

Modélisation de l'évolution géologique d'un paléosite à l'échelle de la centaine de milliers d'années: exemple du Jarama (Espagne)

Manuel Garcin, Carmen Bajos, Carlos del Olmo, Pierre Godefroy, Pierre Peaudecerf

► **To cite this version:**

Manuel Garcin, Carmen Bajos, Carlos del Olmo, Pierre Godefroy, Pierre Peaudecerf. Modélisation de l'évolution géologique d'un paléosite à l'échelle de la centaine de milliers d'années: exemple du Jarama (Espagne). Colloque Géoprospective, 1994, Paris, France. 12 p. hal-00562519

HAL Id: hal-00562519

<https://hal-brgm.archives-ouvertes.fr/hal-00562519>

Submitted on 3 Feb 2011

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

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

Modélisation de l'évolution géologique d'un paléosite à l'échelle de la centaine de milliers d'années: exemple du Jarama (Espagne)

M.Garcin¹, C.Bajos², C.Del Olmo², P.Godefroy³, P.Peaudecerf⁴

Résumé

L'objectif de cette étude réalisée dans le cadre du projet CCE n° F12W-CT91-0075 "Paleoclimatological revision of climate evolution and environment in Western Mediterranean Regions" est de reconstituer les évolutions géologiques sur une zone test (paléosite du Jarama, Espagne) au cours des 120 000 dernières années (Eémien à l'Actuel). Ce site, bien que ne répondant pas à tous les critères nécessaires à un stockage de déchets, a été choisi pour sa représentativité des conditions géologiques que l'on pourrait rencontrer dans des zones plus appropriées d'Espagne.

Le principe de base de cette étude est d'évaluer les répercussions d'hypothèses fondamentales d'évolution globale sur les phénomènes d'échelle régionale (échelle du paléosite représentant quelques centaines de km²) en intégrant les interactions de ces phénomènes.

A cette fin, nous avons mis en oeuvre les techniques de l'Intelligence Artificielle et du raisonnement qualitatif développées et utilisées dans le projet EXPECT du BRGM.

La méthodologie suivie consiste, dans un premier temps, à faire un inventaire le plus exhaustif possible des phénomènes géologiques qui interviennent aussi bien à l'échelle globale (variations eustatiques, variations des températures etc.) qu'à l'échelle régionale (érosion, formations de terrasses alluviales, variation de la végétation etc.). Cet inventaire s'appuie le plus souvent possible sur les études réalisées sur le terrain dans les autres modules du projet (ITGE 1993) en ce qui concerne les phénomènes d'échelle régionale, et sur les sources bibliographiques pour ceux de l'échelle globale.

Une évaluation quantitative de certains processus majeurs est ensuite effectuée afin d'en retirer les ordres de grandeur des vitesses des phénomènes.

La phase suivante consiste en une analyse fine des phénomènes et paramètres à prendre en compte. Elle s'attache plus particulièrement aux interactions des phénomènes et aux modalités de ces interactions. Cette analyse utilise la taxonomie et le formalisme mis au point dans le cadre du projet EXPECT (Garcin et al. 1994). Les liens sont définis qualitativement ou quantitativement selon notre degré de connaissance.

Cette phase permet l'élaboration d'un graphe conceptuel *propre* au cas du paléosite du Jarama dans lequel sont intégrés les différents processus jugés influents.

Les hypothèses fondamentales d'évolutions globales sont alors appliquées au schéma conceptuel précédemment élaboré et se propagent selon les lois définies dans les liens causaux. Cette étape, qui constitue la simulation *sensu stricto*, permet d'élaborer des scénarios d'évolutions des paramètres dans le temps (historiques).

Une analyse de la sensibilité du système modélisé est effectuée sur les historiques résultants de plusieurs scénarios construits soit à partir d'hypothèses fondamentales d'évolutions différentes soit avec des caractéristiques de noeuds du graphe différentes.

Cette étude d'un paléosite permet d'une part, de valider la méthodologie mise en oeuvre, d'autre part de démontrer l'intérêt de l'application des techniques de l'Intelligence Artificielle dans une démarche géoprospective.

Abstract

The objective of this study, carried out as part of EEC Project No. F12W-CT91-0075, entitled "Paleoclimatological revision of climate evolution and environment in Western Mediterranean Regions", was to reconstruct the geological evolution of a test area (the Jarama paleosite, Spain) over the past 120,000 years (Eemian to Present).

This site, even though it did not meet all the criteria necessary for a waste repository, was chosen for its representativity of geological conditions likely to be encountered in more suitable areas of Spain.

The basic principle of this study was to assess the repercussions of fundamental hypotheses of global evolution on phenomena of regional scale (scale of the paleosite representing several hundred square kilometres) through integrating the interactions of these phenomena. To this end we used the techniques of Artificial Intelligence and qualitative reasoning developed and used in the BRGM Expect Project.

The methodology followed consists, in the first instance, in making as exhaustive an inventory as possible of the geological phenomena that occur at both global scale (eustatic variations, temperature variations, etc.) and regional scale (erosion, alluvial terrace deposition, variation in vegetation, etc.). This inventory is based as often as possible on field studies from other modules of the project (ITGE 1993), as far as regional scale phenomena are concerned, and on literature sources for global scale phenomena.

A quantitative evaluation of selected major processes is then carried out so as to obtain an order of magnitude for the rates of these phenomena.

The next phase consists in a detailed analysis of the phenomena and the parameters to be considered. It more particularly concerns the interactions of the phenomena and the modalities of these interactions.

This analysis uses the taxonomy and formalism developed within the Expect Project (Garcin et al. 1994). The relationships are defined qualitatively or quantitatively, depending on our degree of knowledge.

This phase enabled a specific conceptual diagram to be drawn up for the Jarama paleosite, integrating the different processes considered to have an influence.

Fundamental hypotheses of global evolution are then applied to this conceptual diagram and expanded according to the laws of causal relationships. This phase, which is the simulation *sensu stricto*, provides parameter-evolution scenarios (histories).

The sensitivity of the modelled system is analysed against the histories derived from several scenarios developed from different fundamental hypotheses of evolution or from different nodal characteristics of the conceptual diagram.

INTRODUCTION

L'objectif de cette étude, dans le cadre du contrat CCE n° F12W-CT91-0075 "Paleoclimatological revision of climate evolution and environment in Western Mediterranean Regions", est de reconstituer l'évolution passée d'une région (paléosite) durant le dernier cycle climatique c'est-à-dire de - 120 000 ans à l'Actuel. Cela permet de valider les techniques utilisées pour les reconstitutions, d'envisager une fois les paramètres calés, une simulation des états futurs de ce même site et enfin d'identifier les processus ou phénomènes pour lesquels nous manquons d'informations fiables ou précises.

Le site choisi en collaboration avec l'ENRESA et l'ITGE se situe aux confins des provinces de Madrid, Guadalajara et Segovia (fig. 1). La zone d'étude définie par un quadrilatère d'environ 20 par 20 km chevauche les cartes à 1:50 000 de Valdepeñas de la sierra et de Marchamalo (feuille n° 485, 510). Cette zone de la Meseta espagnole se situe à environ 500 km de la côte atlantique et à environ 300 km de la côte méditerranéenne. Les altitudes assez élevées sont comprises entre 1267 m et 650 m. Le Jarama, rivière la plus importante du secteur est un affluent du Tajo qui se jette dans l'océan Atlantique au Portugal après un trajet de plusieurs centaines de km à travers la péninsule Ibérique. La zone d'étude appartient donc au bassin versant atlantique et, de part sa position centrale dans la péninsule Ibérique, est en dehors de l'influence directe des océans. Les précipitations moyennes annuelles sont d'environ 600 à 700 mm et les températures moyennes annuelles comprises entre 11° et 12° C ; l'énergie solaire est d'environ 4 à 4,3 Kwh/m²/jour (ITGE 1988).

La zone du paléosite fait partie intégrante du bassin du Tajo (ou bassin de Madrid) qui est le second bassin en superficie des bassins intérieurs ibériques après celui du Duero. Il s'agit d'un bassin intra-cratonique constitué depuis la phase compressive du Crétacé supérieur (80 Ma) formé par la fracturation du socle hercynien lors de cette compression. Le bassin est compartimenté en domaines morpho-structuraux à évolutions distinctes dans le temps. Au Tertiaire, les dépôts sont essentiellement fluviatiles, palustres et lacustres. Les sédiments y sont essentiellement détritiques même si, au centre du domaine, des évaporites (gypses) se développent.

Au Miocène moyen et supérieur, on assiste à une période de sédimentation à dominante carbonatée constituant la formation des calcaires lacustres du Paramo. Le jeu des accidents au cours du Tertiaire et du Quaternaire va contrôler les zones d'accumulation des épisodes sédimentaires fluviatiles, lacustres ou palustres.

Deux phases majeures y sont distinguées :

- une phase importante à l'Oligocène supérieur,
- une phase tardi-pliocène à caractère distensif dont le rôle est majeur dans l'évolution géométrique des corps sédimentaires.

Durant le Quaternaire, le jeu des failles a conditionné les directions préférentielles des rivières principales contrôlant ainsi les zones de dépôt et d'érosion. La fin du remplissage du bassin est datée du Villafranchien; à partir de cette période, on assiste à de nouveaux processus géomorphologiques.

Depuis 2,5 à 2 millions d'années, la configuration du bassin est proche de l'actuelle. Ce nouveau cycle commence par la formation de croûtes calcaires à structures laminées; ensuite, on observe le développement de dépôts de piémont (formation de la Raña) constitués par des galets plus ou moins roulés emballés dans une matrice argilo-sableuse rouge. Ensuite, la région subit une "dissection" fluviale à laquelle est associé un cortège de dépôts

caractéristiques: terrasses, fans alluviaux, glacis etc. Ce modèle de "dissection fluviale" forme un paysage assez complexe relativement bien connu à l'heure actuelle.

METHODOLOGIE

Cette étude s'appuie sur le système expert "Prospect" développé par le BRGM dans le cadre du projet EXPECT. La méthode utilisée consiste, dans un premier temps, à faire un inventaire exhaustif des phénomènes et de leurs caractéristiques ayant eu lieu sur la zone du paléosite au cours des temps géologiques et plus particulièrement durant la période à traiter, qu'ils s'agissent de phénomènes d'expression globale ou locale. Les liens entre les processus moteurs de l'évolution d'une région sont formalisés afin de dresser un **schéma conceptuel** de cette évolution. Le schéma conceptuel est constitué par des "noeuds" symbolisant des paramètres ou des phénomènes reliés par des "arcs" qui selon leur code précise le type de relation existant entre ces différents noeuds (DJERROUD et *al.* 1993; GARCIN et *al.* 1994). Ces liens sont exprimés qualitativement ou quantitativement. La création de ce graphe revêt une importance capitale car c'est ici qu'intervient l'expertise géologique. La phase finale consistera à élaborer des simulations en propageant les valeurs de chaque "noeud" suivant le schéma conceptuel défini auparavant. L'évolution du paléosite sera donc la réponse locale de la zone, qui possède ses propres caractéristiques, à une évolution globale ("forcing"). Les résultats obtenus se présentent sous la forme d'historiques des valeurs des paramètres. Ces historiques permettent d'analyser la sensibilité du système à la variation d'un ou plusieurs paramètres. Il faut toutefois rappeler que les résultats obtenus seront directement liés au degré de connaissance que l'on a de la zone à traiter. En effet, la phase de définition des liaisons entre phénomènes s'avère généralement relativement aisée; par contre, la connaissance régionale des processus et leur quantification est plus sujette à caution.

OBSERVATIONS GEOMORPHOLOGIQUES ET MORPHOGENETIQUES

Hydrographie

L'écoulement général sur la zone s'effectue en direction du sud-ouest. Les rivières autres que le Jarama (Torote etc.) présentent des sens d'écoulement homogènes et montrent relativement peu d'anomalies de tracé. Seuls quelques lits abandonnés sont à signaler dans la partie Sud du secteur. D'après les auteurs, le Torote constituerait, à l'échelle régionale, un axe stable délimitant deux zones divergentes de basculement. Le tracé du Jarama et de ses affluents présentent de nombreuses anomalies:

- tracé en baïonnette, tracé sigmoïdal, tracé très rectiligne de certaines portions de rivière, présence d'une zone à drainage centrifuge.

Ces différentes anomalies confirment l'existence d'un contrôle tectonique à travers des mouvements de basculement assez localisés et à travers des failles dont ce serait la seule expression en surface. Ces mouvements se sont produits au cours de la vie de ces rivières et donc durant tout le Quaternaire. Ceci est attesté par la dissymétrie des réseaux mais surtout par la migration de leurs tracés et l'abandon de certains de leurs tronçons.

Organisation des terrasses

Quinze terrasses au minimum sont dénombrées dans la vallée du Jarama. Leurs cotes respectives vont de +6 m à +190 m au-dessus du cours actuel. Les autres rivières de la région, de genèses plus récentes, ont des terrasses moins nombreuses. Sur le cours de la Dueñas, les terrasses +6-8 m et +10-12 m sont considérées comme Pléistocène supérieur, la limite Pléistocène inférieur à moyen serait localisée sur la terrasse +80 m. Les terrasses sont disposées en escalier ; les moyennes et hautes terrasses se présentent généralement en reliefs inversés. Il faut noter, sur l'ensemble des cartes de Marchamalo et Valdepeñas de la Sierra, la dissymétrie des sections transverses des vallées :

- le Jarama a des terrasses échelonnées sur sa rive gauche ;
- toutes les autres rivières présentent des dissymétries inverses c'est-à-dire sur leurs rives droites.

Des interpolations entre les témoins des différentes terrasses montrent la migration de leurs limites d'extension et par là même la migration du cours du Jarama durant le Quaternaire. On remarquera plus particulièrement les irrégularités de cette migration qui indique des basculements locaux plus ou moins importants. La partie intermédiaire du cours du Jarama illustre une migration latérale importante en direction du Nord aboutissant peu à peu au tracé sigmoïdal actuel. Le contrôle tectonique de ces terrasses paraît de ce fait évident. L'axe sub-méridien correspondant au cours du Torote délimite deux zones de basculement divergentes ; la totalité du bloc subissant de plus un basculement en direction du SSW. L'ensemble de ces mouvements durant le Plio-Quaternaire va occasionner diverses perturbations des écoulements et notamment des phénomènes de capture. La plaine d'inondation holocène du Jarama est constituée par 2 m de sables fins à très fins dont 60 % de boues argileuses recouvrant les barres graveleuses et barres sableuses affectées de stratifications entrecroisées et planes ; des galets imbriqués sont à signaler. Dans la partie supérieure constituée de sédiments fins, de nombreux débris de *Bos taurus* domestique ont été trouvés. La taille des éléments et le degré de minéralisation donneraient un âge compris entre le Moyen âge et l'Actuel.

Répartition des cônes alluviaux

Les cônes sub-actuels à actuels sont de dimensions plus réduites que ceux du Pléistocène et montrent des textures de plus en plus sableuses ou sablo-argileuses particulièrement lorsque le bassin de réception est constitué de matériaux tertiaires. Ils sont présents dans le fond des vallées actuelles. La répartition géographique des cônes alluviaux et des dépôts de talus épais confirme l'existence de mouvements durant le Quaternaire. On note en effet une bonne concordance entre la répartition de ces corps sédimentaires et les anomalies précédemment citées. Les grands cônes situés à la limite centre Ouest du paléosite sont alignés sur la limite socle-bassin ainsi que sur la portion rectiligne du tracé actuel du Jarama. De même, les portions de tracé rectiligne du Rio Matarrubia sont bordées au Nord (rive droite) par une formation de pied de pente asymétrique considérée comme pléistocène moyen à holocène. Cette coïncidence entre le tracé de cette rivière et cette formation ne paraît pas fortuite mais peut être interprétée comme l'indice de mouvements différentiels ayant d'une part canalisé la rivière et d'autre part déstabilisé les pentes et ainsi réactivé l'érosion.

TECTONIQUE RECENTE

Au cours du Pliocène terminal et du Quaternaire, la région a été soumise à un ajustement de blocs et à un mouvement de remontée et de basculement vers le SSW ayant conditionné les directions d'écoulement, le contrôle des terrasses et les différents niveaux de la "Raña" ainsi que la dissymétrie des vallées fluviales. Localement, sur la feuille de Valdepeñas de la Sierra, des failles sont signalées. Elles affectent les dépôts pliocènes y compris la croûte ferrugineuse ou les arkoses rouges sont signalées; ces failles sont soit de direction nord-sud avec le panneau effondré à l'Ouest soit de direction est-ouest avec le panneau effondré au nord. Actuellement, l'activité morphodynamique semble assez élevée comme en témoigne l'érosion fluviale active (sauf sur les plateaux de la "Raña"). Les chapitres précédents ont montré qu'une activité tectonique durant l'ensemble du Quaternaire paraît indéniable. Celle-ci a été mise en évidence au travers de l'analyse du réseau hydrographique actuel ainsi que par l'analyse de la répartition des différents corps sédimentaires. Les implications morphostructurales confirment et complètent celles de la carte néotectonique à 1/200 000 de Segovia.

INVENTAIRE DES PROCESSUS GLOBAUX RECENTS

A partir de la variation des paramètres orbitaux de rotation de la Terre (théorie de Milankowitch), le globe subit des **variations d'insolation** ayant pour conséquence des **variations de température**. Ces variations seront tempérées par divers facteurs (nébulosité, présence d'un manteau neigeux modifiant l'albédo) attribuables à des phénomènes de géodynamique externe mais aussi de géodynamique interne (émission de poussières et de gaz volcaniques dans la haute atmosphère). Ces variations de température vont, dans certaines régions du globe, permettre l'installation puis le développement d'importantes masses de glace continentales (**inlandsis**) qui vont, en stockant un volume important d'eau sous forme solide, provoquer un déficit dans les eaux océaniques (**variations eustatiques**) et par là même provoquer un changement des rapports isotopiques de l'oxygène par exemple. Ce déficit va induire une baisse du niveau marin que l'on pourra grossièrement considérer comme égale en tout point de l'océan. La baisse du niveau marin et conjointement l'apparition de grandes masses de glace qui jouent le rôle d'accumulateur de frigories (et qui de plus modifient l'albédo terrestre) vont fortement perturber les régimes de **circulations atmosphériques et océaniques** dont l'importance est fondamentale dans l'évolution du climat: il se produit donc des rétroactions. D'autre part, ces variations du niveau marin auront pour conséquence l'immersion ou l'émersion de certaines zones côtières contribuant à éloigner ou à rapprocher la zone de l'océan. Cette variation de la distance à la mer conduira à une **continentalisation** ou à une **océanisation** du climat (**contraste thermique saisonnier, précipitations** etc.). L'émersion d'une partie du plateau continental offrira aux vents un stock important de poussières qui pourront alimenter des dépôts de loess distaux. De plus, les variations eustatiques ont un rôle important dans l'évolution de la morphogenèse en modifiant la position du niveau de base des fleuves; ces modifications du niveau de base déclenchent soit des périodes de reprise d'érosion ou, au contraire, des périodes de sédimentation. Enfin, il faut noter l'importance des liens existants entre la **géosphère** et la **biosphère**, cette dernière étant bien souvent "contrôlée" par les évolutions de la première. Ainsi, à titre d'exemple, nous pouvons évoquer le rôle primordial joué par les variations de la température et des précipitations dans la localisation spatiales des étages phytoclimatiques. Ainsi, une région actuellement située dans l'étage Sub-Humide (peuplement de chêne-vert) pourra, lors de

baisses de température et d'augmentation conjointe de l'humidité, passer dans l'étage Sub-Xérique (chênes à feuilles marcescentes) puis Boréo-Montagnard (forêts mixtes) par exemple. Cette évolution de la couverture végétale sera conjointe avec une évolution des écosystèmes dans leur intégralité et concernera aussi la zoosphère.

PROPOSITION D'UN SCHEMA CONCEPTUEL APPLIQUE AU PALÉOSITE PRINCIPES

Seuls les phénomènes les plus significatifs ont été retenus; leurs relations et leurs interdépendances sont explicitées dans le graphe causal de la figure 2 suivant le formalisme approprié (DJERROUD et *al.* 1993, GODEFROY et *al.* 1993, GARCIN et *al.* 1994). A partir des hypothèses fondamentales d'évolution globale on va évaluer leurs répercussions à l'échelle régionale en propageant leurs historiques dans le graphe en intégrant les interactions entre les phénomènes. Les caractéristiques initiales du site permettent de le localiser par rapport à l'extension de ces phénomènes et de définir la réponse locale à cette évolution. L'introduction de données quantitatives avec les incertitudes appropriées débouche sur plusieurs scénarios plausibles. Ce graphe décrit les liens logiques existant entre le phénomène à prendre en compte indépendamment des valeurs qui seront affectées aux événements des noeuds entrants ou aux valeurs de contrôle de déclenchement de certains processus ou même aux vitesses des phénomènes. Il correspond à la logique du "système paléosite" que l'on modélise. Les valeurs des paramètres (vitesses, variables de description etc.) sont fixées ultérieurement pour chaque test et simulation et sont par conséquent indépendantes de la "logique" du système exprimée dans le schéma. Compte tenu de la position méridionale du paléosite, c'est-à-dire bien au-delà des limites des inlandsis des périodes glaciaires et donc en dehors de leurs influences directes (Garcin, 1993), certains phénomènes classiquement abordés dans des régions plus nordiques ne seront pas traités en tant que tel mais seuls, les variables issues de leurs interactions seront prises en compte sous la forme de noeuds entrants. C'est le cas par exemple pour les inlandsis dont les cycles de croissance et de décroissance ne seront pas traités mais dont certains effets tels que les variations eustatiques seront intégrés en tant que noeuds entrants dans le système. Ce graphe permet de traiter d'une manière homogène des processus d'échelle globale à régionale qui sont soit de type numérique (altitude, niveau marin, profil d'équilibre etc.) soit de type qualitatif ou symbolique (végétation, permafrost). La plupart des noeuds du graphe subissent des influences conjuguées de différents types (Idecl, M+, M-, Equa, Deriv etc. Garcin et *al.* 1994) ; les réponses aux historiques ne sont alors plus linéaires mais complexes. L'un des points remarquable de ce schéma conceptuel est la présence de deux boucles de rétroaction ("feed-back") couplées. L'une concerne l'altitude du Jarama qui est contrôlée par l'évolution du profil d'équilibre lui-même conditionnant la vitesse d'érosion du Jarama et donc son altitude (fig. 1) et l'autre l'altitude du site contrôlée par la variation du niveau de base régional induisant des variations de la vitesse d'érosion agissant directement sur l'altitude du site. La première boucle est essentiellement sous le contrôle de phénomènes globaux tandis que la seconde est essentiellement sous le contrôle de phénomènes régionaux. Toutefois, les variations des phénomènes globaux influant sur l'altitude du Jarama sont susceptibles en déséquilibrant le niveau de base régional de réactiver la seconde boucle et donc de la contrôler *pro-parte*. Ce

couplage permet donc de représenter schématiquement une reprise d'érosion régressive sur le site *sensu stricto* lors d'un encaissement du lit du Jarama dont l'origine peut être la conjonction des effets des variations eustatiques et des mouvements verticaux. De la même manière, le jeu d'une faille située entre le site et le Jarama (phénomène typiquement d'échelle régionale) pourra, selon son jeu, tempérer ou amplifier la reprise d'érosion régressive en diminuant ou, au contraire, en augmentant le potentiel du niveau de base local. Les processus d'échelle régionale peuvent donc tempérer voire contrer certains *stimuli* dont l'origine est globale.

QUELQUES RESULTATS

Afin d'illustrer les chapitres précédents, nous présentons ici quelques résultats issus de simulations effectuées sur 120 000 ans de l'Eémien à l'Actuel.

La phase de simulation va consister à propager les historiques des valeurs des noeuds entrants à travers le schéma conceptuel précédemment décrit. Chaque noeud du graphe présentera à chaque période de temps significative une valeur qui sera la contribution combinée de tous les noeuds prédécesseurs selon les lois et modalités fixées dans le graphe conceptuel du paléosite. Afin de tester la sensibilité du graphe, nous avons procédé à plusieurs simulations de l'évolution du site au cours des 120 derniers milliers d'années, c'est à dire durant tout le dernier cycle glaciaire.

Deux stratégies de simulation ont été distinguées :

- 1 - Des simulations dont l'objectif est d'évaluer uniquement la sensibilité du modèle. Dans ce cas, seul un noeud entrant d'échelle globale est activé (variation des niveaux marins ou variation des températures moyennes annuelles). Ceci dans le but d'analyser l'impact d'une seule fonction "forçante" sur les variables du site. Ce type de simulation nous permet d'évaluer la contribution unitaire de chaque phénomène moteur dans l'évolution du système.
- 2 - La seconde famille de simulation active toutes les causes globales de variation mais avec des activations différentes de certains processus régionaux. Les cas correspondent à l'émission d'hypothèses géologiques sur l'occurrence de certains phénomènes. A titre d'exemple, nous avons procédé à une simulation sans mouvement verticaux ni de faille, avec des mouvements verticaux seuls et enfin avec des mouvements verticaux et des mouvements sur une faille située entre le Jarama et le site.

Les historiques des noeuds entrants d'échelle globale sont extraits de sources bibliographiques. La courbe de vitesse de variation des niveaux marins extraite des courbes eustatiques de Chapell et Schakleton (1986), les paléotempératures sont extrapolées des courbes de paléotempératures fournies par Guiot et *al.* (1989). La vitesse des mouvements verticaux a été fixée à -0,5mm/an soit 0,5 m/Ka et la vitesse moyenne du jeu de la faille à 0,5mm/an soit 0,5m/Ka.

la simulation 5 nous a permis de reconstituer l'évolution du cours du Jarama telle qu'elle est représentée dans la figure 3 avec notamment la constitution de 3 terrasses respectivement datées de 81-87 Ka, 66-46 Ka, 40-31 Ka et de la plaine alluviale de l'Holocène. La migration latérale du cours du Jarama atteint 202 m sur tout le cycle climatique, ce qui est en accord avec les données géologiques. Le cours du Jarama s'encaisserait de 15 m en 120 000 ans durant lesquels 3 terrasses se seraient formées, les deux dernières pouvant éventuellement être associées à un seul ensemble (fig.3). Le temps cumulé durant lequel le Jarama serait en

période d'érosion serait de l'ordre de 64%, les 36% du temps restant correspondrait aux phases de dépôt des terrasses. Les épaisseurs des dépôts de ces terrasses sont de l'ordre de 1 à 2 m. La valeur de l'encaissement du cours du Jarama obtenue est de même ordre de grandeur que celle évaluée à partir des données de terrain.

Les fluctuations des températures moyennes annuelles sont fournies dans la figure 4 et montrent clairement les enchainements de périodes froides et plus tempérées au cours du dernier cycle. Enfin, dans ces simulations comme dans les autres cas étudiés, aucun permafrost n'a pu se développer, ce qui est en accord avec les données de terrain (absence de phénomène périglaciaire sur cette zone).

Les associations végétales, sous contrôle climatique, ont été reconstituées et montrent les fluctuations des associations caractérisant les zones sub-humide, sub-xérique, forêts mixtes, taïga et tundra (fig.5).

CONCLUSIONS

L'objectif de cette étude a été de reconstituer l'évolution passée d'une région sur 120 000 ans et de valider cette simulation par rapport aux données géologiques existantes. Cette validation permettra ensuite de faire une simulation de l'évolution future de cette même région dans des conditions comparables.

Compte tenu du fait que les comportements et les valeurs des phénomènes et processus traités sont conformes aux observations géologiques dans l'état actuel de notre connaissance, une simulation de l'évolution future du site sur une centaine de milliers d'années est envisageable.

BIBLIOGRAPHIE

- Chapell J., Shackleton N.J. (1986) - Oxygen isotopes and sea level. *Nature*, 324, p.137-140.
- Corchon (1976) - Estudio hidrogeológico del Cretácico de los alrededores de Torrelauna (Madrid et Guadalajara). *Bol. del Servicio Geológico*, 40, p 189.
- Defaut B., Courbouleix S., Garcin M., Gros Y. (1992) - L'environnement de l'Espagne au Quaternaire (l'Espagne au Quaternaire dans le contexte géologique et paléoenvironnemental Ouest-Européen et péri-Méditerranéen Occidental). Rapport BRGM R 36737, 83 p., 7(fig., 2 ann.).
- 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
- Djerroud A., Rousset M.C., Godefroy P., Garcin M. (1993) - Event driven causal simulation: evolution scenarios for waste-disposal sites. IMACS International Workshop on Qualitative Reasoning and Design Technologies - Barcelona, June 93 Spain.
- Djerroud A., Rousset M.C., Godefroy P., Garcin M. (1993) - Process-oriented modelling for event-driven simulation. Tech.Rep.CSEG5-19-93, University of Arkansas Department of Computer System Engineering, 313 Engineering Bldg, Fayetteville, AR 72701
- Garcin M., Godefroy P., Djerroud A., Rousset M.C. (1994) - Application des techniques de l'intelligence artificielle à la géoprospective: le projet Expect. Colloque géoprospective. Paris 1994
- 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 Paris Avril 1994 .
- 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. Géocofine 1993- Montpellier
- Guiot J., Pons A. Beaulieu J.L.(de), Reille M. (1989) - A 140 000 years climatic reconstruction from two European pollen records. *Nature*, 338; p.309-313.
- ITGE (1988) - Atlas geocientífico del medio natural de la comunidad de Madrid. ed.:ITGE, série: medio ambiente.

ITGE (1989) - Carte du Quaternaire d'Espagne à 1/1 000 000 , Madrid, 279 p. et 1 carte h.t..

ITGE (1990) - Cartes géologiques d'Espagne à 1/50 000, Valdepenas de la Sierra n°485 , Marchamalo n°510

ITGE/ENRESA (1993) - Sintesis del medio ambiente en España durante los dos ultimos millones de años p.473

Remerciements: D.Baretino, G.Farjanel, C.Oliveros, J.Perez-Gonzalez, T.Torres,



Figure 1 : Carte de localisation du paléosite du Jarama

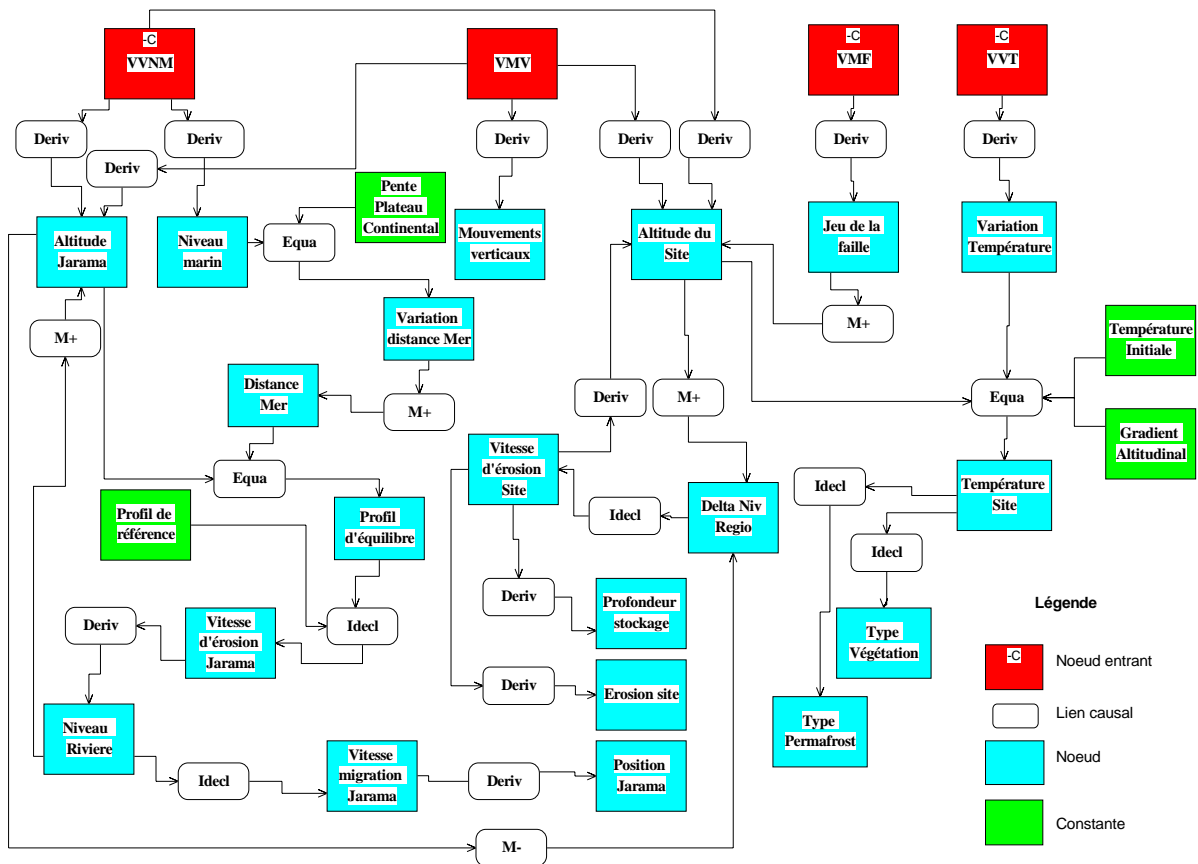


Figure 2 : Schéma conceptuel du paléosite du Jarama

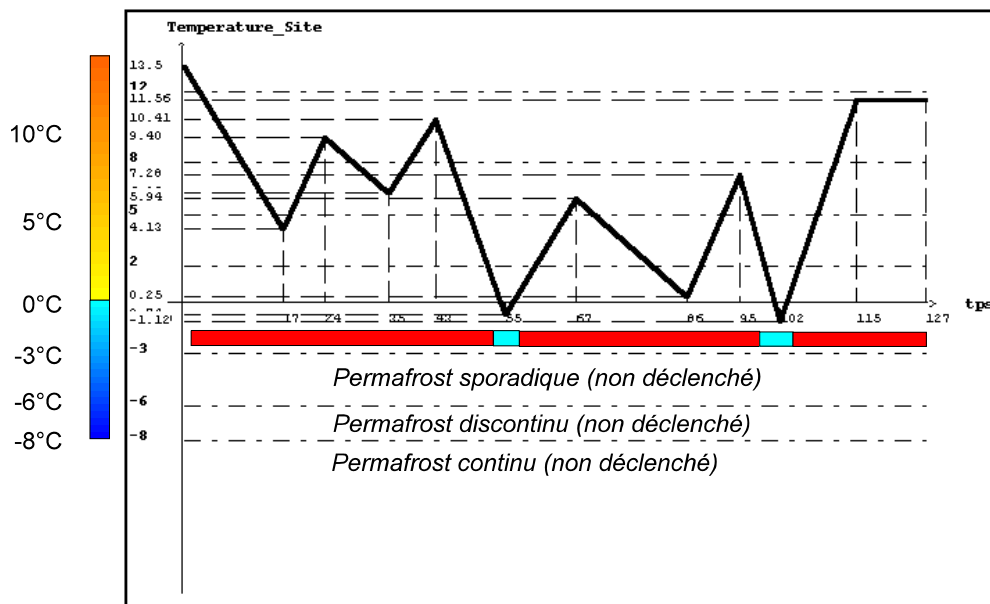


Figure 4: Variation de la température sur le site au cours de la simulation 5 (120 ka BP à l'Actuel)

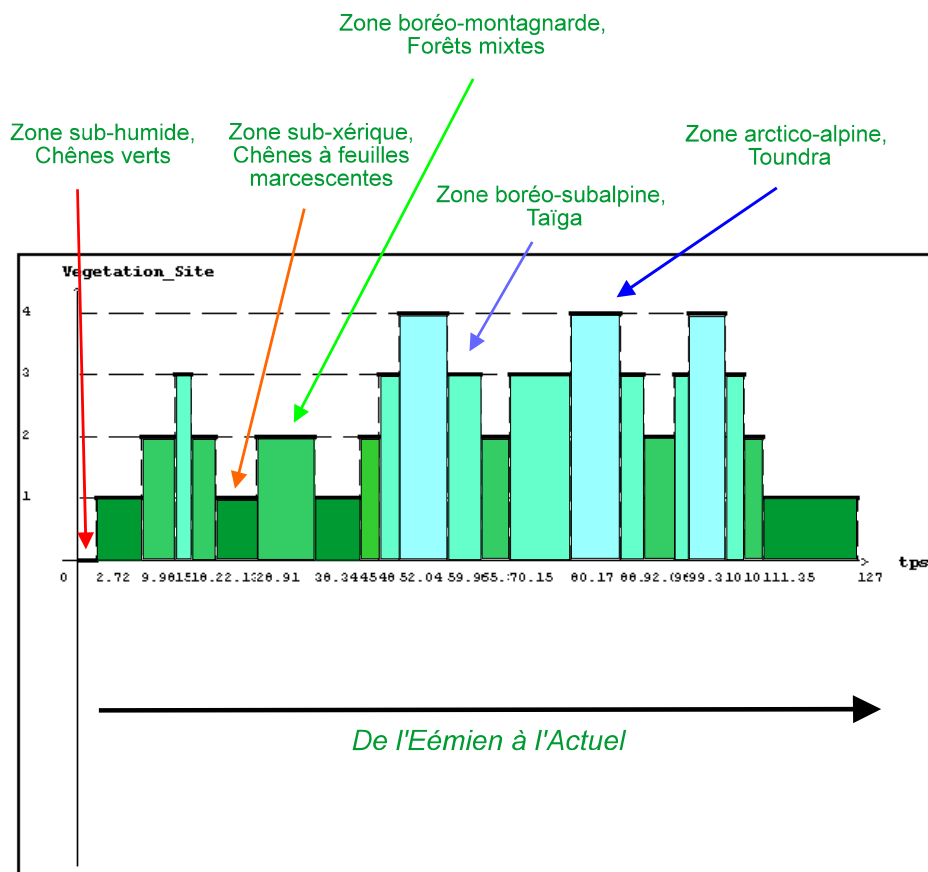


Figure 5: Evolution de la végétation sur le site au cours de la simulation 5 (120 ka BP à l'Actuel)

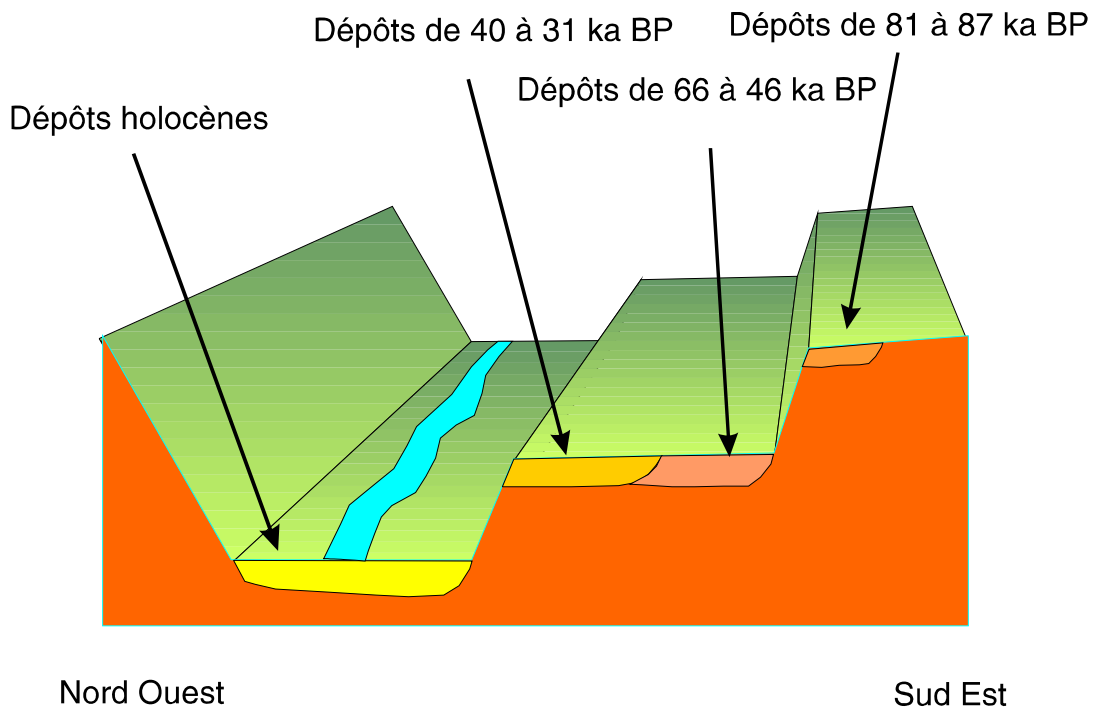
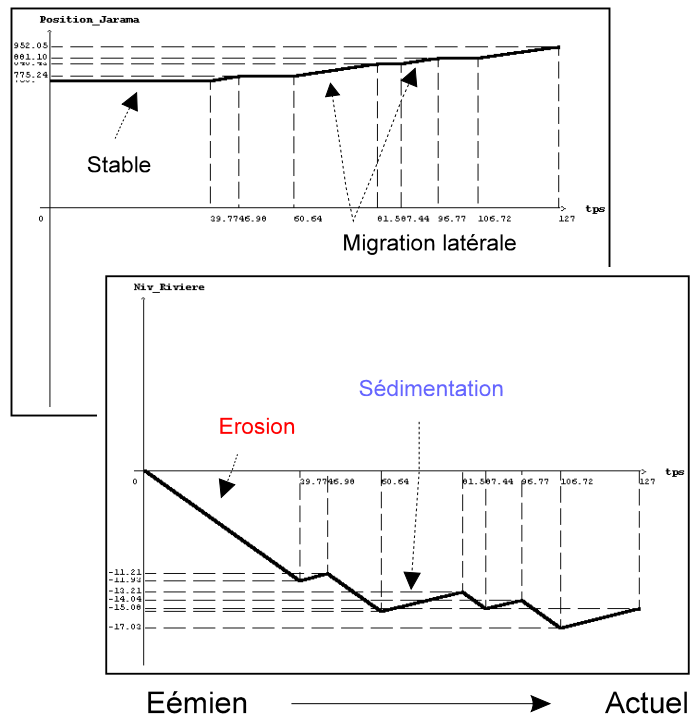


Figure 3: Evolution schématique du Jarama au cours de la simulation 5 (120 ka BP à l'Actuel)

