

SEVE	<i>Document de projet de SEVE</i>	Version : 5 Date : 03/05/2005 Page : 1
-------------	-----------------------------------	---

**Propositions pour la construction d'un système de modélisation du
fonctionnement des surfaces continentales**

SEVE – Sol Eau Végétation Energie-

Rédacteurs : I. Braud, G. Dedieu, V. Borrell (à l'aide des documents rédigés par différents contributeurs du groupe)

Diffusion : Tout le groupe SEVE

SEVE	<i>Document de projet de SEVE</i>	Version : 5 Date : 03/05/2005 Page : 2
-------------	-----------------------------------	--

1	Objectifs et contexte de SEVE	4
1.1	Contexte.....	4
1.1.1	Enjeux sociétaux.....	4
1.1.2	Enjeux scientifiques	4
1.1.3	Contexte programmatique	4
1.2	Etat de l'art	5
1.3	Objectifs généraux du projet SEVE.....	8
1.4	Quelques exemples de questions précises auxquelles SEVE permettrait de répondre.....	9
2	Spécification des besoins	9
2.1	Généralités	9
2.2	Fonctionnalités d'un outil de modélisation commun	11
2.2.1	Fonctionnalités attendues de SEVE en terme de segmentation et topologie du paysage 11	
2.2.2	Fonctionnalités attendues de SEVE pour la modélisation du fonctionnement des surfaces continentales et des transferts qui s'y déroulent	12
	La modélisation proposée doit répondre à trois objectifs :	12
2.2.3	Fonctionnalités attendues de SEVE pour la spécification des paramètres et la spatialisation des approches.....	13
2.2.4	Fonctionnalités attendues de SEVE en terme de validation, quantification des incertitudes et valorisation des jeux de données	14
	Pour le calage du modèle, on doit envisager l'implantation de méthodes permettant :	15
2.2.5	Fonctionnalités liées à la mise en œuvre et à l'utilisation de la plate-forme (spécifications techniques) 15	
2.3	Activités permettant d'alimenter l'outil de modélisation.....	15
2.4	Apport de SEVE par rapport à l'existant	16
3	Spécification de l'outil de modélisation	18
3.1	Architecture générale	18
3.1.1	La structuration des surfaces continentales : segmentation, maillage et Objets.....	18
3.1.2	Quels transferts représente-t-on dans les modules de transfert ?.....	26
3.1.3	Que représente-t-on dans les modules de description et d'évolution du paysage ?.....	27
3.1.4	Comment coupler les différents modules?.....	28
	Cette tâche correspond à la gestion de l'assistance au débogage :	31
3.1.5	Conséquences pour l'architecture de SEVE	31
3.1.6	Choix des langages de programmation	32

SEVE	<i>Document de projet de SEVE</i>	Version : 5 Date : 03/05/2005 Page : 3
-------------	-----------------------------------	---

3.2	Spécification d'une version 0	32
4	Recherches complémentaires	33
4.1	Spatialisation des entrées	33
4.2	Typologie de paysages	33
4.3	Mise au point de représentations simplifiées des processus sous maille	33
4.4	Etudes de couplages particuliers entre processus et conditions à la limite	34
4.5	Recherches de nouvelles technologies informatiques pour le superviseur	34
5	Proposition d'organisation du projet	35
6	Références bibliographiques.....	36
7	Annexes	39
7.1	Description détaillée des besoins	39
7.1.1	Spécifications liées à la topologie et à la segmentation de l'espace.....	39
7.1.2	Spécifications liées à l'outil de modélisation du fonctionnement des surfaces continentales et aux transferts qui s'y déroulent.....	39
7.1.3	Spécifications liées à la documentation des unités de modélisation et à la spatialisation	42
7.2	Spécifications liées à la calibration, la vérification /validation du modèle et la quantification des incertitudes et la valorisation de jeux de données.....	44
7.3	Fonctionnalités liées à la mise en œuvre et à l'utilisation de la plate-forme (spécifications des fonctionnalités techniques).....	46
8	LISTE DES ACTIONS.....	47

SEVE	<i>Document de projet de SEVE</i>	Version : 5 Date : 03/05/2005 Page : 4
-------------	-----------------------------------	---

1 Objectifs et contexte de SEVE

1.1 Contexte

1.1.1 Enjeux sociétaux

L'évolution constante des activités humaines et les modifications possibles du climat dans le futur posent les questions de leur impact sur l'environnement immédiat des populations (ressource et approvisionnement en eau, qualité des sols, impact sur la production des cultures, pollutions de l'environnement, risque hydrologique, préservation de la biodiversité, etc.). Nos sociétés sont en outre de plus en plus préoccupées par les problèmes environnementaux. Ces préoccupations sont intégrées dans des textes réglementaires nombreux, comme la Directive Cadre sur l'eau ou les nouvelles orientations de la Politique Agricole Commune, dont beaucoup se réfèrent au concept de développement durable.

L'application de ce cadre législatif, la prise en compte simultanée des activités humaines, des processus physiques, biologiques et chimiques et des conflits d'intérêt posent des questions nouvelles et complexes aux gestionnaires du territoire et aux décideurs. Ceci est particulièrement critique pour les échelles allant du local (parcelle) au paysage (de l'ordre de la centaine de km²) et au régional (de l'ordre de 100x100 km²). Des outils d'aide à la décision en matière de gestion du territoire sont nécessaires pour effectuer des diagnostics, confronter des points de vue et simuler des évolutions.

1.1.2 Enjeux scientifiques

La compréhension du fonctionnement des surfaces continentales aux échelles du paysage et de la région pose de nombreuses questions non résolues. Parmi celles qui ont été assez peu abordées par la communauté, nous citerons la compréhension des interactions des divers processus et l'expression de ces interactions aux diverses échelles de temps et d'espace, l'impact des activités humaines présentes et passées sur ces processus, le rôle de la structuration de l'espace d'origines naturelle ou anthropique.

Outre les études de processus et la mise en place de dispositifs de mesure, savoir répondre à ces questions passe par une modélisation intégrée de l'ensemble des processus impliqués dans les cycles de l'eau, du carbone et des autres éléments (y compris d'origine anthropique) au niveau des surfaces continentales, aux échelles du paysage et de la région.

L'objet du projet SEVE est de proposer une démarche devant aboutir à une telle modélisation intégrée, en abordant en priorité l'échelle du paysage.

1.1.3 Contexte programmatique

Le besoin d'un tel effort de modélisation a été reconnu à divers niveaux, notamment dans les textes prospectifs rédigés pour le colloque "Surfaces et Interface Continentales" qui a eu lieu en Décembre 2002 à Montpellier.

Cette reconnaissance s'est concrétisée par le soutien reçu par le projet SEVE de la part de l'ACI Ecologie Quantitative puis du programme ECCO (Ecosphère Continentale) via les actions thématiques PNRH (Programme National de Recherche en Hydrologie) et PNBC (Programme Nationale Biosphère Continentale).

SEVE	<i>Document de projet de SEVE</i>	Version : 5 Date : 03/05/2005 Page : 5
-------------	-----------------------------------	---

1.2 Etat de l'art

Au cours des dernières décennies, la communauté scientifique nationale est parvenue à des avancées significatives dans la compréhension et la modélisation de la plupart des processus intervenant dans le fonctionnement et la dynamique des surfaces continentales. Pour l'essentiel, ces avancées ont été réalisées indépendamment et par champ disciplinaire. De nombreux modèles couplant les cycles de l'eau, du carbone et de l'azote existent, essentiellement pour les échelles locales ou globales (e.g. modèle ORCHIDEE de l'IPSL). Peu de travaux ont été réalisés sur les échelles intermédiaires en couplant l'ensemble des processus aux échelles auxquels ils opèrent réellement et en traitant explicitement de l'hétérogénéité spatiale, de la topographie et du changement d'échelle.

La Figure 1 résume les principales caractéristiques de différents modèles développés hors de la communauté nationale et intégrant une description de l'hydrologie de surface couplée à la modélisation d'autres compartiments (e.g. végétation, échanges sol-végétation-atmosphère, ...). De cette analyse de l'existant, il ressort quelques traits marquants :

- Le mode de segmentation de l'espace est largement empirique, basé soit sur un découpage en mailles régulières soit sur des unités de réponse hydrologique (HRU). Le maillage régulier présente l'intérêt de la simplicité conceptuelle, mais conduit à un sur-échantillonnage de l'espace d'un facteur 10 environ pour représenter correctement l'hétérogénéité, et à des temps de calcul importants. L'approche par HRU cherche à définir des unités élémentaires de comportement homogène. Les critères de définition de ces HRU sont pour l'instant relativement grossiers et non validés. Surtout, cette approche rend difficilement compte de l'influence déterminante sur les écoulements d'éléments de faible taille des paysages naturels, cultivés ou urbains tels que les fossés, talus, routes, réseaux d'assainissement, canaux, retenues...L'approche développée au MIT (Ivanov et al., 2004) à partir d'un réseau de triangles permettant de conserver les caractéristiques de la topographie, avec un nombre de nœuds de calcul très inférieur à celui nécessaire sur une grille carrée, semble prometteuse, mais le modèle développé ne semble pas très modulaire.
- L'architecture de ces modèles n'intègre pas une réflexion approfondie sur les modes de couplage entre les différents compartiments représentés et en relation avec la description de l'espace. La capacité d'évolution, la modularité, permettant par exemple de remplacer un module de bilan hydrique par un autre, sont limitées.
- Quelques modèles, comme SWAT (Soil and Water Assessment Tool, Neitsch et al., 2002), décrivent un nombre élevé de compartiments et de processus de manière intégrée. Les processus sont cependant modélisés de manière simplifiée et relativement empirique.
- Le raffinement de la maille des modèles et/ou de la représentation des processus (e.g. MIKE-SHE, DHI, 1993, Abbott et al., 1986-a,b) s'accompagne rarement d'un effort similaire sur les méthodes de détermination des paramètres et les outils de validation. Les possibilités offertes par la télédétection sont peu explorées.

On retrouve dans la communauté internationale la volonté de développer des modélisations intégrées couplant différents compartiments. On peut citer les extensions du modèle TOPOG (Vertessy et al., 1994) couplant une modélisation hydrologique et un modèle de fonctionnement de la végétation (Silberstein et al., 1999), le concept de modélisation environnementale intégrée TARSIER développé là encore en Australie (Watson et al., 2001), une modélisation intégrée hydrologie - cycle du CO₂ pour les zones humides (Zhang et al., 2002) ou adaptée aux zones semi-arides (Staudenrausch et al., 1999; Krol et

al., 2001), la modélisation hydro-écologique de bassin versant (RHESSys, Band et al, 2001-a,b) simulant les processus couplés intervenant dans les cycles de l'eau, du carbone et de l'azote, intégrant la structuration de l'espace, et visant, entre autre, à démontrer l'influence des transferts latéraux d'eau surfaciques et sub-surfaciques sur la dynamique du fonctionnement eau/carbone/azote à l'échelle du versant.

Couplage (processus)	SVAT-Hydrologie	SIM, DHSVM, COUMEHY, RHESSys	Pas de temps infra-journalier: bilan d'énergie explicite
	Hydrologie - végétation	SWAT	Fonctionnement de la végétation
Télédétection	LandSat, SPOT	WATFLOOD	Utilisation directe de données satellitaires
	Application SIG	IHDM, SWAT	Interface pour les applications SIG : ARView
Echelle temporelle	Evénement	HEC-HMS, DWSM	Heures, jours: Recherché et prévision
	Long terme	SIM, MIKE-SHE DHSVM, RHESSys	Simulations continues (années) les études d'impact
Maillage	Rectangulaire Eléments finis	SIM, DHSVM WATFLOOD	Transfert (latéral) dans la zone saturée : distribué
	Type-HRU, HSU, URU, patch	PRMS, SWAT, HYDROTEL, RHESSys	« Hydrological Response Units », distribué/ conceptuel
	Triangulaire	tRIBS	Distribué, à base physique
	« Lumped »	HBV, NWS-RFS	Pas de variables spatialisées

Figure 1.: Synthèse de quelques travaux de modélisation couplant de l'hydrologie à d'autres compartiments ou travaillant aux échelles visées par SEVE.

Parallèlement, de nombreuses approches de modélisations ont également tenté de tenir compte de l'hétérogénéité du milieu. Ces approches sont basées sur une segmentation de l'espace soit en mailles de formes régulières (e.g. ANSWERS (Beasley et al., 1980), SHE (Abbott et al., 1986), IHDM (Beven et al., 1987), AGNPS (Young et al., 1989), HYDROTEL (Fortin et al., 2001a, 2001b) ; LISEM (De Roo et Offermans, 1995) (Maidment *et al.*, 1989) soit en unités hydrologiques de forme variable (e.g. KINEROS (Woolhiser *et al.*, 1990) ; CELMOD (Diskin and Simpson, 1978) et plus récemment REW (Reggiani et al., 2005) ou POWER (Haverkamp et al., 2003). Chaque approche développée permet de représenter certains éléments caractéristiques des paysages sur lesquels elle a été développée, mais ne possède pas un caractère générique autorisant son utilisation sur des milieux très divers.

SEVE	<i>Document de projet de SEVE</i>	Version : 5 Date : 03/05/2005 Page : 7
-------------	-----------------------------------	---

La communauté nationale a commencé à développer des couplages plus ou moins complets entre modèles. On peut citer les travaux visant à coupler modèle de Transfert Sol-Végétation-Atmosphère (SVAT) et modèle hydrologique (Pellenq et al., 2003 pour ISBA-Topmodel), modèle de fonctionnement de la végétation et modèle SVAT (e.g. Cayrol et al, 2000, Oliosio et al., 2002), modèle SVAT et modèle de transfert radiatif – AliBi, SiSPAT-RS, ISBA, ISBA-Ags (Oliosio et al., 1999, Demarty et al., 2004, Oliosio et al., 2002, Inoue et al., 2003), modèle de culture et modèles de transfert radiatif – STICS-RS (Weiss et al., 2001, Prévot et al., 2003), modèle écologique et données de télédétection (Nouvellon et al., 2001). L'originalité supplémentaire de ces travaux est d'intégrer dans leur approche l'assimilation de mesures de télédétection.

Même si les échelles concernées dépassent un peu les échelles de SEVE, on peut aussi citer les travaux de couplage entre modélisation atmosphérique méso-échelle et hydrologie (ISBA-SAFRAN-MODCOU, Habets et al., 1999a, b) ou modélisation atmosphérique régionale - hydrologie (projet COUMEHY - Couplage des cycles hydrologiques atmosphériques et continentaux aux échelles régionales et climatiques - soutenu par l'ACI GRID).

A une échelle plus grande encore, il est également nécessaire de mentionner le modèle ORCHIDEE qui est développé à l'IPSL pour représenter les échanges entre la surface terrestre et l'atmosphère au sein de modèles de circulation générale atmosphérique (Krinner et al., 2003). Ce modèle combine la modélisation TSVA (SECHIBA), la modélisation biogéochimique du cycle du carbone au pas de temps journalier (STOMATE), la modélisation de la dynamique de la végétation à long terme (extraite du modèle LPJ) et une représentation simple des transferts latéraux d'eau entre les mailles. La maille spatiale d'ORCHIDEE est largement supérieure à la maille élémentaire de SEVE, et l'organisation spatiale des surfaces sous-maille n'est pas prise en compte. Les applications premières de ce modèle concernent en effet les études climatiques, entre autres le rôle de la dynamique de la végétation sur la variabilité du climat, l'évolution de la végétation, en tant que puits de carbone, ou en terme d'échange de surface, en réponse aux changements climatiques, ainsi que le suivi de la fixation de carbone à grande échelle.

Pour ce qui concerne la segmentation du paysage, l'intérêt s'est porté sur le cas des espaces fortement anthropisés : dans les milieux agricoles avec la prise en compte de discontinuités liées aux aménagements et aux systèmes de culture (MHYDAS - Moussa et al., 2002), dans les milieux urbains avec la représentation des routes, réseaux et bâtis (URBS - Rodriguez et al., 2003).

Les résultats obtenus à partir de ces différents couplages ont permis des progrès certains et encouragent à poursuivre dans cette voie. Néanmoins, l'effort à fournir pour mettre en œuvre de tels couplages reste conséquent. Ils nécessitent souvent un investissement lourd dans la compréhension des différents codes et peuvent déboucher sur des modèles totalement imbriqués, où il devient alors difficile d'intégrer les évolutions futures des différents codes source et dont la portabilité et/ou l'utilisation par des personnes différentes du concepteur restent souvent limitées.

Par ailleurs, la mise en œuvre d'un couplage nécessite en général une réflexion approfondie sur la signification et/ou la représentativité des variables calculées par les différents modules. L'apparition de variables calculées plusieurs fois ou de calculs redondants n'est pas rare. La réflexion sur ce problème et les solutions apportées sont souvent définies au cas par cas et une discussion plus large sur les variables pertinentes et leur signification physique bénéficierait à l'ensemble de la communauté scientifique et pourrait déboucher sur l'adoption de définitions et/ou normes communes. Il est donc apparu nécessaire de coordonner les efforts et de les rassembler autour d'un outil commun qui pourrait ensuite permettre une pérennisation des acquis.

SEVE	<i>Document de projet de SEVE</i>	Version : 5 Date : 03/05/2005 Page : 8
-------------	-----------------------------------	---

1.3 Objectifs généraux du projet SEVE

L'objectif du projet à terme est de concevoir et de développer une modélisation intégrée du fonctionnement des surfaces continentales, représentant explicitement les hétérogénéités de la surface et permettant de simuler les processus couplés impliqués dans le cycle de l'eau, du carbone, de l'azote et de substances polluantes. L'ambition est de dépasser les limitations des approches et des modèles existants, brièvement identifiées au paragraphe précédent : segmentation de l'espace, représentation des processus et de leurs interactions, paramétrisation et validation, modularité et évolutivité.

La modélisation SEVE portera sur les "surfaces continentales", entendues ici comme le continuum formé par le sol (y compris les nappes superficielles), la végétation, l'eau en circulation et la couche atmosphérique de surface. Ultérieurement, cette modélisation pourra être couplée à des modèles atmosphériques (e.g. MESO-NH), des modèles de nappes profondes ou des modélisations socio-économiques, ce qui nécessitera l'intégration de partenaires spécialisés dans ces différents domaines.

La modélisation SEVE se donne comme objectif de couvrir les échelles suivantes : de l'échelle locale à celle du paysage ou petit bassin versant (quelques centaines de km²), puis à terme du paysage à la région ou au bassin versant plus grand (quelques dizaines de milliers de km²). La distinction de ces deux échelles constitue une hypothèse de travail qui sous-entend que les résultats de la première modélisation (du local au paysage) pourront servir à définir des représentations simplifiées pour le passage aux échelles supérieures (du paysage à la région).

Nous avons jusqu'ici employé le terme modélisation pour souligner deux caractéristiques du projet : i) l'effort de modélisation porte non seulement sur la description des processus et de l'hétérogénéité spatiale mais également sur les méthodes de détermination des paramètres, de validation, en incluant dans l'approche des outils comme la télédétection ou la scintillométrie, notamment pour assurer que les modélisations développées pourront être facilement transférées à des sites non étudiés en détails ; ii) il ne s'agit pas de bâtir un modèle unique, fermé, mais un système ouvert dont les composantes (e.g. les sous-modèles) puissent être aisément modifiés ou changés en fonction d'objectifs spécifiques. Par commodité, nous parlerons cependant par la suite de « modèle » et non de modélisation.

Les quatre grands chantiers qui se dégagent et qui seront abordés dans le cahier des charges sont les suivants :

- i) Le développement du modèle de fonctionnement des surfaces continentales incluant des modules de représentation et de simulation du paysage et des modules simulant les transferts qui s'y déroulent
- ii) Le développement de "représentations simplifiées des processus sous maille" (paramétrisation au sens des météorologues), non représentés explicitement dans le modèle
- iii) Le développement de méthodes de description de l'espace (ex: typologie des paysages), de documentation des unités de modélisation, de spatialisation des propriétés des milieux et d'assimilation de données à l'usage du modèle SEVE
- iv) Le calage, la vérification / validation des approches de modélisation, incluant la quantification des incertitudes sur les sorties du modèle, le développement de stratégies d'optimisation et la définition de sites d'étude, ainsi que l'instrumentation requise

SEVE	<i>Document de projet de SEVE</i>	Version : 5 Date : 03/05/2005 Page : 9
-------------	-----------------------------------	--

1.4 Quelques exemples de questions précises auxquelles SEVE permettrait de répondre

Les principes qui ont été énoncés ci-dessus sont assez généraux et il peut être utile, afin de mieux souligner l'originalité et l'apport de SEVE, de lister quelques questions précises – scientifiques ou plus appliquées- auxquelles le modèle permettrait de répondre. Ceci permet aussi d'identifier les communautés potentiellement intéressées par le développement de SEVE.

- i) L'influence de la prise en compte explicite de l'organisation spatiale du paysage sur les différentes composantes du cycle hydrologique
- ii) L'influence de la prise en compte explicite de l'organisation spatiale du paysage sur la croissance et le développement de la végétation en interaction avec le cycle de l'eau
- iii) L'influence de la prise en compte explicite de l'organisation spatiale du paysage sur les flux de surface retournant vers l'atmosphère
- iv) Sur un bassin versant, l'agencement des parcelles entre elles modifie-t-il les écoulements d'eau et de carbone à l'échelle du bassin?
- v) Sur un bassin versant fortement anthropisé, l'influence du réseau de fossés, drains, routes, etc., devient-il prépondérant sur les chemins de l'eau au travers du bassin versant?
- vi) Comment peut-on représenter, sous forme simplifiée, l'influence de l'organisation spatiale des parcelles (si elle est mise en évidence) sur les flux de chaleur sensible et latente à l'intérieur d'une maille d'environ 10x10 km² pour une utilisation dans un modèle de circulation atmosphérique ?
- vii) L'existence de bandes boisées ou de bandes enherbées permet-elle de réduire la pollution par les pesticides à l'exutoire d'un bassin versant?
- viii) Existe-t-il, sur un bassin versant des zones critiques pour la pollution par les nitrates, i.e. des zones où il faudrait concentrer les modifications de pratiques d'épandage?

2 Spécification des besoins

2.1 Généralités

Le modèle SEVE devra permettre une modélisation couplée des cycles de l'énergie, de l'eau et du carbone (production primaire, évapotranspiration, dynamique de l'eau dans le bassin versant) puis de l'azote et autres substances. Les échelles spatiales visées par SEVE vont du local au paysage puis à la région (voir Figure 2). Pour les échelles temporelles on considérera des simulations allant de quelques heures/jours à quelques dizaines d'années.

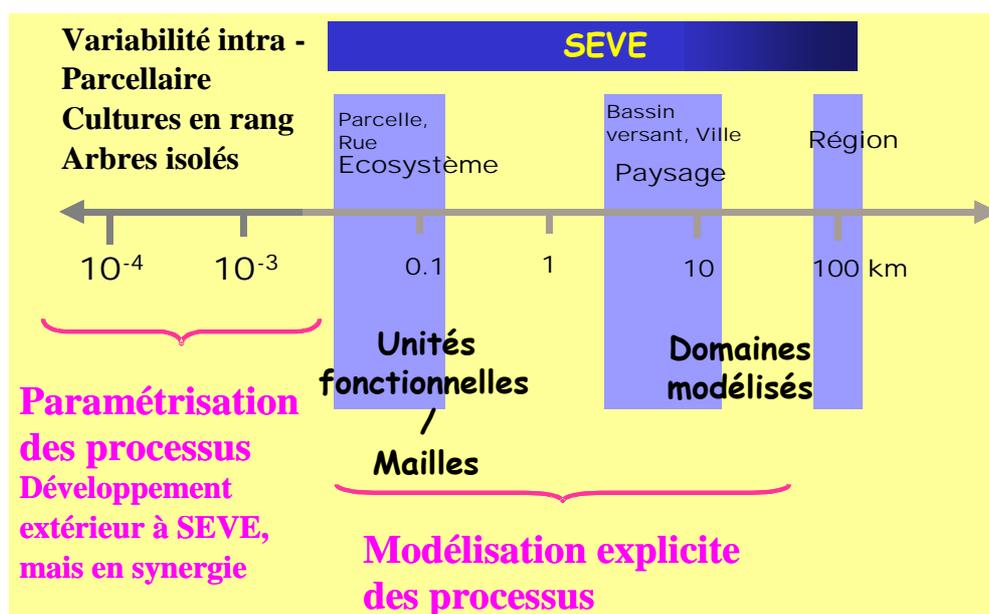


Figure 2. : Schéma de synthèse des échelles visées par la modélisation SEVE

L'ambition à l'origine du projet SEVE est d'intégrer nos connaissances sur le fonctionnement des processus à petite échelle et de bâtir un modèle qui pourra être utilisé pour :

- i) répondre aux questions scientifiques posées aux échelles considérées par SEVE,
- ii) permettre le changement d'échelle spatiale et temporelle avec détermination de propriétés émergentes et de représentations pertinentes pour les échelles supérieures,
- iii) prendre en compte le forçage anthropique et climatique,
- iv) permettre d'améliorer les représentations utilisées dans les modèles de recherche ou opérationnels en météorologie, hydrologie, agronomie, etc.,
- v) permettre le couplage avec des modèles atmosphériques, de nappe, socio-économiques, ce qui suppose une structure de modélisation souple et modulaire,
- vi) permettre l'exploitation de mesures de télédétection
- vii) valoriser les mesures effectuées sur des OREs ou Zones Atelier, voire susciter la mesure de nouvelles variables ou grandeurs d'intérêt sur ces sites d'étude.

Ces objectifs, définis ici de manière très générale, devront être approfondis, hiérarchisés et examinés en détail pour définir les implications pour la modélisation. Ainsi, l'objectif de représentation des impacts anthropiques sur les processus modélisés implique d'être en mesure de prendre en compte la modification de l'espace (réseaux de routes, fossés, talus, drains, réseaux d'assainissement urbain, etc..) et les pratiques culturelles (labour, irrigation, fertilisation). L'analyse de l'impact des phénomènes « naturels » sur les sociétés doit tenir compte des épisodes extrêmes tels que crues, sécheresses, maladies, feux, etc. Ceci se fera dans un premier temps en mode "forcé", un couplage ultérieur avec des modèles socio-économiques pourra être envisagé.

Le modèle SEVE s'adresse principalement aux espaces ruraux anthropisés ou « naturels » mais couvre également les espaces péri-urbains et urbains proprement dits. La segmentation de l'espace d'une part, les bilans d'eau et d'énergie d'autre part se décrivent de façon très comparable dans les deux cas ; un même type d'approche doit ainsi pouvoir répondre aux problèmes posés par chacun.

SEVE	<i>Document de projet de SEVE</i>	Version : 5 Date : 03/05/2005 Page : 11
-------------	-----------------------------------	--

Compte tenu des milieux modélisés, la parcelle devient naturellement l'échelle du grain élémentaire de SEVE, pour traiter l'échelle de la parcelle au paysage ; le paysage devenant quant à lui ce grain élémentaire lors du passage du paysage à la région. On prend donc le parti de ne pas représenter explicitement les processus ayant lieu à une échelle inférieure à celle de la parcelle dans le premier cas (du paysage dans le second cas) (voir Figure 1).

Enfin, partant du constat que les problèmes posés par les questions environnementales et de développement durable ne peuvent pas être traités par des scientifiques issus d'une même discipline, qu'une communauté forte peut émerger d'une structuration autour d'outils de modélisation (voir les exemples de la modélisation atmosphérique ou océanographique), un souhait fort de structuration autour de la modélisation des surfaces continentales a émergé et regroupe, autour du projet SEVE, des météorologues, des écologistes, des hydrologues, des spécialistes des schémas de surface, de télédéTECTEURS, des spécialistes des méthodes numériques, de l'assimilation, des informaticiens. La prise en compte des contraintes économiques et sociales dans ces questions nécessitera, à terme, l'extension de ce groupe aux sciences humaines et sociales, afin, notamment, de représenter et modéliser des scénarios de pressions sur les milieux ou d'évolution des politiques agricoles ou environnementales.

2.2 Fonctionnalités d'un outil de modélisation commun

Nous examinons, dans la suite de ce paragraphe, les conséquences du schéma général décrit précédemment, sur les fonctionnalités à inclure dans SEVE. Nous n'en donnons ici que les traits principaux, une liste détaillée apparaissant dans l'Annexe (section 8.1). Nous balayons les aspects suivants :

- i) Topologie et segmentation de l'espace
- ii) Contenu d'une modélisation intégrée du fonctionnement des surfaces continentales incluant des modules de représentation et de simulation du paysage et des modules simulant les transferts qui s'y déroulent
- iii) Documentation des paramètres, initialisation et spécification des conditions à la limite des différentes unités. Spatialisation des approches de modélisation.
- iv) Le calage, la vérification et la validation des approches de modélisation, la quantification des incertitudes et la valorisation de jeux de données.
- v) Fonctionnalités liées à la mise en œuvre et à l'utilisation de la plate-forme (spécifications techniques)

2.2.1 Fonctionnalités attendues de SEVE en terme de segmentation et topologie du paysage

La segmentation du paysage retenue dans SEVE doit permettre de représenter explicitement l'hétérogénéité des surfaces continentales, ce qui implique un mode de découpage de l'espace capable de prendre en compte les caractéristiques principales :

- de la topographie (pente, orientation des versants),
- du sol (horizons pédologiques, organisation dans le paysage),
- de l'occupation du sol (type et rotation des cultures, habitats, routes),
- des chemins de l'eau (réseau hydrographique naturel ou anthropique),

SEVE	<i>Document de projet de SEVE</i>	Version : 5 Date : 03/05/2005 Page : 12
-------------	-----------------------------------	---

- des aménagements rencontrés dans les bassins versants (ouvrages, fossés, digues, irrigation, pompage, drainage, etc..).

La segmentation de l'espace ne se limite par ailleurs pas à la surface du sol, mais doit aussi intégrer les discontinuités rencontrées dans le volume de sol et notamment la frontière avec les nappes phréatiques ou les hétérogénéités du substrat.

La segmentation produira les **Unités Fonctionnelles** qui seront considérées ensuite dans la modélisation de la surface continentale et des transferts qui s'y déroulent. A chaque Unité Fonctionnelle sera affectée un ou plusieurs Objets (par exemple la végétation ou le réseau hydrographique) qui seront caractérisés par leurs paramètres propres et par leurs modèles de description et d'évolution.

Pour des raisons numériques, ou pour tenir compte d'hétérogénéités internes aux Unités Fonctionnelles, ces dernières pourront ensuite être maillées en **Unités de Calcul**. La segmentation de l'espace devra aussi intégrer ces outils de maillages.

La description explicite des transferts entre les différents Objets qui pourront ainsi être identifiés requiert aussi une connaissance exhaustive de la topologie entre ces Objets et donc de leur organisation dans l'espace. Il en va de même des Unités Fonctionnelles et les Unités de Calcul pour lesquelles on doit connaître les Objets auxquels elles correspondent et leur topologie entre elles.

Le mode de découpage de l'espace devra enfin permettre le changement d'échelle dans la mesure où les critères retenus pour le découpage devront pouvoir être déclinés aux deux échelles visées par la modélisation : de la parcelle au paysage et du paysage à la région, tout en gardant le même environnement informatique.

2.2.2 Fonctionnalités attendues de SEVE pour la modélisation du fonctionnement des surfaces continentales et des transferts qui s'y déroulent

La modélisation proposée doit répondre à trois objectifs :

- i) Modéliser l'évolution propre des Objets identifiés comme significatifs dans le paysage.
- ii) Modéliser les transferts qui se déroulent dans et entre ces Objets.
- iii) Modéliser les interactions dynamiques entre l'évolution des différents Objets et les transferts qui s'y déroulent.

Pour répondre au premier objectif, la modélisation proposée doit permettre de **faire évoluer les grandes caractéristiques du paysage** listées dans la segmentation :

- i) la topographie, ce qui implique une représentation de l'érosion
- ii) les sols, ce qui implique une représentation de l'évolution de la structure du sol aux échelles temporelles pertinentes pour SEVE (compaction, travail agricole du sol, travaux d'aménagement, imperméabilisation, etc..).
- iii) l'occupation des sols, d'où une représentation de la rotation des cultures, de l'urbanisation, de l'évolution des infrastructures,
- iv) de la végétation d'où une représentation de la croissance, de la mortalité de la végétation et donc des pratiques agricoles (irrigation, fertilisation, chaulage, ..)

SEVE	<i>Document de projet de SEVE</i>	Version : 5 Date : 03/05/2005 Page : 13
-------------	-----------------------------------	---

- v) du réseau hydrographique, ce qui implique de représenter les évolutions liées à la géomorphologie des cours d'eau, aux aménagements, à l'anthropisation du milieu
- vi) des aménagements (barrages, endiguements, aménagements des lits des rivières, pompages, etc.)

Ces représentations pourront être explicites (comme par exemple la croissance de la végétation) ou être spécifiées par l'intermédiaire de forçages (par exemple les itinéraires techniques). A terme, on peut imaginer que les évolutions liées à la société ou à l'économie puissent être elles-mêmes modélisées, ce qui impliquerait l'association de spécialistes en modélisation des sciences humaines et sociales.

La modélisation des transferts qui se déroulent entre les différents Objets s'intéressera dans un premier temps au transfert d'eau, d'énergie et de matière (carbone, azote) et dans un deuxième temps, on pourra envisager les transferts de substances polluantes ou de sédiments.

Pour les transferts d'eau, les processus suivants seront représentés : précipitations et leur répartition spatiale, infiltration dans les sols, évaporation, transpiration, interception de l'eau par la végétation ou les bâtiments, ruissellement superficiel, écoulements dans les zones saturées et non saturées des sols, écoulement dans le réseau hydrographique (cours d'eau naturels ou réseaux anthropique).

Pour les transferts d'énergie, on représentera les processus de transferts radiatifs, bilan d'énergie, flux de surface, transferts thermiques dans les sols.

La modélisation des transferts de matière (C,N) impliquera la représentation de la photosynthèse, de la respiration des sols, du cycle de l'azote, etc..

La souplesse de la modélisation devra permettre de représenter tout ou partie des processus listés ci-dessus avec des degrés de complexité variés, en fonction des objectifs de la modélisation et/ou des échelles spatio-temporelles visées (**modularité**).

Enfin, l'évolution dans le temps et dans l'espace des processus décrivant l'évolution des surfaces continentales et des transferts qui s'y déroulent devra se faire avec un **couplage dynamique** des différents processus, sans a priori sur les processus dominants ou leur séquençage. A titre d'exemple, la plate-forme de modélisation devrait être capable de réagir au travail d'une parcelle par un agriculteur et de modifier en conséquence les propriétés hydrodynamiques du sol. Elle devrait aussi pouvoir gérer le fait qu'il ne pleuve que sur une partie du bassin et donc que les processus d'infiltration et de ruissellement ne soient activés que sur la zone concernée, et ce de manière dynamique (en suivant l'évolution dans le temps de la zone influencée).

Le besoin correspondant en terme d'architecture de couplage n'est, a priori, pas couvert par les approches existantes où il y a un certain séquençage des différents modules (coupleur OASIS (<http://www.cerfacs.fr/globc/software/oasis/oasis.html>), couplage développé dans les projets COUMEHY (<http://www.lthe.hmg.inpg.fr/GRID/>) ou HarmonIT (<http://www.harmonit.org/>), etc..) et doit être évaluée pour un coupleur dit dynamique comme le coupleur PALM (<http://www.cerfacs.fr/~palm/>). C'est certainement au niveau du couplage dynamique des modules que se situera un des défis majeurs de SEVE.

2.2.3 Fonctionnalités attendues de SEVE pour la spécification des paramètres et la spatialisation des approches

A terme, la plate-forme de modélisation proprement dite, devra permettre la spécification et la spatialisation des paramètres des différents modules de processus, l'initialisation des variables d'état et la

SEVE	<i>Document de projet de SEVE</i>	Version : 5 Date : 03/05/2005 Page : 14
-------------	-----------------------------------	---

spécification des conditions à la limite. La modélisation SEVE devra donc être capable d'intégrer des outils permettant :

- i) l'estimation de valeurs de paramètres représentatives des unités de modélisation (Objets et/ou Unités de Calcul) à partir d'informations connues sur des supports différents : informations ponctuelles, cartographique, de télédétection ou via des variables auxiliaires qui ne sont qu'indirectement reliées à celles d'intérêt (par exemple la pédologie pour les propriétés hydrodynamiques des sols ou l'occupation des sols pour les paramètres décrivant la végétation)
- ii) l'initialisation des variables d'état (par exemple l'humidité des sols à partir d'informations topographiques)
- iii) la spécification des conditions à la limite (par exemple à l'aide de modèle atmosphériques de plus grande échelle pour l'atmosphère, de modèles de nappes pour le sol, ou lorsqu'on ne voudra modéliser qu'un sous-domaine d'un bassin versant plus grand ou un bassin ayant des apports d'eau externes)
- iv) la spatialisation des approches mises au point sur un bassin versant donné à d'autres bassins, ce qui implique d'être capables de proposer des typologies des paysages adaptées

L'ensemble de ces actions devra faire appel à un ensemble d'outils d'agrégation, de désagrégation et de spatialisation (statistiques, géostatistiques, semi-empirique ou à base physique) adaptés aux différentes variables traitées.

2.2.4 Fonctionnalités attendues de SEVE en terme de validation, quantification des incertitudes et valorisation des jeux de données

Une fois la modélisation mise en œuvre sur un bassin versant, il faut être capable d'évaluer les résultats des simulations (validation), de quantifier les incertitudes sur ces simulations et éventuellement d'ajuster certains paramètres pour corriger la trajectoire du modèle (calage, assimilation). La mise en œuvre d'une validation complète de la modélisation proposée passe par l'identification de jeux de données adaptés (notamment dans les OREs ou Zones Ateliers) et/ou la définition d'une expérimentation dédiée.

Pour mener à bien la validation du modèle, ce dernier devra être capable de simuler les différentes mesures disponibles : mesures ponctuelles telles que débits, piézomètres, humidité des sols, mesures de télédétection. Ceci suppose de disposer d'outils d'interpolation, agrégation et de désagrégation permettant de comparer les simulations et les observations sur les mêmes supports spatio-temporels.

Compte tenu de la modélisation envisagée, un certain nombre de critères que devront respecter les sites choisis peuvent d'ores et déjà être énoncés :

- bassin de l'ordre de 1 à 10 km²
- disponibilité de la topographie (MNT)
- disponibilité d'informations sur le sol et le sous-sol
- mesures spatialisées (i.e. en plusieurs points du bassin) de la pluie, des débits, des niveaux de nappes, de l'humidité des sols, de la météorologie et la micro-météorologie (mesures de flux de surface)

SEVE	<i>Document de projet de SEVE</i>	Version : 5 Date : 03/05/2005 Page : 15
-------------	-----------------------------------	--

- suivi de la végétation (LAI, dates de semis, biomasse, intrants, itinéraires techniques, parcellaire...)
- bassin inclus dans un bassin plus grand afin d'aborder le problème de changement d'échelle du paysage à la région.

Pour le calage du modèle, on doit envisager l'implantation de méthodes permettant :

- i) de limiter le nombre de paramètres à caler en utilisant une spatialisation des paramètres qui fixe les rapports entre eux, afin de limiter les problèmes d'équifinalité sur les paramètres
- ii) de caler les paramètres en utilisant un ensemble de variables calculées par le modèle et pas seulement une seule telle que le débit à l'exutoire (mise en œuvre de méthodes d'optimisation multi-critères)
- iii) de piloter le modèle à l'aide de variables observées : assimilation de données par méthodes variationnelles, ce qui impliquerait la dérivation du code adjoint de SEVE, filtre de Kalman étendu...

En liaison avec les incertitudes sur les paramètres et variables d'entrée du modèle, il importe de disposer d'outils permettant de quantifier les incertitudes sur les simulations : utilisation de méthodes multi-objectifs, de méthodes de Monte-Carlo, détermination de la sensibilité du modèle à partir de codes adjoints...

2.2.5 Fonctionnalités liées à la mise en œuvre et à l'utilisation de la plate-forme (spécifications techniques)

Le détail des fonctionnalités attendu apparaît en annexe (section 9.3). Nous ne rappellerons ici que les principales :

- i) La plate-forme doit être portable sur machines Windows, Linux, Unix et sur machines parallèles.
- ii) La plate-forme doit supporter des codes écrits en langages Fortran, C, C++.
- iii) Une documentation décrivant l'utilisation de la plate-forme et la spécification technique que les codes/modules devront respecter pour pouvoir être intégrés dans la plate-forme.
- iv) Une cellule d'assistance est nécessaire à la formation et à l'assistance des utilisateurs et des contributeurs à la plate-forme ainsi qu'à sa maintenance et à la gestion des versions.

2.3 Activités permettant d'alimenter l'outil de modélisation

La spécification des fonctionnalités attendues de l'outil de modélisation commun permet, d'ores et déjà, de faire émerger des besoins en termes d'activités de recherches qui permettront d'alimenter la modélisation à la fois sur la modélisation des processus (progrès des connaissances et des modélisations associées), sur le transfert d'échelle et sur la mise en œuvre pratique d'un outil complexe. On peut ainsi lister les besoins suivants qui impliquent une communauté plus vaste que les partenaires associés pour l'instant à SEVE, mais qui dessinent comment les activités de recherche menées dans différents domaines (hydrologie, écologie, informatique, sciences économiques et sociales, etc.) pourraient être valorisées dans l'outil de modélisation, voire être suscitées par les besoins :

SEVE	<i>Document de projet de SEVE</i>	Version : 5 Date : 03/05/2005 Page : 16
-------------	-----------------------------------	--

- i) dérivation de représentations simplifiées des processus sous-maille aux échelles de modélisation considérées par SEVE à partir d'observations ou de modélisations plus détaillées (par exemple les transferts latéraux de masse entre parcelles)
- ii) spatialisation des paramètres d'entrée du modèle, avec des méthodes adaptées à la nature des différentes variables considérées
- iii) études de couplages entre processus, notamment d'un point de vue de la stabilité numérique, des erreurs induites par le couplage (par exemple entre transferts verticaux dans les sols et ruissellement de surface)
- iv) mise au point de solutions informatiques innovantes pour répondre aux besoins de couplage dynamique
- v) dérivation de typologies de paysages (pour permettre une extension des résultats à des bassins pas étudiés en détails)
- vi) formalisation de lois de fonctionnement des activités anthropiques (lien avec les sciences économiques et sociales)

2.4 Apport de SEVE par rapport à l'existant

Avant de lancer un grand nombre d'intervenants dans la construction d'un outil de modélisation aussi complexe que celui dessiné au 2.2, il importe de s'assurer que les besoins exprimés ne sont pas couverts par les approches existantes. Les arguments permettant de justifier la mise en œuvre d'une nouvelle approche apparaissent en filigrane de l'état de l'art donné dans la section 1.2, mais il importe de les lister de manière explicite :

Les approches utilisées dans la modélisation climatique de grande échelle s'appuient sur la simulation de différents processus couplés (modélisation SVAT et croissance de la végétation dans ISBA-AGS ou ORCHIDEE par exemple) ou la prise en compte des chemins de l'eau (simulation du débit des grands fleuves), mais les échelles spatiales traitées sont bien plus grandes que celles visées par SEVE (mailles élémentaires de l'ordre de 10 000 km²).

Les approches à méso-échelle (telles que la chaîne SAFRAN-ISBA-MODCOU) permettent le couplage entre processus atmosphériques et hydrologiques à des échelles se rapprochant de celles visées par SEVE (mailles élémentaires de l'ordre de 100 km²). Une des lacunes de ces modélisations est néanmoins de mal prendre en compte les transferts latéraux d'eau liés à la topographie et la redistribution.

Une des hypothèses de SEVE est que ces redistributions latérales ont un rôle prépondérant sur les flux de surface et les flux d'eau dans un bassin versant. C'est pourquoi il faut se doter d'un outil permettant de représenter explicitement les hétérogénéités de la surface et les chemins de l'eau, en incluant l'influence anthropique, rarement prise en compte dans les approches existantes. Ceci permettra de vérifier l'hypothèse de départ et ensuite d'utiliser cette modélisation explicite pour dériver des représentations simplifiées qui pourront être utilisées, par exemple dans les modèles atmosphériques.

Les travaux récents sur le couplage des composantes continentale et atmosphérique du cycle de l'eau aux échelles régionale et climatique (projet COUMEHY) permettent de rendre compte des transferts latéraux au niveau des surfaces continentales et dans l'atmosphère en couplant un modèle atmosphérique 3D, un ou plusieurs SVAT et une représentation des écoulements latéraux de surface sur des bassins versants. Le couplage reste néanmoins piloté par la modélisation atmosphérique pour l'application réalisée (Messager, 2005). Le coupleur PALM du CERFACS permet, a priori, un couplage dynamique, mais il faut

SEVE	<i>Document de projet de SEVE</i>	Version : 5 Date : 03/05/2005 Page : 17
-------------	-----------------------------------	--

encore évaluer son adéquation aux contraintes imposées par SEVE (par exemple la distinction entre fonctionnement des Objets et modules de transfert) avant d'éventuellement en faire un outil opérationnel de SEVE. Par ailleurs, l'idée, dans le projet SEVE, est d'aller assez loin dans le couplage dynamique des processus, en limitant au maximum les séquençages a priori entre processus. Il convient donc de bien examiner l'apport des recherches récentes en ce domaine et de tester différentes solutions techniques avant de conclure sur celles qui seront pertinentes pour répondre aux objectifs visés.

Un des enjeux majeurs sous-jacents au projet SEVE est de pouvoir répondre aux défis posés par les questions de développement durable ou de qualité de l'environnement (via la Directive Cadre sur l'Eau notamment) où la demande en terme de réponse sur la qualité et la quantité d'eau sont beaucoup plus précises (masses d'eau, tronçons de rivière) et nécessitent des modélisations beaucoup plus fines que celles existantes. Les enjeux du changement climatique ou la définition de nouvelles politiques agricoles ou d'aménagement supposent aussi de pouvoir simuler des scénarios d'évolution (modifications des pratiques agricoles, urbanisation) et d'en déterminer les impacts sur la ressource en eau et la qualité de l'environnement, ainsi que les incertitudes associées, afin que les décisions prises soient les « meilleures possibles ».

SEVE	<i>Document de projet de SEVE</i>	Version : 5 Date : 03/05/2005 Page : 18
-------------	-----------------------------------	---

3 Spécification de l'outil de modélisation

3.1 Architecture générale

L'outil de modélisation SEVE repose sur le principe que les surfaces continentales sont le siège, d'une part, de processus d'évolution et de description des éléments constitutifs de ces surfaces et, d'autre part, de processus de transfert d'eau, d'énergie et d'autres substances qui vont permettre des échanges entre ces différents éléments constitutifs.

L'architecture générale de SEVE rend compte de ces deux types de processus en distinguant explicitement :

- Les Objets : qui représentent les différents éléments constitutifs des surfaces continentales et qui sont caractérisés par des propriétés physiques et par des modèles de description et d'évolution.
- Les modules de transfert : qui conceptualisent les équations qui régissent les flux physiques échangés entre les Objets.

La modélisation des flux échangés par les Modules de Transfert s'appuie sur une discrétisation spatiale (ou maillage) des surfaces continentales qui doit être cohérente avec la représentation en Objets. Les unités ainsi obtenues sont appelées Unités Fonctionnelles, qui sont éventuellement re-découpées en Unités de Calcul pour des besoins numériques essentiellement.

Cette architecture, issue de l'expression des besoins, s'articule donc autour de 4 grandes composantes :

- la structuration des surfaces continentales, destinée notamment à identifier les Objets et le maillage sur lesquels s'appuiera la modélisation (appelée « Segmenteur » ou « structuration » ou « pre-processeur »)
- les Modules de Transfert
- les Modules de Description de l'évolution du paysage
- l'architecture permettant le couplage dynamique entre ces différents modules (appelé « Superviseur »)

3.1.1 La structuration des surfaces continentales : segmentation, maillage et Objets

3.1.1.1 Objectifs et principes de la structuration des surfaces continentales

Une étape importante d'une modélisation intégrée des surfaces continentales aux échelles du paysage puis de la région consiste à définir les modalités selon lesquelles sont représentés les espaces étudiés et leurs hétérogénéités. L'approche suivie à cet égard par SEVE est fortement inspirée de celle suivie par certaines modélisations hydrologiques (e.g. MHyDAS, POWER, URBS). Elle repose sur une segmentation de l'espace et des différents compartiments qui le composent en un ensemble d'unités d'espace. Ces unités correspondent à une représentation spatiale particulière des éléments constitutifs des surfaces continentales. La segmentation en unités répond en principe à plusieurs objectifs et contraintes :

- Représenter l'hétérogénéité spatiale du milieu en termes de propriétés physiques et de processus physiques.

SEVE	<i>Document de projet de SEVE</i>	Version : 5 Date : 03/05/2005 Page : 19
-------------	-----------------------------------	--

- Représenter les relations topologiques en termes de flux entre les différentes composantes des surfaces continentales.
- Permettre une hypothèse de continuum à l'échelle des unités de segmentation afin de pouvoir ignorer leurs motifs exacts de variabilité interne (propriétés, conditions aux limites ou initiales) et y définir des lois de transfert et des propriétés « émergentes ». En d'autres termes, la dimension des unités doit être adaptée à l'échelle de description des processus et vice versa.
- Permettre l'utilisation de sources variées de données spatiales (télédétection, cartes à bases typologiques, enquêtes, capteurs) pour la spécification des paramètres de la modélisation. La segmentation ne doit pas seulement être raisonnée par rapport aux contraintes internes de la modélisation mais aussi vis-à-vis des contraintes externes de disponibilité et de structure des données d'alimentation du modèle.

La fonction principale de l'étape de « Segmentation » des surfaces continentales de SEVE est de permettre de structurer complètement le paysage ou la région autour d'Objets et de définir le maillage sur lequel va reposer l'ensemble des modélisations. Cette structuration recouvre donc plusieurs fonctionnalités :

- Définition des Objets pertinents pour décrire les surfaces continentales aux échelles considérées.
- Description de la segmentation et de la géométrie de l'espace en Unités Fonctionnelles et en Unités de Calcul.
- Description du maillage, de la topologie (i.e. description des différentes relations spatiales non métriques se conservant par déformation continue - adjacence, voisinage, inclusion ...- entre Unités Fonctionnelles et Unités de Calcul).
- Description de la sémantique des Unités Fonctionnelles et Unités de Calcul ainsi définies par l'introduction d'Objets (affectation des propriétés d'un Objet par Unité Fonctionnelle / Unité de Calcul, initialisation générale des propriétés de ces Objets en fonction des modélisations retenues pour les différents processus).

Afin de modéliser les surfaces continentales, il faut s'assurer que ces différentes unités peuvent bien communiquer entre elles. La cohérence entre Objets et Unités Fonctionnelles / Unités de Calcul devra être assurée à ce niveau, ce qui suppose que certaines règles de définition de ces unités devront être respectées.

L'étape de structuration de l'espace devient alors un véritable pré-processeur.

3.1.1.2 Les différents niveaux de segmentation

Domaine d'étude et Compartiments dans SEVE

Le **domaine d'étude** est l'ensemble du domaine géographique du système Surface Interface Continentale que nous voulons modéliser et au sein duquel sont calculés les différents processus avec une restitution spatialisée des flux et variables d'état associés. *Il peut s'agir du paysage ou de la région par exemple.*

Dans SEVE, ce domaine d'étude est décomposé en sous-systèmes, appelés **compartiments**, qui correspondent aux milieux rencontrés (air, sol) et à leur interface (la surface continentale) conduisant à 3 compartiments :

- « la basse atmosphère »

SEVE	<i>Document de projet de SEVE</i>	Version : 5 Date : 03/05/2005 Page : 20
-------------	-----------------------------------	--

- « la surface continentale » : la végétation, le bâti, le réseau hydrographique....
- « le sol et le sous-sol »

Définition des Unités Fonctionnelles (UFs)

L'Unité Fonctionnelle est une unité qu'il est nécessaire de distinguer pour la représentation d'un processus, soit du fait d'un fonctionnement propre individualisable nécessitant un calcul solidaire (résolution simultanée sur l'ensemble de l'UF d'un système d'équations), soit du fait des objectifs de l'étude (elle se réduit alors à l'intersection entre l'ensemble du domaine d'étude et le domaine d'application du processus considéré). Elle résulte du croisement entre un domaine géographique et une spécificité fonctionnelle vis à vis de ce processus. **L'UF est donc le domaine spatial optimal nécessaire pour représenter les processus considérés.** Par conséquent, l'UF peut être de taille variable d'un processus à l'autre.

Par exemple pour calculer les transferts tridimensionnels dans le sol, il est nécessaire de considérer le sol sur l'ensemble du domaine d'étude alors que les flux de surface à l'interface sol atmosphère sont, dans le cas des surfaces couvertes de végétation, établies à l'échelle de la parcelle ou d'une entité de végétation considérée comme homogène.

Définition des Unités de Calcul (UCs)

L'Unité de Calcul est issue d'un découpage de l'UF en unités plus fines. Ce découpage supplémentaire peut être rendu nécessaire pour tenir compte de la variabilité spatiale interne à l'UF ou pour des raisons numériques dans la modélisation d'un processus donné ou bien encore pour traiter les problèmes de marges (*par exemple, dans le cas de transferts dans les fossés*). **L'UC est donc l'unité d'espace élémentaire sur laquelle sont définies les valeurs des variables de modélisation** : chaque variable prend une valeur unique sur l'Unité de Calcul, considérée comme uniforme. Chaque UF peut faire l'objet d'une discrétisation de l'espace en UC qui lui est propre mais l'UC peut tout à fait être confondue avec l'UF.

3.1.1.3 Représentation du paysage par des Objets ?

Qu'est-ce qu'un Objet ?

La spécification des besoins a fait émerger la nécessité de représenter les surfaces continentales à l'aide d'Objets, identifiables dans le paysage ou la région considéré, et d'en modéliser le fonctionnement et l'évolution. **Ces Objets sont donc les représentations des différents éléments constitutifs des Surfaces Continentales. Ils ont une existence propre quelle que soit l'échelle de modélisation envisagée. La nature des Objets est définie de façon intrinsèque, alors que la description détaillée de leurs propriétés physiques et de leurs modèles d'évolution est intimement liée aux échelles de modélisation du paysage** (*par exemple, l'Objet « tronçon hydrographique » sera caractérisé par ses propriétés topographiques (pente et largeur uniforme) et par ses modèles d'évolution (état des berges homogènes). Pour un objectif de modélisation depuis l'échelle de la parcelle vers celle du paysage, ce tronçon hydrographique sera décrit à l'échelle de la parcelle : curage du tronçon de rivière adjacent à la parcelle de blé de l'exploitation de Mr. Untel, alors que pour un objectif de modélisation depuis l'échelle du paysage vers celle de la région ce tronçon hydrographique pourra être décrit à l'échelle du paysage : description d'un cours d'eau dans sa globalité comme un Objet homogène et uniforme*). Même si elle est plus facile à appréhender pour la surface continentale, cette notion doit aussi être étendue à tous les compartiments de SEVE (comprenant aussi la basse atmosphère et le sol sous-jacent).

On propose la terminologie suivante, inspirée du langage utilisé en modélisation orientée objet :

- **Une classe d'Objet** est un type qui définit l'ensemble des **propriétés** et le **fonctionnement** communs aux Objets de cette classe (propriété : description des propriétés physiques décrite à

SEVE	<i>Document de projet de SEVE</i>	Version : 5 Date : 03/05/2005 Page : 21
-------------	-----------------------------------	---

l'aide de différents attributs qui peuvent être statiques, *par exemple* : *sol {texture}* et/ou dynamiques, *par exemple* : *sol {humidité}* / fonctionnement : modules d'évolution et de description décrits à l'aide de différentes fonctions ou méthodes). *A titre d'exemple, les attributs d'une classe d'Objets « parcelle agricole » pourront inclure le type (e.g. blé), la densité (n plants/m2), l'indice foliaire, la biomasse aérienne, la biomasse racinaire, la profondeur et la densité racinaire.*

- **Un Objet** est une « instance » (ou « **occurrence** ») d'une classe. Les Objets sont les entités réelles et localisées du paysage, ils correspondent à une réalité physique surfacique ou volumique du paysage ou de la région (*par exemple « la parcelle de blé de l'exploitation de Mr. Untel »*).

L'ensemble des propriétés d'un Objet n'est néanmoins pas obligatoirement renseigné (*par exemple la date de semis pour une culture pérenne*).

De même, des modèles d'évolution différents peuvent être associés à une même classe au travers de l'écriture de plusieurs fonctions possibles pour décrire cette évolution (*par exemple, pour une classe « parcelle agricole », la fonction décrivant la croissance de la végétation pourra être différente si on s'intéresse au blé, aux herbacées ou aux ligneux, et nous pourrons aussi définir plusieurs modules en concurrence pour décrire l'évolution du blé*). L'ensemble des propriétés des Objets est répertorié et géré par des Banques de Données.

Quels Objets pour décrire le paysage ?

On peut proposer une liste -non exhaustive- de classes d'Objets qui peuvent être pertinentes pour chacun des compartiments de SEVE. La description détaillée de chaque Objet (affectation des valeurs des attributs et paramètres des méthodes) ne pourra être réalisée qu'une fois l'échelle d'étude considérée (en particulier sa taille et sa frontière géographique). Une liste plus détaillée des classes d'Objets considérées dans la version V0 de SEVE est présentée dans le « cahier des charges de la version 0 de SEVE ».

- Compartiment « Basse Atmosphère » : a priori une seule classe d'Objet avec un seul Objet qui recouvre l'ensemble du domaine.
- Compartiment « Sol / Sous-sol » : aquifère (ou unité d'aquifère), unité de sol / sous-sol (définie par des propriétés pédologiques, géologiques... homogènes), puits...
- Compartiment « Surface » : Ce compartiment couvre de manière exhaustive le domaine étudié. Il comprend différents types d'Objets dont la réunion forme une discrétisation exhaustive de la surface en éléments mutuellement exclusifs. La représentation des flux pourra faire l'Objet de modèles distincts selon le type d'Objet. Dans les objectifs initiaux de SEVE, il conviendra de prendre en compte les Objets suivants : parcelle végétalisée, parcelle urbaine, bâtiment, tronçon de route, tronçon hydrographique, tronçon de fossé, tronçon de réseau d'assainissement, tronçon de talus, tronçon de haie, puits, réseau de drainage, barrage, rivière, sous-bassin versant, paysage. Les Objets de surface cités pourront être soumis à des processus de flux faisant appel à plusieurs modules de transfert (*par exemple les surfaces « parcelle végétalisée » et « bâtiment » sont soumises à des flux verticaux et latéraux non concentrés tandis que le réseau hydrographique est soumis à des flux concentrés et verticaux*).

Quels rôles pour ces Objets ?

On peut distinguer trois fonctions qui peuvent être associées à des Objets :

- **Décrire le fonctionnement du paysage.** Les Objets contiendront des attributs qui caractérisent l'état des paramètres physiques du paysage et seront associés aux Modules de description et d'évolution du paysage (*par exemple : décrire la croissance de la végétation, l'itinéraire*

SEVE	<i>Document de projet de SEVE</i>	Version : 5 Date : 03/05/2005 Page : 22
-------------	-----------------------------------	--

cultural pour la classe d'Objets « parcelle végétalisée », décrire l'évolution du lit des rivières pour la classe d'Objets « tronçon de rivière »). Dans une première étape, on fait les hypothèses suivantes :

- Il n'y a pas d'interaction directe entre Objets voisins (*par exemple pour simuler l'influence d'une baie sur la croissance de la végétation, on fera l'hypothèse que cette influence peut être représentée via les effets sur les transferts (dans l'atmosphère ou dans le sol) ou en définissant des Objets supplémentaires (par exemple: division de la parcelle en deux)*), mais il peut y avoir passage de paramètres entre Objets.
- La géométrie des Objets ne peut pas évoluer de manière dynamique dans la simulation (*par exemple: rivière qui déborde, modification du lit d'une rivière (géomorphologie), modification de la topographie (érosion)*). Pour traiter ces cas, on fera un découpage de l'espace et on réinitialisera une nouvelle simulation.

Dans une version ultérieure, on pourra lever ces restrictions et on pourra aussi considérer des processus spatiaux se développant sur plusieurs Objets en créant de nouvelles classes d'Objets couvrant plusieurs des Objets précédemment cités. *Par exemple une classe Objet telle que "coopérative agricole" ou "exploitation agricole", pourrait être définie pour prendre en compte/ simuler les pratiques de gestion sur les parcelles concernées.*

- **Conditionner la définition des Unités de Fonctionnement (UFs).** En effet, les Objets pertinents pour décrire le fonctionnement des surfaces continentales ne sont pas forcément fonctionnels pour les transferts qui s'y déroulent. *Par exemple, si la « parcelle végétalisée » est pertinente pour décrire la croissance de la végétation (fonctionnement), le bilan d'énergie (transfert), elle n'est pas fonctionnelle pour le ruissellement où l'Unité Fonctionnelle est le versant.* Si les UF's et les Objets ne correspondent pas à une même segmentation de l'espace, l'affectation d'un ou plusieurs Objets par UF devient délicate au point de pouvoir conduire à de multiples schémas agrégatifs / désagrégatifs potentiellement sources d'approximations et d'incertitudes dans la modélisation. Par ailleurs, ce sont ces Unités Fonctionnelles pour les transferts qui seront les éléments pertinents pour définir le découpage en Unités de Calcul (UCs) (*par exemple : l'UF sous-bassin versant est pertinente pour les transferts latéraux de surface, l'UF rivière pour les transferts /écoulements concentrés, l'UF parcelle pour les transferts verticaux en surface, etc.*). Ainsi, les Objets seront utilisés dans la phase de définition des UF's et UCs constitutifs du maillage des surfaces continentales selon certaines règles que nous évoquons plus loin dans ce document.
- **Servir de support aux sorties de SEVE** (*par exemple : sous-bassin versant, parcelle*) **et simuler les capteurs.** Il apparaît en effet nécessaire de définir de nouvelles classes d'Objets spécifiques aux sorties. Il s'agit notamment de représenter des capteurs fournissant des valeurs mesurées *telles que points de mesure (pluviographe, limnigraphie, piézomètre), pixels de télédétection, mât micro-météo.* Il est apparu nécessaire de définir ces dernières classes d'Objet, dans une perspective de validation des sorties ou de mise en place de procédures d'assimilation.

3.1.1.4 Le maillage

Contexte

Comme nous l'avons précisé dans les parties précédentes, le fonctionnement et l'évolution des surfaces continentales seront décrits au niveau des Objets ; alors que les processus de transferts s'opérant au sein des surfaces continentales seront décrits à travers les UF's, elles-mêmes re-découpées en UCs en

SEVE	<i>Document de projet de SEVE</i>	Version : 5 Date : 03/05/2005 Page : 23
-------------	-----------------------------------	--

fonction de l'hétérogénéité des surfaces et des besoins spécifiques des résolutions des schémas numériques mis en œuvre.

Puisque les UFs et les Objets doivent pouvoir communiquer entre eux (les attributs des Objets correspondent aux paramètres des UFs ; les frontières des UFs sont en accord avec la physique des équations qui traduisent les flux), la segmentation peut rapidement devenir quelque chose d'inextricable. Pour avoir une segmentation de l'espace cohérente et optimale en terme de complexité, nous sommes amenés à définir une méthodologie de segmentation assortie de contraintes. Ces contraintes sont liées à la coexistence d'Objets de nature fondamentalement différente, qui peuvent couvrir des zones d'espace partiellement communes et qui doivent pouvoir communiquer entre eux :

La description des Surfaces Continentales fait naturellement émerger la nature et la sémantique des Objets. La géométrie précise de chaque Objet ne pourra être définie qu'après recoupement entre toutes les informations disponibles (pour assurer la compatibilité entre segmentation de l'espace en Objets et maillage de l'espace).

La segmentation en UFs contrainte par les Objets

L'espace est décrit par un maillage 2D ou 3D, reposant sur des objets géométriques de type point, ligne, polygone, cercle et polyèdres (tétraèdre, parallélépipède ...), cylindre, ellipsoïde. Ainsi, le découpage rendra compte de la géométrie du domaine d'étude considéré, en s'adaptant à la dimension spécifique de chaque Objet géographique, qu'il soit segment (par exemple : tronçon de fossé), polygone (par exemple : parcelle, bassin versant), voire volume (par exemple : horizon pédologique).

La taille des mailles peut être irrégulière. La densité du maillage initial sera adaptée localement en fonction des desiderata de l'utilisateur. A terme, le système devra pouvoir vérifier la cohérence du maillage avec les modèles de processus utilisés et assister l'utilisateur.

Le principe de pouvoir hiérarchiser les différentes couches SIG en fonction du ou des processus que l'on souhaite plus particulièrement étudier est retenu. Ainsi, les découpages en UFs par rapport aux différents processus devront être compatibles entre eux et donc, autant que possible, plutôt emboîtés (ceci permettra d'éviter d'avoir des résultats qui soient trop liés à des schémas d'interpolation, d'agrégation et/ou de désagrégation). Ceci suppose de pouvoir définir une hiérarchie entre les compartiments de façon à asservir le découpage d'un compartiment à un autre. Les critères définissant cette hiérarchie peuvent être soit d'ordre géométrique (on privilégie le découpage le plus fin) soit thématique (on privilégie un processus hydrologique jugé dominant pour l'application projetée). Techniquement, ceci conduit à des systèmes d'intégrations de plusieurs couches géographiques qui sont de type « maître –esclave » alors que les fonctionnalités d'intégration implémentées couramment dans le SIG ne prennent pas en compte une telle hiérarchie. Des développements spécifiques sont donc peut-être à prévoir. A titre d'illustration, une hiérarchie dans la définition de la segmentation pourrait être la suivante :

- une segmentation en sous-bassins versants, s'organisant autour du réseau hydrographique
- une segmentation de ces sous-bassins en surface en unités homogènes selon différentes couches SIG: pédologie, occupation des sols, réseaux de linéaires et routes
- un découpage éventuel de ces unités surfaciques dans la verticale en fonction des propriétés du sol

Lorsque la contrainte d'emboîtement des découpages d'UFs ne règlera pas tous les problèmes de cohérence entre découpages, en particulier lorsque l'asservissement d'un découpage à un autre induira des déformations insupportables (*par exemple : asservissement de limites de petite parcelle à un maillage carré de*

SEVE	<i>Document de projet de SEVE</i>	Version : 5 Date : 03/05/2005 Page : 24
-------------	-----------------------------------	--

téledétection) ou lorsqu'un découpage sera très fin par rapport à un autre, SEVE devra alors comporter des procédures d'agrégation, de désagrégation et d'interpolation. Plusieurs procédures devront sûrement être implémentées afin de s'adapter aux exigences de représentation des processus. La localisation de ces procédures pourrait être dans Superviseur de SEVE car elles devront être lancées lors des échanges entre modules dont la chronologie est gérée par le module de supervision.

Le principe d'un calcul solidaire entre UCs d'une même UF implique que, pour un même processus de transfert, il n'y a pas d'échange entre les différentes UFs. *Par exemple, si les UFs sont les versants pour le processus de transferts latéraux non concentrés, il n'y aura pas d'échange d'eau entre les versants.* Les UFs regroupent donc un sous-domaine de l'espace, où, pour le transfert considéré, un calcul solidaire est nécessaire, mais reste indépendant de celui des autres UFs pour ce même transfert.

Au-delà des spécificités de découpage de chacun des compartiments, on peut citer d'ores et déjà comme indispensables les fonctionnalités suivantes :

- Compatibilité en entrée-sortie avec les formats de SIG standards (ARC/INFO, GRASS...)
- Intégration raster-vecteur (ex : ajout d'un attribut « pente moyenne » sur un polygone calculé à partir d'un MNT)
- Croisement de plusieurs couches d'informations vecteur
- Découpage d'un espace en bassins versants avec prise en compte de la délimitation de réseaux de drainage
- Création et mise à jour de topologies vecteur (ex : identification du polygone voisin haut, du segment bordant le polygone)
- Interfaces pour visualisation et interaction (ajustement d'un découpage par l'utilisateur)

Dans le cas des deux premières dimensions citées (1D et 2D), les procédures de segmentation pourront utiliser des fonctionnalités des Systèmes d'Information Géographique vecteur-raster disponibles, en particulier dans le monde des logiciels libres. Notons cependant que peu d'outils couvrent toutes les fonctionnalités, en particulier l'avant-dernière, pourtant nécessaire pour la représentation des relations fonctionnelles entre ces entités. Pour la segmentation en volumes quelconques (impliquant la dimension 3D), les solutions seront nettement plus limitées et une recherche d'outil reste à faire.

La définition des UCs

Ce mode de segmentation en UCs sera emboîté dans le précédent. Les UCs permettront de satisfaire aux contraintes de représentation numérique des processus ou de représentation d'une variabilité spatiale au sein d'une UF. Elles seront également utilisées pour passer d'une représentation 2D à une représentation 3D d'un compartiment (*par exemple : un maillage vertical du compartiment sol-sous sol appuyé sur un découpage 2D de surface*).

Les calculs effectués par les modules de transfert s'appuient sur des UCs qui recevront des informations provenant des Objets. On pourrait imposer que les UCs respectent strictement les limites des Objets. Néanmoins, en forçant ainsi l'emboîtement, on pourrait aboutir à des maillages pas très satisfaisants d'un point de vue numérique et, par ailleurs, à un nombre de mailles qui pourrait devenir prohibitif. Le choix retenu est donc de laisser l'utilisateur définir, au niveau du Segmenteur, les limites des Objets qu'il souhaite voir respectées lors de la segmentation en UCs.

SEVE	<i>Document de projet de SEVE</i>	Version : 5 Date : 03/05/2005 Page : 25
-------------	-----------------------------------	--

La question de savoir si on peut considérer qu'une fonction de distribution pour une grandeur peut être considérée comme une UC a été posée. Le choix retenu est de n'utiliser le mot UC que pour des éléments de calcul relatifs à la représentation des transferts et ayant un support spatial. L'utilisation de fonctions de distribution relève alors de l'implémentation du module correspondant.

Compte tenu de ces objectifs, les procédures de maillage devront avoir les fonctionnalités suivantes :

- produire des éléments triangulaires (2D) prismatiques ou tétraédriques (3D) s'appuyant sur les limites existantes, issues du précédent découpage
- pouvoir être contraintes par la définition a priori de densités de maillage variable dans l'espace

De tels outils existent déjà en 2D et en 3D¹. Il faut créer les interfaces entre les sorties SIG et l'entrée du mailleur choisi. Un exemple d'une telle interface existe dans le cas du modèle MHYDAS 3D développé par le LISAH.

La mise en rapport des Objets / UFs / UCs

Plusieurs Objets peuvent être affectés à une UC ou à une UF. Dans ce dernier cas, les attributs de l'UF (*par exemple le LAI*) seront propagés à l'ensemble des UCs de l'UF. Une nouvelle UF peut-être définie en assemblant plusieurs UFs.

Un Objet peut occuper plusieurs UCs. L'approche objet permet de gérer ce genre de situation. Un Objet (*par exemple rivière*) pouvant être constitué d'un ensemble d'Objets (*par exemple eau*) auquel l'Objet de niveau supérieur ajoute une propriété ou plusieurs (*par exemple la continuité*).

Les Objets présents sur une UC ou UF peuvent évoluer au cours du temps (*par exemple : pour le riz : sol -> eau -> végétation + eau -> végétation -> sol nu ; pour une rivière ou un lac eau -> sol -> eau*).

A chaque Objet est associé un ensemble de « méthodes » dont la fonction est de définir la valeur des attributs (détaillées plus loin dans ce document).

Certains de ces attributs ne sont pas entièrement calculés par SEVE mais « forcés », par exemple via des fichiers externes. Il s'agit par exemple des propriétés du sol (*e.g. texture*) stockées dans le SIG ou tout autre fichier. Ces attributs sont définis lors de la phase de création du maillage. Même s'ils ne sont pas calculés, ces attributs peuvent évoluer dans le temps. *C'est par exemple le cas de l'occupation du sol (rotation des cultures). La météo, les pratiques culturales ou des variables dérivées de l'observation satellitaire peuvent être introduites de la même manière.*

Les méthodes associées au forçage sont donc des procédures (fonctions) de type lecture de fichier et prétraitement (*par exemple pour calculer le rayonnement net, des volumes d'irrigation, de pompage ou de recharge ou interpoler*). Plusieurs méthodes peuvent être définies pour une même action, par exemple pour lire des fichiers de formats différents.

Les caractéristiques des maillages des différents compartiments ainsi constitués seront définies dans une base de données constituée avec les outils de segmentation disponibles dans SEVE. Cette base de donnée contiendra les caractéristiques topologiques des UFs et UCs et toutes les informations nécessaires pour les échanges d'informations entre compartiments (table de correspondances entre UCs, poids des UCs dans les processus d'agrégation/désagrégation).

Les principales étapes de la segmentation sont alors les suivantes :

¹ Voir synthèse réalisée par Marie Larroque, stage INSA Toulouse, CESBIO, Juillet 2004

SEVE	<i>Document de projet de SEVE</i>	Version : 5 Date : 03/05/2005 Page : 26
-------------	-----------------------------------	--

- Choix par l'utilisateur des modules de transfert et de description du fonctionnement qu'il souhaite utiliser
- Segmentation du paysage en Objets cohérents avec les choix précédents
- Définition des UFs pertinentes pour les transferts
- Segmentation en UCs avec choix des limites d'Objets à respecter
- Pour chaque étape de la structuration, la géométrie, la topologie et la connectivité entre les différents éléments doit être établie et mémorisée (Objets – UCs, UCs-UFs)
- Initialisation générale des Objets : propriétés (attributs, valeurs des paramètres), valeurs initiales des variables d'état (pour les initialisations ne nécessitant pas d'étude préalable spécifique ; des initialisations complémentaires pourront être réalisées au sein même des Objets si elles nécessitent la mise en œuvre des modèles physiques associés)

3.1.2 Quels transferts représente-t-on dans les modules de transfert ?

L'analyse des compétences des équipes et des pratiques de la modélisation montre qu'on peut identifier cinq grandes classes de transfert qui seront reprises dans l'architecture de SEVE :

- les transferts dans la basse atmosphère (domaine de la (micro)-météorologie)
- les transferts dans le sol et le sous-sol (domaine de la physique du sol, de l'hydrologie des sols et de l'hydrogéologie)
- les transferts verticaux de surface (domaine de la modélisation TSVA)
- les transferts latéraux non concentrés en surface (domaine de l'hydrologie de surface)
- les transferts latéraux concentrés en surface (domaine de l'hydraulique en charge et à surface libre dans les réseaux hydrographiques naturels et anthropiques)

Les transferts modélisés s'intéresseront aux transports de l'eau, de l'énergie, de matière (de carbone, d'azote puis des autres éléments, des substances polluantes et des sédiments). La Figure 3 illustre, de façon non exhaustive, le contenu de tels modules de transfert.

SEVE	<i>Document de projet de SEVE</i>	Version : 5 Date : 03/05/2005 Page : 27
-------------	-----------------------------------	---

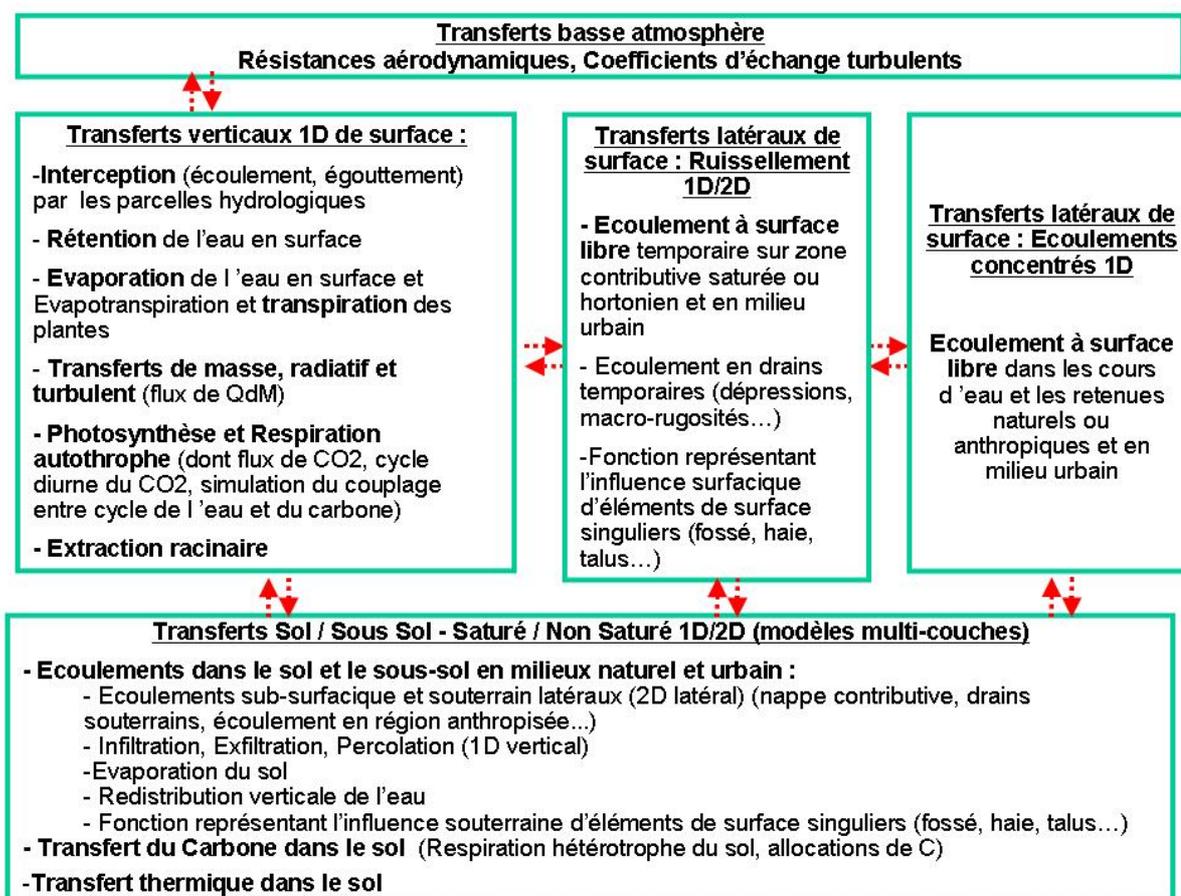


Figure 3. : Illustration des différents types de transferts potentiellement intégrés dans les Modules de Transfert de SEVE

3.1.3 Que représente-t-on dans les modules de description et d'évolution du paysage ?

Ces modules sont attachés aux classes d'Objets décrivant le paysage. Les tâches suivantes leur sont affectées :

- Ces modules décrivent **l'évolution des éléments constitutifs du paysage**, avec des variables d'état qui leurs sont propres. Cette évolution s'appuie sur des forçages externes et l'état du milieu tel qu'il est calculé par les modules de transfert. Les modules de description et d'évolution simulent donc des variables de sortie de SEVE qui ne sont pas uniquement liées aux modules de transfert (*ex: rendement, production de biomasse, etc.*).
- Ces modules calculent **l'évolution des paramètres de transfert** nécessaires aux modules de transfert (*ex: évolution des paramètres de rugosité de la surface pour Transfert latéraux en surface, LAI pour Transfert verticaux en surface, etc.*)
- C'est aussi dans ces modules que sont calculés **les conditions à la limite du domaine d'étude**, notamment pour l'atmosphère (*soit à partir d'un fichier de forçage climatique si l'évolution de l'atmosphère n'est pas calculée explicitement, soit à partir d'un modèle de plus grande échelle s'il y a un calcul explicite de cette évolution*) et le sol (*forçage par un modèle de nappe, évolution de valeurs ou de flux au fond et sur les bords du domaine*).

SEVE	<i>Document de projet de SEVE</i>	Version : 5 Date : 03/05/2005 Page : 28
-------------	-----------------------------------	--

3.1.4 Comment coupler les différents modules?

Les Objets, contenant les modules de description et d'évolution du paysage, et les modules de transferts présents dans SEVE sont perçus comme des modèles existants ou à construire mais potentiellement développés indépendamment les uns des autres. Afin de coupler ces différentes entités, pour constituer la modélisation intégrée des surfaces continentales, nous proposons d'utiliser un « Superviseur ».

Ainsi, le rôle du superviseur est de faire communiquer les différents modules entre eux (synchronisation des modules, échanges d'information à leur interface), d'adapter les maillages et de réaliser les interpolations temporelles de part et d'autre de l'interface de communication, et d'assurer la convergence des processus couplés itérativement. Ce couplage doit être réalisé de façon flexible puisqu'il doit permettre de substituer un module à un autre module de même fonction, il doit aussi être dynamique puisque la séquence des modules à exécuter est définie par les réactions des modules aux différents événements qui peuvent se produire (par opposition à un déroulement séquentiel des modules dont l'enchaînement peut être prédéfini par un ordre établi et synchronisé).

De plus, les résolutions spatiales et temporelles des processus à modéliser (étendue du domaine pouvant atteindre la région à partir d'une description parcellaire pour des processus décrits à un pas de temps horaire ou inférieur sur des cycles pouvant atteindre plusieurs décennies) nécessitent une optimisation des calculs. En particulier, le superviseur doit gérer la parallélisation des calculs et supporter des fréquences de couplage élevées.

Au final, nous proposons d'assigner au superviseur les tâches suivantes :

- **Gestion de l'exécution des modules de transfert et d'évolution et des échanges entre modules** (ordre, pas de temps, déclenchement)
- **Gestion des interpolations lors des échanges entre modules et de la convergence entre modules en cas de processus itératifs**
- **Gestion des sorties de SEVE**
- **Gestion des incidents** (plantage, non convergence en précisant si possible l'origine, par exemple en cas d'incompatibilité du maillage: maillage trop grossier par rapport aux processus modélisés) **et des reprises** (imposer des sauvegardes périodiques de l'état du système pour pouvoir relancer une simulation sans repartir depuis le début)

3.1.4.1 Gestion de l'exécution des modules

Cette tâche comprend :

- La gestion de l'ordre d'exécution des modules de transfert et d'évolution
- La gestion de l'exécution des modules de transfert et d'évolution
- La gestion de l'exécution des échanges entre modules (ordre, déclenchement, pas de temps, déclenchement, unités)
- La gestion de la parallélisation des calculs
- La gestion de toutes les communications entre le superviseur et les autres éléments : les UFs, les Objets, les modules de transfert et le superviseur lui-même

SEVE	<i>Document de projet de SEVE</i>	Version : 5 Date : 03/05/2005 Page : 29
-------------	-----------------------------------	--

Deux options ont été envisagées :

- Une gestion séquentielle des appels fixée a priori par l'utilisateur en fonction de sa connaissance des processus dominants
 - o *Avantage*: simplicité de mise en œuvre
 - o *Inconvénient*: probablement une gestion non optimale des calculs qui seraient contraints par le processus le plus pénalisant
 - o *Inconvénient*: On ne pourra pas étudier de manière exhaustive les interactions possibles entre modules car elles seront imposées a priori.

- Une base de données d'Objets dont l'état évolue en fonction de celui des autres grâce à la transmission de signaux au superviseur de type "Attention mon état a changé" ou " J'ai besoin de telle valeur".
 - o *Avantage*: la gestion implicite des exécutions assure que l'ensemble des interactions entre modules ou Objets puisse être traitée
 - o *Avantage* : la parallélisation des calculs peut alors être optimisée en fonction des composants effectivement exécutés à un instant donné
 - o *Inconvénient*: plus difficile à mettre en œuvre techniquement et plus difficile d'en contrôler le bon fonctionnement.

Compte tenu des besoins exprimés pour SEVE, et notamment le souhait de pouvoir étudier de manière exhaustive les interactions entre processus, c'est la seconde option qui est plus pertinente pour SEVE et qu'il faudra mettre en œuvre, sachant que la première option en est un cas particulier.

Pour la mise en place d'une telle structure, il importe de bien préciser les éléments habilités à envoyer des messages et ceux habilités à en recevoir. Pour faciliter la parallélisation des calculs sur des machines différentes et un meilleur contrôle des chemins suivis par les informations, il est souhaitable que les messages envoyés par les modules transitent par le superviseur, afin que ce dernier les analyse et déclenche les actions appropriées.

Les actions peuvent donc s'enchaîner de la manière suivante :

- les modules de transfert calculent les dates d'échange pour chaque UF et les proposent au superviseur qui peut le modifier et donne le feu vert pour l'exécution.
- le superviseur soit valide les calculs, soit relance le pas de temps, en fonction des informations reçues des autres modules de transfert ou d'évolution
- les informations fournies au superviseur peuvent être : les valeurs des variables à échanger appartenant à une UF ; le temps des valeurs pour l'UF ; le gradient des valeurs...
- pour les modules de description où les fonctions sont définies par un forçage extérieur (*ex: les dates de travail du sol*), les temps des échanges seront fixés par un agenda connu à l'avance par le superviseur.
- Chaque module (de transfert, d'évolution et de description) transmet au superviseur les variables dont il a besoin en précisant les dates auxquelles il en a besoin, ainsi que les variables modifiées qu'il vient de recalculer aux dates auxquelles elles sont disponibles (cette modification peut

SEVE	<i>Document de projet de SEVE</i>	Version : 5 Date : 03/05/2005 Page : 30
-------------	-----------------------------------	--

provenir du résultat d'un calcul réalisé dans un module de transfert, ou bien, pour les modules de description, cette modification peut provenir du forçage extérieur (*ex: les dates de travail du sol*)).

- Le superviseur, en disposant ainsi d'une vue globale de la situation, décide des dates d'échanges des variables entre les différents modules (de transfert et d'évolution)
- Le superviseur soit valide les calculs, soit relance le pas de temps, en fonction des informations reçues des autres modules de transfert ou d'évolution.

3.1.4.2 Gestion des interpolations et des calculs itératifs

Cette tâche comprend :

- La gestion des interpolations/ agrégations/ désagrégations lors des échanges entre modules
- La gestion de la convergence entre modules en cas de processus itératifs

Seule une analyse détaillée de la question permettra de conclure sur la place des interpolations : dans le superviseur ou dans les modules ?. C'est l'utilisateur qui pourra définir le type d'interpolation qu'il souhaite. Néanmoins, il est probable qu'on définira quelques interpolations type qui pourront être incluses dans une boîte à outils du superviseur (*on peut penser à des interpolations par pondération des surfaces, par exemple sur des flux, ou à des interpolations respectant des contraintes physiques telles que le bilan de masse*).

Les calculs itératifs seront automatiquement gérés dans le superviseur, compte tenu du fonctionnement par messages retenus. On pourra envisager des modules génériques pour gérer les itérations qui incluraient: la spécification des modules sur lesquels portent la convergence, les variables sur lesquelles porte la convergence, le(s) domaine(s) d'étude / les UFs concernés par la convergence, les critères de convergence, la décision de l'atteinte de la convergence.

Les numériciens attirent néanmoins l'attention sur le point suivant : des algorithmes de convergence, tels que l'algorithme du point fixe, sont bien maîtrisés et fonctionnent correctement, mais la convergence n'est pas assurée. Des études plus précises sur le fonctionnement des couplages entre modules devront être menées. Elles feront partie des études nécessaires à SEVE à mener en parallèle (cf sections 2.4 et 4).

3.1.4.3 Gestion des sorties de SEVE

On peut, au niveau du superviseur, imaginer une autre boîte à outils où l'utilisateur pourrait choisir :

- les variables de sortie qu'il souhaite
- les supports spatiaux pour ces variables
- les pas de temps de sortie
- leur interpolation ou agrégation éventuelle : agrégation, désagrégation, variables instantanées, moyennes sur une certaine durée, cumuls sur une certaine durée.

Il faudra donc prévoir des outils d'agrégation, désagrégation, prise de moyenne, cumul. Reste à définir où se feront ces opérations : dans les modules ou au niveau du superviseur.

Comme mentionné dans la section 3.1.1, la perspective de validation du modèle ou de mise en place de procédures d'assimilation a fait émerger la notion d'Objets "capteurs" qui correspondent typiquement à des Objets sur lesquels l'utilisateur pourra vouloir simuler les sorties.

3.1.4.4 Gestion des incidents et des reprise

Cette tâche correspond à la gestion de l'assistance au débogage :

- Gestion des incidents (plantage, non convergence) et des reprises (sauvegardes périodiques et reprises de simulation possibles depuis le dernier état sauvé).
- Rôle de vérificateur : tous les paramètres doivent être renseignés en fonction des méthodes retenues pour la modélisation.
- Envoi de messages d'alerte en cas d'incompatibilité du maillage (Le maillage doit être cohérent avec la physique).

3.1.5 Conséquences pour l'architecture de SEVE

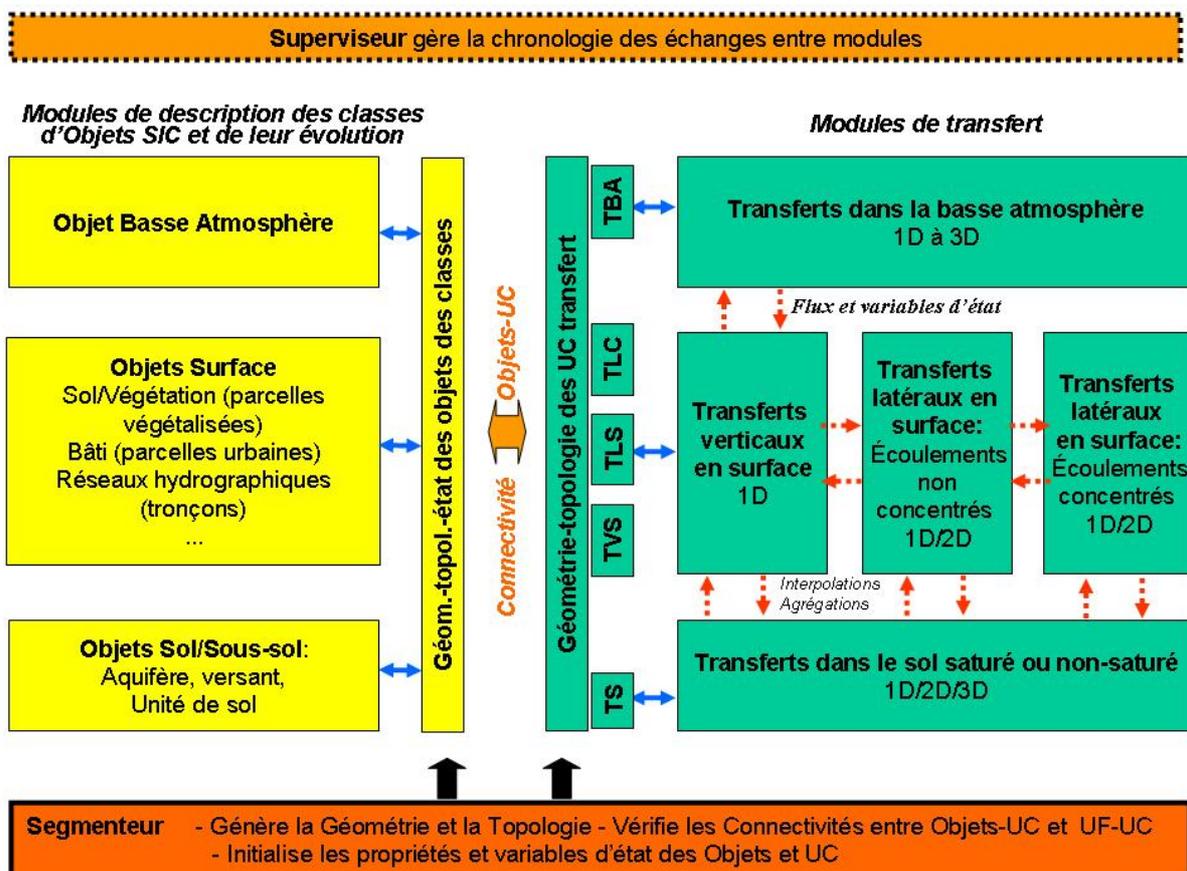


Figure 4. : Schéma de l'architecture du modèle SEVE

Les spécificités énoncées précédemment conduisent au schéma de principe de la Figure 4 pour l'outil de modélisation SEVE.

On définit (à gauche en jaune) des classes d'Objets décrivant le paysage et son fonctionnement. A une entité spatiale est associée un Objet. A ces Objets sont associés des attributs décrivant la géométrie des Objets, leur topologie et leur connectivité avec les autres Objets, leurs variables d'état propres, les paramètres des modules de transfert qu'ils font évoluer et des fonctions décrivant l'évolution des variables et paramètres associés à l'Objet.

La partie droite reprend la définition des modules de transfert, telle que définie section 3.1.3.

SEVE	<i>Document de projet de SEVE</i>	Version : 5 Date : 03/05/2005 Page : 32
-------------	-----------------------------------	--

Les barres centrales verticales vertes traduisent le fait que, pour les différents modules de transfert, un découpage en UCs et UFs est effectué. Le lien entre les Objets des modules de description de l'espace et les UCs/UFs des modules de transfert se fait via la connaissance des connectivités entre Objets et UCs et les échanges entre modules de description et de transfert. La définition des échanges entre modules de transfert et de description est détaillée en Annexes (section 8.2 et 8.3 respectivement).

Enfin, on trouve le Superviseur qui aura un rôle de contrôle et de pilotage dynamique de l'exécution des différents modules, en fonction des événements qui se produiront dans chacun d'eux.

Dans cette architecture, le rôle du segmenteur est conséquent, puisque, outre un rôle de découpage de l'espace proprement dit, lui est dévolue **l'initialisation générale des Objets et des Unités de Calcul**. Ceci permet de profiter du lien qui devra être établi entre cette phase d'initialisation et des bases de données ou des systèmes d'information géographique. Le segmenteur produit des fichiers contenant les informations sur la géométrie, la topologie (connectivité) des Objets et unités de calcul, ainsi que des valeurs des paramètres et variables d'état associés aux modules de transfert et de description qui pourront être repris par le superviseur pour lancer la simulation proprement dite.

L'architecture logicielle proposée est évolutive : on peut définir une nouvelle classe d'Objets en fonction des besoins. Par ailleurs, ajouter un nouveau module (de description ou de transfert) nécessitera, outre l'écriture du module en question, l'implémentation des Objets pertinents pour décrire le fonctionnement ou les transferts et celle de leur initialisation dans le segmenteur.

3.1.6 Choix des langages de programmation

Les modules de transfert ou de description peuvent être dans des langages différents parmi (Fortran, C, C++) avec une encapsulation dans le langage utilisé pour le superviseur.

Le langage à utiliser dans le superviseur sera à définir en fonction des choix techniques retenus pour le superviseur.

3.2 Spécification d'une version 0

Les spécifications précédentes définissent l'outil de modélisation complet auquel nous souhaitons aboutir. La complexité d'un tel outil nécessite d'attaquer sa construction par étapes. C'est pourquoi, nous définissons la version 0 de SEVE, qui constitue cette première étape.

Cette version 0 est définie dans le document « Cahier des charges de la version 0 de SEVE ».

On peut distinguer deux pistes pour la définition des versions ultérieures de SEVE :

- Soit une amélioration de l'outil existant par l'adjonction de nouvelles fonctionnalités (comme la prise en compte des politiques de gestion, le transfert de polluant, etc..) ou l'inclusion du cycle de l'azote et de la matière organique
- Soit une remise en cause totale de l'outil car il ne pourrait pas supporter l'adjonction des nouveaux processus envisagés ou l'architecture initiale ne répond plus à l'ensemble des besoins

SEVE	<i>Document de projet de SEVE</i>	Version : 5 Date : 03/05/2005 Page : 33
-------------	-----------------------------------	---

4 Recherches complémentaires

La spécification des fonctionnalités attendues de l'outil de modélisation commun a permis de faire émerger des besoins en termes d'activités de recherches (voir section 2.3). Nous les reprenons ici en essayant de dégager les priorités à donner à chacune d'elles:

4.1 Spatialisation des entrées

La mise en œuvre pratique de la modélisation sur les cas d'étude proposée ne sera possible que si des outils permettant la spécification des paramètres et variables d'entrée sur les unités de modélisation existent. Les priorités suivantes ont été identifiées en ce domaine :

- i) Spatialisation des propriétés hydrodynamiques des sols
- ii) Désagrégation de l'information climatique fournie par un modèle atmosphérique en zone de relief
- iii) Prise en compte des effets de relief pour une utilisation optimale des données de télédétection en tant que source d'informations pour SEVE

4.2 Typologie de paysages

Afin de disposer d'un outil de modélisation facilement transposable à d'autres bassins que ceux étudiés en détails, il est nécessaire de disposer de critères permettant une spatialisation aisée des résultats ainsi que le changement de bassin d'étude. Compte tenu de l'importance de ce point pour la crédibilité du projet SEVE, il importe que des travaux débutent dès maintenant sur le sujet. Les actions suivantes ont été identifiées :

- i) Synthèse bibliographique des travaux existant dans d'autres communautés
- ii) Etablissement de critères de typologie des paysages en se restreignant aux sites d'étude retenus pour l'application du modèle

4.3 Mise au point de représentations simplifiées des processus sous maille

L'un des enjeux de la version 0 est de démontrer que la prise en compte des transferts latéraux entre unités de modélisation modifie de manière significative les flux de matière et d'énergie, par rapport à une modélisation qui ne les inclurait pas.

Compte tenu de la taille du grain élémentaire retenu pour SEVE (la parcelle), on note qu'il existe peu de représentations simplifiées des transferts latéraux à ces échelles, à la fois dans le sol et dans l'atmosphère. Ceci permet de dégager les priorités suivantes pour les recherches à mener en terme de représentations simplifiées des processus :

- i) Représentation des transferts latéraux dans les sols entre 2 parcelles. L'idée est de s'appuyer sur un modèle résolvant l'équation de Richards 3D comme modèle de référence et de définir les configurations type à paramétriser à l'aide d'une typologie de versants ou bassins versants.
- ii) Transfert dans les basses couches de l'atmosphère et développement d'une approche intermédiaire entre une modélisation 3D complète et une modélisation 1D sans interaction entre les parcelles. Cette méthode intermédiaire autoriserait à se concentrer uniquement sur les basses couches de l'atmosphère. Elle utiliserait un bilan d'énergie complet sur chaque

SEVE	<i>Document de projet de SEVE</i>	Version : 5 Date : 03/05/2005 Page : 34
-------------	-----------------------------------	--

maille et un calcul linéaire d'un vent semi-paramétré par tranche d'atmosphère, puis le transport des autres grandeurs (équation de transport-diffusion), assurant la conservation de la masse de l'air et des constituants. La méthode ne s'appliquerait néanmoins pas sur des pentes fortes.

4.4 Etudes de couplages particuliers entre processus et conditions à la limite

Des expériences de couplage menées dans différents domaines, il ressort que le couplage, via le superviseur, entre certains processus risque de poser des problèmes de stabilité numérique, de convergence, voire de conservation des quantités calculées. Les réflexions ont permis d'identifier plusieurs questions délicates touchant à la spécification des conditions à la limite dans SEVE, au couplage de processus particuliers et au couplage entre Objets de nature différentes (par exemple des Objets 1D et 2D). Les points suivants ont donc été identifiés comme prioritaires :

- i) Définition des conditions à la limite inférieure dans le sol/sous-sol et lien éventuel avec des modèles de nappe
- ii) Couplage entre module de transfert dans le sol/sous-sol et module de transferts latéraux en surface (avec la variable charge en surface qui est une variable d'interface)
- iii) Couplage entre modules de transfert s'appliquant à des unités de calcul 2D ou 1D (cas des linéaires tels que fossés, haies, routes, etc.. et du sol)

4.5 Recherches de nouvelles technologies informatiques pour le superviseur

Le rôle du superviseur dans SEVE est d'une importance capitale puisqu'il gère les communications entre les différents modules scientifiques et pourrait donc dégrader l'information élémentaire produite s'il était inadapté. Des recherches se concentreront donc sur l'adéquation entre les nouvelles technologies informatiques disponibles et le cahier des charges de SEVE.

SEVE	<i>Document de projet de SEVE</i>	Version : 5 Date : 03/05/2005 Page : 35
-------------	-----------------------------------	--

5 Proposition d'organisation du projet

Partie en cours de réflexion.

SEVE	<i>Document de projet de SEVE</i>	Version : 5 Date : 03/05/2005 Page : 36
-------------	-----------------------------------	---

6 Références bibliographiques

- **Abbott, M.B., J.C. Bathurst, J.A. Cunge, P.E. O'Connell and J. Rasmussen**, 1986a: An introduction to the European Hydrological System-Système Hydrologique Européen "SHE" 1: History and philosophy of a physically based distributed modeling system. *Journal of Hydrology*, 87, 45-59.
- **Abbott MB, Bathurst JC, Cunge JA, O'Connell PE, Rasmussen J.** 1986b. An introduction to the European Hydrological System - Système Hydrologique Européen, "SHE", 2, Structure of a physically-based, distributed modelling system. *Journal of Hydrology* 87: 61-77.
- **Band LE, Tangué CL, Tenenbaum DE, Fernandes RA.** 2001a. Modeling watersheds as spatial object hierarchies : structure and dynamics. *Transact Geogr Inf Syst* 4:181-196.
- **Band LE, Tangué CL, Groffman P, Belt K.** 2001b. Forest ecosystem processes at the watershed scale : Hydrological and ecological controls of nitrogen export. *Hydrol. Proc.* 15:2013-2028.
- **Beasley DB, Huggins LF, Monke EJ.** 1980. ANSWERS – A model for watershed planning. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineering* 23: 938-944.
- **Beven KJ, Calver A, Morris EM.** 1987. The Institute of Hydrology distributed model. *Report 98, Institute of Hydrology, Wallingford, Oxon, United Kingdom.*
- **Cayrol, P., Moulin, S., Kergoat, L., Dedieu, G. and Chehbouni, A..** 2000. Calibrating a coupled SVAT/Vegetation growth model with remotely sensed reflectance and surface temperature. A case study for the HAPEX-Sahel grassland sites. *J. Appl. Meteorol.*, 39, 2452-2472.
- **Danish Hydraulic Institute (DHI)**, 1993. MIKE SHE WM, short description.
- **De Roo APJ, Offermans RJE.** 1995. LISEM: a physically based hydrological and soil erosion model for basin-scale water and sediment management. *Proceedings of a Boulder Symposium: Modelling and management of sustainable basin-scale water resources system*, IAHS Publ. N°231.
- **Demarty, J., Ottlé, C., Braud, I., Frangi, J.P., Bastidas, L.A. and Gupta, H.V.,** 2004. Using a multiobjective sensitivity analysis to calibrate SiSPAT-RS model, *J. Hydrology*, 287, 214-236.
- **Diskin MH, Simpson ES.** 1978. A quasi linear spatially distributed model for the surface runoff systems. *Water Resources Bulletin* 14(4): 903-918.
- **Fortin JP, Turcotte R, Massicotte S, Moussa R, Fitzback J.** 2001 a. Distributed Watershed model compatible with remote sensing and GIS data. I : Description of the model. *Journal of the Hydrologic Division, ASCE* 6(2): 91-99.
- **Fortin JP, Turcotte R, Massicotte S, Moussa R, Fitzback J.** 2001 b. Distributed Watershed Model Compatible with Remote Sensing and GIS Data. II: Application to Chaudière Watershed. *Journal of the Hydrologic Division, ASCE* 6(2): 100-108.
- **Habets, F., Noilhan, J., Golaz-C., Goutorbe, J.P., Lacarère, P., Leblois, E., Ledoux, E., Martin, E., Ottlé, C. and Vidal-Madjar, D.,** 1999a. The ISBA surface scheme in macroscale hydrological model applied to the Hapex-Mobilhy are. Part I: Model and database, *J. Hydrology*, 217, 75-96.
- **Habets, F., Noilhan, J., Golaz-C., Goutorbe, J.P., Lacarère, P., Leblois, E., Ledoux, E., Martin, E., Ottlé, C. and Vidal-Madjar, D.,** 1999b. The ISBA surface scheme in macroscale hydrological model applied to the Hapex-Mobilhy are. Part II: Simulation of streamflows and annual budget, *J. Hydrology*, 217, 97-118.
- **Haverkamp, R., Angulo-Jaramillo, R., Braud, I., Debionne, S., De Condappa, D., Gandola, F., Roessle, S., Ross, P.J., Sander, G., Vachaud, G., Varado, N., Viallet, P. and Zin, I.,** 2004. POWER - Planner Oriented Watershed modelling system for Environmental

SEVE	<i>Document de projet de SEVE</i>	Version : 5 Date : 03/05/2005 Page : 37
-------------	-----------------------------------	--

Responses-. *Final Integrated report AgriBMPwater*, Project UE n° EVK1-CT-1999-00025, 26 pp.

- **Inoue, Y., Oliosio, A. et Choi, W.**, 2003. Dynamic Change of CO₂ Flux over Agricultural Ecosystem and its Relationship with Remotely Sensed Thermal and Optical Signatures. *IGARSS-2003*, Juillet 2003, Toulouse, France, IEEE, 3p.
- **Ivanov, V. Y., E. R. Vivoni, R. L. Bras, and D. Entekhabi.** 2004. Catchment hydrologic response with a fully distributed triangulated irregular network model. *Water Resources Research* 40:W11102, doi: 11110.11029/12004WR003218.
- **Krinner G, Viovy N, de Noblet-Ducoudré N, Ogée J, Polcher J, Friedlingstein P, Ciais P, Sitch S, Prentice I C**, 2003. A dynamic global vegetation model for studies of the coupled atmosphere-biosphere system. *Global and Biogeochemical Cycles*, in revision
- **Krol M.S., Jaeger A., Bronstert A., Krywkow, J.**, 2001. The semi-arid integrated model (SIM), a regional integrated model assessing water availability, vulnerability of ecosystems and society in NE-Brazil, *Phys. Chem. Earth Pt B*, 26 (7-8), 529-533.
- **Maidment DR, Djokic D, Lawrence KG.** 1989. Hydrologic modeling on a triangulated irregular network. *Transactions of the American Geophysical Union* 70: 1091.
- **Messenger, C.**, 2005. Couplage de modèles atmosphériques et hydrologiques sur l'Afrique de l'Ouest à l'aide de la technologie CORBA, *Thèse de l'Université Joseph Fourier, Grenoble I.*
- **Moussa, R., Voltz, M. and Andrieux, P.**, 2002. Effects of the spatial organization of agricultural management on the hydrological behaviour of a farmed catchment during flood events, *Hydrological Processes*, 16(2), 393-412.
- **Neitsch, S.L., Arnold, J.G., Kiniry, J.R., Williams, J.R. and King, K.W.**, 2002. Soil and Water Assessment Tool, SWAT 2000. Theoretical documentation, Texas Water Resources Institute, *College Station Texas, Report TR-191*, 506 pp.
- **Nouvellon, Y., M. S. Moran, D. Lo Seen, R. Bryant, S. Rambal, W. M. Ni, A. Bégué, A. Chehbouni, W. E. Emmerich, P. Heilman, and J. G. Qi**, 2001, Coupling a grassland ecosystem model with Landsat imagery for a 10-year simulation of carbon and water budgets, *Remote Sensing of Environment*, vol. 78, pp. 131-149.
- **Oliosio, A., Inoue, Y., Demarty, J., Wigneron, J.P., Braud, I., Ortega-Farias, S., Lecharpentier, P., Otlé, C., Calvet, J.-C., Brisson, N.**, 2002. Assimilation of remote sensing data into crop simulation models and SVAT models. *First International Symposium on Recent Advances in Quantitative Remote Sensing*, 16-20 September 2002, Valencia, Spain. J.A. Sobrino (Ed.). Publicacions de la Universitat de València, España. pp. 329-338.
- **Pellenq J, Kalma J, Boulet G, Saulnier GM, Wooldridge S, Kerr Y, Chehbouni A**, 2003. A disaggregation scheme for soil moisture based on topography and soil depth, *J. Hydrology*, 276, 112-127.
- **Prévo L., H. Chauki, D. Troufleau, M. Weiss, F. Baret, and N. Brisson**, 2003, Assimilating optical and radar data into the STICS model for wheat crops., *Agronomie*, vol. 23, pp. 297-303.
- **Reggiani, P. and Rientjes, T.H.M.**, 2005. Flux parameterization in the Representative Elementary Water shed (REW) approach: application to a natural basin, *Water Resources Research*, in press.
- **Rodriguez F., Andrieu H., Creutin J.D.** 2003. Surface runoff in urban catchments: morphological identification of unit hydrographs from urban databanks. *Journal of Hydrology*, 283 (1-4), 146-168
- **Silberstein R.P., Vertessy R.A., Morris J. and Feikema; PM.**, 1999. Modelling the effects of soil moisture and solute conditions on long-term tree growth and water use: a case study from the Shepparton irrigation area, Australia, *Agr. Water Manage.*, 39(2-3), 283-315.
- **Staudenrausch H., W.-A. Flügel, T. Ranchin, I. Herlin, G. Rodolfi, M.J. Clark, R.E. Schulze, N. King, D.S. Tevera & J.I. Matondo**, 1999. The development of an innovative computer based "Integrated Water Resources Management System" for semi-arid catchments: concepts and first results. *Zentralblatt für Geologie und Paläontologie*. Teil I, Heft 3-4, pp. 189-212.

SEVE	<i>Document de projet de SEVE</i>	Version : 5 Date : 03/05/2005 Page : 38
-------------	-----------------------------------	---

- **Vertessy, R., O'Loughlin, E., Beverly, E. and Butt, T.** (1994): Australian experiences with the CSIRO Topog model in land and water resources management. In: *Proceedings of UNESCO International Symposium on Water Resources Planning in a Changing World*, Karlsruhe, Germany, June 28-30, 1994, pp. III-135-144.
- **Watson, F., Rahman, J. and Seaton, S.**, 2001. Deploying environmental software using the Tarsier modeling framework, *3rd Australian Stream Management Conference*, 27-29 August 2001, Brisbane, Australia, 631-637.
- **Weiss M., D. Troufleau, F. Baret, H. Chauki, L. Prévot, A. Oliosio, N. Bruguier, and N. Brisson**, 2001, Coupling canopy functioning and canopy radiative transfer models for remote sensing data assimilation. The case of winter wheat, *Agricultural and Forest Meteorology*, vol. 108, pp. 113-128.
- **Woolhiser DA, Smith RE, Goodrich DC.** 1990. KINEROS, A kinematic runoff and erosion model: Documentation and User Manual. *U.S. Department of Agriculture, Agricultural Research Service, ARS-77*, 130 pp.
- **Young RA, Onstad CA, Bosch DD, Anderson WP.** 1989. AGNPS, a non-point source pollution model for evaluating agricultural watersheds. *Journal of Soil and Water Conservation* 44: 168-173.
- **Zhang Y, Li CS, Trettin CC, Li, H. and Sun, G.**, 2002. An integrated model of soil, hydrology, and vegetation for carbon dynamics in wetland ecosystems, *Global Biochem. Cy.*, 16 (4): art. no. 1061.

SEVE	<i>Document de projet de SEVE</i>	Version : 5 Date : 03/05/2005 Page : 39
-------------	-----------------------------------	--

7 Annexes

7.1 Description détaillée des besoins

7.1.1 Spécifications liées à la topologie et à la segmentation de l'espace

La segmentation de l'espace a pour objectif de déterminer les Objets et unités de calcul qui serviront de base à la modélisation.

- 1) SEVE doit pouvoir traiter des bassins versants de taille variée allant de quelques km² à quelques dizaines de milliers de km², ce qui implique de pouvoir traiter plusieurs millions d'unités de modélisation.
- 2) SEVE doit pouvoir représenter des bassins de topographie variée (allant de fortes à très faibles pentes)
- 3) SEVE doit représenter le réseau hydrographique naturel
- 4) SEVE doit prendre en compte la variabilité spatiale dans l'occupation des sols
- 5) SEVE doit tenir compte de la structuration verticale et horizontale des sols et de l'existence de propriétés hydrodynamiques différentes selon la profondeur
- 6) SEVE doit représenter les zones urbanisées et le réseau anthropique qui modifie les écoulements tels que routes, fossés, canaux, digues, ouvrages
- 7) SEVE doit prendre en compte les lacs naturels ou artificiels
- 8) SEVE doit prendre en compte les réseaux de drainage de surface ou enterrés
- 9) SEVE doit prendre en compte l'irrigation et son mode d'opération
- 10) SEVE doit tenir compte des pratiques culturales (labour, autre travail du sol, etc.)
- 11) SEVE doit prendre en compte des singularités (puits de pompage, etc.)
- 12) SEVE doit prendre en compte l'organisation spatiale des différents Objets constituant le paysage, et donc la topologie de ces Objets
- 13) SEVE doit comporter des outils de maillages 1D, 2D et 3D, permettant de découper les Objets en unités de calcul pertinentes pour les différents modules

7.1.2 Spécifications liées à l'outil de modélisation du fonctionnement des surfaces continentales et aux transferts qui s'y déroulent

- 14) SEVE doit posséder une structure informatique modulaire permettant aisément de remplacer le contenu d'un module par un autre, en fonction du degré de complexité souhaité pour la modélisation et les échelles considérées
- 15) L'utilisateur doit donc pouvoir choisir dans une gamme de modèles disponibles ceux qu'il désire utiliser pour une application particulière

7.1.2.1 Spécifications liées aux aspects temporels

- 16) SEVE doit pouvoir simuler la dynamique à long terme (par exemple une ou plusieurs saisons culturales, plusieurs années) en tenant compte des variations du climat et de l'occupation des sols sur plusieurs années

SEVE	<i>Document de projet de SEVE</i>	Version : 5 Date : 03/05/2005 Page : 40
-------------	-----------------------------------	--

- 17) SEVE doit pouvoir simuler les processus de court terme (par exemple les épisodes de crues) en tenant compte des variations à faible pas de temps (de l'ordre de la minute des entrées comme la pluie)
- 18) SEVE doit permettre d'utiliser des pas de temps différents en fonction des échelles de temps caractéristiques des processus modélisés
- 19) SEVE doit pouvoir simuler l'évolution temporelle des écoulements turbulents dans les basses couches de l'atmosphère et l'évolution des variables climatiques correspondantes
- 20) SEVE doit pouvoir utiliser une information climatique en données de forçage

7.1.2.2 Spécifications liées au cycle hydrologique

- 21) SEVE doit simuler les écoulements dans le réseau hydrographique en fonction de l'espace et du temps
- 22) SEVE doit simuler l'infiltration de l'eau dans les sols en fonction de l'espace et du temps
- 23) SEVE doit simuler l'apparition de charge d'eau en surface suite à un refus d'infiltration (ponding) en fonction de l'espace et du temps
- 24) SEVE doit simuler les écoulements de surface par excès d'infiltration en fonction de l'espace et du temps
- 25) SEVE doit simuler les écoulements sur surface saturée en fonction de l'espace et du temps
- 26) SEVE doit représenter la redistribution verticale de l'eau dans la zone non saturée en fonction de l'espace et du temps
- 27) SEVE doit simuler la redistribution latérale de l'eau dans la zone non saturée en fonction de l'espace et du temps
- 28) SEVE doit simuler l'évaporation du sol en fonction de l'espace et du temps
- 29) SEVE doit simuler la transpiration de la végétation en fonction de l'espace et du temps
- 30) SEVE doit prendre en compte l'interception de la pluie par la végétation en fonction de l'espace et du temps
- 31) SEVE doit simuler les processus de formation et d'évaporation de rosée en fonction de l'espace et du temps
- 32) SEVE doit représenter les écoulements préférentiels dans les macropores en fonction de l'espace et du temps
- 33) SEVE doit simuler la formation et l'évolution de nappes perchées en fonction de l'espace et du temps
- 34) SEVE doit simuler les remontées capillaires de la nappe vers la zone non saturée en fonction de l'espace et du temps
- 35) SEVE doit calculer les écoulements d'eau dans la zone saturée (qui interagit avec la surface) en fonction de l'espace et du temps
- 36) SEVE doit prendre en compte les interactions nappes – réseau hydrographique
- 37) SEVE doit simuler les transferts de chaleur dans le sol en fonction de l'espace et du temps
- 38) SEVE doit prendre en compte les processus liés à la neige (accumulation, transformation, fusion, changement de phase) en fonction de l'espace et du temps
- 39) SEVE doit tenir compte des processus liés au gel des sols en fonction de l'espace et du temps

SEVE	<i>Document de projet de SEVE</i>	Version : 5 Date : 03/05/2005 Page : 41
-------------	-----------------------------------	--

- 40) SEVE doit pouvoir simuler l'existence de fractions d'eau mobile et immobile dans la zone non saturée en fonction de l'espace et du temps

7.1.2.3 Spécifications liées au cycle du carbone et à la prise en compte de la végétation

- 41) SEVE doit simuler le transfert radiatif dans les différents éléments de la surface (végétation, sol nu) en fonction de l'espace et du temps
- 42) SEVE doit calculer le bilan d'énergie des différentes composantes (sol nu, végétation)
- 43) SEVE doit simuler la croissance de la végétation (biomasse) en fonction des apports en eau et en substances nutritives) en fonction de l'espace et du temps
- 44) SEVE doit simuler la répartition de la biomasse entre les différents organes des plantes (feuilles, racines, organes) en fonction de l'espace et du temps
- 45) SEVE doit simuler la répartition des racines dans le sol en fonction de l'espace et du temps
- 46) SEVE doit simuler la transpiration des plantes en fonction de l'espace et du temps
- 47) SEVE doit simuler la photosynthèse des plantes en fonction de l'espace et du temps
- 48) SEVE doit simuler la respiration des plantes en fonction de l'espace et du temps
- 49) SEVE doit simuler la transformation de la matière organique des sols en fonction de l'espace et du temps
- 50) SEVE doit tenir compte de l'existence de couches de litière à la surface du sol
- 51) SEVE doit modéliser la régulation stomatique des plantes en fonction de l'espace et du temps
- 52) SEVE doit simuler les réflectances mesurables par télédétection en fonction de l'espace et du temps

7.1.2.4 Spécifications liées à la prise en compte des activités anthropiques

- 53) SEVE doit prendre en compte les rotations de culture
- 54) SEVE doit prendre en compte l'irrigation et son mode d'application
- 55) SEVE doit prendre en compte les fertilisations des cultures
- 56) SEVE doit prendre en compte les dates de travail du sol (labour, sarclage, etc..)
- 57) SEVE doit pouvoir prendre en compte les conséquences de maladies, parasites infestant les cultures
- 58) SEVE doit pouvoir tenir compte des événements météorologiques extrêmes (crues, sécheresse, tempêtes, etc.)
- 59) SEVE doit prendre en compte les modifications d'écoulements dans le réseau hydrographique liées à la gestion d'ouvrages de régulation

7.1.2.5 Spécifications pour permettre la prise en compte de nouvelles composantes

Les extensions qui sont listées ci-dessous correspondent à des processus qui ne seront pas simulés dans la première version de SEVE mais pour lesquels un forçage sera utilisé dans un premier temps. Lister ces extensions possibles permet par ailleurs d'identifier les communautés qui pourront à terme, avoir un intérêt à s'investir dans SEVE ou à l'enrichir: modélisation de l'atmosphère, hydrogéologie, transport et transformation de polluants, érosion, géochimie, hydrologie urbaine, sciences humaines et sociales. On

SEVE	<i>Document de projet de SEVE</i>	Version : 5 Date : 03/05/2005 Page : 42
-------------	-----------------------------------	--

voit aussi se dégager un certain nombre d'applications opérationnelles qui pourraient intéresser les collectivités locales (aménagement du territoire, politique de gestion de l'eau, environnement, politique agricole)

- 60) SEVE devra pouvoir être couplé à terme à des modèles de circulation atmosphérique (en tant que schéma de surface) ou à des modèles de couche limite
- 61) SEVE devra pouvoir être couplé à des modèles de nappes (lorsque ces dernières n'interagissent pas avec la surface)
- 62) SEVE doit pouvoir simuler les processus de transport, transformation, dégradation de nitrates, phosphores, pesticides dans la zone non saturée en fonction de l'espace et du temps
- 63) SEVE doit pouvoir simuler les processus de transport, transformation, dégradation de nitrates, phosphores, pesticides dans la zone saturée en fonction de l'espace et du temps
- 64) SEVE doit pouvoir simuler les processus de transport, transformation, dégradation de nitrates, phosphores, pesticides dans la rivière en fonction de l'espace et du temps
- 65) SEVE doit pouvoir simuler l'érosion des sols et la réorganisation de la topographie qui en découle
- 66) SEVE doit pouvoir être couplé à des modèles d'altération chimique
- 67) SEVE doit pouvoir à terme être couplé à des modèles d'écoulements dans les réseaux d'assainissement en zone urbaine
- 68) SEVE doit pouvoir être couplé à des modèles socio-économiques d'évolution de l'occupation des sols et des pratiques agricoles
- 69) SEVE doit pouvoir prendre en compte les contraintes liées à des politiques d'aménagement du territoire ou des politiques environnementales

7.1.3 Spécifications liées à la documentation des unités de modélisation et à la spatialisation

7.1.3.1 Spécifications liées à la fourniture des données

- 70) Il est important de réduire le risque de sur-paramétrisation du modèle SEVE en limitant au minimum le nombre de paramètres indépendants, pouvant nécessiter une calibration
- 71) Le modèle SEVE doit pouvoir fonctionner pour différentes configurations de disponibilité des données, avec bien entendu un jeu de données d'entrée minimum requis pour espérer des résultats raisonnables
- 72) Le logiciel doit inclure des procédures internes de dérivation des paramètres nécessaires, à partir d'un jeu de données d'entrée minimum
- 73) Le préprocesseur du modèle SEVE doit inclure des procédures et des outils d'agrégation / désagrégation et/ou interpolation (dans l'espace et dans le temps) des données d'entrée à l'échelle des unités de modélisation. Les outils permettant de reconstituer des séries incomplètes doivent être considérées.

7.1.3.2 Spécifications liées à la disponibilité de données d'entrée

On distinguera deux types de données: celles dont la connaissance est absolument nécessaire pour faire tourner le modèle, et celle qui peuvent être utiles puisque leur connaissance augmentera les informations disponibles en entrée. Toutefois cette distinction peut être moins stricte suivant l'objectif de modélisation suivi. On parlera de "données de base" ou de "données recommandées" pour la première

SEVE	<i>Document de projet de SEVE</i>	Version : 5 Date : 03/05/2005 Page : 43
-------------	-----------------------------------	--

catégorie et de "données utiles" pour la seconde catégorie. En fonction de la disponibilité des données, les paramètres d'entrée pourront être dérivés de manière directe ou indirecte. Les différentes options possibles seront décrites dans le chapitre 4 sur la paramétrisation du modèle SEVE.

Données recommandées :

- 74) Modèle Numérique de Terrain (MNT)
- 75) Carte du socle
- 76) Carte précisant les réseaux artificiels, les canaux, les drains
- 77) Carte des infrastructures: lacs, routes, zones urbanisées
- 78) Information sur les zones d'irrigation et les pratiques
- 79) Information sur les puits de pompage et leur gestion
- 80) Carte des sols
- 81) Carte de texture (fractions d'argile, limon, sable)
- 82) Carte d'occupation des sols
- 83) Information sur les rotations de culture et les dates de semis et de récolte
- 84) Information sur les types de culture
- 85) Information sur les réseaux d'irrigation et les pratiques
- 86) Précipitation en une ou plusieurs stations du bassin ou issue d'un modèle atmosphérique
- 87) Variables climatiques (rayonnement solaire incident, rayonnement grandes longueurs d'ondes incident, température de l'air, humidité spécifique de l'air (ou pression atmosphérique + humidité relative ou tension de vapeur), vitesse du vent) en une ou plusieurs stations ou issues d'un modèle atmosphérique
- 88) Une estimation initiale de la distribution spatiale de l'humidité des sols
- 89) Une estimation initiale de la position de la nappe phréatique
- 90) Information sur la géométrie du lit des rivières
- 91) Coefficient de rugosité dans le lit des rivières

Autres données utiles :

- 92) Les apports extérieurs au bassin (si la nappe dépasse les limites du bassin versant)
- 93) Stratification verticale des sols
- 94) Distribution verticale et/ou horizontale de la texture (ou de la granulométrie) des sols
- 95) Distribution verticale et/ou horizontale des propriétés structurales des sols
- 96) Distribution verticale et/ou horizontale de la conductivité hydraulique à saturation
- 97) Distribution spatiale des coefficients de rugosité de surface
- 98) Distribution spatiale de l'Indice foliaire (LAI) en fonction du temps
- 99) Distribution spatiale de la hauteur de la végétation en fonction du temps
- 100) Distribution spatiale de la densité racinaire (et/ou profondeur maximale d'enracinement) en fonction du temps
- 101) Présence de litière, résidus végétaux à la surface du sol
- 102) Information sur les végétations naturelles (hauteur des arbres, arbustes, strates herbacées, espèces, date de chute des feuilles)

SEVE	<i>Document de projet de SEVE</i>	Version : 5 Date : 03/05/2005 Page : 44
-------------	-----------------------------------	---

- 103) Information sur les propriétés optiques des différents couverts
- 104) Profondeur des lacs et réservoirs (pour les propriétés optiques)

7.1.3.3 Spécifications liées à la prescription de conditions à la limite (atmosphère/nappe)

- 105) SEVE doit pouvoir adapter dans l'espace et dans le temps des conditions à la limite atmosphérique fournie par un modèle de plus grande échelle
- 106) SEVE doit donc posséder les outils permettant d'interpoler, en respectant la physique des écoulements, les données atmosphériques sur les unités de modélisation SEVE
- 107) SEVE doit pouvoir utiliser, pour définir les conditions à la limite inférieure du module de transfert dans le sol et le sous-sol, les sorties d'un modèle hydrogéologique de nappe
- 108) SEVE doit donc posséder des outils permettant soit d'adapter la géométrie de l'Objet sol à l'évolution de la condition à la limite, soit si on travaille à géométrie fixe, de rendre compatible les variables d'état calculées par SEVE et par le modèle de nappe

7.1.3.4 Spécifications liées à la prise en compte de techniques de spatialisation

- 109) Le pré-processeur de SEVE devra pouvoir intégrer les développements en terme de techniques de spatialisation des paramètres et variables d'entrée du modèle
- 110) Le pré-processeur de SEVE devra pouvoir intégrer les méthodes développées en terme de typologie de paysage pour la spatialisation des approches à d'autres bassins

7.2 **Spécifications liées à la calibration, la vérification /validation du modèle et la quantification des incertitudes et la valorisation de jeux de données**

7.2.1.1 Spécifications liées aux données de sortie

- 111) SEVE doit calculer les variables d'intérêt à l'échelle de chaque unité élémentaire
- 112) L'utilisateur doit pouvoir choisir les points (horizontalement et verticalement) et les variables qu'il souhaite obtenir en sortie
- 113) L'utilisateur doit pouvoir choisir les pas de temps auquel il souhaite les sorties (possibilité de pas de temps différents selon les variables)
- 114) SEVE doit pouvoir fournir des valeurs moyennes sur des zones précisées par l'utilisateur (par exemple contenu en eau moyen sur une profondeur donnée, etc.)
- 115) SEVE doit calculer la distribution des débits dans le réseau hydrographique dans l'espace et dans le temps
- 116) SEVE doit calculer la distribution des débits dans le réseau hydrographique à des points où existent des stations de mesures dans le temps
- 117) SEVE doit calculer la distribution des teneurs en eau dans l'espace et dans le temps
- 118) SEVE doit calculer la distribution des fractions gelées, la teneur en glace dans l'espace et le temps (y compris les lacs)
- 119) SEVE doit pouvoir fournir le stock d'eau dans l'espace et dans le temps

SEVE	<i>Document de projet de SEVE</i>	Version : 5 Date : 03/05/2005 Page : 45
-------------	-----------------------------------	--

- 120) SEVE doit calculer la distribution des températures dans l'espace et dans le temps
- 121) SEVE doit calculer la distribution des pressions d'eau dans le sol dans l'espace et dans le temps
- 122) SEVE doit calculer la distribution des hauteurs de nappe dans l'espace et dans le temps
- 123) SEVE doit pouvoir fournir les flux d'eau (et autres) dans l'espace et dans le temps
- 124) SEVE doit pouvoir fournir les stocks de neige dans l'espace et dans le temps
- 125) SEVE doit calculer la distribution de la biomasse dans le sol dans l'espace et dans le temps
- 126) SEVE doit calculer la distribution des composantes du bilan radiatif dans l'espace et dans le temps
- 127) SEVE doit calculer la distribution des composantes du bilan d'énergie dans l'espace et dans le temps
- 128) SEVE doit calculer la distribution des flux d'eau (évaporation, transpiration, interception, évapotranspiration totale) dans l'espace et dans le temps
- 129) SEVE doit calculer la distribution des flux de CO₂ (photosynthèse, respiration) dans l'espace et dans le temps
- 130) SEVE doit calculer la distribution des températures radiatives dans l'espace et dans le temps
- 131) SEVE doit calculer la distribution des réflectances dans différentes longueurs d'ondes dans l'espace et dans le temps
- 132) SEVE doit pouvoir être couplé à des modèles de transfert radiatif afin de simuler des variables de télédétection dans différentes gammes de longueur d'ondes

7.2.1.2 Spécifications liées à la calibration du modèle et à l'évaluation des incertitudes

- 133) SEVE doit inclure des procédures automatiques de calibration de certains paramètres du modèle (méthodes d'optimisation multi-critères)
- 134) SEVE doit permettre de quantifier les incertitudes de la modélisation (méthodes multi-critères, méthode GLUE)
- 135) SEVE doit permettre l'utilisation de procédures d'assimilation de données
- 136) Pour les méthodes d'assimilation variationnelle, le calcul du modèle adjoint de SEVE doit être envisagé
- 137) SEVE doit inclure des procédures d'assimilation par filtre de Kalman étendu

7.2.1.3 Spécifications liées à la validation du modèle et à la valorisation de jeux de données

- 138) SEVE doit permettre de simuler les capteurs d'observations du système modélisé (mesures ponctuelles, pixels de télédétection, etc.)
- 139) SEVE doit inclure des procédures d'agrégation / désagrégation, interpolation permettant de restituer les variables simulées aux échelles de mesures ou réciproquement

SEVE	<i>Document de projet de SEVE</i>	Version : 5 Date : 03/05/2005 Page : 46
-------------	-----------------------------------	---

7.3 Fonctionnalités liées à la mise en œuvre et à l'utilisation de la plate-forme (spécifications des fonctionnalités techniques)

- 140) La plate-forme doit pouvoir tourner sur des machines PC ou stations Windows, Linux, Unix et des machines parallèles
- 141) La plate-forme doit pouvoir supporter des codes écrits en Fortran90, C, C++
- 142) La plate-forme sera exécutée dans un premier temps sous forme de ligne de commande. On pourra réfléchir dans un deuxième temps à la construction d'une Interface Homme Machine plus conviviale
- 143) La plate-forme doit comporter les utilitaires (logiciels libres) permettant l'extraction de sous-bassins et du réseau hydrographique à partir d'un Modèle Numérique de Terrain (au niveau du segmenteur)
- 144) La plate-forme doit posséder les utilitaires SIG (logiciels libres) permettant le découpage de la surface 2D en Objets (au niveau du segmenteur)
- 145) La plate-forme doit posséder les outils d'extension du découpage 2D de la surface à un maillage 3D permettant d'aboutir au découpage final du volume modélisé (incluant l'atmosphère et le sol/sous-sol) (au niveau du segmenteur)
- 146) La plate-forme doit posséder des utilitaires permettant de définir la connectivité entre les différents Objets et les calculs géométriques (surfaces projetées, volumes, surfaces et longueurs d'échange, etc..) (au niveau du segmenteur)
- 147) La plate-forme doit inclure les outils d'initialisation des Objets et des conditions à la limite (pouvant passer par des outils de liaison avec des bases de données ou des SIG) (au niveau du segmenteur)
- 148) La plate-forme doit être documenté avec un manuel détaillé permettant à l'utilisateur de lancer son application avec les données dont il dispose
- 149) La plate-forme doit comprendre une notice et des utilitaires pré-écrits permettant la conception et l'écriture d'un nouveau module (spécification des entrées, des sorties, règles et conventions d'écriture des modules)
- 150) La plate-forme doit comprendre une notice permettant de construire le modèle regroupant/couplant/intégrant les composantes logicielles identifiées comme nécessaires à sont application par l'utilisateur
- 151) Il est souhaitable qu'une cellule d'assistance aux utilisateurs soit mise en place pour assurer l'assistance aux utilisateurs de la plate-forme, aux développeurs de nouveaux modules, l'insertion de nouveaux modules dans la plate-forme, la mise à disposition des nouvelles versions, la maintenance de la plate-forme.

SEVE	<i>Document de projet de SEVE</i>	Version : 5 Date : 03/05/2005 Page : 47
-------------	-----------------------------------	--

8 LISTE DES ACTIONS

Action	Qui	Pour quand
Commenter ce document	Tout le monde	10 octobre 2005