buis, S., A. Piacentini, D. Déclat and P. group: "PALM: a computational framework for assembling high-performance computing applications." Concurrency and computation: practice and experience **18**, 231-245, 2005.

Burrough, P., P. van Gaans and R. Hootsmans: "Continous classification in soil survey: spatial correlation, confusion and boundaries." Geoderma **77**(2-4), 115-135, 1997.

Cappelaere, B., B. E. Vieux, C. Peugeot, A. Maia and L. Seguis: "Hydrologic process simulation of a semiarid, endoreic catchment in Sahelian West Niger. 2. Model calibration and uncertainty characterization." Journal of Hydrology **279**(1-4), 244-261, 2003.

Carey, W. P. and A. Simon: "Physical basis and potential estimation techniques for soil erosion parameters in the Precipitation-Runoff Modeling System." U.S. Geol. Surv. Water-Resour. Invest. Rep., 84-4218, 1984.

Carluer, N. and de Marsily G.: "Assessment and modelling of the influence of man made networks on the hydrology of a small watershed: Implications for fast flow components, water quality and landscape management." J. Hydrol. **285**(1-4), 76-95, 2004.

Castany, G.: "Principes et méthodes de l'hydrogéologie." Dunod Paris., 238p, 1982.

Celia, E. Bouloutas and R. S. Zarba: "A general Mass-Conservative Numerical Solution for the Unsaturated Flow Equation." Water Resources Research **26**(7), 1483 - 1496, 1990.

Cerdan, O., Y. Le Bissonnais, G. Govers, V. Lecomte, K. van Oost, A. Couturier, C. King and N. Dubreuil: "Scale effect on runoff from experimental plots to catchments in agricultural areas in Normandy." Journal of Hydrology **299**(1-2), 4-14, 2004.

Chow, V. T.: "Handbook of applied hydrology." McGraw Hill, New York, 1964.

Chow, V. T., D. Maidment and L. W. Mays. Applied hydrology, Mac-Graw Hill International editions 1988.

Christiansen, J. H.: A flexible object-based software framework for modeling complex systems with interacting natural and societal processes. 4th Conference on Integrating GIS and Environmental Modelling (GIS/EM4): Problems, Prospects and Research Needs, Banff, Canada, 2000.

Ciarapica, L. and E. Todini: "TOPKAPI: a model for the representation of the rainfall-runoff process at different scales." Hydrological Processes **16**(2), 207-229, 2002.

Clapp, R. B. and G. H. Hornberger: "Empirical equations for some soil hydraulic properties." Water Resources Research **14**(4), 601-604, 1978.

Codd, E. F.: "A Relational Model of Data for Large Shared Data Banks." Commun. ACM **13**(6), 377-387, 1970.

Collis Jaron and C. v. Buskirk: "The Zeus Agent Building Toolkit." ZEUS Methodology Documentation, 2000.

Collis Jaron and Christopher van Buskirk: "The Zeus Technical Manual." ZEUS Methodology Documentation, 2000b.

Cosandey, C. and M. de Oliveira: "Surfaces saturées, surfaces contributives: localisation et extension dans l'espace du bassin versant." Hydrological Sciences Journal - Journal des Sciences Hydrologiques **41**(5), 751-761, 1996.

Cosby, B. J., G. M. Horneberger, R. B. Clapp and T. R. Ginn: "A statistical exploration of the relationships of soil moisture characteristics to the physical properties of soils." Water Resources Research **20**(6), 682-690, 1984.

Croft, N.: "unstructured mesh finite volume algorithms for Swirling, turbulent, reacting flows." Phd thesis, University of Greenwich, London UK, 1998.

Crooks, S. and C. Prudhomme: "Proof of Concept of OpenMI: A Test Case for the Thames." OpenMI Presentations, 2006.

David, O., S. L. Markstrom, K. Rojas, L. R. Ahuja and I. W. Schneider: "The Object Modelling System." Agricultural System Models in field Research and Technology Transfert. L. Ahuja, L. Ma, T.A. Howell, Eds., Lewis Publishers, CRC Press LLC 317-331, 2002.

de CONDAPPA, D.: "Etude de l'écoulement d'eau à travers la zone non-saturée des aquifères de socle à l'échelle spatiale du bassin versant. Application à l'évaluation de la recharge au sein du bassin versant de Maheshwaram, Andhra Pradesh, Inde." Thèse de Doctorat de l'Université Joseph Fourier, 355p., 2005.

de Marsily, G.: "Quantitative hydrogeology: Groundwater hydrology for engineers." Ed Masson. Paris, 1981.

Dehotin, J. and I. Braud: "Which spatial discretization for distributed hydrological model? Proposition of a methodology for medium to large-scale catchments discretization." Hydrol. Earth Syst. Sci. In Discussion Hess-2007-007, 2007.

Deveughèle, M.: "Porosité et perméabilité des sols et des roches." Centre de Géologie de L'ingénieur ENSMP/ENPC, 1992.

D'Herbes, J. M. and C. Valentin: "Land surface conditions of the Niamey region: ecological and hydrological implications." Journal of Hydrology **189**(1-4), 18-42, 1997.

DHI, S.: "The Mike SHE Technical Reference." 2005.

Dingman, S. L. Physical hydrology, Prentice Hall Inc 1994.

Diskin, M. and E. S. Simpson: "A quasi linear spatially distributed model for the surface runoff systems." Water Ressources Bulletin **14**(4), 903 - 918, 1978.

Dogan, A. and L. H. Motz: "Saturated-Unsaturated 3D Groundwater Model. I: Development." Journal of Hydrologic Engineering **10**(6), 492-504, 2005.

Dogan, A. and L. H. Motz: "Saturated-Unsaturated 3D Groundwater Model. II: Verification and Application." Journal of Hydrologic Engineering **10**(6), 505-515, 2005.

Durand, Y., E. Brun, G. Merindol, G. Guyomarc'H, B. Lessafre and E. Martin: "A meteorological estimation of relevant parameters for snow models." Annals of glaciology **18**, 65-71, 1993.

Eder, G., M. Sivapalan and H. P. Nachtnebel: "Modelling water balances in an Alpine catchment through exploitation of emergent properties over changing time scales." Hydrological Processes **17**, 2125-2149, 2003.

Engeland, K., I. Braud, L. Gottschalk and E. Leblois: "Multi-objective regional modelling." Journal of Hydrology **327**(3-4), 339-351, 2006.

Engeland, K., Braud, I., Gottschalk, L. and Leblois, E: "Multi-objective regional modelling." J. Hydrol. **327**(3-4), 339-351, 2006.

Equipe Cosivie: "COuplage de modèles pour la SIMulation numérique de problématiques enVIronnementalEs." INRIA, Rocquencourt, 35p., 2002.

Even, S.: "Modélisation d'un écosystème fluvial: la seine. Le modèle PROSE." Thèse de doctorat de l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, 1998.

Eymard, R., Gallouet T and Herbin Raphaël: "Finite volumes method." To appear in the Handbook of numerical analysis Eds Ph Ciarlet and J.L Lyons **7**, 713-1020, 1997.

Favrot, J.: "Une stratégie d'inventaire cartographique à grande échelle: la méthode des secteurs de référence." Science du sol **27**, 351-368, 1989.

Fianyo, E.: "Couplage de modèles à l'aide d'agents : le système OSIRIS." Thèse de doctorat en informatique de l'Université Paris IX-Dauphine, 2001.

Fianyo, E., J. P. Treuil, Y. Demazeau and S. Pinson: "OSIRIS : une architecture multi-agents de couplage de processus physiques pour simuler le fonctionnement hydro-salin d'une région irriguée." Ghent, SCS European Publishing House
3ème conférence francophone de MODélisation et SIMulation, Troyes, France. In: A. Dolgui and F. Vernadat (eds) actes de MOSIM'01: Conception, analyse et gestion des systèmes industriels, **2**, 2001.

Fianyo, E., J. P. Treuil and S. Pinson: "OSIRIS system : An Architecture for coupling Environmental Processes with Agents." 3th European Simulation Symposium, Marseille, France. In: N. Giambiasi and C. Frydman (eds) ESS'01 proceedings. Erlangen, SCS European Publishing House., 2001c.

Finke, hartwich, Duval, Ibanez, Jamagne and D. King: "Georeferenced Soil Database for Europe, Manuel of Procedure : Version 1.0, European Soil Bureau. European Communities." 184, 1998.

Flügel, W. A.: "Delineating Hydrgeological Response Units by geographical information system analyses for regional hydrological modelling using PRMS/MMS in the drainage basin of the river Bröl in Germany." Hydrol. Processes **9**(3-4), 423-436, 1995.

Fortin, J. P., R. Moussa, C. Bocquillon and J. P. Villeneuve: "HYDROTEL, un modèle hydrologique distribué pouvant bénéficier des données fournies par la télédétection et les systèmes d'information géographique." Revue des sciences de l'eau **8**(1), 97-124, 1995.

Garbrecht, J. and L. W. Martz: "The assignment of drainage direction over flat surfaces in raster digital elevation models." J. Hydrol. **193**(1-4), 204-213, 1997.

Gejadze, I. Y. and J. Monnier: "On a 2D 'zoom' for the 1D shallow water model: Coupling and data assimilation." Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering **196**(45-48), 4628-4643, 2007.

Girard, M. C.: "Glossaire de Science du Sol." Institut National Agronomique de Paris-Grignon Département Agronomie Environnement (AGER), 2000.

Gottschalk, L., S. Beldring, K. Engeland, L. Tallakse, N. R. Saelthun, S. Kolberg and Y. Motovilov: "Regional/mesoscale hydrological modeling: a Scandinavian experience." Hydrological Sciences Journal - Journal des Sciences Hydrologiques **46**(6), 963-982, 2001.

Gourmelon, J.: Faisabilité de l'utilisation de segmentation sous SIG pour une stratification assistée des paysages. Application à la réalisation d'un plan d'échantillonnage pertinent dans le cadre de la constitution des bases de données géographiques "Sols et Territoires de Bourgogne". Rapport de stage Université de Bourgogne, 54 pp., 2003.

Graham, L. P. and S. Bergström: "Land surface modelling in hydrology and meteorology - lessons learned from the Baltic basin." Hydrology and Earth System Sciences **4**(1), 13-22, 2000.

Grayson, R. B., I. D. Moore and T. A. McMahon: "Physically based hydrologic modelling 1 : A terrain-based model for investigative purposes." Water Resources Research **28**(10), 2639-2658, 1992a.

Grayson, R. B. and I. D. a. M. Moore, T.A., : "Physically based hydrologic modelling 2. Is the concept realistic." Water Resour. Res. **28**(10), 2659-2666, 1992.

Green, A. E., Astill M.S., McAneney K.J. and Nieveen J.P.: "Path-averaged surface fluxes determined from infrared and microwave scintillometers." Agric. Forest. Meteorol. **109**(3), 233-247, 2001.

Green, W. H. and G. Ampt: "Studies of soil physics, Part I- The flow of air and water through soils." J. Ag. Sci. **4**, 1-24, 1911.

Gregersen, J., P. Gijbbers, S. Westen and M. Blind: "OpenMI: the essential concepts and their implications for legacy software." Advances in Geosciences **4**, 37-44, 2005.

Gupta, H. J., L. A. Bastidas, S. Sorooshian, W. J. Shuttleworth and Y. Z.L.: "Parameter estimation of a land surface scheme using multicriteria methods." Journal of Geophysical research **104**(D16), 19491-19503, 1999.

Harbaugh, A. W., E. B. Banta, M. C. Hill and M. G. MacDonald: MODFLOW 2000, The US Geological Survey modular groundwater model. User guide to modularization concepts and the groundwater flow process. Reston, Virginia, USGS, 121 pp, 2000.

Hassani, K.: "Elaboration d'une base de données relationnelle intégrant L'information géographique et géométrique d'un bassin versant." Master Professionnel Compétences complémentaires en Informatique. UCBL Lyon., 59p., 2006.

Haverkamp, R., F. Bouraoui, R. Angulo-Jaramillo, C. Zammit and J. W. Delleur: Soil properties and moisture movement in the unsaturated zone. CRC Groundwater Engineering Handbook. J. W. Delleur, 1998.

Haverkamp, R., I. Braud, S. Debionne, F. Gandola, S. Roessle, P. J. Ross, G. Sander, G. Vachaud, N. Varado. and I. Zin: POWER: Planner-Oriented Watershed modelling system for Environmental Responses. European Geosciences Union EGU 1st Assembly, Nice, France, 2004.

Heesom, D. and L. Mahdjoubi: "Effect of Grid Resolution and Terrain Characteristics on Data from DTM." Journal of Computing in Civil Engineering **15**(2), 137-143, 2001.

Hermeline, F.: "A finite volume method for the approximation of diffusion operators on distorted meshes." Journal of Computational Physics **160**, 481-499, 2000.

Hogarth, W. L., J. Y. Parlange, M. B. Parlange and D. Lockington: "Approximate analytical solution of the Boussinesq equation with numerical validation." Water Resources Research **35**(10), 3193-3198, 1999.

Horritt, M. S. and P. D. Bates: "Effects of spatial resolution on a raster based model of flood flow." J. Hydrol. **253**(1-4), 239-249, 2001.

Horton, R.: "The role of infiltration in the hydrologic cycle." Trans. Am. Geophys. Union **14**, 446-460, 1933.

Hunt, B.: "Bank-Storage Problem and the Dupuit Approximation." Journal of Hydrologic Engineering **10**(2), 118-124, 2005.

Indarto, K.: "Découpages spatiaux et conséquences sur le bilan hydrologique - Application au bassin de l'Orb à travers une démarche de modélisation hydrologique distribuée." Thèse de doctorat, ENGREF Montpellier, 2002.

Ivanov, V. Y., E. R. Vivoni, R. L. Bras and D. Entekhabi: "Catchment hydrologic response with a fully distributed triangulated irregular network model." Water Resources Research **40**(11), W11102, doi: 10.1029/2004WR003218, 2004.

Jamagne, M., R. Hardy, D. King and M. Bornand: "La base de données géographiques des sols de France." Etude de Gestion des sols **2**, 153-172, 1995.

Jayantha, A. and I. Turner: "A Comparison of gradient approximations for use in finite-volume computational models for two-dimensional diffusion equations." Numerical Heat Transfer: Part B: Fundamentals **40**(5), 367 - 390, 2001.

Jayantha, P. A. and I. W. Turner: "A comparison of gradient approximations for use in finite-volume computation models for two-dimensional diffusion equations." Numerical Heat Transfer, Part B **40**, 367-390, 2001.

Jayantha, P. A. and I. W. Turner: "Generalised finite volume strategies for simulating transport in strongly orthotropic porous media." Australian and New Zealand Industrial an Applied Mathematics Journal **44 (E)**, C443-C463, 2003.

Jayantha, P. A. and I. W. Turner: "A second order control-volume finite element least-squares strategy for simulating diffusion in strongly anisotropic media." Journal of Computational Mathematics **23**(1), 1-16, 2005.

Jothityangkoon, C., M. Sivapalan and D. L. Farmer: "Process controls of water balance variability in a large semi-arid catchment: downward approach to hydrological model development." Journal of Hydrology **254**, 174-198, 2001.

Kao, C.: "Fonctionnement hydraulique des nappes superficielles de fonds de vallées en interaction avec le réseau hydrographique." Thèse ENGREF Paris, 2002.

Kern, M.: "Couplage de code pour l'écoulement et le transfert de polluants en milieu géologique: une approche par composants logiciels." Journée GRID2, Bordeaux, Septembre 2003, 30p, 2003.

Kienzle, S.: "The effect of DEM raster resolution on first order, second order and compound terrain derivatives." Transactions in GIS **8**(1), 83-111, 2004.

King, D., J. Daroussin and R. Tavernier: "Development of a soil geographic database from the soil map of the European Communities." Catena **21**, 37-56, 1994.

Klemes, V.: "Dilettantism is hydrology: transition of destiny?" Water Resources Research **22**(9), 177-188, 1986.

Konikow: "Use of numerical models to simulate groundwater flow and transport." US Geology Survey, Reston Virginia, 1998.

Koster, R. D. and M. J. Suarez: "Modeling the land surface boundary layer in climate models as a composite of independent vegetation stands." Journal of Geophysical Research **97(D3)**, 2697-2715, 1992.

Kralisch, S. and P. Krause: "JAMS- A framework for natural resource model developement and application." Proceedings of the 7th International Coference on Hydroinformatics, NICE, 4-8 September 2006 Vol III,, 2356-2364, 2006.

Kralisch, S., P. Krause and O. David: "Using the object modeling system for hydrological model development and application." Adv. Geosci. **4**, 75-81, 2005.

Krause, P., S. Kralisch and W. A. Flügel: "Preface: Model integration and développement of modular modelling systems." Adv. Geosci. **4**(1-2), 2005.

Lagacherie, P.: "Cartographie des sols et de leurs propriétés à un niveau sub-régional." HDR Université de Montpellier2, 2002.

Lagacherie, P.: Cartographie des sols et de leurs propriétés à un niveau sub-régional. Mémoire d'Habilitation à diriger les Recherches. Ecole doctorale Sciences de la terre et de l'eau. Montpellier, Université Montpellier II, 2002.

Lagacherie, P., J. P. Legros and P. A. Burfough: "A soil survey procedure using the knowledge of soil pattern established on a previously mapped reference area." Geoderma **65**(3-4), 283-301, 1995.

Lagacherie, P., J. M. Robbez-Masson, N. Nguyen-The and J. P. Barthes: "Mapping of reference area representativity using a mathematical soilscape distance." Geoderma **101**(3-4), 105-118, 2001.

Lagacherie, P. and M. Voltz: "Predicting soil properties over a region using sample information from a mapped reference area and digital elevation data: a conditional probability approach." Geoderma **97**(3-4), 187-208, 2000.

Leavesley, G. H., S. L. Markstrom, Bremer M.S. and R. J. Viger: "The modular modeling system (MMS) - The physical process modeling component of a database-centered decision support system for water and power management." Water, Air, and Soil Pollution **90**, 303-311, 1996.

Leavesley, G. H., S. L. Markstrom, P. J. Restrepo, R. J. Viger, : "A modular approach to addressing model design, scale, and parameter estimation issues in distributed hydrological modelling." Hydrol. Processes **16**(2), 173-187, 2002.

Leblois, E.: Projet GICC-Rhône. Rapport final, Cemagref, 2004.

Ledoux, E., G. Girard and G. de marsily: "Spatially distributed modeling : conceptual approach, coupling surface water and groundwater. In : Unsaturated flow in hydrologic modeling - Theory and Practice," Morel-Seytoux, H. J. Ed, Kluwer Academic, p.435-454, 1989.

Lehmann, P., C. Hinz, G. McGrath, H. J. Tromp-van Meerveld and J. J. McDonnell: "Rainfall threshold for hillslope outflow: an emergent property of flow pathway connectivity." Hydrology and Earth System Sciences Discussion **3**, 2923-2961, 2006.

Li, K. Y., R. De Jong and J. B. Boisvert: "An exponential root-water-uptake model with water stress compensation." Journal of Hydrology **252**, 189-204, 2001.

Lin, H., J. Bouma, Y. A. Pachepsky, A. W. Western, J. Thompson, M. T. van Genuchten, H. J. Vogel and A. Lilly: "Hydropedology: synergetic integration of pedology and hydrology." Water Resour. Res. **42**, 2006.

Loyers, J. Y., S. Moriaud and L. Descroix: "Unités de paysage pour l'hydrologie au Nord du Mexique." Water reports 16, FAO. Actes de l'atelier international. Proceedings of the international workshop, organized by LCT - CEMAGREF - ENGREF ORSTOM., 1997.

Manus, C.: Analyse de la variabilité de la réponse hydrologique à la variabilité des caractéristiques des sols en région Cévennes-Vivarais. s. O. A. H. Master 2 Recherche Terre Univers Environnement. Grenoble, France, Institut National Polytechnique de Grenoble, 58 pp., 2007.

Margat, J. and G. Castany: "Dictionnaire français d'hydrogéologie." BRGM, 249p, 1977.

Marrow, P.: "The DIET project: building a lightweight, decentralised and adaptable agent platform." AgentLink News **12**, 3-6., 2003.

Marrow, P., M. Koubarakis, R. H. van Lengen, F. Valverde-Albacete, E. Bonsma, J. Cid-Suerio, A.R. Figueiras-Vidal, A. Gallardo-Antolín, C. Hoile, T. Koutris, H. Molina-Bulla, A. Navia-Vázquez, P. Raftopoulou, N. Skarmas, C. Tryfonopoulos, F. Wang and C. Xiruhaki: "Agents in Decentralised Information Ecosystems: the DIET Approach." Proc. of the Artificial Intelligence and Simulation Behaviour Convention 2001 (AISB'01), Symposium on Information Agents for Electronic Commerce, March 2001, York UK., 109-117, 2001.

Martinez, A.: Modélisation numérique d'écoulements en sols saturés/non saturés: Comparaison des différentes formulations des équations de Richards 1D; Introduction à une formulation des équations de Richards 2D et 3D. M. d. M. P. C. S. e. Applications. Bordeaux, France, Université de Bordeaux I, 84 pp., 2007.

Martz, L. and J. Garbrecht: "Numerical definition of drainage network and subcatchment areas from digital elevation models." Comp. and Geosci **18**(6), 747-761, 1992.

Masson, V., J. L. Champeaux, F. Chauvin, C. Meriguet and R. Lacaze: "A global database of land surface parameters at 1-km resolution in meteorological and climate models." Journal of Climate **16**(9), 1261-1282, 2003.

McDonald, M. and A. W. Harbaugh: "A modular three-dimensional finite difference ground-water flow model." US Geology Survey Techniques of Water-Resources Investigations, Book 6 Chap A1, 1988.

Messenger, C.: Couplage de modèles atmosphériques et hydrologiques sur l'Afrique de l'Ouest à l'aide de la technologie CORBA, . Grenoble, France, Université Joseph Fourier, Grenoble I, 243, 2005.

Miles, J. C.: "The representation of flows to partially penetrating rivers using groundwater flow models." J. of Hydrology **82**, 314-355, 1985.

Moore, R. V. and C. I. Tindall: "An overview of the open modelling interface and environment (the OpenMI)." Environmental Science & Policy **8**, 279-286, 2005.

Motovilov, Y. G., L. Gottschalk, K. Engeland and A. Belokurov: ECOMAG: Regional model of hydrological cycle. Application to the NOPEX region, Department of Geophysics, University of Oslo, Norway, 1999a.

Motovilov, Y. G., L. Gottschalk, K. Engeland and A. Rodhe: "Validation of a distributed hydrological model against spatial observations." Agricultural and Forest Meteorology **98-99**, 257-277, 1999b.

Moussa, R., M. Voltz and A. P.: "Effects of the spatial organisation of agricultural management on the hydrological behaviour of a farmed catchment during flood events." Hydrol. Processes **16**(2), 393 - 412, 2002.

Mroczkowski M. and G. Raper G.P. and Kuczera: "The quest for more powerful validation of conceptual catchment models." Water Resour. Res. **33**(10), 2325-2335., 1997.

Mumen, M.: Caractérisation du fonctionnement hydrique des sols à l'aide d'un modèle mécaniste de transferts d'eau et de chaleur mis en œuvre en fonction des informations disponibles sur le sol. Ecole doctorale " Sciences et Agronomie". Avignon, Université d'Avignon, France, 169, 2006.

Murray, N., J.-M. Perraud, J. Rahman and S. Seaton: "TIME Reference manuel." www.toolkit.net.au/time, 94p, 2007.

Murthy, J. Y. and S. R. Mathur: "Computation of anisotropic conduction using unstructured meshes." Numerical Heat Transfer: Part B: Fundamentals **31**, 195-215, 1998.

Neitsch, S., J. G. Arnold, k. J. R, W. J. R and K. K. W: "Soil and Water Assessment tool, SWAT2000. Theoretical documentation." Texas Water Ressources Institute, Colleg Station Texas Report TR 191, 506, 2002.

Nelson, E. J., N. L. Jones and R. J. Berrett: "Adaptive Tessellation Method for Creating TINS from GIS Data." Journal of Hydrologic Engineering **4**(1), 2-9, 1999.

Noilhan, J. and S. Planton: "A simple parameterization of land surface processes for meteorological models." Monthly Weather Review **117**, 536-549, 1989.

Nonguierma, A. and S. Dautrebande: "Modélisation hydrologique de petits bassins versants ruraux sahéliens : apport de la télédétection et des systèmes d'information géographique pour la détermination des paramètres." Actes de l'atelier international Proceedings of the international workshop, organized by LCT - CEMAGREF - ENGREF ORSTOM, 1995.

Numerical Recipes Software: "NUMERICAL RECIPES IN C: THE ART OF SCIENTIFIC COMPUTING." Cambridge University Press, 1992.

Ottlé, C., P. Etchevers, C. Golaz, F. Habets, J. Noilhan, E. Martin, E. Ledoux, E. Leblois, E. Sauquet, N. Amraoui, E. Artinian, J. L. Champeaux, C. Guérin, P. Lacarrère, P. Le Molgne, G. M. Saulnier, D. Théry, D. Vidal-Madjar and S. Voirin: "Hydro-meteorological modeling of the Rhône basin: general presentation and objectives." Physics and Chemistry of the Earth **26**(5-6), 443-453, 2001.

Panday, S. and P. S. Huyakorn: "A fully coupled physically-based spatially-distributed model for evaluating surface/subsurface flow." Advances in Water Resources **27**(4), 361-382, 2004.

Parlange, J.-Y., W. L. Hogarth, R. S. Govindaraju, M. B. Parlange and D. Lockington: "On an Exact Analytical Solution of the Boussinesq Equation." Transport in Porous Media **39**(3), 339-345, 2000.

Pascal, F.: "Sur des méthodes d'approximation effectives et d'analyse numérique pour les équations de la mécanique des fluides." Université de Paris-Sud Centre d'Orsay, 2002.

Peschke, G., C. Etzenberg, J. Töpfer and S. Zimmermann: "Runoff generation regionalization: analysis and a possible approach to a solution." IAHS Publications **254**, 147-156, 1999.

Peucker, T. and D. H. Douglas: "Detection of surface-specific points by local parallel processing of discrete terrain elevation data." Comput. Graphics Image Process **4**, 375-387, 1975.

Philip, J. R.: "The theory of infiltration: 4. Sorptivity and algebraic infiltration equations." soil sci. **84**, 257-264, 1957.

Poligot-Pitsch, S.: "Modélisation des échanges nappes/rivières. Influence de ces échanges sur la stabilité des berges." Thèse de Doctorat Compiègne, 2002.

Press, W. H., S. A. Teukolsky, W. T. Vetterling and B. P. Flannery. Numerical recipes in Fortran 77. Second edition. The art of scientific computing, Cambridge 1992.

Puech: "Utilisation de la teledetection et des modèles numériques de terrain pour la connaissance du fonctionnement des hydrosystèmes." HDR UMR 35, Cemgaref Engref, Intitut National Polytechnique de Grenoble, 2000.

Rahman, J. M., S. P. Seaton, J.-M. Perraud, H. Hotham, D. I. Verrelli and J. R. Coleman: "It's TIME for a New Environmental Modelling Framework." Proceedings of MODSIM 2004 International Congress on Modelling and Simulation, Townsville, Australia, 14-17 July 2003. Modelling and Simulation Society of Australia and New Zealand Inc. **4**, 1727-1732, 2003.

Rawls, W. J. and D. L. Brakensiek: Prediction of soil water properties for hydrologic modeling. Watershed Management in the eighties, Denver, April 30-May 1, 1985, ASCE, 1985.

Razack, M.: "Couplage nappe-rivière dans les modèles de gestion..." Thèse de Doctorat Avignon, 1995.

Reed, M., S. M. Cuddy and A. E. Rizzoli: "A framework for modelling multiple resource management issues--an open modelling approach." Environmental Modelling and Software **14**(6), 503-509, 1999.

Reed, P. M., R. P. Brooks, K. J. Davis, D. R. DeWalle, K. A. Dressler, C. J. Duffy, H. Lin, D. A. Miller, R. G. Najjar, K. M. Salvage, T. Wagener and B. Yarnal: "Bridging river basin scales and processes to assess human-climate impacts and the terrestrial hydrologic system." Water Resources Research **42**, W07418, doi: 10.1029/2005WR004153, 2006.

Refsgaard, J. C., W. G. Harrar, H. Scholten and A. Kassahun: "Quality assurance in model based water management - review of existing practice and outline of new approaches." Environ. Modell. Software **20**(10), 1201-1215, 2005.

Reggiani, P., S. M. Hassanizadeh, M. Sivapalan and W. G. Gray: "A unifying framework for watershed thermodynamics: constitutive relationships." Adv Water Resour **23**(1), 15-39, 1999.

Reggiani, P. and T. H. M. Rientjes: "Flux parameterization in the Representative Elementary Watershed approach: application to a natural basin." Water Resources Research **41**, W04013, doi:10.1029/2004WR003693, 2005.

Reggiani, P. and Shellekens J: "Modelling of hydrological responses: the representative elementary watershed approach as an alternative blueprint for watershed modelling." Hydrol. Processes **17**, 3785-3789, 2003.

Reggiani, P. and M. Sivapalan: "Conservation equations governing hillslope responses: Exploring the physical basis of water balance." Water Resour. Res. **36**(7), 1845 - 1863, 2000.

Reggiani, P., M. Sivapalan and S. M. Hassanizadeh: "A unifying framework for watershed thermodynamics : balance equations for mass, momentum, energy and entropy, and the second law of thermodynamics." Advances in Water Resources **22**(4), 367-598, 1998.

Reggiani, P., M. Sivapalan and S. M. Hassanizadeh., Gray, W.G: "Coupled equation for mass and momentum balance in a stream network : theoretical derivation and computational experiments." Royal Society Proceedings A **457**, 157-189, 2001.

Reggiani, P., M. Sivapalan, S. M. Hassanizadehb and W. G. Gray: "A unifying framework for watershed thermodynamics : constitutive relationships." Advances in Water Resources **23**(1), 15-39, 1999.

Richards, L. A.: "Capillary conduction of liquids through porous mediums." Physics **1**(318-333), 1931.

Robbez-Masson, J. M.: "Reconnaissance et délimitation de motifs d'organisation spatiale. Application à la cartographie des pédopaysages." PhD Thesis, Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Montpellier., 1994.

Robbez-Masson, J. M., F. Borne and M. C. Girard: "Description et segmentation de motifs d'organisation spatiale. Application à l'obtention d'esquisses paysagères." Colloque EPS INRA "étude des phénomènes spatiaux en agriculture", INRA Editions, La Rochelle, France, 1995.

Robbez-Masson, J. M., J. C. Foltête, L. Cabello and M. Flitti: "Prise en compte du contexte spatial dans l'instrumentation de la notion de paysage. Application à une segmentation assistée." Revue internationale de géomatique **9**, 173 -195, 1999.

Rodier, J.: "Du simulateur de pluie aux bassins versants représentatifs sahéliens." Ed. ORSTOM, Collection Etudes et Thèses, 1992.

Rodier, J., M. Meunier and C. Puech: "Le point sur les méthodes de calcul des débits de crues décennales en Afrique de l'Ouest et centrale." Bull. de liaison du CIEH n°58, Ouagadougou, 2-9, 1984.

Rodriguez, F., F. Morena and H. Andrieu: "Development of a distributed hydrological model based on urban databanks - production processes of URBS." Water Science Technology **52**(5), 241-248, 2005.

Rodriguez-Iturbe, I., G. Devoto and J. B. Valdes: "Discharge response analysis and hydrologic similarity: the interrelation between the geomorphologic IUH and the storm characteristics." Water Resources Research **15**(6), 1435-1444, 1979.

Ross, P. J.: "Modeling soil water and solute transport - Fast, simplified numerical solutions." Agronomy Journal **95**, 1352-1361, 2003.

Ross, P. J.: "Modeling Soil Water and Solute Transport--Fast, Simplified Numerical Solutions." Agron J **95**(6), 1352-1361, 2003.

Ross, P. J.: "Fast Solution of the Richards'equation for flexible soil hydraulic properties description." unpublished report, CSIRO., 10 pp, 2006.

Ruelland, D. and G. Billen: "Seneque 3, un logiciel SIG de modélisation prospective de la qualité des eaux de surface." Rapport d'activité 2002 du programme PIREN-Seine, 10p, 2002.

Sauquet, E.: Une cartographie des écoulements annuels et mensuels d'un grand bassin versant structuré par la topologie du réseau hydrographique. Ecole doctorale: Terre Univers Environnement Spécialité: Mécanique des Milieux Géophysiques et Environnement. Grenoble, Institut National Polytechnique de Grenoble, 352 pp., 2000.

Sauquet, E., I. Krasovskaia and E. Leblois: "Mapping mean monthly runoff pattern using EOF analysis." Hydrology and Earth System Sciences **4**(1), 79-93, 2000.

Schmitt, T. G., M. Thomas and N. Ettrich: "Analysis and modeling of flooding in urban drainage systems." Journal of Hydrology Urban Hydrology **299**(3-4), 300-311, 2004.

Serrano, S. E. and S. R. Workman: "Modeling transient stream/aquifer interaction with the non-linear Boussinesq equation and its analytical solution." J. Hydrol. **206**(3-4), 245-255, 1998.

Sidle, R. C.: "Field observation and process understanding in hydrology: essential components in scaling." Hydrological Processes **20**, 1439-1445, 2006.

Simunek, J., M. T. van Genuchten and M. Sejna: The HYDRUS Software package for simulating the two and three dimensional movement of water, heat and multiple solutes in variably saturated media. Technical manual. Version 1.0. P. Progress. Prague, 241 pp, 2006.

Simunek, J., T. Vogel and M. T. Van Genuchten: "The SWMS-2D Code for Simulating Water Flow and Solute Transport in Two-Dimensional Variably Saturated Media." Research Report No. 132, USDA-ARS U.S. Salinity Laboratory, Riverside, California., 1994.

Skøien, J. O. and G. Blöschl: "Catchments as space-time filters: a joint spatio-temporal geostatistical analysis of runoff and precipitation." Hydrol. Earth Syst. Sci. **10**, 645-662, 2006.

Skøien, J. O., G. Blöschl and A. W. Western: "Characteristic space scales and timescales in hydrology." Water Resour. Res. **39**(10), 2003.

Sophocleous, M.: "Interactions between groundwater and surface water: the state of the science." Hydrogeology Journal **10**(1), 52-67, 2002.

Soria, U. J. M.: "Identification des paramètres hydrodynamiques du sol par modélisation inverse des flux d'infiltration : application aux échelles locales et hydrologique." Thèse de l'Université Joseph Fourier, 11 décembre 2003, 166p, 2003.

Sydelko, P. J., I. Hlohowskyj, K. Majerus, J. Christiansen and J. Dolph: "An object-oriented framework for dynamic ecosystem modeling: application for integrated risk assessment." The Science of The Total Environment **274**(1-3), 271-281, 2001.

Tarboton, D.: "A New Method For The Determination Of Flow Directions And Upslope Areas In Grid Digital Elevation Models." Water Resour. Res. **33**(2), 309-319, 1997.

Tarboton, D.: "TARDEM, A suite of programs for the Analysis of Digital Elevation Data." 1999.

Tarboton, D. and P. D. Ames: "Advances in the mapping of flow networks from digital elevation data." World Water Environmental Ressources Congress, May 20-24 2001 Orlando Florida USA, 2001.

Theis, C. V.: "The relation between the lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using ground-water storage." Transactions, American Geophysical Union **16**, 519–524, 1935.

Thiery, D. and N. Amraoui: "Hydrological modeling of the Saône basin sensitivity to the soil model." Physics and Chemistry of the Earth **25**(5-5), 467-472, 2001.

Tiemeyer, B., R. Moussa, B. Lennartz and M. Voltz: "MHYDAS-DRAIN: A spatially distributed model for small, artificially drained lowland catchments." Ecological Modelling In Press, Corrected Proof, 2006.

Turkel, E.: "Accuracy of schemes with Nonuniform meshes for compressible fluid flows." ICASE Rep, NASA, Virginia, 85-43, 1985.

Van Dam, J. C. and R. A. Feddes: "Numerical simulation of infiltration, evaporation and shallow groundwater levels with the Richards equation." J. Hydrol. **233**(1-4), 72-85, 2000.

Van der Vorst: "A fast and smoothly converging variant of Bi-CGSTAB for the solution of nonsymmetric linear systems." SIAM J. Sci. Stat. Comput. **13**(2), 631-644, 1992.

Van Genuchten, M. T.: "A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils." Soil Science Society of America Journal **44**, 892-898, 1980.

VanderKwaak, J. E.: Numerical simulation of flow and chemical transport in integrated surface-subsurface hydrologic systems. Waterloo, Ontario, Canada, University of Waterloo, Canada, 217 pp., 1999.

VanderKwaak, J. E. and K. Loague: "Hydrologic-response simulations for the R-5 catchment with a comprehensive physics-based model." Water Resources Research **37**(4), 999-1013, 2001.

Varado, N.: "Contribution au développement d'une modélisation hydrologique distribuée. Application au bassin versant de la Donga, au Bénin." Thèse Institut national polytechnique de Grenoble, 2004.

Varado, N., I. Braud and P. J. Ross: "Development and assessment of an efficient numerical solution of the Richards' equation including root extraction by plants." Journal of Hydrology **323**(1-4), 258-275, 2006.

Varado, N., I. Braud, S. Galle, M. Le Lay, L. Séguis and a. C. D. B. Kamagate: "Multi-criteria assessment of the Representative Elementary Watershed approach on the Donga catchment (Benin) using a downward approach of model complexity." Hydrology and Earth System Sciences **10**, 427-442, 2006.

Varado, N., P. J. Ross, I. Braud and R. Haverkamp: "Assessment of an efficient numerical solution of the Richards' equation for bare soil." Journal of Hydrology **323**(1-4), 244-257, 2006.

Vertessy, R., E. O'Loughlin, E. Berverly and T. Butt: "Australian experiences with the CSIRO Topog model in land water resources management." In Proceedings of UNESCO International Symposium on water Ressources Planning in a changing world, Karlsruhe Germany, June 28-30 1994, III 135 - 144, 1994.

Viallet, P., S. Debionne, I. Braud, J. Dehotin, R. Haverkamp, Z. Saâdi, S. Anquetin, F. Branger and N. Varado: Towards multi-scale integrated hydrological models using the LIQUID framework. 7th International Conference on Hydroinformatics, Nice, France, Reserach Publishing, 2006.

Vine, P.: "Apport de la télédétection à l'étude des zones contributives aux écoulements: Cas du site de la mare d'Oursi (Burkina Faso)." Water Reports **16**, 1997.

Viney, N. R. and M. Sivapalan: "A framework for scaling of hydrologic conceptualizations based on a disaggregation-aggregation approach." Hydrological Processes **18**, 1395-1408, 2004.

Vogel, H.-J. and K. Roth: "Moving through scales of flow and transport in soil." Journal of Hydrology **272**(1-4), 95-106, 2003.

Voinov, A., C. Fitz, R. Boumans and R. Costanza: "Modular ecosystem modeling." Environ. Modell. Software **19**(3), 285-304, 2004.

Ward, R. C.: "On the response to precipitation of headwater streams in humid areas." Journal of Hydrology **74**(1-2), 171-189, 1984.

Watson, F. G. R. and J. M. Rahman: "Tarsier: a practical software framework for model development, testing and deployment." Environmental Modelling & Software **19**(3), 245-260, 2004.

Winter, T. C.: "The concept of hydrological landscapes." Journal of the American Water Resources Association **37**(2), 335-349, 2001.

Wood, E. F., M. Sivapalan, K. Beven and L. Band: "Effects of spatial variability and scale with implications to hydrologic modeling." J. Hydrol. **102**(1-4), 29-47, 1988.

Wösten, J. H. M., Y. A. Pachepsky and W. J. Rawls: "Pedotransfer functions: bridging the gap between available basic soil data and missing soil hydraulic characteristics." Journal of Hydrology **251**, 123-150, 2001.

Yongchalermpchai, C.: "Etude d'objets complexes sol/plante, à différents niveaux d'organisation de la parcelle au paysage." Thèse de doctorat INA-PG, Sols, 19 Grignon, 183, 1993.

Zehe, E., R. Becker, A. Bardossy and E. Plate: "Uncertainty of simulated catchment runoff response in the presence of threshold processes: Role of initial soil moisture and precipitation." Journal of Hydrology **315**(1-4), 183-202, 2005.

Zhang, G. and H. H. G. Savenije: "Rainfall-runoff modelling in a catchment with a complex groundwater flow system: application of the Representative Elementary Watershed (REW) approach." Hydrology and Earth System Sciences **9**, 263-278, 2005.

ANNEXE I "Présentation des données sol et des méthodes de spatialisation des unités de sol"

A l'échelle de toute la France, deux programmes principaux sur la cartographie des sols existent :

- le programme de la base de données géographique des sols de France. Cette base de données est une représentation de la couverture pédologique de la France à une échelle de 1/1000.000^{ème}.
- le programme "Inventaire, Gestion et Conservation des Sols" (IGCS). Ce programme a été mis en œuvre en 1990 et comprend trois volets. Le premier volet est relatif au programme "Référentiel Régional Pédologique". Le second volet prévoit l'élaboration de "Secteurs de Référence" à un niveau plus local. Le troisième volet concerne le programme "Connaissance Pédologique de la France". Les données pédologiques issues de ce programme sont regroupées dans une structure de base de données unique créée par l'INRA : DONESOL.

A l'échelle du continent, l'Union Européenne a développé une base de données géographique des sols harmonisée sur l'ensemble des pays de l'union : la Base de Données Géographique des Sols d'Europe. Cette base de données a été réalisée à partir de l'analyse des archives, documents et cartes des différents pays de l'Union Européenne (King et al, 1994). Elle a permis la mise au point d'un référentiel pédologique où une cartographie thématique des propriétés des sols peut être réalisée à l'échelle 1/1000000^{ème}.

Toujours à l'échelle européenne, la base de données géoréférencées des sols d'Europe est en cours d'élaboration (Finke et al, 1998). L'objectif est d'harmoniser la description de la couverture pédologique dans l'ensemble des pays européens. Sa structure est très proche de la structure de la base de données DONESOL utilisée en France par le programme IGCS.

1 - La Base de Données Géographique des Sols de France

La Base de Données Géographique des Sols de France au 1/1.000.000^{ème} a été élaborée à partir de travaux de coordination réalisés au sein de divers programmes européens, puis enrichie par les différents programmes nationaux. Elle est gérée par l'INRA.

La méthodologie utilisée pour différencier les types de sol est basée sur la terminologie établie par la FAO en 1974 pour l'élaboration d'une carte mondiale à l'échelle 1/5000000^{ème}. Dans cette terminologie, les types de sol sont distingués sur la base des facteurs et processus responsables de la différenciation des sols. Ces types de sol (en réalité des associations de sols) ont été harmonisés à l'échelle nationale par le regroupement de ceux qui ont des caractéristiques similaires (King et al., 1994). Ils sont définis comme des unités de sols dont on connaît les caractéristiques mais dont on ne connaît pas précisément l'extension (Unités Typologiques des Sols). Les associations de sols, identifiées par un polygone (Unités Cartographiques des Sols) ainsi que les attributs relatifs à chaque association ont été organisés dans une structure de base de données géographique.

Les Unités Typologiques des Sols (UTS) et les Unités de Cartographie des Sols (UCS) sont les éléments principaux de la base de données géographique des sols de France.

□ Description de la base de données géographique des sols

La base de données géographique des sols se compose de deux objets principaux qui décrivent la couverture pédologique suivant trois niveaux d'informations :

Les Unités Typologique des Sols (UTS ou STU) constituent les objets sémantiques de la base de données géographique des sols. L'UTS est un volume de la couverture pédologique, identifiable dans le paysage, constitué par une succession précise d'horizons de sol (Lagacherie, 2002). Ce sont donc des profils de référence dont les caractéristiques sont bien définies. (stratification, organisation géologique, profondeur de sol, caractéristiques hydriques...). Les Unités Typologiques des Sols sont les objets de base formant une association de sols. On distingue une ou plusieurs Unités Typologiques des Sols dans une association. La table d'attributs des Unités Typologiques des Sols donne les caractéristiques des divers types de sols dans les associations ainsi que les unités cartographiques où elles sont représentées. Au sein de la base de données, les UTS sont chacune décrites par une série de

variables codées (environ 40 attributs) caractérisant la nature et les propriétés des sols, en surface comme en profondeur.

Les Horizons sont considérés comme des volumes de la couverture pédologique qu'on peut appréhender sur le terrain et dont on peut définir l'ensemble des caractéristiques (texture, perméabilité, structure, compacité...). Ils sont considérés comme des sous-ensembles homogènes.

Les Unités Cartographiques des Sols (UCS ou SMU) sont les principaux objets géométriques de la base de données géographique des sols. Elles sont définies comme des unités spatiales de la couverture pédologique correspondant à des motifs d'organisation spatiale des facteurs pédogénétiques. Elles comportent une ou plusieurs Unités Typologiques des Sols. On leur associe un degré de pureté en fonction de la proportion prise par l'Unité Typologique des Sols dominant. A l'échelle 1/1.000.000^{ème}, les Unités Cartographiques des Sols correspondent au concept d'association de sols défini par la FAO sur la base des principaux facteurs de formation des sols (King et al, 1994).

Au niveau régional, les Unités Cartographiques des Sols sont déterminées par la classification de motifs pédopaysagers (éléments du paysage participant à la formation des sols) : ce sont les pédopaysages.

Dans la structure de la base de données, les unités cartographiques des sols (UCS) désignent des polygones ayant un identifiant unique qui sont reliés à une ou plusieurs Unités Typologiques des Sols (UTS). A chaque couple UCS – UTS est attribué un pourcentage qui indique l'importance relative des Unités Typologiques des Sols au sein de ces Unités Cartographiques des Sols (à défaut d'avoir leur extension précise au sein des UCS).

La Figure A1.1 résume la structure de la base de données et les relations entre les différents éléments présentés ci-dessus.

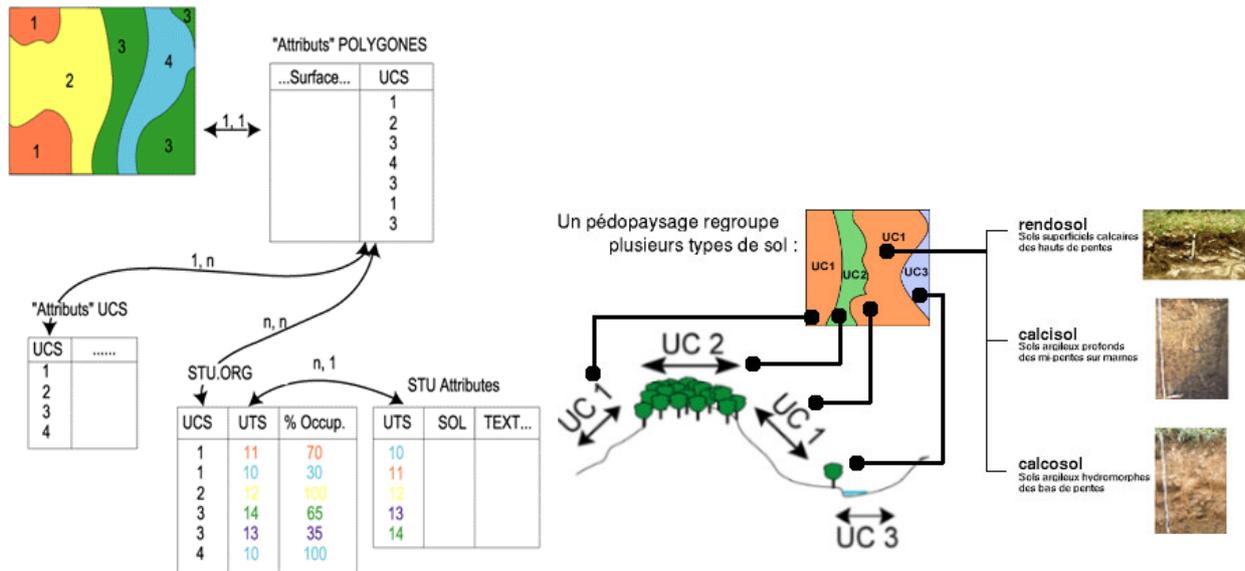


Figure A1. 1 : Modèle des données de la base de données géographique des sols (Source : INRA)

- Les paramètres sur les sols dans la base de données géographique des sols (1/1.000.000ème)

Afin d'obtenir les paramètres du sol, on dispose de deux approches à partir de la base de données géographique, soit l'extraction directe des paramètres pour ceux qui sont disponibles en tant qu'attributs des objets géographiques, soit utilisation des fonctions dites "**règles de pédotransfert**" permettant de passer des données existantes aux paramètres souhaités.

Dans tous les cas, ces méthodes s'appliquent aux attributs des différents objets géographiques à savoir les Unités Cartographiques des Sols, les Unités Typologiques des Sols, les Horizons ou encore leurs combinaisons. Un ensemble de règles de pédotransfert a fait l'objet d'une base de connaissances créée à l'échelle européenne. La représentation graphique se fait suivant deux méthodes :

- Attribuer à chaque Unité Cartographique des Sols, les paramètres de l'Unité Typologique des Sols dominante. Cette méthode introduit une source d'erreur dans les cas où les Unités Typologiques des Sols dominantes ne représentent qu'une faible proportion de surface de l'Unité Cartographique des Sols.
- Sélectionner une classe dominante de l'attribut (ou paramètre de sol) qu'on souhaite cartographier en utilisant l'ensemble des Unités Typologiques des Sols de l'Unité

Cartographique. Cette technique permet de mieux représenter un attribut dans les Unités Cartographiques.

Dans les deux cas, la représentation cartographique des paramètres de sols est entachée de deux types d'incertitudes :

- une incertitude de nature géométrique liée au mode d'agencement des Unités Typologiques au sein des Unités Cartographiques (degré de pureté)
- une incertitude de nature sémantique (niveau de confiance) liée aux règles de pédotransfert utilisées pour dériver certains paramètres de sols (réserve utile, conductivité hydraulique...).

2- Les données du programme "Inventaire, Gestion et Conservation des Sols" ou IGCS.

Le programme IGCS mis en œuvre en 1990 comprend trois volets. Le premier volet est relatif au programme "Référentiel Régional Pédologique". Il s'agit d'une harmonisation de la couverture cartographique à une échelle de 1/250 000^{ème}. Actuellement, seul un nombre limité de départements a été couvert par ce niveau d'investigation. Le second volet prévoit l'élaboration de "Secteurs de Référence" à un niveau plus local (petite région naturelle ; échelle 1/10 000^{ème}). Le troisième volet concerne le programme "Connaissance Pédologique de la France". Il vise globalement à la numérisation de données anciennes acquises à des échelles moyennes (1/50 000^{ème} à 1/100 000^{ème}). Dans la suite, nous présenterons le programme "Référentiel Régional Pédologique" qui sert de base à la spécification des propriétés hydrodynamiques des sols des hydro-paysages du bassin versant de la Saône, dans la modélisation définie au Chapitre IV.

□ Le Référentiel Régional Pédologique

Le programme IGCS vise également à constituer une base de données des sols et de leur répartition géographique, au sein d'une structure de données unique proposée par l'INRA : DONESOL. Au niveau régional, les principaux types de sol sont identifiés, localisés et leurs

propriétés caractérisées. Ainsi, des références pédologiques au niveau régional sont identifiées à une échelle de 1/250 000^{ème}.

L'élaboration de ce référentiel (Unités Cartographiques des Sols) à l'échelle régionale passe par plusieurs étapes :

- Une phase de terrain qui consiste en une série de prospections à la tarière, des inventaires de types de sol et une caractérisation des types de sol par des fosses pédologiques. Les profils et horizons de sol sont alors décrits pour chaque type de sol et des analyses de laboratoire sont faites selon un cahier des charges bien précis.
- Ensuite, une phase d'interprétation des relevés permet de faire une synthèse des informations de terrain afin d'en extraire les informations les plus significatives. L'ensemble des données recueillies sur le terrain et en laboratoire au cours de cette phase est saisi dans la base de données DONESOL.
- Une dernière phase de cartographie permet de définir les Unités Cartographiques des Sols. Cette étape consiste en un découpage géographique des unités paysagères définies comme des ensembles 'litho-géomorpho-pédologique' cohérents. On parle de **pédopaysages**. Ce découpage géographique a été réalisé en Bourgogne grâce à une ébauche s'appuyant sur une procédure automatique de classification paysagère, permettant de mieux cibler les investigations de terrain (Gourmelon, 2003). Cette procédure de classification a été implémentée dans l'outil CLAPAS. Chaque Unité Cartographique des Sols est reliée à un ou plusieurs types de sol ou Unités Typologiques de Sols. Enfin, chaque **pédopaysage** est décrit de façon détaillée dans la structure de la base de données DONESOL.

□ La base de données DONESOL

La base de données DONESOL est une structure de base de données relationnelle créée par l'INRA pour harmoniser les données spatialisées des sols à l'échelle nationale. Il s'agit d'une base sémantique constituée de deux ensembles distincts. Un groupe de données sur les études et un groupe de données sur les profils. Il existe un dictionnaire de données décrivant de façon exhaustive l'ensemble des données de cette base. Nous allons présenter dans le paragraphe qui suit quelques entités qui composent la structure centrale de DONESOL.

La base profil regroupe des informations sur les données recueillies sur le terrain et au laboratoire. Elle contient des informations sur les profils synthétiques, les horizons pour chaque profil, les analyses effectuées pour chaque horizon et les affectations des profils aux études réalisées.

L'entité Profil décrit les profils. Elle est référencée par un numéro d'identification. Les principaux attributs décrivant les profils sont : des coordonnées géographiques de localisation ainsi que l'altitude, la situation du profil (orientation, pente...), son organisation géologique, sa différenciation en horizons, ainsi que des caractéristiques principales telles que la texture dominante, le degré de structuration, sa compacité d'ensemble (tests de pénétrométrie), sa perméabilité d'ensemble (méthode de rabattement de nappe), les caractéristiques hydriques, etc.

L'entité Horizon sert à décrire les horizons de sol au sein des profils. Elle est identifiée par un numéro d'identification et un numéro de profil de la base des profils. Elle est décrite par les attributs suivants : les profondeurs maximale et minimale, l'épaisseur de la limite avec l'horizon inférieure, l'abondance de matière organique, le type de structure principale, la compacité, l'abondance racinaire, la classe texturale de l'horizon, l'abondance et la dimension des pores, etc.

L'entité Analyse sert à relier une analyse à un horizon de sol et à un profil de la base des profils. Chaque analyse comporte des informations sur la teneur en eau, la teneur en eau à la capacité au champ, la densité apparente, la conductivité hydraulique mesurée au terrain et la conductivité hydraulique mesurée au laboratoire.

Les strates sont référencées par un numéro d'identification. Une strate équivaut selon le type de stratification soit à un seul horizon, soit à un regroupement de plusieurs horizons (ou couches). Les strates sont numérotées de la surface vers la profondeur. Elles sont caractérisées par une variable descriptive pouvant être : la texture, la structure, le taux de matière organique, la porosité, la granulométrie, la densité apparente, la conductivité hydraulique, etc.. Pour chaque variable, une fourchette de variation est donnée pour les attributs par la spécification de valeurs minimale et maximale.

La base Etude regroupe les informations sur les organismes associés à l'étude et les informations générales relatives à l'étude. Elle regroupe aussi des informations sur les Unités Cartographiques de Sols (UCS) les Unités Typologiques des Sols (UTS) et des informations sur les strates de l'UTS.

L'entité 'Etude' présente les données générales de l'étude, les organismes maître d'ouvrage et le thème de l'étude. Elle présente également la nature des documents existants, le nombre d'unités cartographiques, le nombre d'observations réalisées, de profils décrits et analysés, etc. Elle est identifiée par un numéro unique.

Les Unités Typologiques des Sols (U_SOL) sont référencées par un numéro d'identification, un numéro d'étude, un nom, un ensemble d'attributs physiques décrivant l'unité de sol dont les principaux sont : les profondeurs minimale et maximale des sols, la texture dominante, la compacité d'ensemble (par des tests de pénétrométrie) ; la perméabilité d'ensemble (par des méthodes de rabattement de nappe), le degré de structuration des sols, la profondeur maximale de la nappe, etc.

Les Unités Cartographiques des Sols (U_CARTO) sont référencées par un numéro d'identification, un numéro d'étude, le nombre d'UTS et des attributs relatifs à la description du type de paysage rencontré (région et domaines morphologiques, type de surface, etc.). A partir du numéro d'un **pédopaysage**, il est possible de retrouver toutes les informations le caractérisant, c'est-à-dire les types de sol qui le composent et les relevés terrains qui ont été effectués.

L'association Unités Cartographiques et Unités Typologiques de Sols est représentée par la relation 'CONTIENT'. Elle est identifiée par un numéro d'Unité Cartographique et un numéro d'Unité Typologique de Sols. Chaque association UCS – UTS est caractérisée par un pourcentage indiquant la fraction de l'Unité Cartographique occupée par l'Unité Typologique de Sol. D'autres attributs sur la localisation et la répétitivité de l'UTS au sein des UCS, le type de formation végétale et l'aspect de surface permettent de caractériser l'association UCS – UTS.

Les associations Strates et Unité Typologique de Sol (Affect_Strate_U_Sol) permettent d'affecter une strate à une Unité Typologique. Elles sont identifiées par un numéro d'étude,

un numéro de strate et un numéro d'UTS, et caractérisées par une profondeur d'apparition (minimale et maximale) et une épaisseur minimale, moyenne et maximale.

L'association entre une étude et un profil est assurée par la relation 'Affect_Profil_Etude'. Cette association permet d'affecter un profil à une étude. Cette association se caractérise par un numéro d'identification dans la base des profils, un numéro d'étude, un numéro de profil donné par l'auteur (un numéro de profils peut correspondre à plusieurs profils de la base), un numéro d'UTS et un numéro d'UCS. Un attribut permet de juger de la représentativité d'un profil par rapport à l'UCS.

Le modèle de données des principales entités de la base de données DONESOL est présenté sur la figure suivante (Figure A1.2).

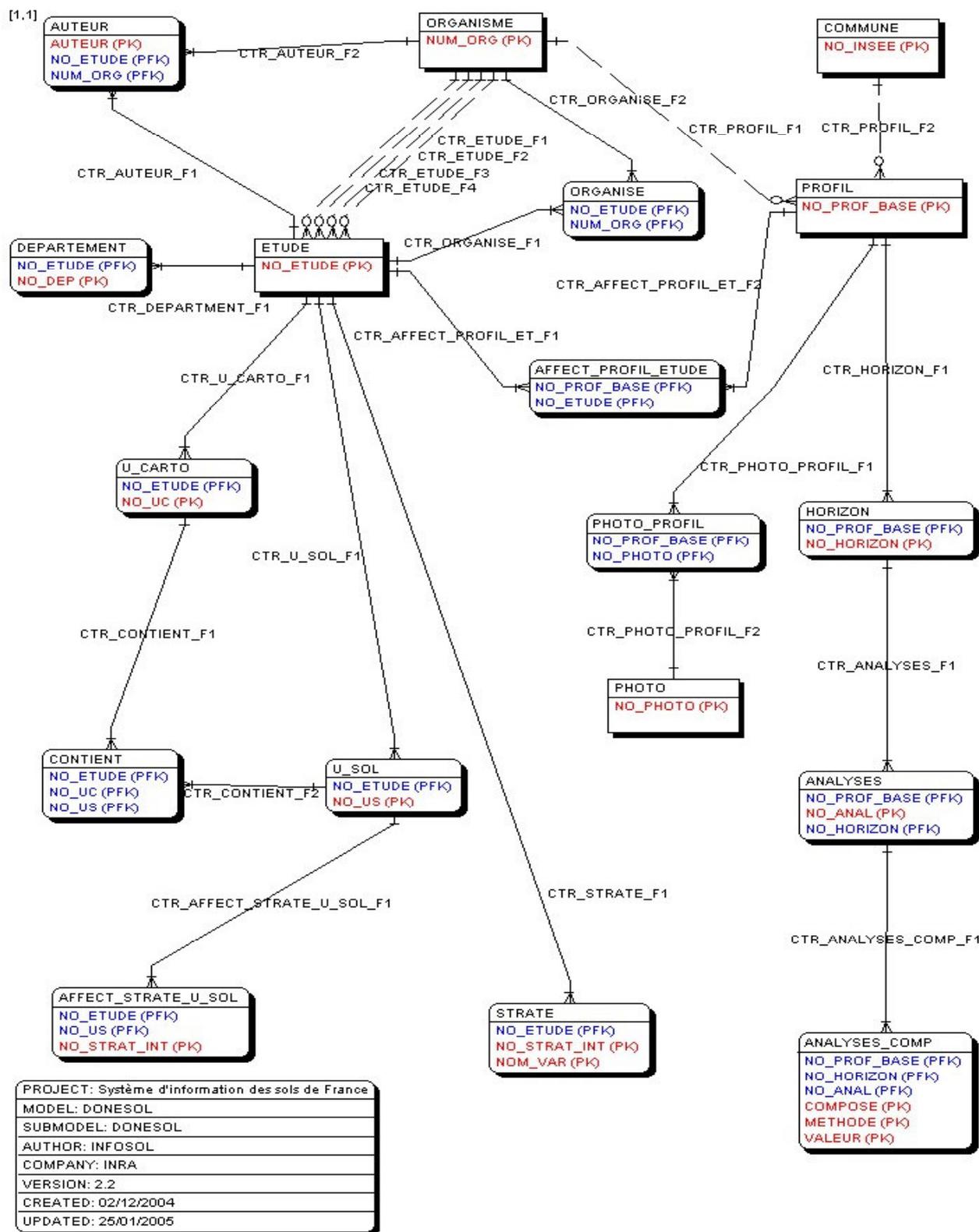


Figure A1. 2 : Modèle conceptuel de la base de données DONESOL

3 – Spatialisation des sols à l'échelle du bassin versant de la Saône

La base de données géographique des sols de France couvre l'ensemble du bassin versant étudié à l'échelle 1/1000000^{ème}. Seulement, la représentation de la couverture pédologique à l'échelle de 1/1000000^{ème} simplifie considérablement l'hétérogénéité des sols. Localement, les Unités Cartographiques des Sols peuvent être entachées d'erreurs importantes. Ces unités sont généralement exploitées dans des cadres de raisonnements globaux. Un référentiel régional serait plus approprié dans le cadre de notre étude.

Les données du programme IGCS sont retenues pour la mise en œuvre de la modélisation proposée au chapitre IV sur le bassin versant de la Saône amont. Les données disponibles pour notre bassin versant dans le cadre de ce programme couvrent uniquement le département de la Côte d'Or. La région de Franche-comté ne dispose pas encore de données issues de ce programme. Afin d'obtenir une cartographie des sols sur l'ensemble du bassin à l'échelle 1/250000^{ème}, nous avons utilisé la technique de classification paysagère présentée au Chapitre III. Pour cela, nous avons utilisé la cartographie des facteurs de différenciation des sols et les unités de sols du programme IGCS de Bourgogne comme unités de référence.

□ Méthode de spatialisation des unités de sol

La délimitation des extensions des types de sol ou des motifs d'organisation des sols est souvent basée sur la répartition des principaux facteurs de pédogenèse. Favrot (1989) a décrit une méthode de délimitation des unités de sol basée sur les secteurs de référence. Cette méthode a été reprise au sein des programmes IGCS. En Bourgogne, une centaine d'unités de sols (ou pédopaysages) a été identifiée à partir de cette méthode. Les pédopaysages serviront donc d'unités de cartographie de référence pour représenter les propriétés des sols à l'échelle 1/250 000^{ème}.

La méthodologie proposée repose sur trois étapes principales :

- La cartographie des principaux facteurs de pédogenèse que sont le relief (la pente) l'occupation des sols et la lithologie (matériaux parentaux) (Gourmelon, 2003) permet d'obtenir une image de la répartition des principaux facteurs de pédogenèse.

- La composition (en facteurs de pédogenèse) des unités de sol de référence (pris comme secteurs de référence) sera déterminée.
- L'utilisation des techniques de classification permettra, enfin, de cartographier les unités de sol. Cette classification est basée sur l'analyse de la composition du voisinage des motifs pédopaysagers.

ANNEXE II " la banque de données de la carte géologique de la France au 1/1000000^{ème}"

La banque de données de la carte géologique de la France au 1/1 000 000^{ème} est une banque de données conforme à la carte dressée par le Service Géologique National. Elle comporte des informations sur l'âge relatif des unités géologiques et des informations à caractère géodynamique telles que le métamorphisme des unités géologiques et leur magmatisme ainsi que les éléments structuraux de subsurface.

Les données relatives aux âges des unités géologiques permettent d'avoir des informations sur les formations géologiques en place (cartographie), les périodes de mise en place des matériaux. Le magmatisme renseigne sur les processus d'orogénèse et de mise en place de ces matériaux ainsi que sur leur nature chimique et leur lithologie. Le métamorphisme renseigne sur les conditions de pression et de température de mise en place de ces formations et donc sur leur nature. Enfin, les éléments structuraux sont relatifs aux discontinuités géodynamiques et aux principaux accidents tectoniques.

Les formations géologiques sont regroupées en unités cartographiques qui en précisent les extensions. Chaque unité cartographique est décrite dans les notices géologiques. Cette description intègre l'âge des formations géologiques de chaque unité, la nature des matériaux, le contexte géodynamique de sa formation et quelquefois la lithologie des formations géologiques au sein de ces unités cartographiques.

1- Les formations géologiques du bassin versant de la Saône amont

Les formations géologiques présentes sur le sous-bassin étudié datent principalement du Jurassique et du Trias (15 milliards d'années : période Mésozoïque ou Secondaire). Les formations plus récentes du Quaternaire (Holocène et Pléistocène) se retrouvent essentiellement le long des rivières et sont limitées aux abords de ces zones. Ces dernières formations caractérisent essentiellement les zones alluviales. Il existe également dans une moindre mesure des formations du Crétacé, du Tertiaire ainsi que des formations anciennes du Primaire (Paléozoïque). La carte ci-dessous (Figure A2.1) présente les principales formations géologiques du bassin versant étudié.

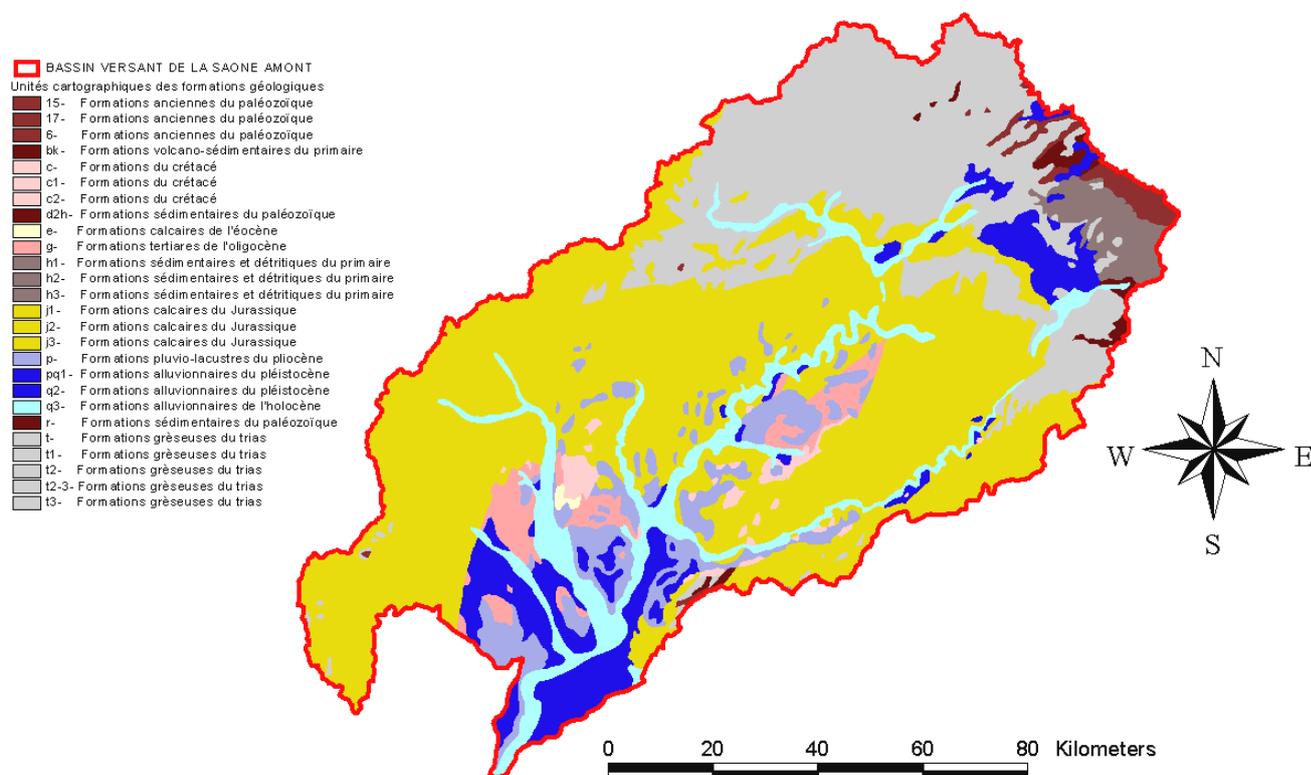


Figure A2. 1 : Carte des principales formations géologiques du bassin versant de la Saône amont.

2- Lithologie des formations géologiques du bassin versant de la Saône amont

Comme annoncé dans le paragraphe précédent, les formations géologiques présentes sur le bassin versant sont essentiellement des formations du Jurassique et du Trias et des formations récentes du Quaternaire. Dans ce paragraphe, une description (âge par âge) de la lithologie des différentes formations géologiques sera présentée.

Les formations géologiques du Primaire (Paléozoïque)

Elles sont dominées par des formations du Carbonifère. Les matériaux mis en place durant cette période proviennent d'une sédimentation marine. Ces formations sont localisées au nord du bassin versant, au niveau des Vosges. Elles sont recouvertes de matériaux sédimentaires anciens (flyschs, schistes...) Elles n'occupent qu'une petite partie du bassin versant, notamment dans sa partie septentrionale.

Les formations géologiques du Trias (Secondaire)

Les matériaux déposés ont subi un régime de sédimentation particulier dominé par des phases de dépôts d'évaporites et de brèves phases d'intrusion marine. Ces formations sont principalement composées de grès, de grès argilo - dolomitique et parfois de calcaires ou de conglomérats. Elles sont bien représentées sur le bassin versant de la Saône amont.

Les formations géologiques du Jurassique (Secondaire)

Elles sont essentiellement composées de matériaux du Jurassique moyen. Ces matériaux présentent des faciès carbonatés, issus d'une phase de sédimentation calcaire. Les matériaux sont principalement des calcaires oolithiques et des marnes. C'est la formation géologique la plus importante en surface couverte pour le bassin versant de la Saône.

Les formations géologiques du Crétacé (Secondaire)

Elles sont dominées par des formations du Crétacé supérieur. Leur faciès est dominé par des marnes et calcaires argileux. Ces formations existent quasiment en trace sur le bassin versant.

Les formations géologiques du Tertiaire (Cénozoïque)

Les formations issues de l'Eocène (53 – 33 Ma) ont un faciès dominé par du calcaire lacustre. Les matériaux déposés durant la période de l'Oligocène (33 – 23 Ma) sont influencés par une série de marnes et de calcaires gréseuses.

Les formations récentes du Quaternaire

Les fluctuations climatiques importantes de cette période ont favorisé une grande variété de dépôts. Ces dépôts sont principalement des formations sédimentaires (moraines, alluvions) et autres formations superficielles. Le cours d'eau de la Saône et ses affluents montrent d'importantes terrasses alluviales.

Pour les besoins de la classification paysagère présentée au Chapitre IV, les différentes formations géologiques décrites ci-dessus ont été simplifiées. Nous les avons regroupé suivant la nature des matériaux et leur âge pour produire une carte simplifiée en 8 classes lithologiques des formations géologiques en présence (Figure A2.2).

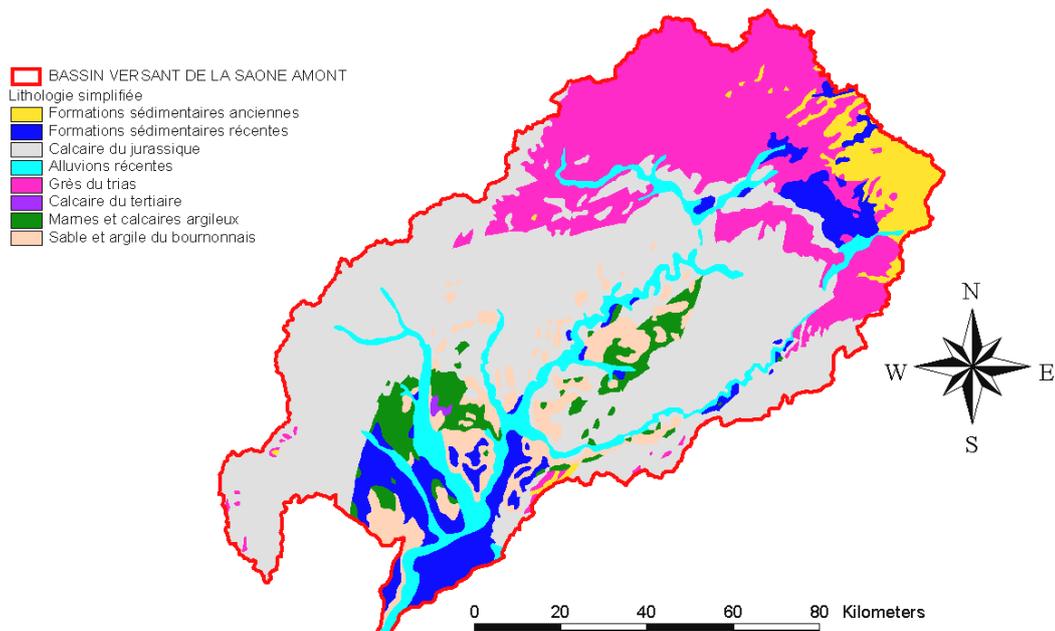


Figure A2. 2 : Carte lithologique simplifiée du bassin versant de la Saône amont

3- Contexte géodynamique des unités géologiques du bassin versant

Les formations géologiques du sous-bassin étudié sont dominées par un matériel magmatique de type granite et rhyolite. En ce qui concerne les accidents structuraux présents, il existe plusieurs sortes de failles, dont les plus retrouvées sont celles qualifiées "d'importantes" et celles dites "majeures" (Figure A2.3). Les informations sur le contexte sédimentaire et le volcanisme mettent en relief la présence près de l'exutoire du bassin versant, d'une isobathe à une profondeur de 500m (Figure A2.3).

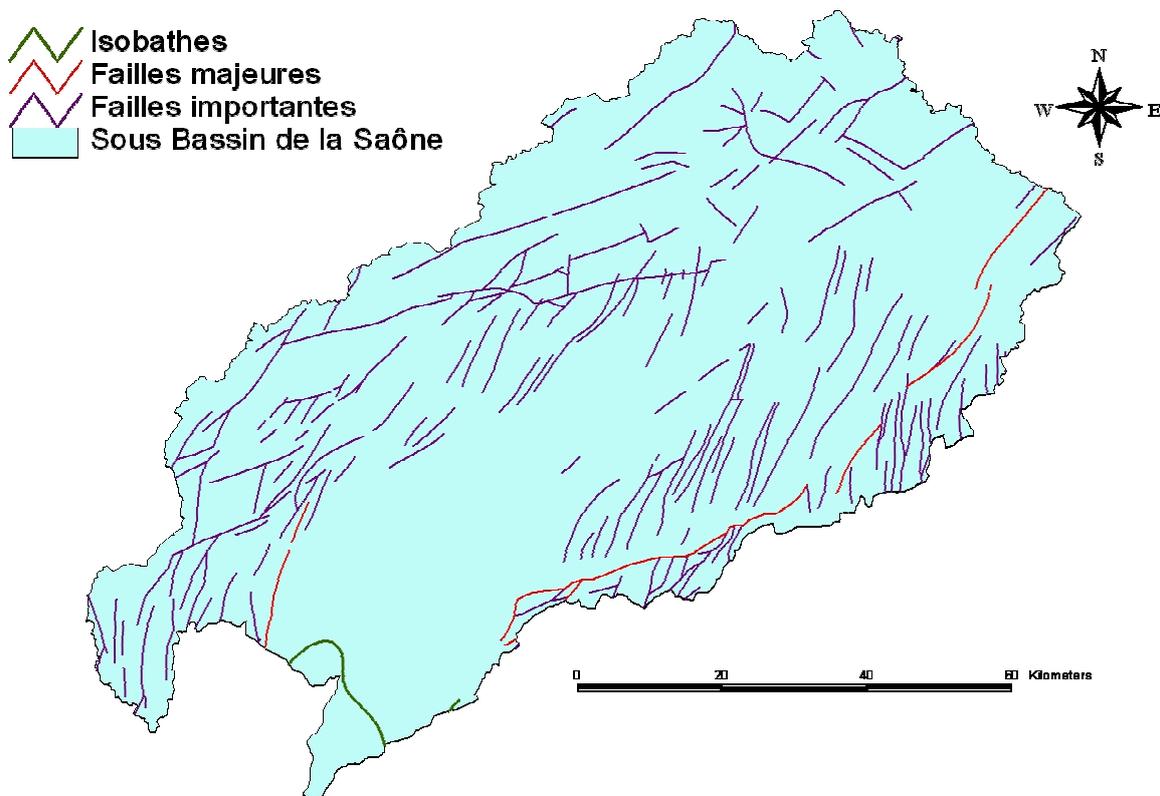


Figure A2. 3 : Carte des principaux accidents structuraux sur le bassin versant étudié.

Annexe III "Modèle Logique de Données (MLD) du Système d'Information Géographique conçu pour gérer les données nécessaires aux modèles hydrologiques spatialisés"

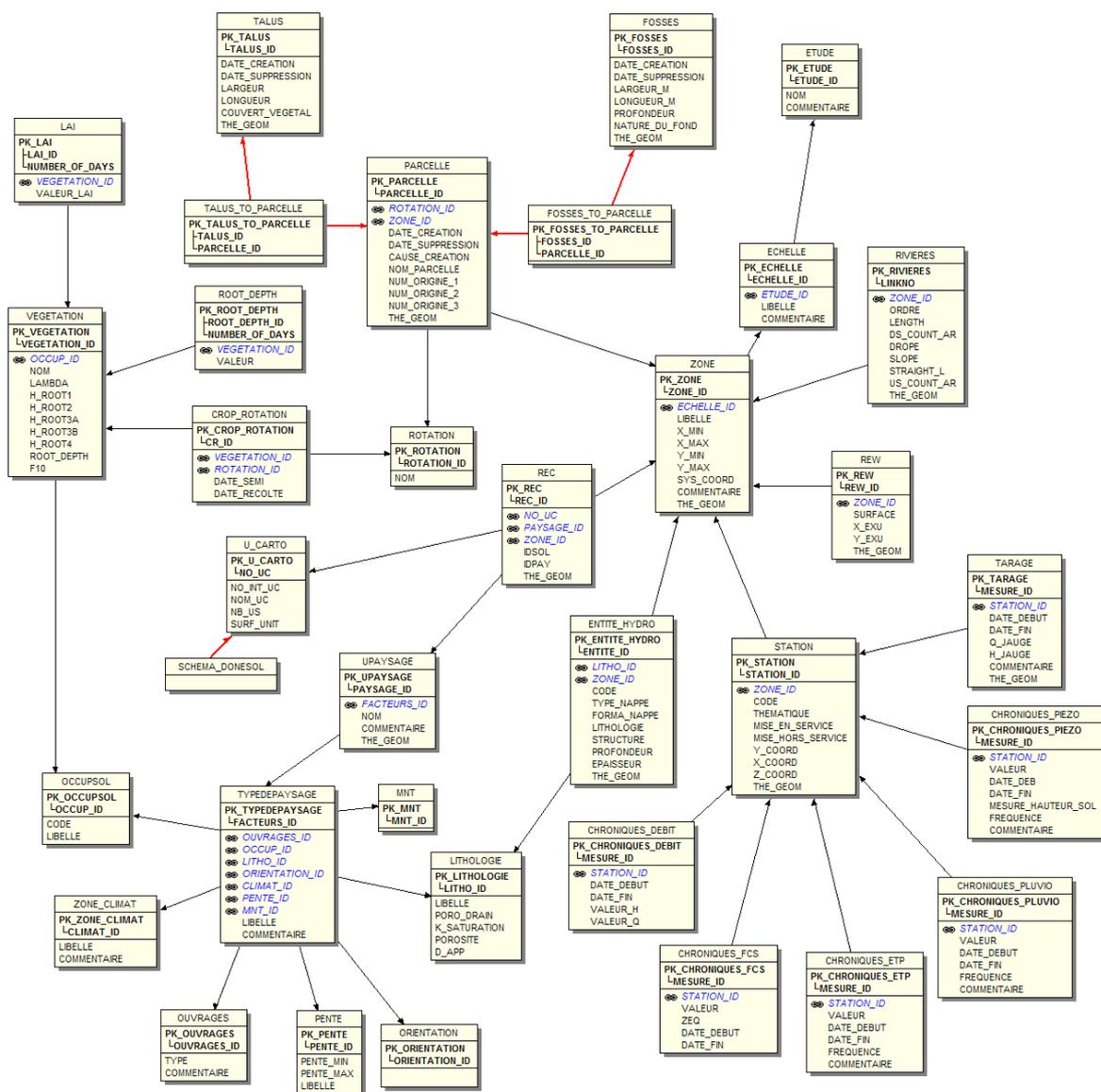


Figure A3. 1: Modèle Logique de Données (MLD) du Système d'Information Géographique développé dans le cadre de cette thèse.