

Zeitschrift: Bulletin de la Société Vaudoise des Sciences Naturelles
Herausgeber: Société Vaudoise des Sciences Naturelles
Band: 80 (1990-1991)
Heft: 1

Artikel: Le concept objet et la modélisation géométrique : application à la modélisation d'environnement géologique
Autor: Quafafou, Mohamed / Rolley, Jean-Pierre / Dubant, Olivier
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-279552>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 14.04.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Le concept objet et la modélisation géométrique. Application à la modélisation d'environnement géologique

PAR

MOHAMED QUAFAROU¹, JEAN-PIERRE ROLLEY²,
OLIVIER DUBANT¹ ET PATRICK PRÉVOT³

Résumé.—QUAFAROU M., ROLLEY J.P., DUBANT O. ET PRÉVOT P., 1990. Le concept objet et la modélisation géométrique. Application à la modélisation d'environnement géologique. *Bull. Soc. vaud. Sc. nat.* 80.1: 83-98.

En géologie, et plus particulièrement lorsqu'il s'agit de modéliser le sous-sol, le problème de la modélisation géométrique prend beaucoup d'importance. La connaissance géométrique est généralement complexe et variée, augmentant la lourdeur des systèmes de modélisation. En effet, dans les systèmes de modélisation géométrique, la connaissance provient d'origines différentes: les différents modèles de procédures géométriques, des contraintes sur chacun des éléments du modèle, les divers scénarios pour composer des objets complexes, règles expertes pour capter le savoir faire dans un domaine précis et expliquer les choix et les interventions du système, etc.

La diversité du domaine géologique est liée à son caractère naturel. Cette diversité et l'imprécision attachée à la géologie augmentent la complexité des systèmes de modélisation utilisés pour représenter un site géologique. Ainsi, l'efficacité des systèmes de modélisation géométrique est alors conditionnée par la structuration fonctionnelle du modèle et par ses capacités à stocker et traiter l'information.

Dans le cadre de la modélisation de site géologique, on montre l'intérêt d'une structuration hiérarchique de la connaissance dans les systèmes de modélisation géométrique. L'information est alors organisée autour d'une même entité d'information: le frame. Nous donnons un exemple d'utilisation d'objets géométriques dans un environnement géologique en simulant un site géologique.

Mots-Clés: Frame, Modélisation géométrique, Représentation Centrée Objets, Représentation de la connaissance, Réseau sémantique, Simulation.

¹ Centre d'Etude et de Traitement de l'Information.

² Institut des Matériaux et des Gisements Miniers.

³ INSA de Lyon.

Ecole des Mines d'Alès 6, Av. de clavières, 30100 Alès Cedex (France)

Summary.-QUAFAROU M., ROLLEY J.P., DUBANT O. AND PRÉVOT P., 1990. The «object» concept and geometric modelling. Application to modelling of geological environments. *Bull. Soc. vaud. Sc. nat.* 80.1: 83-98.

In geology and especially when attempting to model the subsurface, the problem of geometric modelling becomes a crucial one. Geometric knowledge is generally complex thus making modelling systems rather heavy: indeed in the geometric modelling systems knowledge has many sources.

The variety of the geological domain is linked to its very nature. This variety and the imprecision inherent to geological objects increase the complexity of the modelling systems used to represent a geological site. Thus the efficiency of geometric modelling systems is dependent to the model's functional structuration and on its capacity to store and retrieve information.

Therefore, in order to model a geological site, a hierarchical structuration of knowledge is required. Information is then organised around a same entity of data: the «frame». By simulating a geological site, we give an example of the use of geometric objects in a geological environment.

Key-words. Frame, geometric Modelling, centered Representation, Simulation, Semantic Grid

I. INTRODUCTION

La simulation d'une prospection minière a été le sujet de plusieurs recherches (WOODTLI *et al.* 1975, PÉLISSONNIER et WOODTLI 1977) et un premier modèle sur gros ordinateur fut créé par Vannier dans les années 70 (VANNIER et WOODTLI 1979). Autour du même axe de recherche, d'autres travaux ont été effectués (LANÔE 1981). Une telle simulation a pour objectif d'enseigner la technique de la prospection minière sous ses différents aspects: stratégique, technique, financier, etc... L'étudiant planifie sa recherche minière en se basant sur un ensemble de forages effectués selon son désir et des analyses de prélèvements chimiques fictifs.

L'application de systèmes experts à l'EAO (Enseignement Assisté par Ordinateur) a permis l'extension des activités didactiques et des capacités de résolution des problèmes. Ainsi, les systèmes d'EAO permettent une explication et une trace de toutes les étapes utilisées pour résoudre un problème. Aussi, ils guident l'apprenant en fonction de son comportement et détectent ses erreurs. Les fonctionnalités des systèmes d'EAO sont alors divisés en plusieurs modèles:

- le modèle EXPERT: son but est de concevoir et de résoudre les problèmes en fournissant des explications sur son environnement;
- le modèle TUTEUR: ce module spécifie comment le système doit présenter la matière à enseigner. Il dialogue avec l'utilisateur et choisit des problèmes adaptés à son niveau et trouve des remèdes aux lacunes de l'élève si nécessaire;
- le modèle APPRENANT: il doit indiquer le plus fidèlement possible le niveau de compréhension de la matière enseignée par l'apprenant et de son comportement lors de l'apprentissage. Mieux l'apprenant sera connu du système, meilleures seront utilisées les stratégies tutorielles.

Les travaux effectués pour créer des systèmes d'enseignement d'une

prospection minière ont traité quelques aspects de la spécification du modèle EXPERT, et tout particulièrement sur la définition de la base de la connaissance. Ceci s'explique par le fait que les informations utilisées dans le modèle EXPERT sont très complexes et de natures très différentes: Géologie structurale, Géochimie, Minéralisation, Stratigraphie, Gestion du budget, Gestion du matériel, etc. D'autre part, dans chaque type d'information se posent de nouveaux problèmes. Ainsi par exemple, en Géologie structurale, il faut décrire les modèles mathématiques permettant de définir les structures intervenant dans les environnements géologiques, en gardant une certaine cohérence de tout l'ensemble géologique (LANÖE 1981).

Dans le cadre de la simulation d'une prospection minière, nous essayons d'étudier les différentes composantes des systèmes d'Enseignement Assisté par Ordinateur et leur intérêt pour l'enseignement des méthodologies de prospection minière. Les problèmes pédagogiques ne seront pas traités dans cet article, nous nous limiterons à la représentation de la connaissance propre au domaine géologique et à la création d'un contexte géologique synthétique donné.

Dans le but de réduire la complexité du système de modélisation géométrique et d'exploiter les similarités qui existent entre les différents modèles de représentation d'objets géométriques, nous proposons une approche hiérarchique pour construire des modèles de représentation d'objets géométriques: l'application de construction de géométrie d'objet est alors décomposée en plusieurs niveaux. Nous étudierons ensuite les problèmes de construction d'objets géométriques complexes en introduisant des manières (scénarios) de construction qui reflètent les différents facteurs physique réels qui ont concouru à la formation de la structure: «sorte de GENÈSE», voir § IV.

Notre système est basé sur les réseaux sémantiques où différents types de schémas sont reliés par des relations diverses, écrivant ainsi la structuration des connaissances et du modèle de représentation géométrique. On a alors une représentation sémantique et topologique des éléments géométriques (indépendance de l'échelle de représentation et de la taille de l'élément).

Nous exposerons ensuite à travers différents travaux le rapprochement qui existe entre l'intelligence artificielle et la géologie. Le troisième chapitre est une introduction aux frames. Puis, nous traiterons le problème de la simulation d'un site géologique et l'intérêt des frames dans de telles simulations. Dans le cinquième chapitre nous donnerons un exemple de modélisation d'objet géologique. Enfin, avant de conclure nous indiquerons les développements actuels et futurs.

II. L'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE ET LA GÉOLOGIE

La géologie est un milieu dont la définition et l'interprétation sont généralement complexes. En effet, un site géologique est un ensemble de formations naturelles, les unes sur les autres et obéissant à des lois d'influence mutuelles. Plusieurs mesures d'origines diverses (électrique, sismique, forage,...), sont interprétées pour mieux prévoir des aspects du domaine (minéral, morphologie, tectonique, ...).

C'est dans un milieu géologique compliqué et mal connu, que le géologue doit imaginer les possibilités de disposition des structures souterraines, prévoir la présence du minerai et choisir la stratégie pour implanter des forages ou effectuer différentes mesures destinées à confirmer son approche. Enfin, il étudie la rentabilité de l'exploitation d'éventuels gisements et choisit le meilleur processus d'exploitation. Le processus de prospection minière utilise différentes expertises et raisonnements, permettant aux géologues de prendre conscience de l'intérêt de l'intelligence artificielle.

Avec l'évolution des systèmes experts (HAYES-ROTH *et al.* 1983, FARRENY 1983), plusieurs systèmes experts ont vu le jour et sont généralement dédiés à des aspects particuliers de la géologie. Parmi les systèmes experts le plus connu en géologie, PROSPECTOR (REBOH 1981), développé pour la géologie minière, a «découvert» un gisement de molybdène. LITHO (BONNET *et al.* 1982) et SECOFOR (COURTEILLE *et al.* 1983) sont deux systèmes, deux réalisations dédiées à deux fonctions complémentaires, la première interprète les diagraphies et la seconde étudie des cas de coïncement d'un forage. De grandes firmes ont développé leurs propres produits, ainsi DIPMETER ADVISOR (SMITH et BAKER 1983) est réalisé par Schlumberger pour interpréter les diagraphies et l'inclinaison des couches géologiques traversées en forage. SIMMIAS (LAURRIERE et PERROT 1981) et ELFIN (MARTIN-CLOUAIRE 1984) sont deux systèmes experts développés par Elf-Aquitaine pour étudier la migration des hydrocarbures. ELFIN se base sur la théorie des possibilités pour représenter l'imprécision et l'incertitude. Il faut souligner que l'une des difficultés majeures pour ces systèmes réside dans la grande incertitude qui caractérise toutes les sciences de la terre et en particulier la géologie.

Dans les systèmes qui étudient les différents aspects d'une géologie, la modélisation géométrique prend beaucoup d'importance dès qu'il s'agit de modéliser le sous-sol et les phénomènes qui lui sont associés (minéralisation, métamorphisme, failles, etc.). L'efficacité du système dépend des modèles mathématiques et de leur capacité à modéliser les réalités de la géologie, ainsi que de leur façon d'organiser et d'utiliser la connaissance. Pour unifier la représentation de la connaissance du domaine géologique nous considérons que celle-ci est structurée autour d'unités d'informations. Ainsi, tous les objets et les événements intervenants dans la simulation d'un site géologique peuvent être représentés par des frames ou schémas. Ceux-ci sont des entités de structures pré-définies, utilisées dans les langages apparentés aux langages orientés objets. Cependant peu de publications ont été faites sur les systèmes de modélisation 3D construits sur un environnement objet (GRANT *et al.* 1986, HEDELMAN 1984).

Le concept objet peut apporter des solutions intéressantes au niveau de la représentation des connaissances et de la conception des logiciels. Pour des finalités d'enseignement, nous avons développé un système de modélisation de formes géologiques 3D, basé sur une représentation centrée objet. Dans cette optique, un site géologique n'est qu'un ensemble de situations stéréotypées qu'on reconnaît et sur lesquelles nous savons agir automatiquement (déformations, transformations, etc...). On peut aussi manipuler les connaissances et les propriétés chimiques des différents objets.

III. LES FRAMES

III.1 Introduction

L'idée des «frames», appelés encore «schémas», est issue des travaux de MINSKY en 1975 (WINSTON 1975). L'idée de base de Minsky est: «quand quelqu'un rencontre une nouvelle situation, il sélectionne en mémoire une structure déjà connue qu'il peut identifier à l'aide de changements de détails à la situation actuelle. Il construit ainsi une nouvelle situation appelée frame ».

Un *frame* est identifié par un nom unique, il est composé d'un groupe d'attributs, dont chacun est un aspect particulier de la description des concepts qu'il présente. Ces attributs peuvent faire référence à d'autres frames (ex: Morphologie, Identification, etc.).

Exemple:

```
<
Frame Objet_Géologique :
Morphologie : Géométrie
Identification : Lithologie
( si-modif :
  vérifier cohérence (Interface ))
Interface : Phénomène
>
```

Le frame est une entité conceptuelle qui décrit les propriétés communes à plusieurs objets similaires (objets pouvant être regroupés dans une même classe d'objet). Le frame est alors une représentation de cette classe. Tous les attributs dont on a besoin pour décrire les propriétés de la classe doivent être définis.

Une instance de *frame* ou «représentant» est la représentation d'un objet réel appartenant à la classe pré-définie, indiquée par l'attribut «est-un». Une instance du frame «Objet_Géologique» sera défini par les valeurs des attributs:

```
est-un : Objet_Géologique
Morphologie : Strat_Pli
Identification : Roche1
Interface : Catégorie2
```

Un *frame* peut décrire aussi une sous-classe afin d'introduire des attributs ou des procédures plus spécifiques. Un des attributs servira à indiquer la référence à la classe d'appartenance permettant d'obtenir les propriétés génériques. On définit le *frame* «strate», comme une sorte du *frame* *Objet_Géologique* spécialisé par un ensemble de transformation:

```

<
Frame strate:
sorte-de : Objet_Géologique
Transform : (liste des transformations)
>

```

Ainsi par exemple, l'instance S007 du frame «strate» héritera de l'ensemble des attributs Morphologie, Identification et Interface puisque ce frame est défini comme une sorte de frame «Objet_Géologique». Le frame «strate» aura en plus un ensemble de transformations.

```

est-un : strate
Morphologie : Strat_Pli
Identification : Roche1
Interface : Catégorie2
Transform : (Rotation1, Translation007)

```

Aux différents attributs, on peut associer des valeurs par défaut qui sont supposées vraies tant que le contraire n'a pas été spécifié.

La possibilité d'attacher des procédures aux frames permet l'utilisation d'une large gamme de "réflexes" (impression, lecture, modification, etc...); ainsi dans l'exemple de définition du frame «Objet_Géologique», le réflexe «si-modif» est associé à l'attribut Identification et il sera déclenché dès qu'on modifie la valeur de l'attribut Identification.

III.2 Organisation de la connaissance

Les frames sont organisés hiérarchiquement à l'aide de liens de type généralisation/spécification (Sorte-de) et concept/Instance (Est-un). Ces deux types de relations nous traduisent une notion très importante, celle de l'héritage. Ainsi une instance (représentant) hérite des attributs généraux du concept dont il est hiérarchiquement dépendant. Dans l'exemple précédent, la strate S007 hérite de toutes les propriétés associées au concept «Objet_Géologique». Mais cette notion d'héritage pose des problèmes lorsque le frame hérite de plusieurs concepts, c'est le problème du multi-héritage. On a essayé de traiter le problème du multi-héritage dans quelques langages orientés objets tels que Smalltalk (BOBROW et STEFIK 1982, COINTE 1982, GOLDBERG et ROBSON 1983). A l'heure actuelle nous utilisons uniquement un héritage simple⁴.

⁴ Les frames ont donné naissance à plusieurs autres langages dont les plus connus sont KRL «Knowledge Representation Language» et FRL «Frame Representation Language».

IV. SIMULATION D'UN SITE GÉOLOGIQUE

IV.1 Aspect géométrique

L'un des problèmes cruciaux auquel on est confronté lorsque l'on veut enseigner les techniques de prospection minière, est celui de la modélisation de l'environnement géologique sur lequel s'effectuera la simulation. La modélisation des aspects géométriques du cadre géologique conditionne largement l'efficacité de la simulation. Un travail important du géologue est de découvrir la géométrie des structures composant le site prospecté. Cette structure complexe, que l'apprenant sera amené à découvrir, sera composée d'un ensemble d'autres structures plus ou moins complexes. Dans plusieurs travaux (LANÖE 1981), on a essayé de simuler un objet géologique 3D par interpolation de coupes types. Cette façon de procéder, déjà opérationnelle, pose des problèmes de mise à jour du site modélisé. En effet le concepteur du domaine géologique doit être très vigilant pour garder une vue générale de la géologie que définit l'ensemble de ses fichiers de données. Par ailleurs, il est difficile de distinguer une seule structure en tant qu'entité autonome et de lui associer une interprétation. Enfin, il est difficile de reproduire toute la géométrie de la géologie à partir d'un seul modèle mathématique, surtout si plusieurs objets géométriques de nature très différentes interviennent dans la composition du domaine géologique. La possibilité d'introduire de nouveaux modèles de géométrie dans l'environnement de modélisation géométrique, comme étant de nouveaux objets, est l'un des intérêts de la modélisation objets.

IV.2 Intérêt des FRAMES

En CAO (Conception Assistée par Ordinateur) et en particulier dans l'approche de type «Solid Modeling», concevoir un modèle revient à tester et utiliser les différents éléments qui composent le modèle, moyennant un retour arrière si nécessaire. En plus il faut définir la hiérarchie des différents éléments du modèle et de leur histoire : la manière dont ils ont été créés.

Les frames permettent de concevoir un système de modélisation géométrique, composé d'un ensemble d'entités différentes, organisées hiérarchiquement et liées par une catégorie «relation». Les entités représentent des concepts plus ou moins spécialisés. La relation de généralisation/spécification nous permet, à partir d'un objet spécialisé, d'atteindre un objet plus général. La relation «est-un» indique la dépendance hiérarchique du frame, en désignant les concepts supérieurs. Dans l'exemple du § III, à partir de l'objet spécialisé «strate» on peut atteindre l'objet général «Objet_Géologique»

Cette façon de représenter la connaissance (VIGNARD 1984) correspond bien au caractère hiérarchique des tâches et des connaissances utilisées dans les systèmes de modélisation géométrique. Les incohérences souvent conditionnées par une mauvaise représentation de la connaissance sont ici atténuées, puisque l'héritage évite la redondance et diminue les risques d'incohérences.

IV.3 *Modèle choisi*

Les constats du paragraphe IV.1 et l'évolution de l'Intelligence Artificielle et des systèmes d'Enseignement Assisté par Ordinateur, nous ont amené à revoir les différents problèmes propres à la simulation d'une prospection minière. On s'intéresse plus précisément aux points suivants:

- choix des modèles mathématiques pour représenter des structures naturelles et organisation des stratégies de modélisation d'objets géométriques complexes;
- spécification de la stratégie de construction d'objets géologiques et plus généralement d'un domaine géologique;
- les choix précédents doivent respecter la lisibilité dans la conception et la facilité de compréhension et d'accessibilité à l'information.

IV.3.1 *Modèles mathématiques*

Comme on l'a vu précédemment, il n'est pas raisonnable de créer tous les objets d'un environnement géologique à partir d'un même modèle mathématique et nous essayons de développer un ensemble de méthodes de représentation géométrique, chacune plus ou moins spécifique. Pour aller encore plus loin, nous proposons de concevoir un environnement hiérarchique de modélisation géométrique, où coopèrent plusieurs méthodes de natures différentes: interpolation, méthode stochastique, fractale, etc...

Actuellement, une maquette est développée pour reproduire des objets géologiques connaissant leur historique: ensemble des transformations qui ont déformé successivement un objet primitif pour donner naissance à la forme finale de la structure géologique. Les déformations sont de plusieurs natures, celles étudiées sont proches des phénomènes naturels géologiques, par exemple, plissement, torsion, etc...

Nous n'allons pas décrire formellement toutes les déformations utilisées, mais nous en expliquerons juste le principe en donnant comme exemple le formalisme mathématique de la déformation «Ajustement en cône selon l'axe z» (BARR 1984).

Les déformations utilisées sont du type $P=F(p)$, où P est le point image et p le point antécédent; à chaque transformation est associée une matrice qui permet de connaître les coordonnées du point image à partir de celle du point antécédent. Notant M la matrice de la transformation, le système précédent s'écrit matriciellement $P=[M]p$.

Le calcul de la normale en un point de l'objet après application de la transformation est souvent nécessaire dans les problèmes de représentation géométrique. Ici, ce problème se résout facilement. En effet, si J représente le Jacobien de la transformation, un résultat mathématique permet alors d'exprimer $\underline{N}(P)$ vecteur normal en P à partir de $\underline{n}(p)$ vecteur normal en p :

$$\underline{N}(P) = \det(J)[J]^{-1T}\underline{n}(p).$$

Le facteur multiplicatif $\det(J)$ permet de normaliser le norme de $\underline{N}(P)$;

mais, d'une manière générale, seule la direction est importante.

En représentant les points par leurs coordonnées $p(x,y,z)$ $P(X,Y,Z)$ et la transformation F par ses fonctions composantes $F(f1,f2,f3)$, on écrira :

$$\begin{aligned} X &= f1(x) \\ Y &= f2(y) \\ Z &= f3(z) \end{aligned}$$

Pour la déformation décrite ci-dessus, nous allons définir les coefficients de la matrice de transformation $[M]$ et de son Jacobien $[J]$ et nous calculons le transposé de l'inverse de $[J]$ de manière à obtenir la matrice permettant de calculer les vecteurs normaux. Nous donnons ici la définition de la transformation «Ajustement en cône selon l'axe z » et qui consiste à réaliser une variation des coordonnées x et y en fonction de z :

$\begin{aligned} r &= f(z) \\ X &= r.x \\ Y &= r.y \\ Z &= z \end{aligned}$	$[M] = \begin{bmatrix} r & 0 & 0 \\ 0 & r & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad [J] = \begin{bmatrix} r & 0 & f'(z)x \\ 0 & r & f'(z)y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad r^2[J]^{-1T} = \begin{bmatrix} r & 0 & 0 \\ 0 & r & 0 \\ -rf'(z)x & -rf'(z)y & r^2 \end{bmatrix}$
---	--

IV.3.2 Stratégie de modélisation d'objets géométriques complexes

Au niveau le plus bas de la conception hiérarchique d'un environnement géologique on s'occupe de la modélisation géométrique de différentes structures qui seront utilisées ultérieurement. Cet aspect géométrique sera enrichi par d'autres informations propres au domaine géologique ce qui permet de donner une interprétation aux objets ainsi modélisés. A ce niveau, on identifie le modèle mathématique pour générer notre géométrie; par exemple, pour les objets créés par déformation, on décrit l'historique structural de l'objet en spécifiant les différentes transformations et leur ordre d'application. Ainsi, on peut spécifier les scénarios de composition des objets pour créer des objets encore plus complexes.

Le système de modélisation géométrique ainsi créé est organisé en une structure arborescente dont la racine est un schéma «Modèle_Géométrique», défini par une structure formée d'un ensemble d'attributs dont un sous-ensemble est défini en tant que fonction, pour gérer la hiérarchie des sous-schémas (lecture, écriture, création, modification, etc...). Alors que les feuilles terminales représentent les composants élémentaires présents dans notre environnement (différents primitives et transformations, Scénarios Actifs ou Passifs, etc...).

IV.3.3 Objets géologiques

Un des aspects intéressant d'un objet géologique est sa géométrie. Dans l'environnement d'application, on dispose d'un autre ensemble de scénario de composition d'objets «purement géométrique», traduisant des phénomènes de composition propre à la géologie, par exemple "l'EROSION". Ainsi, la composition des objets géométriques à l'aide des scénarios traitant la géométrie, définissent l'aspect morphologique de l'objet géologique. On complète cette définition morphologique en introduisant les deux notions d'Identification et d'Interface. L'Identification permet de définir la lithologie ou plus généralement la composition et le contenu de la morphologie. La morphologie ainsi identifiée représente un objet géologique sans description de son comportement dans un milieu géologique. Les procédés permettant de définir la dynamique de l'objet géologique, et de spécifier ses comportements dans un site géologique, sont définis dans ce qu'on a appelé l'Interface. Ainsi, un objet géologique sera défini selon trois points de vue: Morphologique, Interprétation et Interface.

V. APPLICATION

V.1 Exemple de modélisation d'objets géologiques

Nous donnons ici un exemple d'organisation hiérarchique des roches sédimentaires et des objets géologiques en général.

Au niveau le plus haut, nous trouvons le concept le plus abstrait, qui est «Objet_Géologique» défini par un ensemble d'attributs: (Morphologie, Identification, Interface) et par un ensemble de méthodes utilisées, par exemple, pour gérer la hiérarchie. «Objet_Géologique» est le concept le plus abstrait, le plus général.

Au niveau le plus bas, il apparaît des structures très spécialisées, par exemple le calcaire. Avec le lien hiérarchique «Sorte-de», les feuilles de la hiérarchie héritent des attributs et des concepts qui leurs sont supérieurs, ainsi, le calcaire va hériter des trois attributs: Morphologie, Identification et Interface, de l'objet «Objet_Géologique». En plus, les deux concepts «Sédimentaire» et «Filons» héritent du même concept «strate».

La particularisation du concept «Filons» traduit simplement l'idée suivante: «Un filon est une sorte de *strate* inclinée».

Nous allons maintenant décrire plus en détail les différents niveaux de la modélisation d'un objet géologique.

Objet Géologique générique (1° Niveau, classe)

```
<Frame Objet_Géologique:
Morphologie : Géométrie
Identification : Lithologie
( si-modif : vérifier cohérence (Interface ))
Interface : Phénomène
>
```

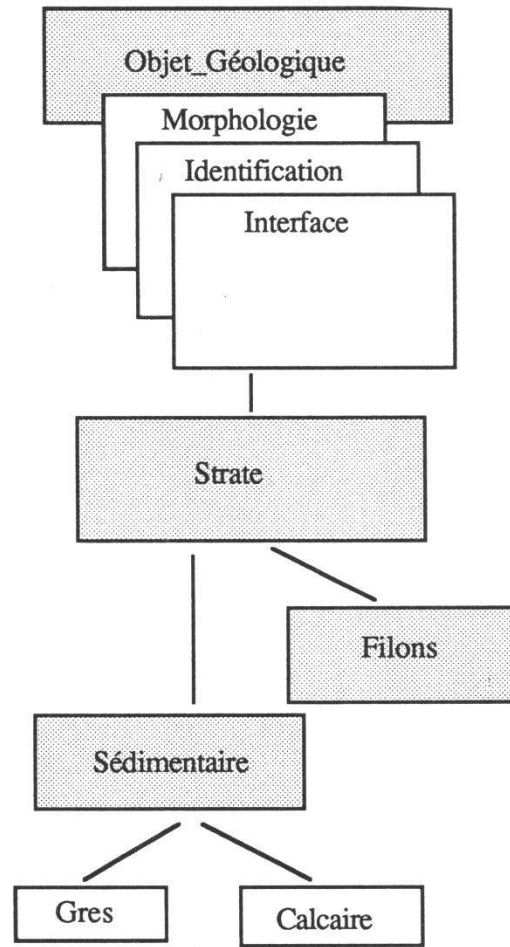


Figure1.-Hiérarchie géologique.

L'objet géologique ainsi décrit fait référence à l'aide de ses différents attributs soit à d'autres objets de natures différentes soit à des procédures:

- Attribut Morphologie*: permet de spécifier les différents modèles mathématiques et les procédés utilisés lors de la modélisation géométrique. On peut utiliser en plus, différents scénarios pour reproduire une structure géométrique encore plus complexe. Sur cette modélisation hiérarchique voir (QUAFAFOU 1989);
- Attribut Identification*: il permet de donner un sens à la structure géométrique dans le domaine géologique en décrivant sa composition, sa couleur, sa dureté, et tout autre facteur intervenant dans la description des différentes caractéristiques de la roche. Lorsqu'on modifie la lithologie, il faut conserver la cohérence du comportement avec le monde extérieur. A l'aide du réflexe «Si-modif», on déclenche la procédure de vérification de la cohérence dès que la lithologie subit une modification;
- Attribut Interface*: cet attribut permet de définir les contraintes possibles vis-à-vis de l'environnement de l'objet (roches voisines, minéralisation, etc...).

Objet strate (2° niveau, sous classe)

```
<Frame strate :
  sorte-de : Objet_Géologique
  Pli : (Si-def (Strate Souple)
  Demander à l'utilisateur )
  Faille : (Demander à l'utilisateur)
  Intrusion : masse
  (Modif)
  Impossible : (Eruptif)
>
<Frame Filons :
  Sorte-de : strate
  Inclinaison : (liste d'angles)
>
```

On continue d'introduire des spécifications de plus en plus précises:

```
< Frame Sédimentaire:
      Sorte-de : strate>

< Frame Calcaire :
      sorte-de : Sédimentaire >

< Frame Grès :
      sorte de : Sédimentaire >
```

On peut aussi développer une autre branche de la hiérarchie:

Objets magmatiques.

```
< Frame Magmatiques :
  sorte-de : Objet_Géologique
  ...
>
```

V.2 Exemple de représentant d'objet géologique

V.2.1 Exemple de représentant de roche calcaire: C007

La roche calcaire C007 hérite des concepts «Sédimentaire» et «Strate». Elle hérite en plus du concept le plus général, à savoir «Objet_Géologique», par conséquent, elle héritera aussi bien des contraintes portant sur la Morphologie (Pli, Faille, ...) que de celles concernant les Phénomènes qui peuvent avoir lieu ou non avec ce genre de roche. Nous donnons ici un exemple d'instance:

Morphologie : Forme005
 Identification : Calcaire003
 Interface : P001

Forme005, Calcaire003, P001, font référence à des objets de différentes natures, construits à partir des différents réseaux sémantiques traduisant respectivement les aspects: Géométriques, Lithologiques ou encore Logiques (cohérence et comportement vis-à-vis du monde extérieur). Un exemple de structure du représentant de l'aspect géométrique de la roche C007 est décrit dans la figure 3. Nous donnons dans la figure suivante un exemple de grammaire pour composer la géométrie des objets géologique :

<u>Grammaire de description de la géométrie des objets composés</u>		
< Objet_Géométrique >	::=	'O' < Nom > < Composants > < Transformations >
< Nom >	::=	'Identificateur'
< Composants >	::=	< Primitive > / < Liste_composants >
< Primitive >	::=	'F' < Numéro_Primitive >
< Numéro_Primitive >	::=	'0' / '1'
< Liste_composants >	::=	{ < Def_composant > } ⁺
< Def_composant >	::=	'B' < Nom > 'X' < Position >
< Position >	::=	< Vecteur > < angles >
< Vecteur >	::=	< Triplet >
< angles >	::=	< Triplet >
< Triplet >	::=	nombre nombre nombre
< Transformations >	::=	'T' < Nom_Transformations > < Paramètres >
< Nom_Transformations >	::=	< Echelle > / < Plissement > / < Torsion > / < Rotation >
< Echelle >	::=	'E'
< Plissement >	::=	'P'
< Torsion >	::=	'T'
< Rotation >	::=	'R'
< Paramètres >	::=	{ nombre } [*]

Figure 2.-Grammaire de description de la géométrie.

Remarque: On se place dans un repère orthonormé (0,x,y,z), et nous considérons ici uniquement deux types de primitives, numérotées par 0 et 1. Le chiffre 0 représentera une primitive surfacique élémentaire, centrée autour de l'origine et ayant dans le plan (0,x,y) des sommets de coordonnées: (1,1,0), (1,-1,0), (-1,-1,0), (-1,1,0), alors que 1 représente un volume élémentaire, centré autour de l'origine et ses six surfaces sont élémentaires: définies comme précédemment. La syntaxe de description d'un objet et un exemple d'instance sont donnés dans la figure 2.

En ce qui concerne la Lithologie, on peut hériter des attributs généraux par exemple :

Composition : XX
 Couleur : CC
 Dureté : DD

Ainsi pour le concept «Phénomène», on peut hériter des différentes contraintes des calcaires vis-à-vis de leurs roches voisines ou de la minéralisation.

Exemple d'instance de la géométrie de la roche C007	
O Couche0 F 1 T E 3 6 0.5 T P 1 -2 -1 -1.5 T P -1 1 2 1.5	Description de l'objet " Couche0". On utilise une primitive de type volumique auquel on applique d'abord une transformation d'échelle de coefficients 3, 6 et 0.5 respectivement selon les axes x, y et z. Puis deux plissements de quatre arguments chacun.
O Couche1 F 1 T E 3 6 0.5 T P 1 -2 -1 -1.5	Création d'un nouvel objet " Couche1 " avec une transformation d'échelle pour saisir les dimensions de l'objet et uniquement un plissement.
O Faille F 0 T E 3 1 10 T R 0 0 1.57	Définition d'une faille, cette fois on utilise une primitive surfacique, à laquelle on applique une transformation d'échelle et ensuite une rotation pour définir la pente de la faille.
O PliFaille B Couche0 X 0 -3.4 0 0 0 0 B Faille B Couche1 X 0 2.6 0 0 0 0 T R 0 0 -0.5	On définit enfin, l'objet "PliFaille", comme composé des deux objets "Couche0" et "Couche1", reliés entre eux à l'aide d'une faille, et on applique à tout l'ensemble une rotation pour définir l'orientation finale de la structure "PliFaille" dans l'espace 3D.

Figure 3.-Exemple de description de la géométrie d'objet géologique.

V.3 Des objets géologiques encore plus complexes

Au niveau géométrique des objets de plus en plus complexes sont obtenus en combinant des objets géométriques déjà modélisés à l'aide de différents scénarios. Une fois que ces objets géométriques sont interprétés dans notre milieu géologique, on peut encore effectuer de nouvelles compositions. Cette fois les différents scénarios ne vont pas s'occuper uniquement de l'aspect géométrique, mais ils vont capter aussi la sémantique propre au domaine géologique.

Comme exemple de scénario traduisant des phénomènes géologiques, on considère pour l'instant:

- *la superposition*: c'est un empilement de structures les unes sur les autres pour exprimer un lien vertical entre des objets. Ce scénario peut nécessiter la modification de certains caractères des roches ainsi superposées;
- *l'injection*: un objet est englobé dans un ou plusieurs autres;
- *l'érosion*: application d'une structure permettant de déformer la surface d'un ou plusieurs objets géométriques.

VI. CONCLUSION

Dans le cadre d'enseignement assisté par ordinateur, une maquette a été développée pour modéliser des structures géologiques.

L'implémentation est faite en Langage C, sur un Compaq. Actuellement nous cherchons à affiner cette application, surtout la façon d'obtenir des objets géologiques de plus en plus complexes.

Avec des objets génériques et différentes relations, la modélisation devient plus structurée donc plus simple. Les frames unifient la représentation de la connaissance et permettent une organisation immédiate de l'information; ainsi, un objet sera vu sous différents aspects.

Nous avons essayé à travers la modélisation d'un site géologique, de montrer l'intérêt de la structuration de la connaissance et de l'organisation hiérarchique de la modélisation. On étudie aussi l'intérêt de telle représentation de la connaissance géométrique pour les systèmes d'Enseignement Assisté par Ordinateur utilisant divers objets géométriques

Une étude est en cours pour améliorer les algorithmes du tracé de rayon avec une organisation hiérarchique des modèles géométriques.

De tels systèmes permettent d'apporter des solutions intéressantes, même si les frames sont peu faciles à utiliser à cause de leur structure complexe, et même si la conception d'un tel univers est un art difficile.

BIBLIOGRAPHIE

- BARR A. H., 1984. Global and local deformations of solid primitives. *Computer Graphics*, Volume 18, Number 3.
- BOBROW D.G., STEFIK M., 1982. The LOOPS manual. Knowledge-Based VLSI Design Group Memo KB-VLSI 82-22 (working paper) first draft: August 14 1982 by Xerox Corporation.
- BONNET A., HARRY J., GANASCIA J.G., 1982. LITHO, un système expert inférant la géologie du sous-sol. *Technique et Science Informatiques 1.5*: 393-402.
- COINTE P., 1982. Une réalisation de SMALLTALK en VLISP. *TSI Technique et Science Informatiques Vol 1.4*.
- COURTEILLE J.M., FABRE M., HOLLANDER C.R., 1983. An advanced Solution: The drilling advisor SECOFOR - S.P.E., Society of petroleum Engineers of AIME, 58th Annual Technical Conference and Exhibition, San Fransisco, CA (October 5-8 1983).
- FARRENY H., 1983. Les systèmes experts. *Informatique et Gestion*. Partie I: Principes d'organisation et fonctionnement, 142: 66-72, Partie II: Aperçu sur quelques réalisations, 143: 52-57.
- GOLDBERG I., ROBSON D., 1983. Smalltalk 80 The language and its implementation. Addison Wesley Publishing company.
- GRANT E., PHIL A., and TURNER W., 1986. Exploiting class in Modeling and display Software. *IEEE CG&A*, Nov.: 13-20.
- HAYES-ROTH R., LENAT D., WATERMAN D., 1983. Building expert system. Addison-Wesley Reading, MA.
- HEDELMAN H., 1984. A data Flow Approach to Procedural Modeling. *IEEE CG&A*, Vol 4, N°1: 16-26.

- LANOE S. 1981. Modélisation sur ordinateur d'un compartiment géologique et applications pédagogiques. Thèse de Docteur Ingénieur, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris.
- LAURIERE J.L., PERROT A., 1981. Représentation et utilisation des connaissances dans l'industrie pétrolière. Journées AFCET d'Etude Systèmes Experts, Avignon, 4 et 5 Mai 1981, 7p.
- MARTIN-CLOUAIRE R., 1984. ELFIN: Une Approche Système-Expert et Théorie des Possibilités Appliquée en Géologie Pétrolière. Thèse de troisième cycle, Université Paul Sabatier Toulouse.
- PÉLISSONNIER H., WOODTLI R. 1977, La formation à la recherche minière, Annales des Mines, Paris, p. 1-12.
- QUAFAROU M., 1989. Les frames dans la modélisation géométrique. Rapport interne, Ecole des Mines d'Alès.
- REBOH R., 1981. Knowledge engineering techniques and tools in the PROSPECTOR environment. Technical Report Technical note 243, Artificial Intelligence Center, SRI International, Menlo Park, CA.
- SMITH R.G, BAKER J.D., (1983). The dipmeter advisor system - A case study in commercial expert system development. *Proc IJCAI-83*: 122-129.
- VANNIER M., WOODTLI R., 1979. Teaching mineral prospecting by computer assisted simulation techniques. *Computers & Geosciences, Vol 5*: 369-374.
- VIGNARD P., 1985. Représentations de connaissances: mécanismes d'exploitation et d'apprentissage. INRIA Rocquencourt, collection didactique.
- WINSTON P.H., 1975. The psychology of computer vision. PH Winston editor, Mac Graw-Hill Book Company.
- WOODTLI R., VANNIER M., TOROS M., 1975. Présentation d'une carte géologique obtenue par simulation à l'ordinateur. *Bull. suisse Minéral. Pétrogr.* 55/3: 583-585.

Manuscrit reçu le 3 janvier 1990