

# L'imagerie du domaine souterrain: retour d'expérience d'un programme de recherche national (GéoFrance 3D).

Avril 2001

**Patrick Ledru, Antonio Guillen, Catherine Truffert**

BRGM, CDG/MA, BP 6009, 45060 Orléans cedex 02

*RESUME : Le programme GéoFrance 3D est un programme de recherche scientifique national qui a eu pour objectif de 1995 à 2000 la définition d'une procédure d'exploration 3D du domaine souterrain. Des projets concernant le Massif armoricain, le Massif central, les Alpes, les Bassins parisiens et du Sud-Est, le Fossé rhénan ont acquis de nouveaux lots de données géologiques et géophysiques qui ont profondément renouvelé l'imagerie de l'infrastructure géologique du territoire national.*

*ABSTRACT : GeoFrance 3D is a scientific research program aimed at the definition of a procedure for 3D exploration of the sub-surface domain. From 1995 to 2000, projects concerning the Armorican Massif, the Massif central, the Alps, the Paris and South East basins, the Rhine Graben have provided new sets of data which deeply renewed the imagery of the geological infrastructure of the national territory.*

Mots clés : Modélisation 3D, données géologiques, données géophysiques programme national

## **1. Les fondements du programme GéoFrance 3D: imager pour faire comprendre et pour comprendre**

La connaissance ne peut se concevoir que si elle dispose d'un support de diffusion afin d'être communiquée. Les scientifiques ont longtemps résolu cette question par l'écriture et le dessin. C'est avec le développement des médias que les scientifiques se sont posés la question d'une transmission de la connaissance au grand public. Ils ont ainsi cherché à rendre leur message accessible en faisant appel à l'image, pour faire appel à notre imaginaire et nous inviter à nous faire notre propre "image" du monde naturel dans lequel nous évoluons.

Les sciences de la terre témoignent de cette évolution. Les dessins de cartes et de coupes géologiques ont accompagné la naissance de la géologie. Dans les années 60, la télévision a mis à la portée du grand public la connaissance de phénomènes tels les éruptions volcaniques puis plus tard les concepts de la tectonique des plaques. Le développement des moyens de calcul informatiques a ensuite mis à disposition des géologues des outils de cartographie numérique permettant la combinaison de données jusqu'à présent considérées séparément. Mais il restait aux géologues à se préoccuper de la 3<sup>ème</sup> dimension. Car le domaine souterrain et les phénomènes qui s'y produisent sont naturellement en 3D. Les circonstances les ont conduit à s'en préoccuper dans les années 80-90.

Les contraintes économiques (concurrence, coût exorbitant des forages en mer...) ont imposé aux compagnies pétrolières d'investir dans les méthodes sismiques 3D afin de réduire l'incertitude géologique. Parallèlement, l'échec relatif des forages scientifiques profonds des années 1980 et les problèmes rencontrés dans le percement des tunnels ont illustré notre difficulté de prévoir dans les contextes géologiques complexes l'extension en profondeur des structures et des unités lithologiques. Difficulté de prévoir et aussi difficulté de représenter un volume quasiment impénétrable, inaccessible dans son intégrité ? Nos aînés procédaient par cartes et coupes sériées afin de suivre les couches minéralisées dans les mines. Mais au bout de quelques années, ces documents constituaient des archives difficiles à manipuler, ne pouvant

être analysées que par des spécialistes et quasiment impossibles à synthétiser à une échelle plus petite. Les compagnies pétrolières ont investi massivement afin de rendre opérationnelle la sismique 3D en fournissant non plus des cartes et des coupes mais des blocs modélisant les couches en 3D. Les développements de l'informatique ont par ailleurs permis de gérer ces données dans un espace numérique 3D garantissant la cohérence de la géométrie construite et des changements d'échelle. L'ensemble de ces réalisations permet une visualisation souvent spectaculaire et compréhensible par des non-spécialistes. L'objectif de communication est ainsi atteint car implicite dans la démarche scientifique: il est nécessaire d'imager afin de comprendre.

C'est dans ce cadre qu'au milieu des années 90 s'est posée la question d'un programme national de recherche scientifique dédié à la modélisation 3D du domaine souterrain, avec un objectif de renouvellement de la connaissance, lié à l'amélioration des moyens d'imagerie. Lancé fin novembre 1995 à Paris (Document du BRGM, n° 247), le programme GéoFrance 3D s'est clos fin 2000. Un colloque tenu à Lyon en novembre 1999 a fait le point des principaux apports scientifiques (Document du BRGM, n° 293). Après 5 années, quel regard pouvons nous porter sur GéoFrance 3D en terme de fonctionnement et sur sa contribution ?

## **2. La connaissance de l'infrastructure géologique de la France: la contribution de GéoFrance 3D**

L'objectif de GéoFrance 3D était la représentation 3D du domaine souterrain par la combinaison des méthodes d'imagerie géologique et géophysique. L'idée de départ est simple:

- chaque méthode et chaque spécialiste peuvent probablement fournir une réponse satisfaisante à un problème scientifique simple,
- une seule méthode ne peut pas fournir une solution unique à un problème complexe
- la résolution des problèmes complexes nécessite la combinaison de plusieurs méthodes afin de déterminer la partie commune à l'ensemble des solutions propres à chaque méthode, l'incertitude au sein de cet espace des solutions doit pouvoir être quantifiée.

Cette démarche doit être ancrée sur la problématique fondamentale de toute science: l'observation des phénomènes, la compréhension de leurs causes et effets et leur modélisation. Or dans le domaine souterrain, on est confronté à l'extrême diversité et hétérogénéité de la nature et de la répartition des paramètres observés et mesurés. GéoFrance 3D a été ainsi conduit à assurer une validation et une valorisation des données existantes et à piloter des acquisitions de données nouvelles sur les domaines mal renseignés. De l'acquisition à la modélisation 3D, l'enjeu du programme est ainsi rapidement devenu la définition d'une plateforme d'échange et de modélisation des données géologiques et géophysiques.

### **2.1. Analyse des réalisations**

L'idée de réviser la connaissance de la géologie de la France en introduisant la 3<sup>ème</sup> dimension était excellente. La communauté scientifique s'est mobilisée (plus de 120 conventions de recherche), les meilleures équipes ont réorienté leurs programmes de recherche partiellement sur ces cibles situées sur notre territoire et des moyens méthodologiques jusqu'à présent réservés aux grandes thématiques internationales ont été déployés dans les Alpes ou le Massif armoricain. On peut citer quelques réalisations comme preuve de réussite:

- de nombreux résultats publiés ou en cours de publication témoignent des découvertes réalisées (plus de 120 publications recensées dans des revues de rang A),
- des acquisitions nécessaires à la connaissance de l'infrastructure géologique ont été menées avec succès parmi lesquelles les levés de géophysique aéroportés (gravimétrie des Alpes,

- magnétisme et radiométrie d'une large zone du Massif armoricain et du Massif central), le levé de plus de 150 km de sismique réflexion dans les socles, les campagnes d'écoute sismique et l'installation de réseaux GPS dans les Alpes et le Fossé rhénan,
- le programme a été largement représenté dans les congrès géologiques internationaux, a obtenu des co-financements européens dans le cadre du 5<sup>ème</sup> PCRD et est souvent cité en référence à l'étranger,
  - des documents numériques (cartes géologiques et géophysiques) ont été diffusés sur CD ROM ou via INTERNET et sont aujourd'hui utilisés dans les cursus d'enseignement,
  - plus d'une vingtaine de thèses ont été soutenues sur des thématiques GéoFrance 3D et plusieurs post doctorants sont intervenus, attestant de l'implication des équipes universitaires sur les thèmes de recherche
  - la dynamique du programme a capté l'intérêt d'entreprises industrielles telles MATRA, COGEMA, CEA ou d'autres organismes jusqu'à présent peu impliqués dans les sciences de la Terre tel l'INRIA.

On peut conclure que GéoFrance 3D a largement contribué à faire progresser la connaissance de la géologie de la France ces 5 dernières années et a créé une dynamique fédérative. La combinaison des méthodes géologiques et géophysiques a ainsi été saluée comme un succès par les équipes participantes même si tout le monde est conscient du chemin qu'il reste à parcourir.

## **2.2. Les attentes de la communauté scientifique**

Il faut constater que la communauté scientifique académique reste encore aujourd'hui relativement indifférente à la représentation 3D. Le monde académique a des attentes qui sont peu ou pas formulées, contrairement à leurs collègues impliqués dans l'exploration et l'exploitation des ressources naturelles (hydrocarbures mais aussi mines et stockages souterrains) qui vont jusqu'à développer des caves 3D recréant un espace souterrain virtuel.

L'expérience de GéoFrance 3D a montré que seul le respect de l'objectif du programme conduisait les chercheurs à passer par la "case 3D". Quelques uns sont repartis enthousiastes, la plupart intéressés, mais la demande de mise à disposition et d'utilisation d'outils de modélisation est restée très en dessous de nos espérances. La principale raison que l'on peut invoquer est que dans la mesure où les chercheurs ne se préoccupent pas de référencer avec précision leurs données ni d'intégrer des données d'autres sources au sein d'un référentiel 3D, le recours à la modélisation 3D et l'investissement temps nécessaire sont évités. Publier les résultats dans des revues de rang A reste l'objectif prioritaire des équipes CNRS et universitaires et la modélisation 3D ne rentre pas en compte dans les critères d'évaluation des publications, seul l'aspect esthétique (hautement subjectif) étant éventuellement évalué.

## **2.3. Une procédure d'imagerie du domaine souterrain**

A l'issue du programme, une procédure générale peut être définie, encore expérimentale mais très proche d'une mise à disposition de la communauté scientifique, incluant les phases d'acquisition, de traitement et de valorisation. On peut ainsi résumer les étapes à accomplir:

- Révision de la carte géologique dans une perspective de modélisation 3D et complément de la couverture géophysique. Cette étape inclut un retour sur le terrain afin de mettre à niveau la couverture cartographique (géologie, champs de potentiel) et structurale dans la perspective d'une modélisation 3D.
- Analyse du contexte géologique régional et choix des objets représentatifs de la géométrie des unités à modéliser. Ce stade implique la caractérisation du champ de déformation

régional qui contraint la représentation en profondeur des unités lithologiques et des discontinuités structurales.

- Modélisation géologique a priori prenant en compte la carte géologique et le champ de déformation. Ce modèle 3D prend en compte les coupes dessinées par le géologue, reflétant sa vision conceptuelle de l'évolution géologique régionale. Il intègre éventuellement les données des profils sismiques si elles sont disponibles.
- Calcul de l'anomalie gravimétrique et magnétique produite par le modèle géologique a priori, comparaison avec les anomalies mesurées. Un premier ajustement sera fait en cas d'écart trop important par révision des coupes géologiques.
- Inversion des données géophysiques (gravimétrie et magnétisme) et définition de l'espace des solutions et de la probabilité d'extension en profondeur des unités géologiques et structurales. A l'issue de ce stade, un volume 3D répondant aux caractères géologiques, structuraux, sismiques, gravimétriques et magnétiques est disponible. Ce modèle ne représente toutefois pas une solution unique et la méthodologie devrait comporter une phase de validation (forage, travaux souterrains... ?)

C'est cette démarche qu'illustre le volume spécial de *Tectonophysics* qui doit paraître en 2001 au sujet du domaine nord armoricain. Dans le cas de la Châtaigneraie et du Massif central, cette méthodologie a permis de proposer une explication originale à l'origine des minéralisations à Or et Tungstène en caractérisant un leucogranite non affleurant. Une reprise de l'exploration minière dans ce secteur ouvrirait des champs de découvertes de nouveaux gisements.

### **3. Retour d'expérience: les leçons à tirer de GéoFrance 3D**

GéoFrance 3D a montré qu'un programme scientifique ayant pour objectif la connaissance de l'infrastructure géologique du territoire peut être fédérateur et dynamique. Quelques leçons sont tirées des points forts et points faibles observés durant le programme.

#### **3.1. La valeur de la donnée, la nature englobante de certaines acquisitions**

La numérisation de l'information géologique et l'interrogation par les systèmes d'informations géographiques et les outils de modélisation 3D permettent un accès direct à une information géoréférencée. L'approche multi-échelle est ainsi possible et on peut mettre à disposition la représentation la plus complète possible du domaine souterrain pour des spécialistes et des non spécialistes, conseillers ou décideurs, experts ou réalisateurs. La donnée et son traitement sont ainsi conçus en fonction du mode de diffusion qui sera choisi. D'autre part, l'accès numérique à la donnée géologique implique de se doter d'une évaluation de l'incertitude sur la donnée et oblige donc la géologie, science naturaliste à l'origine, à s'interroger sur le poids relatif de l'observation par rapport à la mesure physique.

Certaines acquisitions ont une valeur englobante qui est précieuse dans le cadre de l'évaluation de l'incertitude sur la donnée et de l'enseignement sur les extensions en profondeur. C'est notamment le cas des couvertures géophysiques aéroportées qui permettent de valider les modèles géologiques a priori. La couverture géophysique de la France nous paraît ainsi constituer une priorité, étant aujourd'hui très insuffisante. La réalisation de ces acquisitions ne pouvait être accomplie en 5 ans et les tâches qui restent à accomplir pour disposer d'une couverture géophysique digne d'un pays développé soucieux de gérer son environnement ne sont pas aujourd'hui évaluées.

### **3.2. Les enjeux de la modélisation 3D**

Malgré les efforts de l'industrie pétrolière dans le domaine de la modélisation 3D et les résultats encourageants de divers organismes dont le BRGM, il reste beaucoup de chemin à parcourir pour mettre à disposition du géologue et du géophysicien la plate forme d'échanges et de modélisation 3D nécessaire à une bonne représentation 3D du domaine souterrain, quel que soit le type de terrain. GéoFrance 3D n'a pas réussi à favoriser la liaison recherche fondamentale et recherche appliquée ou industrielle. Ainsi les propositions de transfert de savoir faire du domaine pétrolier au monde académique sont restées sous exploitées, l'intérêt de tester les modélisations 3D sur des exemples naturels permettant une validation a posteriori (notamment dans le cas des percements de tunnels) n'a pas été exploré, les développements en terme de modélisation 3D n'ont pas débouché sur les partenariats industriels souhaités.

En conclusion, bien que les outils soient d'ores et déjà disponibles pour la représentation 3D appliquée aux activités économiquement rentables de l'industrie pétrolière, on peut craindre que la faiblesse des moyens publics mis au service de la recherche renvoie à plusieurs années la mise au point d'outils adaptés aux besoins du service public. A moins qu'une quelconque catastrophe écologique ou modification climatique majeure ne vienne rappeler qu'un investissement de quelques millions de francs peut éviter des coûts sociaux incommensurablement plus élevés ?

### **4. Conclusion**

GéoFrance 3D a montré que mettre à disposition une représentation 3D précise du domaine souterrain impliquait:

- des projets d'acquisition de données géologiques et géophysiques dédiés à une connaissance actualisée et mise à niveau de l'infrastructure géologique,
- la définition d'objectifs scientifiques afin de garantir la qualité des méthodes et des traitements choisis et la notoriété internationale du programme.
- le développement des outils de modélisation 3D adaptés aux besoins du service public et de la recherche scientifique, à tous les types de terrains et à toutes les échelles,
- une dynamique de recherche pluri-disciplinaire et alliant plusieurs organismes de recherche avec ponctuellement des recherches en partenariat industriel.

Le BRGM - Service Géologique National - s'inscrit aujourd'hui dans la continuité de ces deux premières implications à travers sa programmation de la recherche. Le maintien d'une forte implication dans le développement des outils de modélisation 3D est fortement compromis par l'arrêt du programme GéoFrance 3D. Quant à la dynamique de recherche, elle ne peut voir le jour que si de nouveaux objectifs d'ambition nationale sont définis. Ce qui n'est pas le cas à ce jour.