HAL
open science

Raisonnement spatial pour l'intégration de modèles de simulation : Application aux avalanches

Vincent Cligniez, Jérôme Euzenat, Yannick Manche

▶ **To cite this version:**

Vincent Cligniez, Jérôme Euzenat, Yannick Manche. Raisonnement spatial pour l'intégration de modèles de simulation : Application aux avalanches. [Contrat] INRIA Rhône-Alpes/CEMAGREF Grenoble. 1999, pp.23. hal-01401151

HAL Id: hal-01401151

https://hal.science/hal-01401151v1

Submitted on 23 Nov 2016

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

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

Programme Systèmes d'Information Géographique (PSIG)
CNRS SHS – CNRS SPI – Institut Géographique National
Appel d'offre 1998

Rapport Scientifique de fin de projet

Raisonnement spatial pour l'intégration de modèles de simulation

Application aux avalanches

septembre 1999

Cemagref

INRIA RHÔNE-ALPES

Programme Systèmes d'Information Géographique (PSIG)
CNRS SHS – CNRS SPI – Institut Géographique National
Appel d'offre 1998

Rapport Scientifique de fin de projet

Raisonnement spatial pour l'intégration de modèles de simulation Application aux avalanches

Vincent Cligniez[*], *Jérôme Euzenat*[+], *Yannick Manche*[#]

La description d'une avalanche nécessite la prise en compte des différents phénomènes physiques qui interviennent aux différentes étapes de son déroulement. Il est donc essentiel d'intégrer différents modèles de simulation au sein d'un système unique, afin d'obtenir une image exhaustive de l'avalanche, de la formation du manteau neigeux à l'arrêt de son écoulement, en passant par la stabilité des plaques de neige et la propagation de la rupture du manteau.

Mais cette intégration requiert les inférences spatiales nécessaires pour appliquer les différents modèles aux différentes étapes de la simulation. L'ensemble des modèles combinés doit former un tout cohérent, aussi tout raisonnement aboutissant à un résultat doit être maintenu. Un système de gestion des dépendances spatio-temporelles entre les entrées et les sorties des différents modèles doit donc être développé. Il s'inspirera des techniques de systèmes de maintien du raisonnement et de la programmation par contraintes.

Le projet a consisté à tester cette idée à partir d'un cas concret, basé sur l'intégration de modèles de simulation. Il s'articule autour d'un système à base de connaissances spatiales, ARSEN, développé au Cemagref avec l'aide de l'INRIA, destiné à intégrer les représentations de l'espace et les modèles de simulation. Ce système a été appliqué au phénomène avalanche, de manière non exhaustive, à l'aide de deux modèles de formation du manteau neigeux et d'écoulement.

[*] DDE 38 depuis septembre 1998, Vincent.Cligniez@voila.fr
[+] INRIA Rhône-Alpes, Jerome.Euzenat@inrialpes.fr
[#] CEMAGREF ETNA, Yannick.Manche@grenoble.cemagref.fr

1 Méthodologie

1.1 Application

Dans le domaine des risques naturels, les simulations informatiques permettent une approche des phénomènes physiques par modélisation. Ces modèles, calibrés grâce à des comparaisons avec des sites d'étude connus, sont destinés à évaluer les effets des catastrophes présentes ou à venir. Généralement, un seul modèle ne suffit pas pour avoir une vision globale d'un phénomène. Les conditions initiales, le mode de déclenchement et la propagation du phénomène sont par exemple trois fonctions liées chronologiquement, qu'il faut combiner pour réaliser une étude exhaustive. D'autre part, pour une fonction déterminée, il existe souvent plusieurs modèles qu'il est intéressant de comparer pour une meilleure évaluation du phénomène en question. Le problème posé ici repose donc sur **l'intégration de modèles de simulation**, qu'ils soient utilisés les uns après les autres ou conjointement.

Dans le domaine des avalanches, on retrouve cette multiplicité de modèles aux différentes étapes de la simulation, avec des échelles d'espace et de temps différents :

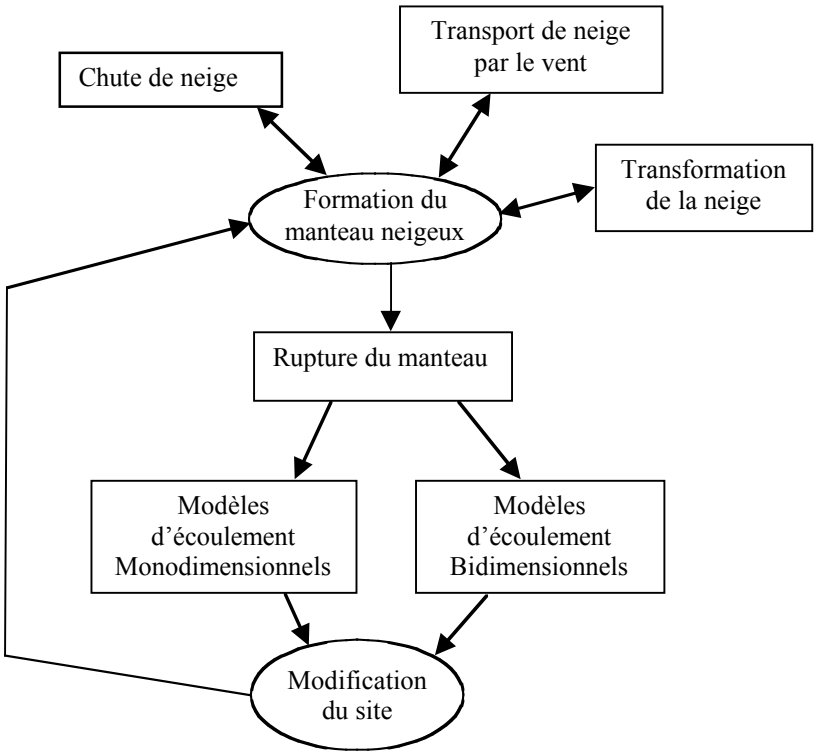


Figure 1 *: les différents modèles impliqués dans le phénomène avalanche.*

Tout d'abord, il faut évaluer le manteau neigeux en tenant compte des chutes de neige, des effets du vent qui déplace la neige, et des effets de la météo (soleil, gel…) qui transforment la neige. Différents modèles simulent cette formation, de manière purement physique ou de manière empirique. La temporalité de ces modèles est de l'ordre du jour et l'espace varie : les modèles météorologiques précisent les précipitations et le vent sur un massif montagneux, les modèles de transport par le vent ont besoin d'une description plus précise du site avalancheux, avec une précision de l'ordre du mètre.

Ensuite, il s'agit de déterminer la stabilité de ce manteau neigeux, afin de simuler la rupture et la quantité de neige initiant l'avalanche. Différents modèles d'écoulement sont alors disponibles pour obtenir une extension spatiale de l'avalanche et les champs de pression développés pendant cet écoulement. Ces modèles ont une dimension temporelle comparable, liée au temps de l'écoulement. Il se développent également sur une même échelle spatiale.
Finalement, il est intéressant, après une simulation d'écoulement, de pouvoir revenir à un manteau neigeux modifié afin d'étudier des avalanches multiples sur un site pendant un même hiver.

1.2 Besoins et outils

Malheureusement, le couplage de tous ces modèles est rarement réalisé, à cause des nombreuses contraintes pour faire cohabiter les différentes échelles de temps et d'espace correspondantes. Un système unique intégrant ces différents modèles reste à mettre au point, c'est l'objet de ce projet.
L'intégration de modèles au sein d'un système nécessite la formalisation des liens entre ces modèles. Qu'ils soient utilisés successivement ou de manière simultanée, les dépendances entre ces modèles doivent être créées et maintenues. C'est pourquoi la méthode proposée s'inspire des techniques des **systèmes à base de connaissances**, avec **maintien du raisonnement**.

De plus, le projet doit tenir compte des besoins de tous les modèles en matière de données en entrée, notamment les **représentations du terrain** nécessaires. En effet, chaque modèle s'exécute sur une représentation de l'espace qui lui est propre, et fournit ses résultats sous un format pas forcément compatible avec le(s) modèle(s) suivant(s). La composition de modèles ne pourra donc être réalisée qu'avec des passerelles d'échanges entre les entrées/sorties de ces modèles.
Par exemple, si on prend le cas d'un modèle de chute de neige avec vent sur un massif, la représentation du site doit mettre en valeur les arêtes responsables de la formation des plaques dites « à vent ». Les modèles numériques d'écoulement nécessitent, quant à eux, un maillage relativement régulier à base de quadrilatères.

Pour ces raisons, il est proposé d'utiliser l'outil de représentation générique ARSEN [Buisson& 1994], qui permet à la fois de gérer les multiples représentations de l'espace nécessaires et les liens entre les différents modèles à exécuter. Cet outil propose une organisation de l'information spatiale appelée couverture, divisée en trois couches. Chaque couverture est en réalité une représentation de l'espace et peut être associée à d'autres couvertures via l'application d'un fonction d'inférence liée à un modèle. Par exemple, à partir d'une couverture « terrain nu », on peut construire la couverture « hauteurs de neige » par application d'un modèle de précipitation avec vent. Le schéma conceptuel de l'application proposée est détaillée sur la figure 1.

Les travaux développés s'inspireront du projet ELSA [Buisson 1990], qui propose une intégration au sein d'un système à base de connaissances de modèles simplifiés sur les avalanches : création du manteau neigeux, rupture et propagation de la rupture, écoulement selon un profil défini par l'utilisateur.

1.3 Problèmes posés

Les problèmes pris en comptes dans le présent projet sont donc :

- Utiliser les techniques des bases de connaissances spatiales, et en particulier le maintien du raisonnement [Euzenat 1990], afin de combiner différents modèles de simulation sur les avalanches : formation du manteau neigeux, rupture, écoulement. Ces modèles

s'exécutent selon des échelles spatiales et temporelles variées, et impliquent de nombreuses contraintes.

- Développer une application à partir du noyau ARSEN (Aide à la Représentation Spatiale pour l'Environnement) [Buisson& 1994] afin de tester cet outil, l'améliorer et donner suite au projet ELSA (Étude des Limites de Sites Avalancheux) [Buisson 1990].
- Utiliser cette application à un couloir précis. Dans un premier le couloir des Almes dans la station de ski de Tignes (Savoie) avait été envisagé, mais pour des raisons d'attente pour l'achat de données IGN les simulations ont été réalisées sur le site de Valmorel (Savoie).

La simulation des avalanches reste un problème d'actualité, qui touche de nombreuses personnes et infrastructures [Naaim& 1998] tous les ans. Les différentes étapes de simulation d'une avalanche sont développées au sein de plusieurs applications informatiques, mais aucune intégration n'a été pour l'instant réalisée. C'est dans ce sens que le projet proposé ici répond à une demande de la communauté scientifique.

Les problèmes à résoudre pour implémenter cette intégration se situeront au niveau :

- **Spatial**, pour que chaque modèle puisse s'appliquer à une représentation de l'espace qui lui soit adaptée. Par exemple, les deux modèles d'écoulement que l'on veut intégrer ne peuvent s'exécuter sur la même représentation, aussi il faudra inférer ces représentations. Cela revient à dire que chaque flèche de la figure 2 correspond à une transformation de l'information spatiale afin de réaliser la combinaison en entrée/sortie des modèles à lier.
- **Temporel**, car la formation du manteau neigeux et les écoulements se situent à des échelles de temps différentes. Ainsi, la boucle temporelle formée par l'application des modèles de transformation du manteau et de détermination d'une rupture éventuelle se devra d'être résolue par l'application de scénarios. En effet, il ne s'agit pas ici de créer une application qui traite le problème des avalanches en temps réel. Il s'agit d'étudier, pour un site donné, les avalanches possibles en fonction de conditions d'enneigement réalistes.

1.4 Plan du rapport

On présentera tout d'abord les principes d'ARSEN utilisés dans l'étude (§2). On envisagera ensuite les techniques développées pour gérer les dépendances entre représentations et leur application au contexte des données spatiales et plus précisément au logiciel ARSEN (§3). Enfin, l'expérimentation d'intégration de logiciels de simulation au sein d'ARSEN sera présenté (avec son application au site de Valmorel, §4). Le rapport se termine par un bilan de l'étude (§5).

2. ARSEN

ARSEN (Aide à la Représentation Spatiale pour l'Environnement) est un système de représentation générique de l'espace dont les deux caractéristiques principales sont les suivantes :

- organisation générale centrée sur les **systèmes à base de connaissances**, pour une parfaite intégration des modèles et des représentations spatiales associées au sein d'un environnement déclaratif.
- **représentation par objet**, afin d'assurer la possibilité de spécialisation en utilisant le mécanisme d'héritage et ainsi répondre aux exigences de généricité du système.

2.1 L'intégration des modèles et des données spatiales

Il est nécessaire de définir ici la notion de **couverture**, qui décrit, de manière générique, une représentation de l'espace sur un site d'étude. Le mot couverture est issu du vocabulaire propre à l'information géographique, où il représente un ensemble d'objets situés dans un même plan cartographique (par exemple, les courbes de niveau, le réseau hydrographique, le réseau routier sont des couvertures). Il est ici employé avec un sens plus vaste qu'habituellement : il est en effet fréquent d'utiliser le terme couverture pour un ensemble d'objets aux caractéristiques identiques (exemples : couverture des polygones de végétation, couverture du réseau linéaire routier). Cette entité couverture autorise l'utilisation au sein d'un même système dédié à un risque naturel plusieurs modèles de simulation.
L'ensemble des descriptions spatiales et des modèles de simulation est baptisé **site**, entité qui est composée d'une ou plusieurs couvertures et modèles. La figure 2 suivante montre un exemple de site réalisant la combinaison de modèles appliqués en parallèle.

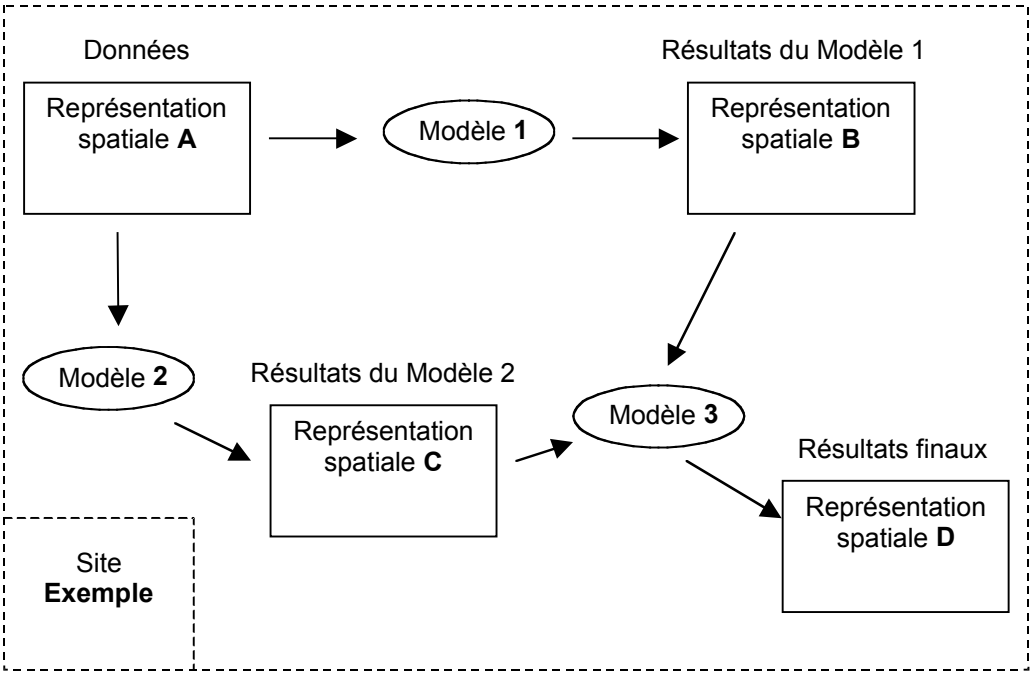


Figure 2 *:Un exemple d'utilisation multi-couvertures. Le résultat dépend de l'application en parallèle de deux modèles qui se basent sur la même représentation de l'espace. Le site, appelé ici « Exemple », est composé de 4 couvertures et possède 3 modèles.*

L'adaptation de toute cette structure générique se fait par mécanisme classique d'**héritage** du formalisme objet. Ainsi, on peut déclarer une couverture « spécialisée » dont les objets spatiaux seront dépendants d'une autre couverture. Le raisonnement spatial ayant conduit à la représentation de l'espace sera ainsi maintenu, comme au sein d'une seule couverture. Dans l'exemple de la figure 2, un changement dans la couverture « Données » entraînera l'invalidation des résultats des trois autres couvertures, et l'exécution des deux modèles si une interrogation sur les objets de la couverture « Résultats » est réalisée. Le site forme ainsi un ensemble cohérent.

2.2 Une structure basée sur trois couches

Toute couverture peut être fondée sur trois couches reliées entre elles par de nombreuses relations. Chaque couche possède des objets à 0,1 et 2 dimensions. La troisième dimension est mise de côté dans le cadre de ce travail, car rares sont les modèles qui aujourd'hui nécessitent de manipuler des objets réellement 3D (objets volumes). Examinons tout ceci plus en détail.

La couche utilisateur

Elle est composée de 3 types d'objets, suivant leur dimension :

- *les objets ponctuels*, de dimension 0, qui représentent toutes les caractéristiques dont on a besoin avec comme seule indication spatiale un point. Ce sont des objets comme les sondages, les points avec altitude, les sources (sans indication de leur trajet), les départs de feu, les postes d'observation...
- *les objets linéaires*, de dimension 1, qui représentent toutes les caractéristiques nécessaires avec une extension spatiale monodimensionnelle. Ce sont des objets comme les courbes de niveau, les arêtes, les lignes de contraintes, les biefs d'écoulement, les routes...
- *les objets surfaciques*, de dimension 2, qui représentent toutes les caractéristiques nécessaires avec une extension spatiale bidimensionnelle. Ce sont des objets comme les zones de végétation, les bassins versants... Ces objets possèdent une limite, qui est considérée comme un objet linéaire, et des attributs qui caractérisent leur surface (coefficient de rugosité, d'élasticité...).

Ces objets ne possèdent évidemment pas que des caractéristiques spatiales. Des informations quantitatives (débit d'une rivière) ou qualitatives (type de végétation) leur sont affectées. Il faut pouvoir retrouver ces informations facilement, car ce sont des paramètres importants pour les modèles.

La couche vectorielle topologique

Cette couche est calculée à partir de la précédente à l'aide d'un processus d'extraction de polygones. Toutes les intersections entre les lignes polygonales forment les nœuds. Ces mêmes lignes polygonales sont ensuite découpées en arcs, entre chaque nœud d'intersection. Puis une reconnaissance des polygones minimaux est effectuée, afin d'engendrer les faces. On se retrouve donc avec 3 types d'objets selon 3 dimensions :

- *les nœuds*, de dimension 0. Chaque nœud connaît la liste des arcs qui en sont issus et celle de ceux qui y arrivent.
- *les arcs*, de dimension 1. Chaque arc connaît son nœud de départ, son nœud d'arrivée, sa face à gauche et sa face à droite. Les arcs sont donc orientés.
- *les faces*, de dimension 2. Chaque face connaît la liste des arcs qui l'ont comme face à droite (ceux qui sont dans le sens des aiguilles d'une montre) et la liste des arcs qui l'ont comme face à gauche (ceux qui vont dans le sens trigonométrique).

La couche géométrique
Après une triangulation dans chaque face, on obtient une couverture complète du site étudié en triangles, ce qui répond aux besoins de nombreux modèles.
De nouveau, trois types d'objets apparaissent à l'issue de cette construction :

- *les points*, de dimension 0. Chaque point possède des coordonnées (x,y,z), et connaît la liste des segments qui en sont issus et qui y arrivent.
- *les segments*, de dimension 1. Chaque segment a un point de départ et un point d'arrivée, et possède un triangle à droite et un triangle à gauche. Ces segments, comme les arcs, sont donc orientés.
- *les triangles*, de dimension 2. Chaque triangle connaît la liste des segments qui le connaissent comme triangle à droite, et la liste des segments qui le connaissent comme triangle à gauche.

On peut résumer cette organisation en 3 couches avec le tableau présenté sur la figure 3. On se retrouve avec 9 classes d'objets de base (plus les objets complexes).

Relations entre les différentes couches
Afin d'assurer la cohérence de la structure de données, des relations existent entre les différentes couches, en plus des relations que l'on vient de voir au sein d'une même couche. Ainsi, un objet surfacique doit connaître les faces qu'il contient (et réciproquement, afin de pouvoir récupérer un attribut surfacique pour une face). Une face connaît également les triangles qui la composent. La figure 3 récapitule toutes les relations entre objets de la structure totale en trois couches.

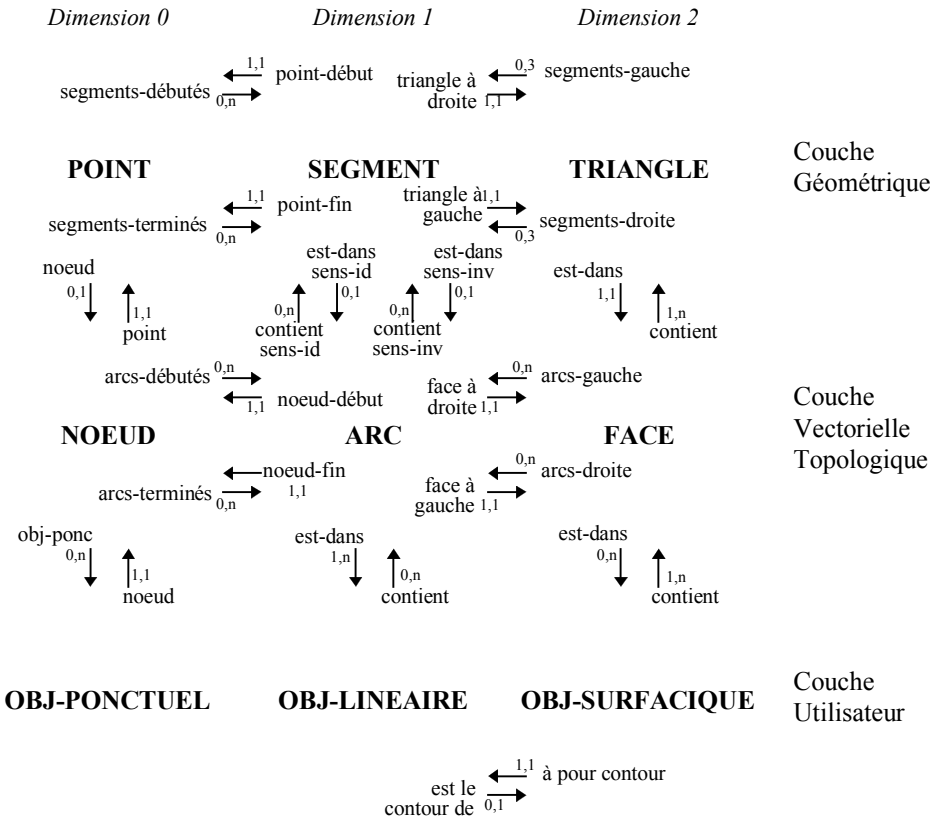


Figure 3 *: Les relations entre objets. Toutes les relations entre les objets des différentes couches sont représentées par des flèches pondérées selon la cardinalité minimum et maximum de la relation. Ainsi, un objet linéaire contient 1 à n arcs, un objet surfacique a un*

et un seul contour, une face contient 1 à n triangles...

2.3 L'inférence des couches

ARSEN dispose de mécanismes d'inférence des connaissances spatiales, partant des données fournies ou entrées par l'utilisateur et allant aux triangles de la couche géométrique. Cette construction se réalise en deux étapes principales, par extraction de polygones pour obtenir la couche vectorielle topologique et par triangulation pour la couche géométrique (figure 4).

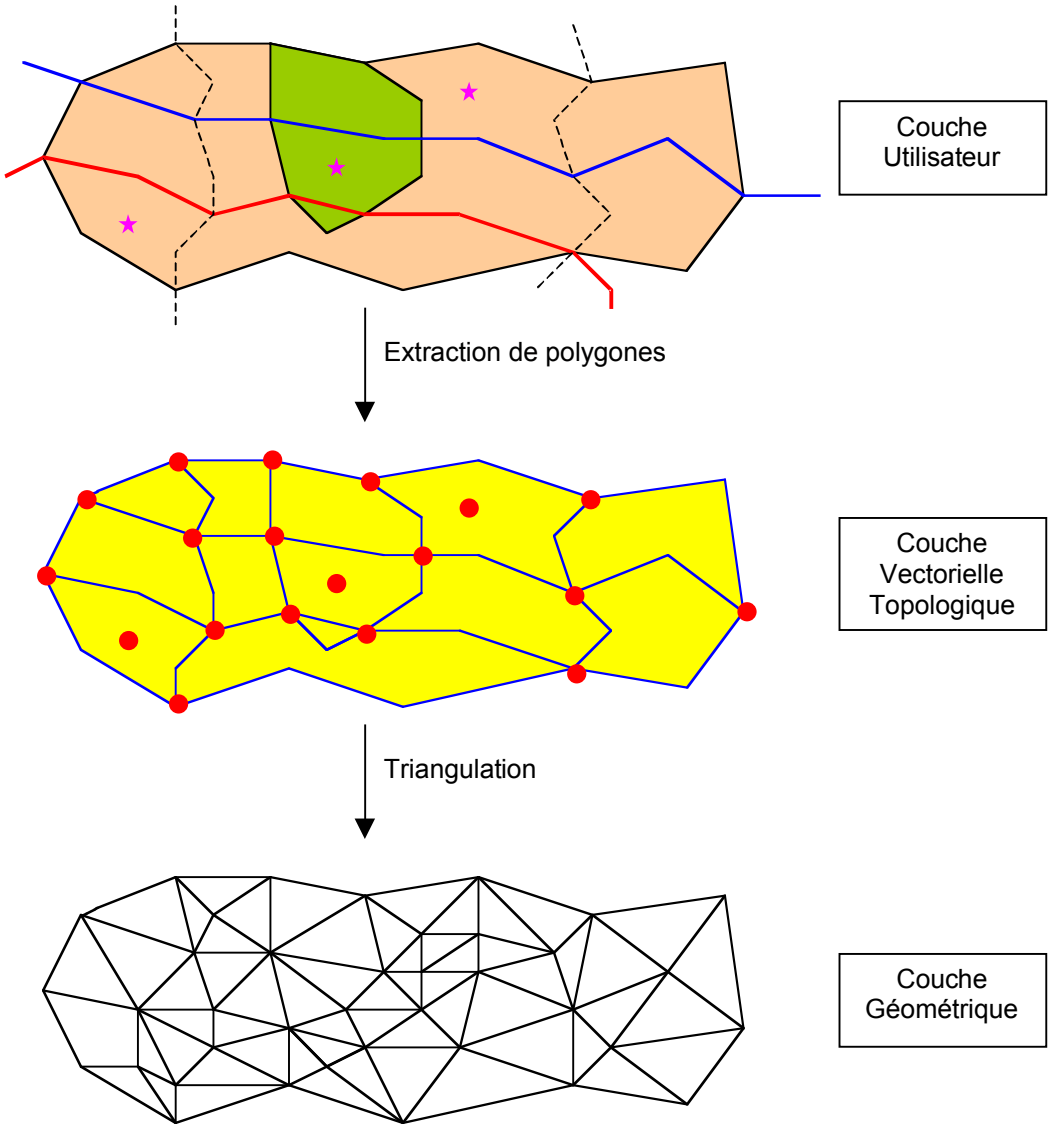


***Figure** 4 :Le remplissage des couches. Il est réalisé par application des deux fonctions d'extraction de polygones et de triangulation.*

Ces deux méthodes de remplissage sont, comme les couches et les objets spatiaux qu'elles utilisent et créent, spécialisables si un besoin particulier est imposé par un modèle. Plus d'information sur les différents algorithmes peut être trouvée dans [Cligniez 1998].

2.4 Conclusion

ARSEN est donc un noyau d'objets et de méthodes organisés en trois couches; il peut être spécialisé facilement pour s'adapter aux besoins précis d'un développeur s'intéressant à un

risque naturel particulier. Ce noyau est destiné à intégrer des modèles de simulation, et à organiser les calculs nécessaires autour d'un système de gestion de dépendances.

La figure 5 résume l'organisation de ce noyau d'objets et de méthodes, en prenant un exemple de trois couvertures, afin de montrer les différents emboîtements proposés. L'intégration de modèles de simulation y est rendue possible grâce aux mécanismes d'héritages que le formalisme orienté objet possède.

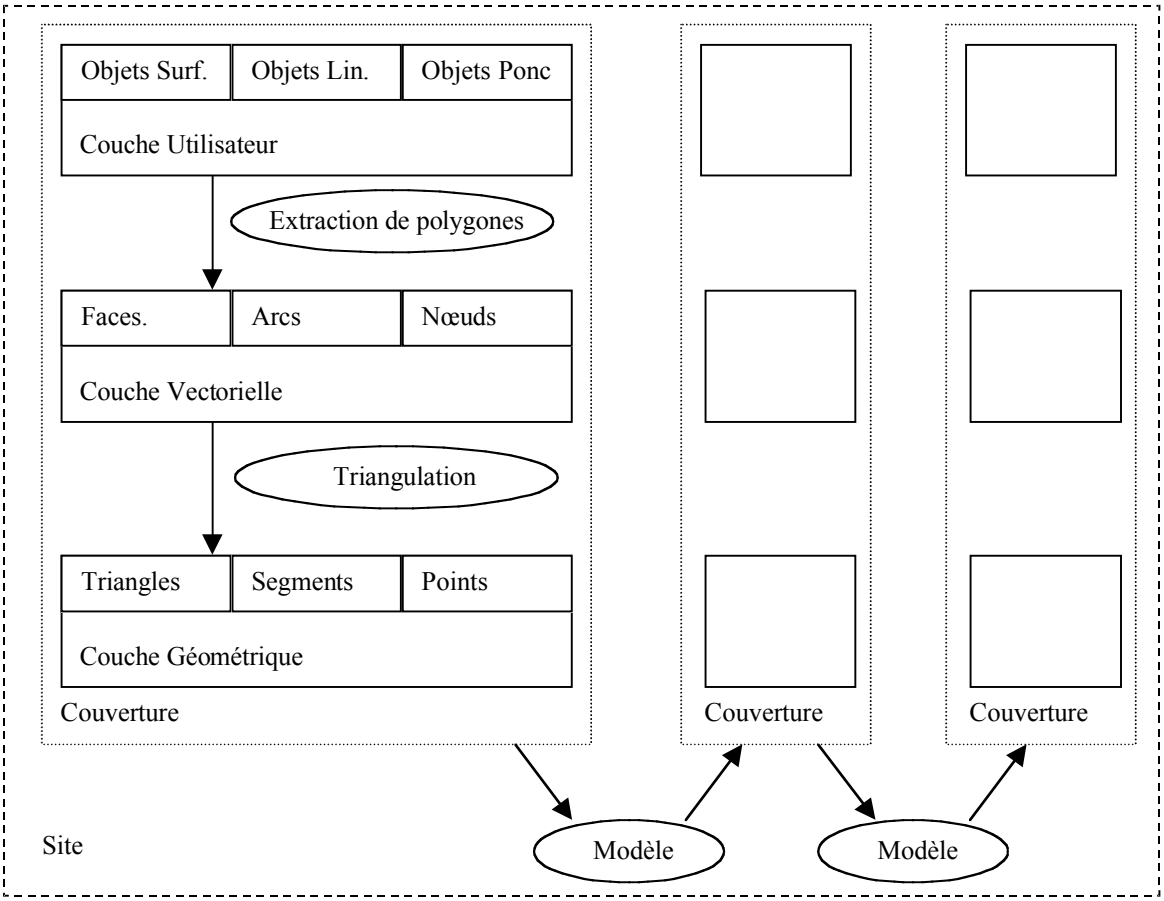


Figure 5 *: Les emboîtements de la structure générique de représentation de l'espace. On retrouve dans ce schéma tous les objets (dans des rectangles) et méthodes (dans les ellipses) spécialisables du système d'intégration des représentations spatiales et des modèles de simulation.*

Deux types d'inférences sont mises en évidence par la structure d'ARSEN :

- les inférences internes à chaque couverture : ce sont celles qui assurent la cohérence de l'information contenue dans l'ensemble des trois couches utilisateur, vectorielle-topologique et géométrique. Elles permettent d'utiliser avec efficacité la représentation spatiale ARSEN, notamment les découpages proposés (faces, triangles).
- les inférences entre les différentes couvertures d'une application : ce sont celles qui assurent la coordination entre les modèles appliqués entre les différentes représentations spatiales ARSEN (figure 2). Elles permettent notamment la mise à jour, transparente à l'utilisateur, des résultats d'application des modèles en fonction des hypothèses de départ.

Les opérations d'inférence sont transparentes pour l'utilisateur et, pour assurer une performance optimale des calculs effectués, un enregistrement (ou cache) des inférences est

réalisé. Mais afin d'assurer sa cohérence, il est nécessaire de noter les dépendances et de maintenir les inférences effectuées. C'est l'objet de la section suivante.

3 Maintien du raisonnement au sein d'ARSEN

3.1 Maintien du raisonnement et révision

La problématique de la révision est destinée à prendre en compte les changements dans une représentation lorsqu'un événement (arrivée d'une nouvelle connaissance) se produit. En révision on distingue traditionnellement entre révision (lorsque les connaissances du système sur la situation représentée changent) et mise à jour (lorsque c'est la situation représentée qui change). Le problème posé ici n'entre dans aucun de ces cadres, il s'agit d'un problème de simulation, c'est-à-dire de maintien d'états hypothétique. Ce sont donc les états qui changent, mais il n'est pas possible d'appliquer directement les techniques de mises à jour car l'état ne change pas dans le temps (ou selon une causalité bien définie) mais selon le bon vouloir de la personne réalisant la simulation.

Ce type de problème est traditionnellement pris en compte par les systèmes de maintien du raisonnement (TMS pour "truth maintenance systems" et ATMS pour "assumption-based TMS"). Les deux systèmes entretiennent un graphe de dépendances entre les faits (ou les valeurs) manipulés par l'application.

Les premiers utilisent des inférences non monotones pour poser automatiquement des hypothèses (par exemple: en l'absence de l'information « la plaque est stable » poser que « la plaque est instable ») et se chargent d'établir la validité absolue des items (« sa charge de neige part donc lors qu'une plaque versant déclenche »). Ainsi, ce système propage dans le graphe de dépendances les valeurs de vérité des assertions. Si cela même à une contradiction (déclarée comme telle par l'application), le TMS fera alors en sorte que les hypothèses posées ne soient plus considérées (ainsi, il va poser que «la plaque est stable» et supprimer de la base que «sa charge de neige part donc lors qu'une plaque versant déclenche»).

Les ATMS ont connaissance des hypothèses posées par l'utilisateur (et identifiées comme telles) et établissent, pour chaque item inféré, sous quelles hypothèses il doit être considéré comme présent dans la base (par exemple: sous l'hypothèse que « la plaque est instable », « sa charge de neige part donc lors qu'une plaque versant déclenche »). Ceci permet de passer facilement d'un ensemble d'hypothèses à un autre: c'est le raisonnement multi-contextes. Si une combinaison d'hypothèses mène à une contradiction (par exemple: «la plaque est instable» et «sa charge de neige est nulle»). L'ATMS ne considérera plus les hypothèses incriminées («la plaque est stable», par conséquent, « sa charge de neige part donc lors qu'une plaque versant déclenche » ne doit plus être présent sous aucune hypothèse).

3.2 Application aux systèmes de gestion de l'espace

Puisque la simulation réalise un raisonnement hypothétique, on pourrait penser que l'ATMS est le système à utiliser. Mais il y a deux obstacles à son utilisation dans le cas précis :

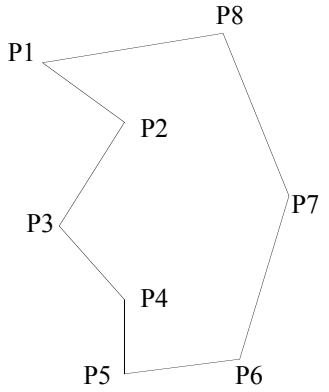
- l'ATMS explore toute la combinatoire des cas en fonction des hypothèses ce qui n'est pas souhaité dans notre cas (toutes les hypothèses de stabilité des panneaux) ;
- l'ATMS utilise des hypothèses propositionnelles, discrètes, qui sont peu adaptées à une représentation des variables numériques trouvées dans un GIS et que l'on fait varier. Car, ce n'est pas le fait qu'il y ait de la neige qui est important (comme nous l'avons pris comme illustration) mais que sa hauteur atteigne un certain niveau.

C'est pourquoi il est préférable de mettre en œuvre un système de gestion des dépendances entre faits de manière à pouvoir propager une modification là où elle a une influence. Par ailleurs, les aspects non monotones du TMS ne sont pas utiles dans notre cadre (en effet, en modifiant une hypothèse par une autre, c'est jamais un ajout de connaissance qui est réalisé mais une modification).

Nous avions déjà implémenté un TMS sur une représentation par objets [Buisson& 1992] permettant de maintenir les représentations d'un site en fonction des hypothèses utilisées. Ce système prenait en compte une des spécificité des objets que l'on retrouve dans les GIS : ce ne sont pas des propositions isolées qu'il faut maintenir mais les valeurs de variables.
Les techniques sont assez proches des techniques de maintenance de solutions utilisées dans les systèmes de satisfaction de contrainte [Verfaillie& 1995]. On retiendra de ces techniques la facilité à programmer de nouvelles contraintes. Mais on éliminera le caractère générique de la propagation tout en introduisant un ordre sur celle-ci (à l'instar des contraintes à sens unique [Sannela& 1993]).

Une analogie peut être faite avec le mode de fonctionnement des tableurs, qui maintiennent les liens entre les cellules dont la valeur dépend de celle d'autres cellules. Le maintien du raisonnement permet donc de réaliser des gains importants pour les calculs, en conservant les résultats justifiés de toutes les méthodes employées. Cela nécessite un **enregistrement** des inférences réalisées.

Par exemple, si un objet *Polygone* possède un attribut *Surface* dépendant des coordonnées des points du polygone, cet attribut est calculé une fois et est enregistré. Cet enregistrement reste justifié tant qu'il n'y a pas de changements dans les points en question. Alors qu'avec un formalisme orienté-objet classique, chaque appel à l'attribut *Surface* lance le calcul, ce qui ne sert à rien à partir du deuxième appel si le polygone reste inchangé (figure 6).



Objet Polygone
Nombre de Points = NB
Points = Pi
Méthode Surface(S) = fonction(Pi, i=1 à NB)

Un premier appel à la méthode Surface lance le calcul et justifie le résultat.
Tant que les points ne sont pas modifiés, les appels à la méthode Surface se contentent de renvoyer le résultat précédemment trouvé.
Une modification sur un des points entraîne l'annulation du résultat, et le prochain appel à la méthode Surface relancera le calcul.

Figure 6 *: Les gains en calcul apportés par le maintien du raisonnement.*

Les aspects déclaratifs et le maintien du raisonnement sont les côtés très attractifs pour réaliser des applications de simulation de phénomènes naturels. L'intégration des modèles y est aisée et ce genre de système est le seul qui réponde effectivement à ce besoin. La gestion des inférences, tant spatiales que propres au phénomène à simuler, est réalisée de manière transparente à l'utilisateur, ce qui permet à l'utilisateur de n'avoir à définir que les différents processus et leurs interactions.

Du côté saisie et affichage des données spatiales, tout reste à programmer, ce qui rend les développements de systèmes de simulations de risques naturels peu attractifs. De plus, l'expérience a montrée en partie [Hottegindre 1992] que l'utilisation d'un système général de maintenance pour les applications spatiales très structurées ne permettait pas d'obtenir des gains de temps vraiment appréciable. La conclusion, implémentée dans ARSEN, est qu'il faut utiliser des propagations du type de celles produites par les TMS mais sans le faire systématiquement. Au contraire, les dépendances, et donc les propagations à réaliser en cas de modification d'une hypothèse seront posées à l'aide de dispositifs fournis par ARSEN,

application par application.

3.3 Instanciation dans ARSEN

S'opposant à la notion de procédural, un système déclaratif réalise de manière transparente à l'utilisateur toutes les opérations d'inférence (par exemple lors de demandes d'informations par l'utilisateur dans le cas du chaînage arrière). Ainsi, pour la structure de données spatiales ARSEN, la couche vectorielle topologique est déduite de la couche utilisateur par extraction de polygones. Il est intéressant de réaliser cette opération de manière déclarative, afin que l'utilisateur ne soit pas obligé de lancer le calcul explicitement. Il suffit d'une requête sur les faces de la couche vectorielle topologique pour que le système soit capable de déterminer quelles opérations effectuer pour obtenir ces objets.
Le même principe s'applique à la couche géométrique, dont les objets dépendent de ceux de la couche vectorielle topologique. Si l'utilisateur a besoin des triangles de la structure spatiale, le système appliquera la fonction de triangulation si nécessaire pour obtenir ces objets.
Les deux principales fonctions de construction que sont l'extraction de polygones et la triangulation s'enchaînent comme le montre la figure 7 et le petit système ainsi formé fonctionne sur le principe du chaînage arrière : quand l'utilisateur demande une information au système, celui-ci essaye d'inférer cette information grâce aux méthodes d'inférence qu'il possède.

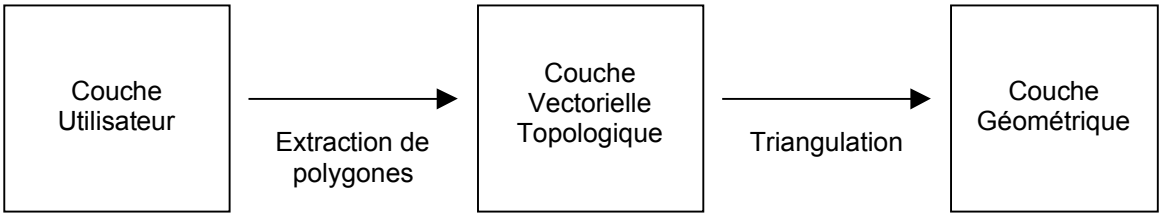


***Figure** 7 :Les inférences entre les 3 couches de la structure spatiale.*

Ce mode de fonctionnement déclaratif s'applique à d'autres fonctions des données spatiales manipulées. Par exemple, il peut être intéressant de connaître la surface d'un triangle, fonction déclarée au système et dépendant des trois sommets du triangle. Un modèle de simulation demandant au système la valeur de ce paramètre entraînera si nécessaire le calcul de cette surface.

Pour assurer une performance optimale des calculs effectués, un enregistrement (ou cache) des inférences doit être réalisé qui évite l'exécution de fonctions dont le résultat est toujours valable. De plus, la structure de données doit être cohérente à tout instant. Ainsi, une modification, même minime, dans la couche utilisateur (rajout d'un objet ponctuel, déplacement d'une ligne...) peut entraîner des modifications importantes dans les couches vectorielles topologiques et géométriques.

Certains se sont déjà penchées sur les problèmes de localité dans le maintien du raisonnement, comme Olivier Hottegindre [Hottegindre 1992]. Ses conclusions tendent toujours vers le même propos : il est très difficile de prévoir si une modification locale ne se propagera pas sur tout l'espace considéré. Ainsi, pour le raisonnement spatial dans notre structure de données, nous avons choisi de tout recalculer dès que la couche utilisateur subit la moindre modification.

Cependant, pour maintenir la déclarativité de notre système, il faut « maintenir » le raisonnement spatial. Il suffit de créer un lien de dépendance entre la couche vectorielle topologique et la couche utilisateur, car les faces, arcs, nœuds dépendent des objets utilisateurs. Un deuxième lien de dépendance est également nécessaire entre la couche vectorielle topologique et la couche géométrique car les triangles, segments, points dépendent des objets vectoriels topologiques (figure 8).

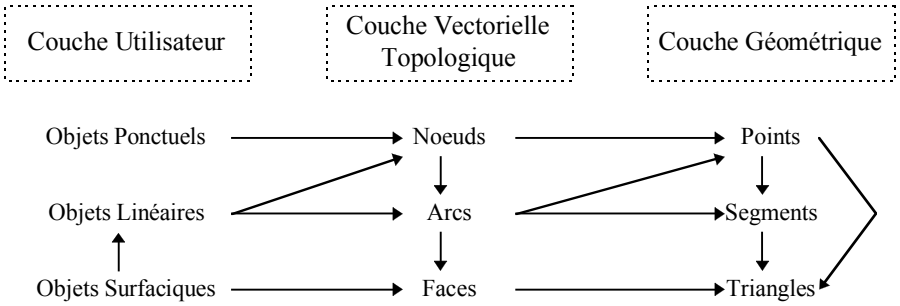


Figure 8 *:Les liens de dépendance entre les couches. Ils permettent d'enregistrer et de maintenir le raisonnement spatial effectué par l'extraction de polygones et la triangulation. Le lien entre objets surfaciques et objets linéaires est dû aux contours des objets surfaciques qui imposent un objet linéaire supplémentaire.*

Voici un exemple d'utilisation de cette structure spatiale déclarative (les étapes en *italiques* sont réalisées de manière transparente à l'utilisateur) :

⇒ Entrée de données dans la couche utilisateur.

⇒ Demande de visualisation de la couche géométrique : *le système sait qu'il faut appliquer une triangulation sur les objets de la couche vectorielle topologique. Mais pour obtenir la couche vectorielle topologique, il faut exécuter une extraction de polygones sur les objets utilisateurs. Les deux fonctions seront donc exécutées successivement pour arriver au résultat. Les liens de maintenance du raisonnement sont créés (les inférences sont enregistrées).*

⇒ Application d'un modèle ayant besoin des objets de la couche vectorielle topologique. *Cette couche étant toujours justifiée (lien existant), pas de calcul.*

⇒ Rajout d'un objet linéaire dans la couche utilisateur. *Le lien de justification avec la couche vectorielle topologique disparaît, puis celui entre cette dernière et la couche géométrique.*

⇒ Réapplication du modèle précédent. *La couche vectorielle topologique est recalculée via l'extraction de polygones.*

⇒ Demande de carte des pentes construite avec les triangles. *La couche géométrique est recalculée avec la triangulation. Les liens correspondants sont enregistrés.*

3.4 Conclusion

La gestion des dépendances dans ARSEN suit donc un algorithme très simple mais très adapté à l'intégration de modèles de simulation à forte composante spatiale. Il est, de plus, structuré

sur le modèle d'ARSEN puisque l'unité, tant pour l'objet calculé que pour celui à calculer est la couche.

La partie suivante du rapport va maintenant montrer le développement réalisé avec ARSEN pour intégrer au sein d'une même application plusieurs modèles réalisant la simulation d'une avalanche.

4. Expérimentation

Le phénomène avalanche se décompose en nombreux sous-phénomènes qui, dans un souci de simulation complète, doivent être pris en considération. De la chute de neige à l'arrêt de l'écoulement, de nombreux modèles existent, mais chacun est utilisé séparément au sein de systèmes qui ne communiquent entre eux que par fichiers d'entrée/sortie. Un essai avec ARSEN a été réalisé dans ce sens, dans le but de coupler au sein d'un même système deux modèle complémentaires. Il s'agit d'un modèle de création du manteau neigeux et d'un modèle de trajectoire d'avalanche. De la même manière qu'avec l'application de chute de bloc présentée précédemment, ces modèles ont été simplifiés car ils servent uniquement à l'illustration des mécanismes d'utilisation de l'outil ARSEN.

4.1 Instanciation d'ARSEN

Pour réaliser le couplage en série des deux modèles proposés (formation du manteau et trajectoire de l'avalanche), une organisation en trois couvertures ARSEN est envisageable, comme le montre la figure 9 :

- Une couverture ***représentation du terrain*** qui est la couverture des données entrées par l'utilisateur. Il faut y inclure toutes les données spatiales sur le terrain, pour construire la représentation topographique du site à étudier, ainsi que les données qualitatives (rugosité des sols en surface, forme des arêtes) nécessaires pour appliquer les modèles.
- Une couverture ***manteau neigeux***, pour représenter les résultats de l'application du modèle de formation du manteau neigeux. Il s'agit en fait d'afficher une carte des stabilités et de déterminer l'endroit le plus instable à partir duquel la trajectoire de l'avalanche va être simulée par le deuxième modèle.
- Une couverture ***trajectoire***, qui présente la trajectoire de l'avalanche par application d'un modèle simple qui utilise à la fois les données topographiques de la première couverture et les données sur le manteau neigeux simulées dans la deuxième couverture.

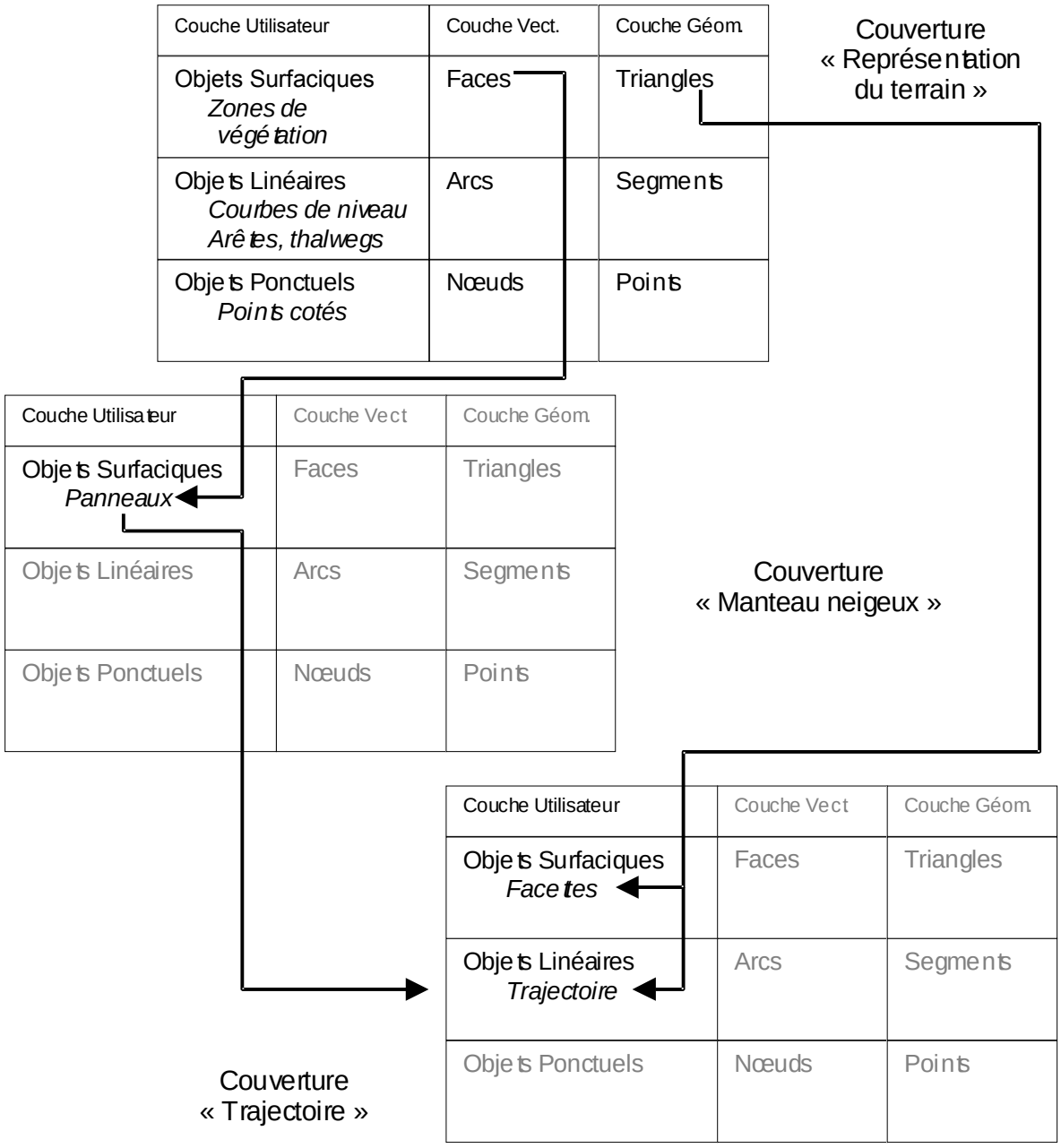


Figure 9 *: L'organisation en couvertures de l'application aux avalanches.*

Cette organisation avec liens de dépendance assure le bon fonctionnement du système. Par exemple, la trajectoire dépend non seulement du modèle de terrain, mais aussi des panneaux formant le manteau neigeux. Ainsi les modèles sont appliqués dans le bon ordre, l'obtention d'une trajectoire d'avalanche passe toujours par le calcul d'un manteau neigeux nécessaire à son initiation.

Les objets et paramètres mis en œuvre pour la première couverture de cette application sont les suivants :

Zones de végétation

- *Rugosité* (m/s^2) : ce paramètre indique le frottement subi par l'écoulement de neige lors de son passage sur la zone de végétation. On peut ainsi simuler, par des coefficients élevés, des zones de végétation haute (arbustes, arbres…). Ce paramètre est également utilisé par le modèle de stabilité pour déterminer la susceptibilité d'un panneau à décrocher.

Courbes de niveau

- *Altitude* (m) : altitude de la courbe par rapport au niveau de la mer.
- *Importance* (1-2) : comme pour l'application aux chutes de blocs, ce paramètre permet de visualiser les courbes maîtresses (tous les 50 m) en les rendant plus épaisses.

Lignes d'arête

- *Forme* (1-5) : ce paramètre caractérise l'arête suivant ses effets lors du transport de neige par le vent. Ce transport n'est effectif que lorsque la direction du vent est globalement perpendiculaire à la direction de l'arête.

Lignes de thalweg

Sans paramètres, cet objet est nécessaire pour la construction de la représentation du terrain afin d'éliminer les triangles horizontaux que l'on peut rencontrer lors de la triangulation entre courbes de niveau.

Points cotés

- *Altitude* (m) : altitude du point saisi.

Ces objets permettent la construction de la représentation du terrain qui va être utilisée par les deux modèles des deux autres couvertures. Voici le détail des objets de ces deux couvertures « induites » :

Panneaux

- *Stabilité* (%) : ce paramètre indique la stabilité du panneau de neige en tenant simplement compte de sa pente moyenne et de sa végétation au sol. Le panneau de stabilité minimum est celui qui sera l'initiateur de l'avalanche.

Facettes

Ces objets sont recopiés, pour la troisième couverture, afin de proposer à l'utilisateur une visualisation améliorée du terrain, ceci en affichant une carte des orientations par rapport à une direction d'éclairage donnée.

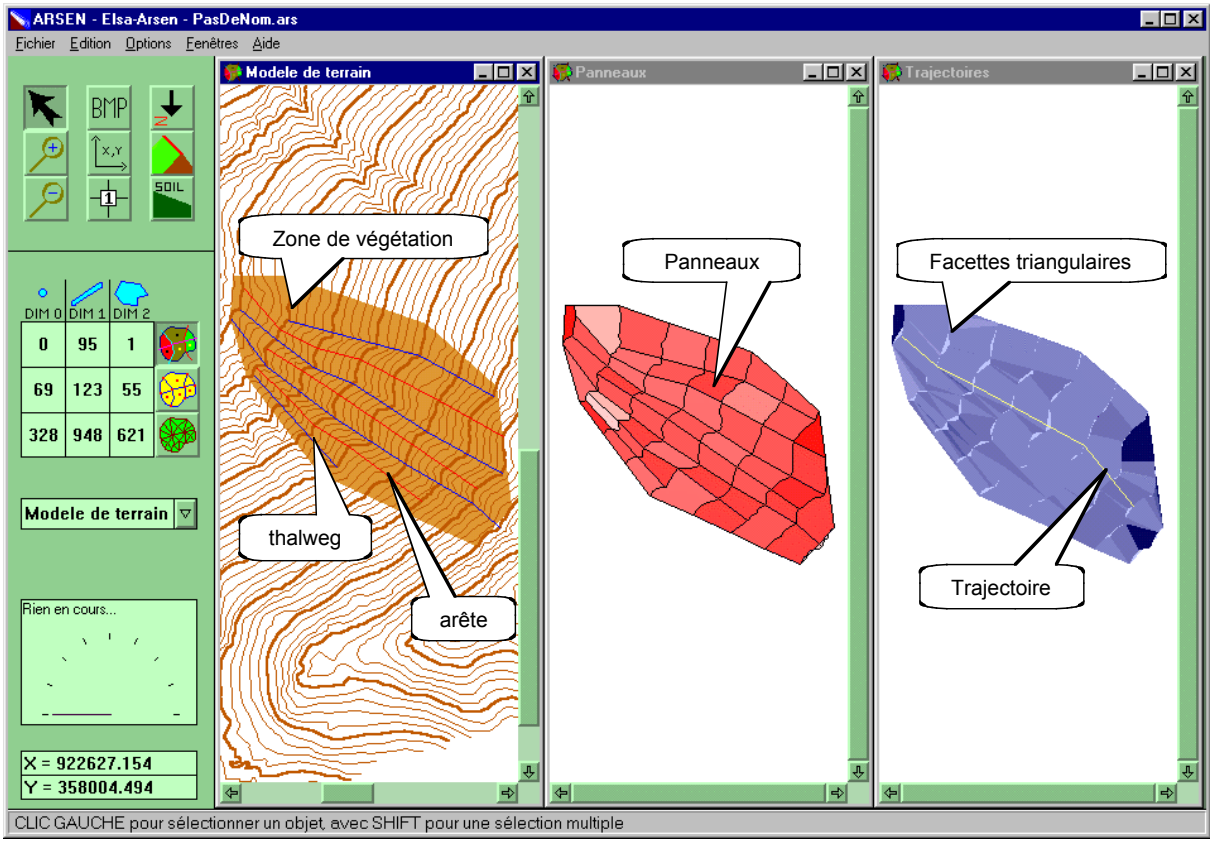
- *Pente* (%) : paramètre utile pour le calcul des trajectoires.
- *Orientation* (-1 ; 1) : paramètre utilisé pour l'affichage de la carte des orientations.

Trajectoire

Sans paramètres, cet objet représente sur la troisième couverture, sur fond de facettes triangulaires, la trajectoire de l'avalanche calculée avec un modèle simple de trajectographie.

4.2 Fonctionnement de l'application

On y retrouve les trois couvertures proposées : les données entrées par l'utilisateur, une description du manteau neigeux par panneaux et une simulation de trajectoire.



Copie d'écran 1 *: Les trois couvertures de l'application (site de Valmorel).*

L'utilisateur de cette application charge un fichier de courbes de niveau et entre à la souris les zones de végétation, les arêtes et les thalwegs. Il obtient dans la couverture du milieu une carte des stabilités basée sur les panneaux et sur la couverture de droite la trajectoire simulée de l'avalanche sur un fond composé de triangles (carte des pentes).

L'intégration des modèles est réalisée de manière transparente à l'utilisateur. Par simple interrogation sur les couvertures inférées (panneaux et trajectoire), les fonctions appliquant les modèles sont exécutées et les résultats obtenus sont maintenus tant qu'il n'y a pas de changement dans la couverture qui possède les données de départ (modèle de terrain).

4.3 Manifestation du maintien du raisonnement

L'obtention des résultats des simulations se réalise de manière transparente à l'utilisateur : il suffit de renseigner les conditions initiales et d'interroger la couverture « résultats » pour lancer les calculs à la fois :

- à l'intérieur de chaque couverture afin d'assurer la cohérence entre les différentes couches, et notamment engendrer la représentation spatiale triangulée nécessaire à l'application du modèle d'écoulement.
- entre chaque couverture par l'application des modèles eux-mêmes.

Le système enregistre, pour chaque couche, celles dont elle dépend.

Un changement dans les hypothèses de départ remettra en question les résultats qui en découlent :

- une modification du terrain entraînera un recalcul des couches de la couverture « modèle de terrain », et donc aussi une nouvelle application des modèles.

- une modification d'un paramètre propre à la qualité de la neige ne changera pas la représentation géométrique du terrain et seuls les modèles dépendants de ce paramètre seront alors exécutés.

L'efficacité de cette application est donc sans commune mesure avec les méthodes habituelles, notamment grâce à une intégration « intelligente » des modules de construction des représentations de terrain et des modules d'application des modèles de simulation.

5 Bilan

Le projet prévoyait d'expérimenter sur le couloir des Almes (Tignes, Savoie) mais devant l'absence de notification et de fourniture des données terrains, nous avons préféré avancer et utiliser les données terrains dont nous disposions (site de Valmorel).

Plus que les résultats quantitatifs de l'application développée dans le cadre de ce projet (résultats dépendant de la qualité des modèles intégrés, ne faisant pas l'objet de la présente recherche), ce sont les aspects d'intégration qui ont apporté un véritable plus par rapport à une utilisation séquentielle d'applications séparées. La transparence dans la gestion des inférences entre les modèles et les hypothèses favorise une utilisation poussée de nombreux scénarios et par là même un nombre de simulations plus important permettant d'affiner les résultats de manière statistique.

Le gain de temps (hors coût en temps de calcul des modèles) lié au système de gestion de dépendances est également appréciable lorsqu'un changement d'hypothèse n'entraîne pas un recalcul complet des résultats. Par exemple, un changement de type de neige n'implique aucune modification de la structure spatiale, et donc assure un gain en calcul très sensible par rapport à une approche systématique.

Les suites possibles à donner à ce projet sont les suivantes :

- intégrer d'autres modèles de simulation, à la fois pour compléter ceux existants et mettre en place des comparaisons de performances (temps, résultats) entre modèles. Ainsi prendre en compte la modification du terrain naturel après la descente d'une première avalanche permettrait de réaliser une simulation sur « terrains enneigés » non réalisées jusqu'à aujourd'hui.
- à l'inverse, utiliser des représentations spatiales variées (taille des entités, précisions des altitudes...) avec un seul modèle permettrait de qualifier les types de représentations spatiales idéales pour un modèle donné. Cela permettrait de quantifier les mesures de terrain à effectuer pour obtenir une représentation de l'espace pertinente pour l'application du(des) modèle(s). Pour l'instant cette connaissance est relativement floue, on ne sait pas si un couloir d'avalanche peut être correctement représenté avec 10 points de mesures ou s'il en faut 10000.

6 Références

[Buisson 1990] Laurent BUISSON, « Le raisonnement spatial dans les systèmes à base de connaissances. Application à l'analyse de sites d'avalanches », Thèse de l'Université Joseph Fourier, Grenoble, novembre 1990

[Buisson& 1992] Laurent BUISSON, Jérôme EUZENAT, The Elsa avalanche path analysis system: an experiment with reason maintenance and object-based representation, Actes ECAI workshop on « Applications of Reason Maintenance Systems », Wien (AT), 1992

[Buisson& 1994] Laurent BUISSON, Vincent CLIGNIEZ, « Bases de connaissances pour l'environnement : le projet ARSEN », *Revue Internationale de Géomatique*, Volume 4 – n° 3-4/1994

[Cligniez 1998] Vincent CLIGNIEZ, « Un outil de représentation générique de l'espace pour l'étude des risques naturels », Thèse de l'Université Jean Monnet, Saint-Étienne, novembre 1998

[Euzenat 1990] Jérôme EUZENAT, « Un système de maintenance de la vérité à propagation de contextes », Thèse de l'Université Joseph-Fourier, Grenoble, février 1990

[Gensel 1995] Jérôme GENSEL, « Integrating constraints in an object-based knowledge representation system », *Lecture notes in computer science 923*:67-77 (Manfred Meyer (éd.), Constraint processing), 1995

[Hottegindre 1992] Olivier HOTTEGINDRE, « La construction d'une description spatiale de terrain naturelle à l'aide d'un système à base de connaissance », Mémoire CNAM, Grenoble, janvier 1992

[Naaim& 1998] Mohamed NAAIM, Vincent CLIGNIEZ, « Snow avalanches study and modelling, Application to road protection », Proceedings of the International Symposium on Roads, Lulea, Sweeden, (10p), 1998

[Sannella& 1993] Michael SANNELLA, John MALHONEY, Bjorn FREEMAN-BENSON, Alan BORNING, « Multi-way versus one-way constraints in user interfaces : experience with the delta-blue algorithm », *Software — practice and experience* 23(5):529-566, 1993

[Verfaillie& 1995] Gérard VERFAILLIE, Thomas SCHIEX, « Maintien de solution dans les problèmes dynamiques de satisfaction de contraintes : bilan de quelques approches », *Revue d'intelligence artificielle* 9(3):269-309, 1995