

Reconstructions paléogéographiques : un nouveau domaine de recherche au service de la prédictivité des ressources minérales au BRGM

Rapport final

BRGM/RP-60651-FR

Décembre 2011



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Reconstructions paléo- géographiques : un nouveau domaine de recherche au service de la prédictivité des ressources minérales au BRGM

Rapport final

BRGM/RP-60651-FR

Décembre 2011

Étude réalisée dans le cadre des activités
de Recherche du BRGM 2011 RESC03

G. Bertrand

Vérificateur :

Nom : L. Guillou-Frottier

Date : Exemple original signé le
12/01/2012

Approbateur :

Nom : C. Braux

Date : Exemple original signé le
12/01/2012

En l'absence de signature, notamment pour les rapports diffusés en version numérique,
l'original signé est disponible aux Archives du BRGM.

Le système de management de la qualité du BRGM est certifié AFAQ ISO 9001:2008.

Mots clés : Géodynamique, paléogéographie, ressources minérales, métallogénie, porphyres, PaleoGIS

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

Bertrand G. (2011). Reconstructions paléogéographiques : un nouveau domaine de recherche au service de la prédictivité des ressources minérales au BRGM. Rapport BRGM/RP-60651-FR, 65 p., 40. Fig., 1 Ann.

© BRGM, 2011, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Synthèse

La présente étude s'inscrit dans le projet cadre de recherche PROMÉTÉ (PROvinces MÉtallogéniques et prédictivITÉ – RESR03), dont la finalité est le développement d'outils dédiés à la découverte de nouvelles ressources minérales. Plus précisément, le projet vise à développer des techniques de prédictivité adaptées à la mise en évidence de concentrations en métaux stratégiques. L'approche spatiale de la prédictivité s'intéresse à l'environnement géologique des gisements et aux paramètres contrôlant leur mise en place, depuis l'échelle du district jusqu'à l'échelle sub-continentale : géologie, structures, signatures géophysiques et géochimiques, mais aussi contexte géodynamique et paléogéographie.

La présente étude visait à développer une méthodologie pour reconstruire la paléogéographie des minéralisations à l'époque de leur formation, afin de préciser les relations avec leur environnement géodynamique (limites de plaques, accidents tectoniques majeurs, géologie, ...) et d'identifier les critères favorables à leur genèse. L'objectif de l'étude, *in fine*, est de développer une nouvelle approche pour renforcer la capacité du BRGM dans le domaine de la recherche en prédictivité des ressources minérales.

En 2011, deux actions principales étaient prévues, qui sont :

- Mettre en place un outil de reconstruction paléogéographique, pour comprendre les processus géodynamiques guidant la genèse des minéralisations ;
- Tester l'outil sur un premier cas d'étude, les porphyres à Cu-Mo de la suture Téthysienne occidentale, afin de mieux comprendre leur genèse et d'identifier, le cas échéant, des conditions géodynamiques favorables à leur mise en place.

Pour la mise en place d'un outil de reconstruction paléogéographique, plusieurs logiciels ont été identifiés et testés. L'un d'eux, qui offrait la meilleure adéquation avec les besoins exprimés, a été acquis et est désormais opérationnel au BRGM. Il s'agit de l'outil PaleoGIS dont l'interface et les principales caractéristiques sont présentées dans ce rapport.

Une première étude de cas a été démarrée, sur la mise en place des porphyres cuprifères le long de la suture téthysienne occidentale. Bien que préliminaire, cette étude a permis d'identifier plusieurs phases de mise en place des gisements porphyriques dans le temps et l'espace. Elle suggère aussi que les porphyres créacé sup. et oligo-miocènes de la zone Egée-Balkans-Carpathes, qui constituent deux ensembles (ou clusters) distincts, pourraient s'être mis en place dans un contexte géodynamique polyphasé ou se succèderaient 1) d'abord une vitesse de subduction élevée, favorisant la fusion dans le biseau mantellique, puis 2) une diminution de la vitesse de convergence favorisant le retrait de la subduction et, sur la plaque chevauchante, un régime extensif favorable à la mise en place des systèmes

magmato-plutoniques. Au-delà de ces observations, cette étude a mis en lumière l'intérêt de l'approche, mais aussi et surtout l'importance de disposer d'un modèle cinématique fiable, détaillé et adapté à l'échelle de l'étude.

Ainsi, à l'issue de l'année 2011, les deux objectifs de l'étude - à savoir 1) disposer d'un outil de reconstruction paléogéographique compatibles avec les besoins et la politique logicielle du BRGM, et 2) démarrer une première étude de cas sur la mise en place des porphyres cuprifères de la suture téthysienne occidentale – ont été atteints.

Toutefois, le travail présenté dans ce rapport est très préliminaire et mérite d'être approfondi. Plusieurs pistes sont proposées, en conclusion, pour consolider et développer ce travail.

Sommaire

1. Introduction	9
1.1. CADRE DE L'ETUDE	9
1.2. GEODYNAMIQUE ET PREDICTIVITE	9
1.3. OBJECTIFS DU RAPPORT	10
2. Principes de base des reconstructions paléogéographiques	11
2.1. GEOMETRIE DES PLAQUES	11
2.2. DEPLACEMENTS ET POLES EULERIENS	12
2.3. REFERENCES ET HIERARCHIE	15
2.4. CHRONOLOGIE	16
3. Choix de l'outil	19
3.1. IDENTIFICATION DU BESOIN	19
3.2. LES OUTILS EVALUES	19
3.2.1. Gmap	19
3.2.2. GPlates	20
3.2.3. PaleoGIS	21
3.3. SOLUTION RETENUE	23
4. Présentation de l'outil PaleoGIS	25
4.1. CONTRAINTES TECHNIQUES	25
4.2. DESCRIPTION DE L'INTERFACE	26
4.3. FONCTIONS ET OUTILS	27
4.3.1. Basic Functions Toolbar	27
4.3.2. Analysis Toolbar	28
4.3.3. Plate Moving Functions Toolbar	31
4.3.4. Menu PaleoGIS de la table des couches de données	31
4.4. DESCRIPTION DES MODELES CINEMATIQUEs FOURNIS	32
4.4.1. EarthByte	33

4.4.2. Fugro PlateWizard	34
4.4.3. GETECH	35
4.4.4. Scotese	36
4.4.5. UTIG PLATES	37
4.4.6. Synthèse	38
5. Etude des porphyres de la suture téthysienne occidentale.....	41
5.1. GENERALITES SUR LES PORPHYRES CUPRIFERES	41
5.2. MISE EN PLACE DES PORPHYRES DE LA SUTURE TETHYSIENNE OCCIDENTALE	43
5.2.1. Données utilisées	43
5.2.2. Répartition temporelle et spatiale des gisements	43
5.2.3. Reconstructions paléogéographiques	49
5.2.4. Approche cinématique	56
6. Conclusion et perspectives.....	61
7. Bibliographie	63

Liste des illustrations

Figure 1 - Carte des principaux épicentres des séismes (points noirs) montrant les frontières actuelles des principales plaques tectoniques (données NASA DTAM Project)	12
Figure 2 - Pôle eulérien décrivant le mouvement d'une plaque rigide à la surface du globe.	13
Figure 3 - Mouvements instantanés, par géodésie, des principales plaques (image NASA JPL).....	14
Figure 4 - Données chronologiques des fonds marins montrant les phénomènes d'accrétion le long des rides océaniques (image LGDC NOAA).....	14
Figure 5 - Extrait de d'arbre hiérarchique des mouvements relatifs de plaques du modèle EarthByte.	15
Figure 6 - Mouvement relatif du Pacifique par rapport au point chaud Hawaïen (cercle), mis en évidence par la chaîne sous-marine de l'Empereur (flèches) ; image NGDC NOAA.....	16
Figure 7 - Chronologie des mouvements relatifs de la plaque 201 (Amérique du Sud) par rapport à la plaque 701 (Afrique) dans le Modèle UTIG PLATES	17
Figure 8 - Vue de l'interface utilisateur EasyGmap	20
Figure 9 - Vue de l'interface utilisateur GPlates	21

Figure 10 - Vue de l'interface utilisateur PaleoGIS (en l'occurrence, l'interface ArcMap dotée de menus spécifiques à PaleoGIS).....	22
Figure 11 - L'interface utilisateur de paleoGIS est celle d'ArcMap, avec trois barres d'outils supplémentaires propres à PaleoGIS.....	26
Figure 12 - Accès au menu PaleoGIS par click droit sur une couche de données.	27
Figure 13 - Barre d'outils « Basic Functions Toolbar ».....	28
Figure 14 - Barre d'outils « Analysis Toolbar ».....	28
Figure 15 - Courbes de variation d'azimuth et de vitesse du point de coordonnées 80°E et 30°N (bordure nord de la plaque Indienne, no. 501) par rapport à l'Eurasie fixe (plaque 601), entre 0 et 120 Ma, par pas de 2 Ma (modèle UTIG PLATES)	29
Figure 16 - Champs de vitesse des plaques par rapport à l'Eurasie fixe (modèle EarthByte), il y a 50 Ma (Yprésien).....	29
Figure 17 - Cartographie du déplacement du point de position actuelle 80°E et 30°N (bordure nord de la plaque Indienne), par rapport à l'Eurasie fixe, entre 120 et 0 Ma, par pas de 2 Ma (modèle EarthByte, vitesses exprimées en cm/an)	30
Figure 18 - Vue de la fenêtre « Power user dashboard », qui propose en routine les calculs courants associés aux pôles et points sur la sphère.	30
Figure 19 - Barre d'outils « Plate Moving Functions Toolbar ».....	31
Figure 20 - Menu PaleoGIS de la table des couches de données	32
Figure 21 - Reconstruction de la convergence Inde-Asie, au Lutétien (45 Ma), avec le modèle EarthByte.....	34
Figure 22 - Reconstruction de la convergence Inde-Asie, au Lutétien (45 Ma), avec le modèle Demo Fugro PlateWizard.....	35
Figure 23 - Reconstruction de la convergence Inde-Asie, au Lutétien (45 Ma), avec le modèle Demo GETECH.....	36
Figure 24 - Reconstruction de la convergence Inde-Asie, au Lutétien (45 Ma), avec le modèle Demo Scotese.....	37
Figure 25 - Reconstruction de la convergence Inde-Asie, au Lutétien (45 Ma), avec le modèle UTIG PLATES.....	38
Figure 26 - Modèle de genèse des magmas en zone de subduction et des porphyres cuprifères dans les batholites de la croûte supérieure, modifié d'après Jébrak et Marcoux (2008).....	42
Figure 27 - Distribution chronostratigraphique des porphyres le long de la bordure téthysienne occidentale, depuis le Crétacé inf. jusqu'au Plio-Pléistocène	45
Figure 28 - Distribution chronostratigraphique normalisée des porphyres le long de la bordure téthysienne occidentale, depuis le Crétacé inf. jusqu'au Plio-Pléistocène, moyennée par unité de temps (Ma).....	45
Figure 29 - Distribution temporelle des porphyres le long de la bordure téthysienne occidentale, depuis le Crétacé inf. jusqu'au Plio-Pléistocène, par période arbitraire de 10 Ma	46
Figure 30 - Répartition spatio-temporelle de la mise en place des porphyres le long de la suture téthysienne occidentale.....	47

Figure 31 - Répartition cartographique des porphyres de la suture téthysienne et identification des phases majeures de mise en place.....	48
Figure 32 - Reconstruction paléogéographique de la convergence Afrique-Eurasie à l'Hauterivien (130 Ma), et champs de vitesses instantanées par rapport à l'Eurasie fixe (modèle UTIG PLATES)	51
Figure 33 - Reconstruction paléogéographique de la convergence Afrique-Eurasie au Turonien (90 Ma), et champs de vitesses instantanées par rapport à l'Eurasie fixe (modèle UTIG PLATES)	52
Figure 34 - Reconstruction paléogéographique de la convergence Afrique-Eurasie au Thanétien (60 Ma), et champs de vitesses instantanées par rapport à l'Eurasie fixe (modèle UTIG PLATES)	53
Figure 35 - Reconstruction paléogéographique de la convergence Afrique-Eurasie au Chattien (30 Ma), et champs de vitesses instantanées par rapport à l'Eurasie fixe (modèle UTIG PLATES)	54
Figure 36 - Reconstruction paléogéographique de la convergence Afrique-Eurasie au Serravallien (15 Ma), et champs de vitesses instantanées par rapport à l'Eurasie fixe (modèle UTIG PLATES).....	55
Figure 37 - Courbes de vitesse de la bordure nord de la plaque Afrique, par rapport à l'Eurasie supposée fixe.....	56
Figure 38 - Courbes de vitesse de la bordure nord-est de la plaque Vardar-Pélagonia, par rapport à l'Eurasie supposée fixe.....	57
Figure 39 - Trajectoires et vitesses, entre 160 et 0 Ma, de deux points des bordures nord de la plaque Afrique, par rapport à l'Eurasie fixe, calculées d'après le modèle UTIG PLATES	58
Figure 40 - Mise en place des porphyres des clusters 2 et 4 dans des contextes géodynamiques en extension associés à la fermeture de la Téthys (modifié d'après Jolivet et Brun, 2010).....	60

Liste des annexes

Annexe 1 - Données des gisements porphyriques le long de la suture Téthysienne occidentale.....	67
---	----

1. Introduction

1.1. CADRE DE L'ETUDE

La présente étude s'inscrit dans le projet cadre de recherche PROMÉTÉ (PROvinces MÉtallogéniques et prédictiviTÉ – RESR03), piloté par l'unité CORE (CONnaissance de la RESSource) du service REM du BRGM (chef de projet : M. Urvois), et plus précisément dans l'action (projet cible) REM GEODYN (chef de projet : L. Guillou-Frottier).

La France et, au-delà, l'Europe sont loin de couvrir leurs besoins en métaux stratégiques et dépendent fortement de leurs importations. Or, ces métaux interviennent dans le développement de nombreuses technologies modernes (transport, réduction des émissions de CO₂, stockage d'énergie, communication, militaire ...). A ce titre, ils représentent un enjeu important pour les politiques nationales et communautaires.

La métallogénie des métaux stratégiques est mal connue. Elle soulève de vrais problèmes scientifiques, principalement pour deux raisons. D'une part, nombre de ces métaux n'ont trouvé des utilisations que récemment, en contribuant au développement de nouvelles technologies. D'autre part, il s'agit fréquemment de substances secondaires, voire même de "sous-produits de sous-produits" qui ne sont extraits du minerai qu'après une ou plusieurs phases de traitement.

La finalité du projet PROMÉTÉ est le développement d'outils dédiés à la découverte de nouvelles ressources minérales. Plus précisément, le projet vise à développer des techniques de prédictivité adaptées à la mise en évidence de concentrations en métaux stratégiques.

1.2. GEODYNAMIQUE ET PREDICTIVITE

L'approche spatiale de la prédictivité s'intéresse à l'environnement géologique des gisements et aux paramètres contrôlant leur mise en place, depuis l'échelle du district jusqu'à l'échelle sub-continentale : géologie, structures, signatures géophysiques et géochimiques, mais aussi contexte géodynamique et paléogéographie. Cette approche intervient en phase amont d'une campagne de prospection. Elle permet de guider la stratégie d'exploration et de réduire les surfaces à explorer en prédisant les zones a priori les plus favorables. Idéalement, elle peut déboucher sur la découverte de nouveaux gisements.

Le post-doc sur fonds Carnot réalisé en 2010 à REM par C. Loiselet montre le fort impact de la géométrie et de la dynamique des zones de subduction sur la répartition de certaines minéralisations (Loiselet *et al.*, 2010 ; Bertrand *et al.*, 2010). De manière plus générale, nous savons que la mise en place des minéralisations est largement guidée par la géodynamique. Une bonne connaissance du contexte géodynamique est donc nécessaire pour identifier les facteurs tectoniques favorisant la genèse des

minéralisations. Un obstacle majeur, toutefois, est qu'il est difficile de replacer la minéralisation dans son contexte géodynamique à l'époque de sa mise en place. Il est nécessaire, pour s'affranchir des déformations ultérieures qui ont perturbé les relations spatiales entre la minéralisation et son environnement, de réaliser des reconstructions paléogéographiques intégrant les âges et la répartition des gisements.

Si l'approche paléogéographique suscite l'attention de nombreux chercheurs (e.g. Gurnis *et al.*, 2012), elle a été peu utilisée pour la prédictibilité des ressources minérales. La présente étude est, à ce titre, novatrice. Elle a pour objectif de développer une méthodologie pour reconstruire la paléogéographie des minéralisations à l'époque de leur formation, afin de préciser les relations avec leur environnement géodynamique (limites de plaques, accidents tectoniques majeurs, géologie, ...) et d'identifier les critères favorables à leur genèse. L'objectif de l'étude, *in fine*, est de développer une nouvelle approche pour renforcer la capacité du BRGM sur la prédictivité des ressources minérales.

En 2011, deux actions principales étaient prévues, qui sont :

- Mettre en place un outil de reconstruction paléogéographique, pour comprendre les processus géodynamiques guidant la genèse des minéralisations ;
- Tester l'outil sur un premier cas d'étude, en l'occurrence les porphyres à Cu-Mo de la suture Téthysienne occidentale, afin de mieux comprendre leur genèse et d'identifier, le cas échéant, des conditions géodynamiques favorables à leur mise en place.

1.3. OBJECTIFS DU RAPPORT

Le présent rapport n'a pas pour objectif de présenter des résultats scientifiques robustes. Le travail réalisé à ce jour n'est pas suffisamment avancé pour cela. Tout au plus pourra-t-il proposer des pistes de réflexion qui pourront être approfondies ultérieurement.

La raison d'être de ce rapport est de présenter, dans les grandes lignes, la thématique, la méthodologie, et un premier exemple d'application, afin de les porter à la connaissance des différents acteurs du BRGM impliqués dans les activités de recherche sur le domaine, afin de susciter des échanges entre géodynamiciens et métallogénistes et d'envisager de nouvelles applications.

Au-delà des ressources minérales, l'approche paléogéographique peut s'inscrire dans de nombreux autres domaines de recherche de l'établissement, dès lors qu'ils concernent des processus géologiques guidés par le contexte géodynamique régional dans lequel ils s'inscrivent (dynamique de bassins, orogénèses, etc...).

2. Principes de base des reconstructions paléogéographiques

La tectonique des plaques repose sur quelques principes de base :

- la lithosphère est divisée en plusieurs « fragments » ou plaques ;
- les plaques se déplacent sur l’asthénosphère sous-jacente et sont mobiles les unes par rapport aux autres ;
- les plaques sont jointives à leurs frontières, où se concentrent leurs déplacements relatifs qui peuvent être convergents, divergents ou coulissants ;
- les plaques sont considérées, au premier ordre, comme rigides et les déformations résultants des interactions inter-plaques se concentrent sur leurs bordures.

Les reconstructions paléogéographiques (on devrait plus justement parler de reconstructions paléotectoniques) consistent à replacer les plaques lithosphériques dans leurs géométries et positions à un temps donné du passé, dans le respect des principes de la tectonique des plaques. Pour cela, il est nécessaire de disposer de plusieurs données incontournables qui sont :

- La géométrie des plaques
- Leurs déplacements
- Les références de leurs déplacements
- La chronologie de leurs déplacements

2.1. GEOMETRIE DES PLAQUES

Identifier la géométrie des plaques tectoniques revient à identifier leurs frontières, aussi bien actuelles que passées. En effet, tout comme une plaque peut se fragmenter – comme ce fut par exemple le cas pour le Gondwana à partir du Silurien (e.g. Stampfli et Borel, 2002) – deux plaques peuvent aussi se joindre et n’en former plus qu’une seule.

Les limites actuelles de plaques sont relativement faciles à identifier car elles sont bien mises en évidence par la sismicité (Figure 1). En effet, de l’ordre de 90% des déformations sismiques sont concentrées le long des frontières actives de plaques. Les limites de plaques anciennes sont généralement identifiées par les géologues sous forme de ceintures orogéniques et/ou ophiolitiques.

Preliminary Determination of Epicenters 358,214 Events, 1963 - 1998

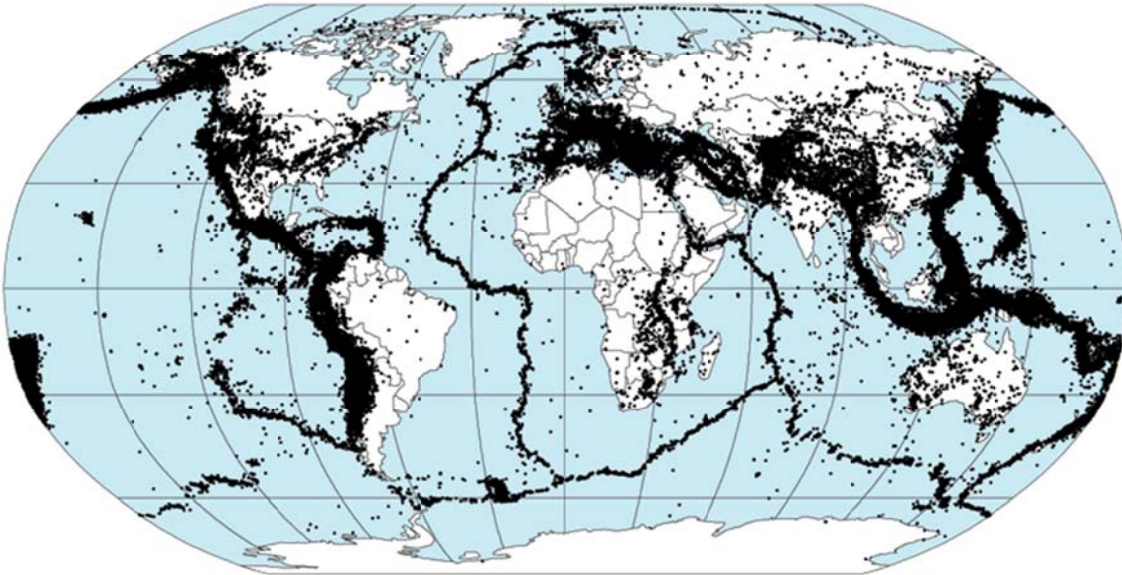


Figure 1 - Carte des principaux épicentres des séismes (points noirs) montrant les frontières actuelles des principales plaques tectoniques (données NASA DTAM Project)

2.2. DEPLACEMENTS ET POLES EULERIENS

Le déplacement – relatif ou absolu – d'une plaque tectonique sur le globe peut être décrit par le théorème d'Euler, qui dit que, d'une manière générale, le déplacement d'un corps rigide sur une sphère peut être vu comme une rotation autour d'un axe passant par le centre de la sphère. Ainsi, le mouvement d'une plaque tectonique peut être décrit par (Figure 2) :

- Un axe de rotation passant par le centre du globe et recoupant sa surface en un point de latitude et longitude données (et son antipode), ou pôle eulérien ;
- Une vitesse de rotation (ou angle de rotation pour une durée connue).

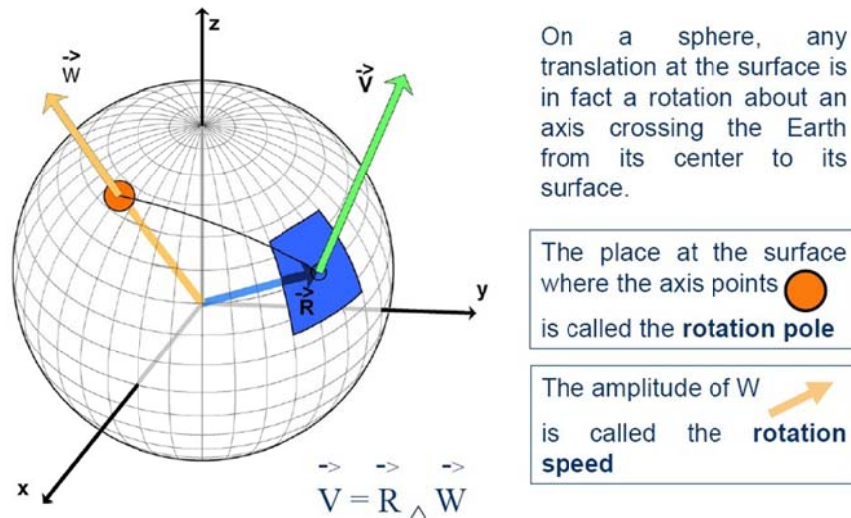


Figure 2 - Pôle eulérien décrivant le mouvement d'une plaque rigide à la surface du globe.

Une difficulté majeure des reconstructions paléogéographiques est de décrire fidèlement le mouvement des plaques (*i.e.* contraindre leurs pôles eulériens). Les mouvements actuels (aussi dits instantanés) sont fournis de manière assez précise par la géodésie (Figure 3). A l'inverse, contraindre les mouvements anciens (aussi dits finis) nécessite généralement des données variées, dont les principales sont :

- La géométrie des bordures continentales, afin de faire coïncider les plaques qui étaient jadis associées au sein de super-continents (Pangée, Gondwana,...) ;
- Les données paléomagnétiques des fonds océaniques, ainsi que les failles transformantes, qui permettent de retracer la cinématique des rides d'accrétion (Figure 4) ;
- Les données paléomagnétiques des roches continentales, afin de déterminer les paléolatitudes et d'identifier les mouvements relatifs entre plaques ;
- Les données structurales (failles, sutures, orogénèses, etc...) résultants du mouvement relatif des plaques et donc susceptibles de fournir des informations sur ces derniers ;
- Les traces des points chauds, qui fournissent des informations sur le mouvement des plaques par rapport au manteau ;
- Les données de tomographie sismique, qui permettent de retrouver les traces d'anciennes plaques subductées dans le manteau ;
- Les données sédimentaires et paléontologiques, qui fournissent des informations sur les conditions de dépôts (paléo-latitudes) ou sur la continuité passée de domaines maintenant séparés (provinces faunistiques,...) ;
- Plus généralement, tout marqueur géologique susceptible de marquer la continuité d'un domaine dans le passé (par exemple, continuité de la chaîne hercynienne entre l'Europe et l'Amérique du Nord avant l'ouverture de l'Atlantique Nord).

La réalisation d'un modèle cinématique est un travail long et méthodique, qui nécessite la compilation et la synthèse d'un très grand nombre de données de natures variées.

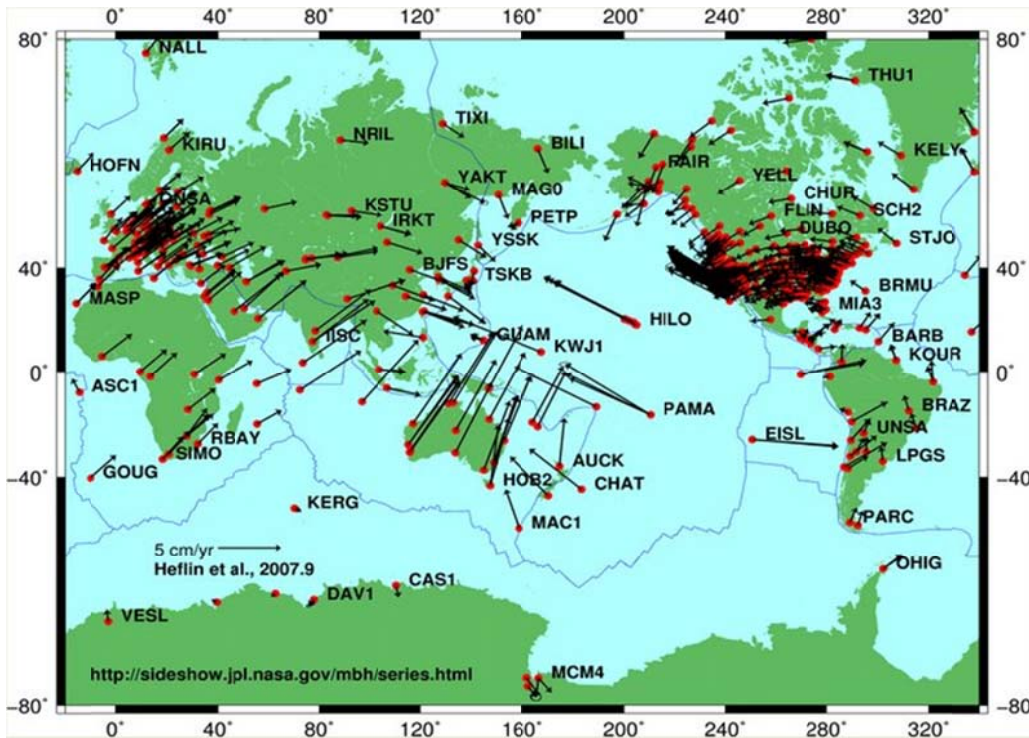


Figure 3 - Mouvements instantanés, par géodésie, des principales plaques (image NASA JPL)

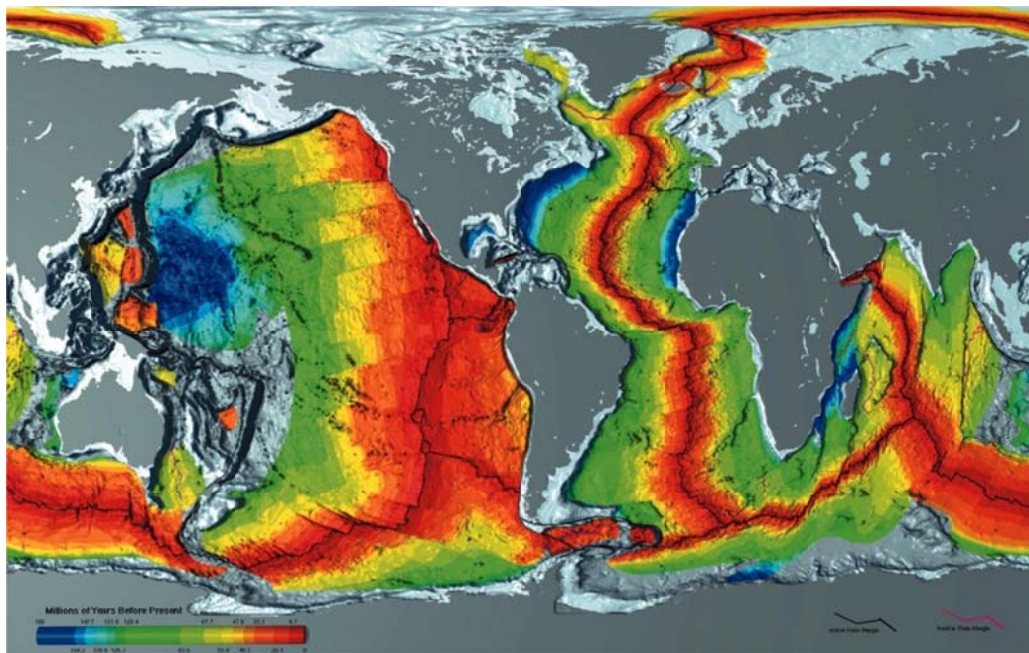


Figure 4 - Données chronologiques des fonds marins montrant les phénomènes d'accrétion le long des rides océaniques (image LGDC NOAA).

2.3. REFERENCES ET HIERARCHIE

Le mouvement d'une plaque sur le globe est décrit par rapport à une référence. Il s'agit généralement d'une autre plaque (par exemple, mouvement de l'Amérique du Sud par rapport à l'Afrique, contraint par la géométrie des bordures de plaques, mais aussi par les failles transformantes et les données paléomagnétiques dans l'Atlantique Sud). On parle alors de mouvement relatif. Le mouvement relatif des plaques les unes par rapport aux autres est ainsi organisé sous la forme d'un arbre (ou d'une pyramide) hiérarchique. Par exemple, le modèle globale EarthByte (utilisable avec GPLates ou PaleoGIS) considère (Figure 5) un mouvement relatif de la plaque Australie (AUS) par rapport à Antarctique (ANT), elle-même en mouvement par rapport à l'Afrique (AFR).

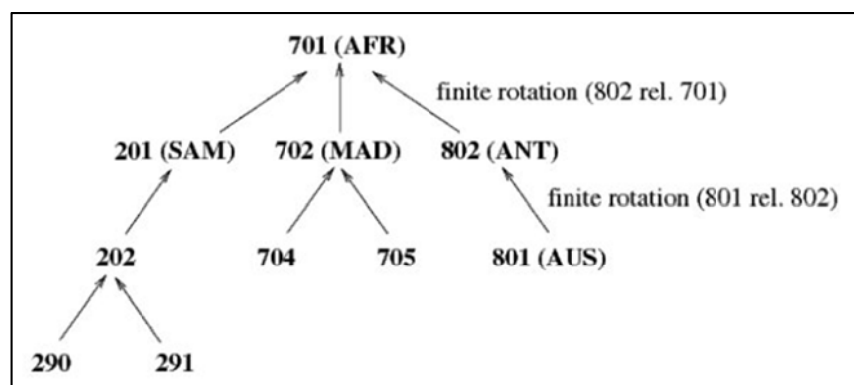


Figure 5 - Extrait de l'arbre hiérarchique des mouvements relatifs de plaques du modèle EarthByte.

Le sommet de la pyramide hiérarchique est le « point d'ancrage » de l'ensemble du modèle cinématique. Il peut s'agir d'une plaque majeure qui sera considérée comme fixe (ou comme référence de l'ensemble du modèle). Il peut aussi s'agir d'un point considéré comme fixe, ou de position donnée, sur la fourchette de temps couverte par le modèle (point chaud, ou champs paléomagnétique par exemple). A titre d'exemple, le point chaud Hawaïen, dans l'Océan Pacifique, est considéré comme fixe au premier ordre. La chaîne sous-marine de l'Empereur, constituée de reliefs volcaniques, est la trace du déplacement de la plaque Pacifique par rapport à ce point chaud (Figure 6).

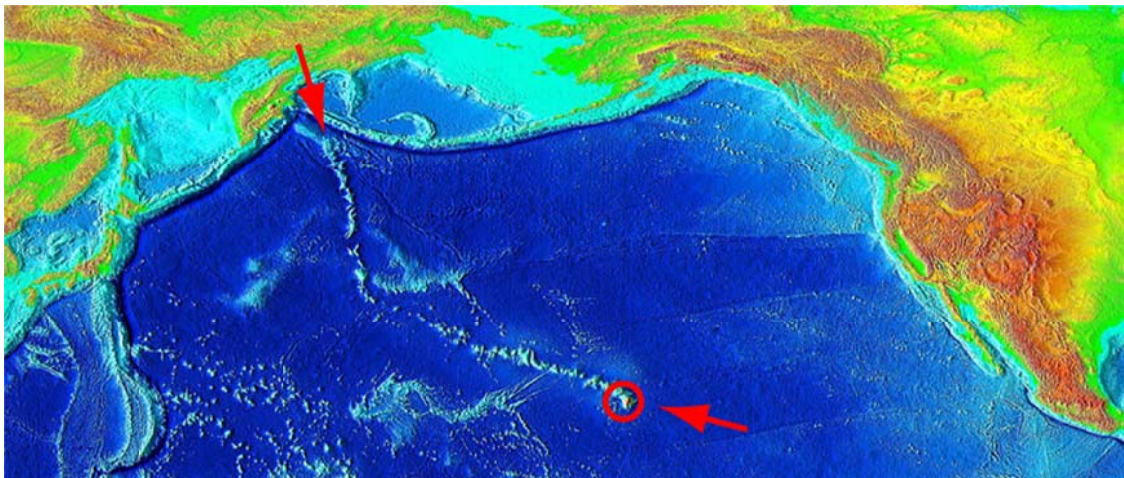


Figure 6 - Mouvement relatif du Pacifique par rapport au point chaud Hawaïen (cercle), mis en évidence par la chaîne sous-marine de l'Empereur (flèches) ; image NGDC NOAA.

2.4. CHRONOLOGIE

L'histoire géodynamique du globe terrestre est complexe, et les mouvements de plaques ne sont pas constants au cours du temps. Le pôle de rotation décrivant le mouvement d'une plaque va donc varier dans le temps (en position et/ou en intensité). Pour tenir compte de ces variations et décrire de la manière la plus fidèle possible le déplacement d'une plaque, le géodynamicien va affecter à cette dernière une série de pôles de rotations, chacun étant valide sur une période de temps donnée. Les modèles cinématiques fournissent généralement plusieurs pôles pour chaque plaque (le nombre de pôles étant généralement d'autant plus grand que le mouvement de cette plaque par rapport à sa référence s'est initié à un âge ancien) et précisent, pour chaque pôle, la période de temps concernée (Figure 7).

plateid	age	lat	lon	angle	ref_plate
201	9,7	62,05	-40,59	3,18	701
201	19	58,77	-37,32	7,049	701
201	25,8	57,59	-36,27	9,962	701
201	33,1	56,17	-33,64	13,41	701
201	38,4	57,1	-33	15,912	701
201	46,3	56,95	-31,15	19,107	701
201	52,4	58,89	-31,18	21,38	701
201	55,9	61,35	-32,21	22,273	701
201	65,6	63,88	-33,61	24,755	701
201	71,6	63,41	-33,38	26,573	701
201	79,1	62,92	-34,36	30,992	701
201	83	61,88	-34,26	33,512	701
201	115	50,47	-33,57	50,19	701
201	120,7	49,15	-33,51	52,29	701
201	127,2	49,15	-33,51	54,26	701
201	130	49,15	-33,51	55,5	701
201	136	49,15	-33,51	55,5	701
201	545	49,15	-33,51	55,5	701

Figure 7 - Chronologie des mouvements relatifs de la plaque 201 (Amérique du Sud) par rapport à la plaque 701 (Afrique) dans le Modèle UTIG PLATES ; on note qu'il n'y a pas de mouvement plus ancien que 130 Ma (début de l'ouverture de l'Atlantique Sud au Barrémien).

3. Choix de l'outil

3.1. IDENTIFICATION DU BESOIN

L'objectif premier était de doter le BRGM d'un outil de reconstruction paléogéographique, de manière à renforcer la capacité de recherche de l'établissement dans le domaine de la prédictivité des ressources minérales.

Cet outil devait, à minima, réunir les caractéristiques suivantes :

- Permettre d'effectuer des reconstructions paléogéographiques globales ou régionales sur les échelles de temps appropriées aux processus minéralisateurs ;
- Permettre de réaliser et/ou modifier ses propres modèles cinématiques ;
- Permettre à l'utilisateur d'inclure, dans les reconstructions, ses propres données (e.g. provinces magmatiques, plutonisme, structures tectoniques, gisements, districts, etc ...)
- Etre opérable par un ingénieur de recherche ayant un minimum de compétences en géodynamique et reconstructions paléogéographiques ;
- Permettre une interaction efficace avec les outils logiciels du BRGM (notamment ArcGIS ou MapInfo, qui sont des outils standards) pour l'analyse et le traitement des données paléogéographiques.

Au-delà de la thématique ressources minérales, la possibilité de mettre l'outil au service d'autres domaines de recherche du BRGM était considéré comme un atout.

3.2. LES OUTILS EVALUES

Après avoir effectué une recherche sur les outils existants, trois logiciels de reconstruction paléogéographiques ont été identifiés : Gmap, GPlates et PaleoGIS. Une version d'essai a été testée pour chacun de ces trois logiciels, afin d'évaluer leur adéquation à répondre aux besoins identifiés.

3.2.1. Gmap

Gmap est un logiciel de reconstruction paléogéographique, qui a été initialement développé dans les années 1980 par T.H. Torsvik à l'université de Bergen. La dernière version de GMAP a été produite en 2001 pour Windows 95/98/NT/2000. La plupart des fonctionnalités de cette version sont décrites par Torsvik & Smethurst (1999).

La version testée est EasyGmap (Figure 8), distribuée en freeware et qui permet de réaliser des reconstructions paléogéographiques à partir d'un modèle cinématique

fourni et non modifiable. Une version commerciale de Gmap est disponible, qui permet de modifier le modèle cinématique.

Des informations plus détaillées sur Gmap sont disponibles sur internet, à cette adresse : <http://www.geodynamics.no/GMAP/GmapHelp2001.htm>

Malgré des fonctionnalités intéressantes, Gmap nous a semblé mal adapté pour plusieurs raisons :

- Possibilités d'import (*i.e.* intégration des données utilisateurs dans les reconstructions) trop limitées ;
- Possibilités d'export trop limitées aussi (uniquement vers logiciel de dessin type Corel Draw ou Adobe Illustrator) ;
- Absence de nouveaux développements depuis une dizaine d'années (donc outil « en fin de vie ») ;
- Interface peu conviviale et manipulation malaisée des données.

Pour ces raisons, Gmap ne nous a pas paru répondre à nos besoins.

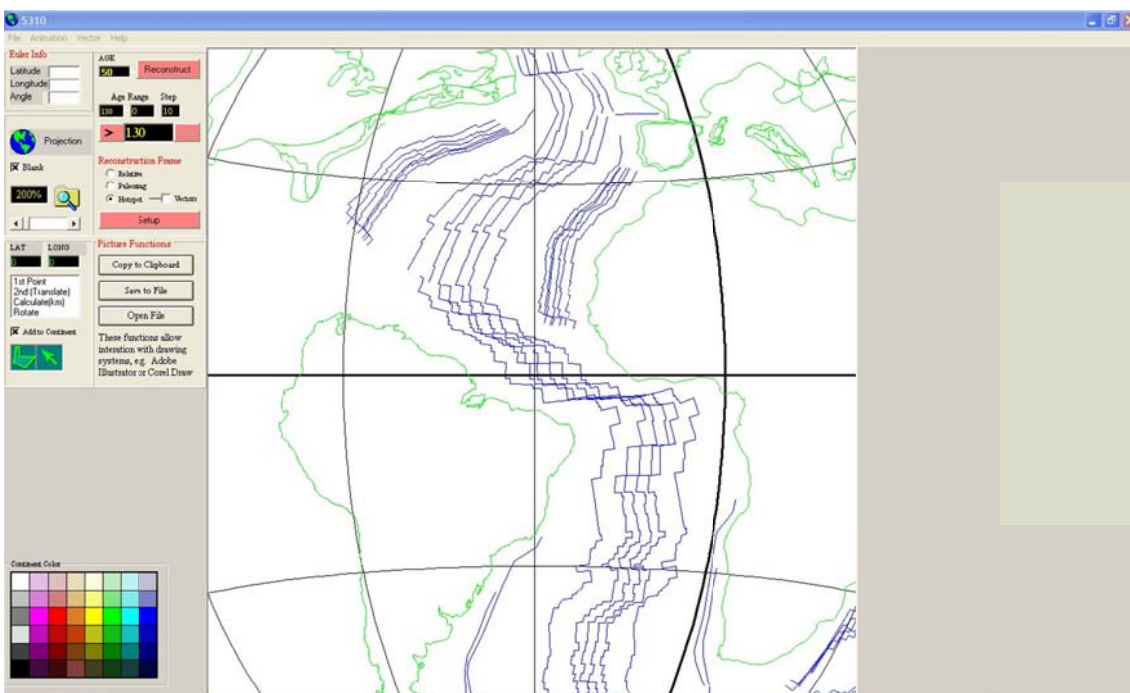


Figure 8 - Vue de l'interface utilisateur EasyGmap

3.2.2. GPLates

GPLates est un logiciel de reconstructions paléogéographiques développé par une équipe pluridisciplinaire qui inclue notamment la School of Geosciences de l'Université de Sidney (EarthByte Project), la Division of Geological and Planetary Sciences de CalTech et le Centre for Geodynamics du Norwegian Geological Survey (McKeon et

al., 2010). A noter que T.H. Torsvik (initialement développeur de Gmap) fait partie de cette équipe, et qu'il est donc probable que GPLates ait bénéficié de l'expérience acquise lors du développement de Gmap. GPLates est un logiciel gratuit distribué sous licence GNU General Public License (GPL). La version testée de GPLates était la 0.9.9.1 (Figure 9).

Des informations plus détaillées sur GPLates sont disponibles sur internet, à cette adresse : <http://www.gplates.org/>

GPLates permet de réaliser des reconstructions paléogéographiques, d'y inclure des données utilisateurs sous différents formats (notamment raster, en jpg) et de créer/modifier les modèles cinématiques. GPLates est fourni en standard avec le modèle EarthByte.

De par sa gratuité et ses nombreuses fonctionnalités en termes de reconstructions paléogéographiques, GPLates est un outil intéressant qui a retenu notre attention. Toutefois, nous avons noté plusieurs lacunes, notamment le peu d'outils d'analyse des données de type SIG et des possibilités d'export (pour traitement ultérieur sous SIG) relativement limitées.

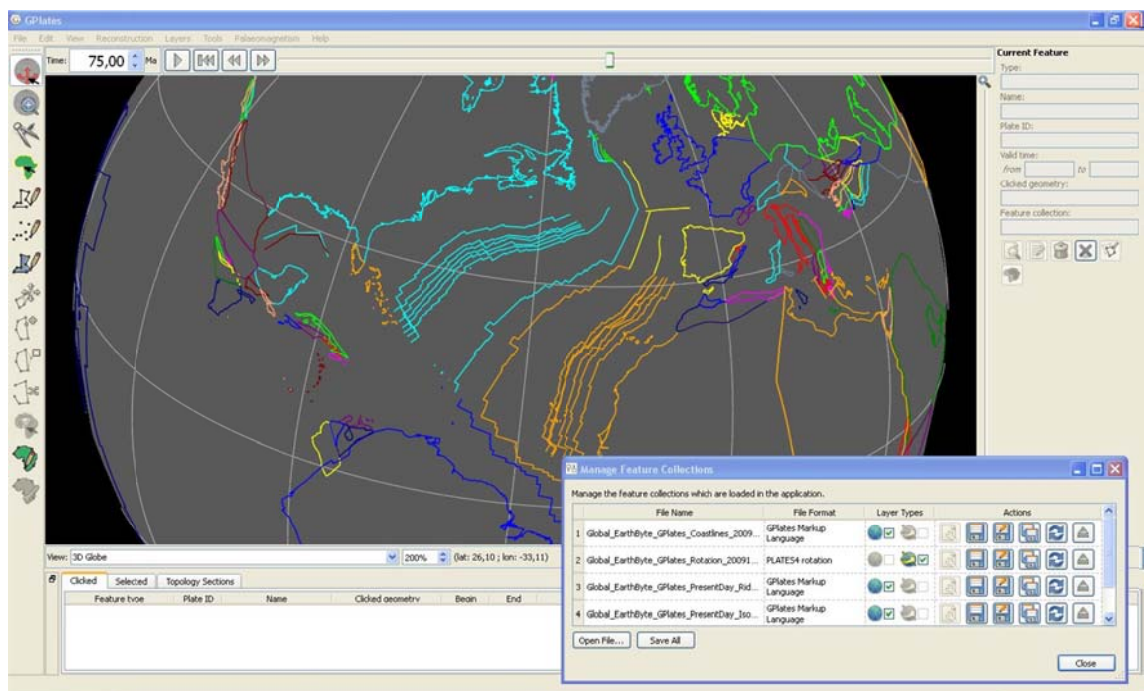


Figure 9 - Vue de l'interface utilisateur GPLates

3.2.3. PaleoGIS

PaleoGIS n'est pas un logiciel à proprement parler, mais une collection d'outils permettant de créer, d'afficher et de manipuler des reconstructions paléogéographiques sous ArcGIS. A ce titre, PaleoGIS est une extension d'ArcGIS

dont il partage l'interface utilisateur. PaleoGIS est distribué à titre commercial par The Rothwell Group. La version testée de paleoGIS était la 3.3.0.0 (release 5866) pour ArcGIS 9.3 (Figure 10). Il s'agit d'une version complète de l'outil, mais fournie avec une licence limitée dans le temps.

PaleoGIS a été développé par M.I. Ross, à partir du programme PaleoMap initialement développé par C.R. Scotese à l'Université du Texas à Arlington. Des informations plus détaillées sur PaleoGIS sont disponibles sur internet, à cette adresse : <http://www.paleogis.com/>

PaleoGIS permet de créer et manipuler des reconstructions paléogéographiques, d'y inclure des données utilisateurs sous tous les formats acceptés par ArcGIS (vecteurs et rasters), de les exporter sous tous les formats autorisés par ArcGIS, et de créer/modifier les modèles cinématiques. PaleoGIS profite aussi de l'environnement d'ArcGIS et de tous les outils de traitement et d'analyses du SIG directement utilisables sur les données paléogéographiques.

ArcGIS étant un outil standard au BRGM, la prise en main de PaleoGIS, du moins pour réaliser les opérations les plus basiques, est à la portée de tous les ingénieurs et/ou techniciens du BRGM ayant une connaissance de base du SIG.

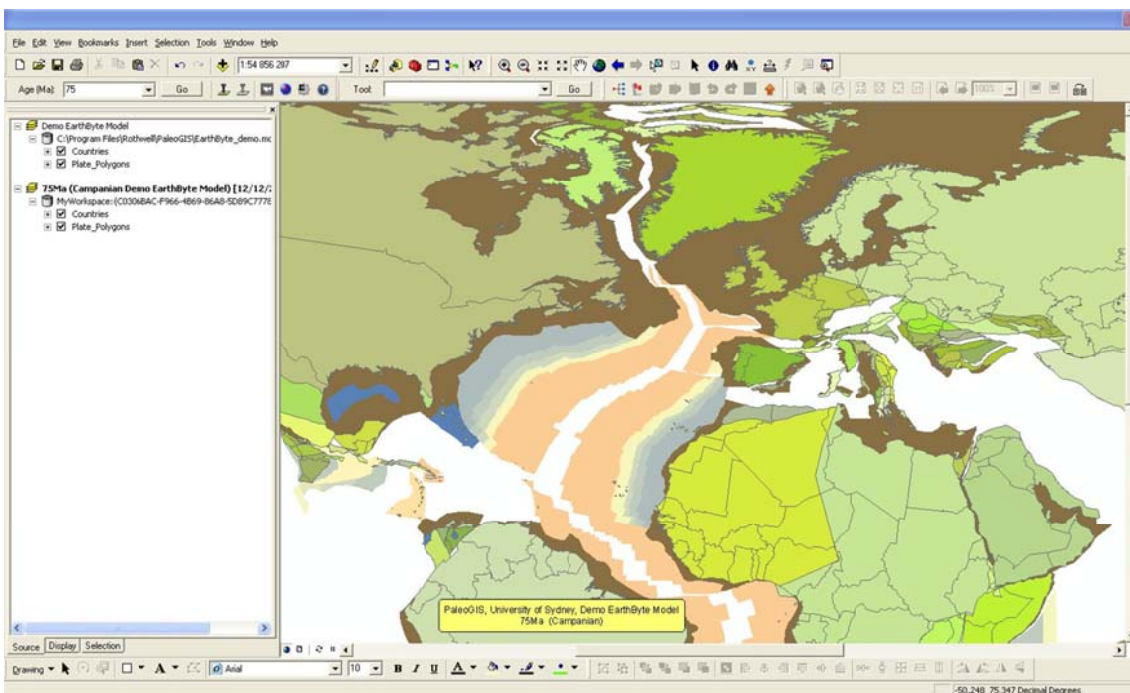


Figure 10 - Vue de l'interface utilisateur PaleoGIS (en l'occurrence, l'interface ArcMap dotée de menus spécifiques à PaleoGIS)

3.3. SOLUTION RETENUE

La solution technique retenue, qui nous a semblé répondre fidèlement au besoin identifié est PaleoGIS. Les raisons de ce choix sont les suivantes :

- L'intégration complète de l'outil de reconstruction paléogéographique dans ArcGIS, et donc le bénéfice de toutes les fonctionnalités (de traitement et d'analyse des données) du SIG, nous a semblé être un atout majeur. Toutes les fonctions de traitement et d'analyses d'ArcGIS sont applicables directement sur les données paléogéographiques. Ainsi, PaleoGIS ajoute, à la dimension spatiale intrinsèque du SIG, une composante temps qui en fait véritablement un outil 4D.
- ArcGIS étant un outil standard du BRGM, PaleoGIS s'intègre parfaitement dans la chaîne de traitement des données et la politique logicielle de l'établissement.
- L'interface utilisateur étant celle d'ArcGIS, elle nous est apparue comme familière et facilement maîtrisable. La prise en main du logiciel s'en trouve grandement facilitée.

Nous avons donc acquis, à la suite de cette phase d'enquête et de test, une licence unique monoposte de PaleoGIS, sur investissement REM. PaleoGIS est opérationnel au BRGM, depuis mai 2011, sur le poste de travail de G. Bertrand à REM.

4. Présentation de l'outil PaleoGIS

4.1. CONTRAINTES TECHNIQUES

La version testée de PaleoGIS était la version 3.3.0.0 pour ArcGIS 9.3. Nous l'avons remplacée par la version 4.0.0 pour ArcGIS 9.x. en juin 2011. A noter aussi, il existe depuis peu une version 4.0.2 pour ArcGIS 9.x et une version 4.0.2 pour ArcGIS 10.0, mais nous ne les avons pas testées à ce jour.

Le poste BRGM sur lequel fonctionne PaleoGIS est une station HP xw4600, processeur Intel Core2 Quad CPU Q8400 à 2.66 GHz et 3.48 Go de RAM (poste déployé en 2009). Conformément à la politique matérielle informatique du BRGM, ce poste sera changé en 2012.

PaleoGIS fonctionne au BRGM sous ArcGIS 9.3.1 (Build 3000) **en version anglaise**. Attention, **PaleoGIS ne fonctionne pas avec la version française d'ArcGIS**. Cette version française ne doit pas avoir été installée sur le poste car, même après désinstallation, des fichiers résiduels bloquent le fonctionnement de PaleoGIS (il est alors nécessaire de réinstaller complètement ArcGIS en anglais). Ce point a été la source de nombreux problèmes techniques que nous avons mis beaucoup de temps à résoudre (conjointement entre REM, STI et The Rothwell Group).

PaleoGIS (licence monoposte ou multi-poste) est compatible avec le système des licences flottantes ArcGIS du BRGM. Pour bénéficier de toutes les fonctionnalités de PaleoGIS, il est nécessaire de disposer de Spatial Analyst et 3D Analyst dans ArcGIS.

La réalisation de reconstructions ou d'animations¹ paléogéographiques génère un grand nombre de fichiers temporaires. Il est donc nécessaire de nettoyer régulièrement le répertoire où ces fichiers sont générés (généralement C:\Documents and Settings\user_name\Local Settings\Temp).

Lors des premiers jours d'utilisation de PaleoGIS, de nombreuses erreurs se sont produites. Le problème a été résolu en sélectionnant « virtual geodatabase » comme type de cache (dans l'onglet « advanced options » de la fenêtre « configuration » de PaleoGIS).

¹ Série chronologique de reconstructions permettant de visualiser le mouvement des plaques sous la forme d'une vidéo animée

4.2. DESCRIPTION DE L'INTERFACE

PaleoGIS fonctionnant sous ArcGIS, l'interface utilisateur est ArcMap, à laquelle s'ajoutent trois barres d'outils propres à PaleoGIS (Figure 11) :

- « PaleoGIS : Basic Functions Toolbar » : outils de base pour charger les modèles cinématiques et réaliser des reconstructions ou animations paléogéographiques ;
- « PaleoGIS : Analysis Toolbar » : menu déroulant proposant quatre outils propres aux reconstructions paléogéographiques ;
- « PaleoGIS : Plate Moving Functions Toolbar » : outils avancés de manipulations des plaques et de leurs pôles de rotation.

Ces barres d'outils, comme toutes celles d'ArcGIS, peuvent être déplacées et « collées » en bordure de fenêtre ou dans la partie supérieure de l'écran.

Par ailleurs, un nouveau menu PaleoGIS est disponible par click droit sur une couche de données dans la table des données (Figure 12). Ce menu donne accès à plusieurs fonctions propres au processus de reconstruction paléogéographique.

Toutes les autres fonctionnalités d'ArcGIS (y compris Arc Catalog, Arc Toolboxes et autres) sont disponibles comme dans l'environnement ArcMap usuel.

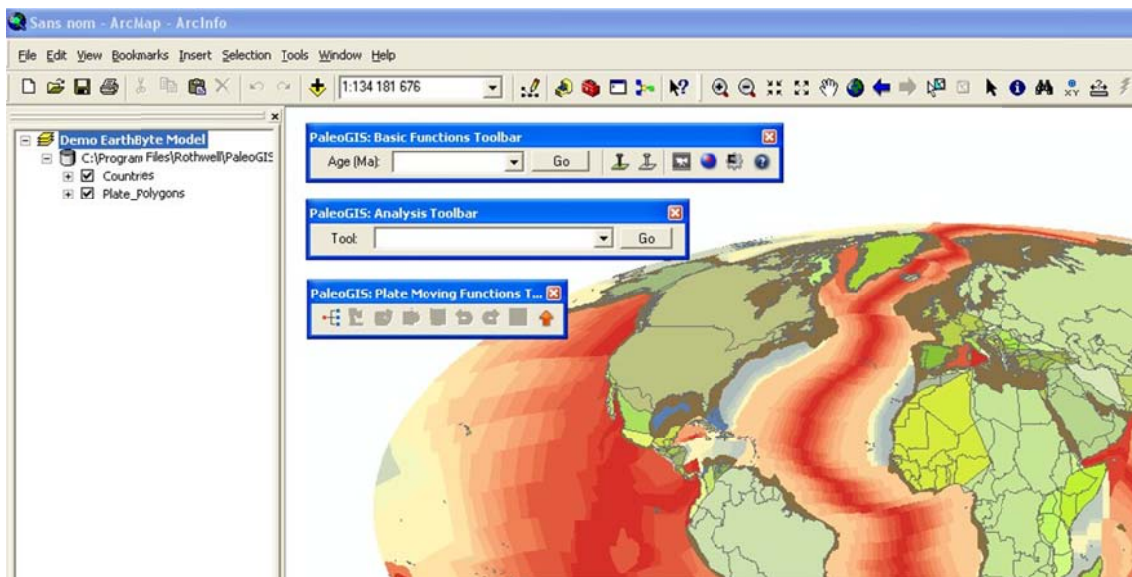


Figure 11 - L'interface utilisateur de paleoGIS est celle d'ArcMap, avec trois barres d'outils supplémentaires propres à PaleoGIS.

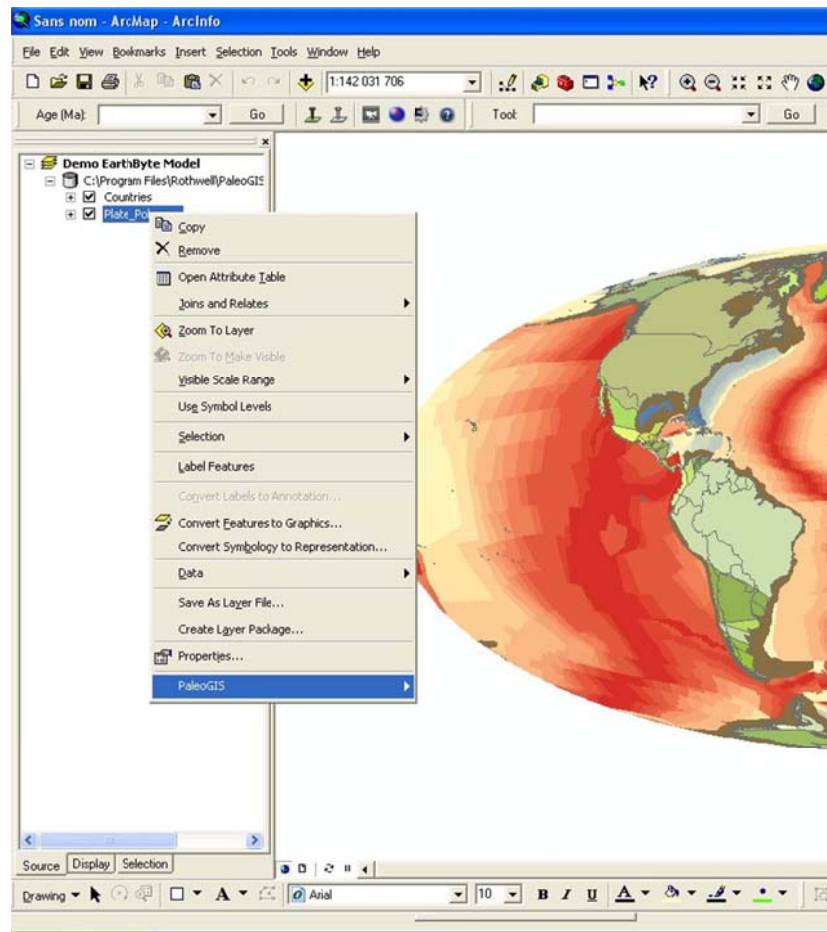


Figure 12 - Accès au menu PaleoGIS par click droit sur une couche de données.

4.3. FONCTIONS ET OUTILS

L'objectif de ce chapitre n'est pas de fournir un manuel utilisateur de PaleoGIS, mais de donner un bref aperçu des fonctions offertes par l'outil. Pour une description complète de PaleoGIS et de son utilisation, nous renvoyons à la lecture du manuel de l'utilisateur.

4.3.1. Basic Functions Toolbar

Cette barre d'outils propose plusieurs fonctions de base de PaleoGIS qui sont, de la gauche vers la droite (Figure 13) :

- La fonction « Reconstruction », sous la forme d'un champ où l'on peut soit saisir la valeur numérique de l'âge de la reconstruction, soit sélectionner un étage stratigraphique dans le menu déroulant ;

- Le bouton « Fixed plate », qui permet d'ancrer la plaque qui servira de référence (*i.e.* plaque supposée fixe) pour la reconstruction ;
- Le bouton « Clear fixed plate », qui annule l'ancrage de la plaque de référence ;
- Le bouton « Animation », qui donne accès à la fenêtre de création d'animation (basée sur une série chronologique de reconstructions) ou sont notamment précisés l'âge de début de l'animation, l'âge de fin, et l'intervalle de temps entre chaque reconstruction ;
- Le bouton « Quick spin » permet d'afficher une vue du globe depuis l'espace et de la recentrer sur le point cliqué ;
- Le bouton « Configuration », qui donne accès à la fenêtre du même nom et aux différentes options pour utiliser PaleoGIS (c'est notamment depuis cette fenêtre qu'est chargé le modèle cinématique) ;
- Le bouton « Help », qui affiche l'aide sur PaleoGIS.



Figure 13 - Barre d'outils « Basic Functions Toolbar »

4.3.2. Analysis Toolbar

Cette barre d'outils est un menu déroulant (Figure 14) donnant accès aux quatre fonctions d'analyse et de calcul suivantes :

- « Azimuth & rate vs. Time » : Cet outil permet de tracer les courbes d'azimut et vitesse de déplacement, relatif ou absolu, d'un point sur une plaque (par défaut le centroïde), pour une période et un pas de temps donnés (Figure 15) ;
- « Instantaneous motion » : Cet outil permet de cartographier le champ de vitesse instantanée du modèle, absolu ou par rapport à une référence fixé, au temps t de la reconstruction (Figure 16) ;
- « Point path visualization » : Cet outil permet de cartographier le déplacement, relatif ou absolu, d'un point donné au cours du temps (Figure 17) ;
- « Power user dashboard » : cette fenêtre propose différents outils pour effectuer les calculs usuels associés aux reconstructions paléogéographiques (addition de pôles, rotation d'un point, calcul de distance sur le grand cercle, calcul de pôle ; Figure 18).



Figure 14 - Barre d'outils « Analysis Toolbar »

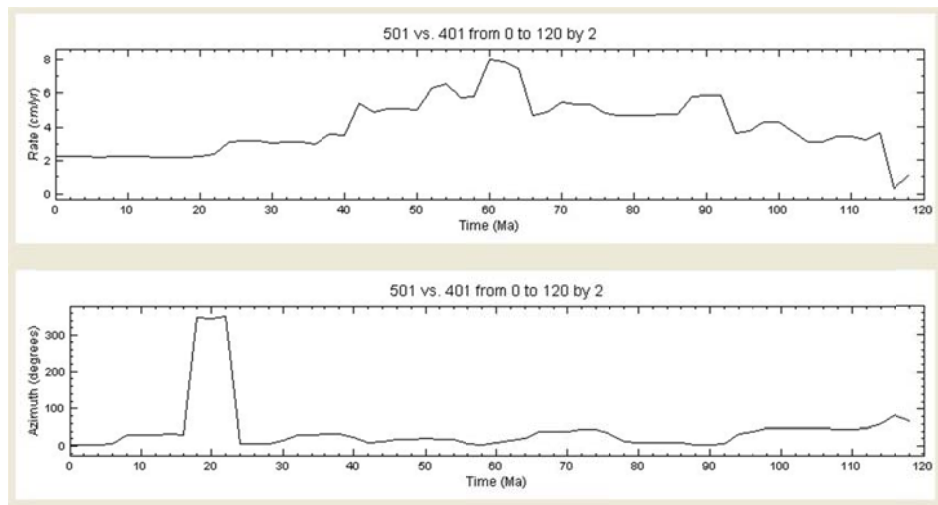


Figure 15 - Courbes de variation d'azimuth et de vitesse du point de coordonnées 80°E et 30°N (bordure nord de la plaque Indienne, no. 501) par rapport à l'Eurasie fixe (plaque 401), entre 0 et 120 Ma, par pas de 2 Ma (modèle UTIG PLATES) ; on note un ralentissement significatif entre le Sélandien et le Lutétien (60-40 Ma), qui marque le début de la collision Inde-Asie.

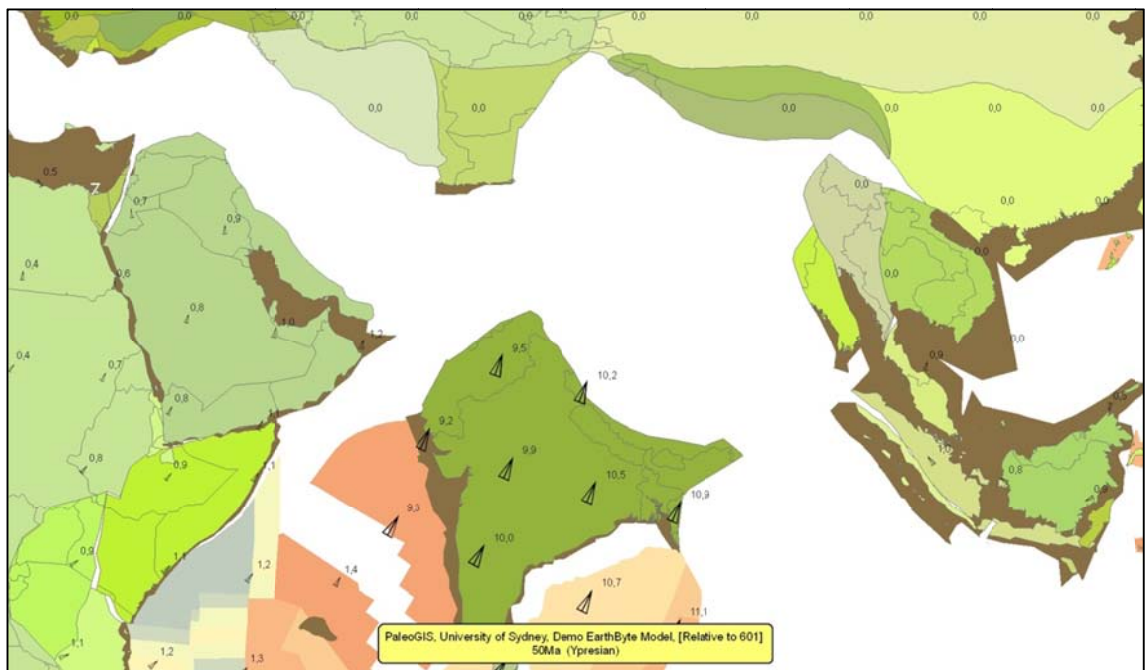


Figure 16 - Champs de vitesse des plaques par rapport à l'Eurasie fixe (modèle EarthByte), il y a 50 Ma (Yprésien) ; on note la migration rapide (environ 10 cm/an) de l'Inde vers le nord, qui coïncide avec l'expansion très active le long de la ride NW Indienne (environ 8 cm/an).

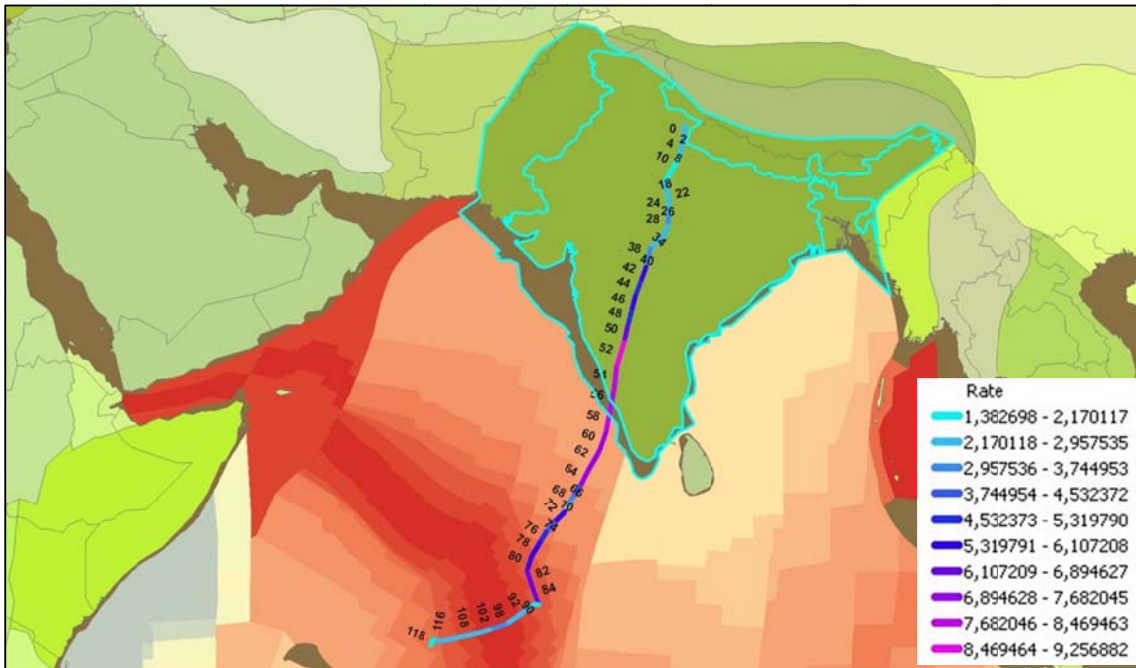


Figure 17 - Cartographie du déplacement du point de position actuelle 80°E et 30°N (bordure nord de la plaque Indienne), par rapport à l'Eurasie fixe, entre 120 et 0 Ma, par pas de 2 Ma (modèle EarthByte, vitesses exprimées en cm/an) ; on note le brusque ralentissement, au début de l'Eocène (autours de 50 Ma), qui correspond au début de la collision Inde-Asie.

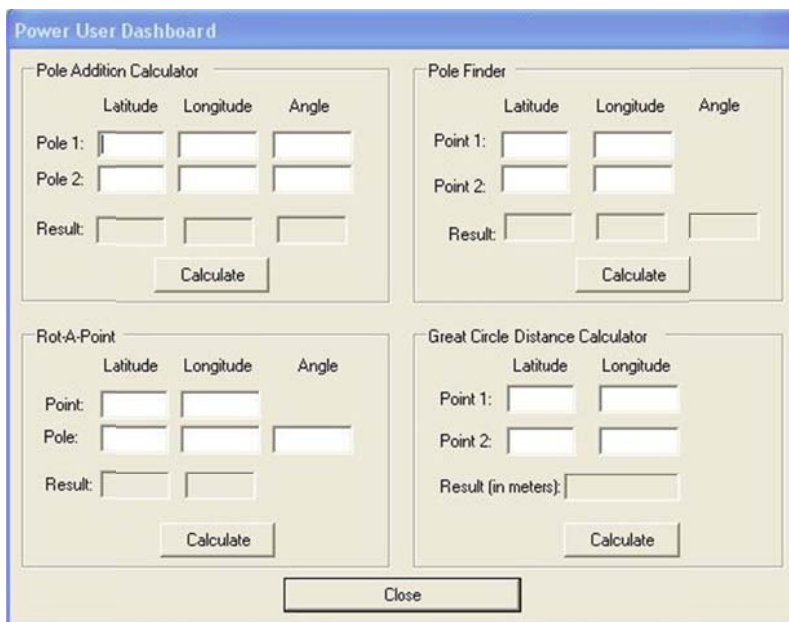


Figure 18 - Vue de la fenêtre « Power user dashboard », qui propose en routine les calculs courants associés aux pôles et points sur la sphère.

4.3.3. Plate Moving Functions Toolbar

Cette barre d'outils est active lorsqu'une reconstruction paléogéographique a été réalisée. Elle propose plusieurs fonctions relatives à la manipulation et au déplacement des plaques et des pôles, qui sont, de la gauche vers la droite (Figure 19) :

- Le bouton « Genealogist », qui permet de visualiser la filiation d'une plaque sélectionnée (*i.e.* l'arborescence des plaques se déplaçant avec elle ou par rapport à elle) ;
- Le bouton « Pole finder », qui affiche les caractéristiques du pôle de rotation d'une plaque sélectionnée, ainsi que sa référence ;
- Le bouton « Spin and drop », qui permet de déplacer une plaque selon un pôle entré par l'utilisateur ;
- Le bouton « Drag and drop », qui permet de déplacer librement une plaque ;
- Le bouton « Undo move », qui permet d'annuler le dernier mouvement de plaque effectué ;
- Le bouton « Redo move », qui permet de refaire un déplacement qui aurait été annulé avec le bouton précédent ;
- Le bouton « Enter pole », qui permet à l'utilisateur d'entrée les coordonnées d'un pôle de rotation ;
- Le bouton « Pole saver », qui permet de sauvegarder les pôles de rotation de plaques qui ont été déplacées ;
- Le bouton « Promotion » permet d'éditer les données de rotations depuis ou vers une table de pôles de rotation.



Figure 19 - Barre d'outils « Plate Moving Functions Toolbar »

4.3.4. Menu PaleoGIS de la table des couches de données

Ce menu est accessible par un click droit sur une couche de données dans la table de données (Figure 20). Il donne accès aux fonctions suivantes, depuis le haut vers le bas :

- Fonction « Save reconstruction », pour sauvegarder les couches de données d'une reconstruction (temporairement stockées dans un « scratch directory ») ;
- Fonction « Export to ArcGlobe », pour sauvegarder puis manipuler une dataframe dans ArcGlobe ;
- Fonction « Refresh cache », pour actualiser, dans le cache, les données utilisées pour les reconstructions, dans le cas où leurs attributs auraient été modifiés ;
- Fonction « Empty scratch directory », pour effacer les données temporaires stockées dans le scratch directory (notamment les reconstructions, qui doivent être sauvegardées auparavant) ;

- Fonction « Validate all layers », pour vérifier que les couches de données sont valides pour être reconstruites avec PaleoGIS ;
- Fonction « Refresh cache for single layer », identique à la fonction « Refresh cache » pour une unique couche de données ;
- Fonction « Unreconstruct », pour « déconstruire » un set de données d'une reconstruction paléogéographique et le replacer dans sa configuration actuelle ;
- Fonction « Validate layer », identique à la fonction « Validate all layers » pour une unique couche de données ;
- Fonction « Repair layer », pour réparer une couche de données dont la géométrie n'est pas valide pour être reconstruite ;
- Fonction « Preprocess raster », pour effectuer les premières étapes de traitement des fichiers rasters (découpage selon la géométrie des polygones) et stocker le résultat dans le cache, afin d'accélérer les reconstructions et animations ultérieures.

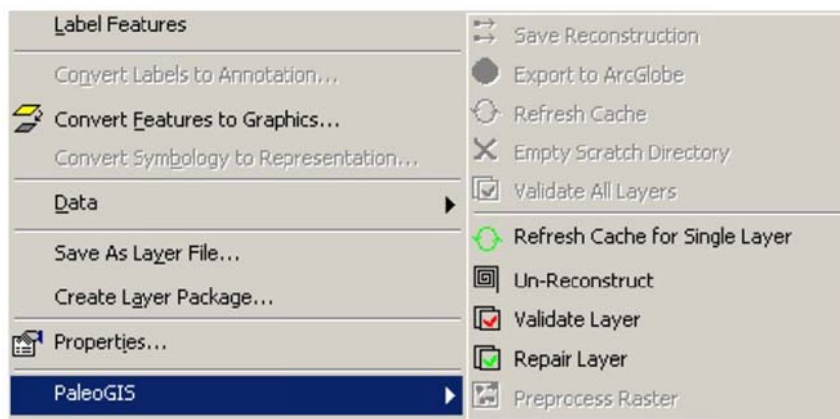


Figure 20 - Menu PaleoGIS de la table des couches de données

4.4. DESCRIPTION DES MODELES CINEMATQUES FOURNIS

Comme tout logiciel de reconstruction paléogéographique, PaleoGIS requiert un modèle cinématique (global ou régional) pour fonctionner (*i.e.* la géométrie des plaques tectoniques, les caractéristiques de leurs rotations – pôles eulériens et références - et la chronologie de ces rotations). Le modèle cinématique peut être créé et modifié par l'utilisateur. Toutefois, il s'agit d'un travail considérable, et cinq modèles « clé en main » sont fournis en standard avec la licence PaleoGIS. Certains sont des versions limitées de modèles commerciaux. Ils sont tous les cinq décrits ci-dessous. A titre d'exemple et de comparaison, une même reconstruction paléogéographique a été réalisée avec chacun des cinq modèles (Figures 21 à 25). Il s'agit de l'initiation de la collision de la plaque indienne avec l'Eurasie, centrée sur le point de longitude 75° est et de latitude 15° nord, il y a 45 Ma (Lutétien).

4.4.1. EarthByte

- Nom du modèle : EarthByte
- Version : 1.0
- Fournisseur : University of Sidney
- Période temporelle couverte : 0 à 140 Ma (Crétacé + Cénozoïc)
- Zone géographique couverte : Monde
- Nombre de polygones : 1480
- Echelle chronostratigraphique de référence : DNAG 1999
- URL : http://www.earthbyte.org/Resources/earthbyte_plate_model_2009.html

Le Modèle EarthByte (Müller *et al.*, 1997, 2008) fourni en standard avec PaleoGIS est une version complète, qui couvre l'ensemble du globe pour le Crétacé et le Cénozoïque (0 à 140 Ma). Il est développé et distribué par l'équipe de Dietmar Müller, à l'université de Sidney. Ce modèle est aussi celui qui est fourni en standard avec le logiciel GPLates.

Le modèle EarthByte est basé essentiellement sur les anomalies magnétiques, les zones de fractures, la géométrie des limites de plaques (océaniques, continentales, et transitions crustales océan-continent) et de nombreux jeux de données géologiques. Le référentiel des déplacements est celui des points chauds, mobiles entre 0 et 100 Ma, puis fixe entre 100 et 140 Ma.

L'équipe de l'Université de Sidney travaille actuellement sur des améliorations du modèle, qui devraient notamment inclure :

- Une plus grande couverture temporelle (jusqu'à 200 Ma, au lieu de 140 dans la version actuelle)
- Des déplacements ayant pour référence la migration vraie des pôles (« true polar wander corrected paleomagnetic reference frame ») entre 100 et 200 Ma ;
- Des polygones pour modéliser les portions de croûte océanique subductées depuis 200 Ma ;
- Une réinterprétation des zones de fractures dérivées des dernières données de gravimétrie.

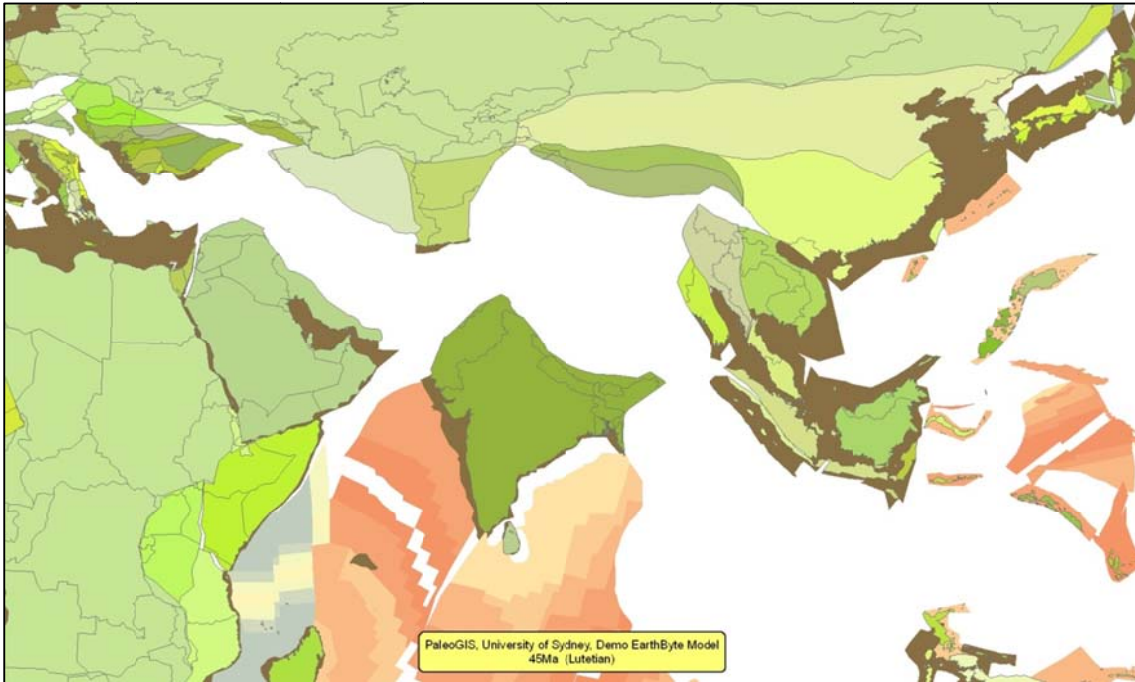


Figure 21 - Reconstruction de la convergence Inde-Asie, au Lutétien (45 Ma), avec le modèle EarthByte.

4.4.2. Fugro PlateWizard

- Nom du modèle : Demo Fugro PlateWizard
- Version : Demo version 1.0
- Fournisseur : Fugro Robertson Ltd.
- Période temporelle couverte : 0 à 65 Ma (Cénozoïque)
- Zone géographique couverte : Afrique, Moyen Orient, Inde, Océan Indien
- Nombre de polygones : 870
- Echelle chronostratigraphique de référence : DNAG 1999
- URL : <http://www.fugro-robertson.com/platewizard/paleogis/>

Le modèle PlateWizard, distribué par Fugro Robertson Ltd., est basé sur des données géophysiques, sismiques et structurales. Le référentiel des déplacements est celui des points chauds fixes.

Le modèle Demo PlateWizard fourni avec PaleoGIS est une portion, limitée dans le temps (0 à 65 Ma) et l'espace (zone Afrique-Moyen Orient-Océan Indien-Inde), du modèle PlateWizard distribué commercialement. La version complète de PlateWizard couvre l'ensemble du globe, du Trias à l'Actuel (0 à 250 Ma), et comprend plus de 5000 polygones rigides. En parallèle, Fugro Robertson Ltd. développe actuellement un modèle de plaques déformables sur les marges extensives atlantiques et sud-australiennes.

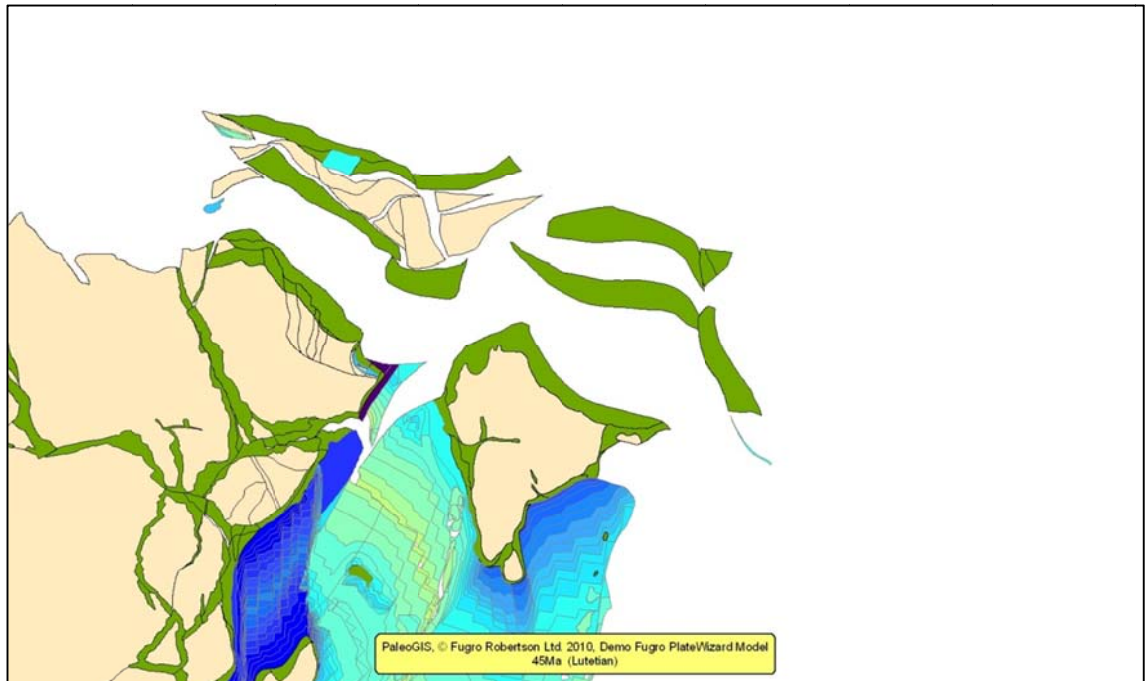


Figure 22 - Reconstruction de la convergence Inde-Asie, au Lutétien (45 Ma), avec le modèle Demo Fugro PlateWizard.

4.4.3. GETECH

- Nom du modèle : Demo GETECH
- Version : 1.0 (Iteration 1)
- Fournisseur : GETECH, Global Tectonics Project
- Période temporelle couverte : 0 à 80 Ma (Campanien à Actuel)
- Zone géographique couverte : Monde
- Nombre de polygones : 9987
- Echelle chronostratigraphique de référence : DNAG 1986
- URL : <http://www.getech.com/paleogis.htm>

Le modèle Demo GETECH est une version limitée du modèle GETECH Baseline Plate Model v.1, développé en 2009. Par rapport au modèle complet, distribué commercialement par GETECH, les limitations portent essentiellement sur la définition des plaques (simplifiée), la chronologie des rotations (dégradée au pas de 20 Ma et limitée à 80 Ma) et l'absence de hiérarchie des déplacements.

En plus de la géométrie des plaques, le modèle inclut une couche de données contenant, sous forme de polygones, les surfaces affleurantes de socle continental.

GETECH continue d'améliorer son modèle. L'objectif annoncé est de produire un modèle global couvrant l'ensemble du Phanérozoïque et la fin du Protérozoïque.

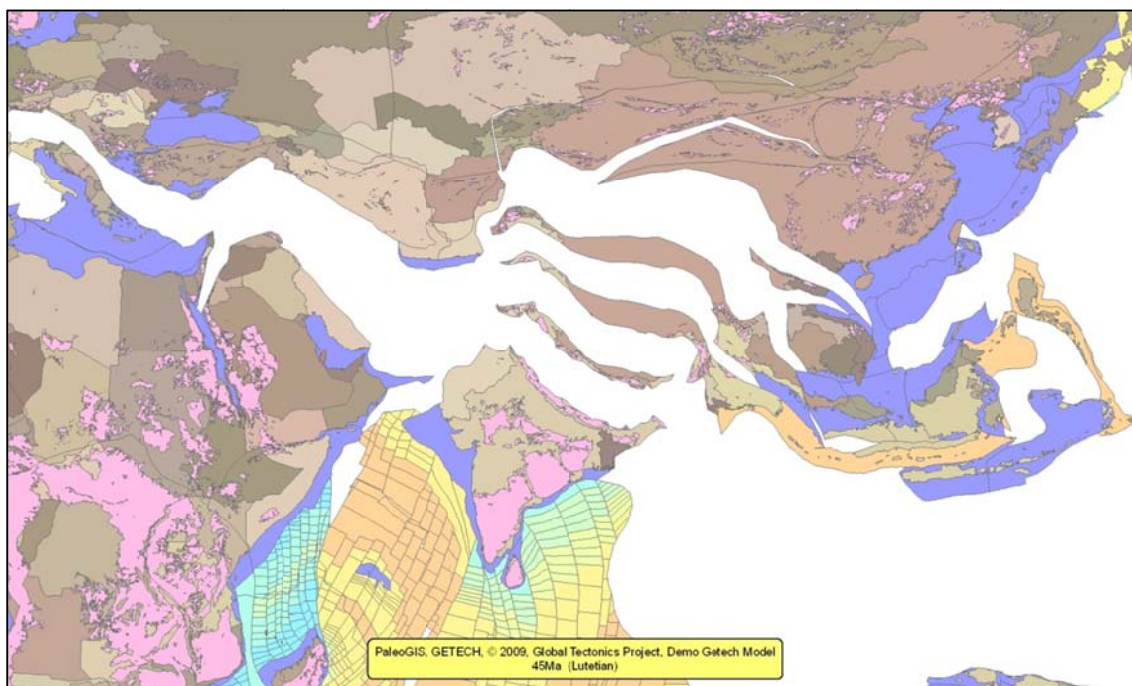


Figure 23 - Reconstruction de la convergence Inde-Asie, au Lutétien (45 Ma), avec le modèle Demo GETECH.

4.4.4. Scotese

- Nom du modèle : Demo Scotese
- Version : 1.0 (Iteration 1)
- Fournisseur : C. R. Scotese, PALEOMAP Project
- Période temporelle couverte : 0 à 50 Ma (Eocène à Actuel)
- Zone géographique couverte : Monde
- Nombre de polygones : 1171
- Echelle chronostratigraphique de référence : DNAG 1999
- URL : <http://www.scotese.com/>

Le modèle Demo Scotese est une version limitée dans sa couverture temporelle (0 à 50 Ma) du modèle développé par C.R. Scotese à l'Université du Texas à Arlington, dans le cadre du projet PaleoMap (e.g. Scotese & Golonka, 1992 ; Scotese, 1997). Le modèle complet est global, et couvre l'ensemble du Phanérozoïque et la fin du Protérozoïque (0 à 650 Ma).

Ce modèle a été largement valorisé par son auteur, notamment dans un but de reconstructions paléoclimatologiques (e.g. Scotese *et al.*, 1999), permettant de mettre en évidence la succession temporelle d'environnements climatiques et de leurs lithologies associées (bauxites, charbons, évaporites, ...). Il a aussi été utilisé à des fins de recherche en métallogénie sur la bordure nord-Pacifique (Scotese *et al.*, 2001).

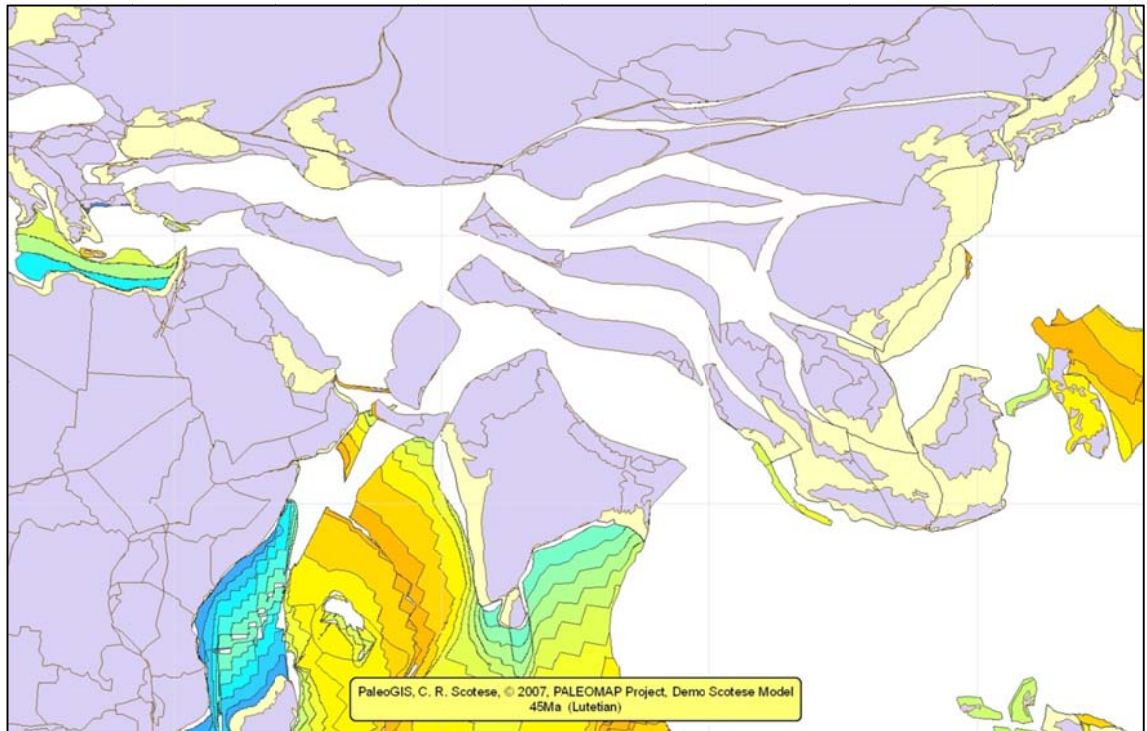


Figure 24 - Reconstruction de la convergence Inde-Asie, au Lutétien (45 Ma), avec le modèle Demo Scotese.

4.4.5. UTIG PLATES

- Nom du modèle : UTIG PLATES
- Version : 1.0 (Iteration 1)
- Fournisseur : University of Texas Institute for GeoPhysics, Austin
- Période temporelle couverte : 0 à 750 Ma (fin du Neoproterozoïc et Phanérozoïc)
- Zone géographique couverte : Monde
- Nombre de polygones : 502
- Echelle chronostratigraphique de référence : DNAG
- URL : http://www.ig.utexas.edu/research/projects/plates/plate_model/

Le modèle UTIG PLATES est développé par l'Institut de Géophysique de l'Université du Texas à Austin, dans le cadre du Projet PLATES, sous la direction de Lawrence Lawver et Ian Dalziel. Le projet PLATES, soutenu par un consortium de compagnies pétrolières et entièrement dédié à la recherche dans le domaine de la tectonique des plaques et des reconstructions paléogéographiques.

Le modèle UTIG PLATES, fourni en standard, avec PaleoGIS est la version complète. Il couvre l'ensemble du globe, depuis la fin du Protérozoïque jusqu'à l'Actuel (0 à 750 Ma).

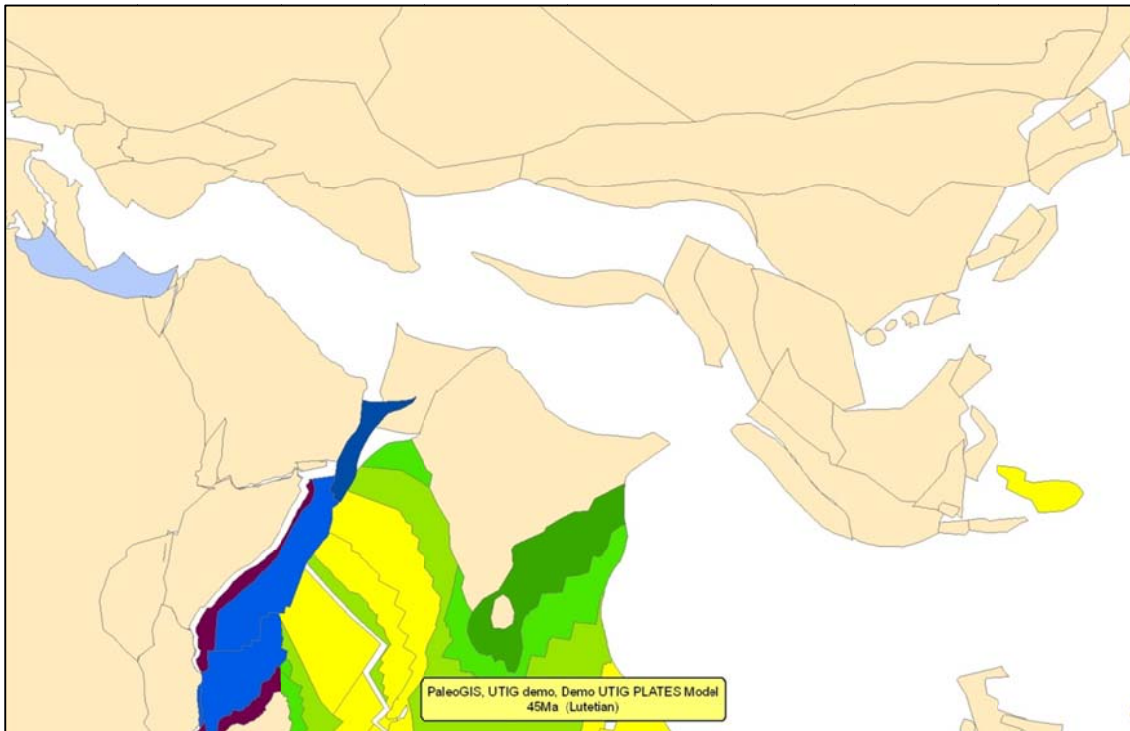


Figure 25 - Reconstruction de la convergence Inde-Asie, au Lutétien (45 Ma), avec le modèle UTIG PLATES.

4.4.6. Synthèse

Parmi les cinq modèles cinématiques fournis en standard avec PaleoGIS, trois sont des versions limitées de modèles distribués commercialement (Fugro PlateWizard, GETECH et Scotese). De par ces limitations - qu'elles concernent la couverture géographique du modèle (Fugro PlateWizard), sa couverture temporelle (Scotese et GETECH) ou sa résolution (GETECH) – ces trois modèles ne nous semblent pas appropriés pour effectuer des reconstructions crédibles dans le cadre de recherches en métallogénie (sauf exception, le modèle Scotese pourrait par exemple apporter des éclairages sur la mise en place des gisements épithermaux néogènes en Europe méridionale).

A l'inverse, les deux modèles cinématiques fournis dans leur version complète (EarthByte et UTIG PLATES) nous semblent appropriés pour être utilisés dans nos projets de recherche :

- Ce sont des produits académiques qui ont fait l'objet de publications scientifiques à comité de lecture (e.g. Müller *et al.*, 1997, 2008 ; Ghidella *et al.*, 2007 ; Mann *et al.*, 2007) et sont donc validés par la communauté scientifique internationale ;
- Ils couvrent l'ensemble du globe, sur des périodes de temps incluant de nombreuses époques métallogéniques.

Ainsi, pour étudier des processus minéralisateurs relativement récents, on préférera le modèle EartByte, qui nous semble plus détaillé mais ne couvre que le Crétacé et le Cénozoïque (en attendant une nouvelle version qui inclura aussi le Jurassique). Pour des processus plus anciens, on choisira le modèle UTIG PLATES, moins détaillé, mais qui remonte dans le temps jusqu'à la fin du Protérozoïque (Cryogénien).

Il faut noter toutefois que ces modèles sont globaux, et que leur pertinence régionale devra être évaluée au cas par cas. Pour des études plus détaillées, à l'échelle d'une ceinture orogénique par exemple, il sera nécessaire d'affiner le modèle (incorporation des domaines et structures tectoniques d'échelle régionale, si non déjà prises en compte dans le modèle global). C'est un travail long et rigoureux (compilation et synthèse de nombreuses données géologiques, géophysiques, cinématiques, ...), mais indispensable pour garantir la pertinence des conclusions dérivées des reconstructions paléogéographiques.

5. Etude des porphyres de la suture téthysienne occidentale

5.1. GENERALITES SUR LES PORPHYRES CUPRIFERES

Les porphyres cuprifères sont liés au magmatisme calco-alcalin des zones de subduction (série à magnétite). On les trouve aussi bien dans les arcs insulaires que dans les cordillères continentales. Ils sont associés aux batholites granitiques qui se mettent en place dans la croûte supérieure. Ces intrusions magmatiques résultent elles-mêmes d'un processus de fusion « en deux temps » dans les zones de subduction : 1) une fusion initiale provoquée par le plongement de la croûte océanique subductée, qui produit un magma mafique, chaud, puis 2) une seconde fusion, par injection de dykes et sills gabbroïques, dans la croûte profonde (zone MASH, pour « Melting Assimilation Storage Homogenization »), qui va produire des magmas hybrides (Figure 26).

Les porphyres minéralisés sont des gisements disséminés qui se mettent en place à faible profondeur. Ils se répartissent préférentiellement dans les zones en distension qui favorisent la migration des magmas (segments de faille en transtension par exemple). Ils apparaissent généralement sous forme de petites intrusions (de l'ordre de 0,5 à 2 km de diamètre) polyphasées emboîtées. Les teneurs y sont généralement assez faibles, mais les tonnages peuvent être considérables, ce qui en fait parfois de très gros gisements (e.g. Bajo de la Alumbrera en Argentine, Chuquicamata, La Escondida ou El Teniente - entre autres - au Chili, Bingham aux Etats-Unis, ou Grasberg en Indonésie).

Les granites porphyriques se mettent en place à des températures de 750 à 850°C et à des profondeurs de 1 à 4 km environ. Les porphyres se développent à l'apex du batholite. Ils peuvent être accompagnés de filons pegmatitiques et/ou de gisements épithermaux en surface. Les minéralisations se présentent sous forme de stockworks, de filonnets, de disséminations ou de pipes bréchiques.

La minéralisation et les altérations hydrothermales présentent généralement une zonalité, grossièrement concentrique, avec :

- une zone interne, à altération potassique, avec biotite et orthose hydrothermaux et quartz néoformé, en veinules et disséminations ; la zone minéralisée (« ore shell », ou « coque minéralisée ») cuprifère à pyrite, chalcopirite, bornite et magnétite (avec parfois molybdénite) forme une enveloppe cylindrique autour de cette zone interne potassique ;
- une zone intermédiaire phylliteuse ou argileuse, à séricite, illite (et autres minéraux argileux), quartz et pyrite ;
- une zone périphérique, souvent largement développée, à quartz, épidote, chlorite, carbonates, kaolinite et montmorillonite.

Cette géométrie concentrique est parfois entourée d'un réseau de filons à plomb, manganèse et argent.

Pour plus d'information sur la métallogénie des porphyres, nous renvoyons le lecteur aux nombreuses synthèses qui existent sur le sujet (e.g. Richards, 2003 ; Jébrak et Marcoux, 2008).

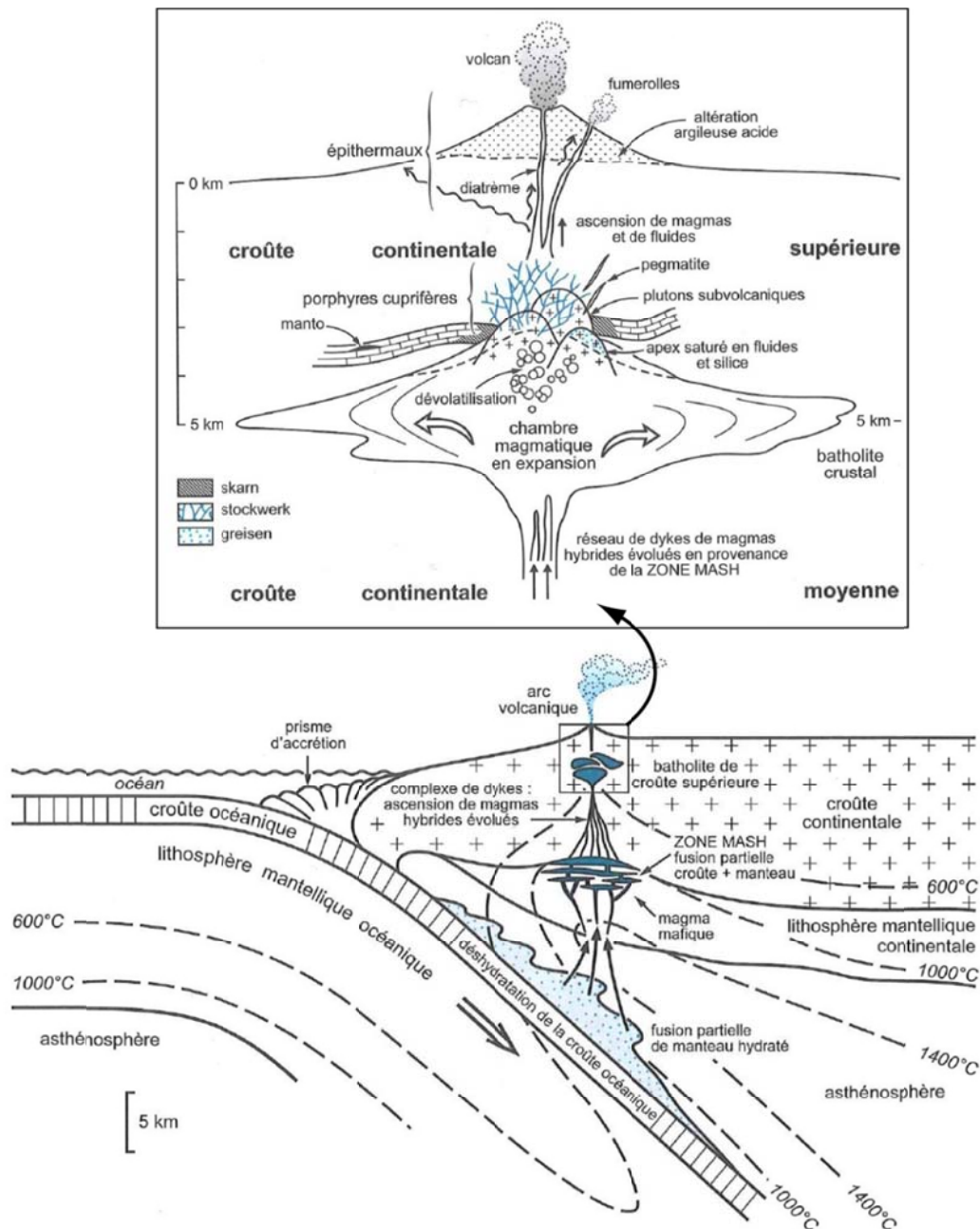


Figure 26 - Modèle de genèse des magmas en zone de subduction et des porphyres cuprifères dans les batholites de la croûte supérieure, modifié d'après Jébrak et Marcoux (2008)

5.2. MISE EN PLACE DES PORPHYRES DE LA SUTURE TETHYSIENNE OCCIDENTALE

5.2.1. Données utilisées

Une base de données des gisements² de type porphyres en Europe et Asie a été constituée. Les données utilisées sont celles des bases de données suivantes :

- La base ProMine (BRGM et partenaires) pour l'Europe (Cassard *et al.*, soumis)
- La base Caucase (BRGM) pour le proche et moyen Orient
- La base «Porphyry Copper Deposits of the World » (USGS) pour l'Europe, le proche et le moyen Orient (Singer *et al.*, 2008)

Ces données ont été complétées, notamment pour les âges des minéralisations, par des données bibliographiques complémentaires (Serafimovski, 2000 ; Volkov *et al.*, 2008 ; Voudouris *et al.*, 2009 ; Yigit, 2009).

Cette base de données contient 239 porphyres, d'âge Pliocène à Mésoarchéen. 26 étaient d'âge inconnu. Une extraction a été réalisée, sur les critères suivants :

- 0 Ma < âge de la minéralisation ≤ 145,5 Ma
- 15° ≤ longitude du porphyre ≤ 75°

Ainsi seuls les porphyres de la suture Téthysienne, mis en place durant le Crétacé et le Cénozoïque ont été retenus. Ils sont au nombre de 116 (voir Annexe 1), parmi lesquels 114 (*i.e.* la quasi-totalité) ont un contenu connu en cuivre, 43 en molybdène et 9 en rhénium.

Par ailleurs, des séries de reconstructions paléogéographiques ont été réalisées avec les modèles UTIG PLATES et EarthByte (tous deux disponibles en versions complètes, et couvrant des périodes de temps appropriées à l'étude), afin de tester leur cohérence régionale sur la zone d'étude. Il est apparu que certaines plaques du modèle EarthByte avaient un comportement anormal (recouvrement non justifié, notamment). Le modèle UTIG PLATES a donc été privilégié pour effectuer les reconstructions paléogéographiques dans la suite de cette étude.

5.2.2. Répartition temporelle et spatiale des gisements

Afin d'étudier la répartition chronostratigraphique des porphyres le long de la suture téthysienne occidentale, nous avons reporté sur la Figure 27 le nombre de gisements par époque stratigraphique, depuis le Crétacé inférieur jusqu'au Plio-Pléistocène. La

² Le terme « gisement » est utilisé ici au sens large, *i.e.* sans connotation économique restrictive, pour désigner une concentration minéralisée

durée des époques stratigraphiques étant variable, nous avons normalisé ces données en calculant, pour chaque époque stratigraphique, un nombre moyen de gisements par unité de temps (Figure 28). Afin de raffiner cette représentation, nous avons, de même, reporté sur la Figure 29, le nombre de gisements par « tranche temporelle » arbitraire de 10 Ma, depuis le Crétacé inférieur jusqu'au Plio-Pléistocène (140 à 0 Ma). Les âges utilisés sont ceux de la minéralisation, que nous considérons au premier ordre comme étant ceux de la mise en place des porphyres. Il convient de garder à l'esprit que certains peuvent être entachés d'erreurs significatives, notamment pour les minéralisations ne disposant pas de datations absolues mais uniquement relatives (par exemple, les gisements d'âge Miocène, sans plus de précision, ont été datés arbitrairement à 14,0 Ma, soit l'âge médian de l'époque stratigraphique).

Dans chacun des trois diagrammes (Figure 27 à Figure 29), nous avons distingué 4 catégories, qui sont :

- L'ensemble des gisements de type porphyre de la bordure téthysienne occidentale qui composent notre jeu de données (« All deposits », 116 gisements) ;
- Les gisements ayant un contenu connu en cuivre (« Cu-bearing deposits », 114 gisements) ; cette catégorie est quasi-identique à la précédente puisque seuls deux gisements d'âge Crétacé sup. n'ont pas un contenu explicite en cuivre ;
- Les gisements ayant un contenu en molybdène (« Mo-bearing deposits », 43 gisements) ;
- Les gisements ayant un contenu en rhénium (« Re-bearing deposits », 9 gisements).

Les trois dernières catégories sont des fractions de la première. Un même gisement peut, selon les données qui le renseignent, appartenir à plusieurs de ces catégories, voire à toutes.

La Figure 28 montre une forte activité dans la mise en place des porphyres depuis le Crétacé sup. jusqu'au Miocène inclus. Cette apparente continuité n'est pas nécessairement le fait d'un événement unique, mais peut résulter de la succession de plusieurs événements. La Figure 29, qui propose une meilleure résolution temporelle montre en effet, un pic d'activité au Crétacé terminal-Paléocène, suivi d'une période de faible activité, puis d'une reprise progressive de l'activité à partir de l'Eocène sup. jusqu'à son maximum au Miocène (10 à 20 Ma, *i.e.* Burdigalien à Serravalien).

On note que c'est dans le groupe dont les mises en place s'étagent du Crétacé terminal au paléocène inf. (Coniacien à Danien) que l'on retrouve la plus forte proportion de gisements contenant du molybdène et/ou du rhénium. Même si cette observation doit être pondérée par le fait que le nombre de gisements est trop faible pour avoir une valeur statistique, cette période semble plus favorable à la genèse de gisements porphyriques à Mo/Re.

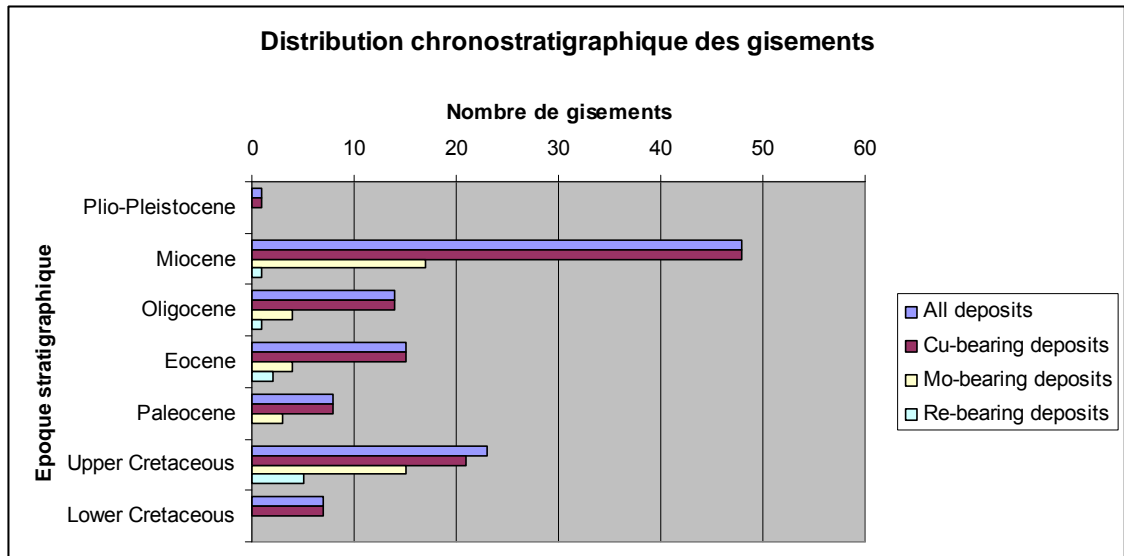


Figure 27 - Distribution chronostratigraphique des porphyres le long de la bordure téthysienne occidentale, depuis le Crétacé inf. jusqu'au Plio-Pléistocène

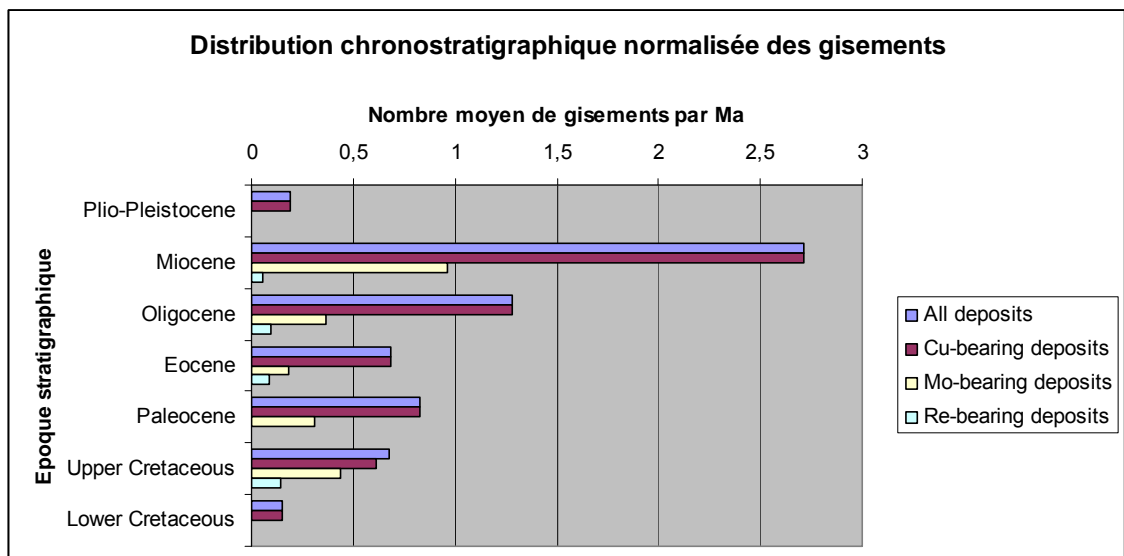


Figure 28 - Distribution chronostratigraphique normalisée des porphyres le long de la bordure téthysienne occidentale, depuis le Crétacé inf. jusqu'au Plio-Pléistocène, moyennée par unité de temps (Ma)

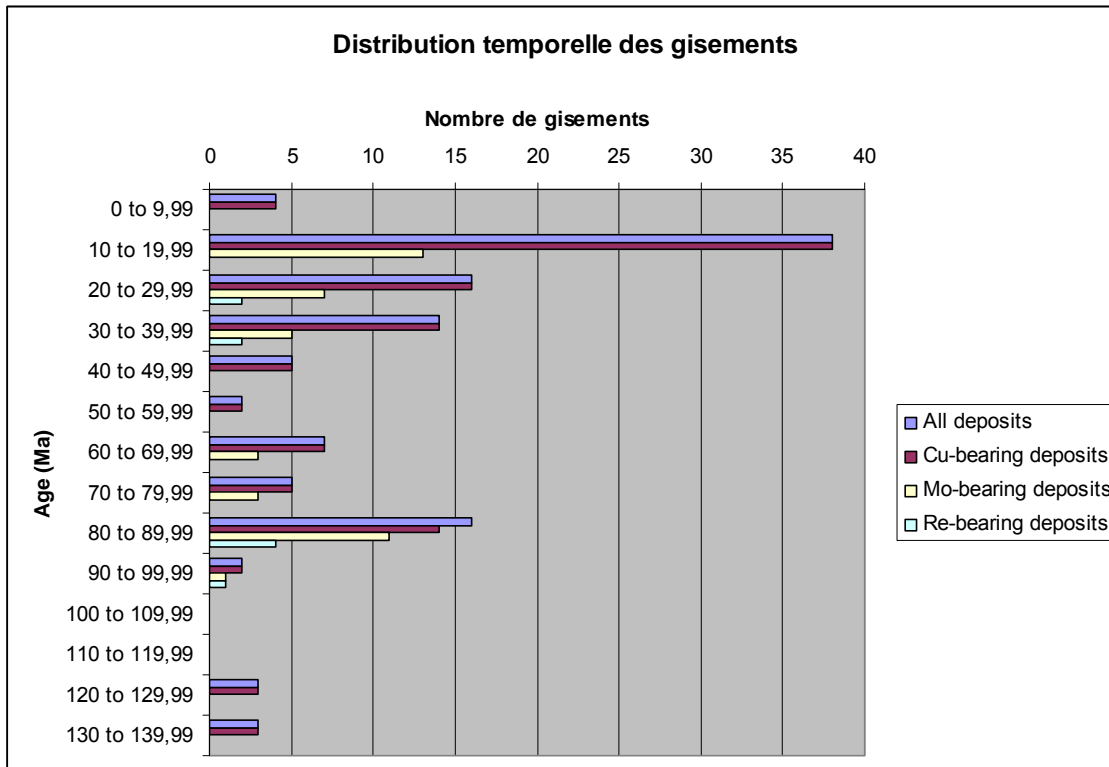


Figure 29 - Distribution temporelle des porphyres le long de la bordure téthysienne occidentale, depuis le Crétacé inf. jusqu'au Plio-Pléistocène, par période arbitraire de 10 Ma

Les 116 gisements étudiés ont été reportés sur un diagramme d'âge en fonction de la longitude (Figure 30), afin de mettre en évidence les périodes et les segments de la suture Téthysienne ayant été le siège d'une forte activité. De fait, on distingue, sur la Figure 30, plusieurs clusters montrant que la mise en place des porphyres le long de la suture téthysienne se concentre non seulement sur des périodes favorables, comme vu précédemment, mais aussi sur des segments géographiques distincts. Ces cinq clusters sont, du plus ancien au plus récent :

1. Les gisements « anciens » des Pontides orientales (Arménie et Azerbaïdjan), mis en place durant la première moitié du Crétacé inf. (5 gisements);
2. Les gisements de la zone Balkans-Carpathes (Bulgarie, Serbie, Roumanie), mis en place au Crétacé sup. et Paléocène (29 gisements);
3. Les gisements de la zone Turquie orientale-Caucase (Géorgie, Arménie, Azerbaïdjan, Iran oriental), mis en place principalement durant l'Eocène (11 gisements);
4. Les gisements de la zone Egée-Balkans-Carpathes (Egée, Grèce, Macédoine, Serbie, Roumanie, Slovaquie), mis en place durant l'Oligocène et le Miocène (47 gisements);
5. Les gisements de la zone moyen-orientale (Iran, Afghanistan, Pakistan), mis en place principalement durant le Miocène (19 gisements).

A noter que c'est parmi les porphyres crétacé sup-paléocènes de la zone Balkans-Carpathes (second cluster) que l'on retrouve la plus forte proportion de minéralisations à Mo/Re. Les cinq clusters identifiés sont aussi identifiables cartographiquement, comme le montre la Figure 31.

Les clusters 2 et 4 étant mieux échantillonnés (29 et 47 gisements, respectivement) que les 1, 3 et 5 (5, 11 et 19 gisements, respectivement), c'est sur eux que nous focaliserons la suite de cette étude. Nous étudierons les conditions de leur mise en place à l'aide de l'approche paléogéographique présentée dans la suite de ce rapport.

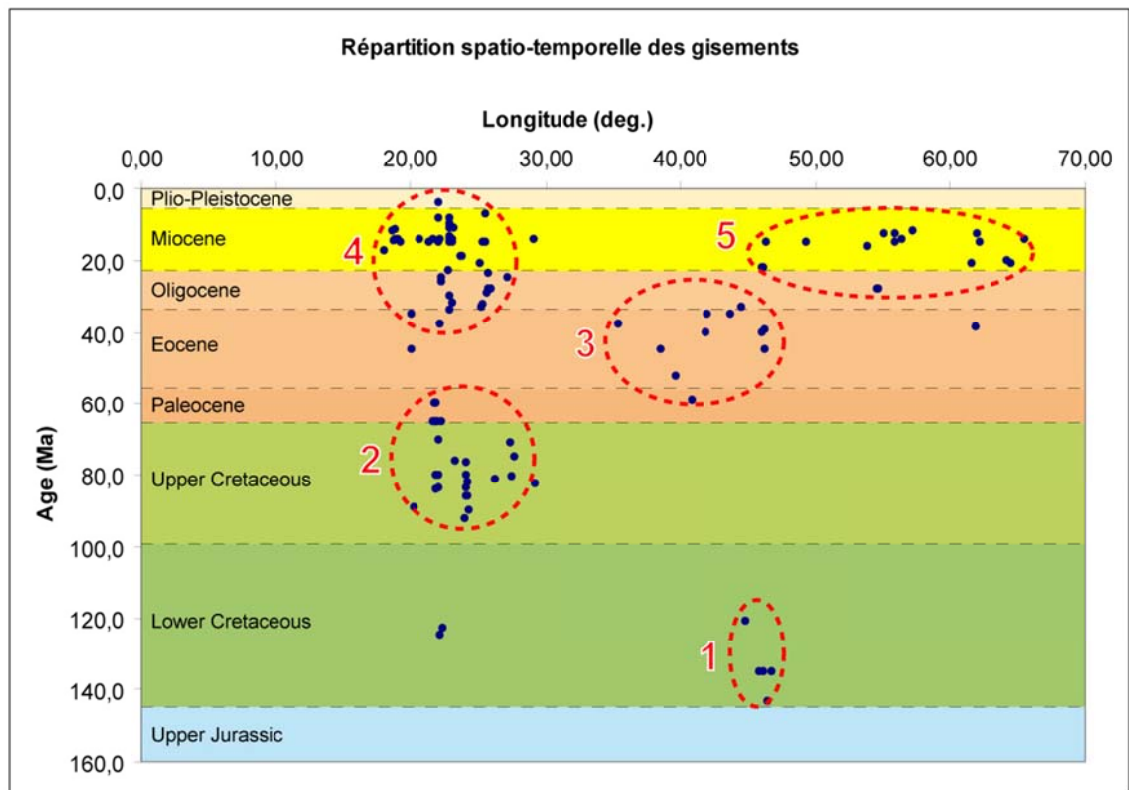


Figure 30 - Répartition spatio-temporelle de la mise en place des porphyres le long de la suture téthysienne occidentale

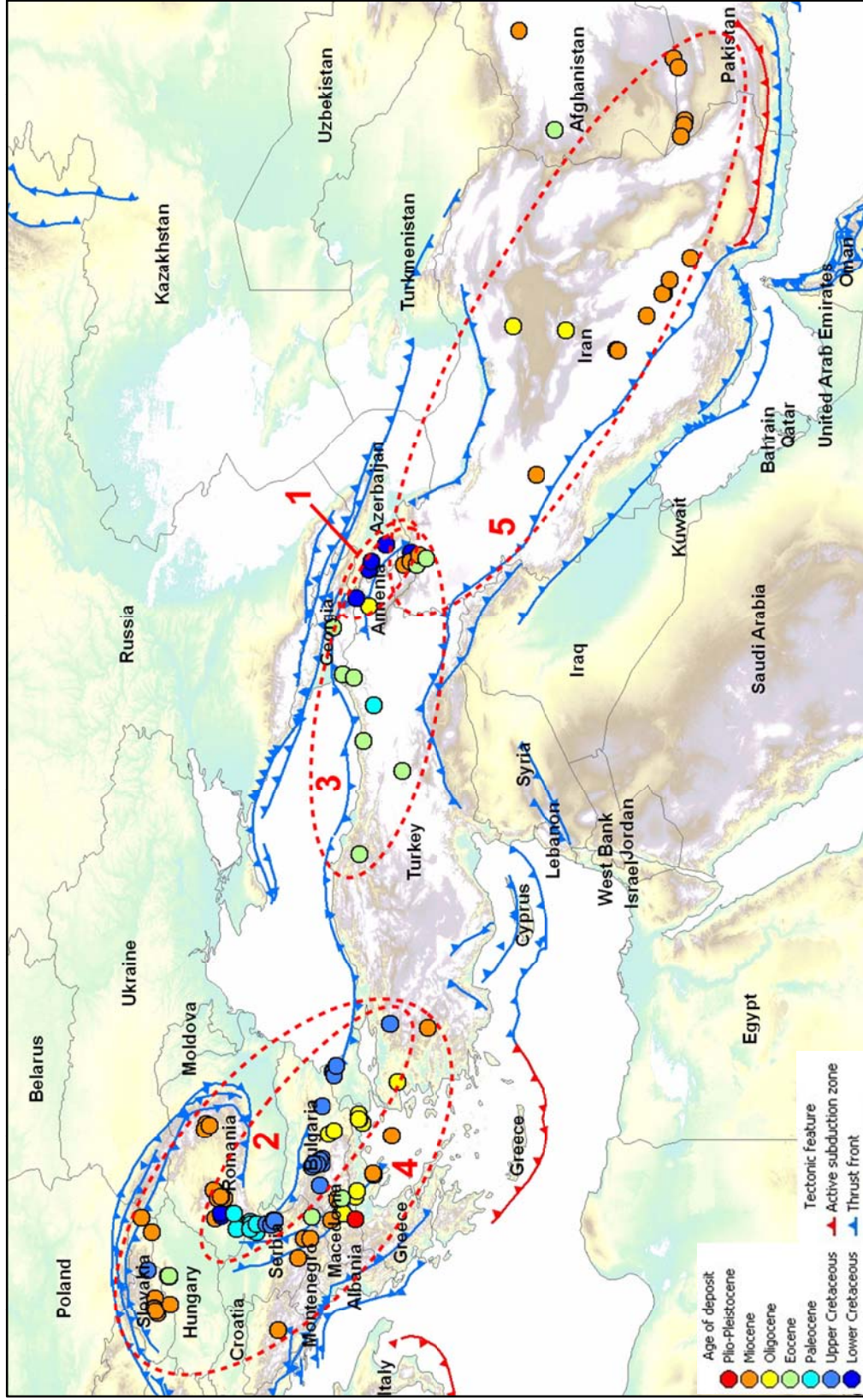


Figure 31 - Répartition cartographique des porphyres de la suture téthysienne et identification des phases majeures de mise en place.

5.2.3. Reconstructions paléogéographiques

Afin de mieux comprendre la mise en place des porphyres cuprifères des clusters 2 et 4, identifiés précédemment, nous avons réalisé une série de reconstructions paléogéographiques centrées sur la zone Egée-Balkans (centrées sur le point de coordonnées 26°E/34°N et à l'échelle écran de 1/20 000 000), à l'aide du modèle UTIG PLATES. Au total, cinq reconstructions ont été réalisées (Figure 32 à Figure 36) :

- Hauterivien (130 Ma)
- Turonien (90 Ma)
- Thanétien (60 Ma)
- Chattien (30 Ma)
- Serravallien (15 Ma)

Les champs de vitesses instantanées ont été ajoutés aux reconstructions, afin de mieux visualiser les déplacements relatifs des plaques. La référence est l'Eurasie supposée fixe. Les principales structures tectoniques ont été sommairement redessinées. Ces reconstructions sont contraintes par le modèle cinématique lui-même (UTIG PLATES), qu'il conviendrait de réviser, afin d'en améliorer la précision.

A l'Hauterivien (130 Ma, Figure 32), de nombreux blocs continentaux, issus de la disclocation de la Pangée, migrent vers le nord. Ils séparent des domaines océaniques, telles que l'océan Vardar qui subducte sous la marge Eurasiatique. Plus au sud, deux autres océans, le Pinde et la NéoTéthys, sont en expansion.

Au Turonien (90 Ma, Figure 33), la subduction de l'océan Vardar se termine, tandis que la NéoTéthys poursuit son expansion.

Au Thanétien (60 Ma, Figure 34), l'expansion de la néoTéthys cesse. La convergence vers le nord de l'Afrique entraîne la subduction vers le nord du Pinde, ce qui entraîne l'accrétion du bloc Menderes (Turquie-Egée) à la marge Eurasiatique. La vitesse relative de l'Afrique par rapport à l'Eurasie s'en trouve sensiblement réduite. C'est dans ce contexte que se mettent en place les porphyres du cluster 2.

Au Chattien (30 Ma, Figure 35), l'océan Pinde a été totalement subducté. La zone de subduction migre vers le sud. Plus à l'ouest, les Alpes entrent en collision, suite à la fermeture de l'océan Valaisan.

Au Serravallien (15 Ma, Figure 36), la subduction continue sa migration vers le sud. La plaque Arabie est entrée en collision, avec pour effet de réduire significativement sa vitesse de convergence. Les vitesses de convergence Apulie-Eurasie et Afrique-Eurasie sont aussi significativement réduites. C'est dans ce contexte que se mettent en place les porphyres du cluster 4, dans la zone Egée-Balkans.

Ces reconstructions montrent que les porphyres cuprifères de la zone Egée-Balkans-Carpathes semblent s'être mis en place durant des périodes de ralentissement de la

subduction, consécutif à un épisode d'accrétion ou de collision. Ce point sera précisé dans le chapitre suivant, qui précisera la cinématique de la convergence.

Ces reconstructions montrent aussi que le modèle cinématique utilisé manque de précision pour mener une étude à l'échelle régionale. Notamment, les blocs continentaux issus de la dislocation de la Pangée et les domaines océaniques (Vardar, Pinde, Valaisan, etc...) sont mal définis. De ce fait, il n'est pas possible de contraindre précisément la chronologie et la géométrie de la fermeture de ces domaines océaniques et de l'accrétion de ces blocs continentaux, qui sont pourtant critiques pour retracer en détail l'évolution des zones de subduction et du magmatisme associé, responsable de la mise en place des porphyres.

Il conviendra donc, dans la suite de ce travail, de raffiner le modèle cinématique en y intégrant des données plus récentes et/ou détaillées, telles que, par exemple, les données cinématiques et paléogéographiques du programme Péri-Téthys (Dercourt *et al.*, 2000), et les données des études régionales sur l'évolution géodynamique du domaine Egée-Méditerranée (e.g ; Jolivet & Faccenna, 2000 ; Jolivet & Brun, 2010 ; Carry, 2010). C'est un travail long et complexe, qui nécessitera une importante phase de recherche bibliographique et de compilation/synthèse de données. Il est cependant indispensable, car l'approche paléogéographique n'est pertinente que si elle repose sur un modèle cinématique détaillé et fiable à l'échelle de l'étude.

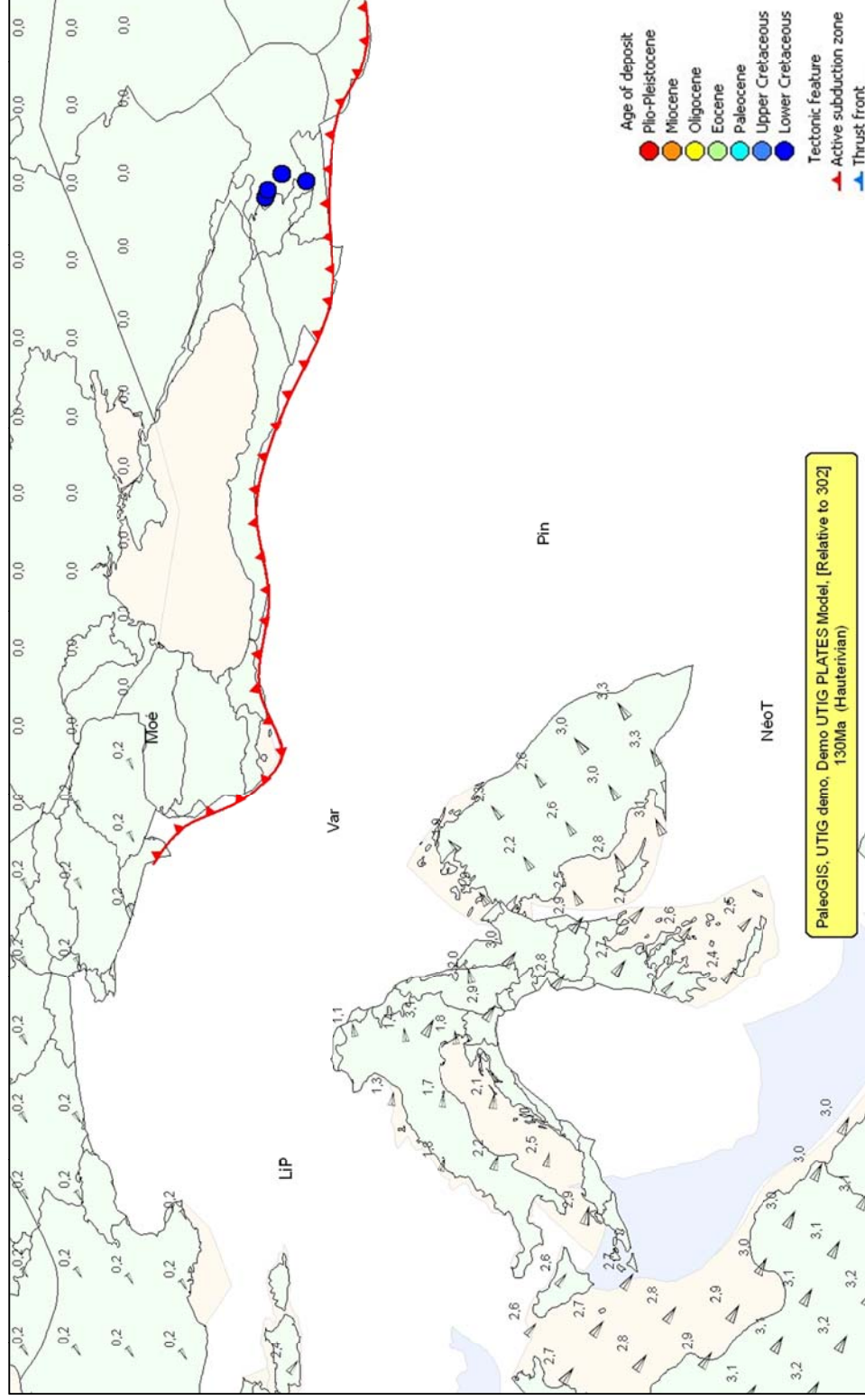


Figure 32 - Reconstruction paléogéographique de la convergence Afrique-Eurasie à l'Hauterivien (130 Ma), et champs de vitesses instantanées par rapport à l'Eurasie fixe (modèle UTIG PLATES) ; LIP = Liguro-Piémontais, Moé = Moésie, NéoT = Néo-Téthys, Pin = Pinde, Var = Vardar.

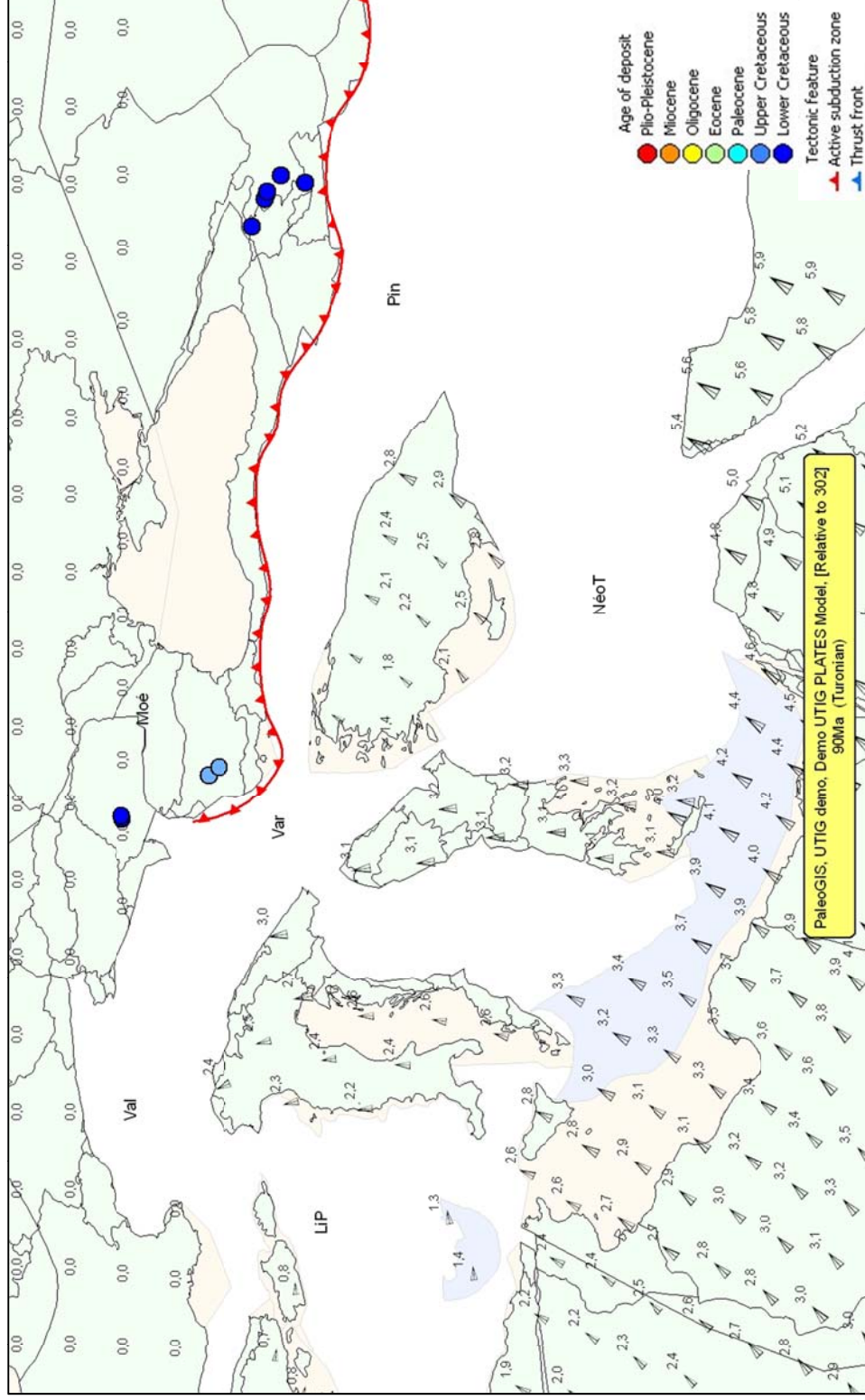


Figure 33 - Reconstruction paléogéographique de la convergence Afrique-Eurasie au Turonien (90 Ma), et champs de vitesses instantanées par rapport à l'Eurasie fixe (modèle UTIG PLATES) ; LIP = Liguro-Piémontais, Moé = Moésie, NéoT = Néo-Téthys, PIn = Pinde, Val = Valaisan, Var = Vardar.

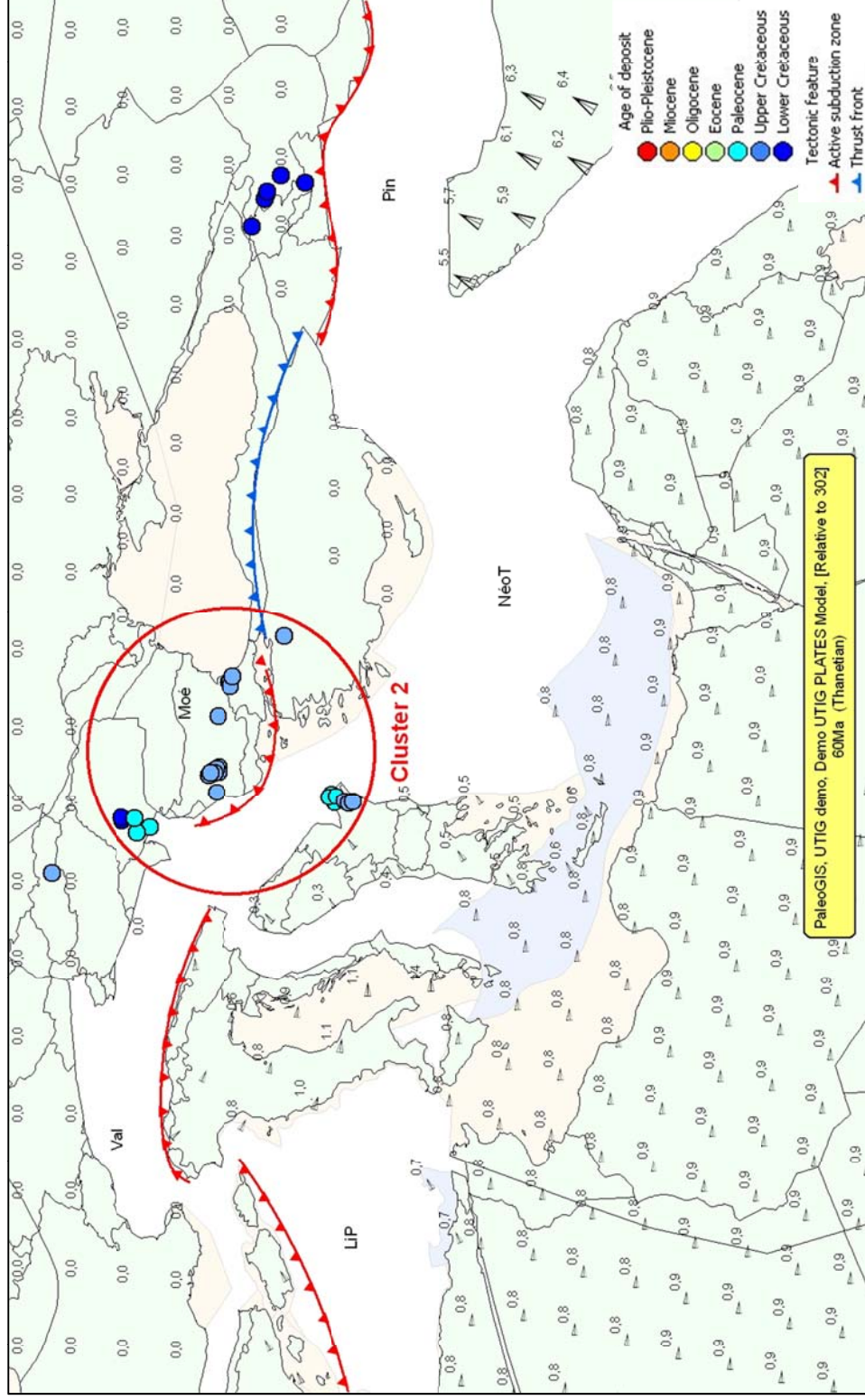


Figure 34 - Reconstruction paléogéographique de la convergence Afrique-Eurasie au Thanétien (60 Ma), et champs de vitesses instantanées par rapport à l'Eurasie fixe (modèle UTIG PLATES) ; LIP = Liguro-Piémontais, Moé = Moésie, Néot = Néo-Téthys, Pin = Pinde, Val = Valaisan.

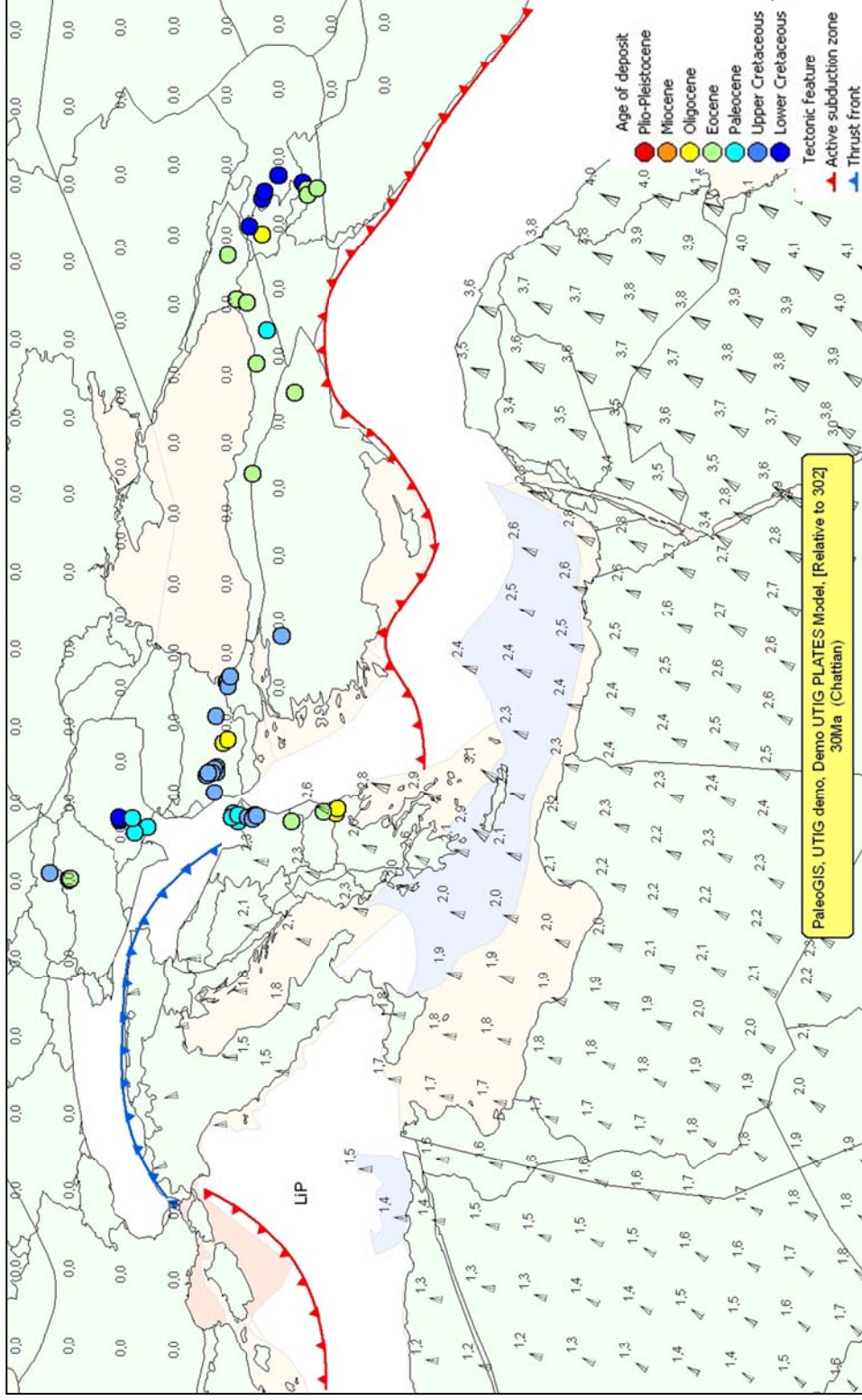


Figure 35 - Reconstruction paléogéographique de la convergence Afrique-Eurasie au Chattien (30 Ma), et champs de vitesses instantanées par rapport à l'Eurasie fixe (modèle UTIG PLATES) ; LiP = Liguro-Piémontais.

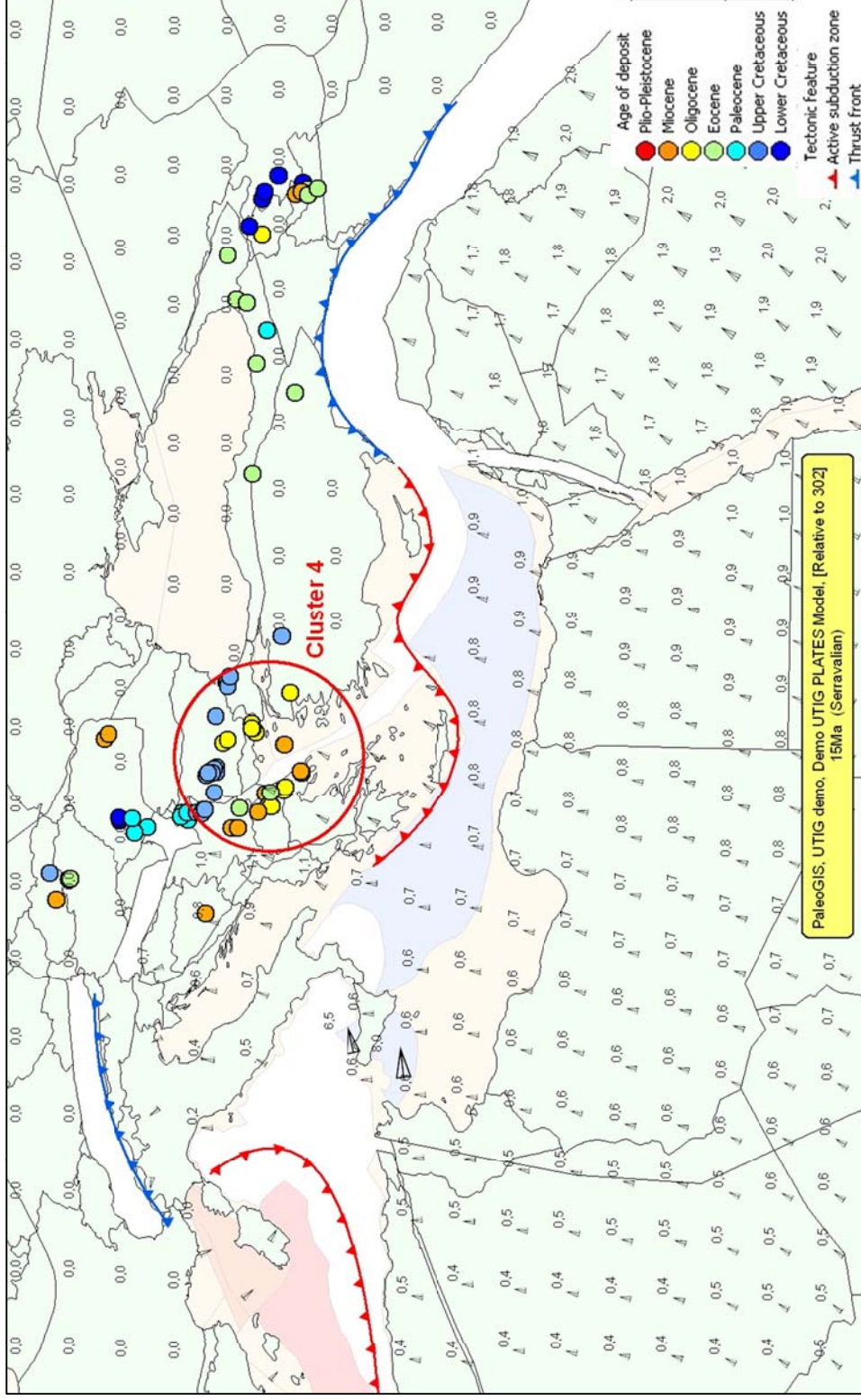


Figure 36 - Reconstruction paléogéographique de la convergence Afrique-Eurasie au Serravallien (15 Ma), et champs de vitesses instantanées par rapport à l'Eurasie fixe (modèle UTIG PLATES).

5.2.4. Approche cinématique

Afin de tester la possible influence des variations de la vitesse de convergence des plaques sur la mise en place des minéralisations porphyriques, nous avons reporté sur les diagrammes ci-dessous les vitesses en fonction du temps de points choisis le long de la suture téthysienne de manière à coïncider en longitude avec les clusters identifiés précédemment. Les fourchettes de temps correspondant aux clusters ont été portées sur les graphiques.

La Figure 37 montre les variations de vitesse de convergence de la bordure nord de la plaque Afrique par rapport à l'Eurasie supposée fixe, calculées d'après les modèles cinématiques UTIG PLATES et EarthByte, afin de tester une possible corrélation avec la mise en place des porphyres des clusters 2 et 4 (zone Egée-Balkans-Carpathes au Crétacé sup.-Paléocène et à l'Oligo-Miocène, respectivement). Elle montre que les deux clusters se mettent en place dans un contexte cinématique identique de vitesse de convergence décroissante :

- De 1,5 cm/an décroissant à 0,5 cm/an environ dans le cas du cluster 2 ;
- De 1 cm/an décroissant à 0,4 cm/an environ dans le cas du cluster 4.

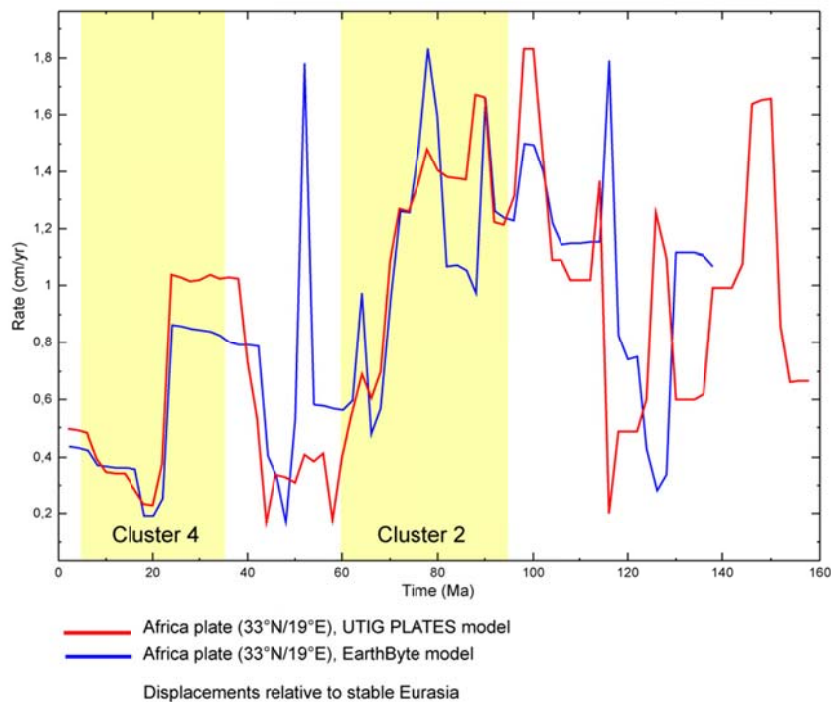


Figure 37 - Courbes de vitesse de la bordure nord de la plaque Afrique, par rapport à l'Eurasie supposée fixe.

En considérant les variations de convergence de la bordure NE de la plaque Vardar-Pélagonia par rapport à l'Eurasie supposée fixe (Figure 38), on observe un contexte

cinématique identique pour la mise en place des clusters 2 et 4, avec des vitesses similaires :

- De 1,4 cm/an décroissant à 0,6 cm/an environ dans le cas du cluster 2 ;
- De 1,2 cm/an décroissant à 0,5 cm/an environ dans le cas du cluster 4.

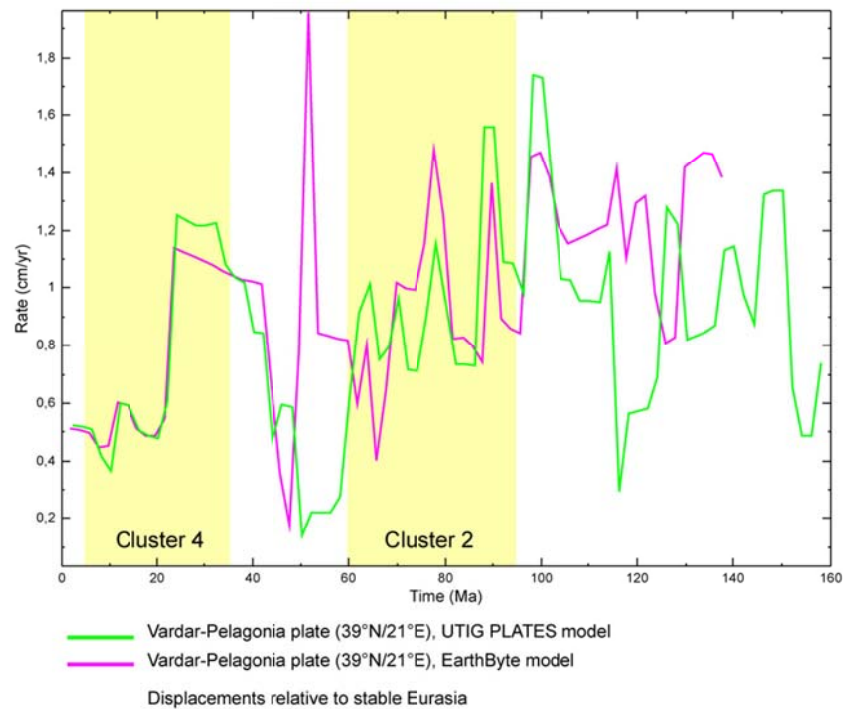


Figure 38 - Courbes de vitesse de la bordure nord-est de la plaque Vardar-Pélagonia, par rapport à l'Eurasie supposée fixe.

La Figure 39 est une représentation « cartographique » du même phénomène. Elle présente la trajectoire et la vitesse de deux points de la bordure nord de la plaque Afrique par rapport à l'Eurasie fixe.

Notons aussi qu'il n'a pas été possible de mettre en évidence un contexte cinématique similaire pour la mise en place des clusters 1, 3 et 5. Ceci peut être du non seulement au faible échantillonnage de ces clusters (5 à 19 gisements), mais aussi à la mauvaise résolution des modèle cinématiques (mouvements de l'Arabie par rapport à l'Eurasie et à l'Iran). Néanmoins, il conviendra, dans la suite de ce travail, de tester plus en détail la reproductibilité (ou non reproductibilité) des observations et d'en identifier, le cas échéant, les causes (géométrie et/ou dynamique de la subduction, lignes magmatiques associées,...). Dans ce but, il sera souhaitable d'étendre l'étude à d'autres zones géographiques où se sont mis en place des porphyres minéralisés (cordillère des Andes, Amérique du nord, Asie du sud-est, autres clusters de porphyres minéralisés de la suture thétysienne, ...).

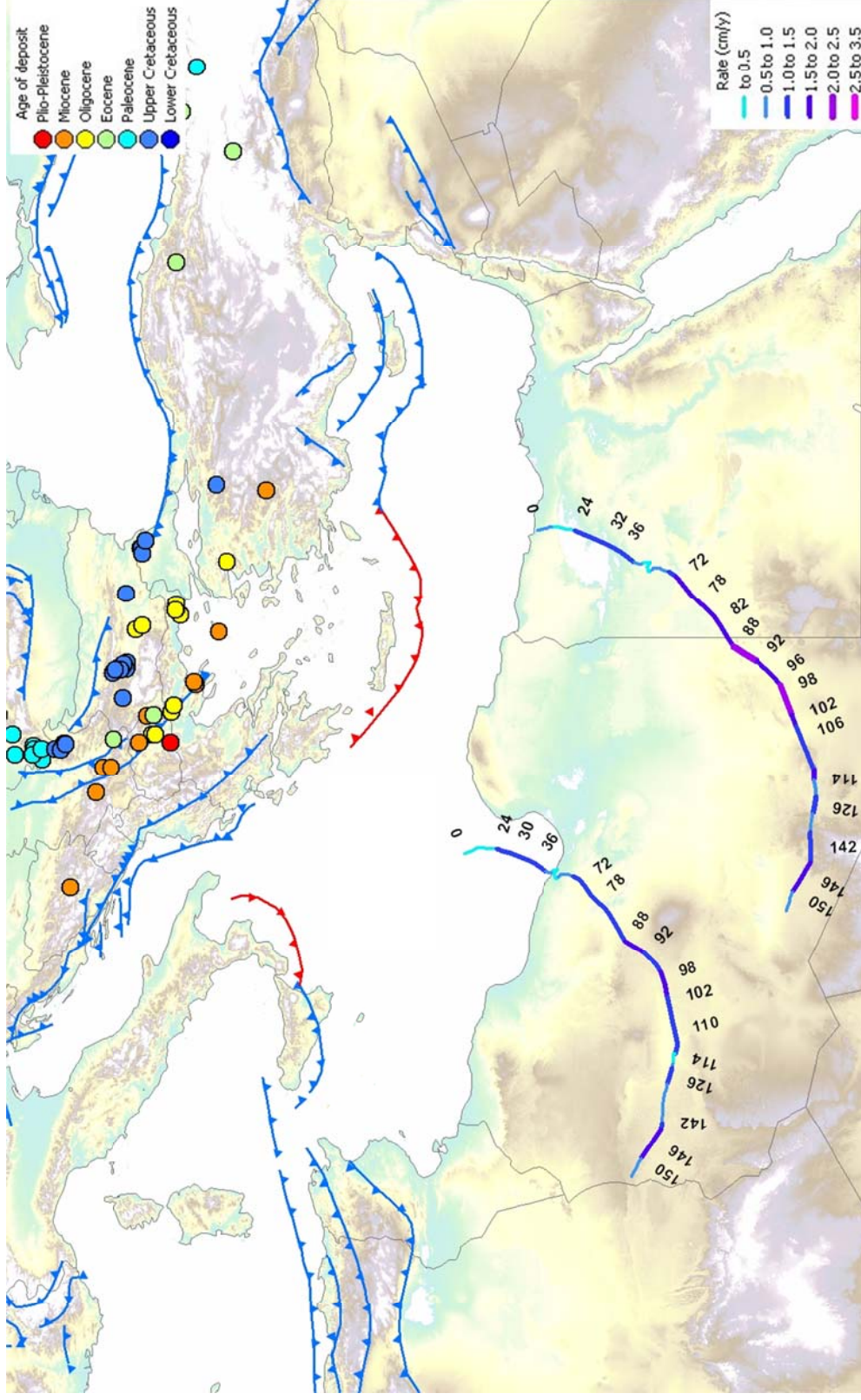


Figure 39 - Trajectoires et vitesses, entre 160 et 0 Ma, de deux points des bordures nord de la plaque Afrique, par rapport à l'Eurasie fixe, calculées d'après le modèle UTIG PLATES (les chiffres portés en bordure des trajectoires sont les âges en Ma)

Compte tenu de l'inertie du système (de l'ordre de 12 Ma pour la durée combinée des systèmes magmatiques et hydrothermaux, d'après Jébrak & Marcoux, 2008), l'initiation de la mise en place des clusters 2 et 4 intervient peu de temps après un pic de vitesse de convergence des plaques. Ce point, s'il venait à être confirmé, viendrait étayer la théorie de Tatsumi & Eggins (1995) qui propose qu'une vitesse de subduction plus rapide génère une fusion plus importante dans le biseau mantellique. Par ailleurs, le ralentissement successif de la vitesse de convergence peut provoquer un retrait du slab (e.g. Schellart, 2005) et générer un régime de contrainte extensif, favorable à la mise en place des plutons dans la croûte supérieure de la plaque chevauchante. Un tel régime de contrainte est mis en évidence, par exemple, par une extension marquée en mer Egée et dans le bassin Panonien autours de la transition entre l'Oligocène et le Miocène (Jolivet & Faccenna, 2000). Ainsi, la mise en place des clusters 2 et 4 coïncide, dans le temps et l'espace, avec des épisodes extensifs qui affectent respectivement la plate-forme Moésienne au Crétacé sup. et la zone Balkans-Rhodopes à l'Oligo-Miocène (Jolivet et Brun, 2010 ; Figure 40).

A partir de ces observations, on peut proposer que le contexte géodynamique polyphasé suivant soit favorable à la mise en place des porphyres cuprifères :

- Dans un premier temps, une vitesse de subduction élevée, favorisant la fusion dans le biseau mantellique ;
- Puis, dans un second temps, un ralentissement de la subduction, favorisant son retrait et un régime extensif, sur la plaque chevauchante, favorable à la mise en place des systèmes magmato-plutoniques.

Fort de cette observation, il sera souhaitable, dans la suite de ce travail, de mieux comprendre ce contexte cinématique et l'influence respective de chacune de ses composantes (est-ce la vitesse élevée de subduction qui importe ? ou le ralentissement ? ou les deux ? dans quelles proportions respectives, et pourquoi ?). Pour cela, il conviendra notamment de préciser la chronologie de mise en place des porphyres (âge des pics de minéralisation), mais aussi d'étudier plus en détail la dynamique de la subduction (vitesse, retrait, rigidité des plaques, etc ...). Ainsi, si les observations présentées ci-dessus tendent à confirmer l'influence de la cinématique de la subduction sur la mise en place des porphyres, il conviendra de les confirmer et de les expliquer dans les suites à donner à ce travail.

De manière générale, on notera que les données cinématiques du modèle EarthByte sont plus « bruitées » que celles du modèle UTIG PLATES, puisqu'elles présentent des pics de forte amplitude que la tectonique ne peut pas justifier. On notera aussi que l'étude se heurte ici à la limite de résolution des modèles cinématiques. Les modèles utilisés sont globaux et se prêtent à des études sur des domaines très vastes. Pour travailler sur des zones d'extension plus réduites, comme c'est le cas ici, il apparaît nécessaire de les affiner, afin qu'ils aient une réelle pertinence régionale.

Enfin, il sera nécessaire, dans la suite de cette étude, de réaliser plus de modélisations et d'approfondir le contexte géodynamique régional afin d'identifier les référentiels les

plus pertinents pour quantifier les taux de déplacements associés à la mise en place des porphyres.

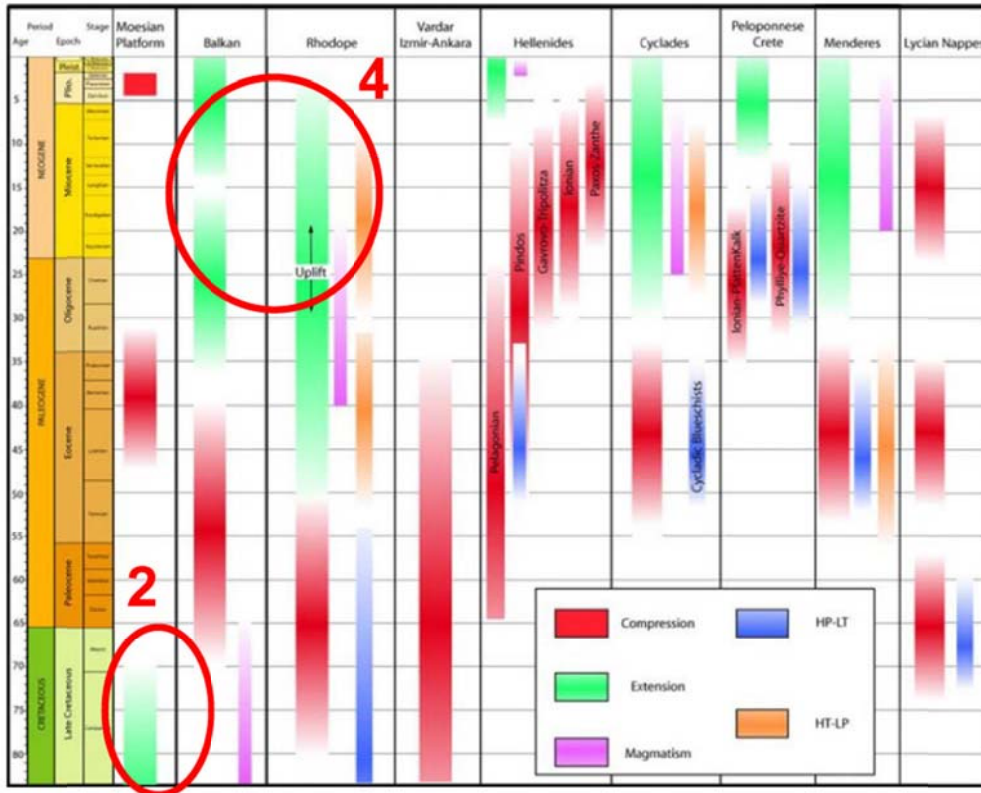


Figure 40 - Mise en place des porphyres des clusters 2 et 4 dans des contextes géodynamiques en extension associés à la fermeture de la Téthys (modifié d'après Jolivet et Brun, 2010).

6. Conclusion et perspectives

Le travail présenté dans ce rapport avait pour objectif de mettre en place un outil de reconstruction paléogéographique afin de compléter la capacité et les outils de recherche du BRGM dans le domaine de la prédictivité des ressources minérales.

Au cours de la première phase de ce travail, réalisée en 2011, plusieurs outils logiciels de reconstruction paléogéographiques ont été identifiés et testés. L'un d'eux, qui offrait la meilleure adéquation avec les besoins exprimés, a été acquis et est désormais opérationnel au BRGM. Il s'agit de l'outil PaleoGIS, édité et commercialisé par The Rothwell Group, dont l'interface et les principales caractéristiques sont présentées dans ce rapport.

Une première étude de cas a été démarrée, sur la mise en place des porphyres cuprifères le long de la suture téthysienne occidentale. Bien que préliminaire, cette étude a permis d'identifier plusieurs phases de mise en place des gisements porphyriques dans le temps et l'espace. Elle suggère aussi que les porphyres créacé sup. et oligo-miocènes de la zone Egée-Balkans-Carpathes, qui constituent deux ensembles (ou clusters) distincts, pourraient s'être mis en place dans un contexte géodynamique polyphasé ou se succèderaient 1) d'abord une vitesse de convergence élevée, favorisant la fusion dans le biseau mantellique, puis 2) une diminution de la vitesse de convergence favorisant le retrait de la subduction et, sur la plaque chevauchante, un régime extensif favorable à la mise en place des systèmes magmato-plutoniques. Au-delà de ces observations, cette étude a mis en lumière l'intérêt de l'approche, mais aussi et surtout l'importance de disposer d'un modèle cinématique fiable, détaillé et adapté à l'échelle de l'étude.

Ainsi, à l'issue de l'année 2011, les deux objectifs de l'étude - à savoir 1) disposer d'un outil de reconstruction paléogéographique compatibles avec les besoins et la politique logicielle du BRGM, et 2) démarrer une première étude de cas sur la mise en place des porphyres cuprifères de la suture téthysienne occidentale – ont été atteints.

Toutefois, le travail présenté dans ce rapport est très préliminaire, et il mérite d'être approfondi. Ainsi, parmi les développements futurs qu'il convient de mener, nous pouvons citer les points suivants :

- Améliorer la maîtrise technique de l'outil, notamment sur la manipulation des modèles cinématiques (édition de la géométrie des plaques, des pôles de rotation, de la hiérarchie et de la chronologie des déplacements,...) ;
- Améliorer la résolution des modèles cinématiques en général, et plus particulièrement au niveau de la suture de la Téthys occidentale, en y intégrant les données détaillées et/ou récentes disponibles (e.g. Dercourt *et al.*, 2000 ; Agard *et al.*, 2006 ; Jolivet et Brun, 2010 ; Carry, 2010) ;
- Intégrer des données complémentaires aux modèles, notamment les structures géodynamiques (zones de subduction et de collision dont on précisera la dynamique) ;

- Dans le cas spécifique de la mise en place des porphyres, prendre en compte les événements plutoniques et magmatiques (lignées granitiques et magmas associés) qui sont le lien entre dynamique de la subduction et genèse des minéralisations ;
- Affiner la description des porphyres, en tenant compte, notamment des tonnages et des teneurs en Cu, Mo et Re (*e.g.* Singer *et al.*, 2005 ; Berzina *et al.*, 2005) afin d'identifier, à terme, les facteurs géodynamiques favorisant la présence de rhénium dans les gisements ;
- Etendre l'étude à d'autres frontières de plaques convergentes à porphyres (cordillère des Andes, Amérique du nord, Asie du sud-est, autres clusters de porphyres minéralisés de la suture thétysienne, ...) afin de tester la reproductibilité (ou non-reproductibilité) des observations et d'en identifier, le cas échéant, les causes (géométrie et/ou dynamique de la subduction, lignes magmatiques associées,...)
- Lier l'approche paléogéographique cartographique aux processus lithosphériques profonds afin de développer une approche véritablement 4D.

Cette liste n'est bien-sûr pas exhaustive, mais elle donne un aperçu des points sur lesquels nous devons concentrer nos efforts pour développer ce travail. Il conviendra aussi d'associer géodynamiciens et métallogénistes, afin de croiser de manière optimale les disciplines.

7. Bibliographie

- Agard P., P. Monié, W. Gerber, J. Omrani, M. Molinaro, B. Meyer, L. Labrousse, B. Vrielynck, L. Jolivet, P. Yamato (2006), Transient, synobduction exhumation of Zagros blueschists inferred from P-T, deformation, time, and kinematic constraints: Implications for Neotethyan wedge dynamics, *J. Geophys. Res.*, 111, B11401, doi:10.1029/2005JB004103
- Bertrand G., Loiselet C., Guillou-Frottier L., Billa M., Maldan F., Cassard D., Pelleter E. (2010). Anomalous gold deposit along SE Europe Tethysian margin: a signature of return-induced upper mantle flow around Hellenic slab edges, in AGU 2010 - American Geophysical Union - San Francisco - USA - 13-17 december 2010
- Berzina A.N., Sotnikov V.I., Economou-Eliopoulos M., & Eliopoulos D.G. (2005). Distribution of rhenium in molybdenite from porphyry Cu-Mo and Mo-Cu deposits of Russia (Siberia) and Mongolia. *Ore Geology Reviews*, n. 26, pp. 91-113
- Carry N. (2010). De la subduction continentale à l'exhumation dans les Alpes penniques – Modélisation thermo-mécanique et paléogéographique. Thèse de 3^{ème} cycle, Univ. De Rennes, 259 p.
- Cassard D., Bertrand G., Maldan F., Gaël G., Juha K., Aatos S., Angel J.M., Arvanitidis N., Ballas D., Billa M., Christidis C., Eilu P., Grazea E., Inverno C., Kauniskangas E., Maki T., Matos J., Meliani M., Mladenova V., Navas J., Niedbal M., Perantonis G., Pyra J., Santana H., Serafimovski T., Serrano J.J., Strengel J., Tasev G., Tornos F., Tudor G. (Soumis). ProMine pan-European Mineral Deposit database: a new dataset for assessing primary mineral resources in Europe. Soumis pour publication à *Mineral Resources Potential Maps : a Tool for Discovering Future Deposits*. 12th-14th March 2012, Nancy, France
- Dercourt J., Gaetani M., Vrielynck B., Barrier E., Biju-Duval B., Brunet M., Cadet J., Crasquin S., & Sandulescu M. (2000). Atlas Peri-Téthys – Palaeogeographical maps. CCGM/CGMW Paris
- Ghidella, M.E., Lawver, L.A., and Gahagan, L.M. (2007). Break-up of Gondwana and opening of the South Atlantic: Review of existing plate tectonic models, U.S. Geological Survey and The National Academies: USGS OF-2007-1047, Short Research Paper 055, doi:10.3133/of2007-1047.srp055
- Gurnis M., Turner M., Zahirovic S., DiCaprio L., Spasojevic S., Müller R.D., Boyden J., Seton M., Constantin Manea V., & Bower D.J. (2012). Plate tectonic reconstructions with continuously closing plates. *Computer & Geosciences*, 38, pp. 35-42
- Jébrak M., & Marcoux E. (2008). Géologie des ressources minérales. Géologie Quebec Ed. 667 p.

Jolivet L., & Brun J.P. (2010). Cenozoic geodynamic evolution of the Aegean. *Int. J. Earth Sci. (Geol. Rundsch.)*, 99, pp. 109-138

Jolivet L., & Faccenna C. (2000). Mediterranean extension and the Africa-Eurasia collision. *Tectonics*, v. 19, n. 6, pp. 1095-1106

Loiselet C., Guillou-Frottier L., Bertrand G., Billa M., Pelleter E., Maldan F., Cassard D. (2010) Spatial distribution of mineral deposit along eastern Mediterranean subduction zone: a link with 3D mantle flow associated with slab rollback ?, in GEOMOD 2010 - Lisbonne - Portugal - 27-29 septembre 2010

Mann, P., Rogers, R., and Gahagan, L. (2007). Overview of plate tectonic history and its unresolved tectonic problems, in *Central America - Geology, Resources and Hazards*, J. Bundschuh and G. E. Alvarado (editors), published by Taylor and Francis, Chapter 8

McKeon R., Boyden J. & Clark J. (2010). *The GPlates User Manual*.

Müller, R.D., Roest, W.R., Royer, J.-Y., Gahagan, L.M. and Sclater, J.G. (1997). Digital isochrons of the world's ocean floor. *Journal of Geophysical Research*, 102: 3211-3214.

Müller, R.D., Sdrolias, M., Gaina, C. and Roest, W.R. (2008). Age, spreading rates and spreading asymmetry of the world's ocean crust. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 9(Q04006): doi:10.1029/2007GC001743.

Richards J.P. (2003). Tectono-magmatic precursors for porphyry Cu-(Mo-Au) deposit formation. *Economic Geology*, v. 98, pp. 1515-1533

Schellart W.P. (2005). Influence of the subducting plate velocity on the geometry of the slab and migration of the subduction hinge. *Earth and Planetary Science Letters*, 231, pp. 197-219

Scotese, C.R., Boucot, A.J., and McKerrow, W.S. (1999). Gondwanan paleogeography and paleoclimatology, *Journal of African Earth Sciences*, v. 28, no. 1., pp. 99-114

Scotese, C.R., and Golonka, J. (1992). *Paleogeographic Atlas, PALEOMAP Progress Report 20-0692*, Department of Geology, University of Texas at Arlington, 34 pp

Scotese, C.R., (1997). *Continental Drift*, 7th edition, PALEOMAP Project, Arlington, Texas, 79 pp.

Scotese C.R., Nokleberg, W., Monger, J.W.H., Norton, I.O., Parfenov, L.M., Khanchuk, A., Bundyzen, T.K., Dawson, K.M., *et al.* (2001). *Dynamic Computer Model for Metallogenesis and tectonics of the Circum-North Pacific.*, U. S. Geological Survey Open-File Report 01-261 (CD-ROM).

Serafimovski T. (2000). The Lece-Chalkidiki metallogenic zone : geotectonic setting and metallogenic features. *Geologija*, 42, pp. 159-164

Singer D.A., Berger V.I., Menzie W.D., & Berger B.R. (2005). Porphyry copper deposit density. *Economic Geology*, v. 100, p. 491-514

Singer D.A., Berger V.I., & Moring C. (2008). Porphyry copper deposits of the World : database and grade and tonnage models, 2008. U.S. Geological Survey Open-File Report 2008-1155, 45 p.

Stampfli G.M. & Borel G.D. (2002). A plate tectonic model for the Paleozoic and Mesozoic constrained by dynamic plate boundaries and restored synthetic oceanic isochrons. *Earth and Planetary Science Letters*, 196, pp. 17-33

Tatsumi Y., & Eggins S. (1995). Subduction zone magmatism. Cambridge, MA, Blackwell Science, 211 p.

Torsvik T.H., & Smethurst M.A. (1999). Plate tectonic modelling : virtual reality with GMAP. *Computers & Geosciences*, 25, pp. 395-402

Volkov A.V., Stefanova V., Serafimovski T., and Sidorov A.A. (2008). Native gold of the porphyry copper mineralization in the Borov Dol deposit (Republic of Macedonia). *Doklady Earth Sciences*, v. 422, n. 7, pp. 1013-1017

Voudouris P.C., Melfos V., Spry P.G., Bindi L., Kartal T., Arikas K., Moritz R. and Orтели M. (2009). Rhenium-rich molybdenite and rhenite in the Pagoni Rachi Mo-Cu-Te-Ag-Au prospect, northern Greece : implications for the Re geochemistry of porphyry-style Cu-Mo and Mo mineralization. *The Canadian Mineralogist*, v. 47, pp. 1013-1036

Yigit O. (2009). Mineral deposits of Turkey in relation to Tethyan metallogeny : implications for future mineral exploration. *Economic Geology*, v. 104, pp. 19-51

Annexe 1

Données des gisements porphyriques le long de la suture Téthysienne occidentale

Pays	Identifiant BdD ProMine/Caucase	Nom du Gisement	Long (°E)	Lat (°N)	Substance principale	Cu présent	Mo présent	Re présent	Statut du gisement	Typologie principale	Morphologie principale	Age de la minéralisation (Ma)
Afghanistan	AFG-00006	Okhan-Kashan	65,498	35,189	Cu	oui	oui			Porphyry and porphyry		14,0
	AFG-00007	Shaïda	61,850	33,850	Cu	oui				Porphyry and porphyry		38,5
Arménie		Ankavan	44,517	40,633		oui				Porphyry Cu-Au or Cu		33,0
		Shikahoh	46,467	39,100		oui				Porphyry Cu-Au or Cu		143,5
	ARM-00001	Dastakert	46,033	39,367	Cu	oui	oui	oui	Deposit of unknown s	Porphyry Cu-Mo or Mo	Stockwork (or networ	22,0
	ARM-00003	Agarak	46,217	38,933	Cu	oui	oui		Deposit of unknown s	Porphyry Cu-Mo or Mo	Stockwork (or networ	39,5
	ARM-00006	Kadgaran	46,133	39,150	Cu	oui	oui		Deposit of unknown s	Porphyry copper depo	Stockwork (or networ	22,0
	ARM-00012	Tekhut	44,817	41,108	Cu	oui				Porphyry and porphyry		121,0
Azerbaïdjan		Damirli	46,750	40,017		oui				Porphyry Cu-Au or Cu		135,0
		Garadag	45,850	40,633		oui				Porphyry Cu-Au or Cu		135,0
		Goshgarchai	46,150	40,533		oui				Porphyry Cu-Au or Cu		135,0
	AZE-00003	Ordubad district	46,024	38,904	Au	oui			Dormant district	Porphyry and porphyry		40,0
Bulgarie		Spahievo	25,250	42,117		oui				Porphyry Cu-Au or Cu		33,0
	BGR-00036	ElatSITE	24,038	42,752	Cu	oui	oui	oui	Producing industrial	Porphyry Cu-Au depos	Discordant envelope	92,1
	BGR-00038	Medet	24,188	42,605	Cu	oui	oui	oui	Old industrial mine,	Porphyry Cu-Mo or Mo	Discordant envelope	80,0
	BGR-00039	Assarel	24,136	42,547	Cu	oui			Producing industrial	Porphyry Cu-Au depos	Discordant envelope	76,5
	BGR-00043	Vlaïkov Vruh	24,215	42,352	Cu	oui			Old industrial mine,	Porphyry copper depo	Stockwork (or networ	82,0
	BGR-00048	Prohorovo	26,253	42,374	Cu	oui	oui	oui	Unexploited deposit	Porphyry copper depo	Stockwork (or networ	81,0
	BGR-00076	Briastovo	25,368	41,939	PbZn	oui	oui		Dormant district	Low-sulphidation (ad	Field of discordant	32,5
	BGR-00089	Bardzeto	27,521	41,988	Cu	oui	oui		Deposit of unknown s	Porphyry Cu-Mo or Mo	Discordant primary o	80,5

Reconstructions paléogéographiques et prédictivité des ressources minérales

Pays	Identifiant BdD ProMine/ Caucase	Nom du Gisement	Long (°E)	Lat (°N)	Substance principale	Cu présent	Mo présent	Re présent	Statut du gisement	Typologie principale	Morphologie principale	Age de la minéralisation (Ma)
	BGR-00098	Tsar Asen	24,343	42,355	Cu	oui			Old industrial mine,	Porphyry copper depo	Discordant envelope	90,0
	BGR-00099	Popovo Dere	24,155	42,371	Cu	oui			Subeconomic deposit	Porphyry copper depo	Stockwork (or networ	83,5
	BGR-00100	Petelovo	24,271	42,456	Au	oui			Subeconomic deposit	High-sulphidation ep	Stockwork (or networ	86,0
	BGR-00101	Kominsko Chukarche	24,279	42,456	Cu	oui	oui		Subeconomic deposit	Porphyry copper depo	Stockwork (or networ	86,0
	BGR-00103	Orlovo Gnezdo	24,128	42,539	Cu	oui			Subeconomic deposit	Porphyry copper depo	Stockwork (or networ	86,0
	BGR-00105	Karliovo	24,123	42,695	Cu	oui	oui		Subeconomic deposit	Porphyry copper depo	Stockwork (or networ	86,0
	BGR-00162	Studenets	23,360	42,463	Cu	oui	oui		Deposit of unknown s	Porphyry Cu-Mo or Mo	Discordant envelope	76,0
	BGR-00337	Byrdseto	27,533	41,967	Cu	oui	oui		Deposit of unknown s	Porphyry Cu-Mo or Mo	Stockwork (or networ	80,5
Bosnie-Herzégovine	BIH-00107	Kiseljak	18,081	43,939		oui			Deposit or prospect	Porphyry Cu-Au depos	Stockwork (or networ	17,5
Géorgie	GEO-00008	Garta	43,700	41,940	Cu	oui				Replacement deposit		35,0
	GEO-00014	Merisi (groupe de)	42,012	41,591	Cu	oui				Gisements porphyriq		35,0
		Fakos	25,192	39,812		oui				Porphyry Cu-Au or Cu		21,0
	GRC-00041	Vathi Kilikis	22,967	41,133	U	oui			Deposit of unknown s	Porphyry and porphyr	Atypical, unspecific	30,0
	GRC-00046	Pontokerasia	23,149	41,073	Cu	oui			Deposit of unknown s	Porphyry and porphyr	Discordant envelope	32,0
	GRC-00060	Skouries	23,732	40,465	Au	oui			Industrial project u	Porphyry Cu-Au depos	Breccia-pipe, funnel	19,0
	GRC-00238	Fisoka	23,795	40,498	Cu	oui			Deposit of unknown s	Porphyry copper depo	Stockwork (or networ	19,0
Grèce	GRC-00271	Maronia	25,644	40,881	Mo	oui	oui		Subeconomic deposit	Porphyry Cu-Mo or Mo	Stratabound envelope	29,0
	GRC-00287	Pagoni Rachi	25,805	41,000	Mo	oui	oui		Mineral occurrence	Porphyry Cu-Mo or Mo	Stratabound envelope	28,0
	GRC-00313	Mili	25,968	41,007	Cu	oui			Deposit of unknown s	Porphyry copper depo	Stratabound envelope	28,0
	GRC-00378	Kassiteres	25,788	41,023	Cu	oui			Deposit of unknown s	Porphyry Cu-Au depos	Stockwork (or networ	23,5
	HUN-00026	Recsk-Lahca (Cu-Au)	20,087	47,955	Au	oui			Industrial project u	High-sulphidation (a	Discordant envelope	45,0
Hongrie	HUN-00039	Recsk (Cu-Au-Pb-Zn)	20,053	47,947	Cu	oui	oui		Dormant deposit	Porphyry Cu-Au depos	Stockwork (or networ	34,9
	HUN-00176	Recsk-Lahca (Cu-Mo-	20,067	47,923	Cu	oui			Prospect	Porphyry and porphyr	Atypical, unspecific	34,9
	HUN-00344	Bszsny Mountains	19,033	47,917	Cu	oui			Deposit of unknown s	Porphyry copper depo	Stockwork (or networ	14,0
		Dallil	49,267	34,550		oui				Porphyry Cu-Au or Cu		14,9
		Raigan	57,233	28,900		oui				Porphyry Cu-Au or Cu		12,0
Iran	IRN-00001	Darrehzar	55,901	29,881	Cu	oui	oui			Porphyry and porphyr		14,9
	IRN-00002	Sar Cheshmeh	55,867	29,948	Cu	oui	oui			Porphyry and porphyr		12,5

Reconstructions paléogéographiques et prédictivité des ressources minérales

Pays	Identifiant BdD ProMine/ Caucase	Nom du Gisement	Long (°E)	Lat (°N)	Substance principale	Cu présent	Mo présent	Re présent	Statut du gisement	Typologie principale	Morphologie principale	Age de la minéralisation (Ma)	
Macédoine	IRN-00003	Kal-e-Kafi	54,550	33,467	Cu	oui	oui			Porphyry and porphyry		28,0	
	IRN-00004	Meiduk	55,067	30,533	Cu	oui				Porphyry and porphyry		12,5	
	IRN-00005	Sungun	46,375	38,808	Cu	oui	oui			Porphyry and porphyry		14,9	
	IRN-00008	Ali-Abad	53,841	31,634	Cu	oui	oui			Porphyry and porphyry		16,0	
	IRN-00009	Darreh-Zerreshk	53,826	31,585	Cu	oui	oui			Porphyry and porphyry		16,0	
	IRN-00011	Char Gonbad	56,378	29,675	Cu	oui				Porphyry and porphyry		14,0	
	IRN-00013	Kharvana	46,266	38,549	Au	oui				Porphyry and porphyry		45,0	
	IRN-00016	Gandy	54,700	35,380	Au	oui				Porphyry and porphyry		28,0	
				22,867	41,800		oui				Porphyry Cu-Au or Cu		23,0
		MKD-00016	Bucim	22,350	41,669	Cu	oui			Producing industrial	Porphyry Cu-Au depos	Discordant envelope	25,0
		MKD-00036	Borov Dol	22,347	41,579	Cu	oui			Deposit or prospect	Porphyry Cu-Au depos	Atypical, unspecific	26,0
		MKD-00038	Zlatica	22,115	42,032	Cu	oui			Deposit or prospect	Porphyry copper depo	Discordant envelope	15,0
		MKD-00061	Dudica	22,127	41,147	Cu	oui			Dormant deposit	High-sulphidation (a	Discordant lode or v	4,0
		MKD-00103	Kadiica	22,883	41,617	Cu	oui	oui		Prospect	Porphyry Cu-Mo or Mo	Stockwork (or networ	34,0
		MKD-00105	Rudnitsa	20,717	43,233	Cu	oui			Prospect under (down	Porphyry Cu-Au depos	Stockwork (or networ	14,0
	Pakistan			62,194	29,123		oui				Porphyry Cu-Au or Cu		14,9
PAK-00001		Dash-e-Kain	64,504	29,554	Cu	oui	oui			Porphyry and porphyry		21,0	
PAK-00002		Reko Dig	62,033	29,133	Cu	oui				Porphyry and porphyry		12,5	
PAK-00003		Saindak	61,615	29,248	Cu	oui	oui			Porphyry and porphyry		21,0	
	PAK-00004	Ziarat Pir Sultan	64,171	29,366	Cu	oui				Porphyry and porphyry		20,0	
		Talaglu	22,150	46,267		oui				Porphyry Cu-Au or Cu		8,2	
Roumanie		Ostros	25,613	46,573	Cu	oui			PRIMARY OCCURRENCES	Porphyry Cu-Mo or Mo	Stockwork (or networ	7,0	
		Bozovici	22,032	44,967	Au	oui	oui		PRIMARY OCCURRENCES	Atypical or unspecif	Discordant lode or v	65,0	
		LÓpusnicul Mare	21,947	44,947	Cu	oui			Deposit or prospect	Porphyry Cu-Mo or Mo	Stockwork (or networ	60,0	
		Bocsa	21,795	45,473	Brt	oui	oui		PRIMARY OCCURRENCES	Porphyry and porphyry	Stockwork (or networ	60,0	
		Moldova Nouo (SSOP)	21,666	44,725	Cu	oui	oui		Old industrial mine,	Porphyry copper depo	Stockwork (or networ	65,0	
		Svrsin	22,260	46,026	Cu	oui			Old mining district	Porphyry and porphyry	Discordant lode or v	125,0	

Reconstructions paléogéographiques et prédictivité des ressources minérales

Pays	Identifiant BdD ProMine/ Caucase	Nom du Gisement	Long (°E)	Lat (°N)	Substance principale	Cu présent	Mo présent	Re présent	Statut du gisement	Typologie principale	Morphologie principale	Age de la minéralisation (Ma)
Slovaquie	ROM-00076	Cerbia	22,379	46,067	Cu	oui			Old mining district	Porphyry and porphyry	Discordant lode or v	123,0
	ROM-00080	Deva (ROM)	22,887	45,919	Cu	oui	oui		Old industrial mine.	Porphyry Cu-Au depos	Discordant envelope	13,3
	ROM-00083	Bolcana-Troita	22,946	46,016	Au	oui			Old mining district	Porphyry copper depo	Discordant primary o	10,0
	ROM-00087	Valea Morii	22,919	46,119	Au	oui			Old industrial mine.	Porphyry Cu-Au depos	Discordant lode or v	11,0
	ROM-00088	Remetea	22,906	46,158	Cu	oui	oui		Old mining district	Porphyry copper depo	Stockwork (or networ	14,0
	ROM-00092	Bucium-Tarnita (porp	23,127	46,242	Cu	oui			Prospect under (down	Porphyry Cu-Au depos	Stockwork (or networ	14,9
	ROM-00093	Bucium - Arama (peri	23,127	46,242	Au	oui			Prospect under (upst	High-sulphidation (a	Field of discordant	14,0
	ROM-00096	Rosia Poieni	23,187	46,316	Cu	oui			Producing deposit	Porphyry copper depo	Stockwork (or networ	11,0
	ROM-00211	Sumuleu-Gurghiu	25,410	46,630	Cu	oui	oui		Deposit or prospect	Porphyry Cu-Mo or Mo	Stockwork (or networ	15,0
	ROM-00212	Mdras-Hrghita	25,570	46,470	Cu	oui				Porphyry Cu-Mo or Mo	Stockwork (or networ	15,0
	ROM-00256	Ciclova	21,783	44,983	Cu	oui			Deposit of unknown s	Porphyry copper depo	Stockwork (or networ	65,0
	ROM-00264	Cofu	22,350	45,550	Cu	oui			Deposit of unknown s	Porphyry copper depo	Stockwork (or networ	65,0
	ROM-00334	Rovina	22,900	46,167	Cu	oui			Deposit of unknown s	Porphyry copper depo	Stockwork (or networ	14,9
	ROM-00339	Sopot	21,950	44,750	Cu	oui			Deposit of unknown s	Porphyry copper depo	Stockwork (or networ	65,0
	ROM-00356	Voia	22,967	46,061	Cu	oui			Deposit of unknown s	Porphyry copper depo	Stockwork (or networ	8,2
	SVK-00019	Rochovce	20,300	48,700	Mo		oui		Prospect under (upst	Porphyry and porphyry	Discordant lode or v	89,1
	SVK-00021	Javorie	19,267	48,433	Cu	oui	oui		Mineral occurrence	Porphyry and porphyry	Discordant mass or l	15,0
	SVK-00035	Pukanec 2 - Rudno	18,717	48,367	Ag	oui			Old mining district	Porphyry copper depo	Stockwork (or networ	12,0
	SVK-00037	Morske oko	22,200	48,920	Zn	oui	oui		Mineral occurrence	Porphyry and porphyry	Breccia-pipe, funnel	14,0
	SVK-00038	Brehov	21,670	48,540	Zn	oui			Deposit of unknown s	Porphyry and porphyry	Stockwork (or networ	14,0
SVK-00050	Banská Stivavnica (in	18,900	48,450	Ag	oui			Abandoned industrial	Porphyry Cu-Au depos	Discordant lode or v	11,6	
SVK-00076	Banská Stivavnica 1	18,880	48,450	Cu	oui	oui		Deposit of unknown s	Porphyry and porphyry	Stockwork (or networ	14,0	
SVK-00133	Voznica	18,780	48,430	Cu	oui	oui		Unexploited deposit	Porphyry Cu-Au depos	Stockwork (or networ	14,5	
		Berta	41,900	41,200		oui			Porphyry Cu-Au or Cu			40,0
		Tereoba	27,150	39,600		oui			Porphyry Cu-Au or Cu			25,0
Turquie	TUR-00184	Kisladag	29,105	38,492	Au	oui			Deposit under develo	Porphyry Cu-Au depos	Stockwork (or networ	14,0
	TUR-00387	Copler	38,527	39,418	Au	oui			Deposit under develo	Porphyry and porphyry	Subconcordant or str	45,0
	TUR-00689	Gelemic	29,267	39,883	Mo		oui		Deposit of unknown s	Porphyry and porphyry	Discordant envelope	82,5
	TUR-00704	Derekoj	27,367	41,939	Cu	oui	oui		Deposit of unknown s	Porphyry copper depo	Discordant envelope	70,9

Reconstructions paléogéographiques et prédictivité des ressources minérales

Pays	Identifiant BdD ProMine/ Caucase	Nom du Gisement	Long (°E)	Lat (°N)	Substance principale	Cu présent	Mo présent	Re présent	Statut du gisement	Typologie principale	Morphologie principale	Age de la minéralisation (Ma)
	TUR-00706	Bakircay	35,427	41,000	Cu	oui			Deposit of unknown s	Porphyry copper depo	Atypical, unspécifie	38,0
	TUR-00712	Ikiztepele	27,734	41,841	Cu	oui	oui		Deposit of unknown s	Replacement deposit	Discordant envelope	75,0
	TUR-00852	Gumushane	39,617	40,833	Cu	oui				Porphyry and porphyr		52,5
	TUR-00853	Ulutas	40,883	40,450	Cu	oui				Porphyry and porphyr		59,0
	YUG-00058	Majdanpek	21,950	44,376	Cu	oui	oui	oui	Producing industrial	Porphyry Cu-Au depos	Discordant envelope	84,0
	YUG-00061	Bor	22,094	44,095	Cu	oui			Old industrial mine,	High-sulphidation ep	Subconcordant or str	70,0
	YUG-00076	Veliki Krivelj	22,097	44,131	Cu	oui	oui	oui	Producing industrial	Porphyry Cu-Au depos	Discordant envelope	83,5
	YUG-00087	Mackatica	22,217	42,747	Mo	oui	oui	oui	Dormant deposit	Porphyry Cu-Mo or Mo	Stockwork (or networ	38,0
Ex-Yougoslavie	YUG-00118	Djavoilja Varos	21,425	43,034	Au	oui			Deposit or prospect	Low-sulphidation (ad	Field of discordant	15,0
	YUG-00123	Dumitru Potok	21,931	44,201	Cu	oui			Dormant deposit	Porphyry copper depo	Discordant envelope	80,0
	YUG-00134	Borska Reka	22,088	44,082	Cu	oui	oui		Dormant deposit	Porphyry Cu-Au depos	Stratabound envelope	80,0
	YUG-00136	Tulare	21,443	42,795	Au	oui			Deposit or prospect	Low-sulphidation (ad	Field of discordant	15,0



Centre scientifique et technique
Service des Ressources Minérales
3, avenue Claude-Guillemin

BP 36009 – 45060 Orléans Cedex 2 – France – Tél. : 02 38 64 34 34