

**THEME PRINCIPAL : SURFACE ET LITHOSPHERE****Résumé des objectifs.**

Les déformations lithosphériques sont fondamentalement liées aux mouvements des plaques, mais l'interaction, entre d'une part les mouvements profonds et d'autre part l'érosion et la sédimentation en surface, joue un rôle important sur la localisation et l'intensité des déformations. L'objectif sera de quantifier (de décrire et de paramétrer) les phénomènes de déformation, de magmatisme, d'exhumation, d'érosion, et de sédimentation en combinant des observations à différentes échelles de temps et d'espace avec des modèles analogiques et numériques. Une attention particulière sera portée sur le rôle des événements extrêmes dans les bilans globaux et sur les mécanismes de localisation de la déformation.

Le travail sera principalement fondé sur l'acquisition de données de terrain de l'évolution à long terme de la croûte continentale (tectonique, magmatisme) et des bassins associés, sur la paléoclimatologie et sur la quantification de l'érosion, y compris actuelle. Ces observations et l'analyse des échantillons pourront être menées à bien grâce à l'expérience des membres du laboratoire dans ce domaine, aux moyens techniques propres du laboratoire et aux collaborations tissées par ces membres. Le financement sera assuré essentiellement par des programmes ANR et INSU (Relief, dyeti ...) Auxquels participent régulièrement les membres du laboratoire.

**Personnels impliqués.**

*Thématique prioritaire* : Philippe Hervé Leloup (DR), Pascal Allemand (Pr), Vincent Langlois (Mdc), Gweltaz Mahéo (Mdc), Gérard Vidal, Amélie Quiquerez (Mdc), Jean-Emmanuel Martelat (Mdc), Philippe Grandjean (tech).

*Thématique secondaire* : Muriel Andreani (Mc), Stéphane Labrosse (Pr), Fabrice Cordey (Pr), Philippe Sorrel (Pr), Bernard Pittet (Mc), Hervé Bertrand (Mc), Pierpaolo Zudas (Pr), Claude Colombié (Mc), Yanick Ricard (DR).

La large palette de compétences des chercheurs impliqués sera fédérée autour de trois axes de recherches principaux : 1) la quantification de la contribution relative des événements extrêmes et des processus chroniques aux bilans sur le long terme, aussi bien pour la tectonique, l'érosion que pour la sédimentation. 2) Le couplage entre phénomènes internes et externes. 3) Les mécanismes de déformation et de localisation de la déformation.

**1) Contribution relative des événements extrêmes et des processus chroniques sur le transport sédimentaire.****Effets érosifs des glissements de terrain.**

*Participants* : Pascal Allemand, Philippe Grandjean (tech), Vincent Langlois (Mdc), Amélie Quiquerez (Mdc).

Les glissements de terrains sont des agents d'érosion majeurs. Ils se produisent généralement sous l'effet de stimuli extérieurs comme les séismes et les tempêtes sur des versants instables déjà préparés par l'altération, les facteurs géologiques et la végétation. Les glissements de terrain se développent alors en essaims. Le nombre et la dimension des glissements décroît en fonction de la distance au maximum d'intensité du stimulus. Ces effets sont bien décrits pour les îles comme Taïwan ou bien la Nouvelle-Zélande pour lesquelles l'intensité des stimuli est maximale. Il reste à explorer ces réponses dans des contextes moins extrêmes afin 1) de quantifier les rôles précis des différents facteurs déclenchant et 2) d'évaluer l'effet des glissements de terrains dans les bilans de matières par rapport au ravinement et à l'érosion chimique. Ces résultats pourront être inversés pour estimer le nombre et l'importance des stimuli climatiques ou tectoniques nécessaires à la formation d'un relief.

Ce travail sera réalisé dans des îles volcaniques à sismicité modérée comme la Réunion. Dans ces îles, le relief se développe par dépôt de couches de laves qui sont érodées par l'altération chimique, les glissements de terrain, le ravinement et les incisions de rivières. Il s'agira de paramétrer la géométrie des glissements de terrain en trois dimensions, de mesurer leur vitesse et d'estimer pour un stimulus donné (cyclone ou séisme) le flux de matière transporté par les glissements. Ce travail sera réalisé par (1) des données d'imagerie très haute résolution acquise par le drone DRELIO développé dans notre laboratoire (2) des données d'archives d'images aériennes de l'IGN couvrant une période de plus de 50 ans avec un intervalle de 5 ans en moyenne et (3) par de la modélisation numérique de glissements de terrain et de reliefs.

*Autoévaluation* : O4, Q5, E3, F4, X3, C5, O3



Glissement de terrain dans la rivière du Prêcheur (Martinique) suite au cyclone Dean. Le personnage en bas à droite donne l'échelle.

### ***Impact des événements extrêmes sur l'érosion des versants.***

*Participants* : Pascal Allemand (Pr), Vincent Langlois (Mdc), Amélie Quiquerez (Mdc), Philippe Grandjean (tech).

Les flux sédimentaires, alimentant les bassins sédimentaires, sont en grande majorité produits par les versants et dans une moindre mesure par l'incision des rivières. Il apparaît donc important de mieux comprendre comment les flux sédimentaires transitent sur les versants. Les versants viticoles, reconnus comme étant particulièrement sensibles à l'érosion, sont de bons laboratoires naturels pour quantifier l'érosion et étudier les paramètres physiques, pédologiques, climatiques, et anthropiques la contrôlant, de l'échelle de l'événement hydrologique et à une échelle de temps pluri-décennale.

Sur ces versants, l'érosion résulte des effets combinés de l'érosion naturelle par ruissellement lors d'événements hydroclimatiques intenses et des pratiques culturales (labours..). Si, la topographie joue un rôle majeur dans les processus de ruissellement et d'érosion, elle n'explique cependant pas l'hétérogénéité spatiale des vitesses d'érosion observée à l'échelle métrique au sein d'une même parcelle. Nous chercherons à déterminer si cette variabilité de l'érosion est corrélée à des variations spatiales des caractéristiques physiques et culturelles des sols à l'échelle du mètre. Nous chercherons également, à expliquer l'origine de la variabilité de ces paramètres en mesurant la microtopographie, en décrivant la typologie des sols (texture, pierrosité, minéralogie des argiles), et en effectuant des mesures de capacité d'infiltration, ceci en fonction des pratiques culturales opérant sur les parcelles.

Ce travail sera réalisé sur les versants de la côte viticole de Bourgogne dont les caractéristiques lithologiques, topographiques, climatiques et anthropiques sont connues. L'approche méthodologique s'appuiera sur l'acquisition, le traitement et l'analyse de données à haute résolution spatiale issues de mesures in situ (pièges à sédiments, imagerie géophysique), levés de terrain (coupes pédologiques) de cartographie numérique ITHRS (images aériennes, satellitaires, MNT) combinée avec l'analyse par SIG.

Ce travail permettra de discuter du rôle des contraintes hydro-climatiques, géomorphologique et anthropique sur les vitesses et les processus de l'érosion et également d'établir l'importance relative des processus d'érosion naturels face aux processus anthropiques.

*Autoévaluation* : O4, Q5, E4, F4, X5, C5, O2

### ***Impact des événements extrêmes sur les flux sédimentaires dans les systèmes fluviaux***

*Participants* : Pascal Allemand (Pr), Vincent Langlois (Mdc).

Les processus élémentaires du transport de fond dans un écoulement restent décrits sur la base de modèles sommaires qui peuvent difficilement s'appliquer aux situations hors d'équilibre rencontrées dans les systèmes naturels. L'objectif de ce projet est de parvenir à une meilleure compréhension des mécanismes de base régissant l'entraînement de sédiments par une rivière, en s'attachant à modéliser les effets dus à une large gamme de tailles de grains, à la géométrie du socle, aux interactions entre lit fixe et lit mobile, et à la variabilité du débit, en particulier à travers l'occurrence d'événements rares mais de grande amplitude (crues).

Pour cela, il est possible de s'appuyer sur les méthodes expérimentales classiques en hydrodynamique (bancs expérimentaux financés par la Région Rhône-Alpes) et sur les outils développés dans le cadre de la

physique des milieux granulaires secs. Cette étude reposera sur des simulations numériques permettant de coupler l'écoulement d'un fluide au mouvement d'un matériau granulaire, et sur le développement d'une plateforme expérimentale visant à observer directement les processus du transport à l'échelle des grains. Ces travaux expérimentaux seront complétés par une approche observationnelle réalisée à l'aide du drone DRELIO. Des rivières situées sous climat tropical seront imagées à une fréquence au moins bisannuelle afin de mesurer les granulométries de fond et d'évaluer les variations de granulométrie. Ces observations seront couplées aux mesures de précipitations et de flux disponibles.

*Autoévaluation* : O3, Q4, E2, F4, X4, C3, O1

### **Formation et préservation des tempestites dans le domaine marin.**

*Participants* : Claude Colombié (Mc), Christophe Lécuyer (Pr.), Bernard Pittet (Mc), Philippe Sorel (Mc)

Les tempêtes, dont l'intensité et la fréquence dépendent en partie du climat, peuvent avoir un rôle tout aussi important, si ce n'est plus important, que les processus cycliques dans l'enregistrement sédimentaire en milieu marin. L'analyse sédimentologique détaillée des tempestites (ou dépôts de tempêtes) et l'interprétation cyclostratigraphique des séries sédimentaires dans lesquelles elles sont préservées permettent de déterminer les variations de l'intensité et de la fréquence des tempêtes. La comparaison des variations de l'activité des tempêtes avec les changements de températures et de précipitations obtenus par ailleurs ( $^{18}\text{O}$  des carbonates, palynologie, minéralogie des argiles, radioactivité et susceptibilité magnétique des roches) dans les séries sédimentaires du Jurassique supérieur ouest téthysien semble indiquer qu'une hausse des températures et des précipitations est corrélée à une hausse de l'intensité et de la fréquence des tempêtes. Cependant, d'autres cas de figures se présentent qui sont difficiles à expliquer. Par ailleurs, l'estimation de l'intensité dépend de la répartition sur un profil proximal-distal des milieux de provenance et de dépôt des tempestites et la fréquence est étroitement liée au potentiel de préservation des séries étudiées. Trois axes de recherche sont envisagés sur la base de ces résultats préliminaires : 1) traitement mathématique des données sédimentologiques pour préciser les valeurs d'intensité et de fréquence estimées ; 2) comparaison des résultats obtenus pour une même période de temps (Jurassique supérieur) mais dans différents bassins (Boulonnais, Aquitaine, Espagne, Maroc), répartis le long d'un transect N-S, pour définir un gradient latitudinal de l'activité des tempêtes et mieux contraindre les facteurs responsables des variations observées ; 3) appliquer les méthodes développées dans le Jurassique supérieur à des séries récentes, comparables en termes de dynamique sédimentaire aux séries étudiées dans l'Ancien (Estuaire de la Gironde, Baie de Floride), pour préciser les paramètres environnementaux et climatiques responsables de la formation et de la préservation des tempestites dans le domaine marin.

Ces recherches s'appuieront sur le lever banc par banc de coupes sédimentologiques et un échantillonnage précis des séries étudiées. L'acquisition, le traitement et l'analyse des données seront menés avec les moyens dont dispose le laboratoire (microscopie optique,  $\delta^{18}\text{O}$  des carbonates, palynologie) et grâce aux collaborations en cours (radioactivité et susceptibilité magnétique des roches, minéralogie des argiles). Les données auront été en partie acquises grâce au financement de la Fondation MAIF (de 09-2007 à 12-2010).

*Autoévaluation* : O4, Q5, E2, F4, X1, C3, O3

## **2) Interaction processus internes et externes**

*Participants* : G. Mahéo, P.H. Leloup, B. Pittet, P. Sorrel, P. Allemand, V. Gardien, C. Lecuyer, V. Langlois, A. Quiquerez, F. Cordey.

La topographie résulte de l'interaction dans le temps et dans l'espace entre l'exhumation des roches, de leur érosion et leur sédimentation. Si la surrection et la subsidence dépendent majoritairement de processus internes (tectonique, flux de chaleur, isostasie) et l'érosion de processus externes (climat, variation du niveau de base) ; il existe des interactions complexes entre tectonique, érosion et climat, dont les mécanismes ne sont pas encore complètement connus. Leur interdépendance rend la quantification des différents processus difficile, et les nombreuses approches numériques qui ont été proposées pour reconstituer l'évolution de la morphologie manquent souvent de données pour les valider.

En nous appuyant sur notre expérience dans la quantification de l'exhumation, de l'analyse des phases de déformation, de la dynamique des bassins sédimentaires et des analyses géochimiques nous nous proposons de quantifier l'évolution spatiale et temporelle de la topographie, de l'érosion, de l'exhumation, de la tectonique, et du climat sur des objets naturels. Cette quantification servira de base à l'élaboration de modèles conceptuels mettant en avant l'influence des facteurs externes et internes. Elle pourra également servir à la paramétrisation et ou au test des modèles analogiques et numériques.

L'évolution du relief sera retracée indirectement via les enregistrements sédimentaires dans les bassins périphériques (sédimentologie, pétrographie et palynologie) et l'analyse des isotopes stables piégés dans les inclusions fluides, celle de l'exhumation en combinant l'analyse structurale et la thermochronologie. Les zones cibles sont les Alpes occidentales pour les quelles un projet, financé par l'ANR, est en cours en collaboration avec l'université de Grenoble et les systèmes de l'Atlas et Himalaya – Tibet sur lesquels nous disposons d'une

grande expérience de terrain. La modélisation numérique sera utilisée tant pour le traitement des données (thermochronologie de basse température) que pour la simulation des processus d'érosion et de sédimentation à grande échelle (modèle DIBAFILL). La modélisation analogique ciblera des aspects précis des processus d'érosion, de transport et de dépôt des sédiments dans les rivières.

Ces recherches seront menées avec les moyens propres au laboratoire ou dans ou existants dans son environnement immédiat (microscopie optique, moyens de séparations minérales, analyse isotopes stables, Raman, cluster de calcul, MEB, matériel pour la préparation et l'analyse des grains de pollens: hottes, centrifugeuses, micropaléontologie des radiolaires) et grâce aux collaborations en cours (sondes ioniques, datation argon et U-Th/He, microsonde électronique).

*Autoévaluation* : O3, Q4, E3, F4, X1 C3, O3



Relief résultant de l'interaction entre tectonique et climat : vue aérienne du Tibet au nord de la syntaxe est Himalayenne.



Relief avec un fort contrôle tectonique : trace de faille normale active au Sud Tibet (Ama Drime horst)

### 3) Mécanismes de déformation et de localisation de la déformation.

*Participants* : P.H. Leloup, J.-E. Martelat, P. Allemand, G. Mahéo, Y. Ricard, S. Labrosse, M. Andreani.

Les observations de terrain montrent que les déformations de la lithosphère continentale peuvent être localisées dans des zones relativement étroites (zones de cisaillement) même jusqu'en faciès granulitique à des températures élevées ( $T > 850^{\circ}\text{C}$ ). Cependant il est difficile de quantifier les parts respectives de la déformation localisée et de la déformation diffuse et les paramètres qui contrôlent cette répartition. En conséquence, à l'échelle d'une zone de collision, certains proposent des modèles où la déformation est localisée sur quelques discontinuités majeures alors que pour d'autres ces discontinuités sont des épiphénomènes d'une déformation fondamentalement continue.

Si nous savons caractériser la géométrie le sens de mouvement et retracer l'évolution P-T pendant la déformation dans les zones de cisaillement, il est en revanche beaucoup plus difficile de mesurer des paramètres physiques, comme les paléo-contraintes différentielles et les paléo-vitesses de déformation. Il est également difficile de prendre en compte le fait que les zones de cisaillement sont souvent des systèmes chimiques ouverts où se localisent des circulations de fluides pouvant entraîner des modifications chimiques qui peuvent induire trajets P-T et/ou des âges apparents. D'autre part, les modèles numériques actuels, trop simplistes, peinent à localiser la déformation et les données expérimentales sont obtenues avec des paramètres irréalistes (vitesses de déformation 6 ordres de grandeur trop rapides, compositions simples). Il n'existe encore aucun modèle thermomécanique satisfaisant de zone de cisaillement ductile. Plusieurs questions fondamentales restent donc posées :

- Comment quantifier, dans le cas de déformations naturelles, les parts respectives de la déformation localisée et de la déformation diffuse ?
- Comment expliquer la localisation de la déformation ?
- Comment prendre en compte la localisation de la déformation dans les modèles numériques ?
- Comment évaluer le rôle joué par les fluides (liquides silicatés,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ...) dans les processus de déformation ?

Pour apporter des éléments de réponse à ces questions nous profiterons de notre longue expérience d'observation naturelle des gradients de déformation extrêmes (zones de cisaillement ductiles) à différents

niveaux structuraux en abordant l'étude des processus depuis l'échelle cristalline jusqu'à celle de la lithosphère. Après avoir obtenu des premiers résultats de mesure de vitesse de déformation à l'échelle d'un affleurement et de quelques Ma, nous désirons d'une part confronter des mesures locales de déformation et/ou de vitesses de déformation, à des mesures de paléo-contraintes (paléopiezomètres); et d'autre part caractériser la géométrie (analyses quantitatives par vectorisation) et la composition de roches polyminérales déformées représentatives de la croûte continentale depuis l'échelle de la lame mince (étude microtexturale) jusqu'à celle de la lithosphère (cartographie géologique et géochimique, imagerie satellite et géophysiques). L'étape finale de ce volet sera d'établir à partir des données naturelles obtenues des modèles thermomécaniques cohérents de la croûte continentale pour différents niveaux structuraux prenant en compte le rôle des fluides et ce même quand ils sont présents en faible quantité (<5%). Il est à noter que les zones de cisaillement ductiles contrôlent la majeure partie des minéralisations d'intérêt économiques et que leur étude a donc de fortes implications sociétales.

Ces recherches seront menées avec les moyens propres au laboratoire ou existants dans son environnement immédiat (microscopie optique, moyens de séparations minérales, ICPMS, Raman, accès aux microscopes MEB et MET du CLIM, cluster de calcul) et grâce aux collaborations en cours (sondes ioniques, EBSD, microsonde électronique). Il sera nécessaire de réaliser la jouvence des moyens de microscopie optique et d'acquisition d'image associée.

*Autoévaluation* : O4, Q3, E2, F3, X3, C3, O2