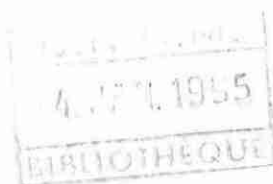




DOCUMENT PUBLIC

Géoprospect TD Rapport d'avancement annuel

**Décembre 1994
Rapport BRGM R 38242**





DOCUMENT PUBLIC

Géoprospect TD Rapport d'avancement annuel

M. Garcin



**Décembre 1994
Rapport BRGM R 38242**

**SERVICE GEOLOGIQUE NATIONAL
Département Utilisation et Protection de l'Espace Géologique
B.P. 6009 - 45060 Orléans - France - tel : (33) 38 64 34 34**

Mots clés : géoprospective, simulation, évolution future, outils, programmation objet.

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

GARCIN M. (1994) - Géoprospect TD : Rapport d'avancement annuel - Rapport BRGM R 38242, 44 pages, 16 figures.

© BRGM, 1994, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

RESUME

Ce rapport présente l'état d'avancement de Géoprospect TD à la fin de l'année 1994.

Géoprospect TD est un démonstrateur d'atelier de géoprospective dont l'objectif est de permettre la simulation de l'évolution future d'un paysage sur des temps de l'ordre de 100 000 ans. Il a été réalisé dans le cadre du projet de recherche P09 du BRGM.

Après avoir défini les notions et concepts de base de la géoprospective et de l'atelier, les modules traités au cours de l'année 1994 sont succinctement présentés.

Il s'agit des modèles suivants :

- modèle d'érosion/sédimentation surfacique,
- modèle d'érosion fluviale,
- modèle climatique,
- modèle permafrost,
- modèle biosphère (végétation),
- modèle d'accidents cassants,
- modèle de mouvements verticaux,
- modèle de mouvements de basculement.

Certains de ces modèles ont été spécifiés et intégrés dans le démonstrateur tandis que d'autres ne sont encore qu'au stade de la spécification.

Les couplages entre ces modèles, qui correspondent à des processus d'interactions voir de rétroactions, ont été prévus. Certains sont effectifs, tandis que d'autres restent à déterminer précisément (par exemple couplages précipitation/érosion et végétation/érosion).

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION	9
1 -PRINCIPES GENERAUX	10
1.1 - LE FACTEUR TEMPS	10
1.2 - NOTION D'ECHELLE DES PHENOMENES	10
1.2.1 - échelle globale.....	10
1.2.2 - échelle régionale.....	11
1.2.3 - échelle locale.....	11
1.2.4 - rapport et liens entre les processus d'échelle différente.....	11
1.3 - NOTION DE "PAYSAGE"	12
1.3.1 - définition.....	12
1.3.2 - le site: un élément du paysage.....	12
1.3.3 - l'héritage	13
1.3.4 - conclusions	13
1.4 - LE CONCEPT "SCENARIO-ACTEUR-METTEUR EN SCENE"	13
1.5 - DU COUPLAGE DES DIVERS PHENOMENES EN GEOPROSPECTIVE	14
2 - LE CONCEPT D'ATELIER DE GEOPROSPECTIVE.....	15
2.1 - IMPORTANCE DE LA COHERENCE.....	15
2.2 - ARCHITECTURE D'ENSEMBLE	15
2.2.1 - Pré-processeurs	15
2.2.2 - Processeur.....	16
2.2.3 - Post-processeur	16
2.2.4 - Divers	16
3 - PRESENTATION SOMMAIRE DE GEOPROSPECT TD	17
3.1 - ENVIRONNEMENT INFORMATIQUE.....	17
3.1.1 - Matériel et système d'exploitation	17
3.1.2 - Langage et technique de programmation	17
3.2 - GEOSCRIPT	17
3.2.1 -Objectifs	17
3.2.2 - Principe de fonctionnement.....	17

3.3 - GEOFAILLE	18
3.3.1 - Objectifs	18
3.3.2 - Principe de fonctionnement	18
3.4 - GEOEVOL	18
3.4.1 - Objectifs	18
3.4.2 - Principes de fonctionnement	18
3.4.2.1 - Création de paysages	18
3.4.2.2 - Simulation de l'évolution d'un paysage	19
3.5 - GEORESULT	19
3.5.1 - Objectifs	19
3.5.2 - Principes de fonctionnement	20
 4 - PROPOSITION DE MODELISATION DE PROCESSUS	 22
4.1 - MODELE D'EROSION/SEDIMENTATION SURFACIQUE	22
4.1.1 - Objectif	22
4.1.2 - Description	22
4.1.3 - Intégration	23
4.2 - MODELE D'EROSION/SEDIMENTATION FLUVIALE	23
4.2.1 - Objectif	23
4.2.2 - Description	25
4.3 - MODELE CLIMATIQUE	27
4.3.1 - Objectif	27
4.3.2 - Description	27
4.3.3 - Intégration	30
4.4 - MODELE PERMAFROST	32
4.4.1 - Objectif	32
4.4.2 - Description	32
4.4.3 - Intégration	32
4.5 - MODELE BIOSPHERE (VEGETATION)	34
4.5.1 - Objectif	34
4.5.2 - Description	34
4.5.3 - Intégration	37
4.6 - MODELE D'ACCIDENTS CASSANTS	37
4.6.1 - Principes	37
4.6.2 - Description	37
4.6.3 - Typologie des failles modélisées	38
4.6.3.1 - Failles normales	38
4.6.3.2 - Failles inverses	38
4.6.4 - Combinaisons des failles	40
4.6.5 - Intégration	40

4.7 - MODELE DE MOUVEMENTS VERTICAUX	40
4.7.1 - Objectif.....	40
4.7.2 - Description	40
4.7.3 - Intégration.....	41
4.8 - MODELE DE MOUVEMENTS DE BASCULEMENTS.....	41
4.8.1 - Objectif.....	41
4.8.2 -Description	41
4.8.3 - Intégration.....	41
4.9 - INTEGRATION DES MODELES TECTONIQUES	41
5 - CONCLUSION.....	43
BIBLIOGRAPHIE	44

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Protocole de mise en oeuvre de Géoprospect TD.	21
Figure 2 : Dialogue de modifications des paramètres lithologiques.	24
Figure 3 : Dialogue de modifications des flux d'érosion.	24
Figure 4 : Températures et précipitations pour les climats de référence "toundra" et "boréal"	28
Figure 5 : Températures et précipitations pour les climats de référence "tempéré et tempéré chaud"	29
Figure 6 : Relations entre la température moyenne annuelle et les températures par trimestre	31
Figure 7 : Relations entre la température moyenne annuelle et les précipitations.....	31
Figure 8 : Restitutions des informations climatologiques et phytoclimatiques dans Géoprospect	33
Figure 9 : Répartition des principales formations végétales sur le climagramme Qn2/T ou tc.....	35
Figure 10 : Base de données phytoclimatiques intégrées.....	36
Figure 11 : Panneau modifié par une faille normale et par faille inverse	39
Figure 12 : Faille normale sans amortissement	39
Figure 13 : Faille normale avec amortissement latéral.....	39
Figure 14 : Faille normale avec amortissement latéral et longitudinal.....	39
Figure 15 : Définition d'une faille à l'aide de Géoscript	42
Figure 16 : Définition d'un basculement à l'aide de Géoscript.....	42

INTRODUCTION

Ce travail a été réalisé dans le cadre du programme de recherche P09 du BRGM "Paléoclimatologie et géoprospective; module Géoprospect II". Il correspond à la réalisation des tâches "modèle climatique", "biosphère" et "tectonique" prévues pour 1994.

Géoprospect TD est un démonstrateur d'atelier informatique en géoprospective (Garcin 1993, Garcin *et al.* 1994) qui s'appuie sur les réflexions menées depuis une dizaine d'années sur la géoprospective et s'inscrit dans la lignée des outils développés depuis 1984 (Castor, Herode, Castor PC, Géoprospect). La réflexion menée sur Géoprospect TD s'effectue parallèlement aux recherches menées en collaboration avec le Laboratoire de Recherche en Informatique d'Orsay (L.R.I) sur l'application des techniques de l'intelligence artificielle à la géoprospective. Ces investigations sont complémentaires et permettront à terme de construire des outils opérationnels de simulation de l'évolution future de la géosphère. Un effort particulier a été effectué quant au couplage entre processus géologiques, aux traitements graphiques et numériques des résultats ainsi qu'à l'aspect ergonomique du système.

L'objectif de Géoprospect TD est de simuler l'évolution d'une région (paysage) sur des échelles de temps de plusieurs dizaines de milliers d'années. Ce système intègre, au travers de plusieurs outils, les phénomènes d'échelle globale (variations des températures, variations eustatiques etc.), les processus d'échelle régionale (érosion, sédimentation, accident, végétation, permafrost etc.) et permet de quantifier, de traiter statistiquement et de visualiser les résultats obtenus (fig. 1).

A l'heure actuelle, les phénomènes d'échelle globale sont pris en compte dans Géoprospect TD tandis qu'à l'échelle régionale des modèles d'érosion "surfactive" (érosion et sédimentation), d'accidents cassants, de basculements, de mouvements verticaux, de climatologie et de végétation climacique sont intégrés. Quelques tests ont été réalisés, ils se sont avérés pleins d'avenir. Rappelons toutefois que les "modèles" mis en oeuvre sont relativement simples et qu'ils nécessiteraient une validation sur plusieurs zones caractéristiques dont les évolutions géologiques et climatiques seraient bien connues.

Ce rapport présente succinctement l'état des réflexions et offre des propositions de modélisations de l'érosion et de la sédimentation couplée aux variations eustatiques, aux mouvements verticaux, aux failles actives, aux variations de température en domaine continental ainsi qu'à la végétation climatique. Cette forme de modélisation, prenant fortement en compte les processus d'interactions entre les phénomènes, a été partiellement testée sur la version actuelle de Géoprospect TD.

1 - PRINCIPES GENERAUX

1.1 - LE FACTEUR TEMPS

Le temps est le fil conducteur dans le cadre de la géologie prédictive, en effet, c'est le seul dénominateur commun qui existe entre tous les phénomènes susceptibles d'intervenir dans l'évolution géologique naturelle d'une région; qu'il s'agisse de paramètres orbitaux, de processus de géodynamique interne ou externe. Ce lien permettra une connexion et une prise en compte pertinente de ces phénomènes et de leurs effets sur la zone d'étude.

L'échelle temps à prendre en compte dans les études en géoprospective est de l'ordre de la centaine de milliers d'années, en conséquence, certains phénomènes auront des influences fortement lissées par rapport à leur impact pris en compte à une échelle historique. De ce fait, à l'heure actuelle, le pas d'échantillonnage de l'évolution des phénomènes et des paramètres dans *Géoprospect TD* a été fixé à 1000 ans. Le choix de cette valeur, si arbitraire soit il, a le mérite de ne pas occasionner un trop grand nombre d'itérations et donc de ne pas induire des temps de calcul prohibitifs. Il est toutefois clair que cette valeur a été choisie à des fins de validation mais qu'il serait souhaitable de travailler avec un pas de temps inférieur afin de ne pas estomper et de pouvoir analyser des événements géologiques brefs tel que le Younger Dryas, dont l'impact pourrait être important dans nos régions.

La résolution et la tranche de temps qui nous préoccupent sont compatibles avec ceux des prévisions des variations des paramètres orbitaux de la Terre fournis par les astrophysiciens. Ceci nous permettra donc d'utiliser leurs courbes comme une entrée de paramètres pour notre système.

1.2 - NOTION D'ECHELLE DES PHENOMENES

L'un des apports du projet Expect a été de démontrer l'importance de la prise en compte de l'échelle de laquelle dépend un phénomène donné. Cette constatation est d'ailleurs partagée par d'autres équipes européennes travaillant sur ce thème (Grande Bretagne, Hollande, etc.). Nous allons donc définir les échelles conceptuelles telles que nous les avons intégrées à *Géoprospect TD*.

1.2.1 - Echelle globale

Définition

Nous définissons l'échelle globale comme celle où les phénomènes sont vérifiés quelque soit la localisation géographique de la zone d'étude. Cette définition peut être élargie à des phénomènes dont l'impact sera d'échelle globale et primordial à la compréhension des phénomènes.

Type de phénomène

Dans *Géoprospect TD*, nous avons attribué à l'échelle globale les variations de températures moyennes annuelles, les variations du niveau marin ainsi que, par extension, les variations d'extensions et d'épaisseurs des inlandsis fennoscandien, laurentidien, écossais etc.

1.2.2 - Echelle régionale

Définition

L'échelle régionale est définie comme étant celle dont l'extension est suffisante pour prendre en compte des caractéristiques topographiques et géologiques susceptibles d'influer notablement l'évolution du centre de la zone d'étude.

Type de phénomène

Les phénomènes et les paramètres tels que l'érosion, le développement du permafrost, l'étagement de la végétation, les mouvements verticaux, les déformations isostatiques, l'épaisseur des formations superficielles, etc. seront intégrés à cette échelle.

1.2.3 - Echelle locale

Définition

L'échelle locale est définie comme étant celle où les phénomènes et paramètres traités sont inféodés au site de stockage lui même. Cette échelle est symbolisée par le centre de la zone d'étude définie comme échelle régionale.

Type de phénomène

A cette échelle locale sont attribués des phénomènes et des paramètres qui sont les résultats ultimes de l'évolution temporelle; ce sont par exemple la porosité, la perméabilité, la vitesse de transfert etc. : ce sont les paramètres décrivant l'état de la barrière géologique.

1.2.4 - Rapport et liens entre les processus d'échelle différente

On peut définir les liens entre processus appartenant à différentes échelles comme des liens descendants.

Ainsi, les phénomènes d'échelle globale auront des influences (liens de causalité) sur ceux des échelles régionales et locales; ceux de l'échelle régionale auront un rôle sur ceux de l'échelle locale. Par contre, il n'existe pas de liens ascendants entre processus (les processus associés à l'échelle locale ne peuvent influencer ceux de l'échelle régionale et a *fortiori* ceux de l'échelle globale).

Les différents processus de l'échelle globale fournissent les paramètres d'entrée à ceux de l'échelle régionale et locale et opèrent un "forcing" sur ceux de l'échelle régionale. Le passage de l'échelle globale à régionale s'opère par l'intermédiaire de variables géographiques de localisation qui permettent de particulariser la réponse régionale.

1.3 - NOTION DE "PAYSAGE"

1.3.1 - Définition

Le "paysage", tel qu'il est conçu dans *Géoprospect TD*, correspond à l'échelle régionale conceptuelle.

Le paysage est défini comme un objet comprenant :

- une topographie représentée numériquement par un modèle numérique de terrain,
- des formations superficielles dont on connaît la géométrie et les épaisseurs. Elles sont représentées numériquement comme une matrice à la même résolution que la topographie et fournissant sur chaque maille l'épaisseur de sédiment.
- des caractéristiques climatiques (températures et précipitations),
- des caractéristiques lithologiques,
- des caractéristiques tectoniques: failles, mouvements verticaux et de basculement,
- des informations géographiques: localisations, résolution de la maille etc.

Le paysage, où zone de travail, intègre donc des composants physiques et géographiques ce qui permettra de le restituer son évolution propre à partir de données globales.

Selon la disponibilité des données ou la particularité de l'étude, l'échelle du paysage et la résolution des données pourront être différentes.

A partir de ces informations de base, des données plus spécifiques sont extractibles telles que les réseaux hydrographiques, les matrices d'écoulement, cartes des pentes etc.. D'autres sont superposables: failles, limites de blocs ...

Des informations biologiques, comme la végétation par exemple, sont associées au paysage dans le but d'effectuer, dans une version ultérieure, un couplage géosphère-biosphère.

1.3.2 - Le site: un élément du paysage

Le site, dans *Géoprospect TD* est la matérialisation de l'échelle locale conceptuelle et correspond au site de stockage *sensu stricto*. Ses paramètres sont très fortement liés et contraints par le paysage qui l'entoure; c'est en ce sens que le site peut être considéré comme un point particulier du paysage. Des paramètres spécifiques décrivant les propriétés de la barrière géologique sont associés à ce point particulier.

1.3.3 - L'héritage

L'un des points fondamentaux de la géoprospective est la prise en compte des événements passés ayant affecté et façonné la zone d'étude. Ceci est valable aussi bien pour les phénomènes ayant trait à la géodynamique interne qu'externe.

Concernant cette dernière, la prise en compte d'une topographie, des épaisseurs et de la répartition des corps sédimentaires les plus réalistes possibles (modèles numériques de terrain à haute résolution) permettra au modèle d'érosion (par exemple) de fonctionner sur un paysage dont les traces de son évolution passée seront exprimées; le modèle sera dans ce cas guidé d'une part par cet héritage géologique et d'autre part par les nouvelles modifications de son environnement.

1.3.4 - Conclusions

La prise en compte du paysage sous ses aspects physiques (topographie, lithologie, températures, etc.) et géographiques (latitude, longitude, résolution spatiale etc.) va permettre d'établir les liens entre ce dernier et divers phénomènes d'échelle globale susceptibles de le modifier dans le temps.

A titre d'exemple, ceci permettra au cours de son évolution de restituer :

- ses altitudes,
- l'évolution des corps sédimentaires (position et épaisseurs des formations superficielles) à l'aide de modèles d'érosion/sédimentation couplés,
- les températures moyennes annuelles en surface (à partir de courbe de variation globale, de la température moyenne annuelle actuelle, des altitudes de la zone et de sa position géographique).

L'existence et les épaisseurs de permafrost pourront être évalués (dans une version ultérieure) à partir de l'évolution des températures de surface, de la lithologie du sous sol et du flux géothermique.

Avec un modèle de végétation, certaines rétroactions entre biosphère et géosphère pourront être gérés.

1.4 - LE CONCEPT "SCENARIO-ACTEUR-METTEUR EN SCENE"

Suite aux chapitres précédents, on peut rapprocher une analyse géoprospective de l'élaboration d'un film.

L'expert peut en effet être considéré comme un metteur en scène qui va appliquer un scénario et tester le "jeu" d'un acteur en fonction de ce scénario.

En effet, les phénomènes d'échelle globale peuvent être assimilés à une histoire commune à tous les points du globe qui va être imposé ("scénario").

L'utilisateur (le metteur en scène) va créer plusieurs scénarios d'évolutions possibles des paramètres globaux dont il va vouloir tester l'impact sur plusieurs régions et sites. Ces régions vont être les acteurs qui possèdent leurs propres histoires et caractéristiques et qui vont, en fonction de celles ci, réagir différemment (rôle de l'héritage).

Le résultat (le film) sera la réponse d'un paysage à un scénario donné, cette réponse se traduira dans le temps par des modifications telles que les altitudes, les températures, les positions de l'exutoire.

L'expert pourra ainsi, à partir du même scénario, comparer plusieurs sites où sur le même site appliquer plusieurs scénarios afin d'analyser la sensibilité de ce dernier à différents paramètres.

1.5 - DU COUPLAGE DES DIVERS PHENOMENES EN GEOPROSPECTIVE

L'évolution naturelle d'une région ou d'un site est le résultat des influences conjuguées de multiples phénomènes interagissant les uns par rapport aux autres. Les processus de rétroaction y sont nombreux et les interdépendances quasi systématiques. De ce fait, toute étude géoprospective s'attache à l'analyse des phénomènes et de leurs relations.

En conséquence, il paraît primordial que les outils développés dans ce but intègrent ces divers processus afin de fournir les réponses les plus pertinentes possibles.

Le premier problème qui se pose alors est que, bien souvent, les modèles traitant d'un phénomène unique sont très complexes, lourds à mettre en oeuvre et parfois coûteux en temps de calcul. Il nous paraît donc plus judicieux de concevoir et d'utiliser des modèles simplifiés intégrés et couplés dans le même système.

Le second problème est qu'assez souvent, on s'aperçoit que certaines conséquences induites par un phénomène ne sont pas quantifiables compte tenu de nos connaissances actuelles.

Concernant le premier point, il nous paraît à l'heure actuelle plus judicieux d'utiliser des modèles simplifiés. En effet, " l'erreur " induite par l'utilisation de modèles simplifiés mais couplés les uns aux autres est dans beaucoup de cas inférieure à celle induite lors de l'utilisation de modèles sophistiqués mais unitaires. A titre d'exemple, l'utilisation d'un modèle d'érosion ne tenant pas compte des mouvements verticaux ou des variations du niveau marin donneraient des résultats physiquement valides mais irréalistes. En effet, en plus des phénomènes de reprise d'érosion par variation du niveau de base qui ne pourrait être traités, les erreurs d'évaluation de l'altitude seraient très élevées: l'intervalle de variation des niveaux marins se situe dans la tranche de -120 m à +6 m durant le Quaternaire; une différence d'altitude résultant de l'utilisation de deux modèles d'érosion de 120 m en quelques 100 mille ans paraît fortement improbable.

Quant au second type de problème, il ne peut être éliminé que par la poursuite des recherches phénoménologiques ou gommé en utilisant des techniques différentes comme celles mises en oeuvre dans le projet Expect qui s'appuient largement sur le raisonnement qualitatif (Djerroud et al. 1993 , Godefroy et al. 1993).

2 - LE CONCEPT D'ATELIER DE GEOPROSPECTIVE

Comme nous l'avons démontré dans les chapitres précédents, les études de géoprospective nécessitent la mise en oeuvre de nombreux modèles. Afin de satisfaire ces exigences, il nous paraît primordial que l'utilisateur puisse avoir des outils adaptés et conçus pour cette problématique.

2.1 - IMPORTANCE DE LA COHERENCE

L'un des apports, et non des moindres, d'un atelier est de fournir des outils dont l'objectif est d'être complémentaire au sein d'un ensemble cohérent. Par nature, les ponts entre ces différents outils sont innés, les communications et échanges aisés. Les modes opératoires, l'ergonomie et la convivialité des outils étant proches, l'utilisateur se retrouve devant un atelier cohérent, homogène; l'apprentissage, la maîtrise et donc l'élaboration de l'étude en sont facilités.

Bien qu'homogène, l'atelier se compose d'outils complémentaires, ce partage des tâches permet une séparation "physique" entre les différents concepts instanciés par les outils.

Ainsi, les échelles conceptuelles globales et régionales/locales seront (dans cette version de *Géoprospect TD*) affecté à deux outils.

L'autre point positif est le partage des grandes tâches nécessaires à une étude géoprospective en plusieurs phases distinctes non séquentielles (élaboration des scénarios, définitions d'un paysage, simulation, traitements post-simulation). Compte tenu du nombre très élevé de paramètres et de phénomènes à prendre en compte, ce point n'est pas superflu.

2.2 - ARCHITECTURE D'ENSEMBLE

Le démonstrateur est composé de quatre outils principaux participant à l'élaboration de l'étude géoprospective, ils sont la représentation du concept scénario-acteur-metteur en scène.

2.2.1 - Pré-processeurs

Leur rôle est de permettre la création de scénarios d'évolution future, de définir les objets tectoniques. Ils traitent soit que de phénomènes appartenant à l'échelle globale soit des processus propres à la zone d'étude.

Les scénarios créés peuvent avoir des durées variables et pourront être entièrement différents en fonctions des hypothèses concernant des variations futures des paramètres orbitaux par exemple. Les objets tectoniques pourront être modifiés (localisation, type, vitesse) en fonction des hypothèses de travail.

2.2.2 - Processeur

Son rôle est double; d'une part il sert à créer les paysages (acteurs), d'autre part il va permettre d'appliquer aux paysages l'un des scénarios disponibles afin d'effectuer une simulation.

La création d'un paysage va préciser sa nature (topographie, corps sédimentaires, caractéristiques climatiques etc.) mais aussi ses paramètres géographiques. Le paysage ainsi créé représente l'échelle conceptuelle régionale tandis que le site *sensu stricto* sera automatiquement accroché au centre de la zone d'étude (échelle locale).

2.2.3 - Post-processeur

Compte tenu de la grande quantité de données gérées et calculées par le processeur, il nous paraît utile de créer un outil permettant d'analyser, de visualiser, de traiter et de quantifier le paysage à différents stades de son évolution après avoir effectué une ou plusieurs simulations.

Cet outil permet :

- de visualiser la topographie, les pentes, les corps sédimentaires soit sous forme de courbe en fonction du temps, soit sous forme de cartes 2D ou des visualisations 3D pour des époques particulières,
- de quantifier et de comparer les variables d'une époque par rapport à une autre afin d'établir des bilans (érosion, volume de sédiments etc.).

2.2.4 - Divers

Nous incluons dans cet ensemble un groupe de logiciels utilitaires permettant de personnaliser et d'adapter l'atelier; il s'agit par exemple d'éditeurs de palettes graphiques, de rapport, d'utilitaires de conversions de fichiers etc.

3 - PRESENTATION SOMMAIRE DE "GEOPROSPECT TD"

Afin de tester la validité des concepts présentés précédemment et pour évaluer la faisabilité d'un atelier de géoprospective, nous avons développé un démonstrateur "Géoprospect Time Dépendant"; c'est cet outil que nous allons brièvement présenter dans les paragraphes suivants. La démarche nécessaire à la mise en oeuvre du système est celle présentée dans la figure 1 et suit la logique précédemment décrite.

3.1 - ENVIRONNEMENT INFORMATIQUE

3.1.1 - Matériel et système d'exploitation

Le démonstrateur *Géoprospect TD* fonctionne sur micro-ordinateur sous Windows 3.1™ sous MS DOS™. Il est préférable, afin d'avoir une finesse de restitution graphique correcte, de posséder une carte graphique haute résolution (800 x 600 ou 1024 x 768) avec 256 niveaux de couleurs.

3.1.2 - Langage et technique de programmation

Géoprospect TD a été développé en utilisant les techniques de programmation orientée objet en Pascal Orienté Objet pour Windows (TPW v1.5, Borland™). Les interfaces homme-machine (dialogues, icônes etc.) ont été réalisées selon des méthodes WYSIWYG (What You See Is What You Get).

3.2 - GEOSCRIP

3.2.1 - Objectifs

Cet outil permet de définir et de fournir des courbes d'évolution des paramètres d'échelle globale qui constitueront un scénario d'évolution ultérieurement appliqué au paysage.

3.2.2 - Principe de fonctionnement

Les paramètres de sortie d'échelle globale sont calculés à partir d'une courbe de variation de la température moyenne annuelle globale. Afin de faciliter la création de cette courbe, seuls les points d'inflexion des températures sont fournis en regard de leurs âges respectifs; ce sont ces points particuliers qui constituent les événements. A partir de ces événements, la courbe de la température est calculée puis le système appelle les modèles de couplage afin d'évaluer la variation des épaisseurs maxima des inlandsis (si la température le permet); ensuite, les niveaux marins relatifs sont calculés.

Ces couplages sont à l'heure actuelle simplifiés, ils s'effectuent selon une loi linéaire mais ils pourront, en fonction de l'évolution de nos connaissances sur ces phénomènes où des préférences de l'utilisateur, être rapidement modifiés.

Les événements définis par l'utilisateur et les scénarios calculés peuvent être sauvegardés indépendamment et être utilisés ultérieurement.

Une version ultérieure prenant en entrée des courbes orbitales (Imbrie et *al.* 1980 et Kukla et *al.* 1981) au lieu des variations de températures est prévue.

3.3 - GEOFAILLE

3.3.1 - Objectifs

Cet outil permet de définir des objets tectoniques de manière interactive sur la topographie. Ces objets tectoniques (failles, mouvements verticaux et de basculement) pourront être chargés afin d'être pris en compte dans les simulations.

3.3.2 - Principe de fonctionnement

L'utilisateur définit à l'aide de dialogue spécialisé les différents paramètres nécessaires à la création de chaque objet tectonique. Plusieurs objets de différentes natures peuvent être associés à un même paysage. Un fois les objets créés, l'utilisateur demande la création d'un modèle numérique de déformation (MND) qui intégrera les déformations conjuguées de chaque objet par unité de temps. C'est ce MND qui sera utilisé par le simulateur GéoEvol durant le calcul.

3.4 - GEOEVOL

3.4.1 - Objectifs

Deux objectifs principaux sont assignés à GéoEvol :

- 1 - la création de paysages,
- 2 - la simulation de l'évolution d'un paysage à partir de scénarios précédemment créés.

3.4.2 - Principes de fonctionnement

3.4.2.1 - Création de paysages

Cette tâche va consister à définir interactivement, à partir de modèles numériques de terrain (MNT) et d'un fichier décrivant les formations superficielles, un paysage. Après désignation de la zone sur une carte représentant le MNT, l'utilisateur désigne un fichier associé de formations superficielles et renseigne les différents paramètres propres à la zone tels que la température moyenne annuelle etc. Les paramètres géographiques (latitude, longitude, résolution...) sont automatiquement extraits du MNT par le système qui gère ensuite, d'une manière transparente, tous les fichiers constituant une représentation du paysage au temps initial. Le paysage sera ensuite sauvegardé; il pourra être utilisé immédiatement ou ultérieurement.

3.4.2.2 - Simulation de l'évolution d'un paysage

Après avoir chargé un paysage dans le système, il est nécessaire d'activer un scénario d'évolution. Celui-ci qui, par définition, correspond aux hypothèses d'évolution de paramètres globaux, n'est pas modifiable dans GéoEvol; par contre, les paramètres des modèles des phénomènes d'échelle régionale et locale sont accessibles. Leurs modifications, en utilisant un même scénario, permettent de tester et d'évaluer la réponse du paysage aux variations d'un ou plusieurs paramètres.

Le couplage entre les paramètres d'échelle globale et le paysage est géré par le système grâce aux paramètres géographiques intégrés au paysage.

L'utilisateur a la possibilité de charger avant la simulation les objets tectoniques se rapportant à la zone afin qu'ils soient pris en compte dans la simulation.

Les types de paramètres accessibles dépendent du nombre et de la complexité des modèles disponibles et activés pour une simulation.

A titre d'exemple, en ce qui concerne le modèle d'érosion/sédimentation actuellement installé dans GéoEvol, les valeurs du flux peuvent être modifiées (érosivité, creep) bien que des valeurs par défaut soient fournies; les coefficients d'érodabilité des roches du bed-rock ou des formations superficielles sont aussi modifiables.

Afin de garder des traces des états intermédiaires entre le temps initial et la fin de la simulation, l'utilisateur peut définir les dates auxquelles il souhaite conserver toutes les données du paysage (altitude, corps sédimentaires, températures etc.). Le paysage sera ainsi sauvegardé automatiquement dans sa totalité puis visualisé avec GéoEvol ou traité par GéoRésult.

Le paysage courant, lors d'une session de travail sous GéoEvol, peut être visualisé sous différents modes cartographiques qu'il s'agisse de la topographie, des formations superficielles, de la température: carte hypsométrique, pentes, orientation des pentes ombrage etc.

L'échelle de l'observation est modifiable et gérée par le système (1/25 000, 1/50 000 etc. ou une valeur d'échelle quelconque); les liens entre les valeurs et les couleurs de la représentation cartographique ainsi que les palettes de couleurs sont personnalisables.

3.5 - GEORESULT

3.5.1 - Objectifs

Son objectif est de permettre de visualiser, analyser et quantifier les variations des divers paramètres d'un paysage à différentes époques ou de comparer le même paysage aux mêmes époques mais avec un scénario différent ou des paramètres de modèle différents.

3.5.2 - Principes de fonctionnement

Après avoir effectué une ou plusieurs simulations, on charge les paysages correspondants à deux époques différentes ou deux paysages de la même époque résultants de deux simulations distinctes afin de calculer, par exemple, la différence d'altitude entre eux, les altitudes moyennes, la différence de volume des formations superficielles, le volume érodé, analyser les paramètres climatiques, phytoclimatiques ou encore pour comparer le tracé d'un cours d'eau.

L'utilisateur peut visualiser sous forme de cartes 2D avec divers traitement, ou sous forme 3D les paysages.

Les bilans entre deux paysages (différences d'altitude etc.) peuvent eux aussi être visualisés. La sélection des différentes opérations se fait à l'aide de dialogues spécialisés, l'évaluation des résultats se fait rapidement.

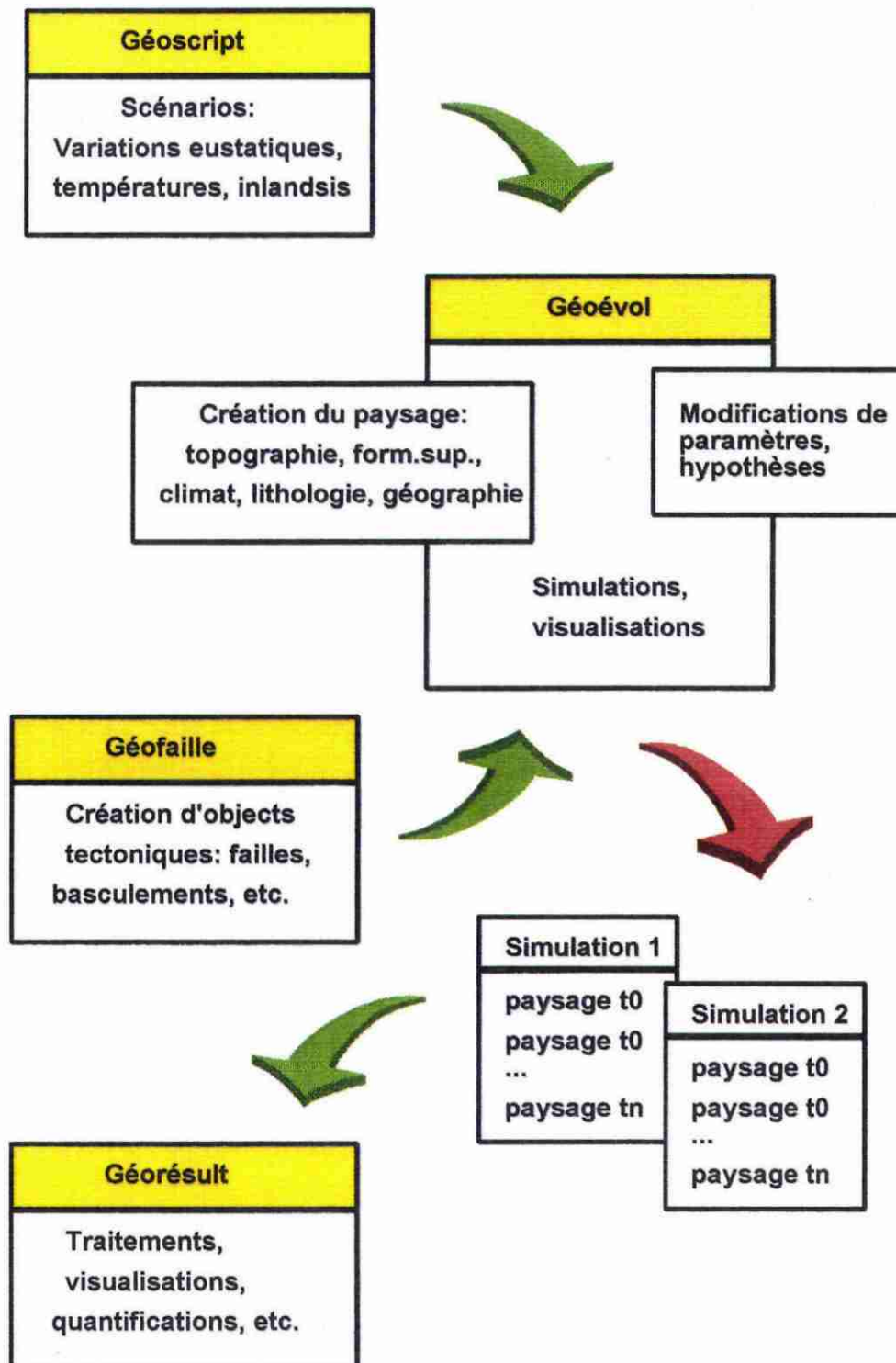


Figure 1: Protocole de mise en oeuvre de Géoprospect TD

4 - PROPOSITION DE MODELISATION DE PROCESSUS

4.1 - MODELE D'EROSION/SEDIMENTATION SURFACIQUE

4.1.1 - Objectif

L'objectif de ce modèle, actuellement installé sur le démonstrateur, est de permettre une simulation de l'érosion et de la sédimentation surfacique en domaine continental, dans les trois dimensions au cours du temps.

4.1.2 - Description

Ce modèle fonctionne sur un modèle numérique de terrain représentant l'état à l'instant t de la région à traiter. Les aspects géographiques et la résolution du MNT sont pris en charge et gérés par le système.

A l'heure actuelle, le modèle ne fonctionne qu'avec deux ensembles lithologiques, l'un correspondant au "bed-rock" et l'autre aux formations superficielles qui incluent les dépôts de pentes, les cônes alluviaux etc..

Les flux d'érosion sont fournis et modifiables pour chaque simulation, ils incluent un facteur d'érosivité et un facteur de creep. Les coefficients d'érodabilité des deux constituants sont modifiables en fonction de leur lithologie.

Le principe de calcul de l'érosion sédimentation surfacique est le suivant:

A chaque pas de temps et pour toute la zone, en fonction des flux d'érosivité et de creep fournie pour la simulation, les étapes décrites ci-dessous seront effectuées.

Pour chaque maille de la zone on calcule l'érosion potentielle selon l'équation combinant récession et diffusion dans les trois coordonnées spatiales.

Pour chaque maille on recherche la plus grande pente des mailles situées en aval (altitude inférieure à la maille de référence), une fois cette maille déterminée, on évalue l'érosion potentielle sur la maille selon l'équation(Hirano 1975, 1976)

$$\Delta z / \Delta t = \alpha(\Delta z^2 / \Delta x^2) + \beta(\Delta z / \Delta x)$$

β : facteur de "ruissellement" (érodabilité) = flux d'érodabilité x coefficient d'érodabilité de la roche

α : facteur de "creep" = flux x coefficient de creep de la roche

Ensuite, pour chaque maille de la zone on calcule l'érosion effective :

S'il n'y a pas de formations superficielles alors on calcule l'érosion effective avec les coefficients du bed-rock; sinon on calcule l'érosion effective avec les coefficients des formations superficielles.

Si l'érosion effective est supérieure à l'épaisseur des formations superficielles alors, on convertit la différence entre l'érosion effective et l'épaisseur de formations superficielles en érosion effective du bed-rock.

L'érosion réelle est alors égale à l'épaisseur des formations superficielles plus l'érosion du bed-rock; dans le cas où l'érosion effective est inférieure à l'épaisseur des formations superficielles, elle est valide. Ensuite, on met à jour une matrice d'érosion réelle.

Pour chaque maille de la zone on cherche la maille qui la draine puis les mailles qu'elle draine afin d'évaluer le bilan de matière transitant par celle-ci.

Si le bilan est positif, cela implique qu'il y a sédimentation, la valeur de la sédimentation est égale au bilan; dans le cas contraire il y a une érosion que l'on corrigeant le bilan en fonction de la lithologie du sous-sol.

On met à jour les altitudes du bed-rock ainsi que les épaisseurs de formations superficielles sur chaque maille; on a donc à chaque pas de temps et pour chaque point deux informations :

- une sur l'altitude du bed-rock,
- l'autre sur l'existence et l'épaisseur en chaque point du MNT des formations superficielles.

L'altitude de cette nouvelle topographie à un instant quelconque est égale à l'altitude du bed-rock plus l'épaisseur de formations superficielles.

4.1.3 - Intégration

Après avoir chargé un paysage ainsi qu'un scénario d'évolution des paramètres globaux (eustatisme, variation des températures) on peut effectuer une simulation de l'évolution du paysage intégrant l'érosion-sédimentation surfacique sur la durée totale du scénario. Dans ce cas, les paramètres d'érodabilité des constituants lithologiques et les flux prennent une valeur par défaut. L'utilisateur peut les modifier avant de lancer la simulation afin de l'adapter au contexte régional. Ces modifications de paramètres s'effectuent interactivement à l'aide de dialogues spécialisés (fig. 2, 3).

4.2 - MODELE D'EROSION/SEDIMENTATION FLUVIALE

4.2.1 - Objectif

L'objectif de ce module (non réalisé) est de permettre la simulation des processus d'érosion et de sédimentation dans les fleuves et les rivières.

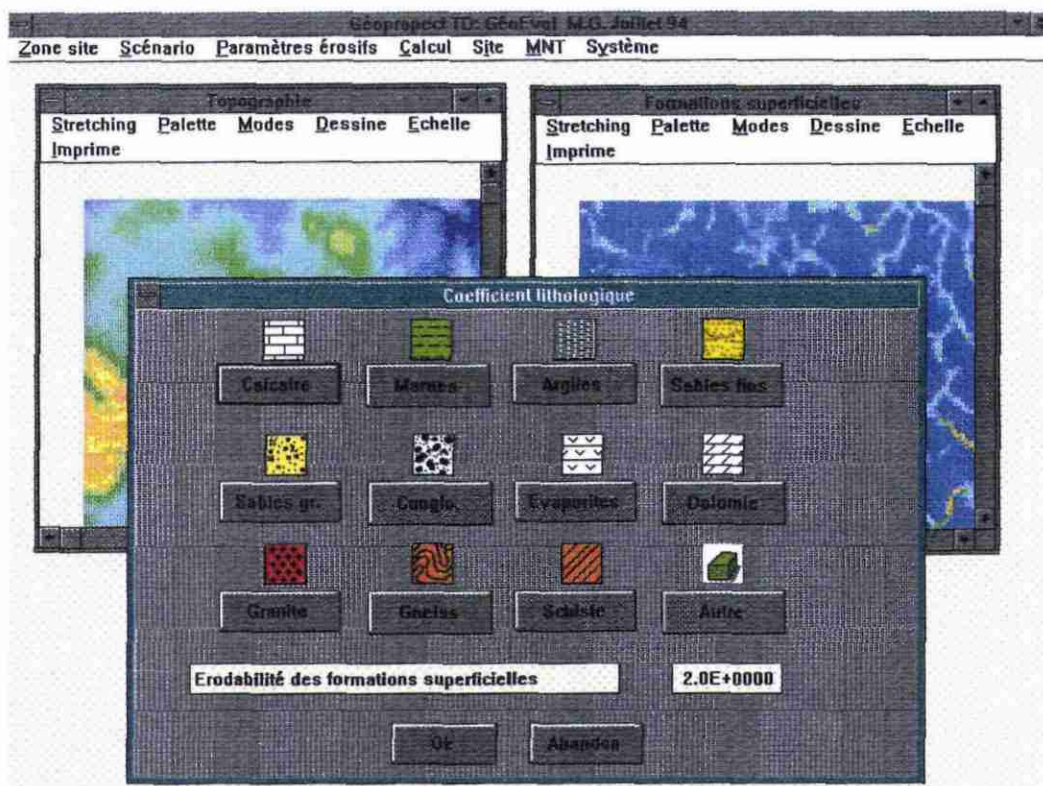


Figure 2 : Dialogue de modifications des paramètres lithologiques

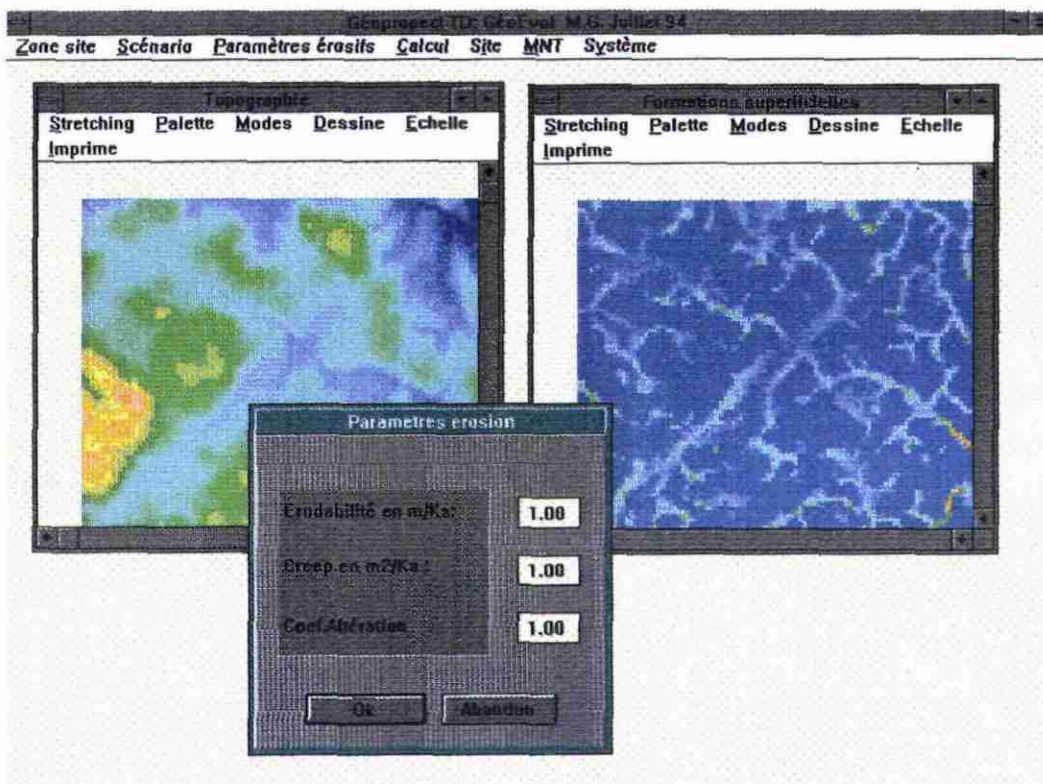


Figure 3 : Dialogue de modifications des flux d'érosion

4.2.2 - Description

Ce modèle, non implanté pour le moment, fonctionnera sur un modèle numérique de terrain représentant l'état à l'instant t de la région à traiter. Les aspects géographiques et la résolution du MNT seront pris en charge et gérés par le système.

Ce modèle devra tenir compte des variations des conditions climatiques (précipitations et températures) qui évolue fortement sur les échelles de temps auxquelles nous travaillons. Il devra prendre en compte les évolutions morphologiques du paysage au cours du temps issues des influences conjuguées des facteurs de géodynamique interne (failles, mouvements verticaux et de basculement) et externe (érosion surfacique, végétation, isostasie glaciaire etc.). Le modèle devra donc, à chaque pas de temps, être capable d'extraire dynamiquement un réseau hydrographique le plus réaliste possible. Cette extraction dynamique est rendu nécessaire du fait de l'évolution perpétuelle du paysage dans le temps.

Afin de modéliser correctement le comportement des rivières en couplant le modèle avec les variations climatiques, il sera nécessaire de donner leurs caractéristiques à l'instant initial de la simulation (débit, superficie totale du bassin versant).

Le couplage de ce modèle avec les variations eustatiques et les mouvements verticaux, qui peuvent occasionner des reprises d'érosion importantes est envisagé.

Plusieurs cas sont distingués :

a - Le niveau marin est constant

On applique alors le modèle d'érosion/sédimentation sur toute la zone. Le réseau hydrographique est considéré comme restant à l'équilibre du fait de la stabilité du niveau marin, de ce fait, les mailles qui le composent restent à une altitude constante; les matériaux drainés par les cours d'eau sont évacués.

b - Le niveau marin baisse

On applique le modèle d'érosion/sédimentation sur tout le paysage mais du fait de l'augmentation de la pente du profil d'équilibre des rivières, on considère qu'il n'y a érosion des rivières et pas de sédimentation.

Deux solutions sont envisageables:

- on laissera le modèle éroder les cours d'eau en contrôlant que leur baisse n'aboutit pas à un profil d'équilibre à pente inférieure à celle du précédent niveau stable.
- on fixe une vitesse de creusement des cours d'eau qui pourra être étayée par des données géologiques procédant de cas semblables.

Quelque soit la méthode utilisée, cet encaissement ne doit pas dépasser la valeur maximum fournie par la formule suivante:

$$\begin{aligned}a1 &= (\text{Altitude1} / D1) \\a2 &= (\text{Altitude2} / D2) \\D\text{Max} &= (a1 - a2)(D2)\end{aligned}$$

Avec :

$a1$ angle du profil d'équilibre au précédent niveau marin stable

$a2$ angle du profil d'équilibre à l'instant t

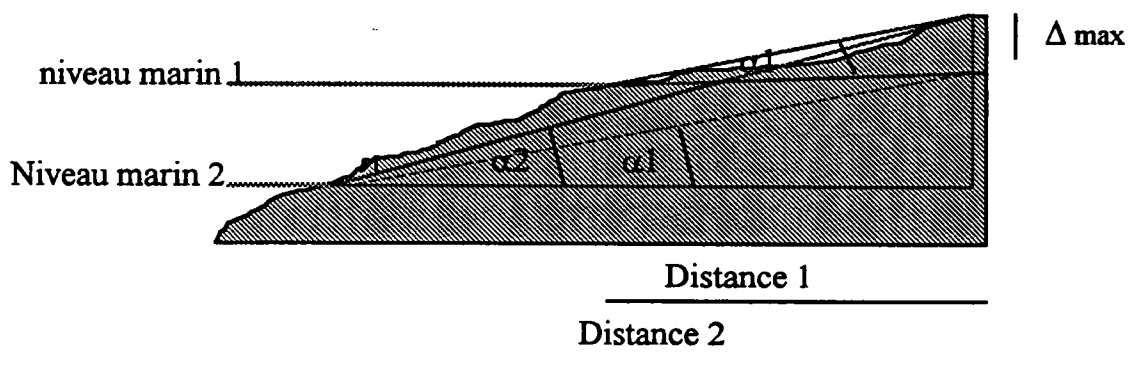
Altitude 1 : altitude du cours d'eau au précédent niveau marin stable

Altitude 2: altitude du cours d'eau à l'instant t

D1 distance à la mer au précédent niveau marin stable

D2 distance à la mer à l'instant t

DMax : surcreusement maximum du cours d'eau



Cet encaissement réactivera d'une manière régressive l'érosion surfacique du bassin versant en augmentant les pentes des rives des cours d'eau.

c - Le niveau marin monte

Dans ce cas, la pente du profil d'équilibre baisse provoquant, par perte de compétence, un empattement des cours d'eau. Dans ce cas, on appliquera le modèle érosion/sédimentation sur toute la zone autorisant éventuellement la sédimentation dans les cours d'eau.

Afin de parvenir à ce couplage, on analyse les variations eustatiques de l'historique et on procède à l'extraction des cours d'eau à chaque changement de sens de la variation ou lors d'une stabilisation à un haut niveau marin.

Lors de la stabilisation à un bas niveau marin, on laisse les cours d'eau se surcreuser jusqu'à ce qu'ils atteignent éventuellement leurs profils d'équilibre.

Ce couplage de l'érosion avec les niveaux marins va permettre de gérer les reprises d'érosion liées aux variations eustatiques mais aussi de générer des systèmes de terrasses emboîtées dans certains cas.

Le point délicat de cette méthode est d'extraire d'une façon acceptable le réseau hydrographique dans des morphologies plus ou moins contrastées et sur des MNT de résolutions variées.

4.3 - MODELE CLIMATIQUE

4.3.1 - Objectif

Le modèle climatique que nous avons développé est basé sur les études et les données de statistiques climatiques de Goodess et *al.* (1992). Ces auteurs ont distingué, à partir de stations climatiques actuelles (concept d'analogues), quatre classes climatiques (tempéré chaud, tempéré, boréal, toundra) englobant les variations climatiques susceptibles de caractériser le Quaternaire et le futur. L'objectif de ce module est de fournir à chaque pas de temps les caractéristiques climatiques de la zone traitée. Les paramètres climatiques restitués sont les précipitations (annuelles et par saison) et les températures (moyennes annuelles et par saison).

4.3.2 - Description

Les données des quatre classes climatiques de référence sont présentées dans les figures 4 et 5. Elles montrent très clairement la répartition des températures et des précipitations durant l'année. L'un des faits le plus intéressant de ces courbes est la mise en évidence pour les zones boréales et de toundra du pic de libération de l'eau sous forme liquide en quelques mois. Ce pic est dû au fait que les précipitations d'hiver, de printemps et d'automne sont bloquées pendant les autres mois sous forme de neige. On notera également les différents déphasages pour chaque climat-type entre maxima des températures et des précipitations.

Afin de permettre un couplage du modèle climatique et des autres modèles présents dans Géoprospect, il s'est avéré nécessaire d'avoir un échantillonnage plus continu des paramètres tels que les températures par trimestre et surtout les précipitations. En effet, le fonctionnement en seulement 4 classes aurait induit des effets de seuil trop important surtout dans la perspective d'un couplage avec les modèles d'érosion, de végétation mais aussi hydrogéologique par exemple. Pour cette raison, nous avons créé des stations intermédiaires virtuelles afin de recréer une série climatique continue susceptible de représenter l'évolution climatique d'une zone tempérée chaude jusqu'au domaine glaciaire. Nous avons utilisé la température moyenne annuelle comme guide à cette création, cette même TMA nous servira ultérieurement comme clé d'accès à ce modèle. Ainsi, à chaque TMA (°C) est rattaché un poste climatique de référence comprenant les températures par trimestre, la Précipitation Moyenne Annuelle (PMA) et les précipitations par trimestre.

La création des postes climatiques virtuels a été effectuée par splines cubiques. Les relations entre la température moyenne annuelle et les autres variables sont présentées dans les figures 6 et 7.

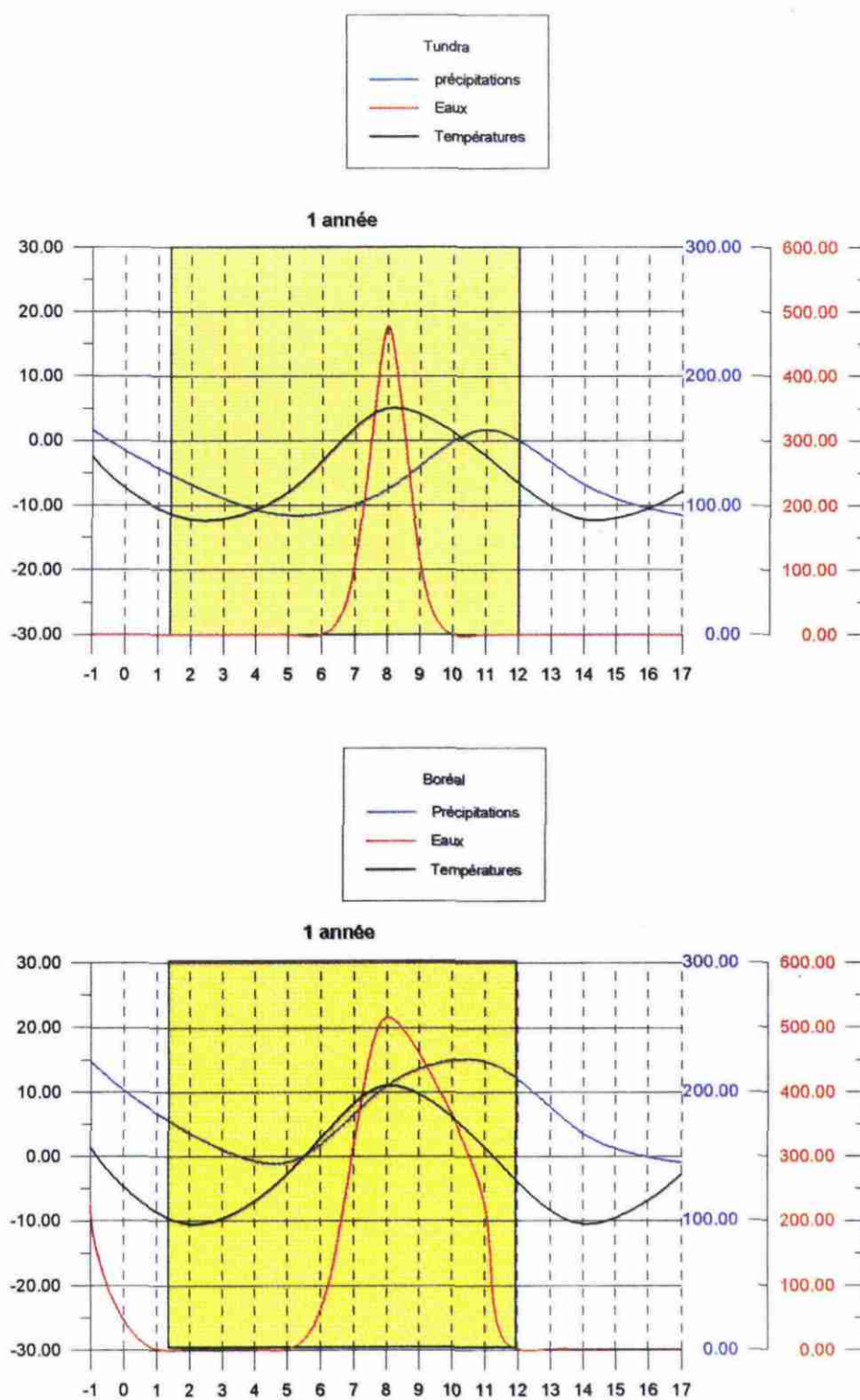


Figure 4: Températures et précipitations pour les climats de référence "toundra" et "boréal"

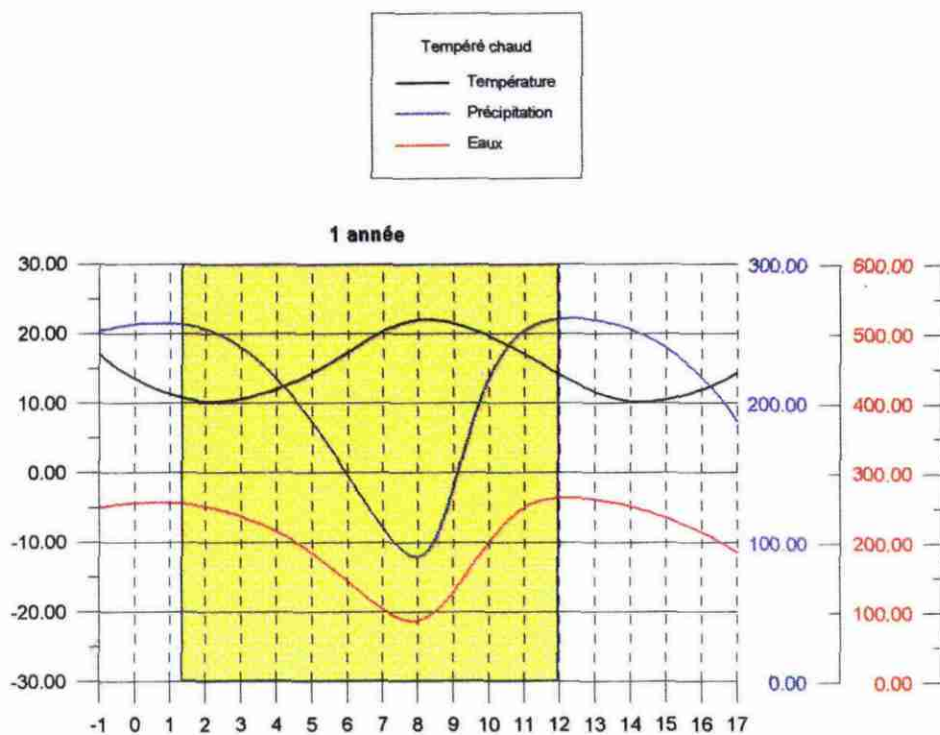
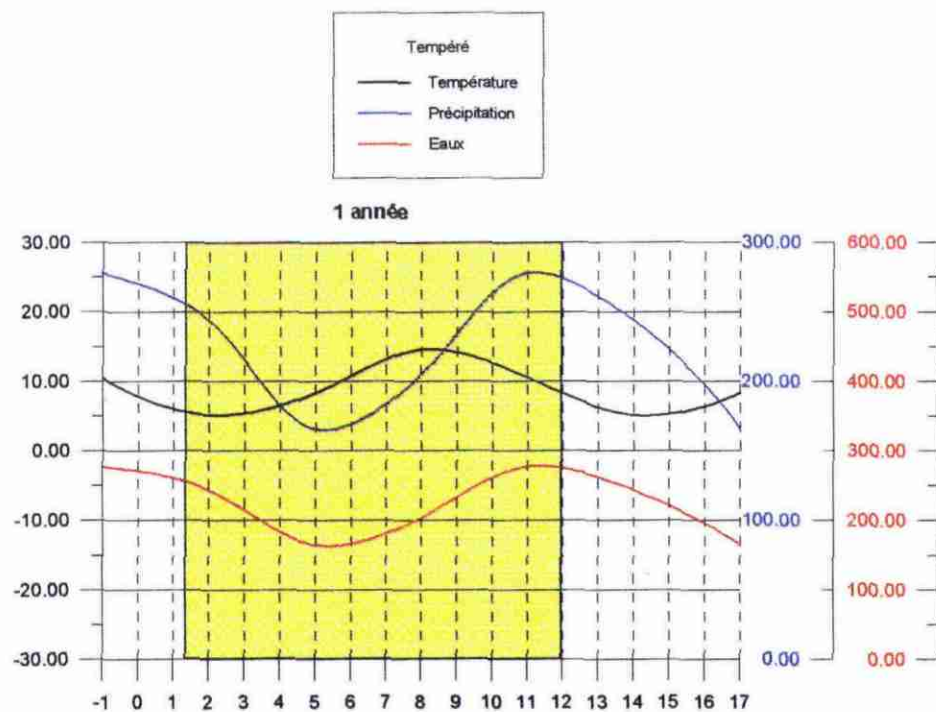


Figure 5: Températures et précipitations pour les climats de référence "tempéré" et "tempéré chaud"

4.3.3 - Intégration

Lors de la création d'un paysage dans géoprospect, outre la caractérisation de la topographie, des formations superficielles etc., il est nécessaire de fournir la température moyenne annuelle (actuelle; TMA) ainsi que les précipitations moyennes annuelles (actuelles; PMA).

La PMA est alors comparée avec celle que renvoie le modèle pour une TMA identique, la déviation entre la PMA théorique et réelle est évaluée et sera conservée. En effet, cette déviation tient compte de la continentalité actuelle de la zone et permettra de corriger les précipitations (par an et par saison) fournies par le modèle à différentes époques proportionnellement à celle-ci. Elles pourront aussi être corrigées en fonction des variations de la distance à l'Océan, facteur lié aux variations eustatiques et à la pente du plateau continental dont l'influence est notable sur la continentalité (cf. § Modèle de végétation).

La simulation dans Géoprospect s'effectue par activation d'un scénario contenant des variables globales effectuant un forcing sur certains processus d'échelle régionale. Les variations eustatiques et les variations de la température moyenne annuelle "globale" font partie de ce scénario. Au cours de chaque pas de temps, le système calcule l'altitude de chaque point du MNT en tenant compte des phénomènes d'érosion-sédimentation, des jeux de failles, des mouvements verticaux et des variations eustatiques. L'altitude du site est la résultante de tous ces processus et intervient sur l'évaluation de la température moyenne du site.

Celle-ci est évaluée de la manière suivante:

$$TMA[t] = TMA_{RefMer}[0] - (AltitudeSite[t]/GradientAltitudinal) + VariationGlobale[t]$$

Avec :

$TMA[t]$: température moyenne annuelle à l'instant t;

$TMA_{RefMer}[0]$: température de référence au début de la simulation ramenée au niveau de la mer;

$VariationGlobale[t]$: variation de température "globale" à l'instant t, cette variation globale est l'un des paramètres fixé dans les scénarii ;

$Gradient\ altitudinal$: gradient exprimant la loi selon laquelle plus l'altitude augmente plus la température baisse

$AltitudeSite[t]$: altitude d'un point à l'instant t; celle ci est égale à:

$$AltitudeSite[t] = AltitudeSite[t-1] + \Delta Eustatisme[t] + Erosion[t] + \Delta MouvementsVerticaux[t] + \Delta Faille[t]$$

Avec:

$\Delta Eustatisme$: variation du niveau marin entre t-1 et t

$Erosion[t]$: érosion (ou sédimentation) sur le point calculé par le modèle d'érosion;

$\Delta MouvementsVerticaux$: variation des mouvements verticaux entre t-1 et t

$\Delta Faille[t]$: est la modification de l'altitude du point résultant de la combinaison du jeu des failles actives sur la zone d'étude

Si le point dont on cherche la TMA n'est pas le point de référence, on corrige la TMA en fonction de différence de latitude entre les deux point par le *gradient latitudinal*.

Une fois la température moyenne annuelle évaluée, on adresse une requête au modèle climatique qui renvoie alors les valeurs "standards" de températures et de précipitations. Ces dernières sont alors corrigées en fonction de la déviation de précipitation évaluée précédemment.

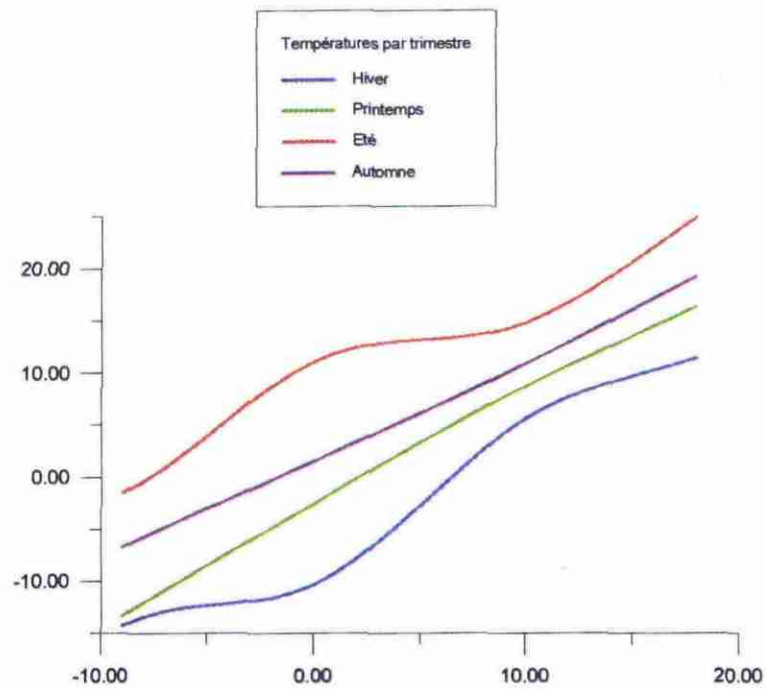


Figure 6: relations entre la température moyenne annuelle et les températures par trimestre

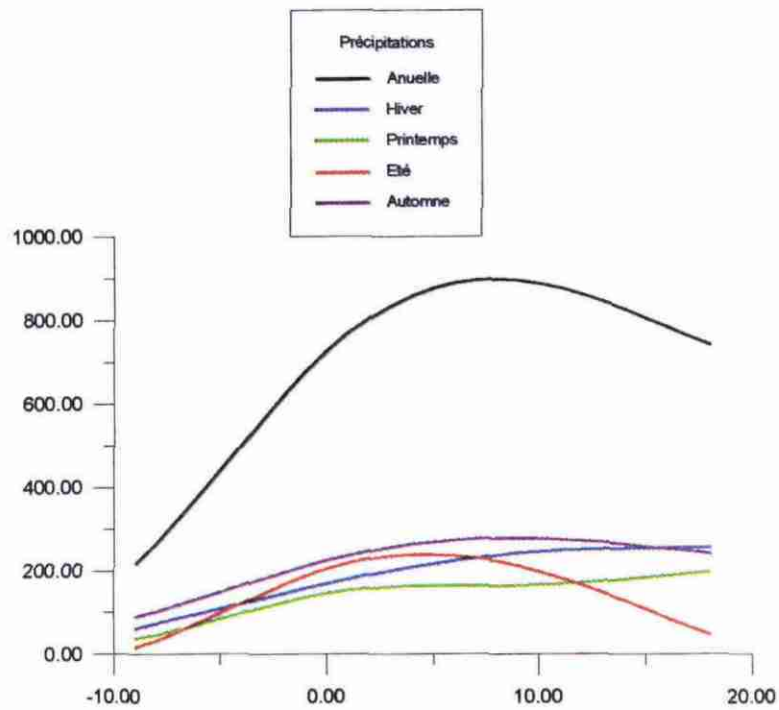


Figure 7: Relations entre la température moyenne annuelle et les précipitations

Pour chaque point du paysage, on a alors accès aux valeurs de températures et de précipitations pour l'année, l'hiver, le printemps, l'été et l'automne.

Ces valeurs sont consultables à partir de GéoEvol ou de GéoResult sous forme de dialogue indiquant à l'utilisateur, après requête, les valeurs de ces différents paramètres (Fig. 8).

Une fonction de traçage de ces valeurs sur fichier pour chaque pas de calcul est envisagée, elle permettrait de voir sous la forme de courbes 2D en fonction du temps les variations de chacun des paramètres climatiques. De plus, ces valeurs pourront ultérieurement servir de paramètres d'entrée à d'autres modèles soit externes soit internes au système. En effet, en plus des paramètres climatiques, la notion de paysage dans géoprospect intègre la topographie (MNT), la lithologie (pour le moment sous une forme simplifiée); il est donc possible de connaître les drains naturels de la zone ainsi que la quantité de précipitations tombées et leurs états (eaux, neige) ainsi que les modalités de leur écoulement. Il sera donc envisagé de coupler les paramètres climatiques avec les modèles d'érosion en paramétrant les coefficients d'érodabilité et de creep.

4.4 - MODELE PERMAFROST

4.4.1 - Objectif

L'objectif de ce module est de fournir à chaque pas de temps le type de permafrost présent.

4.4.2 - Description

Connaissant les paramètres climatiques de chaque point du paysage (précipitations et températures), il est possible d'appréhender le type de permafrost présent sur la zone de travail.

A l'heure actuelle, le modèle implanté est très simplifié et ne donne qu'une information qualitative. L'évaluation du type de permafrost est effectuée en fonction de seuil des températures moyennes annuelles issus des données actuelles. Si la TMA du sol est $>0^{\circ}\text{C}$ il n'y a pas de permafrost, si la TMA du sol est $<0^{\circ}\text{C}$ et $>-3^{\circ}\text{C}$ se développe un permafrost sporadique, si la TMA du sol est $<-3^{\circ}\text{C}$ et $>-5^{\circ}\text{C}$ se développe un permafrost discontinu, enfin si la TMA du sol est $<-5^{\circ}\text{C}$ se développe un permafrost continu.

La TMA du sol est considérée statistiquement comme 3°C supérieure à celle de l'air.

4.4.3 - Intégration

A partir des informations climatiques calculées à chaque époque, et en fonction de valeurs seuils, le modèle renvoie le type de permafrost théoriquement présent sur la zone: absent, sporadique, discontinu ou continu sans notion d'épaisseur (fig. 8).

Ce "modèle" n'intègre ni le facteur temps (steady state model), ni le flux géothermique régional ni la conductivité thermique des roches. On considère donc que le permafrost est en équilibre avec les conditions climatiques courantes. Cette simplification est acceptable si le gradient de températures est inférieur à 1°C par xxx ans (Boulton et *al.* 19).

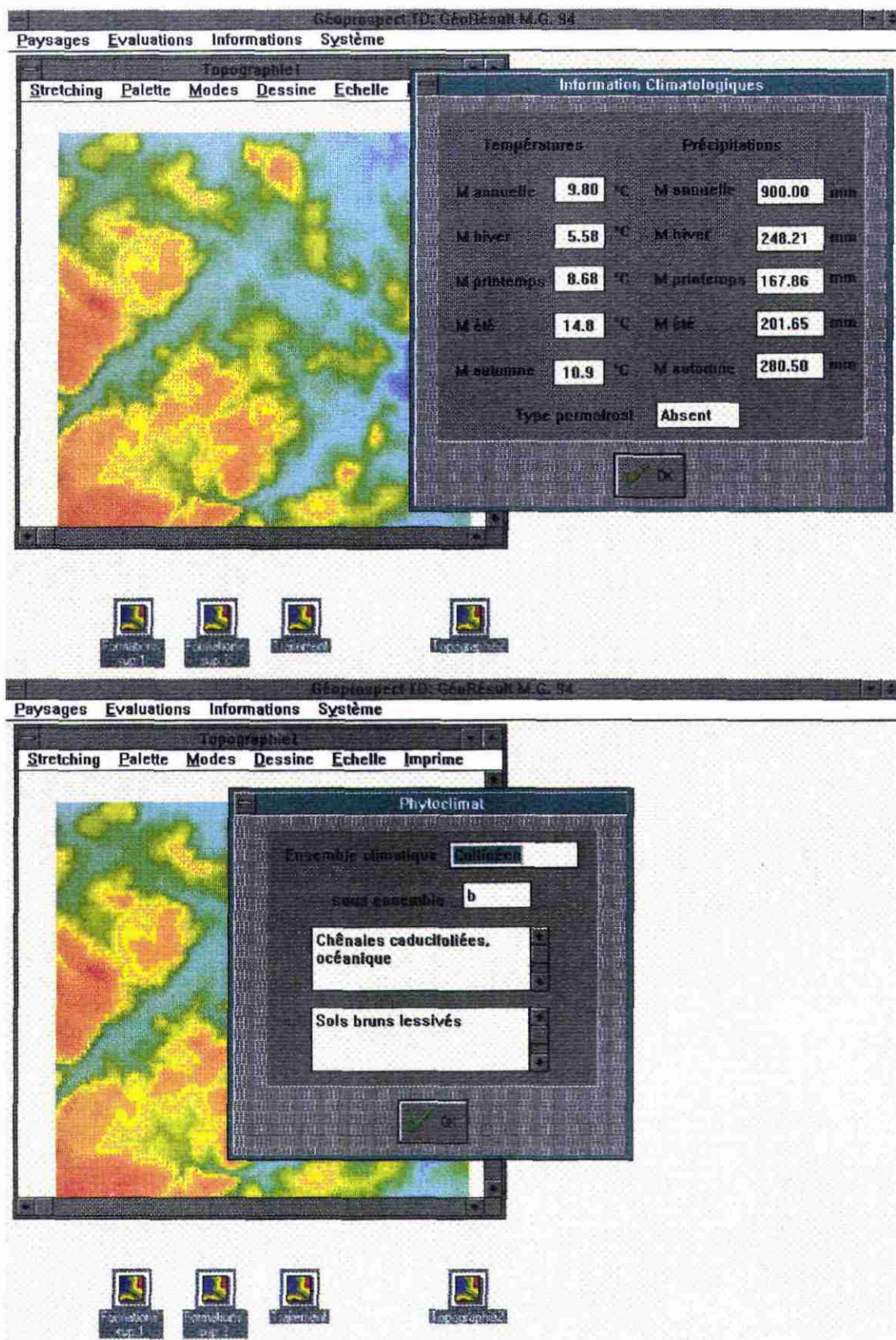


Figure 8: Restitutions des informations climatologiques et phytoclimatiques dans Géoprospect

4.5 - MODELE BIOSPHERE(VEGETATION)

4.5.1 - Objectif

L'objectif de ce modèle est de fournir le type d'association végétale présent sur la région à chaque pas de temps à l'équilibre avec les conditions climatiques (végétation climacique). Il s'agit d'une information de type qualitative.

Le temps de réponse caractéristique de la végétation est de l'ordre de la centaine d'année ce qui permet de traiter le problème sous forme statique sans analyser les phénomènes transitoires. En effet, le pas de temps de calcul actuellement utilisé (1000 ans) est largement supérieur à cette valeur.

4.5.2 - Description

Pour cette approche, nous nous sommes appuyé sur les travaux de B.Default (1991, 1992) et notamment l'indice d'aridité "Qn2" et le climagramme.

L'évaluation de la végétation climacique passe par le calcul de l'indice d'aridité Qn2 qui est de la forme:

$$Qn2 = \sqrt{\frac{50(P + 10 P')}{(T + 30)(tc - tf)}}$$

Avec P pluviométrie moyenne annuelle
P' pluviométrie du trimestre le plus sec
T température moyenne annuelle
tc température du mois le plus chaud,
tf température du mois le plus froid

Compte tenu du fait que les températures du mois le plus chaud et le plus froid ne nous sont pas connues, nous utilisons à la place les températures du trimestre le plus chaud et le plus froid. Cette simplification induit une "décontinentalisation" relative du climat par lissage des écarts thermiques réels.

Une fois le calcul de Qn2 effectué et connaissant soit la TMA soit la température du trimestre le plus chaud (Default 1991, 1992), on a accès à travers le climagramme (fig. 9) à la végétation climacique ainsi qu'aux sols zonaux.

La classification de Default comporte 29 phytoclimats principaux comprenant les climats xériques, sub-xériques et axériques, chacun d'eux étant parfois constitué de plusieurs sous-étages (fig.10).

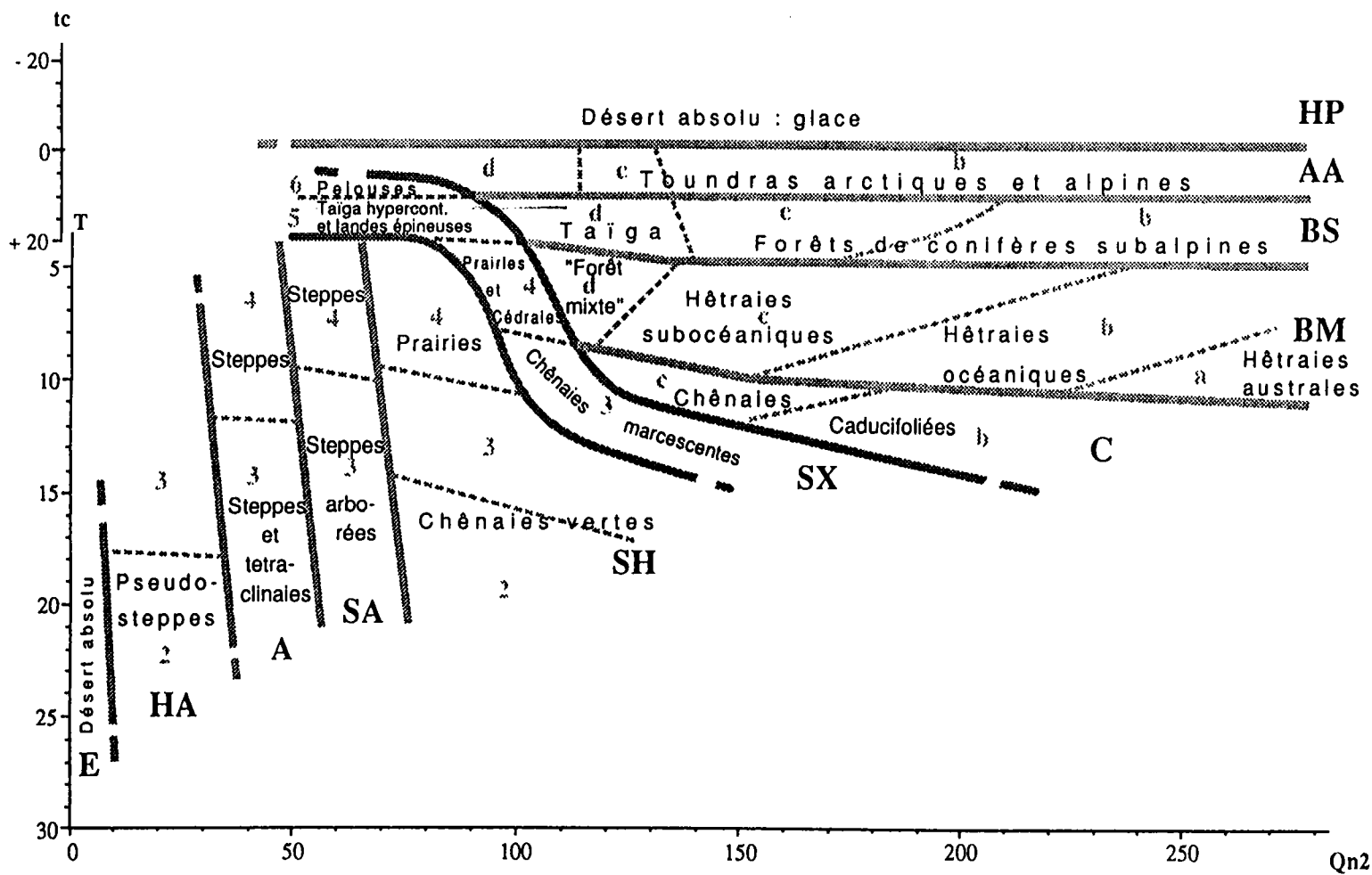


Figure 9: Répartition des principales formations végétales sur le climagramme Qn2/T ou tc

<i>Etage</i>		<i>Végétation</i>	<i>Sols zonaux</i>
Erémique	rien	Désert absolu	sols bruts
Hyper aride	2	Pseudo steppes	Sols bruts
Hyper aride	3	Pseudo steppes	Sols bruts
Aride	3	Steppes et tétraclinaies	Sierozems
Aride	4	Steppes	Sierozems
Semi Aride	3	Steppes arborées à cocciferaies matoral	Sols marrons
Semi Aride	4	Steppes à graminées et Armoises	Sols châtaîns
Collinéen	b	Chênaies caducifoliées océanique	Sols bruns lessivés
Collinéen	c	Chênaies caducifoliées sub océanique	Sols bruns tempérés
Boréo Montagnard	a	Hêtraies australes	Sols bruns lessivés
Boréo Montagnard	b	Hêtraies océaniques	Sols bruns lessivés
Boréo Montagnard	C	Hêtraies sub océaniques	Sols bruns tempérés
Boréo Montagnard	d	Forêts mixtes	Sols bruns tempérés
Subhumide	2	Chênaies vertes	Sols fersialitiques
Subhumide	3	Chênaies vertes	Sols fersialitiques
Subhumide	3	Chênaies vertes	Sols fersialitiques
Subhumide	4	Prairies	Chernozems
Subxérique	3	Chênaies marcescentes	Sols ferrugineux et ferrisols
Subxérique	3	Chênaies marcescentes	Sols ferrugineux et ferrisols
Subxérique	3	Chênaies marcescentes	Sols fersialitiques à sols ferrugineux
Subxérique	3	Chênaies marcescentes	Sols fersialitiques à sols bruns tempérés
Subxérique	4	Hêtraies sapinières cédraies et prairies	Chernozems
Subxérique	5	Taïga hypercontinentale landes épineuses	Sols podzolisés
Boréo-subalpin	d	Taïga	Sols podzolisés
Boréo-subalpin	c	Conifères sub-alpins	Sols podzolisés
Boréo-subalpin	b	Conifères sub-alpins	Sols podzolisés
Arctico-Alpin	d	Toundras	Cryosols
Arctico-Alpin	c	Toundras	Cryosols
Arctico-Alpin	b	Pelouses alpines	Cryosols

Figure 10: Base de données phytoclimatiques intégrée à Géoprospect TD

4.5.3 - Intégration

Pour évaluer l'association phytosociologique en un point, il suffit dans un premier temps d'activer le modèle climatique puis une fois les précipitations et les températures connues, d'effectuer le calcul de Qn2. La phase finale consiste à émettre une requête au climagramme qui restitue alors le type de climat (xérique, sub-xérique, axérique), l'étage, le sous étage, le type de végétation et le type de sol zonal. Cette opération est bien évidemment transparente à l'utilisateur et lui est par ailleurs accessible à partir d'un menu (figure 8).

Ce modèle phytoclimatique a été intégré dans Géoprospect et, à l'heure actuelle, les associations phytosociologiques fournies ne concernent que le point central du paysage c'est à dire le site *sensu stricto*. Il est possible d'envisager la génération de cartes phytosociologiques théorique pour chaque période sur toute l'aire considérée; toutefois, compte tenu de l'échelle spatiale de travail actuellement utilisée (quelques centaines de km², les variations seront probablement assez faibles).

Des corrections topographiques et édaphiques du résultat fourni par le modèle sont envisageables. Celles-ci tiendraient compte de l'exposition des versants ainsi de l'acidité du substratum qui pourrait être fournie lors de la description lithologique du "bed-rock".

4.6 - MODELE D'ACCIDENTS CASSANTS

4.6.1 - Principes

La modélisation des déformations cassantes permet de simuler le jeu d'un ou plusieurs accidents affectant la zone de travail. Cette simulation permet d'analyser entre autres les interdépendances entre les processus géologiques lors de l'évolution d'un paysage (interaction tectonique-érosion-sédimentation, "feed-back" altitude-température, piégeage de sédiment par formation de barrière morphologique, etc.).

Nous ne nous attachons dans cette modélisation qu'aux répercussions géomorphologiques, aux comportements et aux mouvements de surface, sans aborder les problèmes dès leurs sources c'est à dire l'accumulation de contraintes ou leurs modifications.

4.6.2 - Description

Compte tenu du fait que nous allons appliquer ces modèles sur des MNT représentant l'état de la topographie à diverses époques, les failles que nous allons définir doivent être suffisamment cohérentes en terme de géométrie par rapport à la réalité.

Une autre restriction est que qu'ils s'agissent de failles normales ou inverses, des effets distensifs ou compressifs sont induits. Compte tenu des échelles de temps auxquelles nous travaillons cet aspect sera négligé.

La pente du plan de faille ne sera pas prise en compte dans un premier temps, les plans de faille seront considérés comme verticaux.

Du fait que l'on exprime le jeu d'une faille en terme de mouvements relatifs d'un panneau par rapport à l'autre, nous allons devoir émettre les postulats suivants :

- pour les failles normales, on considérera que c'est le panneau non effondré qui est à une altitude stable, le panneau effondré est dans ce cas le seul qui est affecté de mouvements négatifs (figure 11),
- pour les failles inverses, on contraire, on admettra que c'est le panneau chevauchant qui est animé par un mouvement positif, le panneau chevauché restant stable (figure 11).

Pour le moment, seules des failles dont le tracé est rectiligne seront traitées, les failles listriques ne pourront donc pas être modélisées.

4.6.3 - Typologie des failles modélisées

4.6.3.1 - Failles normales

Failles traversant entièrement la zone d'étude

C'est le cas le plus simple dans lequel tous les points situés dans le panneau effondré subissent un mouvement négatif égal et constant (figure 12).

Failles traversant entièrement la zone d'étude avec amortissement latéral

Dans ce type, seule la zone comprise entre l'escarpement de faille et les limites d'amortissement est affectée de mouvements. Celui-ci est proportionnel aux mouvements maxima (a proximité immédiate du tracé de l'accident) et est fonction du rapport des distances entre ce point à la faille et à la limite d'amortissement (figure 13).

Bien que très schématique et compte tenu des amplitudes relativement faibles des déformations sur les intervalles de temps que nous traitons, on peut considérer ce modèle comme assez satisfaisant.

Failles locales avec amortissements latéraux et longitudinaux

L'amortissement latéral se fait selon les modalités du cas précédent. L'amortissement longitudinal procède de la même logique si ce n'est que la valeur maximum de mouvement sur chaque point de la faille est définit proportionnellement à la position de ce point par rapport au centre de la faille (figure 14).

4.6.3.2 - Failles inverses

Elles comprennent les mêmes catégories que les failles normales :

- failles inverses traversant entièrement la zone,
- failles inverses traversant entièrement la zone avec amortissement latéral,
- failles inverses locales avec amortissements latéraux et longitudinaux.

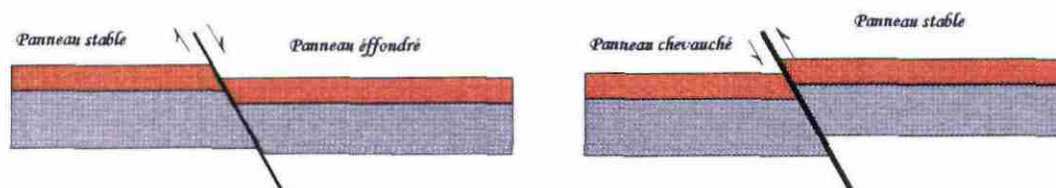


Figure 11: Panneau modifié par une faille normale et par faille inverse

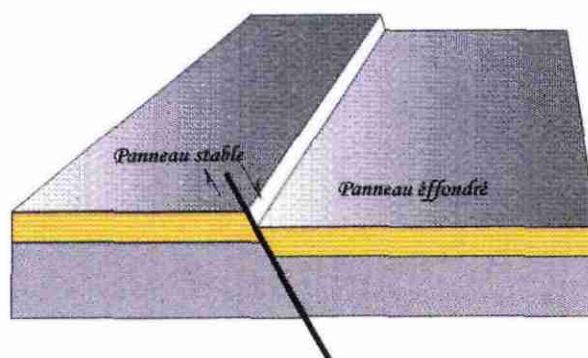


Figure 12: faille normale sans amortissement

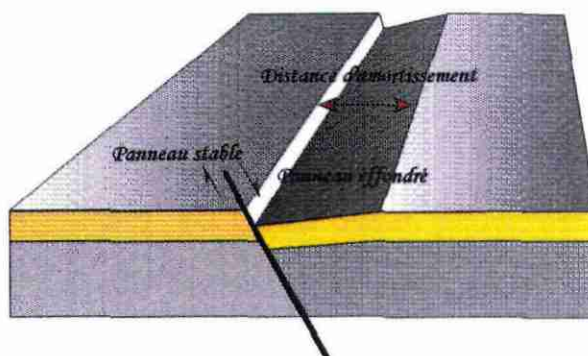


Figure 13: faille normale avec amortissement latéral

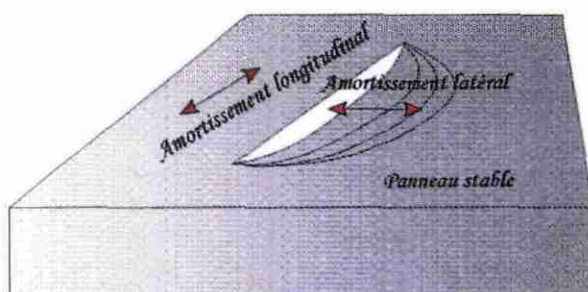


Figure 14: faille normale avec amortissement latéral et longitudinal

4.6.4 - Combinaisons des failles

En combinant géométriquement ces 6 types de failles on peut recréer la plupart des cas de figure susceptibles de se reproduire sur quelques centaines de milliers d'années. Il faut de surcroît noter qu'en fonction des paramètres d'amortissement définis et des vitesses moyennes de mouvement, les déformations générées par ces failles peuvent apparaître fort différentes.

4.6.5 - Intégration

La définition géométrique des failles s'effectue de façon interactive sur le MNT du paysage considéré à l'aide de Géofaille. Les données à fournir pour définir chaque faille sont les suivants (fig.15) :

- nom de la faille (ce paramètre permettra de définir des systèmes de failles indépendamment de toute simulation et permettra de les sélectionner ou non),
- type de faille (normale, inverse),
- Azimut,
- Pente,
- Jeu maximum en m/ka,
- Distance d'amortissement latéral en m,
- Distance d'amortissement longitudinal en m.

Dans le modèle que nous proposons, le mouvement de la faille est considéré comme un processus lent mais continu.

Il peut toutefois être envisagé de définir une quantité de mouvement sur une période de référence et de donner un temps de retour du jeu instantané (failles cosismiques). Le système déclenche à une époque aléatoire, comprise dans le temps de récurrence, un mouvement "instantané" sur l'accident et modifiant d'autant la topographie.

4.7 - MODELE DE MOUVEMENTS VERTICAUX

4.7.1 - Objectif

La modélisation des mouvements verticaux régionaux (non glacio-isostatiques) permet de simuler les mouvements régionaux positifs ou négatifs affectant de manière homogène l'ensemble de la zone d'étude.

4.7.2 - Description

La modélisation des mouvements verticaux régionaux s'effectue par correction à chaque pas de temps des valeurs des altitudes de chaque point du MNT en fonction des vitesses en m/ka préalablement définies.

Ils seront pris en compte dans l'érosion/sédimentation dans les rivières à travers le réseau hydrographique dont le traitement sera comparable à celui effectué lors d'une baisse ou d'une remontée du niveau marin selon le sens de ces mouvements.

Le couplage sera effectué après le calcul de la composante entre les variations du niveau marin et les mouvements verticaux.

En effet, on peut considérer qu'un mouvement vertical de 1mm/an est équivalent à une baisse eustatique de 1mm/an en terme de reprise de l'érosion des cours d'eau; la seule différence qui existe est la distance de la zone à la ligne de rivage qui dans le cas de mouvements verticaux seuls ne variera pas.

4.7.3 - Intégration

La définition des mouvements verticaux s'effectue interactivement à l'aide de Géofaille après la création du paysage et avant de lancer la simulation.

4.8 - MODELE DE MOUVEMENTS DE BASCULEMENTS

4.8.1 - Objectif

La modélisation des mouvements de basculement a pour objectif de simuler un ou plusieurs mouvements de basculement régionaux combinés affectant la zone d'étude.

4.8.2 -Description

La modélisation des mouvements de basculement régionaux s'effectue par correction à chaque pas de temps de chaque point du MNT en fonction de sa distance par rapport à l'axe de basculement et en fonction de sa vitesse angulaire.

4.8.3 - Intégration

La définition du ou des basculements s'effectue à l'aide de Géofaille après la création du paysage et avant de lancer la simulation.

Lors de la définition du ou des basculements, on fixe interactivement sur le MNT l'axe de basculement, son azimut ainsi que son taux de mouvements en degré décimaux par millier d'années. A chaque basculement est attribué un nom permettant une modification ultérieure soit de sa géométrie soit de sa vitesse (fig.16).

4.9 - INTEGRATION DES MODELES TECTONIQUES

Après avoir défini un paysage, on définit interactivement à l'aide d'un outil spécialisé (Géofaille), les mouvements verticaux, les basculements et les failles selon les modalités exposées précédemment.

On calcule ensuite la déformation résultante générée par les divers objets tectoniques actifs sur la durée élémentaire du pas de calcul (à l'heure actuelle 1000 ans). Cette déformation résultante se présente sous la forme d'une matrice de déformation qui possède les mêmes caractéristiques géométriques que le paysage (topographie, formations superficielles, MNT, résolution, nombre de points etc.).

Avant d'effectuer une simulation de l'évolution future d'une zone, on peut charger ce modèle de déformation tectonique qui sera pris en compte durant toute la durée de celle-ci, le couplage entre déformation tectonique, érosion-sédimentation, variations eustatiques sera effectif à ce moment là.

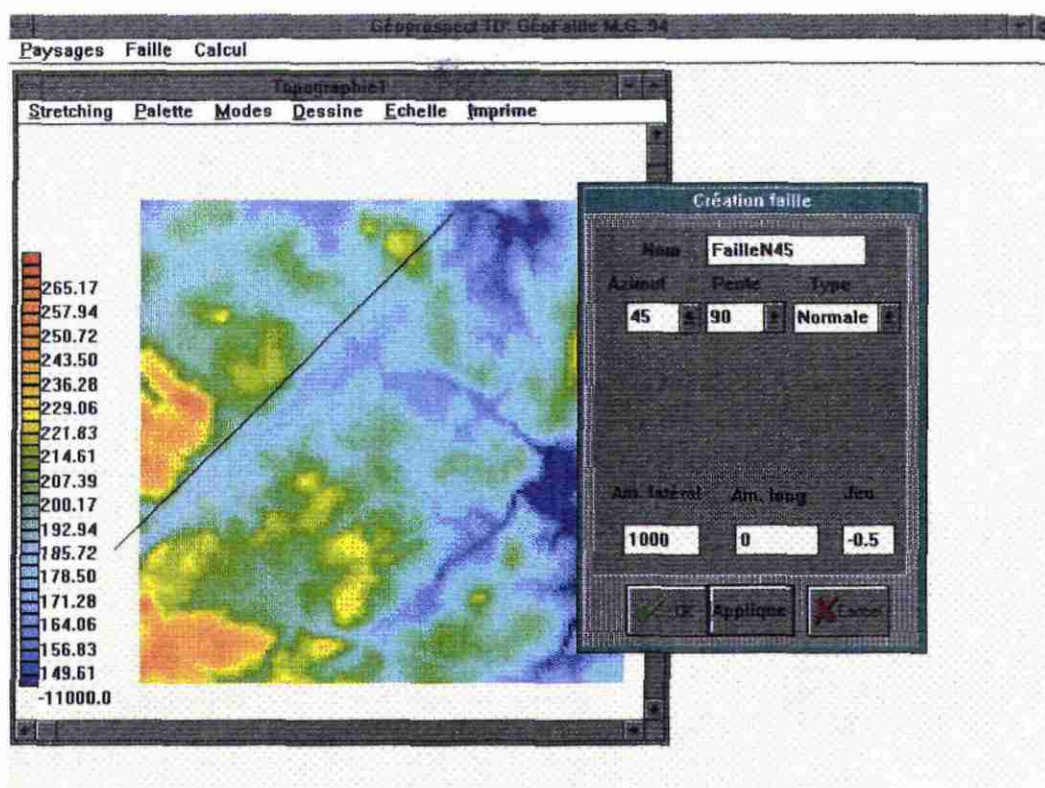


Figure 15: Définition d'une faille à l'aide de Géoscript

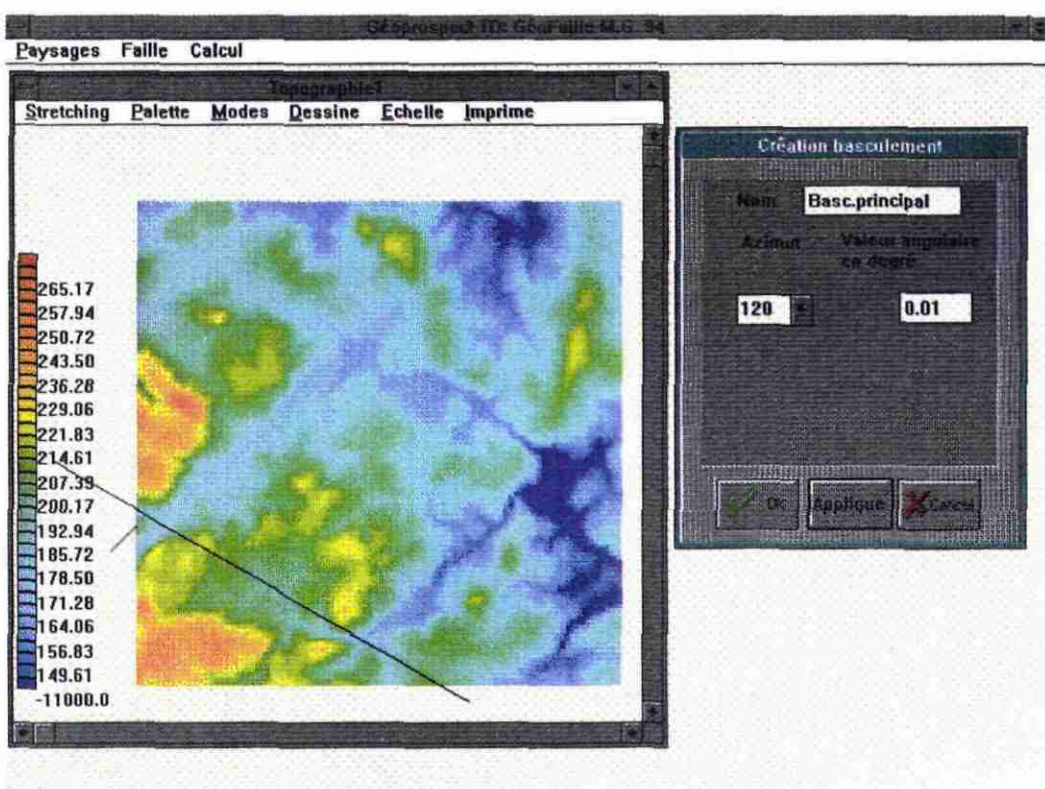


Figure 16: Définition d'un basculement à l'aide de Géoscript

5 - CONCLUSION

Géoprospect TD a permis de valider le concept d'étalement de géoprospective. Les processus et phénomènes intégrés au cours de l'année 1994 ont concerné aussi bien la géodynamique externe qu'interne. Le couplage des différents modèles simulant les processus géologiques et climatiques apportent beaucoup quant à la compréhension de l'évolution des paysages sur des tranches de temps de l'ordre de 100 000 ans dans un contexte géodynamique de type Quaternaire. Il n'en reste pas moins que certains couplages restent à faire tandis que certains modèles devront être développés afin de satisfaire aux objectifs à atteindre.

BIBLIOGRAPHIE

- CANCEILL M., COURBOULEIX S., FOURNIGUET J., GODEFROY P., GROS Y., MANIGAULT B., PEAUDECERF P. (1984) - Etude géoprospective d'un site de stockage; rapport de fin d'étude: simulation de l'évolution d'un site à l'aide du programme "Castor". Rapport BRGM 84 SGN 229 STO.
- DEFAUT B. (1991) - Vers une modélisation de l'évolution climatique au Quaternaire. Relations entre climat actuel et étages de végétation dans le domaine paléarctique. Rapport BRGM R 33036 GEO SGN 91, 57 p., 6 fig., 4 tabl.. h.t.
- DEFAUT B. (1992) - Données complémentaires sur les relations entre climat actuel et étages de végétation dans le domaine paléarctique. Rapport BRGM R 34849 GEO SGN 92, 29 p., 4 fig., 5 tabl.. h.t.
- DJERROUD A., ROUSSET M.C., GODEFROY P., GARCIN M. (1993) - An event-driven causal simulation applied to geoforecasting analysis - 4th annual conference on AI, simulation, and planning in high autonomy systems AIS'93 - Tucson Arizona
- GODEFROY P., GARCIN M., DJERROUD A., ROUSSET M.C. (1993) - Apports des techniques de l'intelligence artificielle à l'élaboration de schémas d'évolution naturelle à long terme d'un site géologique. Intérêt pour les stockages profonds de déchets. Géoconfiner 1993-Montpellier
- GODEFROY P., COURBOULEIX S., FOURNIGUET J., GARCIN M., GROS Y., PEAUDECERF P. (1994) - Concepts, méthodes et outils d'études géoprospectives développés au BRGM: synthèse de plus de dix ans de recherche. Colloque Géoprospective UNESCO Paris 1994.
- GARCIN M., GODEFROY P., DJERROUD A., ROUSSET M.C. (1994) - Application des méthodes de l'intelligence artificielle à la géoprospective: le projet Expect. Colloque Géoprospective UNESCO Paris 1994.
- GARCIN M. (1993) - GEOPROSPECT TD (Time Dependant) Démonstrateur d'atelier de géoprospective. Rapport R37775, 30 p., 17 fig.
- GARCIN M. (1992) - Ergonomie des logiciels de géoprospective: restitutions des résultats (étude préliminaire). Rapport R35432 p.25, 5 fig., 2 annexes.
- GARCIN M., COURBOULEIX S. (1991) - GEOPROSPECT: maquette d'un outil de géoprospective (nouveaux développements, mars 1991). Rapport R32517, 28 p., 11 fig.
- GARCIN M., COURBOULEIX S. (1991) - GEOPROSPECT: maquette d'un outil de géoprospective. Rapport R32128, 36 p., 15 fig.
- GOODESS C., PALUTIKOF J.P., DAVIES T.D. (1992) - Studies of climatic effects and impacts relevant to deep underground disposal of radioactive waste. Nirex Safety Series, NSS/R267.

- HIRANO M. (1975) - Simulation of developmental process o interfluvial slopes with reference to graded form. Journ. of Geol., 83, p. 113-123.
- HIRANO M. (1976) - Mathematical model and the concept of equilibrium in connection with slope shear ratio. Zeitschrift für Geomorphologie. 25, p. 50-71..
- IMBRIE J., IMBRIE J.Z. (1980) - Modelling the climatic response to orbital variations. SCience, 207, p.943-953.
- KUKLA G., BERGER A., LOTTI R., BROWN J. (1981) - Orbital signature of interglacials. Nature, 290(5804), p.295-300.