

La Modélisation Géologique 3D

1. Qu'est ce qu'un modèle?
2. La modélisation des interfaces et volumes géologiques
 - 2.1. Généralités
 - 2.2. Les types de surfaces
 - 2.3. Traitement des données structurales par surfaces implicites
 - 2.4. Les surfaces ont une histoire: une pile lithologique
 - 2.5. Champ de déformation et pile lithologique
3. Applications à la modélisation de domaines géologiques 3D
 - 3.1. Le cas d'étude de la ville de Lyon
 - 3.2. Une procédure d'imagerie 3D, le cas d'étude de la Chataigneraie (MCF)

Les enjeux de la modélisation 3D dans les sciences de la Terre

- La difficulté de représenter un domaine souterrain à partir de données discontinues
- L'extrême diversité et hétérogénéité de la nature et de la répartition des paramètres observés et mesurés
- L'accès à des outils d'acquisition, de traitement et de modélisation des données très spécialisés et coûteux
- La prévision de l'extension des structures et des phénomènes géologiques en profondeur

Nécessité de la modélisation

- La compréhension d'un phénomène quel qu'il soit passe par sa description explicite
- Le modèle est une représentation plus ou moins schématique de la réalité
 - Il permet de décrire notre état de compréhension de la réalité à un moment donné
 - La première utilité des modèles est donc de pouvoir communiquer cette connaissance

Divers types de modèles plus ou moins élaborés

- Modèles conceptuels
- Modèles de processus - phénomènes
- Modèle géologique au sens large
- Modèle géologique au sens géométrique

Modèles conceptuels

- Les notions de failles, plis, chevauchement, stratigraphie sont des modèles conceptuels
- Une phrase du type " *la chaîne Himalayenne est une chaîne de collision, le raccourcissement est accommodé par des zones de subduction continentale* " est l'expression d'un modèle conceptuel

« *La chaîne Himalayenne est une chaîne de collision , »*

- Personne n'a jamais vu à quoi cela ressemble
 - chacun s'en fait une représentation mentale pas toujours facile à communiquer.
- La seule réalité du modèle réside dans l'idée qu'on s'en fait
- Des mots et des images suffisent à transmettre ce concept
- En fait, il faudra des des modèles quantifiés pour l'argumenter, le discuter,...

Modèles de processus - phénomènes

- On procède soit par modèles dits analogiques ou par des modèles numériques
- Ce sont en général des modèles où le temps intervient
 - Pétrologie expérimentale
 - Mécanismes de formation des plis
 - Mécanismes d'évolution des failles
 - Mécanismes de transfert
 - Mécanismes de réaction métamorphiques
 - Mécanismes d'érosion
 - Modèles cinématiques...
- Ces modèles n'essaient pas de décrire la réalité mais essaient de fournir des mécanismes similaires à ceux qui se sont passés et qui aboutissent à ce que l'on observe aujourd'hui

Modèle géologique au sens large

- C'est un modèle qui combine les types de modèles évoqués plus hauts
- Le modèle est ce qu'a compris le géologue
- Sa communication passe par des mots et des images

Modèle géologique au sens géométrique

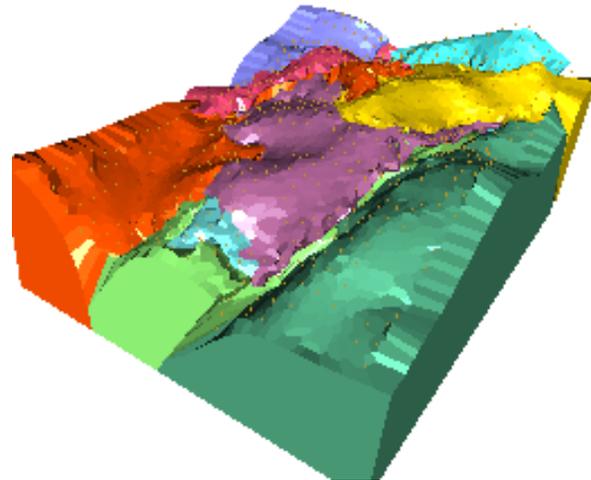
- C'est un modèle qui est capable de décrire la valeur d'un paramètre géologique dans l'espace 1D, 2D, ou 3D de façon continue (au moins par parties) et à un moment donné
 - On peut également parler de modèles spatiaux
 - La forme générale du modèle sera une fonction de x de (x,y) ou (x,y,z)
 - Si on arrive à modéliser l'erreur (l'incertitude) que l'on fait lorsqu'on estime un de ces paramètres, c'est encore mieux !

Exemples

- Variations de la teneur dans un filon $f(x,y) =$ teneur en un élément chimique
 - On se rapporte à un problème 2d dans la surface du filon
 - Si l'on prend en compte l'épaisseur du filon comment s'exprime cette fonction ?
- Coupes géologiques 1d
- Cartes isobathes - isopaques
- Niveau piézométrique
- Densité de répartition de fractures modèles déterministes - modèles probabilistes
- ...

2. Modélisation d'interfaces géologiques

- On se focalise maintenant sur la modélisation d'interfaces géologiques
- Nécessité de modéliser la géométrie en 3d
 - Pourquoi on fait des modèles 3d ?
 - A quoi ça sert ?



2.1. Généralités

- Nécessité de modéliser la géométrie en 3D
- Constat que les objets géologiques sont en 3D
 - Projets de génie civil
 - Projets d'aménagement
 - Stockage des déchets
 - Le modèle géologique sert de référence pour d'autres études
 - C'est un modèle partagé par de multiples applications
 - On doit pouvoir répondre à des questions comme:
 - « ou est tel interface en profondeur ? »
 - « quelle formation trouve t'on à tel endroit ? »

Le modèle est une représentation simplifiée de la réalité

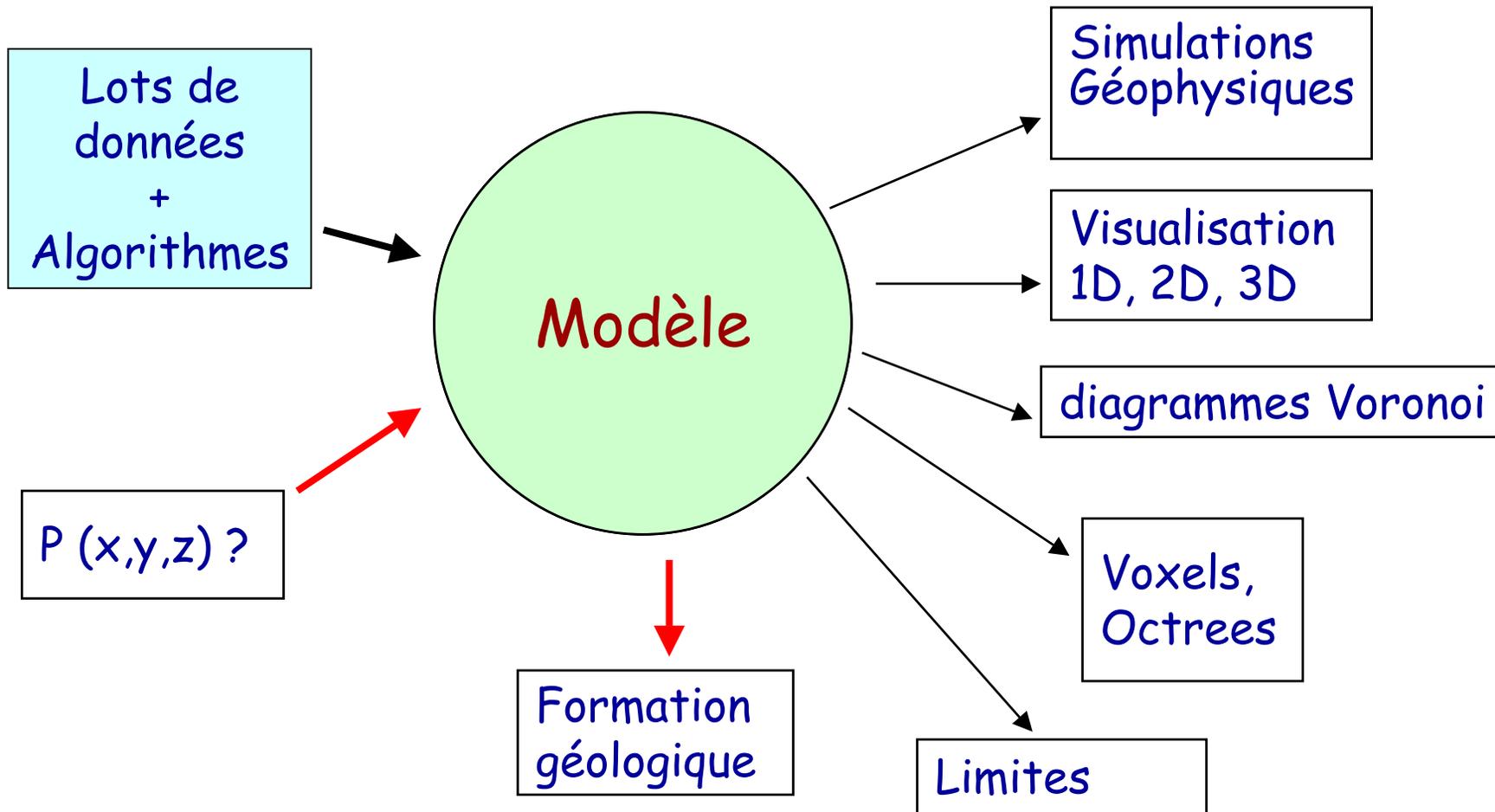
- On a recours à des méthodes qui ne prennent en compte qu'un aspect de la réalité
- Les hypothèses simplificatrices conduisent généralement à des résultats décevants au regard de l'idée que l'on a du sous-sol

Posons le problème

- Avec des informations
 - conceptuelles
 - quantifiables
 - éparses
 - disparates (point de passage, pendages, directions, épaisseurs, isobathes,...)
- Il faut pouvoir reconstruire un modèle géométrique 3D de la géologie

La solution est une interpolation et une reconstruction

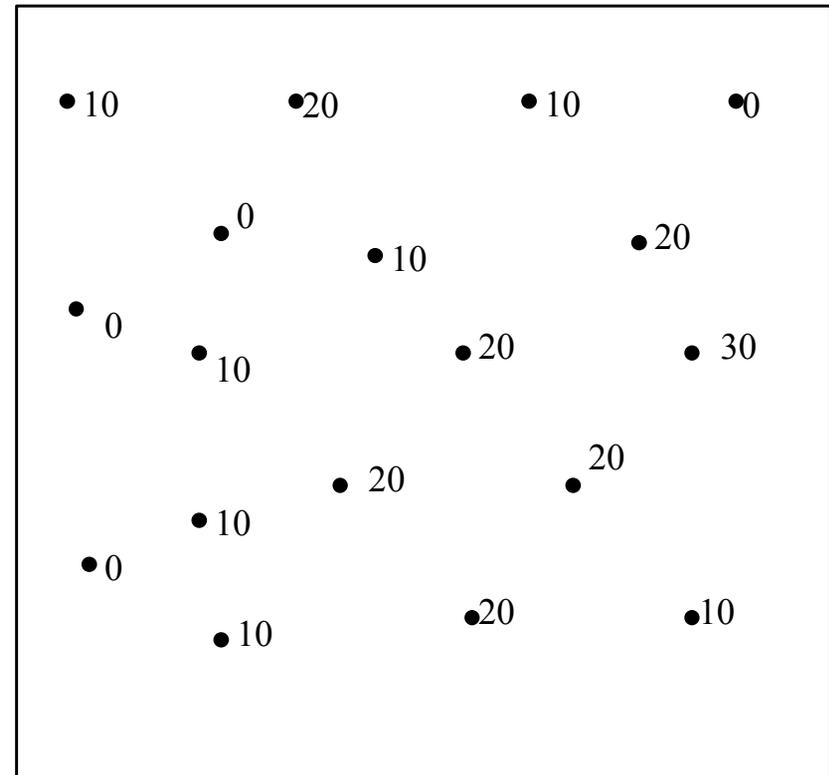
- Quoi interpoler ?
- Avec quelles méthodes d'interpolation ?
- Comment reconstruire un modèle géométrique 3D ?



Qu'est ce qu'un modèle géométrique?

Difficultés liées au choix d'une méthode dite objective

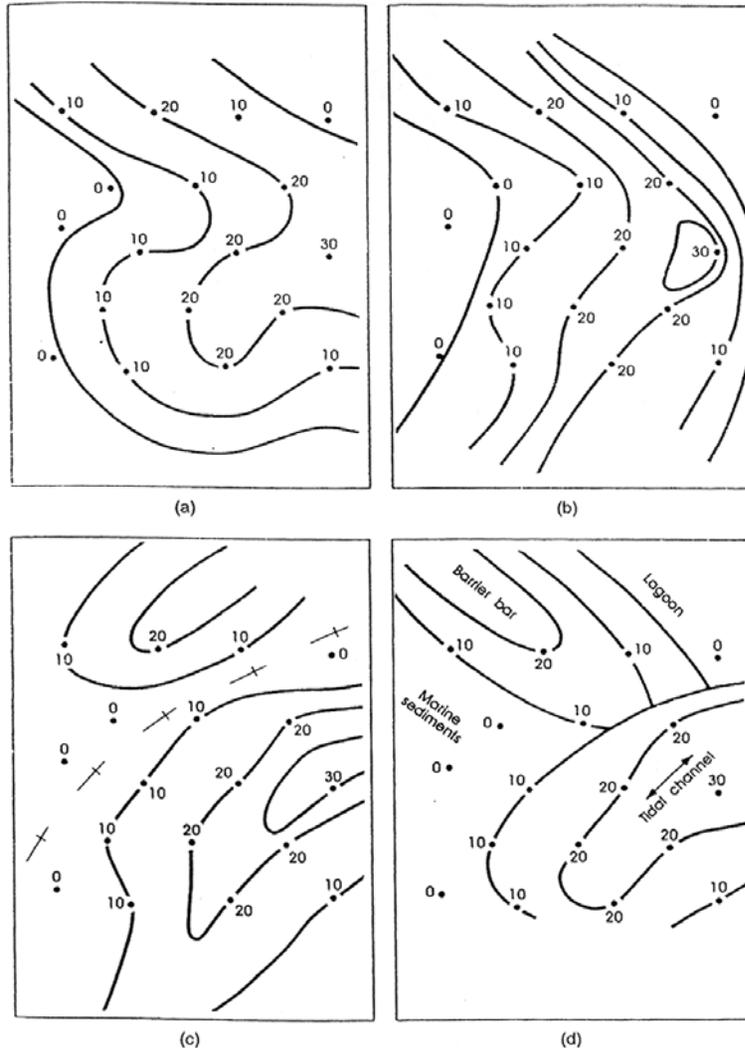
- Cas simple des surfaces d'élévation du type $f(x,y) = z$
 - Problème le plus courant : estimer la profondeur (altitude) ou l'épaisseur d'une couche en fonction de sa position cartographique à partir de n points irrégulièrement répartis
 - On illustre le problème à partir de l'exercice suivant



Quel modèle avez-vous choisi?

DESCRIPTION OR INTERPRETATION?

9

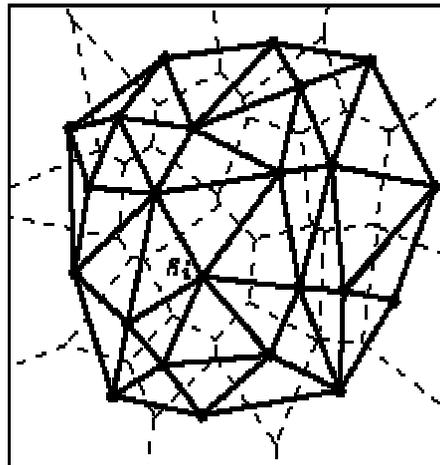
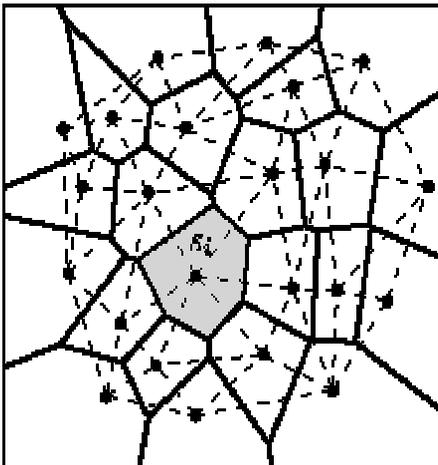
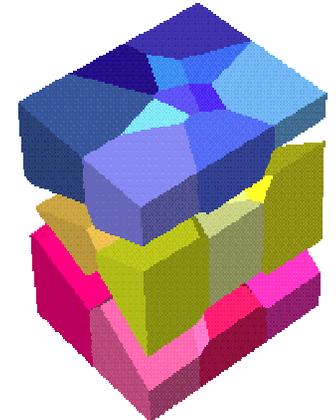
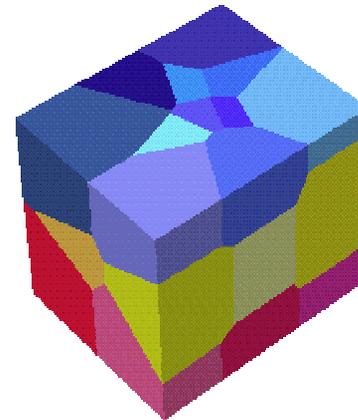
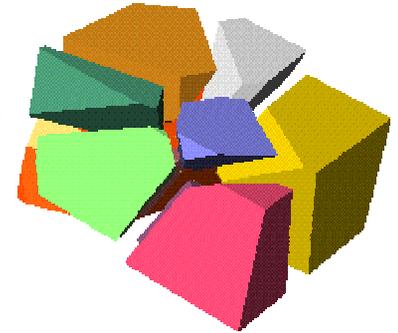
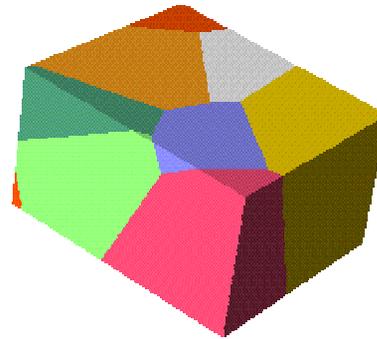


- Modèle 1
- Modèle 2
- Modèle 3
- Modèle 4

FIGURE 0.1. Four interpretations of the same synthetic data set (hand-drawn isopach maps): (a) meandering channel; (b) infill-channel; (c) transgressive sand filling paleo-valleys; (d) barrier bar eroded by a tidal channel. From O. Serra, personal communication.

Reconstruction avec les Diagrammes de Voronoï

- Partition de l'espace en cellules volumiques basée sur la proximité des données
- Coloriage des cellules en fonction des données
- Union des cellules colorées pour construire des régions
- Lissage des frontières ainsi obtenues



Triangulation de Delaunay

Avec les données (points colorés) on calcule une triangulation de Delaunay

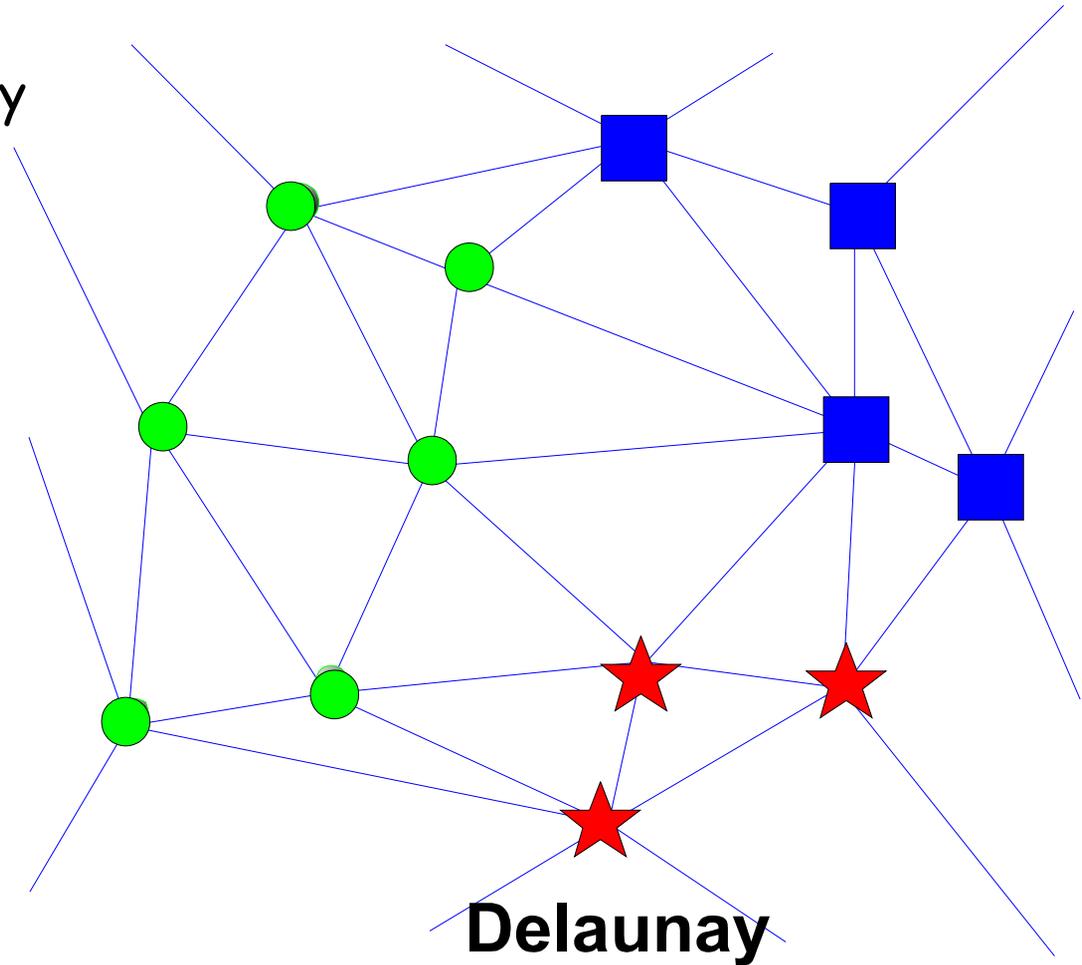
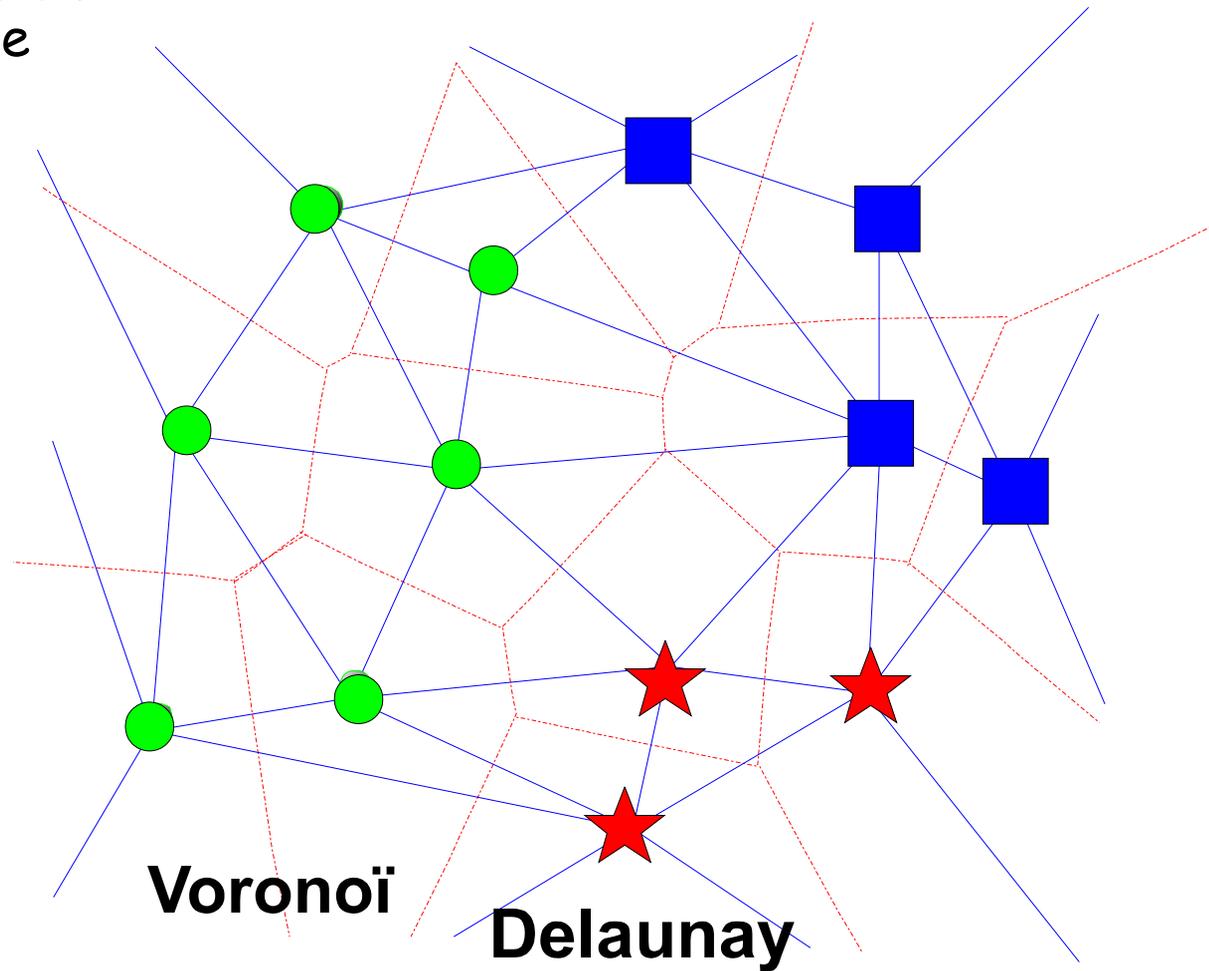


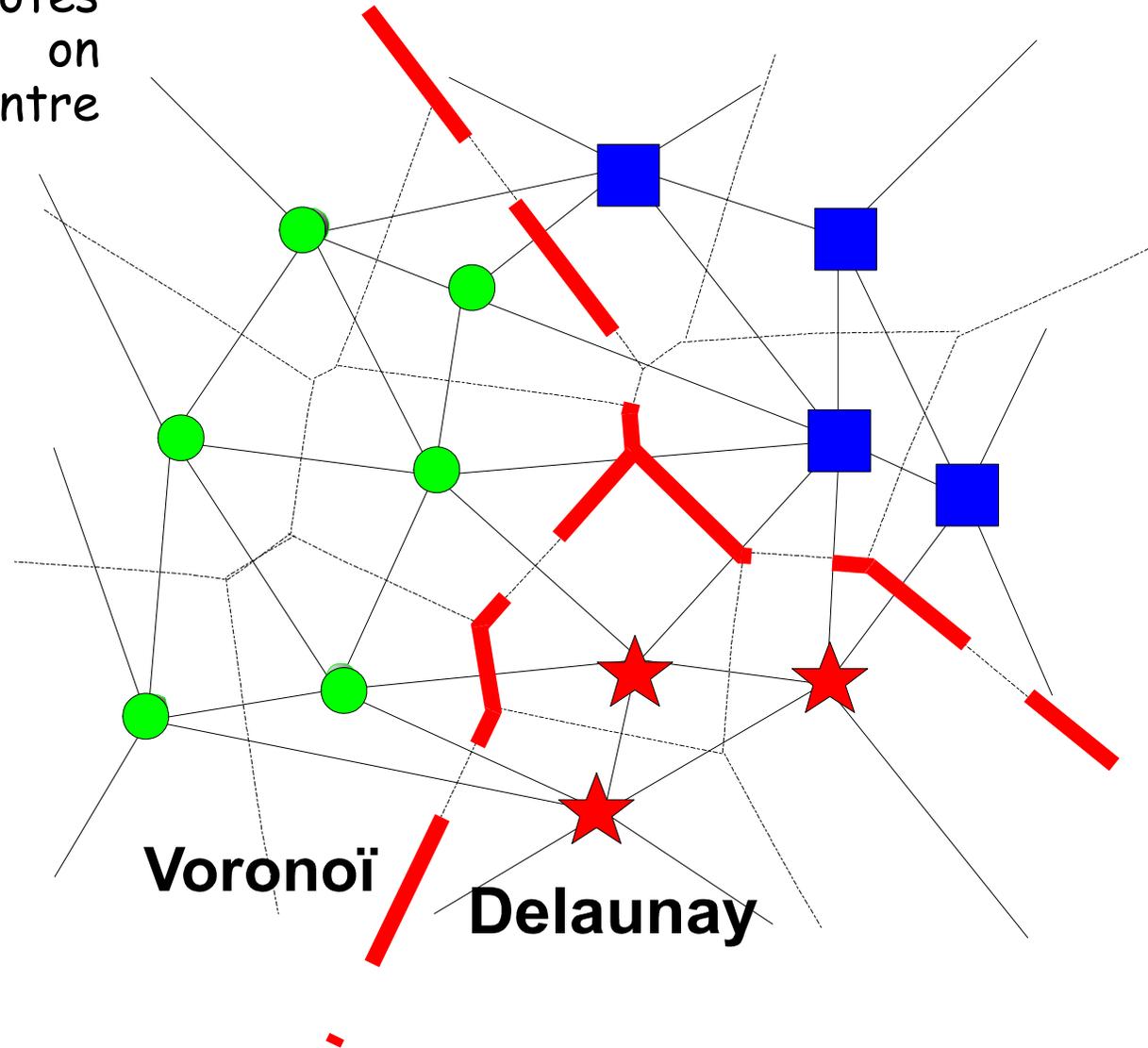
Diagramme de Voronoï

A partir de la triangulation de Delaunay on calcule le Dual (Diagramme de Voronoï)



Limites des formations

En faisant l'union des cotés de couleur identique on construit les limites entre des zones homogènes



Lissage des limites

Union des cercles où les sommets des limites peuvent bouger

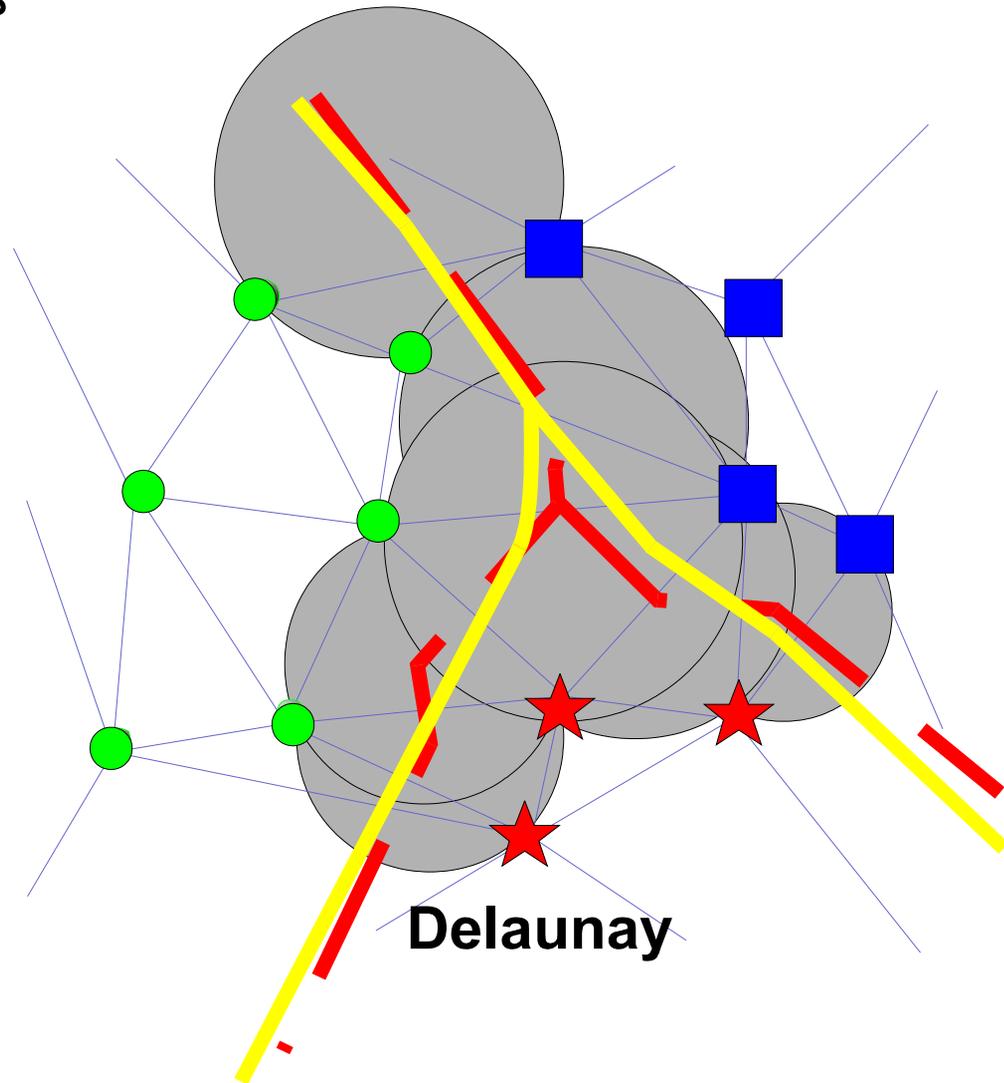
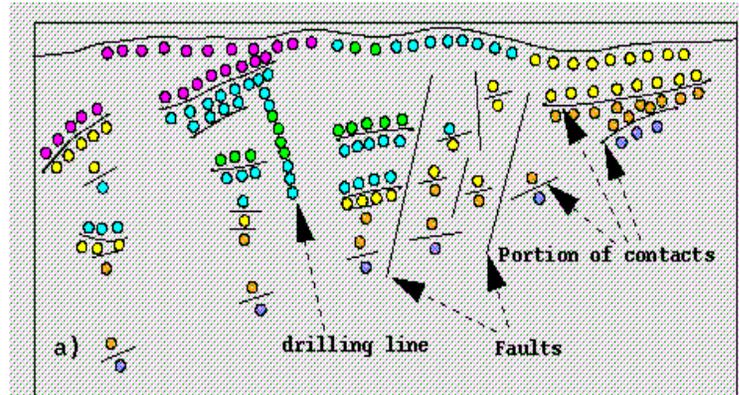
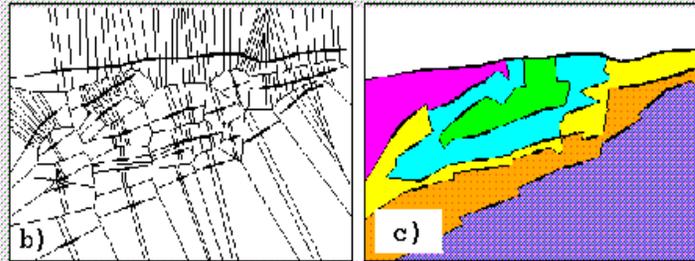


Illustration en 2D du processus

Données

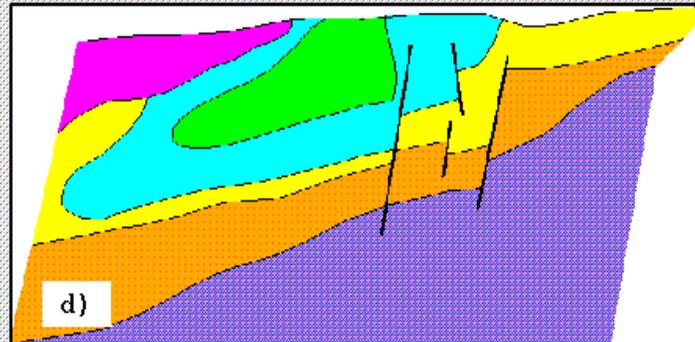


Partition avec
Voronoi



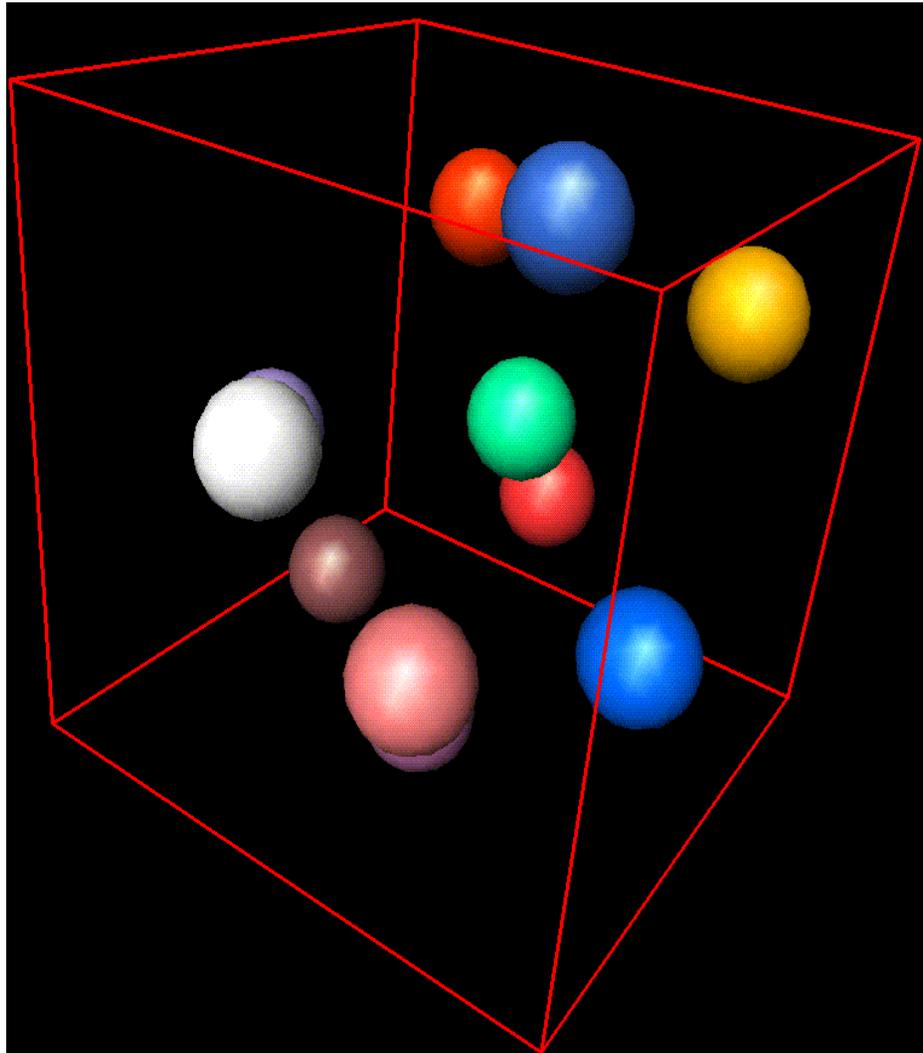
Partition en zone
homogène

Lissage et insertion
des failles

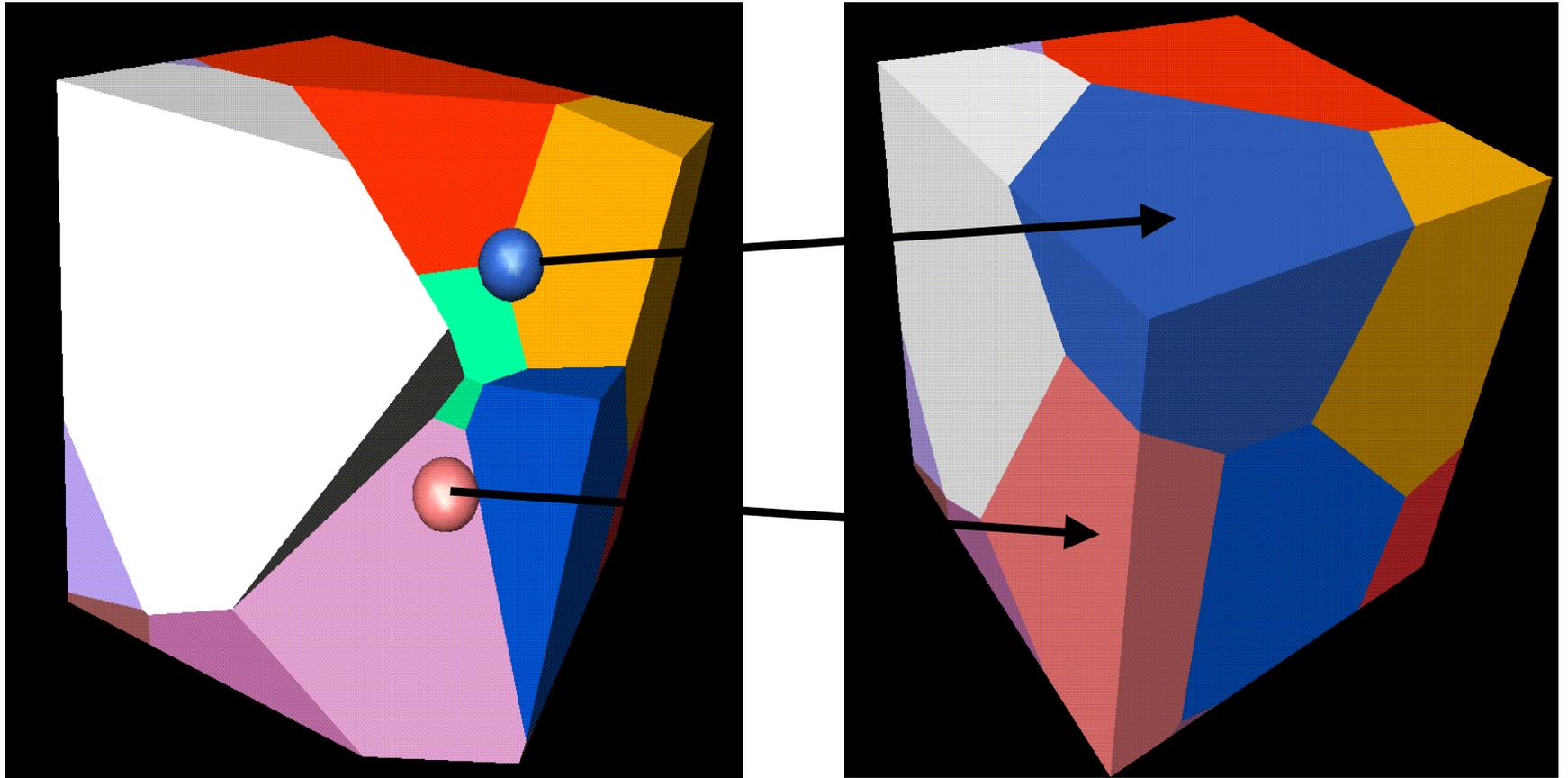


Reconstruction 2d d'une
coupe géologique

Exemple 3D



Reconstruction 3D

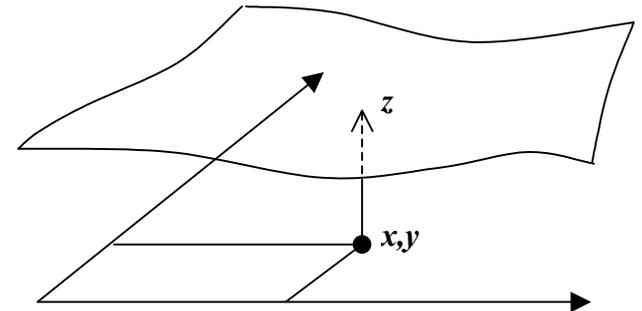


2.2 Les types de surfaces

- Quelques types de surface
 - Les surfaces d'élévation
 - Les surfaces triangulées
 - Les surfaces paramétrées
 - Les surfaces implicites

Les surfaces d'élévation

- Ce sont des surfaces dont la valeur Z est une fonction de x et y : $Z=f(x,y)$.
- Typiquement les Modèles Numériques de Terrain sont de ce type.
 - A un point (x,y) correspond une seule valeur de Z .
- Ces surfaces ne permettent donc pas de représenter des surfaces quelconques avec des replis ou des formes lenticulaires
- Elles sont toutefois pratiques car dans de nombreux cas elles suffisent à représenter les couches géologiques et de plus bénéficient de toutes les méthodes géostatistiques 2D largement implémentées



Les surfaces triangulées

- Ces surfaces sont constituées de points de donnée dans l'espace reliés par des triangles
- Leur structure permet de représenter des formes assez complexes
- Toute la modélisation réside dans le fait d'obtenir la triangulation adéquate et dans les algorithmes de lissage qui vont permettre à cette surface respecter au mieux les données
- **Avantage** : Tout objet peut être approché par des séries de triangles
- **Inconvénient** : les moyens d'y arriver peuvent être assez compliqués..

Les surfaces paramétrées

- Ce sont les surfaces les plus utilisées dans la C.A.O. (Spline, Bézier)
- Ce sont des surfaces qui ont un repère propre (u, v) en 2 dimensions , on les exprime de la façon suivante :
 - A un point u, v du repère de la surface, on associe un point 3d de l'espace
$$F(u, v) = (x, y, z) \text{ avec } x = f1(u, v), y = f2(u, v), z = f3(u, v)$$

Où $f1$, $f2$ et $f3$ sont des fonctions quelconques de u et v
 - En pratique, ce sont des fonctions polynomiales: (exemple :
$$f1(x) = a_0u^0 + a_1u^1 + \dots + a_nu^n + b_0u^0 + b_1u^1 + \dots + b_nu^n$$
)
- Inconvénient : il n'est pas toujours possible de trouver le paramétrage adéquat de surfaces géologiques quelconques lorsqu'on a des données irrégulièrement réparties
- De plus les formes polynomiales sont peu adaptées à la modélisation des surfaces discontinues (surfaces coupées par les failles)

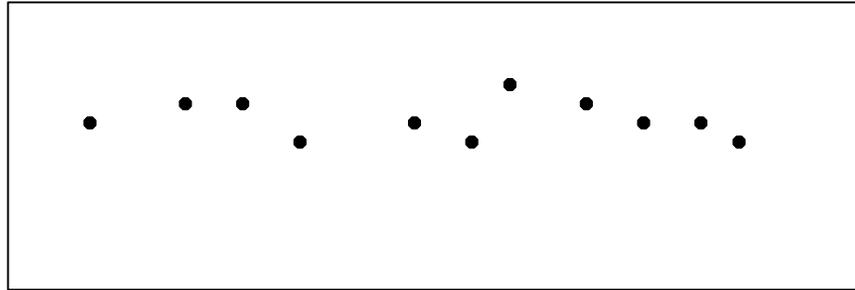
Les surfaces implicites

- Ce sont des surfaces définies par une isovaleur particulière d'un champ scalaire dans l'espace :
 - On a une fonction définie en tout point de l'espace $f(x, y, z) = V$. Une isovaleur particulière est définie comme l'ensemble des points tels $f(x, y, z) = V_0$
 - Si f est continue alors l'ensemble de ces points forme une surface continue
Si au contraire f est discontinue alors l'ensemble de ces points forme une surface discontinue
- La modélisation va consister à :
 - trouver une expression de f de telle sorte que f soit calculable en tout point (méthode d'interpolation)
 - représenter des surfaces isovaleurs de cette interpolation (les rendre explicites)
 - Exemples:
 - L'équivalent en 2D est par exemple le dessin de courbes de niveau ou courbes isoteneurs ...
- Ces méthodes sont intéressantes du fait de leur généralité et de leur caractère automatique. Elles permettent de plus de passer facilement à une représentation volumique des corps géologiques.

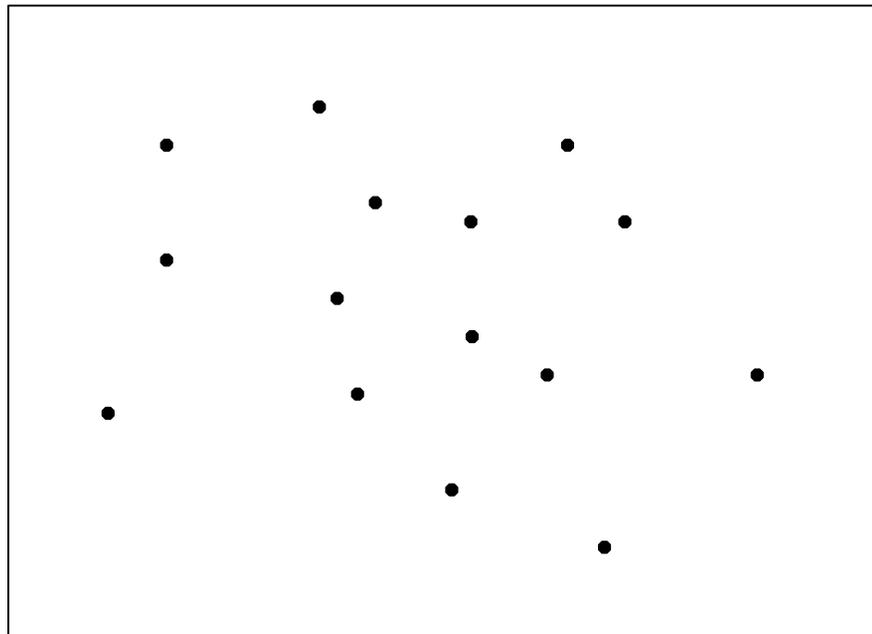
Les surfaces implicites

- Dans ce qui suit, on se focalise sur un exemple de méthode d'interpolation basée sur ce principe

Exercice



- Tracer l'interface passant par ces points.

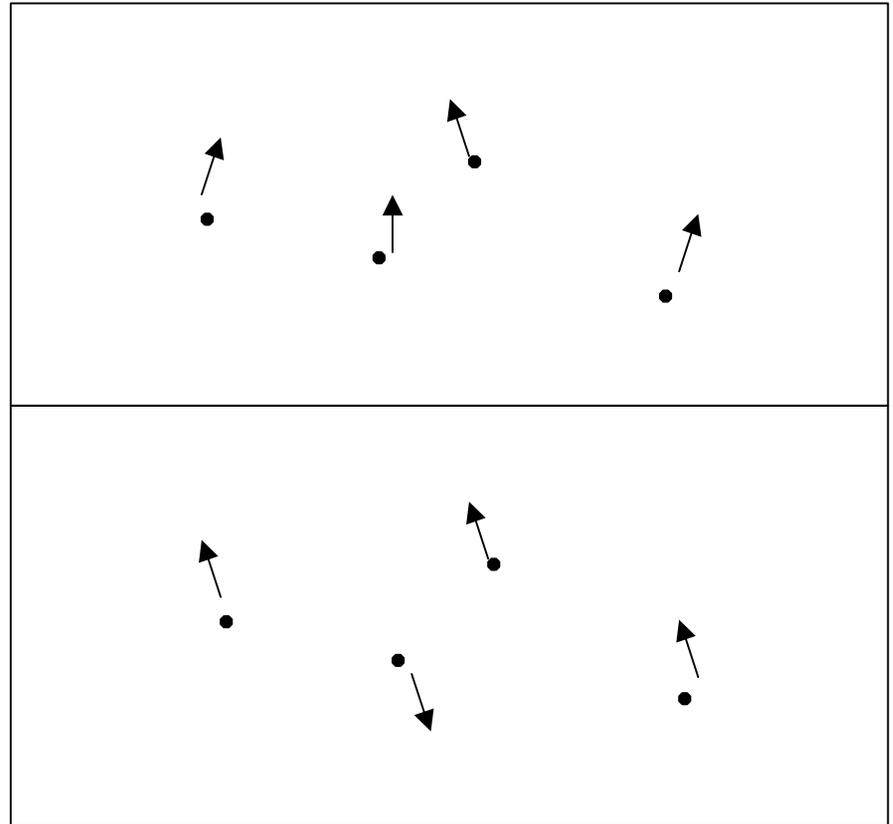


Difficultés

- En fait il faut pouvoir disposer d'une information en plus qui renseigne sur l'intérieur et l'extérieur du volume dont l'interface est la frontière
- Les données structurales peuvent fournir un guide

Exercice (suite)

- On a observé une interface géologique à différents endroits reportés sur une coupe verticale
- Plus des données directionnelles (normales aux données structurale indiquant la polarité de la couche)
- Tracer l'interface géologique probable qui respecte ces observations



2.3 Traitement des données structurales par surfaces implicites

- Objectif
 - L'objectif de cette partie du cours est de fournir les éléments de base qui permettent la manipulation informatique des données structurales (données sur l'orientation des structures géologiques)
 - Ceci concerne :
 - La représentation numérique des données structurales
 - Les traitements élémentaires
 - la représentation graphique 2D et 3D des données

Méthode d'interpolation

- Problème
- Méthode
- Illustration
- Exemple d'application à des données de sondage

Méthode d'Interpolation, le Problème

- La position des interfaces est connue à certains endroits
- Des données d'orientation sont également disponibles
- Elles ne sont pas nécessairement situées sur les interfaces mais échantillonnent l'anisotropie principale de la formation en question (stratification, schistosité, foliation)
 - Les données d'orientation doivent être directionnelles
 - Ce qui signifie que la polarité des structures doit être connue, elles indiquent vers où sont dirigés l'intérieur et l'extérieur de la formation par rapport à la donnée d'orientation (haut, bas pour une série sédimentaire)

Méthode d'Interpolation, le Problème

- Les interfaces à modéliser appartiennent à une famille de surfaces corrélées entre elles, suivant toutes le même champ de foliation
 - le cas dans beaucoup de situations géologiques.
 - dans les bassins sédimentaires on peut considérer un parallélisme général entre limites chronostratigraphiques et plans de stratification
 - dans les granites les structures internes sont généralement utilisées pour déterminer la forme des plutons
 - dans les terrains métamorphiques on suppose que les limites entre unités montrent un fort parallélisme avec les foliations métamorphiques

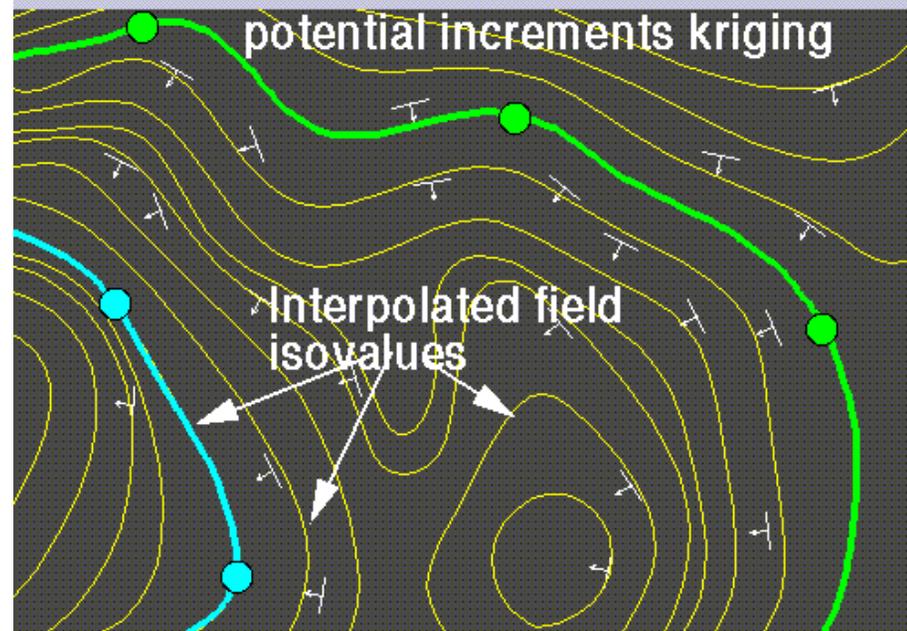
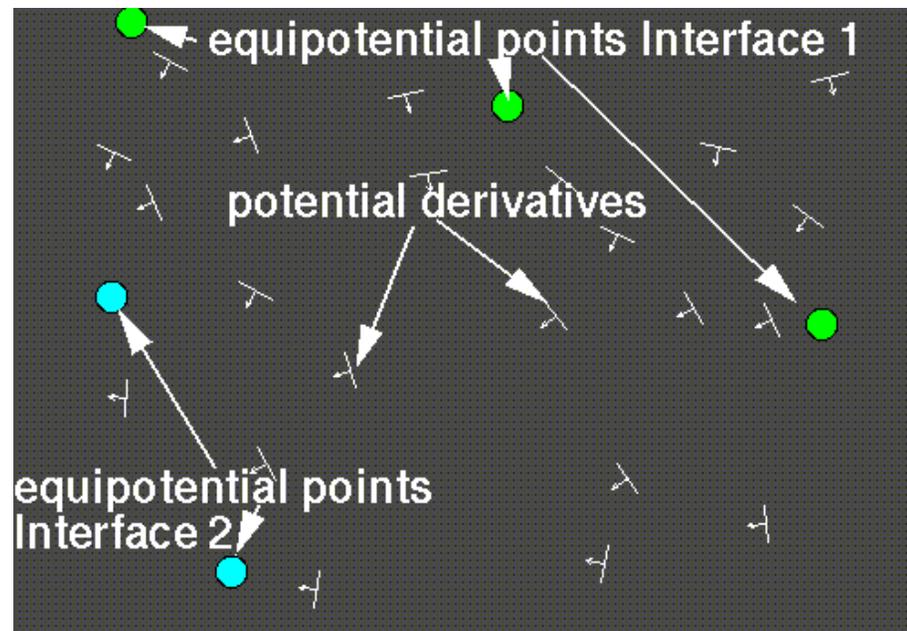
Méthode d'Interpolation, le Problème

- les discontinuités (failles) sont connues à certains endroits
- Le problème est de trouver les surfaces qui respectent globalement le champ directionnel, les failles connues et qui passent par les points d'interfaces connus
- Enfin la méthode doit être assez générale pour pouvoir modéliser des interfaces de forme quelconque et pas seulement des surfaces du type $z = f(x,y)$

Méthode d'Interpolation, la méthode

- On se ramène à l'interpolation d'un champ scalaire U dans l'espace pour lequel:
 - les points de passage d'un même interface ont la même valeur
 - les données directionnelles représentent le gradient
 - Les interfaces sont finalement représentés comme des isolignes (2D) ou des isosurfaces (3D) du champ interpolé

Méthode d'Interpolation



Méthode d'Interpolation

- En pratique le champ scalaire est assimilé à un champ de potentiel
 - Du fait que le champ de potentiel est défini à une constante près
 - Sa valeur à l'origine est définie arbitrairement
 - on interpole alors des accroissements de potentiel.

Méthode d'Interpolation

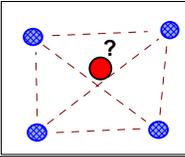
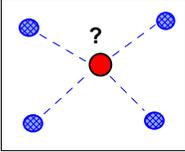
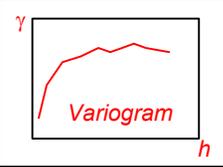
- Les données sont définies comme suit
 - une donnée d'orientation est traduite en une ou deux dérivées partielles :
 - La dérivée partielle de U dans la direction de la foliation (2D) ou dans deux directions du plan de foliation (3D)
 - La donnée de polarité permet de compléter le gradient de U , i.e. donne la valeur de la dérivée partielle dans la direction orthogonale à la foliation
 - Quand on sait que deux points appartiennent à la même interface, ceci est traduit par le fait que l'incrément de U entre ces deux points est égal à 0

Méthode d'Interpolation

- Le champ de potentiel est ensuite estimé en tout point par cokriging i.e. en utilisant des estimateurs linéaires
- L'algorithme est complètement décrit par Lajaunie et al. (1997)
 - Noter que l'estimation dépend de la fonction de covariance du champ de potentiel
 - En pratique celle-ci n'est pas connue
 - Dans ce cas d'étude nous utilisons une covariance cubique
 - Des variances d'erreur peuvent être introduites pour prendre en compte des incertitudes sur les données d'orientation

Kriging best linear unbiased estimator

- MINIMIZES THE ERROR VARIANCE
- UNBIASED
- TAKES INTO ACCOUNT:

number of samples and quality of the data for each sample	uncertainties
location of the data within the field	
distances between the data and the area of interest	
spatial continuity of the interpolated variable	
other relevant information	seismic data drift gradient

Méthode d'Interpolation

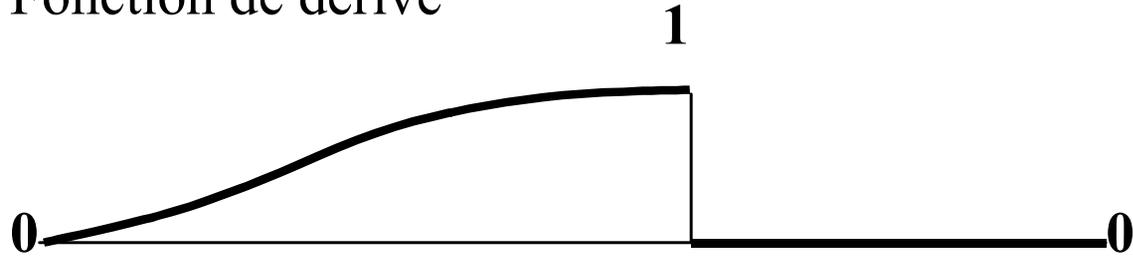
- Les isolignes (en 2D) ou isosurfaces (en 3D) sont finalement calculées
 - Par construction elles respectent simultanément les points connus et les données d'orientation
- Pour prendre les failles en compte, on introduit une fonction spatiale discontinue dans le système de cokrigeage, comme fonction de dérive
- Pour chaque faille la fonction modélise la forme d'influence de la faille

Méthode d'Interpolation

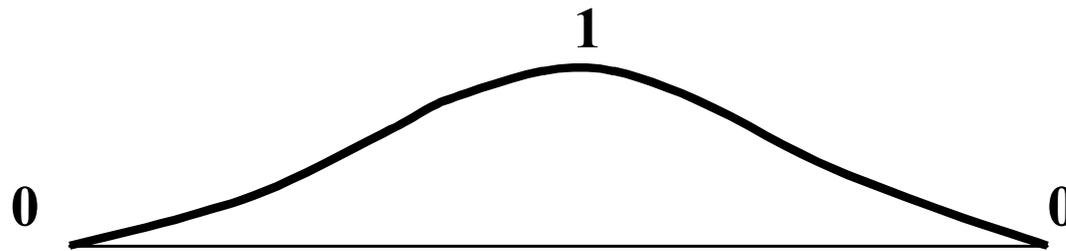
- Sa valeur est 0 d'un côté de la faille et décroît de 1 à 0 de l'autre coté en fonction de la distance à la faille et la distance au bord de la faille
 - Prendre en compte un type donné de faille implique un choix pertinent pour cette fonction
 - » Par exemple si une translation rigide est supposée, la fonction décroîtra seulement en fonction du bord de la faille.

Méthode d'Interpolation

Fonction de dérive



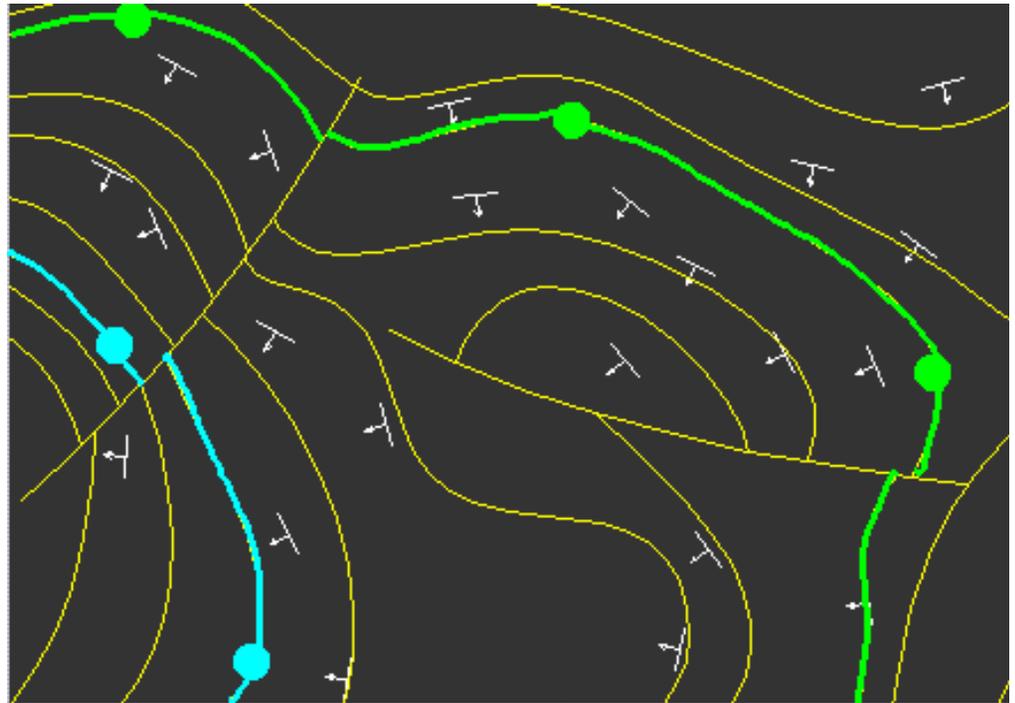
Profile transversal



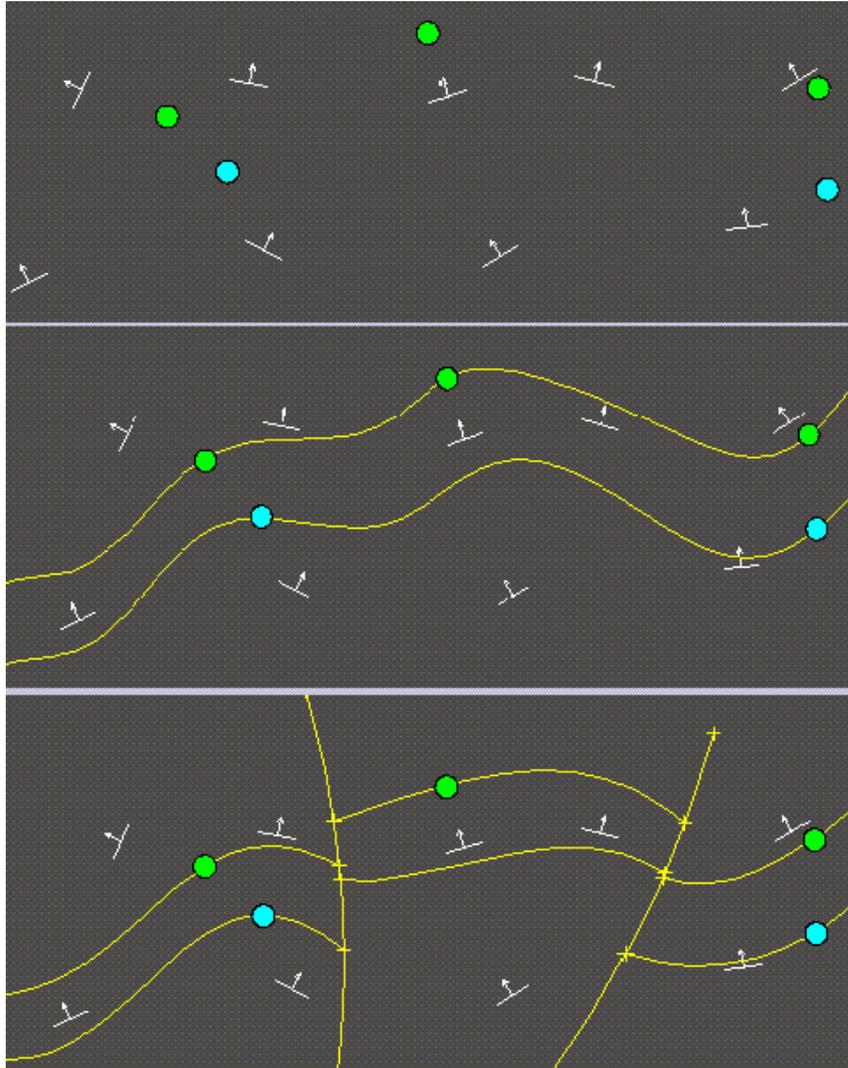
Profile longitudinal

Méthode d'Interpolation

- Sur la figure on a ajouté 2 failles
- On voit que le champ est interpolé de telle manière que le déplacement relatif décroît progressivement aux bords des failles



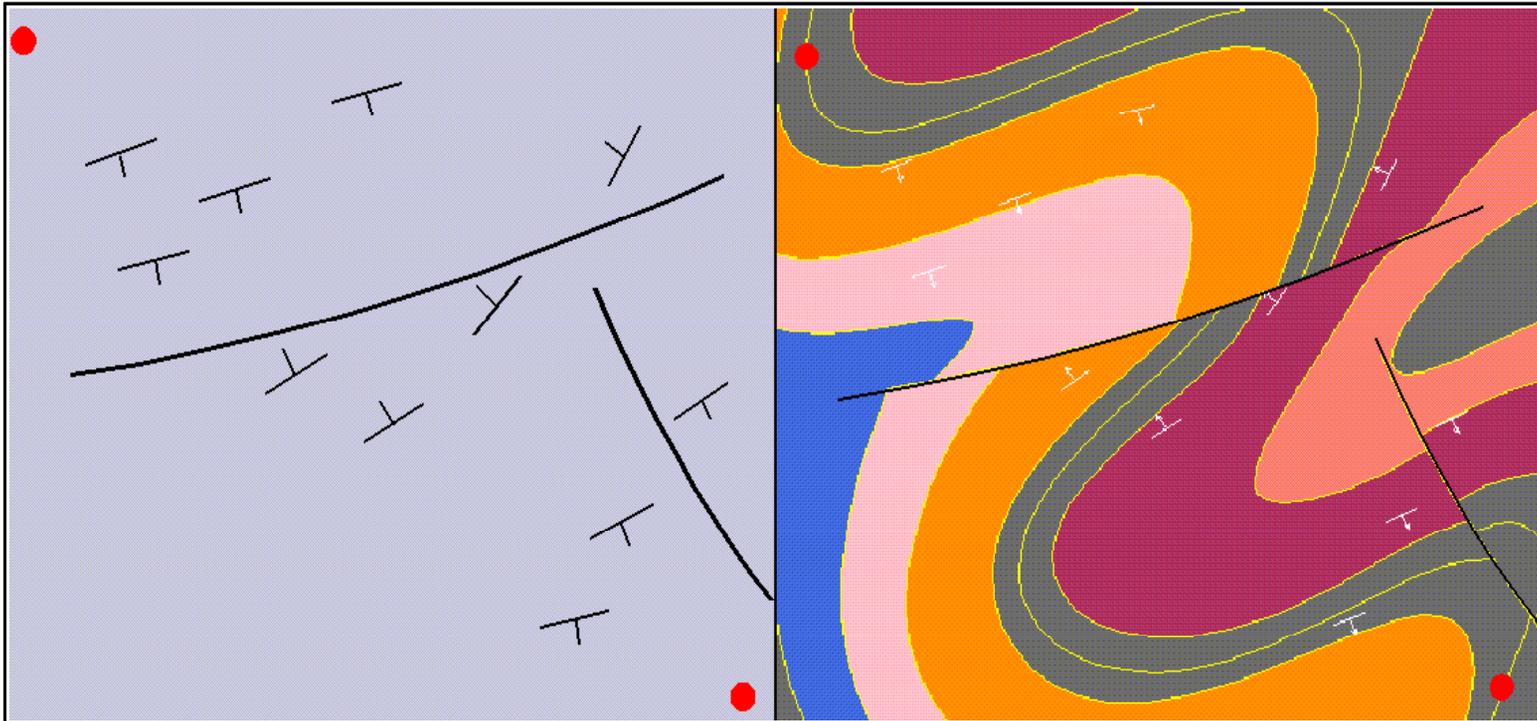
Méthode d'Interpolation



- L'exemple simple sur la figure montre que les résultats peuvent être sensiblement différents selon que l'on prenne en compte ou non les failles
- Il montre de plus que le manque d'information sur l'une des interfaces est compensé par l'information sur les autres interfaces

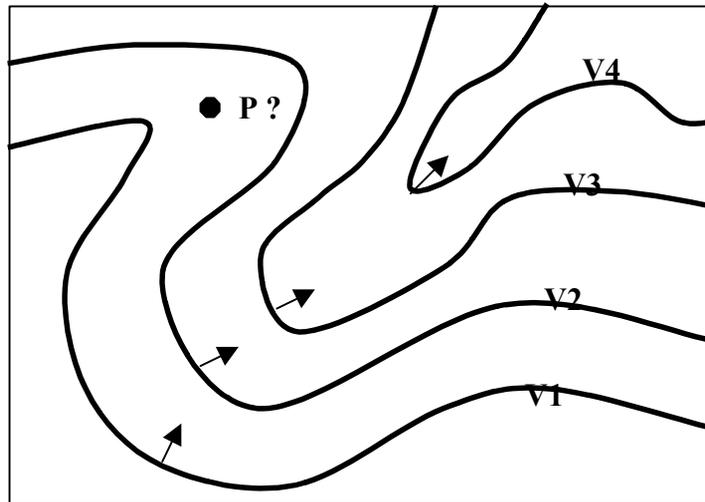
Méthode d'Interpolation

- La modélisation de structures plus complexes telles que des plis couchés ou intrusions granitiques, surfaces qui ne peuvent être modélisées par des surfaces d'élévation du type $z=f(x,y)$ est possible par l'introduction de la polarité sur les données d'orientation



Détermination de la formation dans un champ de potentiel

- Grâce aux données de polarité, dans un champ interpolé il est toujours possible de déterminer la formation dans laquelle on se situe en comparant la valeur du potentiel en un point et les isovaleurs des différentes interfaces

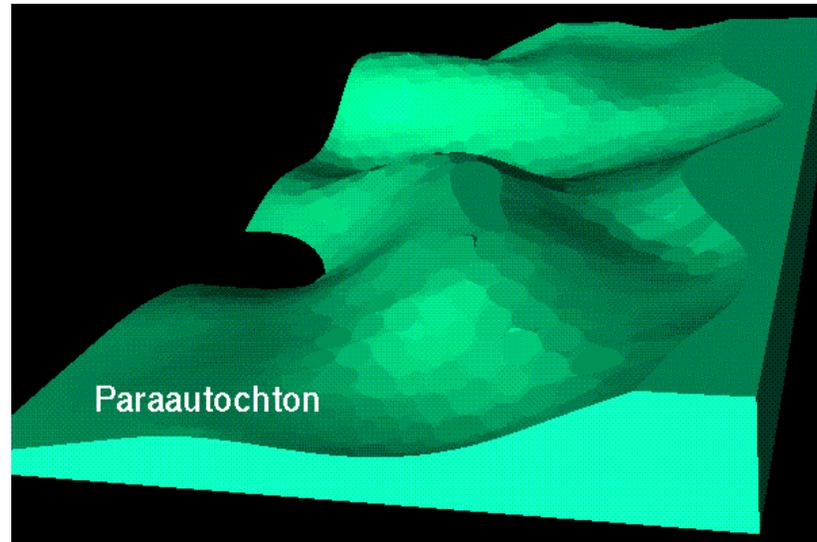
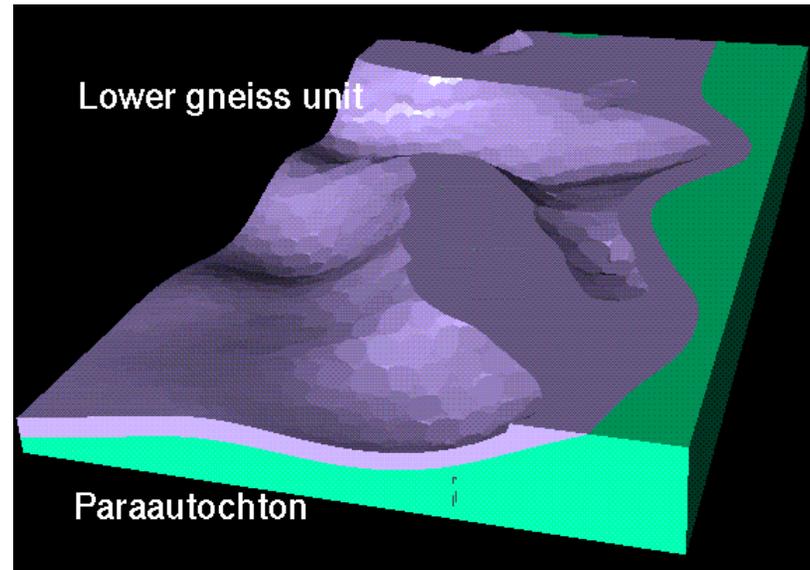
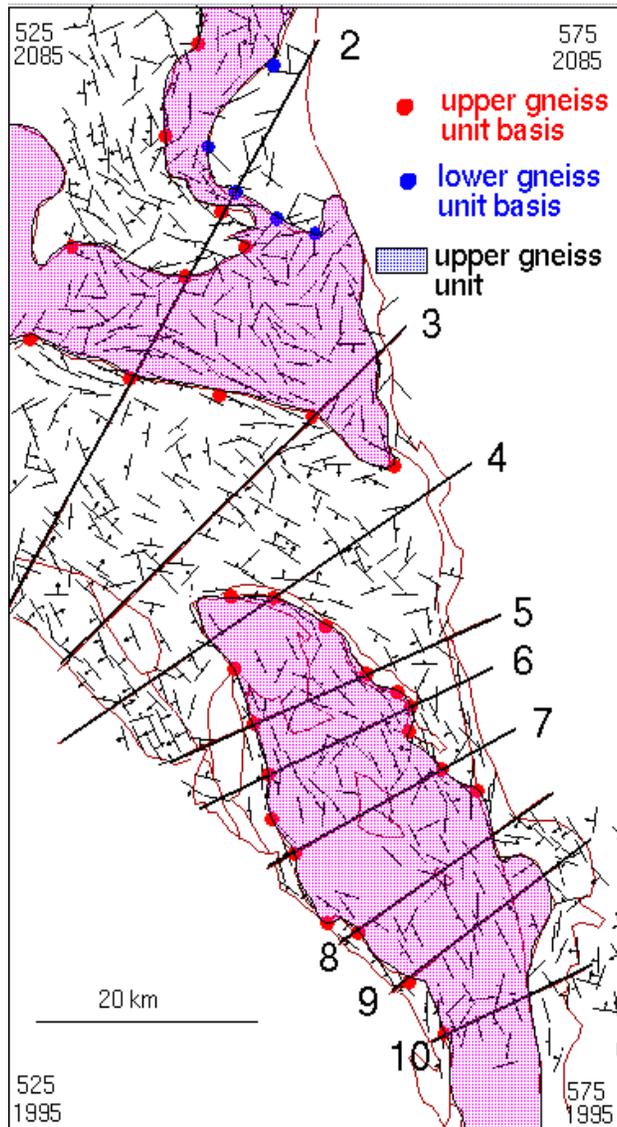


Détermination de la formation dans un champ de potentiel

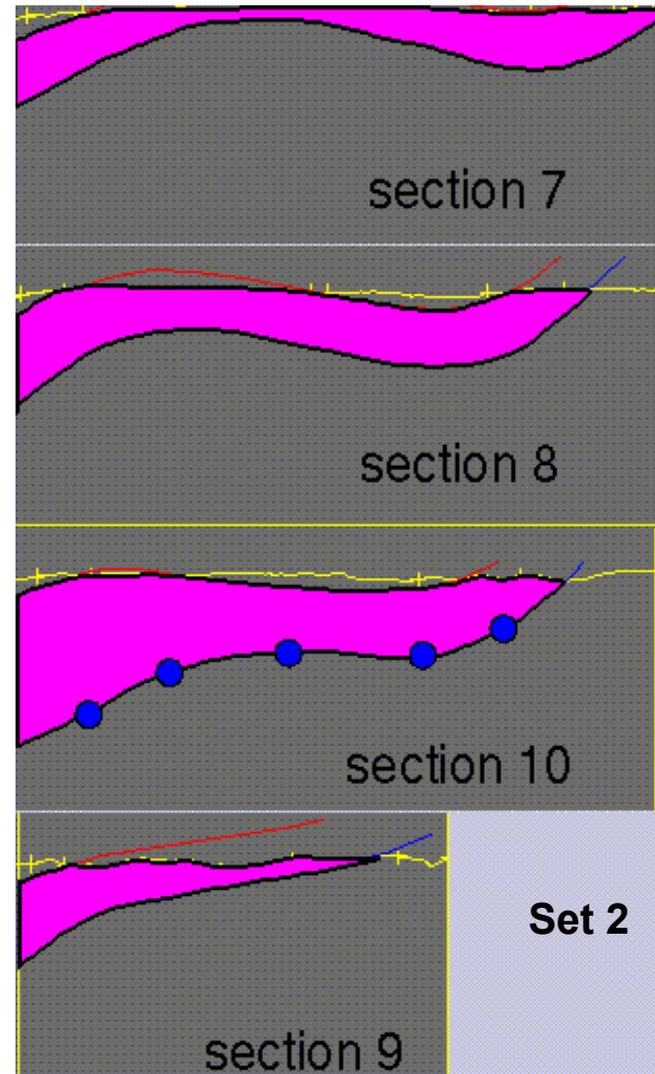
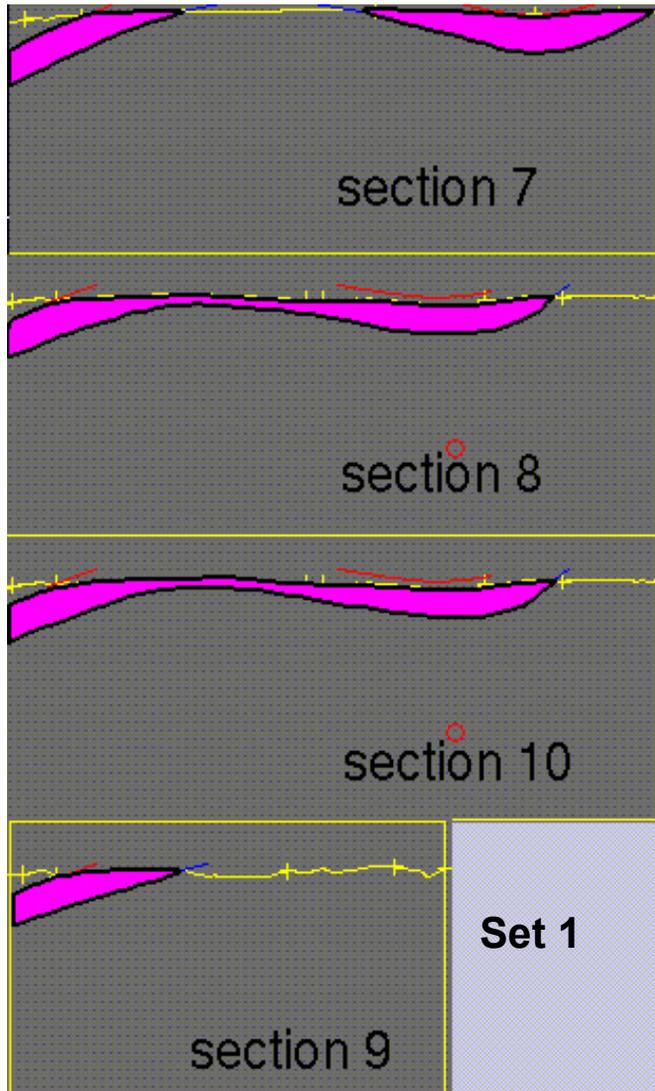
- Soient v_1, v_i, \dots, v_n les valeurs croissantes de potentiel correspondant aux différentes isovaleurs des n interfaces représentant les toits des formations f_1, \dots, f_n
- Il existe une formation de plus dans la pile que d'interfaces à modéliser (f_{n+1})
 - Soit $V(p)$ la valeur du potentiel en un point quelconque
 - Si $V(p) \leq v_1$ alors $p \in f_1$
 - Si $v_i \leq V(p) \leq v_{i+1}$ alors $p \in f_{i+1}$
 - Si $V(p) > v_n$ $p \in f_{n+1}$

Modélisation à partir de données de terrain

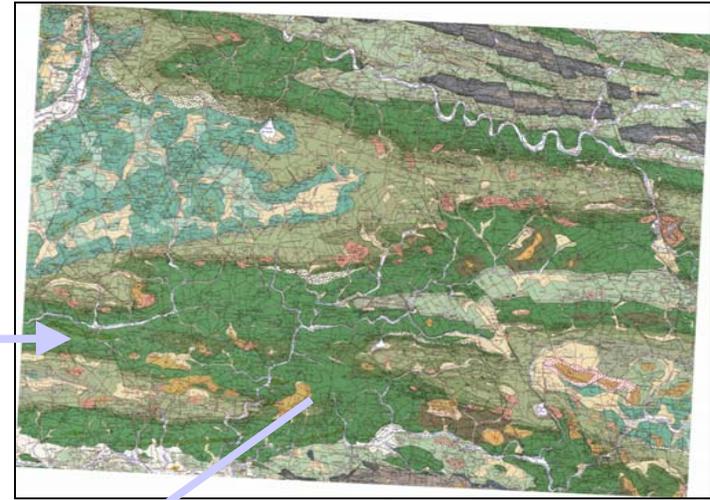
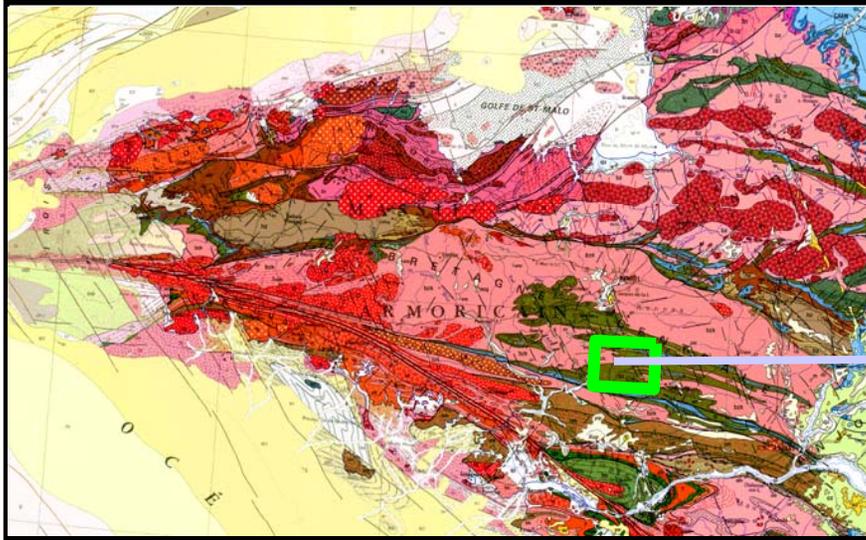
Tulle anticlinal



L'édition du modèle suivant différentes coupes

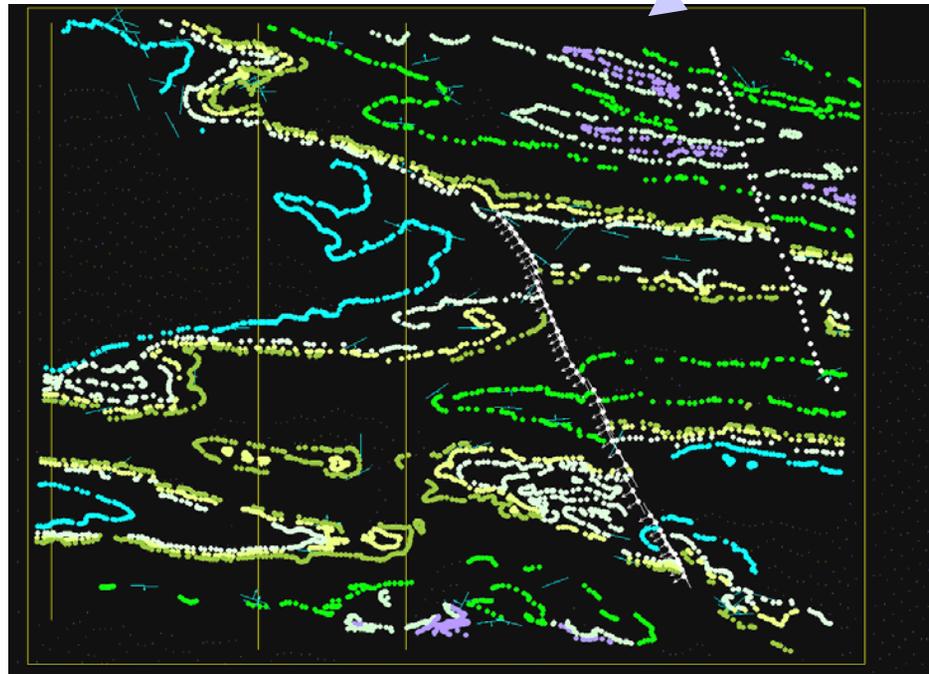


De la carte géologique au 1/50000 au modèle 3D

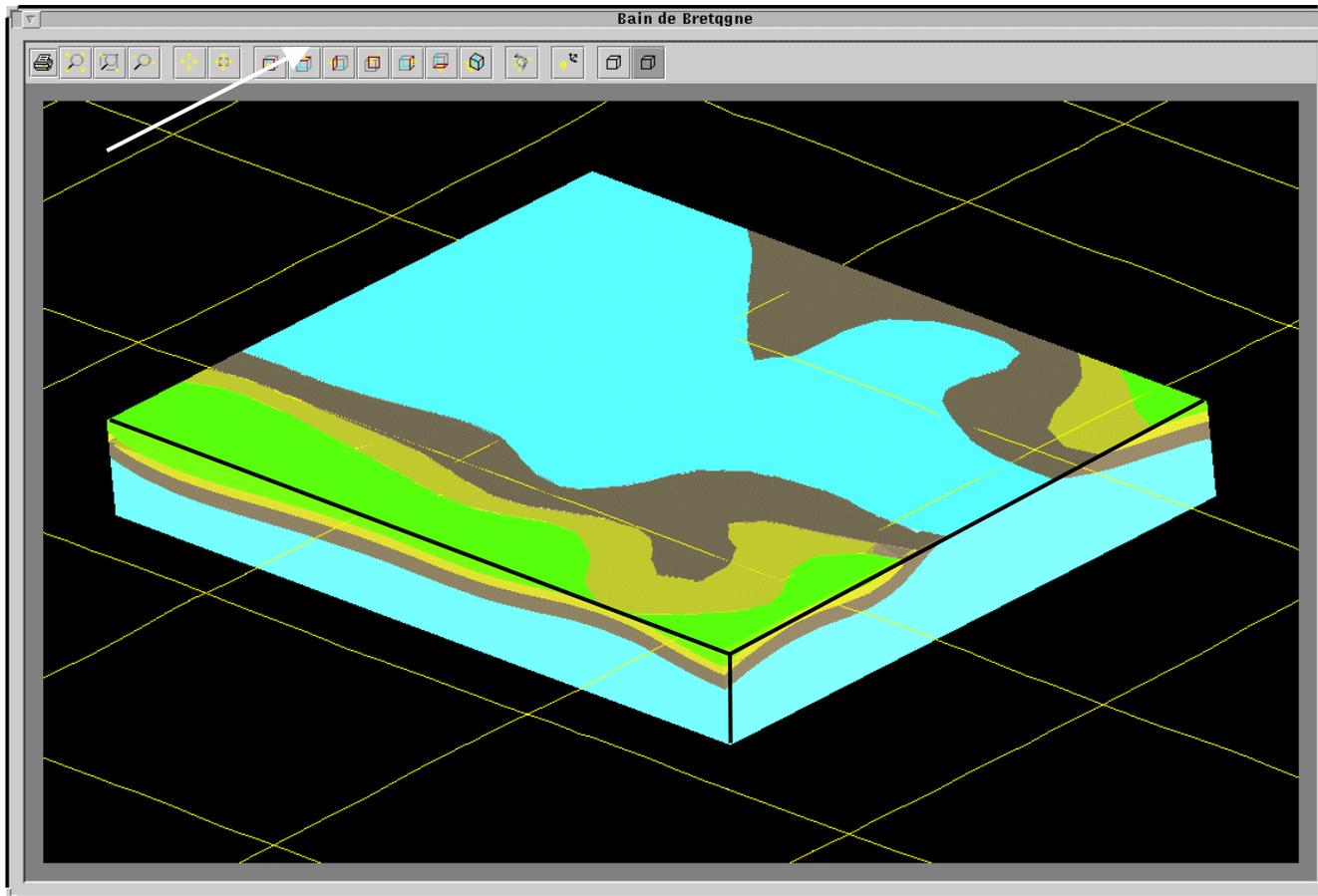


~20 km

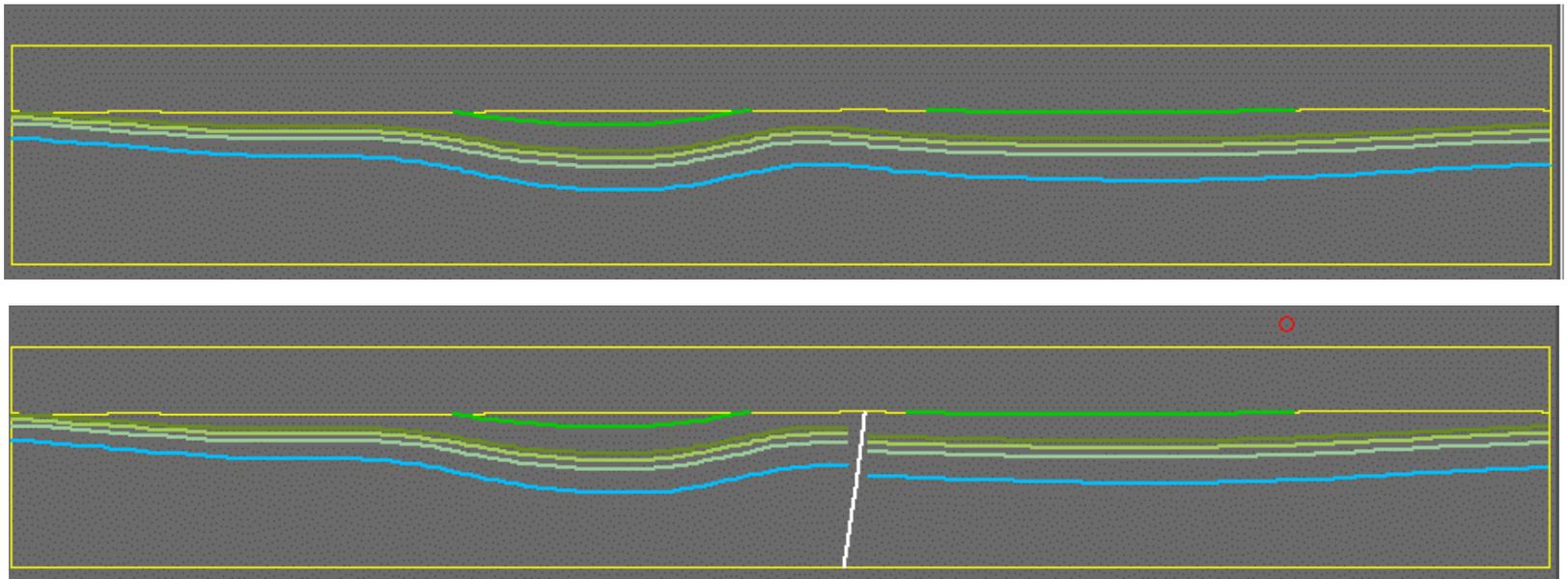
~30 km



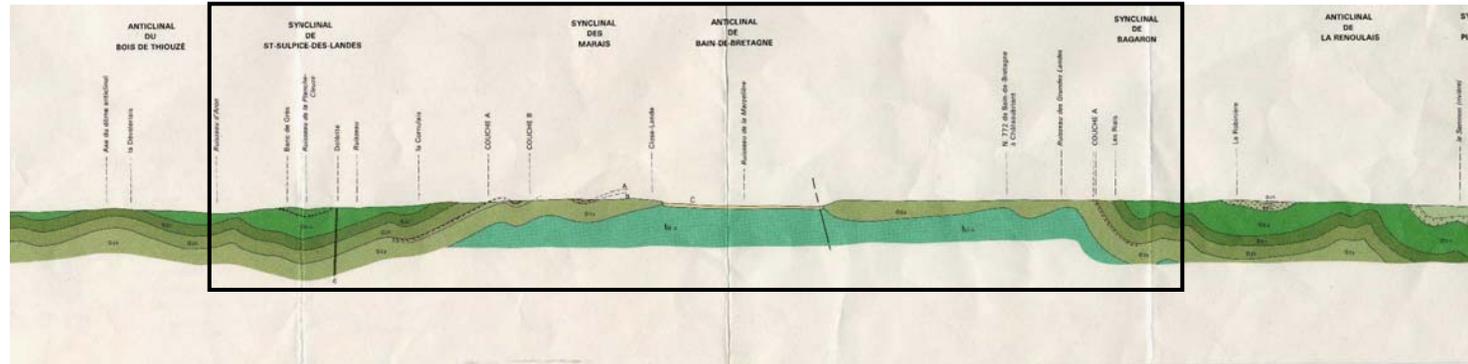
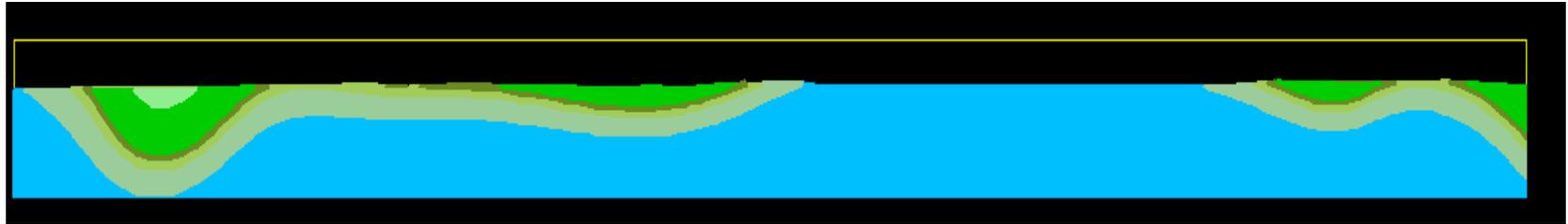
La partie centrale du modèle



Une coupe E-W dans le modèle

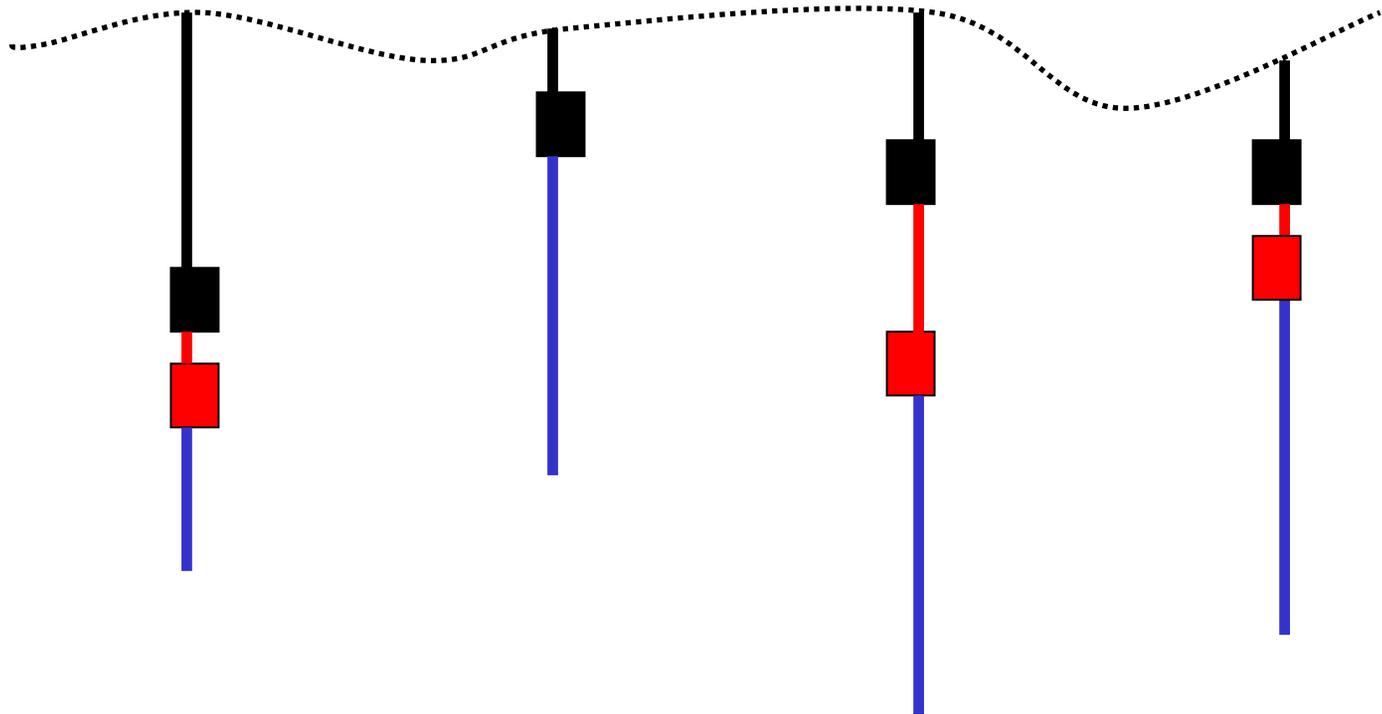


Une image de la structure générale sans information sur la profondeur

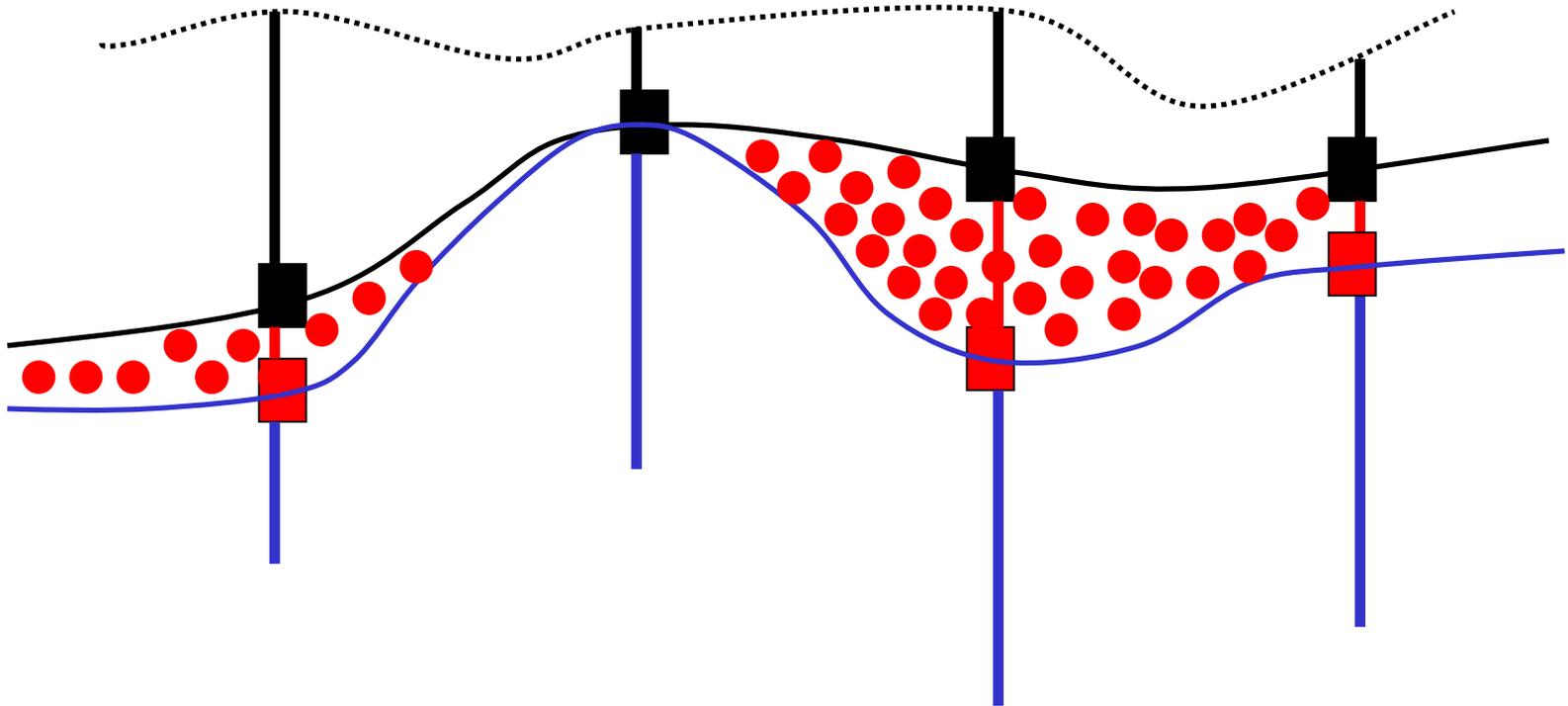


2.4. Les surfaces ont une histoire, une pile lithologique

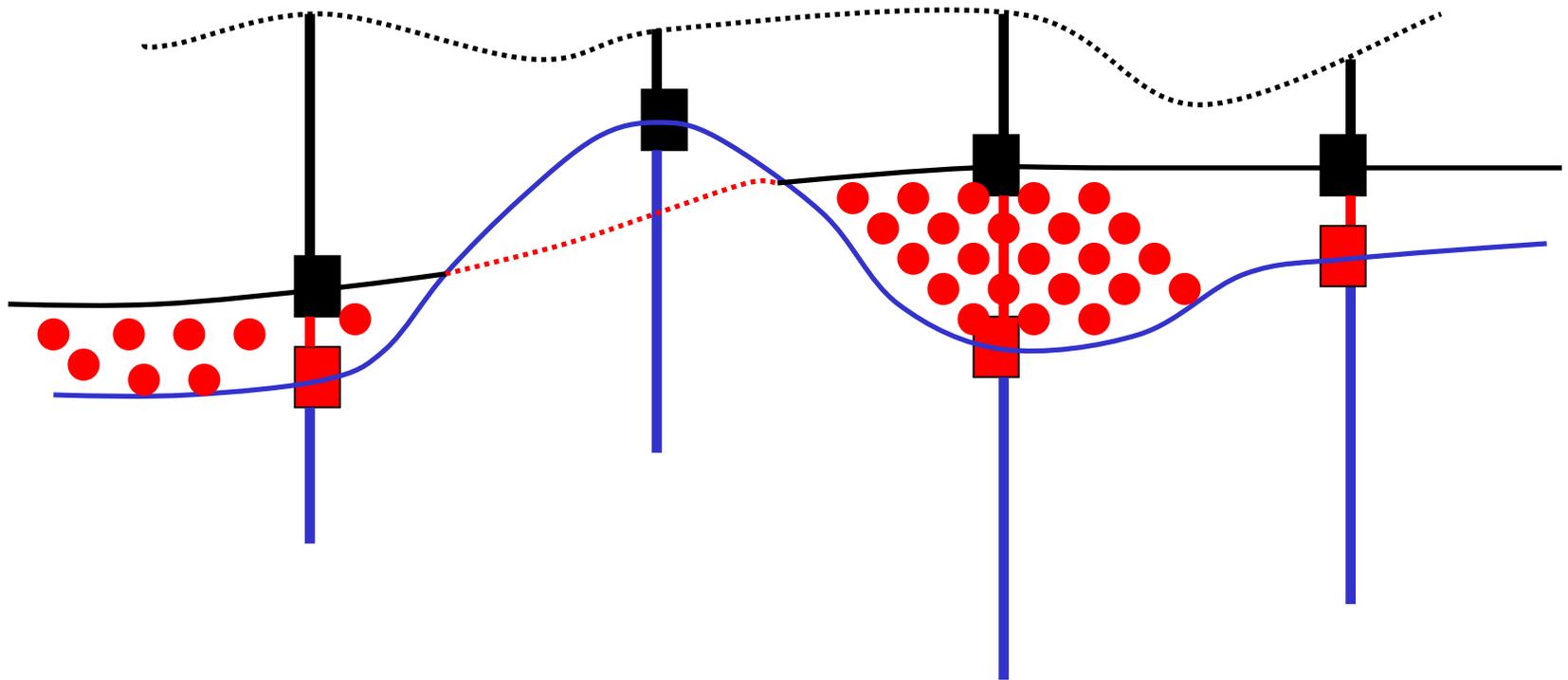
- Données de terrain (sondages)



Un modèle possible



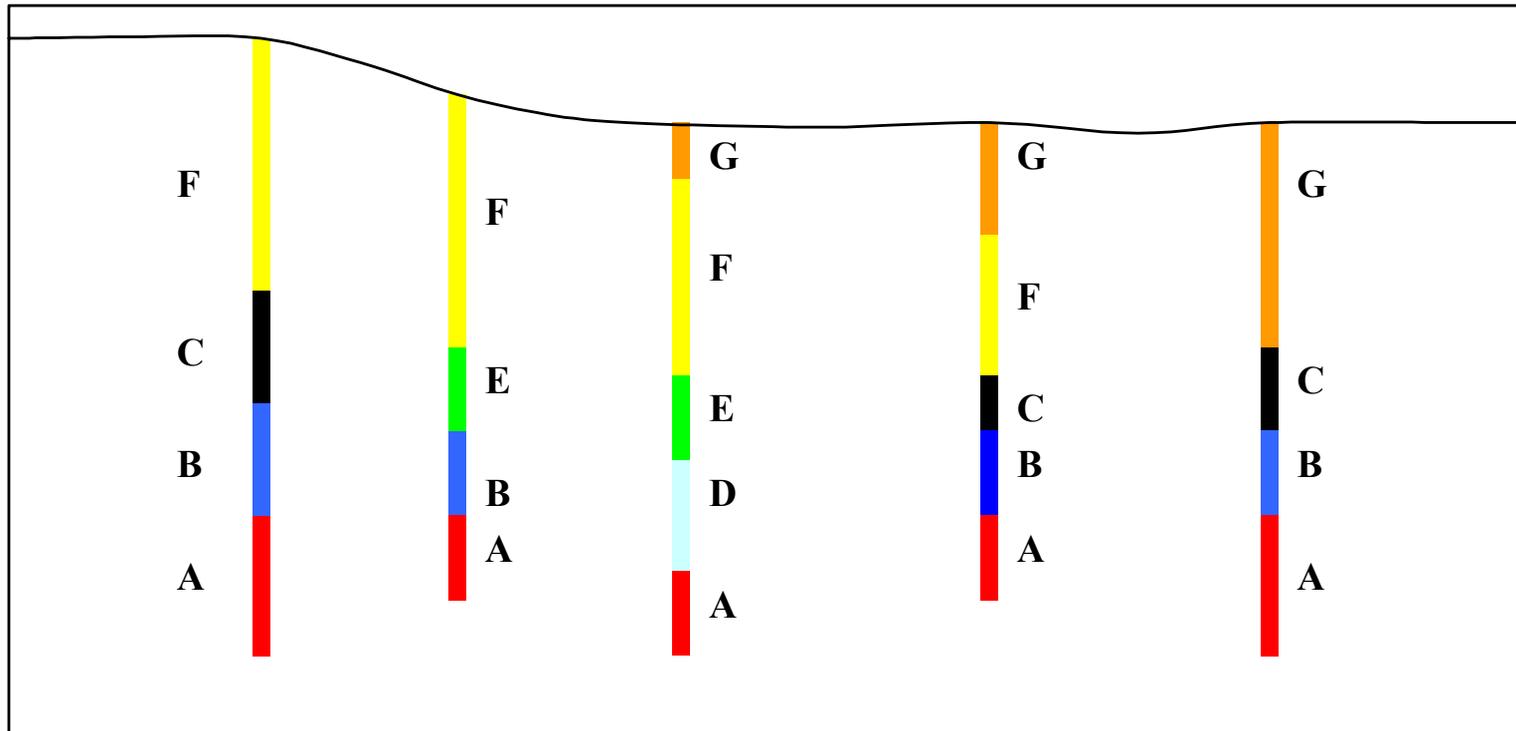
Un autre modèle possible



Exercice

Illustration du problème : Exercice.

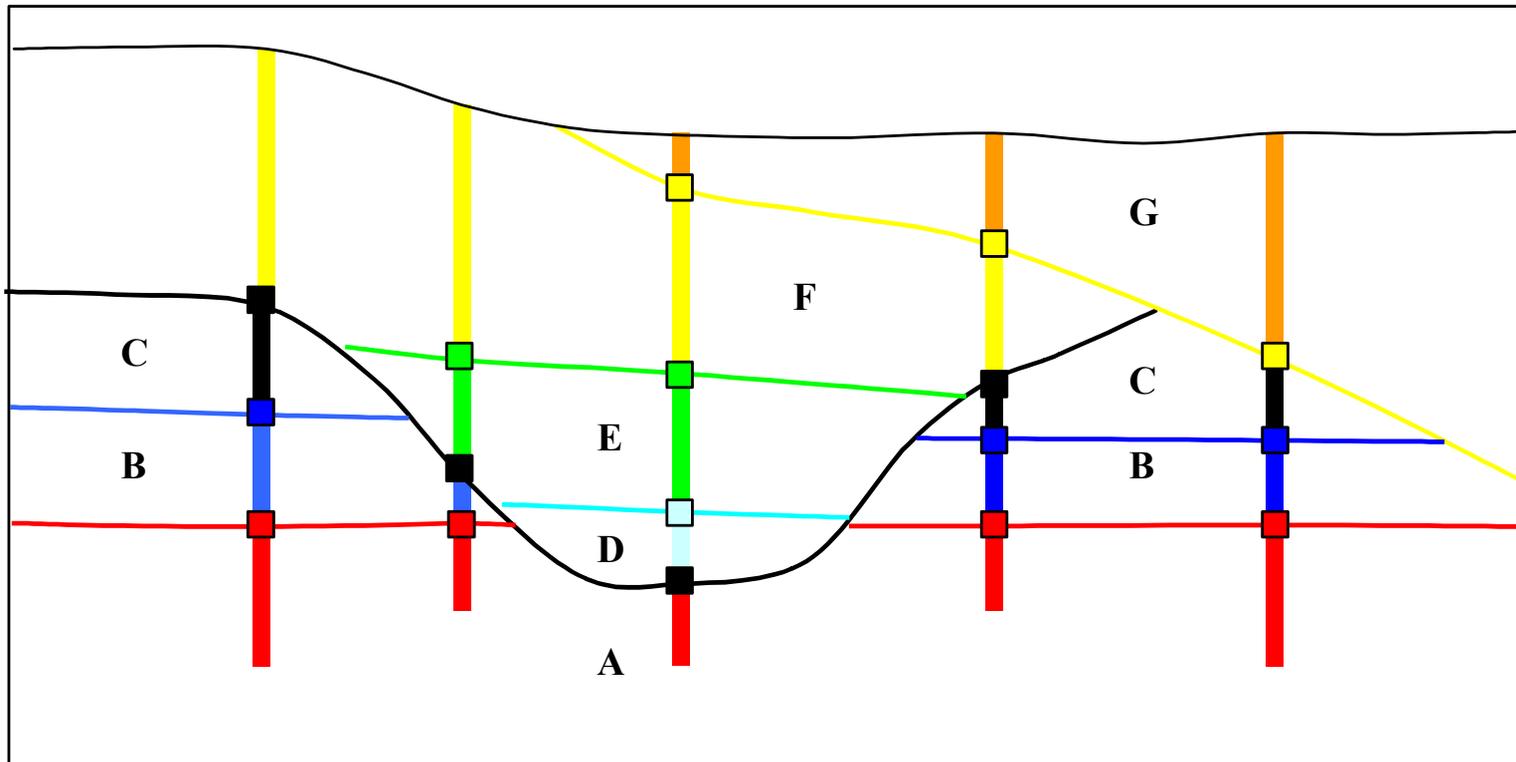
Différentes formations géologiques A, B, C, D, E, F, G, on été traversées par des sondages.
Dessiner une coupe géologique possible à partir de ces données



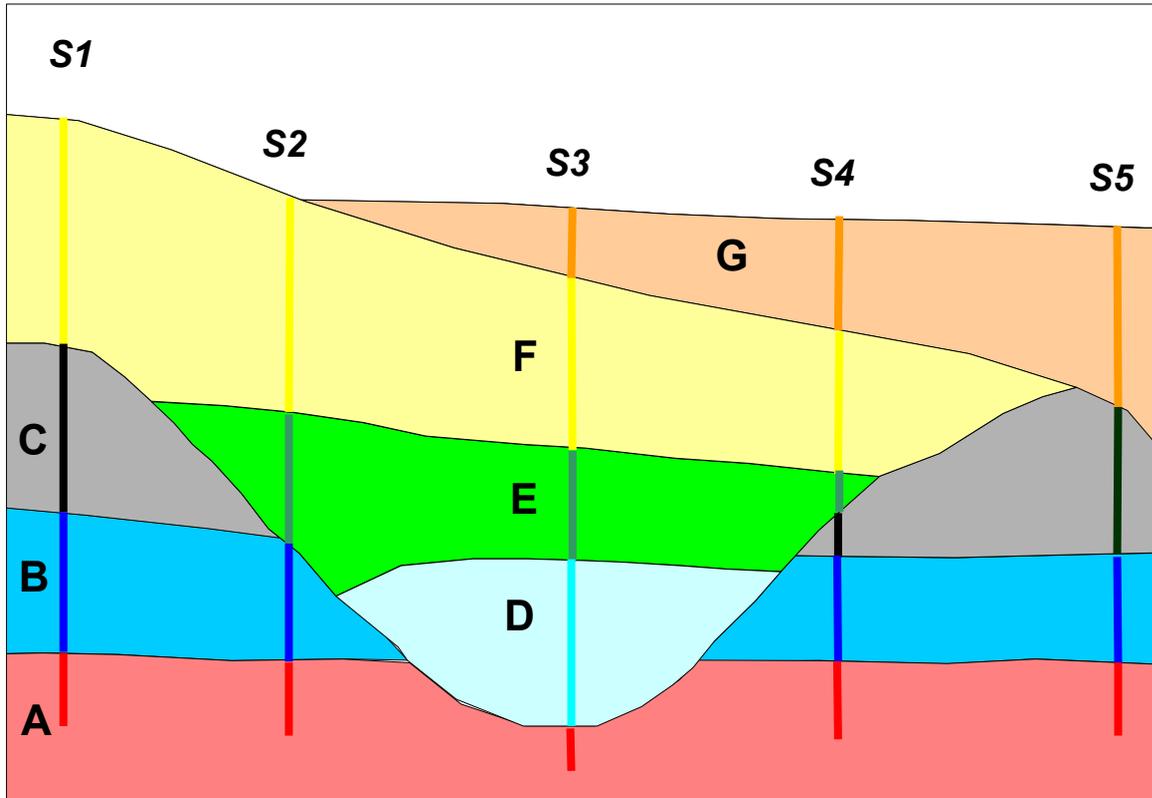
Une Solution possible

- En l'absence d'hypothèses supplémentaires, sur la nature des formations, leur chronologie, et leurs relations il est difficile de dessiner une coupe qui ait un sens géologique :
 - Par contre si l'on fournit une chronologie et une suite de relations sur les formations on peut déterminer des toits de formation pertinents
 - Le toit d'une formation ne correspond pas nécessairement au sommet de la passe de cette formation rencontrée dans le sondage
- Si l'on donne la suite de relations :
 - A : Erod
 - B : Onlap
 - C : Erod
 - D : Onlap
 - E : Onlap
 - F: Erod

Une solution du tracé des interfaces



Remplissage des polygones par les formations
hypothèse: interfaces = toits



Pourquoi de telles différences?

- Dans un sondage, les interfaces rencontrées ne représentent pas nécessairement la position historique du toit (ou de la base) des formations qu'elles séparent
- Il est donc indispensable de resituer chaque interface dans l'histoire géologique à l'aide d'une pile de référence

Exemple: le toit de B est une surface d'érosion, « erod »

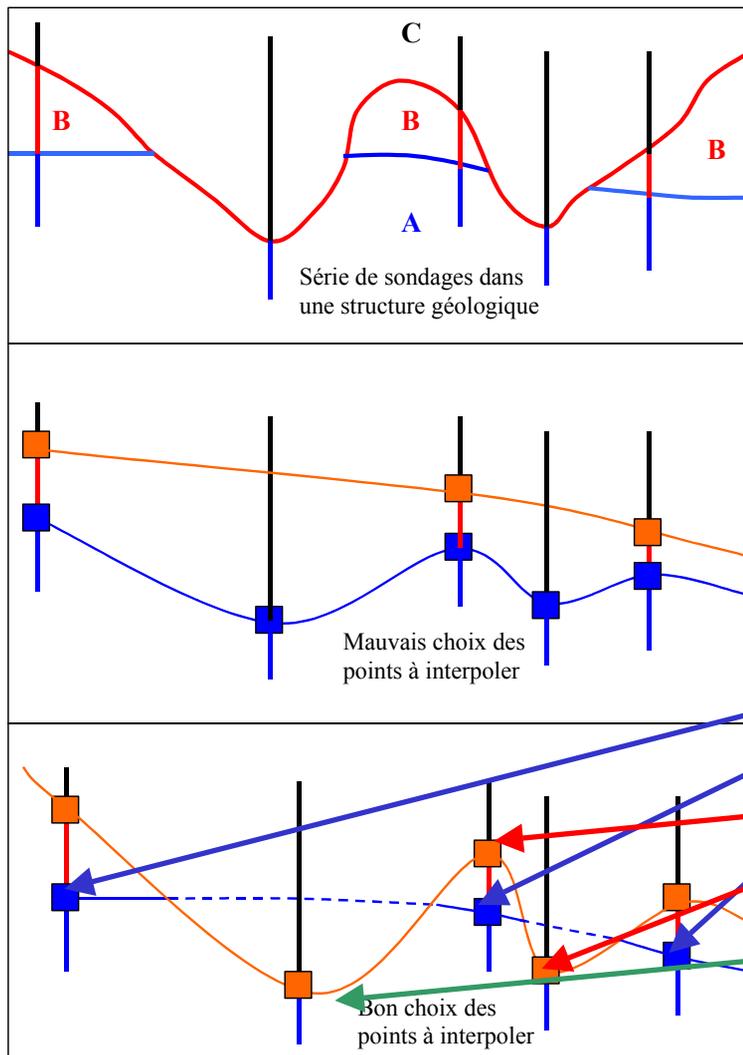


Figure 10 a

- L'interface limitée par le toit de A ne représente pas le toit historique de A
- Interpoler le toit de A en utilisant toutes les limites supérieures de A contenues dans les sondages conduirait à des résultats non réalistes
- Par contre, si on fait l'hypothèse que le toit de B est une surface « erod », il est préférable de
 - identifier le toit de A uniquement là où il est en contact avec B
 - identifier le toit de B comme les contacts B,C ou A,C
 - le toit d'une formation est identifié sans qu'une passe de cette formation ne soit nécessairement présente dans le sondage

Exemple: le toit de B est une surface de recouvrement, « onlap »

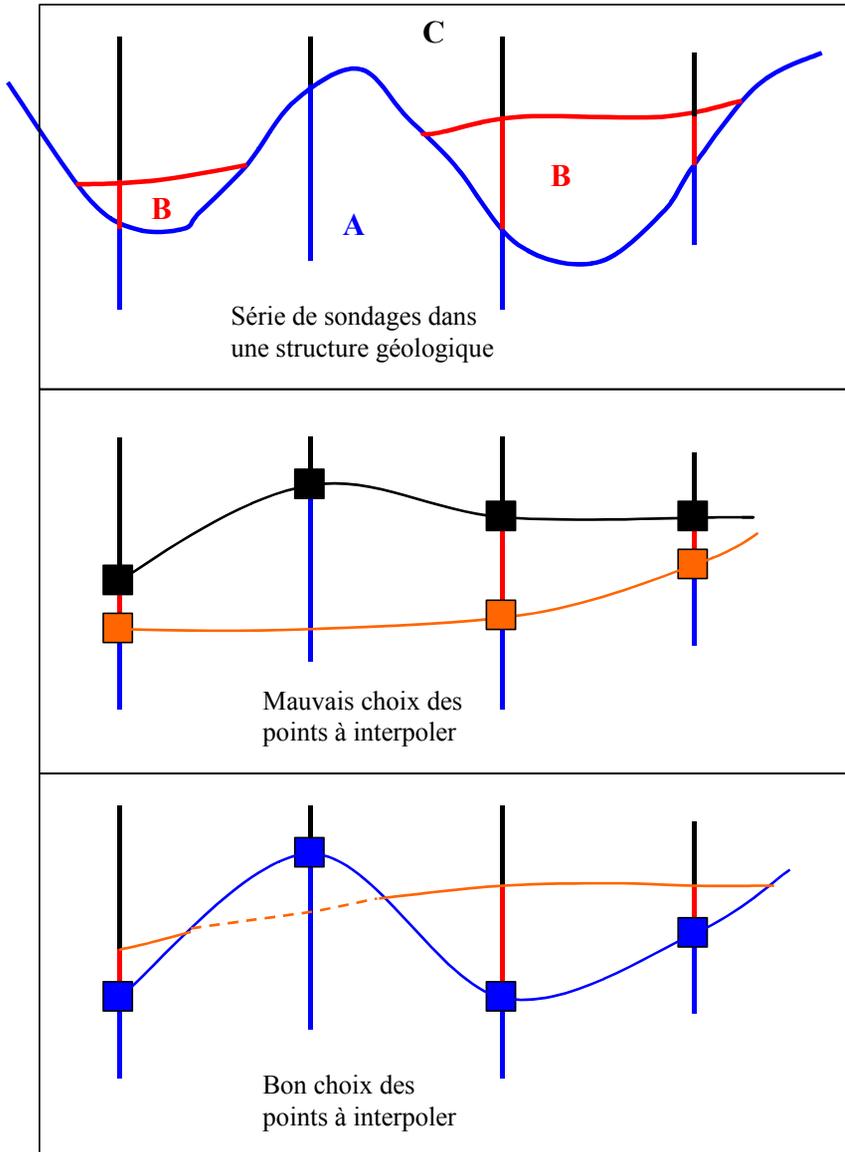


Figure 10b

- A l'inverse cette figure représente une relation où le toit de B est "OnLap" sur A (la formation B repose sur la formation A sans recouper le toit de A)
- Dans ce cas la base de C n'a pas de réelle signification géologique, elle ne peut être interpolée directement en prenant comme donnée les cotes fond de passe de C
- Ce sont les toits de A et de B qu'il faut identifier

Quelle différence entre ces sondages ?

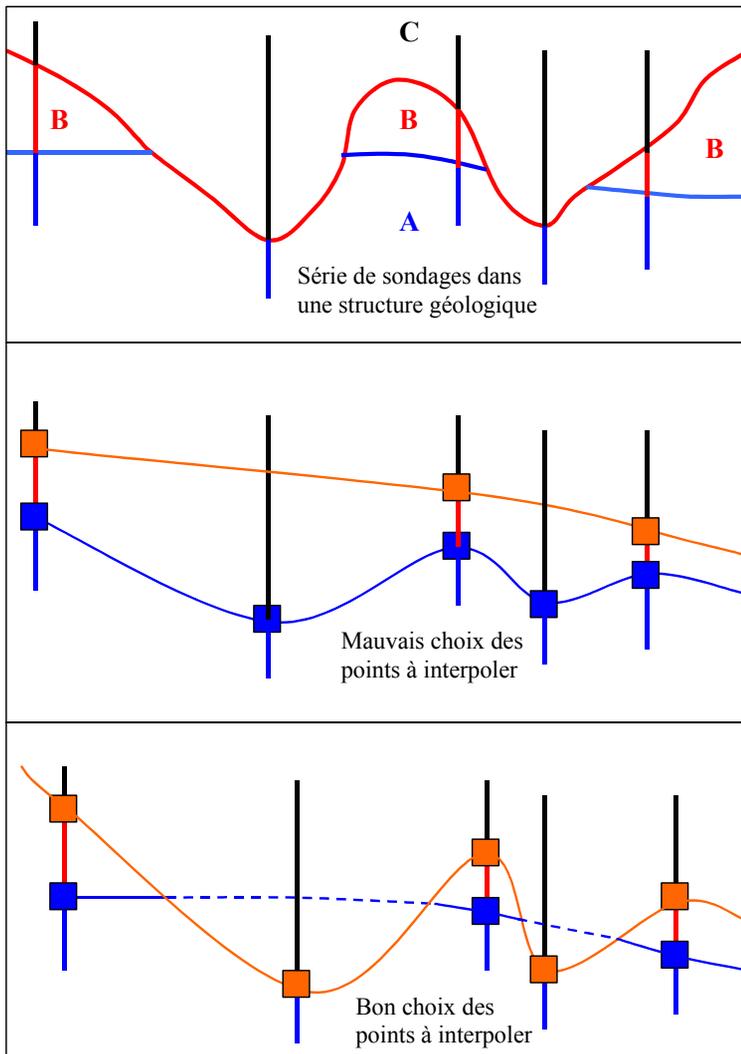


Figure 10 a

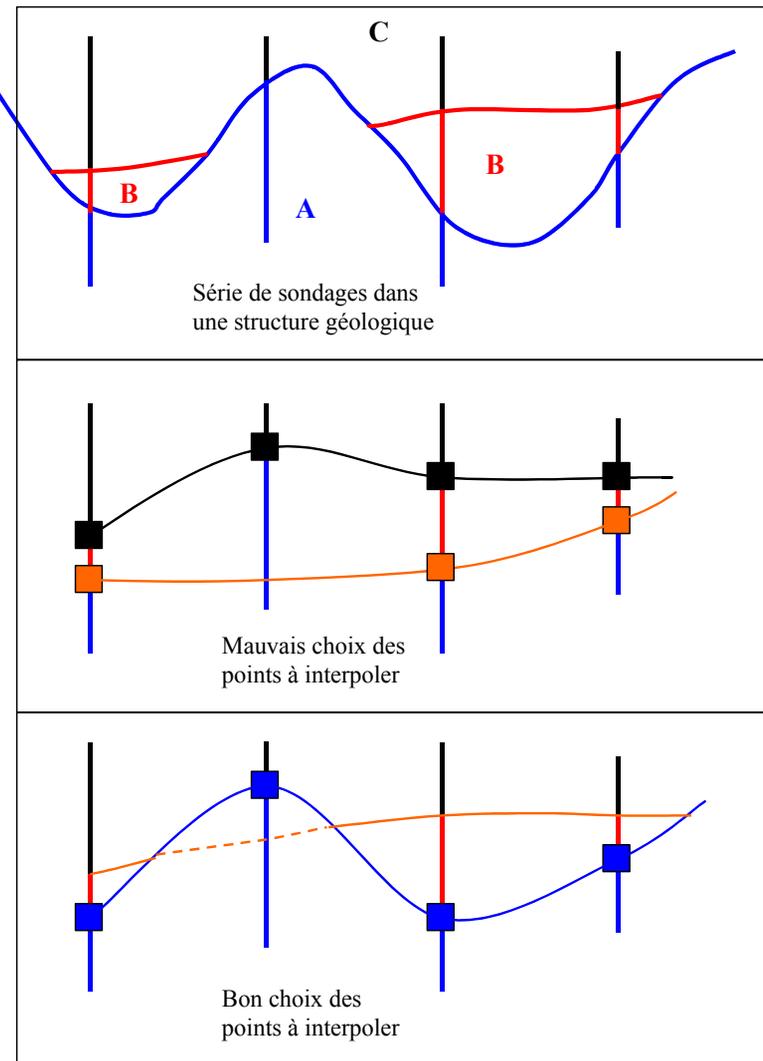
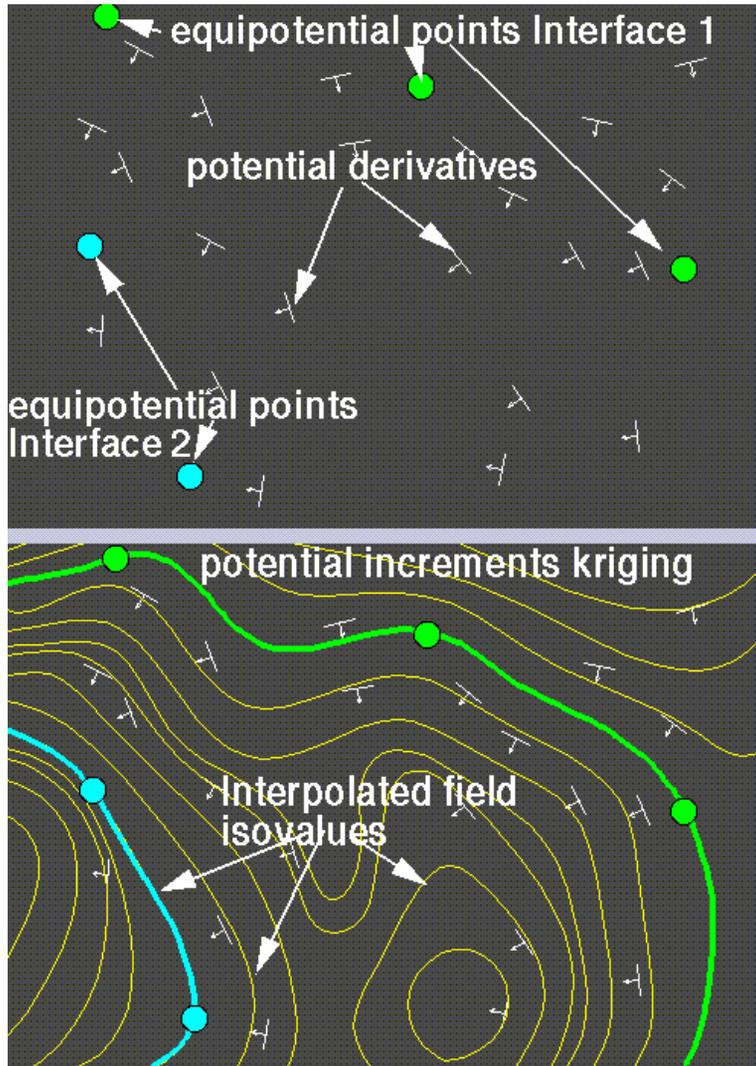


Figure 10b

Pas de différence dans le contenu

- Cela signifie que la donnée seule des sondages ne permet pas de modéliser correctement les différents interfaces
- Il faut en plus fournir une pile stratigraphique qui définit l'ordre chronologique d'empilement des formations et leurs relations:
 - EROD
 - ONLAP

2.5 Champ de déformation et pile lithologique



- Une pile lithologique définie par des relations EROD/ONLAP
- Un champ de déformation définie par les surfaces implicites

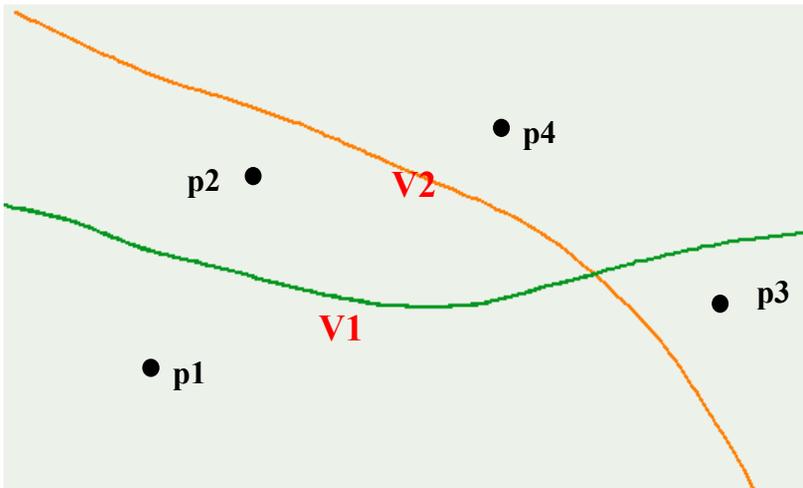
Interpolation géométrique multicouches sécantes

- Combinaison de plusieurs champs de potentiel
- En fait il est assez rare que des interfaces soient parallèles ou sub-parallèles à l'intérieur de toute une zone d'étude

Interpolation géométrique multicouches sécantes

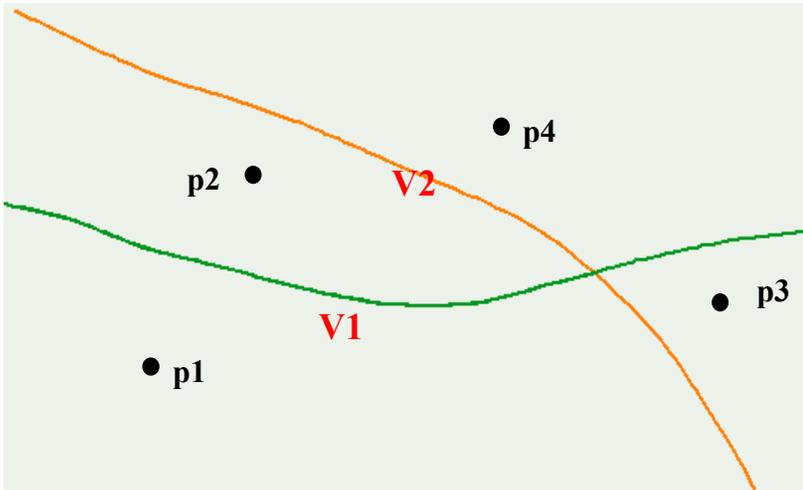
- Dans ce cas on doit interpoler séparément ces interfaces, ou groupes d'interfaces
- On est ramené à interpoler autant de champs de potentiels distincts qu'il existe de groupes d'interfaces sécants
 - Les intersections entre horizons sont gérées en utilisant la chronologie et les relations contenues dans la pile
 - On combine le raisonnement précédent avec l'ajout des relations "EROD" et "ONLAP" pour déterminer la formation en un point p

Interpolation géométrique multicouches sécantes

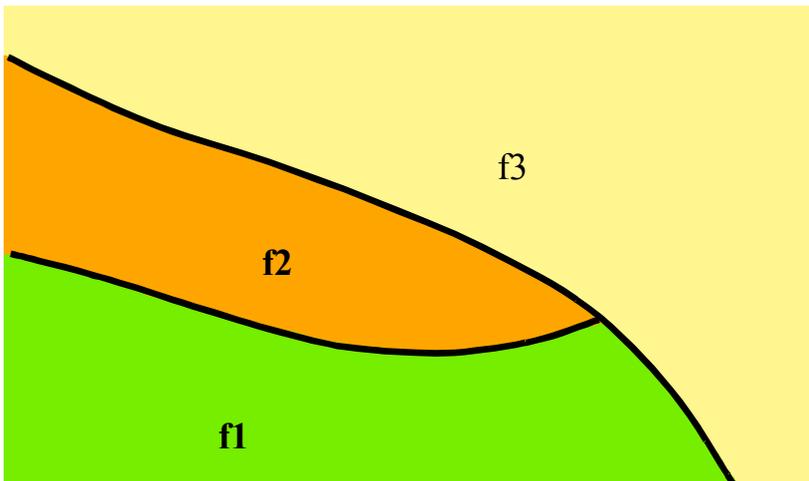


- La pile (**toit**) est définie chronologiquement comme suit :
 - f1 Erod
 - f2 Erod
- $V1(p)$ et $V2(p)$ sont les deux valeurs du champ de potentiel au point p respectivement pour les champs correspondant aux **toits** des formations $f1$ et $f2$
- $V1$ et $V2$ sont les isovaleurs correspondant aux **toits** des formations $f1$ et $f2$ pour chaque champ de potentiel

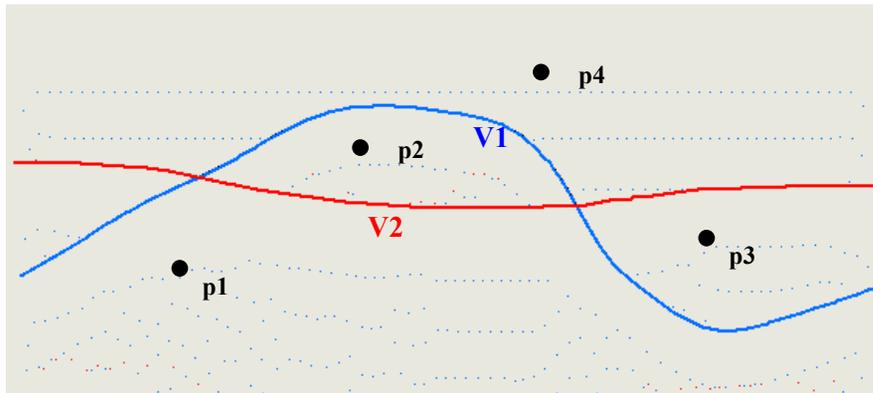
Interpolation géométrique multicouches sécantes



- Si $V2(p) > V2$ alors $p \in f3$
(c'est le cas de $p3$ et $p4$)
- Si $V2(p) < V2$ alors
- alors si $V1(p) > V1$ $p \in f2$
(c'est le cas de $p2$)
- sinon $p \in f1$
(c'est le cas de $p1$)

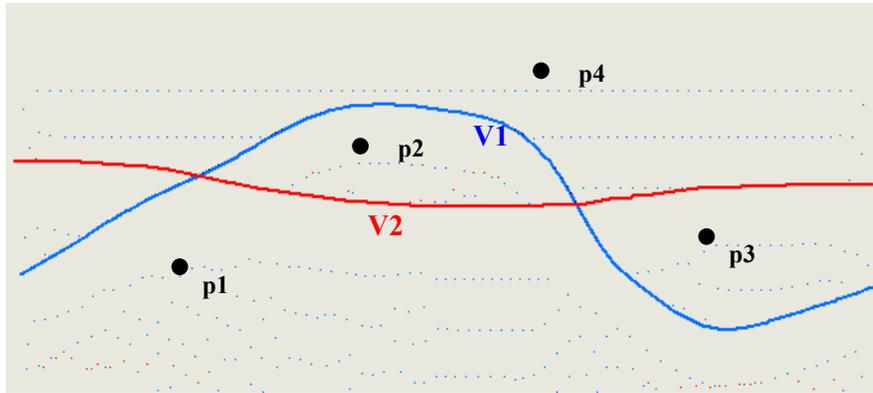


Interpolation géométrique multicouches sécantes

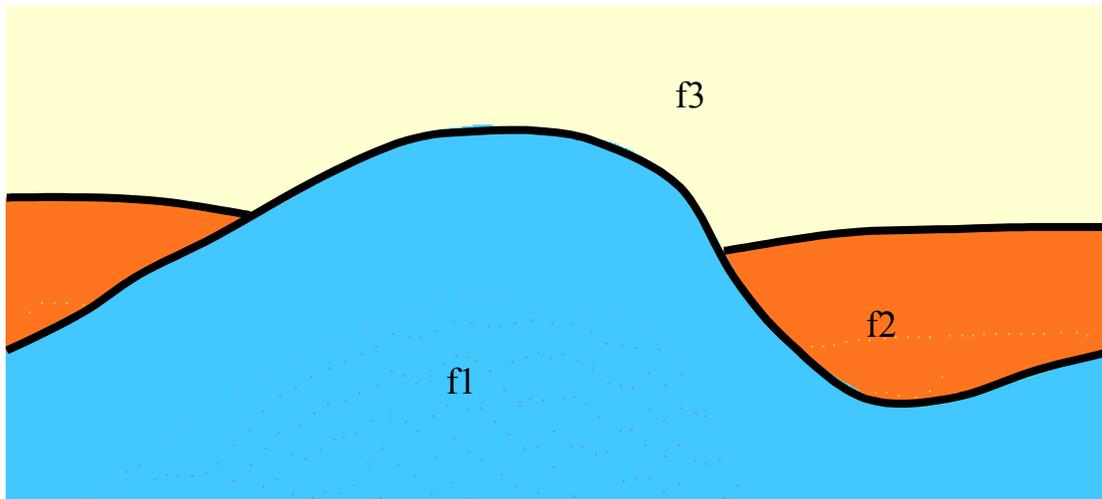


- La pile (toit) est définie chronologiquement comme suit:
 - f1 Erod
 - f2 OnLap
- $V1(P)$ et $V2(P)$ sont les deux valeurs du champ de potentiel respectivement pour les champs
- $V1$ et $V2$ sont les isovaleurs correspondant aux interfaces $f1$ et $f2$ pour chaque champ de potentiel correspondant aux toits des formations $f1$ et $f2$

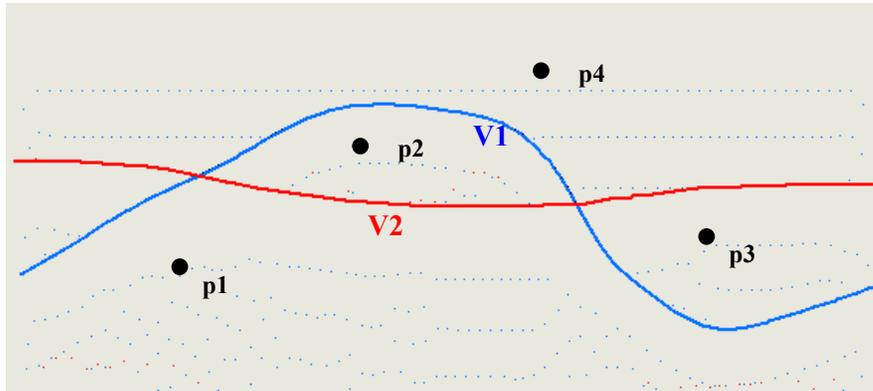
Interpolation géométrique multicouches sécantes



- Si $V1(p) < V1$ alors $P \in f1$
(c'est le cas de $p1$ et $p2$)
- Si $V1(p) > V1$ alors
- Si $V2(p) < V2$ alors $P \in f2$
(c'est le cas de $p3$)
- sinon $P \in f3$
(c'est le cas de $p4$)

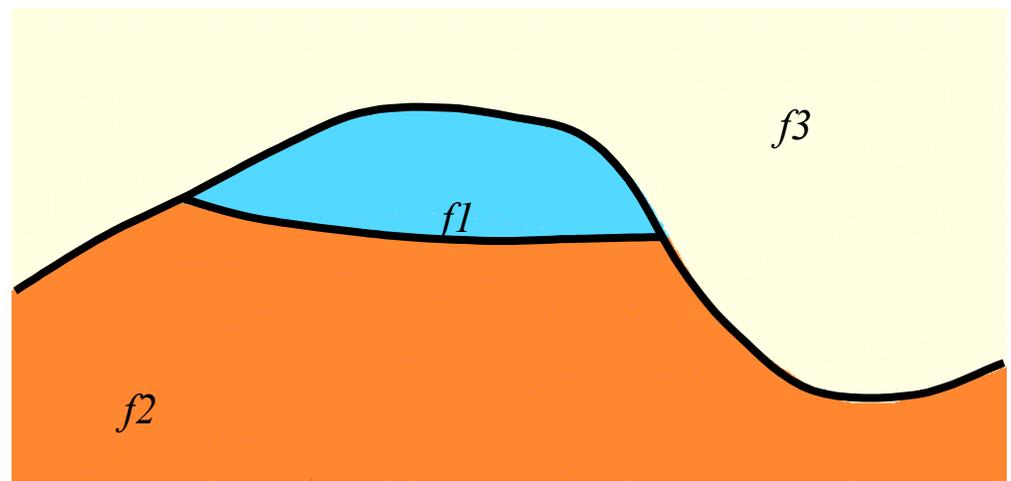


Interpolation géométrique multicouches sécantes



- Si $V1(p) > V1$ alors $P \in f3$
(c'est le cas de p4)
- Si $V1(p) < V1$ alors
- Si $V2(p) > V2$ alors $P \in f1$
(c'est le cas de p2)
- sinon $P \in f2$
(c'est le cas de p1 et p3)

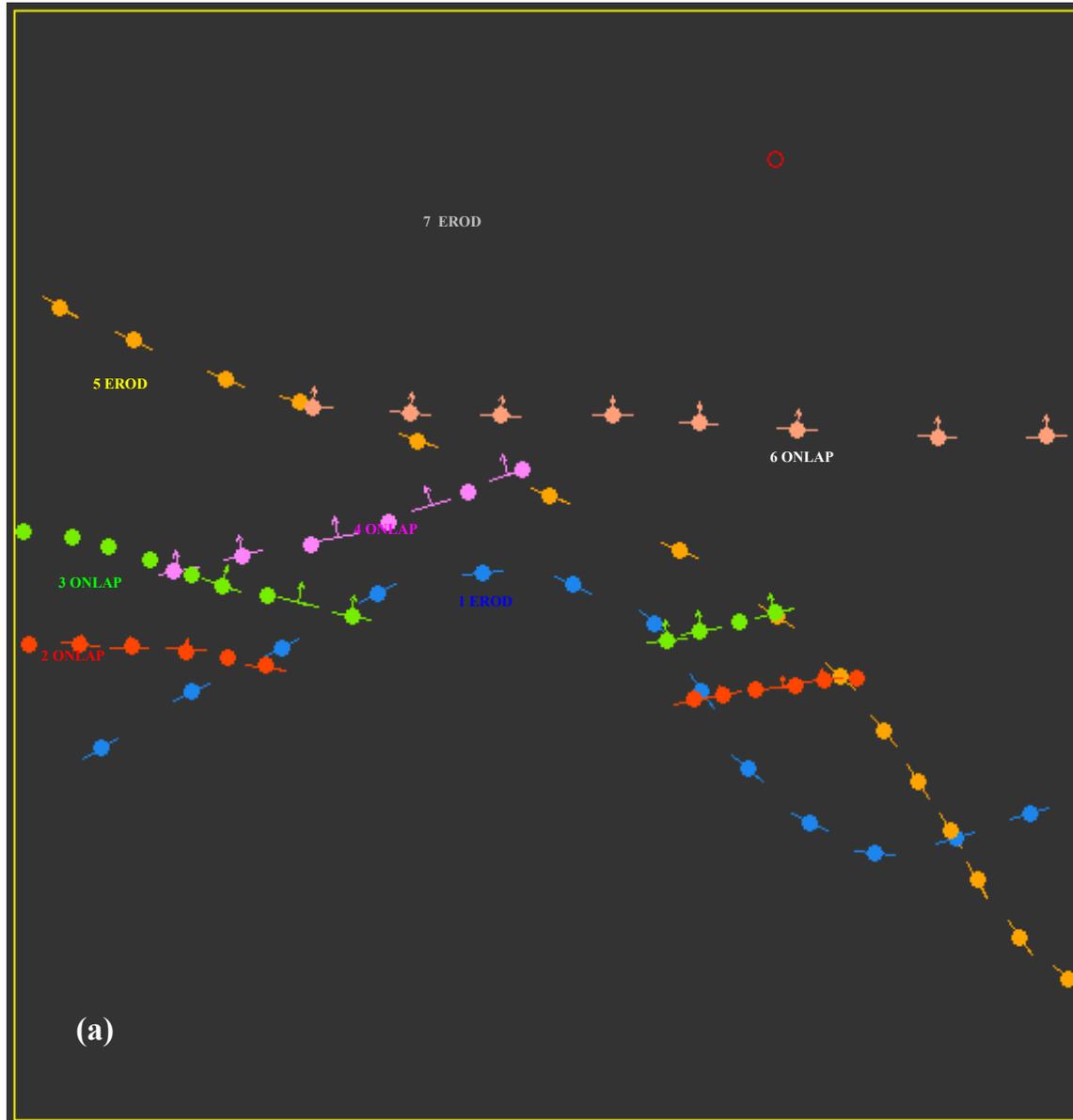
- La pile (toit) est définie chronologiquement comme suit:
 - f2 Onlap,
 - f1 Erod.



Combinaison de n interfaces

- Le raisonnement précédent est généralisé en adoptant une stratégie de parcours sur les interfaces

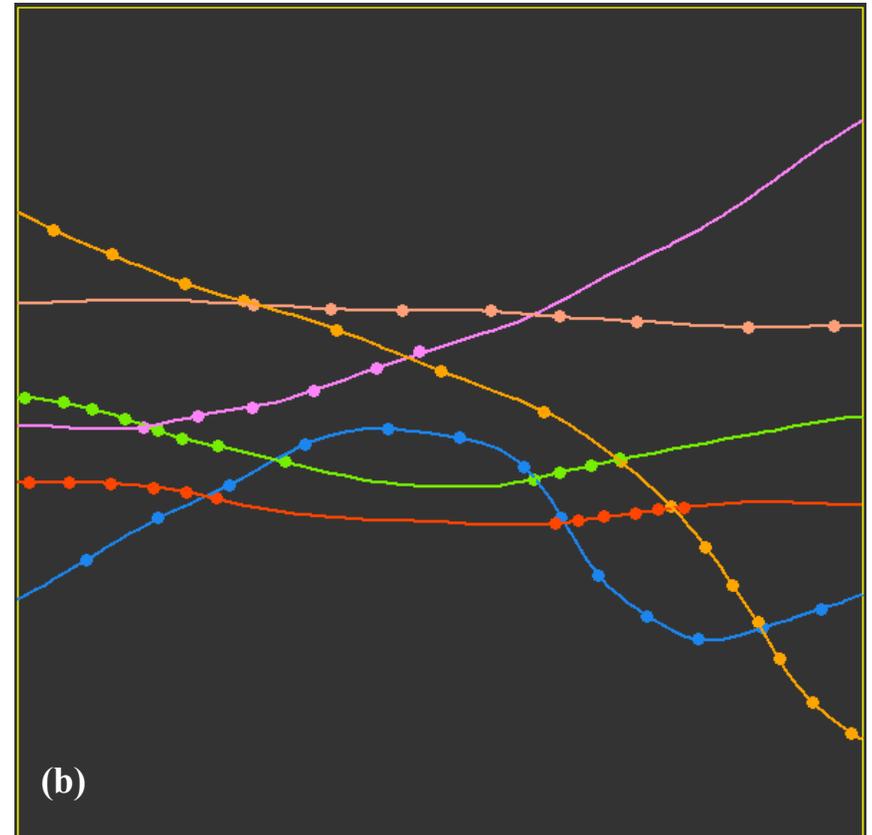
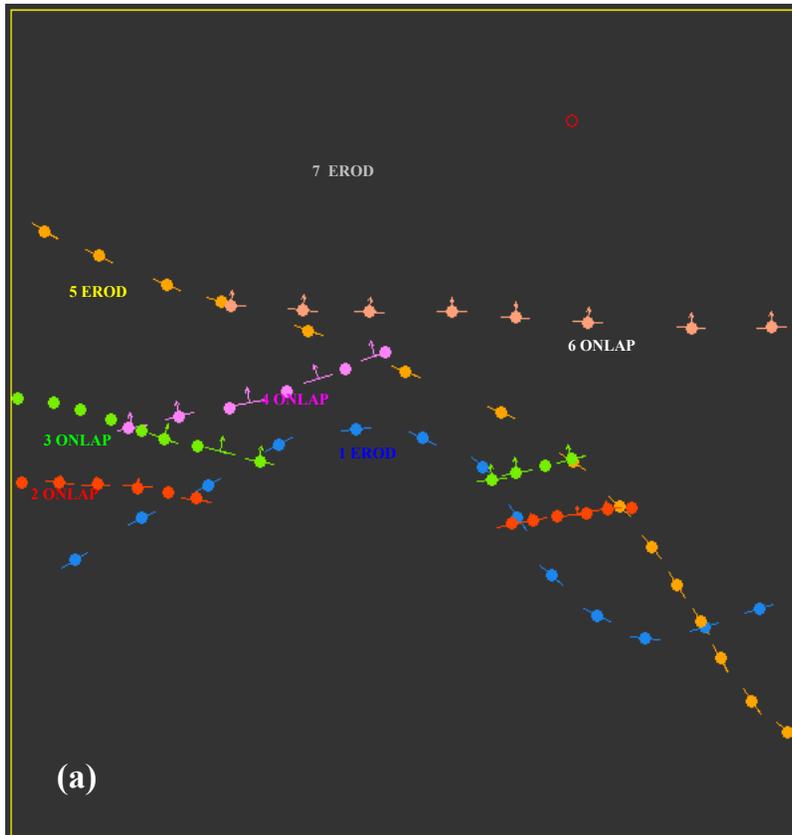
Combinaison de n interfaces



- Le processus est illustré
 - La pile peut être vue comme une succession d'interfaces de EROD encadrant des interfaces de type ONLAP
 - Pour des raisons algorithmiques les extrémités 1 et $n+1$ sont de type EROD

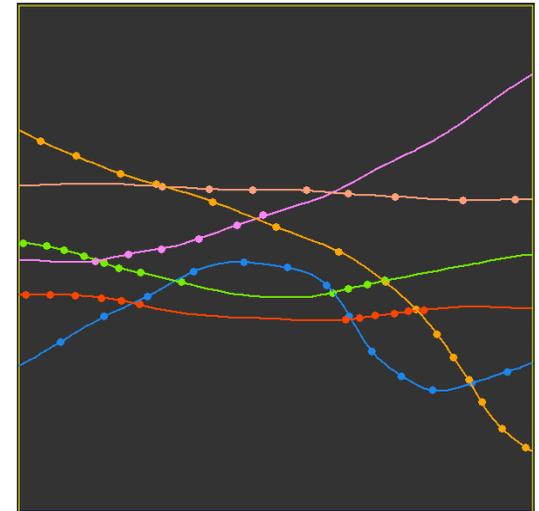
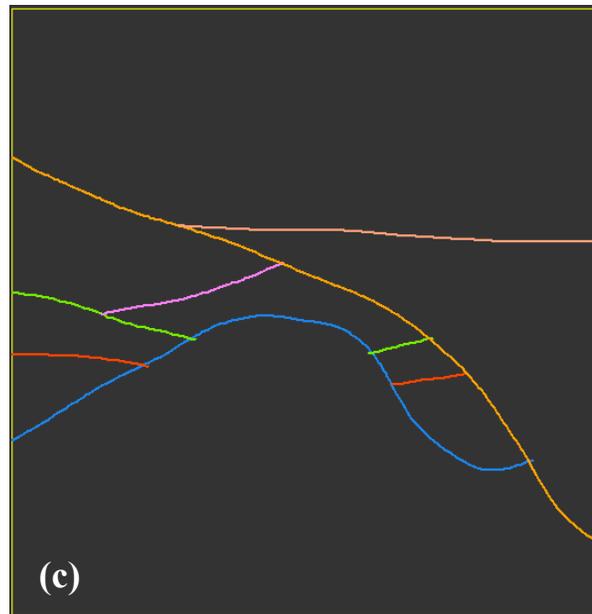
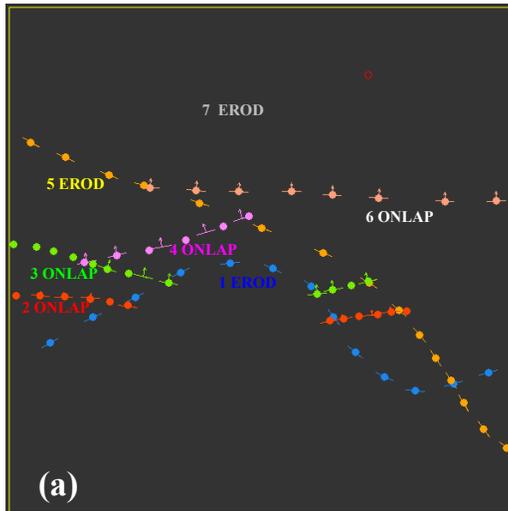
Interpolation de plusieurs interfaces sécants

- Résultat de l'interpolation géométrique en assignant un champ de potentiel à chaque interface

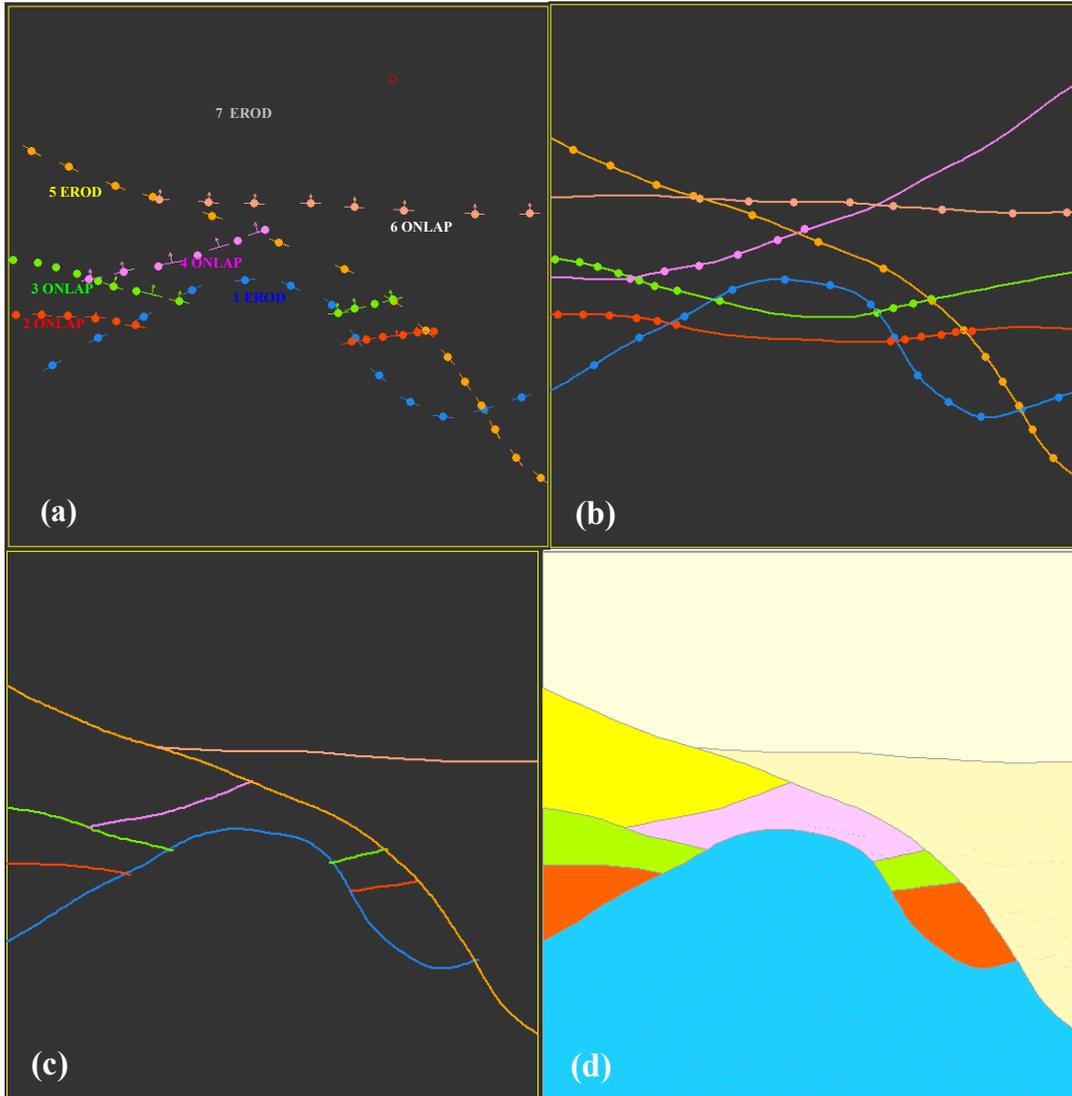


Interpolation de plusieurs interfaces sécantes

- Traitement des relations EROD et ONLAP pour délimiter les domaines



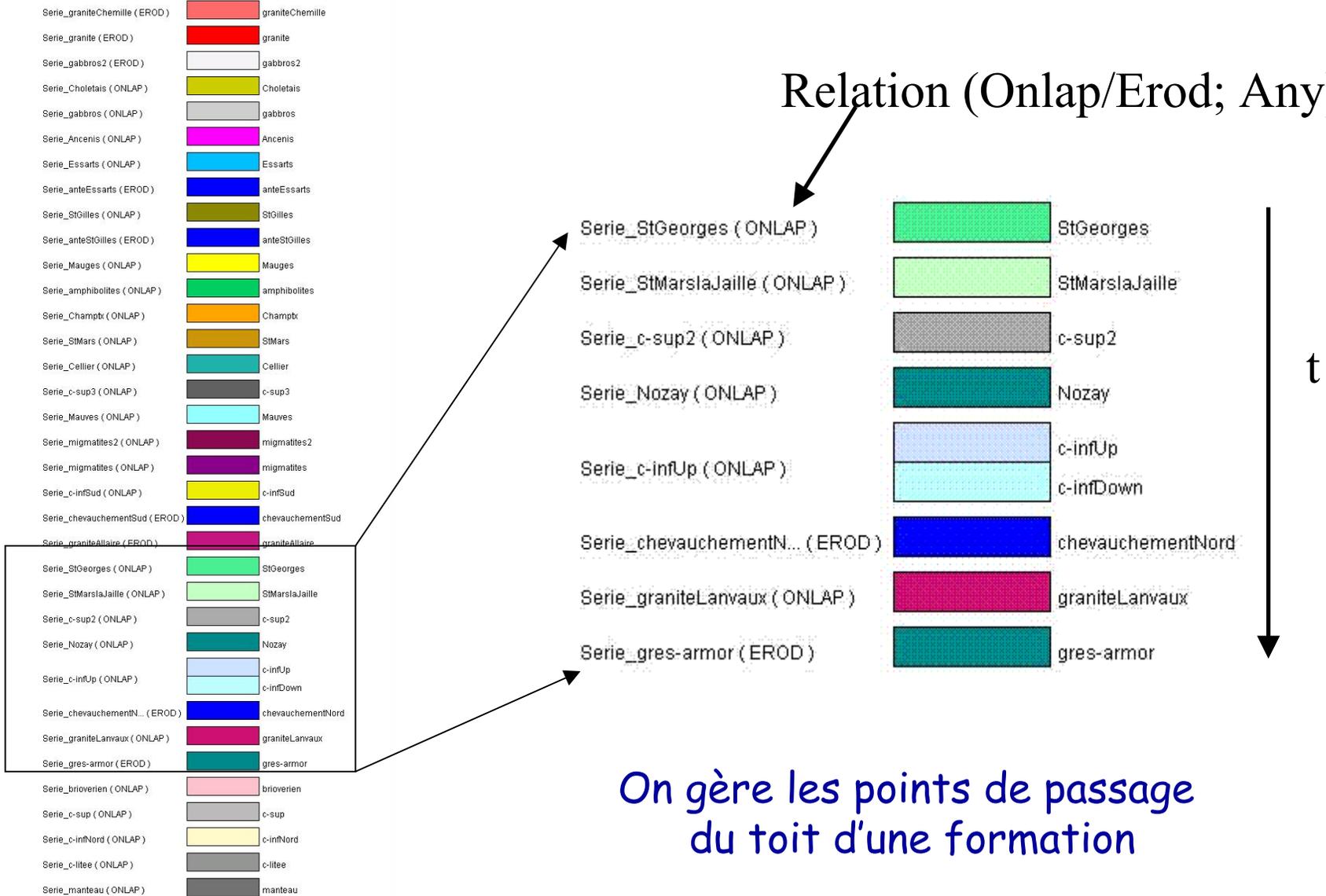
Interpolation de plusieurs interfaces sécantes



- Remplissage des polygones.

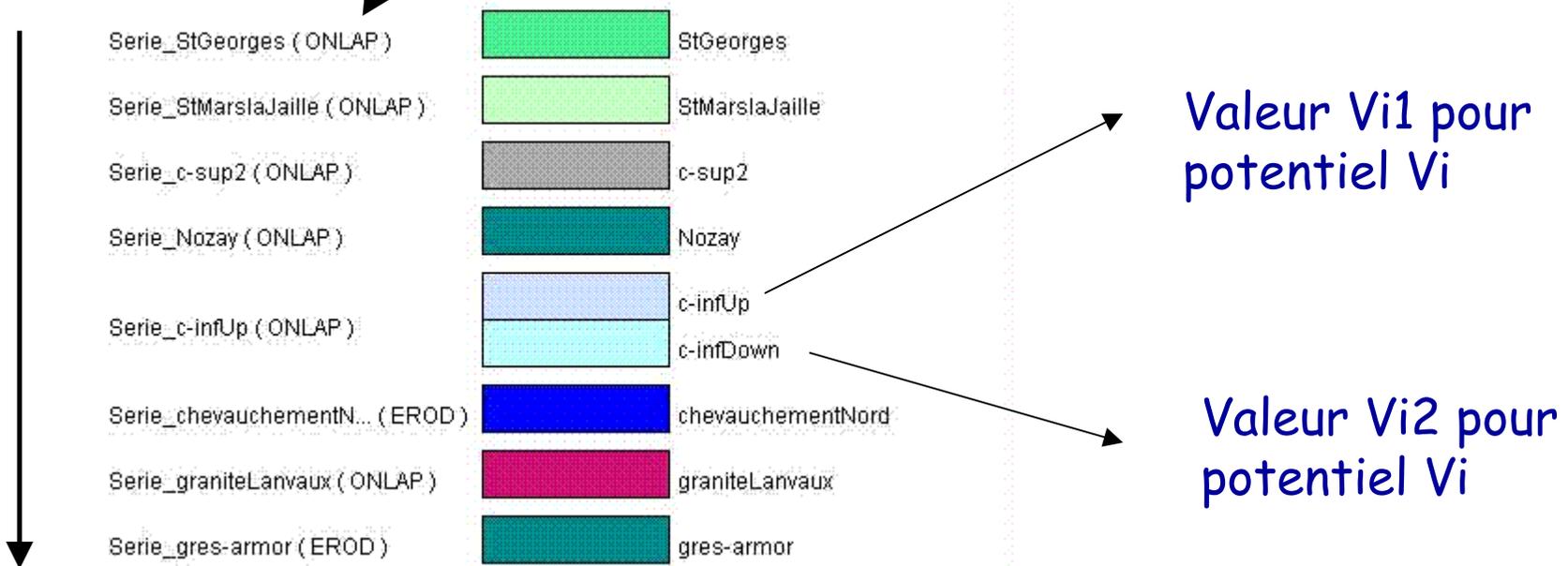
Définition d'une pile

Relation (Onlap/Erod; Any)



Définition d'une pile

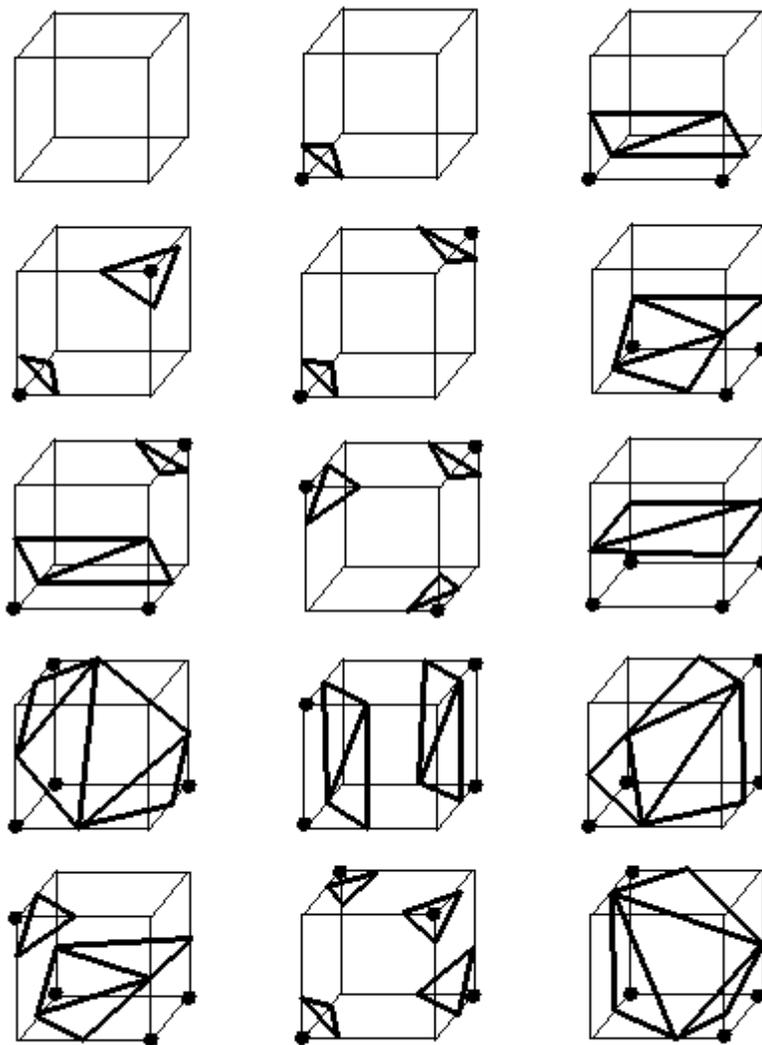
Relation (Onlap/Erod; Any)



Par définition la formation la plus haute (récente) est de type EROD et son toit n'est pas modélisé, il est limité par le MNT

Marching Cube

- Passage de $val = f(x,y,z)$ à des volumes
- <http://iason.zcu.cz/~mkrejza/volume/>



Marching Cubes Configurations

3. Applications à la modélisation de domaines géologiques 3D

3.1. Le cas d'étude de la ville de Lyon

- Application à la ville de Lyon
- Localisation des sondages sur un quartier de la ville de Lyon



Données du problème

- Le modèle numérique est généré par interpolation au pas de 20 mètres des données du S.U.R. (Système Urbain de Référence) de la communauté urbaine du Grand Lyon
- 158 sondages provenant de différentes sources : BSS, BRGM, Communauté Urbaine de Lyon
- La carte géologique et des observations de terrain.
- Toutes les données doivent être homogènes du point de vue de leur description par rapport aux formations géologiques que l'on choisit de modéliser

Données du problème (suite)

- Les formations à modéliser sont codées de la façon suivante :
 - ACTU Formations actuelles (remblais, éboulis, dépôts de pente)
 - AMAL Alluvions modernes
 - LOES Loess
 - FGX Dépôts fluvio-glaciaires
 - GLA Moraines Glaciaires
 - FU Villafranchien (alluvions anciennes)
 - MI Miocène et Miopliocène
 - SCND Secondaire (Trias Lias)
 - SOCL Socle ante triasique

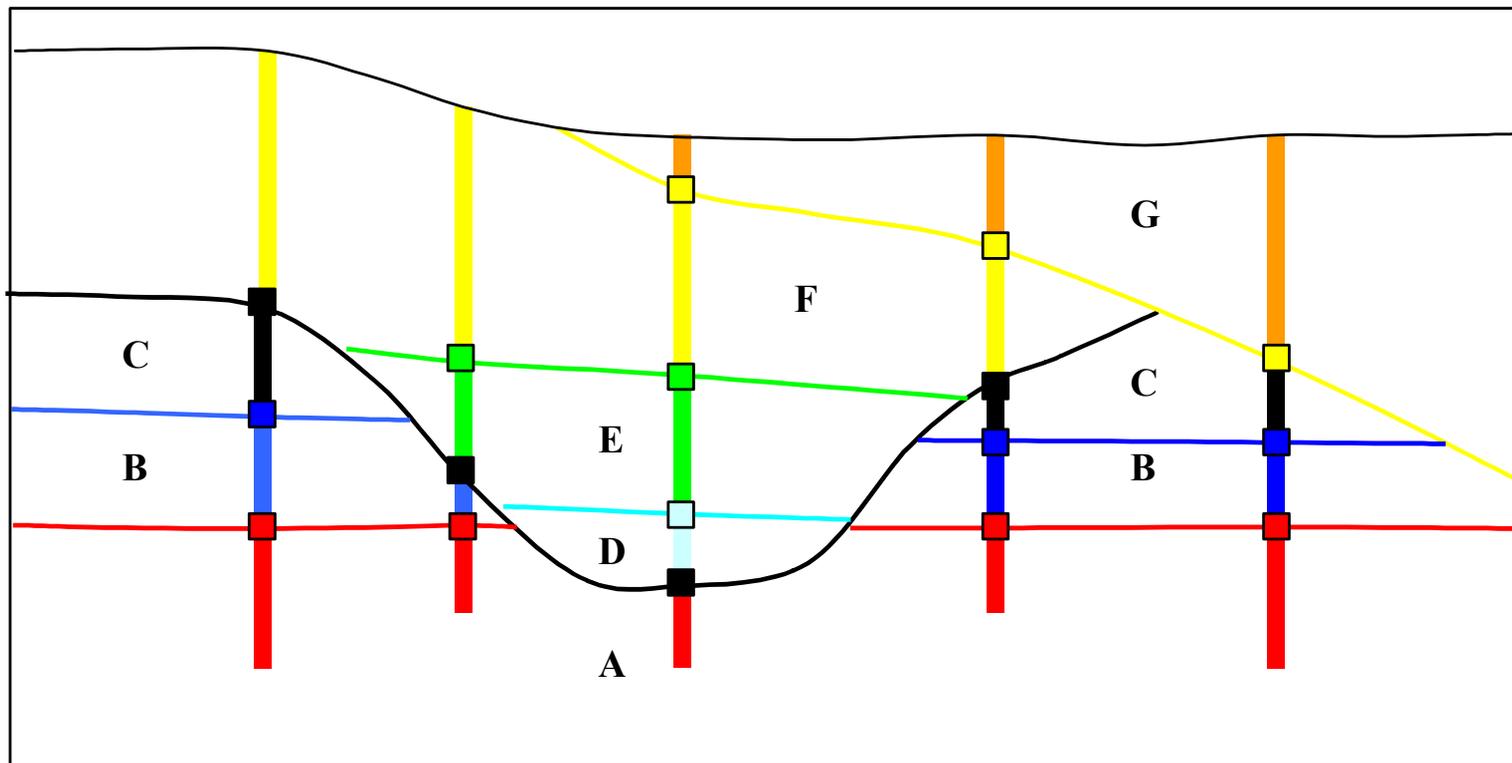
Données du problème (suite)

- 3 interfaces d'érosion ont été ajoutées dans la pile car les toits des formations SCND , GLA, LOES, sont partout systématiquement érodés
 - ACTU: Formations actuelles EROD
 - AMAL Alluvions modernes ONLAP
 - **ANTEMOD Erosion ante-moderne** EROD
 - LOES Dépôts glaciaires
 - FGX et fluvio-glaciaires
 - GLA Glaciaire ONLAP
 - **ANTEGLA Erosion ante-glaciaire** EROD
 - FU Villafranchien ONLAP
 - MI Miocène ONLAP
 - **ANTETER Erosion ante-tertiaire** EROD
 - SCND Secondaire ONLAP
 - SOCL Socle ante triasique EROD

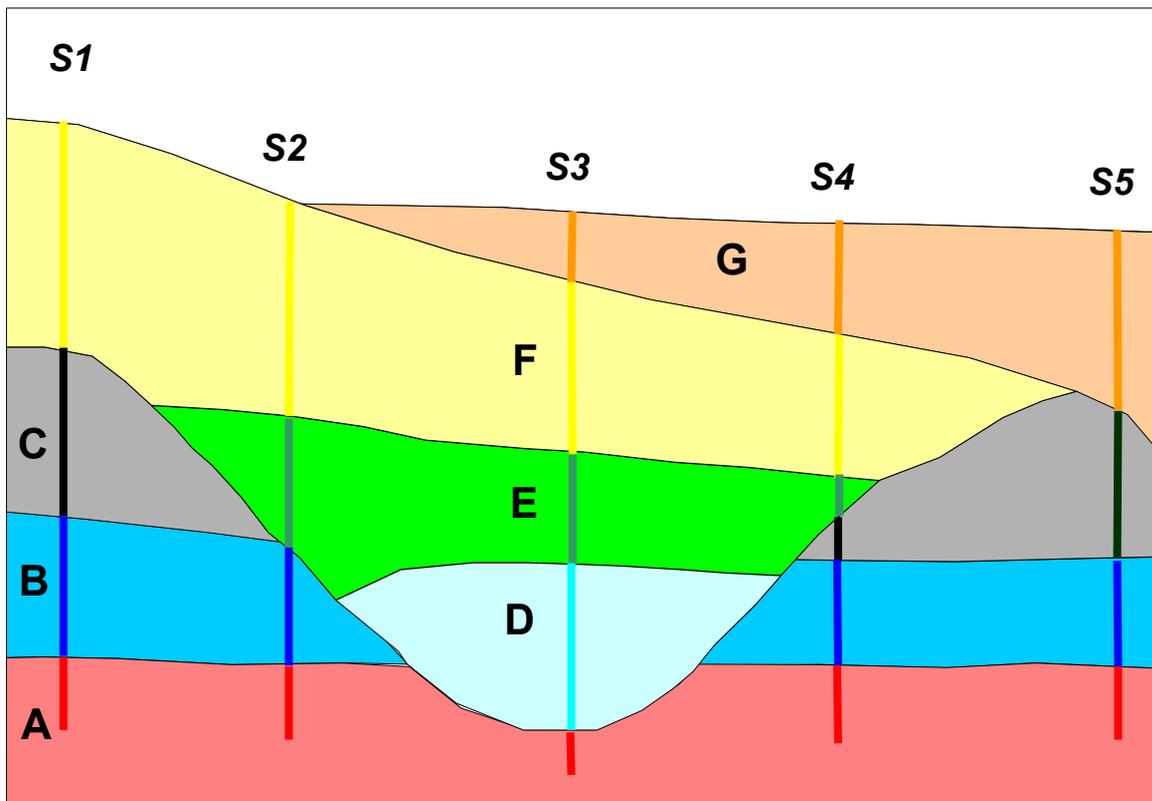
Construction du modèle

- Les points de passage des interfaces à modéliser sont déduits des données de la carte géologique et des sondages en utilisant la pile lithologique
- La méthode de modélisation est appliquée ainsi que les corrections qui permettent de prendre en compte les sondages incomplets

Le tracé des interfaces à partir des sondages

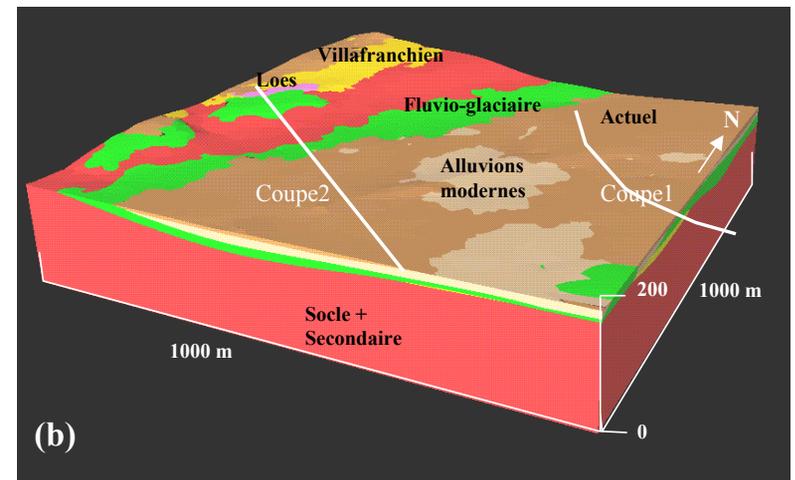
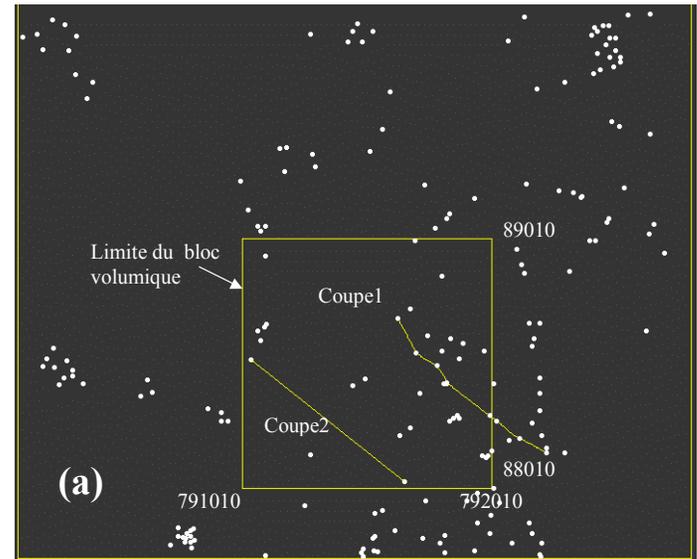


Remplissage des polygones par les formations, hypothèse: interfaces = toits



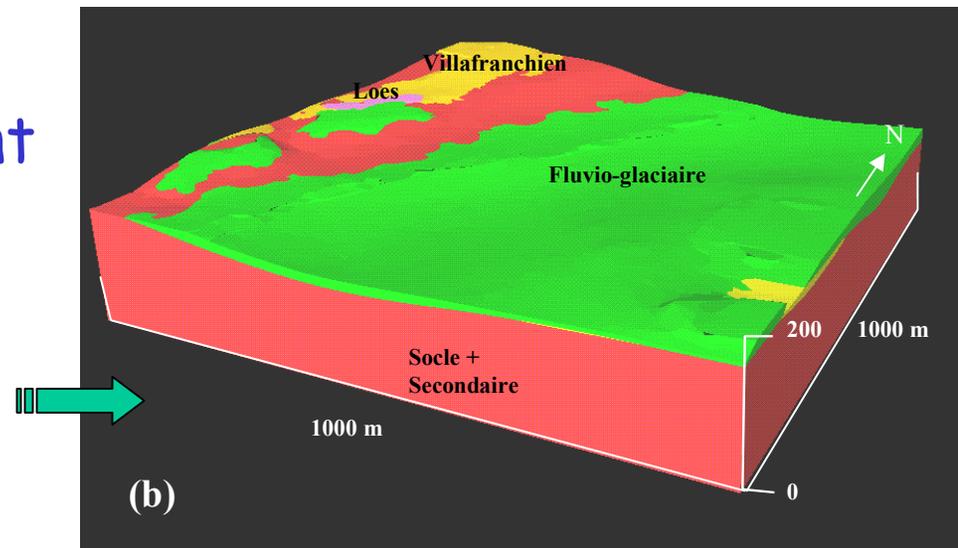
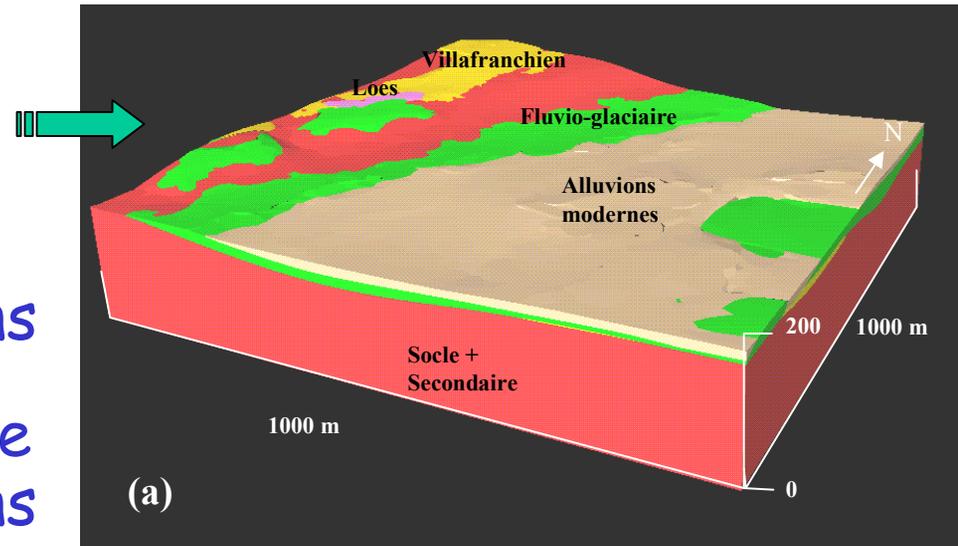
Construction du modèle

- Une représentation volumique du modèle est possible en utilisant les diagrammes de Voronoï
- A titre d'exemple, la figure illustre la répartition actuelle des différentes formations géologiques dans un bloc d'environ 1000m x 1000m



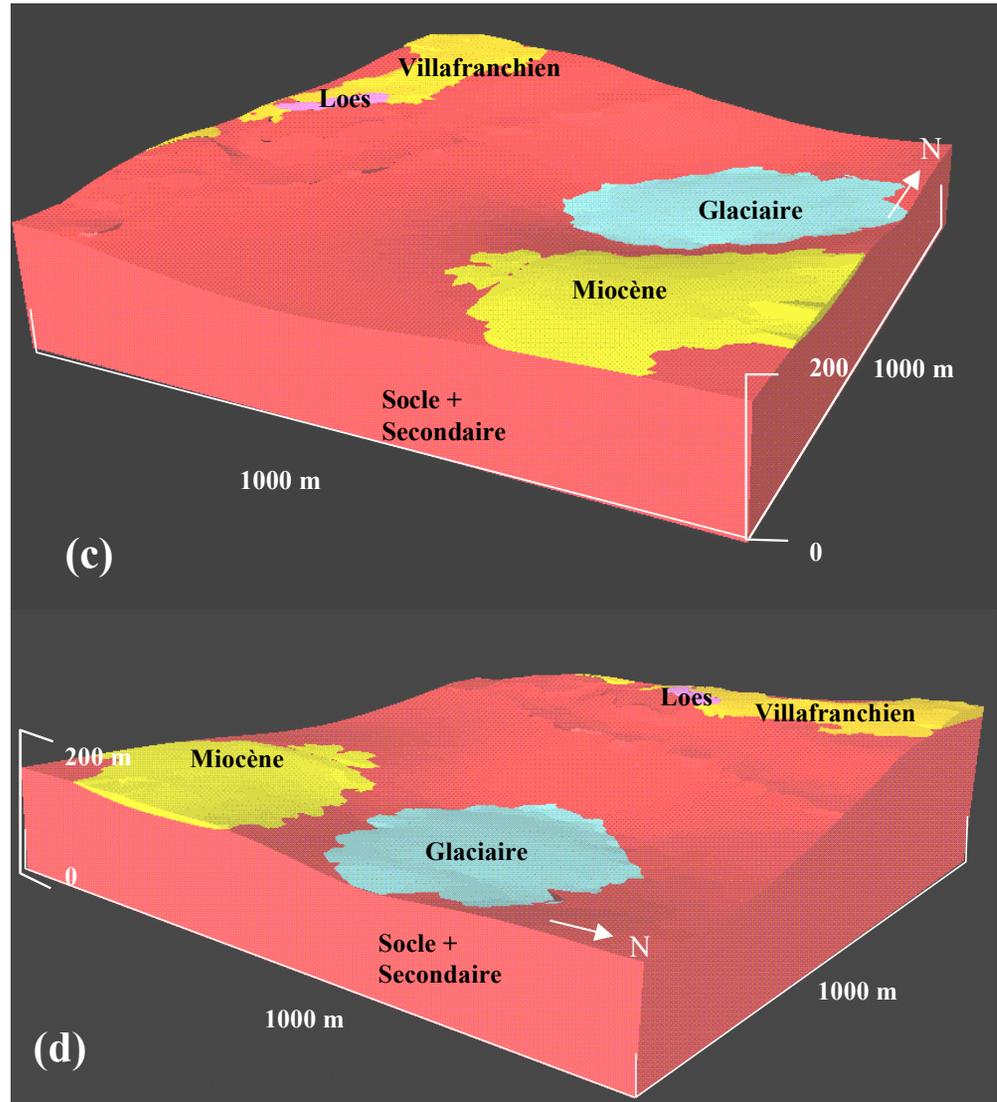
Construction du modèle

- les formations actuelles ont été enlevées laissant apparaître les alluvions
- Cette figure illustre le fait que les formations géologiques peuvent être groupées ou visualisées séparément
- les alluvions ont été enlevées laissant apparaître les formations fluvio-glaciaires



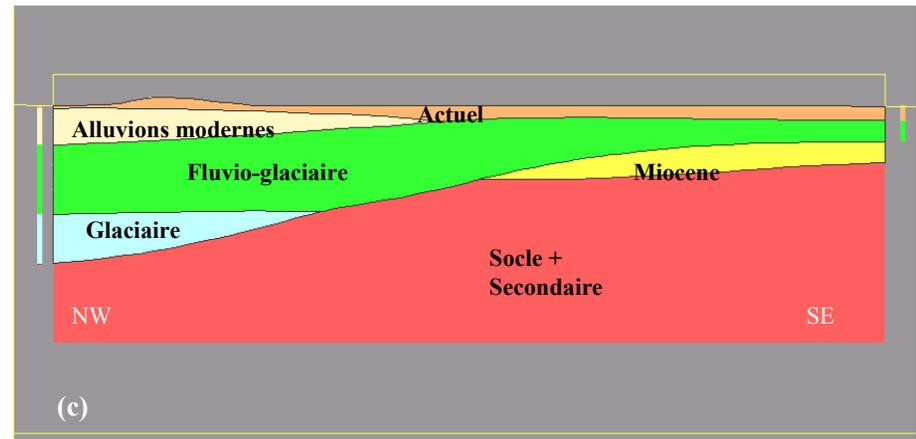
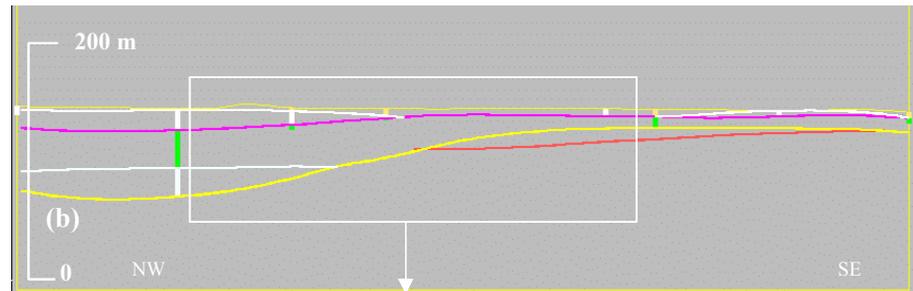
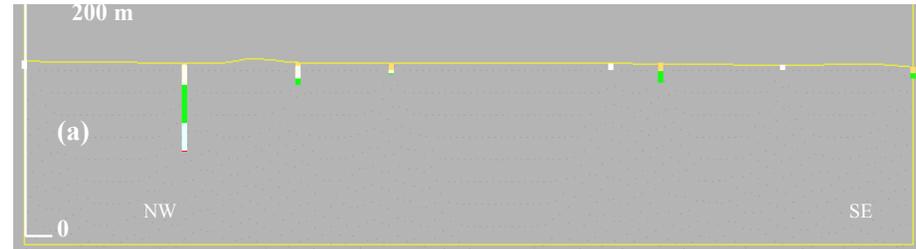
Construction du modèle

- La surface d'érosion anté-glaciaire a laissé quelques lambeaux de Miocène et a été comblée par le glaciaire dans ses parties basses



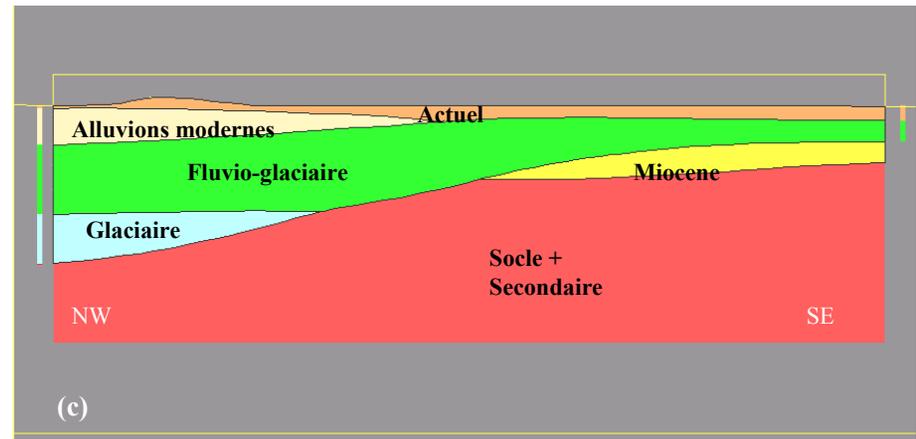
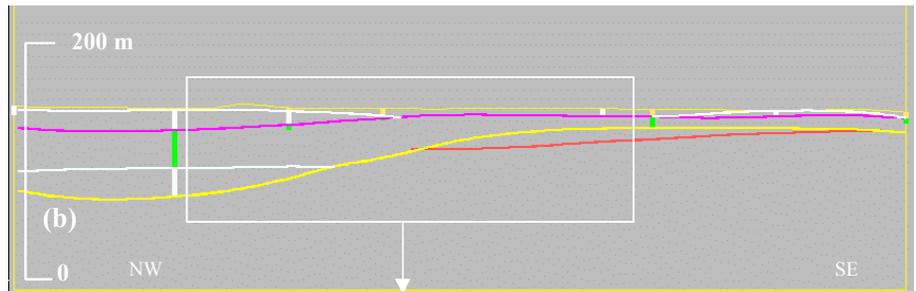
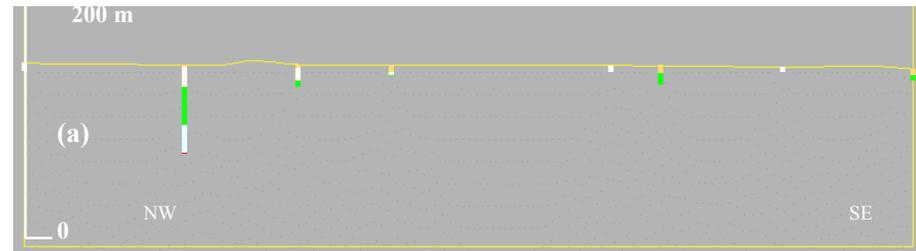
Utilisation du modèle

- Des coupes peuvent être tracées en intersectant le modèle avec une surface quelconque
- Une coupe passant par certains sondages permet de vérifier la cohérence du modèle vis à vis des sondages
- La coupe peut être représentée soit par les différents interfaces modélisés soit par des polygones pleins



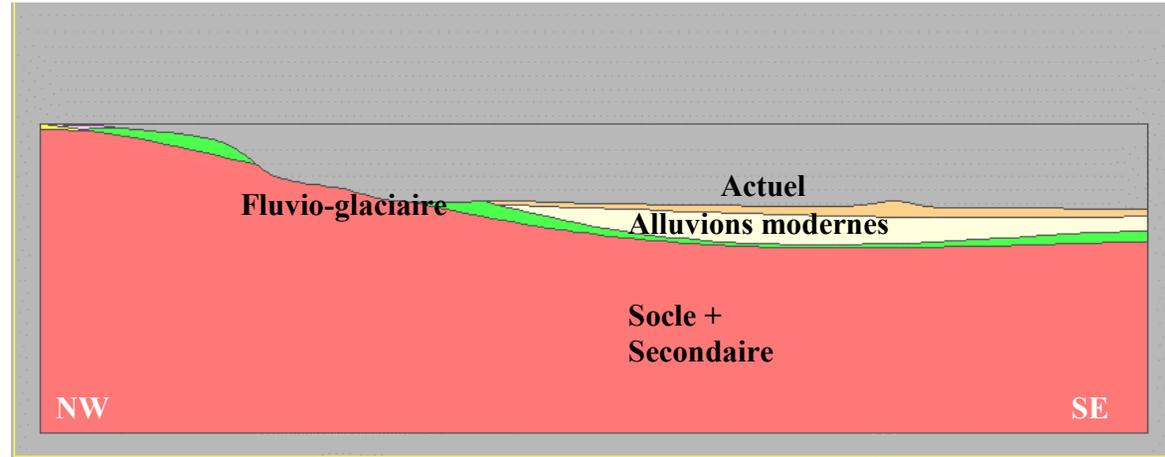
Utilisation du modèle

- les sondages à moins de 10m de la coupe sont projetés dans la coupe
- les interfaces sont tracés en intersectant le modèle 3D avec la surface de la coupe
- Le modèle respecte les règles d'érosion et onlap de la pile, ainsi l'interface Antemod limite les formations fluvioglaciales par érosion
- Les formations remplissant les polygones peuvent être déduites en utilisant les fonctions d'interrogation du modèle



Utilisation du modèle Prédiction

- La figure représente une coupe "prédictive" qui ne passe pas par des sondages
- Toutes les coupes effectuées à travers le modèles seront par construction cohérentes entre elles car partageant un même modèle 3D



3.2. Une procédure d'imagerie 3D, le cas d'étude de la Chataigneraie (MCF)

1. Mettre à niveau l'information sur l'infrastructure géologique
2. Analyser et établir un modèle conceptuel
3. Modéliser en 3D la géométrie pour comprendre la structure et l'histoire
4. Valider les modèles par l'analyse multi-données géophysiques
5. Définir l'espace des solutions 3D par litho-inversion

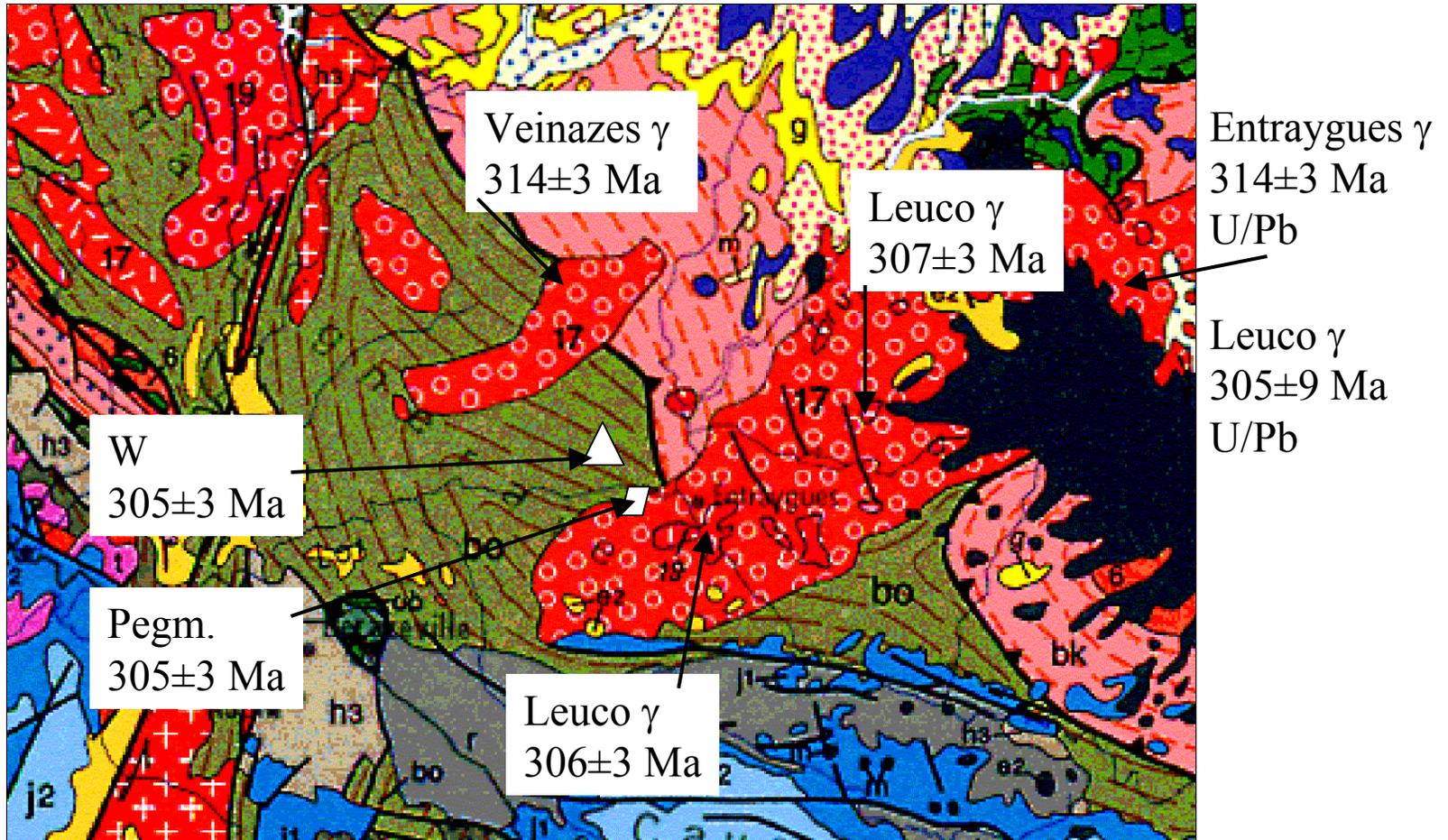
1. Mettre à niveau l'information sur l'infrastructure géologique

- Révision de la carte géologique dans une perspective de modélisation 3D et complément de la couverture géophysique

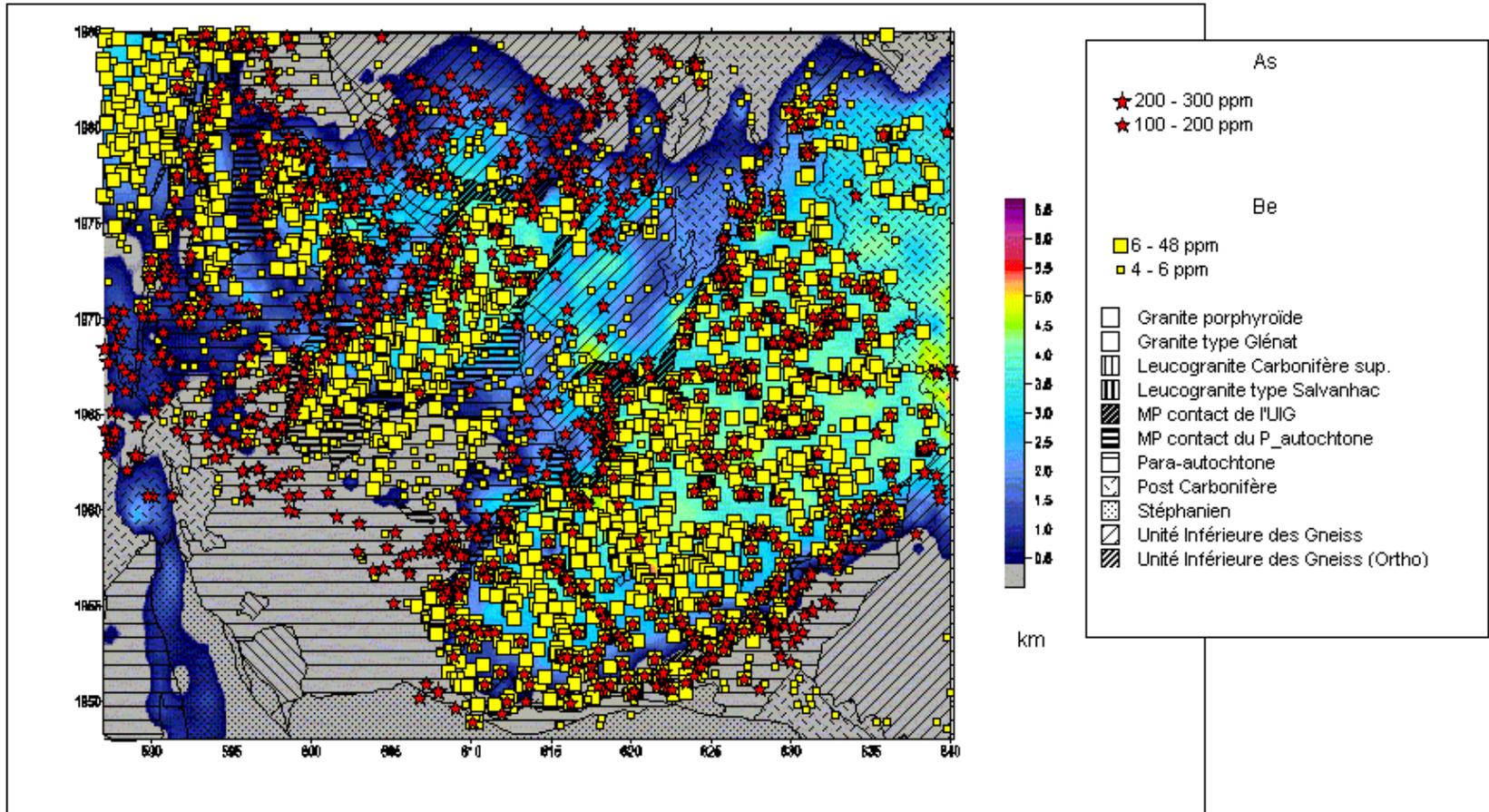
2. Analyser et établir un modèle conceptuel

- Analyse du contexte géologique régional et choix des objets représentatifs de la géométrie des unités à modéliser
 - caractérisation du champ de déformation régional qui contraint la représentation en profondeur des unités lithologiques et des discontinuités structurales

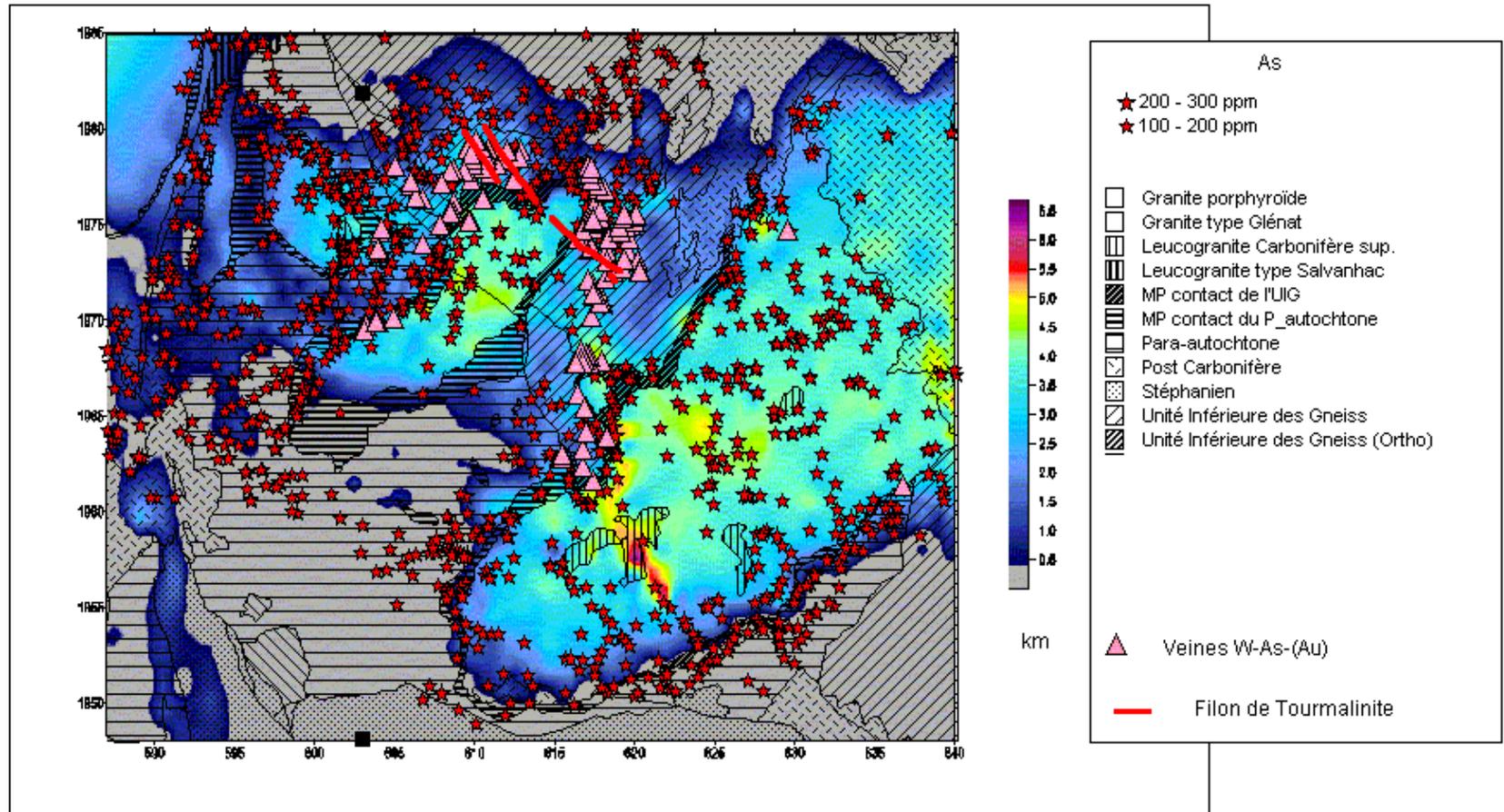
W-(Au) District - Chataigneraie area Ar/Ar ages, Monie et al., 1999



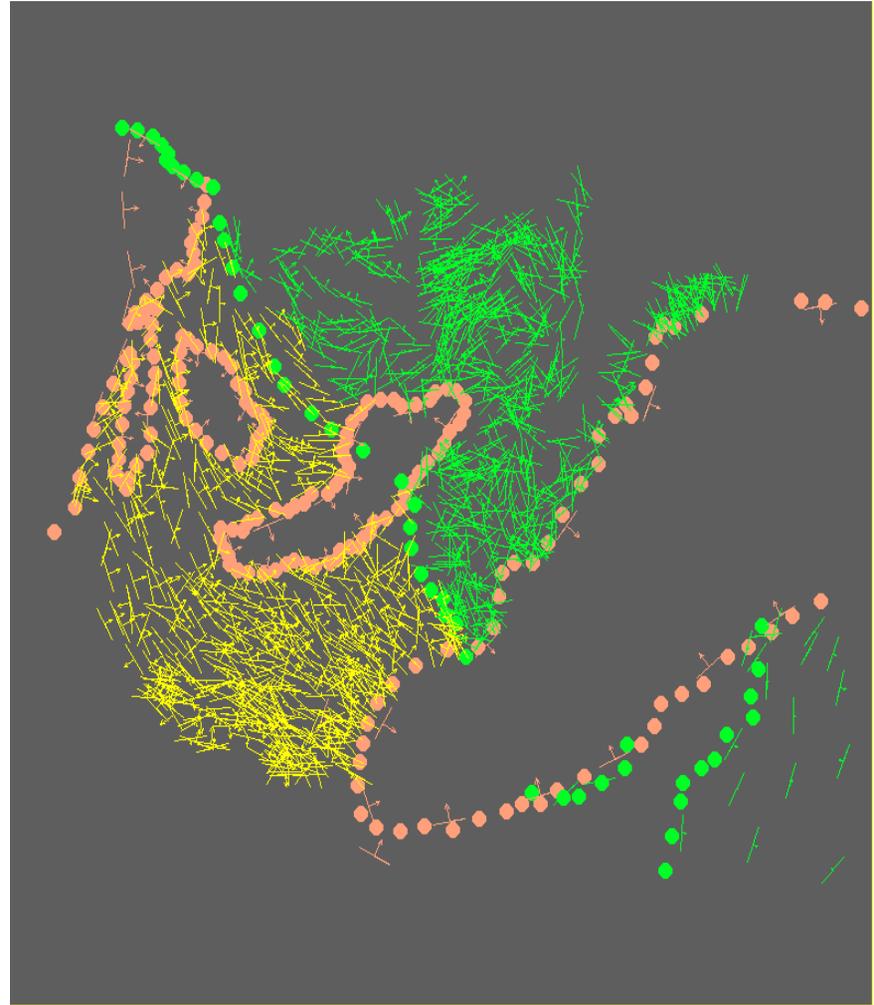
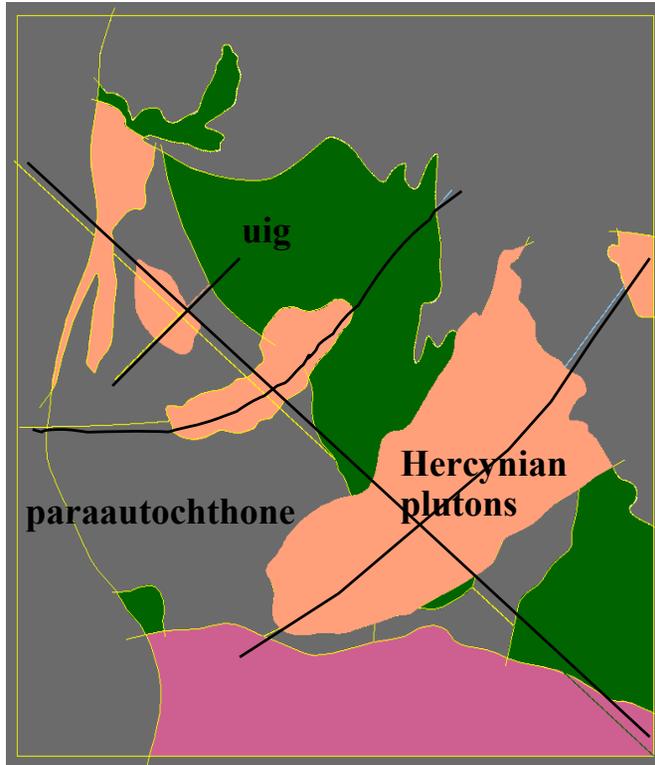
As-Be geochemical anomalies: a \approx 315 Ma granite-related hydrothermal alteration



W-As, Au-Bi geochemical anomalies: the 305 Ma hydrothermal alteration

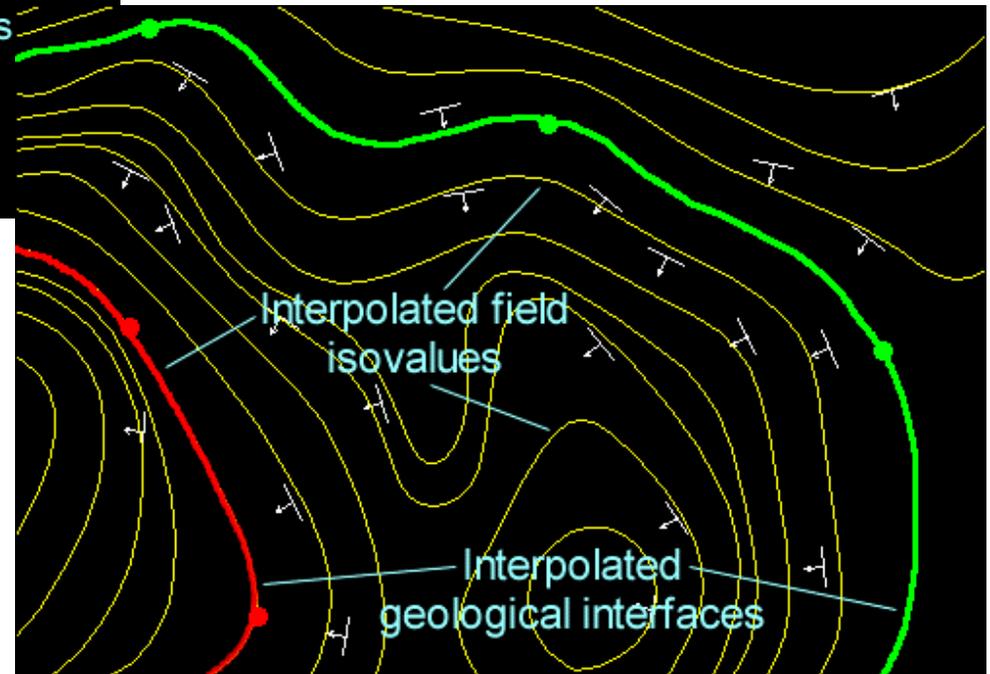
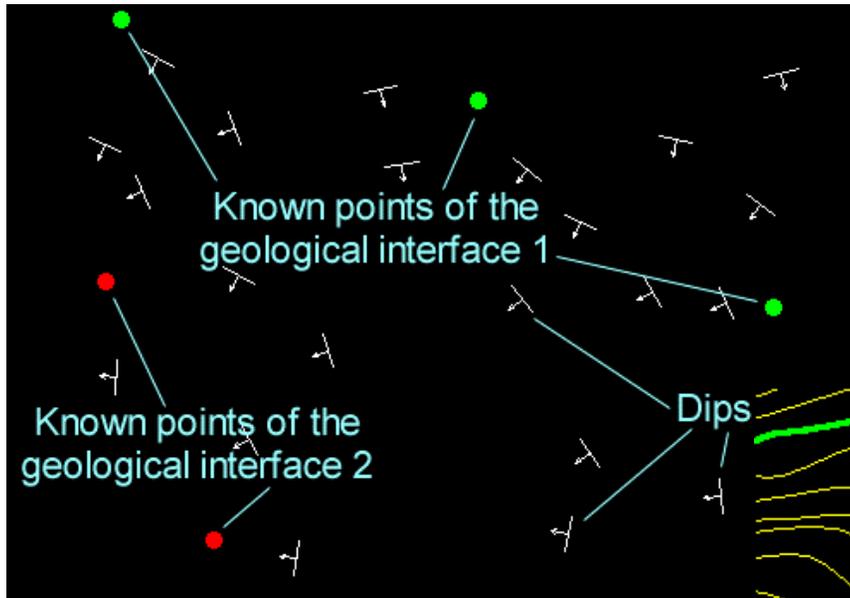


Simplified geological map and structural data of the Chataîgneraie



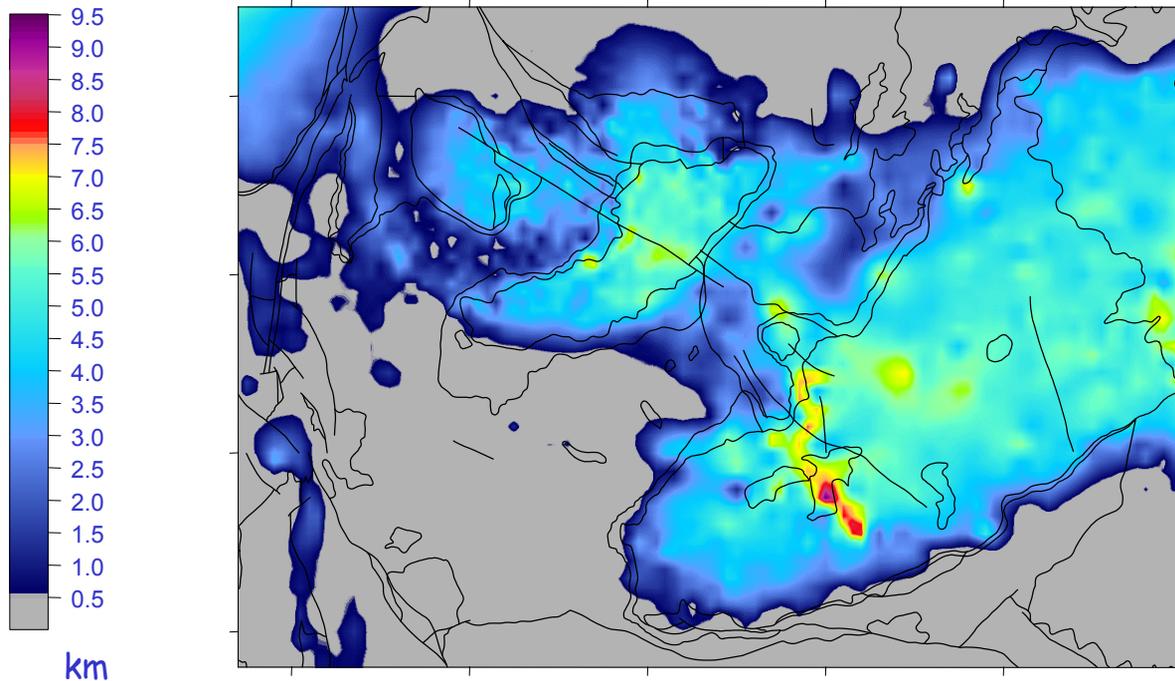
3. Modéliser en 3D la géométrie pour comprendre la structure et l'histoire

Using the strain field as a tool for building the a priori 3D geometrical model

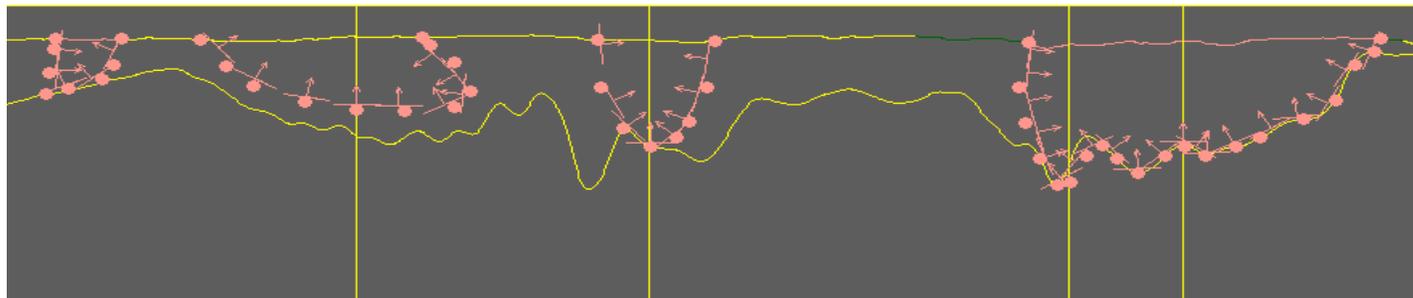


- *Lajaunie, Courrioux et al., Math Geol, 1997*

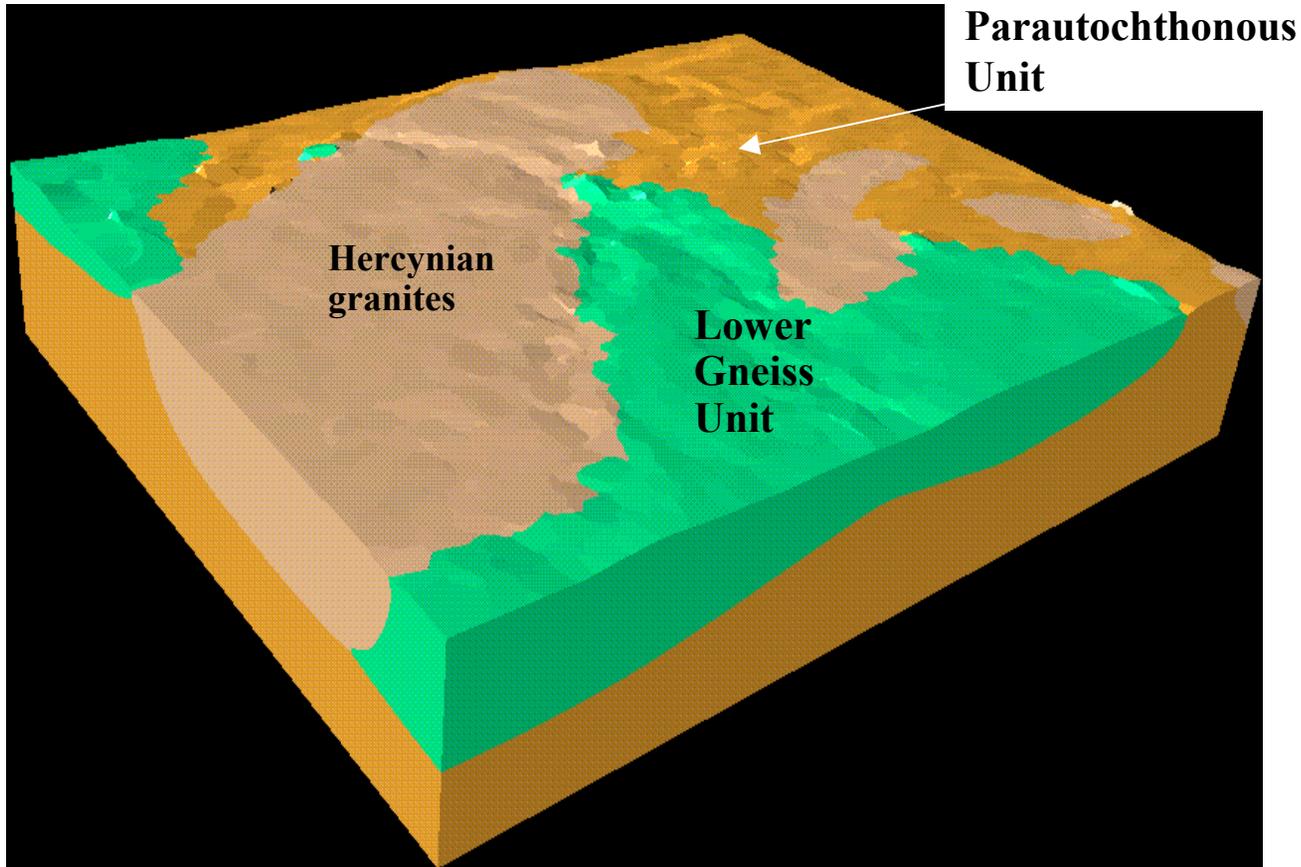
4. Valider les modèles par l'analyse multi-données géophysiques



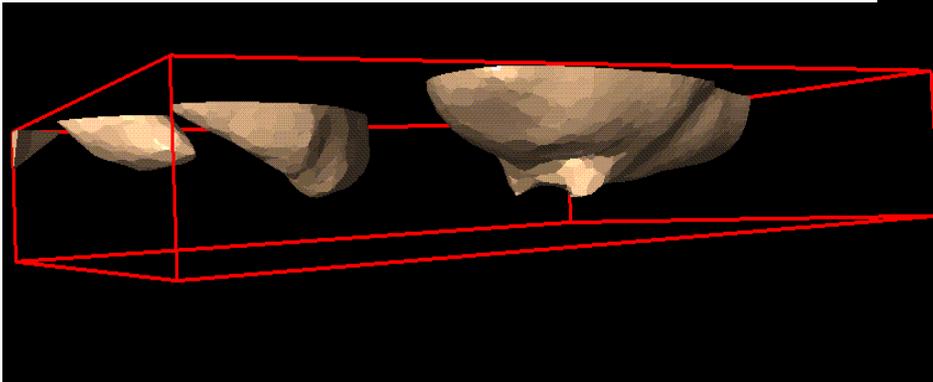
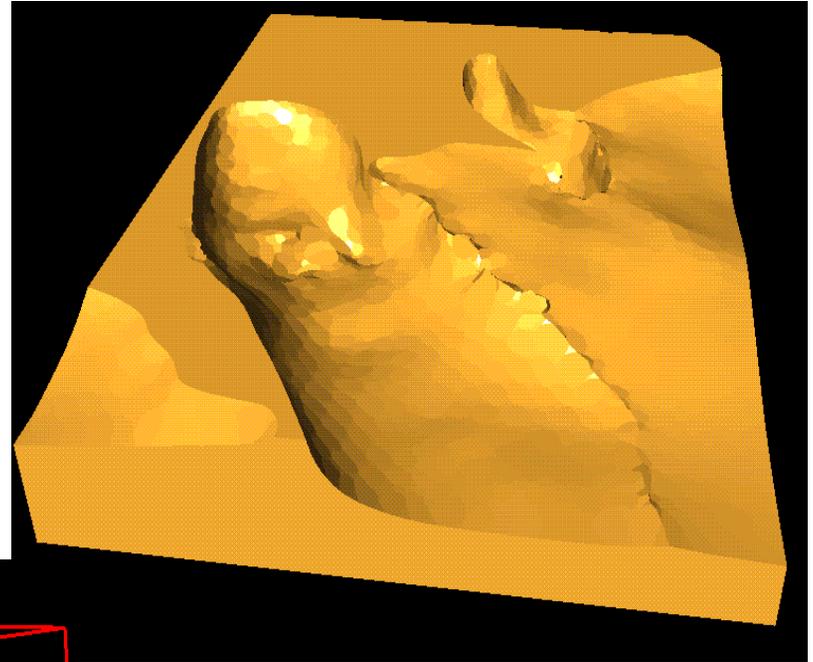
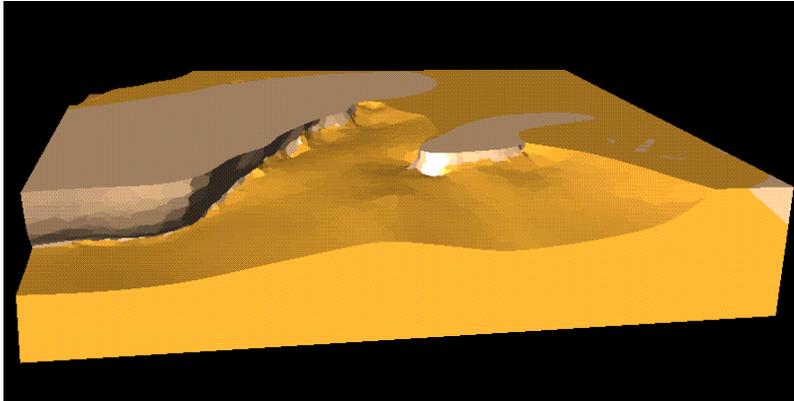
La profondeur du granite par inversion des données gravimétriques



Le modèle volumique de la Chataîgneraie



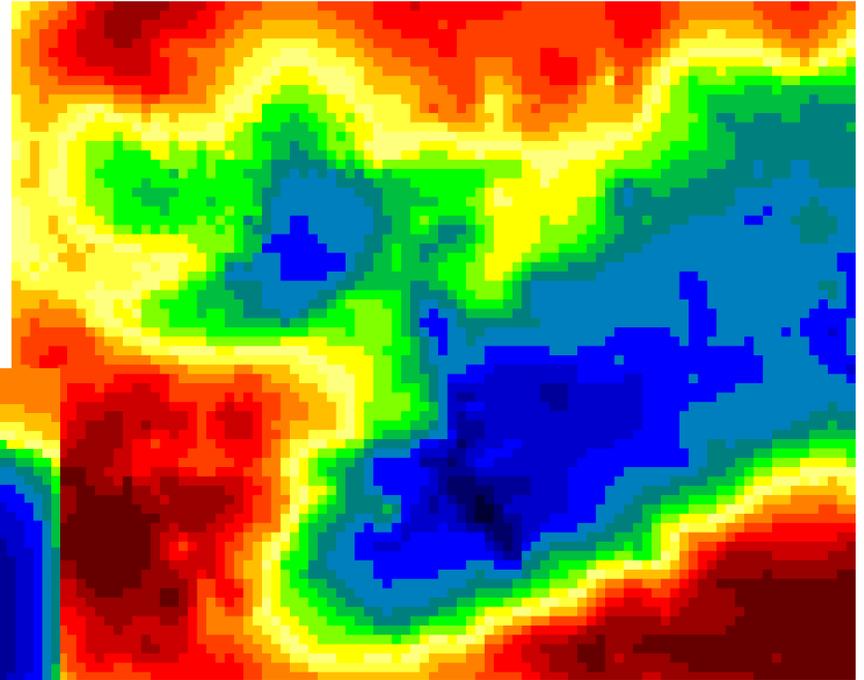
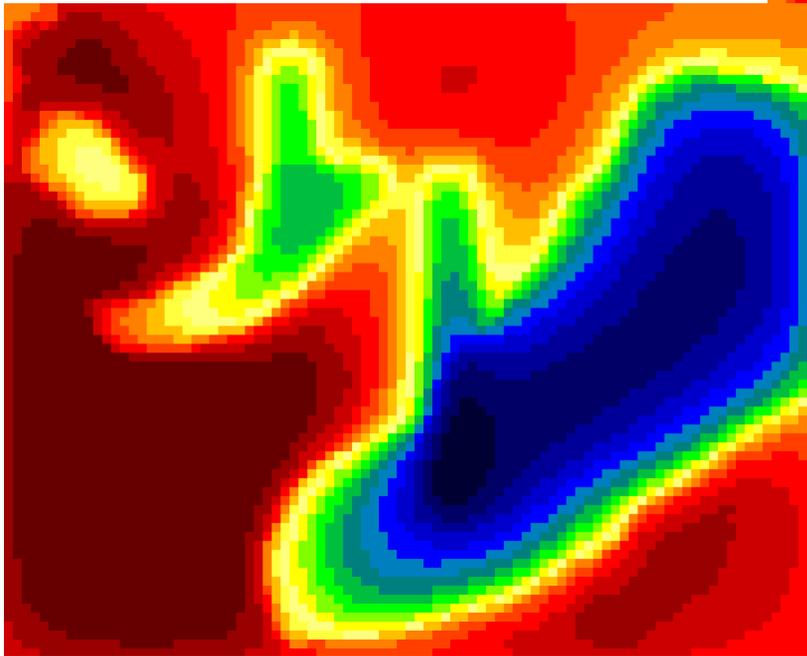
Les unités Parautochthones avec et sans granites



5. Définir les solutions spatiales 3D par litho-inversion

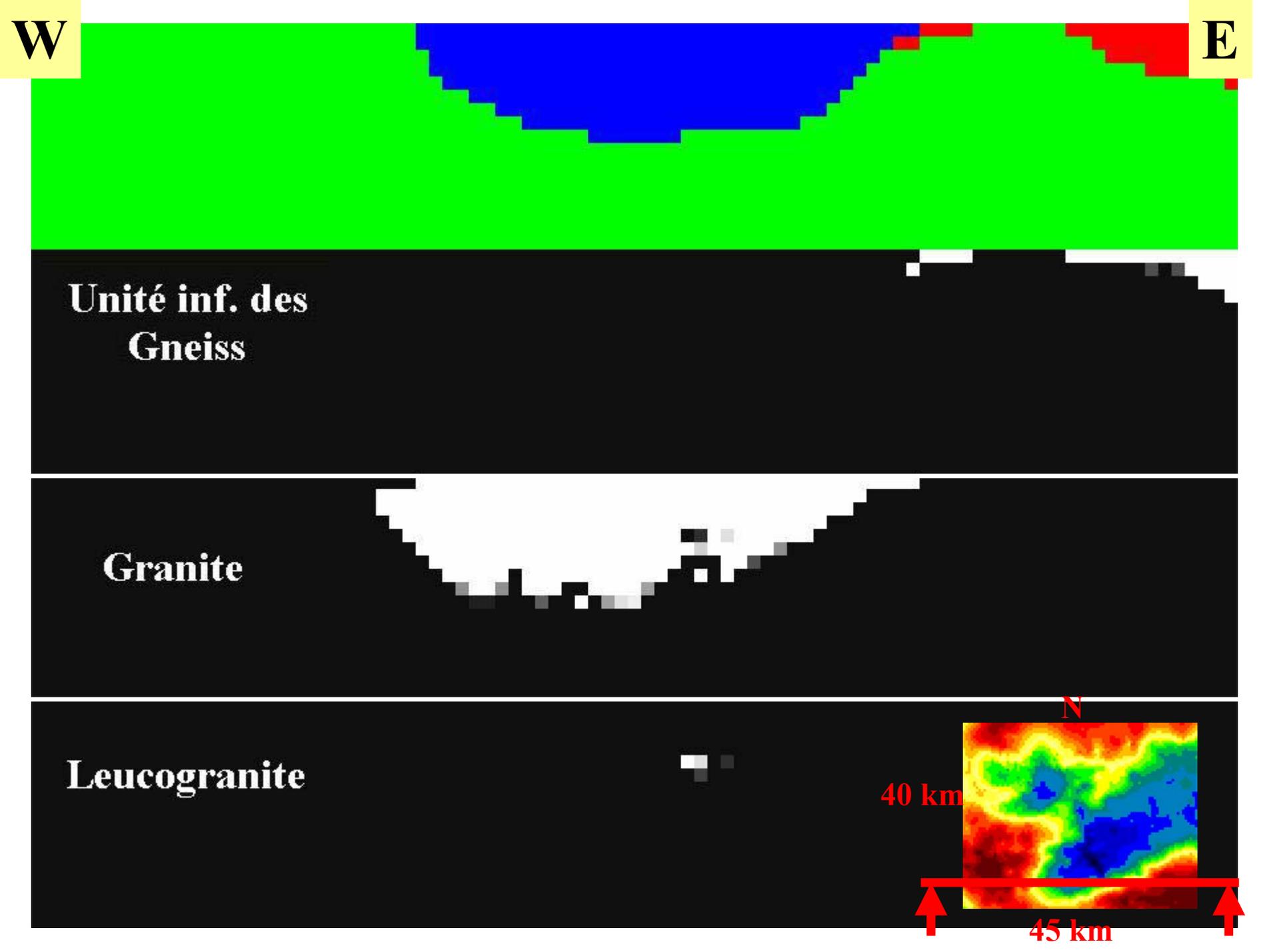
- Calculer les effets physiques du modèle
- Inverser les données géophysiques (gravimétrie et magnétisme)
- Définition des solutions spatiales 3D et probabilité d'extension en profondeur des lithologies et structures
- Test des propriétés physiques du modèle

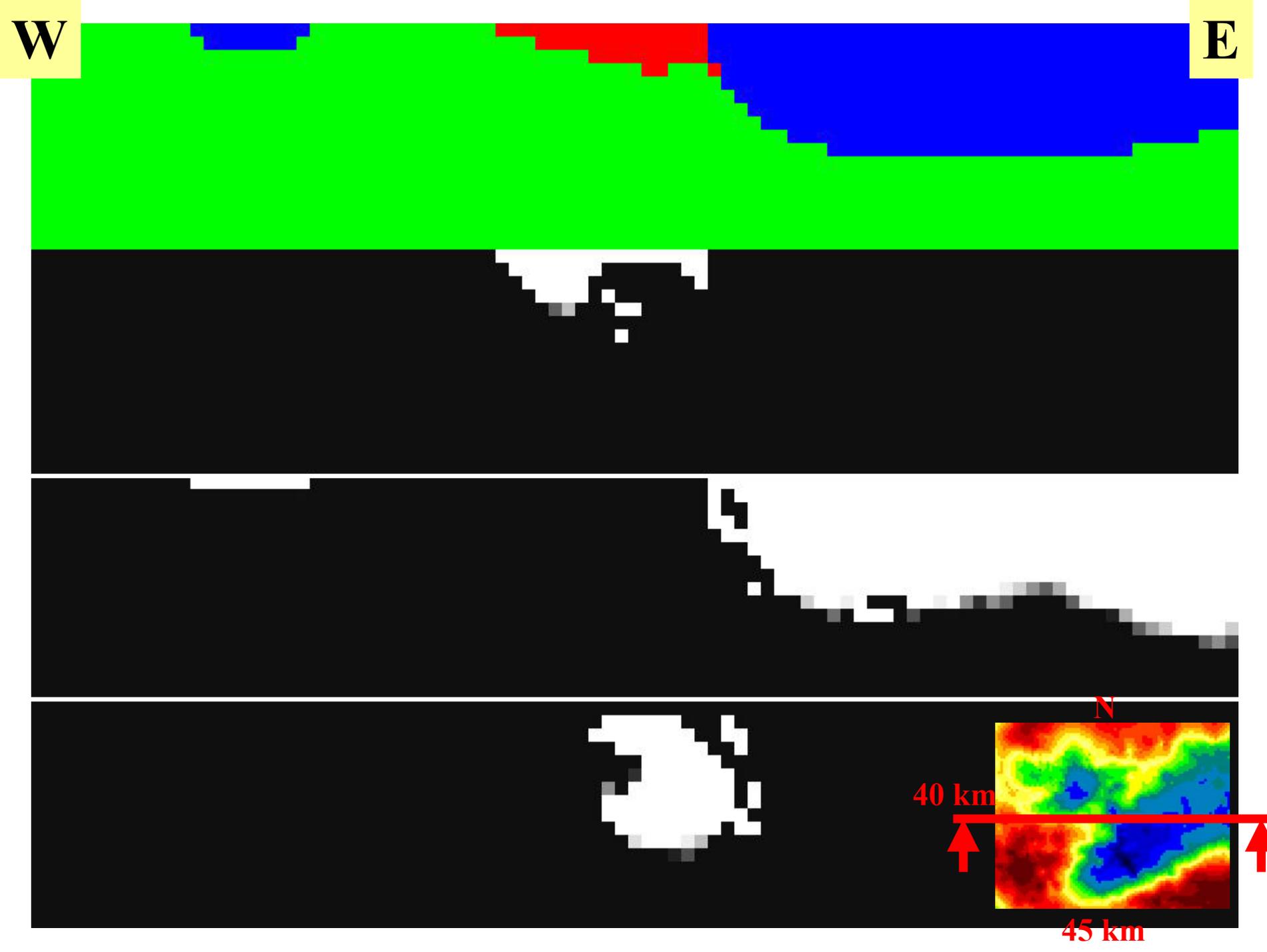
La Châtaigneraie



L'anomalie de
Bouguer mesurée

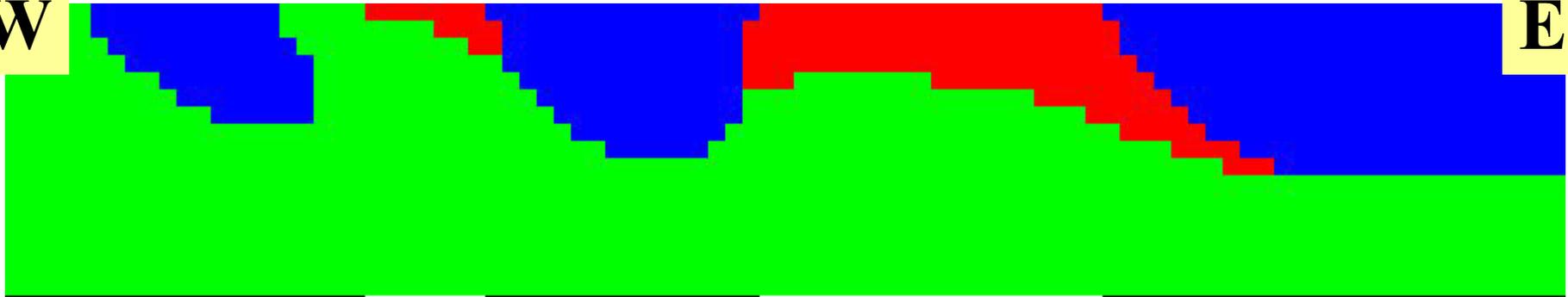
Le calcul de l'anomalie gravimétrique
résultant du modèle



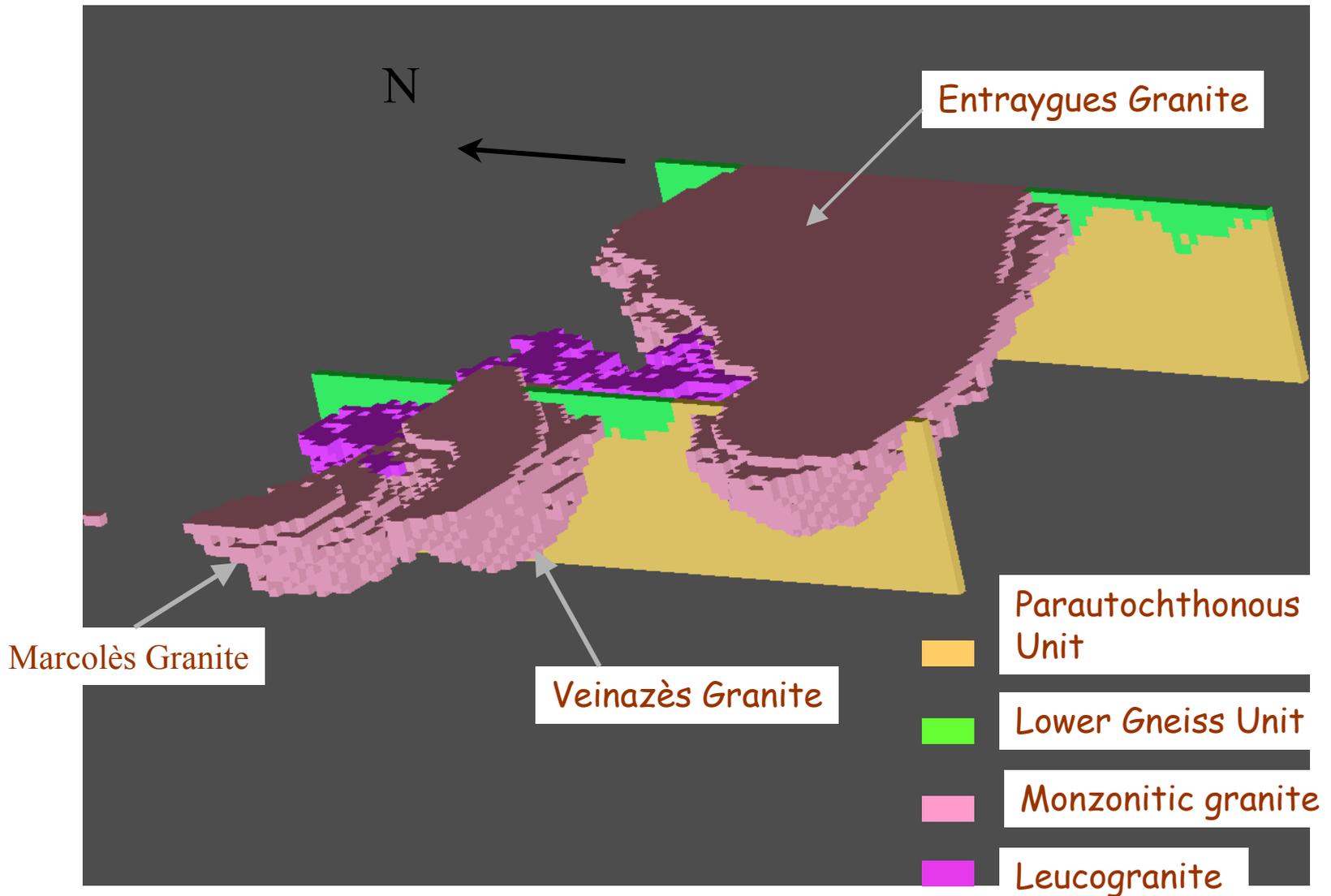


W

E



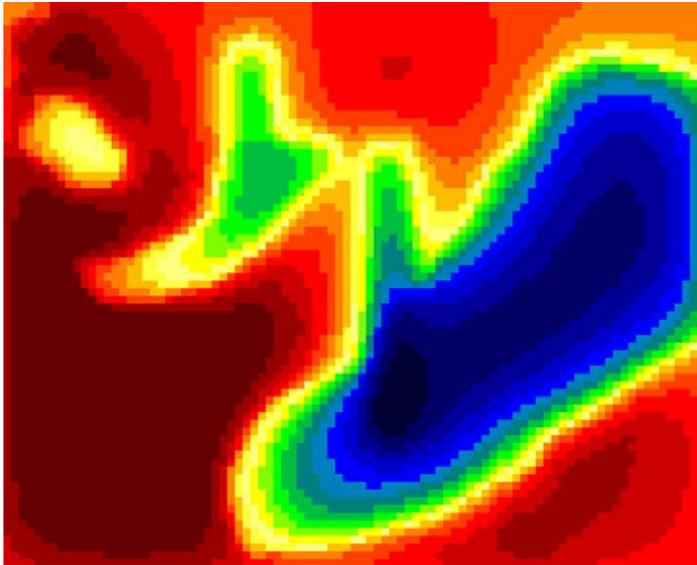
The Chataîgneraie granites after 3D litho-inversion



Résultat de la litho-inversion 1.

1. Carte gravimétrie mesurée
2. Contribution gravimétrique du modèle initial 3D
3. Contribution gravimétrique du modèle final

2.



3.

