

Année 2013 – 2014

Unité de Recherche : Géosciences Montpellier

Équipe(s) : Dynamique de la lithosphère.

Encadrant(s) : J. Malavieille, A. Taboada & S. Dominguez



Les mécanismes de déformation associés à la mise en place des plis couchés kilométriques Hercyniens dans les Pyrénées : modèles analogiques, et étude de terrain.

Audrey Taillefer

Résumé

Dans les Pyrénées, dans une zone située au Sud du Pic du Midi d'Ossau, on observe de grandes nappes de plis couchés dont la mise en place est attribuée à une tectonique d'avant pays de la chaîne Hercynienne. Ces grands plis à flancs pluri-kilométriques se sont formés dans des niveaux structuraux peu profonds, comme le suggère l'absence de métamorphisme et la faible schistosité associée. Les mécanismes de formation de ce type de plis ont été étudiés à l'échelle d'un prisme orogénique grâce à une approche expérimentale [Perrin et al., 2013]. Des modèles analogiques dans lesquels un multicouche fragile-plastique est déformé dans un contexte de prisme soumis à l'érosion, ont permis de proposer une hypothèse originale. Dans la dynamique de formation d'un prisme orogénique, les alternances de couches fragiles/plastiques entraînent la formation et le déversement de grands plis, tandis que l'érosion les maintient à faible profondeur. Le déroulement des charnières synclinales, au sein de larges bandes de cisaillement, permet l'augmentation de l'amplitude de ces plis. En s'appuyant sur de nouvelles expériences mieux dimensionnées, et pour tester cette hypothèse, nous avons amélioré les matériaux et la procédure expérimentale. Nous avons caractérisé le comportement rhéologique de la plasticine utilisée, qui s'avère être un matériau élasto-plastique durcissant, ce qui est typique des roches carbonatées déformées dans la croûte supérieure. Cela en fait un bon analogue des roches plissées dans les prismes orogéniques soumis à l'érosion. Nous avons alors diminué sa résistance au cisaillement en réalisant des mélanges huile de vaseline-plasticine. Les tests effectués avec ce nouveau matériau dont le comportement a été mis à l'échelle, permettent de valider les hypothèses précédentes et de mieux comprendre les mécanismes de formation des grands plis couchés. Une étude structurale et microstructurale de la déformation observée dans les plis du Pic Moustardé, permet de faire le lien objet naturel/modèle analogique, et met en évidence une intense déformation à la fois plastique et cassante, autant dans les charnières que dans les flancs. Cette étude permet une meilleure compréhension du rôle de la rhéologie dans les mécanismes de plissement, et des processus de déformation actifs lors de la croissance des prismes orogéniques.

Mots clés : plasticine, modèle analogique, pli couché, Pyrénées, Moustardé

Table des matières

1 Remerciements	3
2 Introduction	3
3 Caractérisation de la rhéologie de la plasticine	4
3.1 Généralités sur la plasticine	4
3.2 Matériels et méthodes	5
3.2.1 Plasticines utilisées	5
3.2.2 Machine à paramètres	5
3.2.3 Rhéologie et mesures	7
3.3 Discussion : La Plasticine comme analogue de roches	12
4 Amélioration des modèles analogiques de plissement à grande échelle.	13
4.1 Les problèmes de dimensionnement dans les expériences précédentes.	13
4.2 Matériels et méthode	15
4.2.1 Elaboration d'une couche de 1 mm de plasticine faible	15
4.2.2 Réalisation du modèle en boîte à sable	15
4.3 Résultats	16
5 Caractérisation de la déformation sur le terrain	18
5.1 Contexte géologique régional	18
5.2 Description des unités sédimentaires	19
5.3 Etude tectonique et micro-tectonique des plis du Moustardé	21
6 Discussion et perspectives	25
7 Conclusion	27

1 Remerciements

Je remercie mes rapporteurs, Laurie Barrier et Jean Besse, d'avoir pris du temps pour lire et juger ce travail.

Pour ta confiance, et pour avoir partagé avec moi ta passion pour les montagnes, la recherche, l'expérimentation, et ce décevant pique-nique sur les flancs du Moustardé, Jacques, un grand merci !

Je remercie aussi Alfredo Taboada pour ses critiques constructives, et Stephane Dominguez pour son implication dans les manip (et pour son rire discret dans le couloir). Merci de tout coeur à Christian Romano pour m'avoir enseigné les saintes bases du bricolage, et pour avoir réparé mes bêtises sans décrocher son sourire. Merci à Eric Berthebaud pour son aide et sa sympathie. Merci aussi aux étudiants pour les repas du vendredi, en particulier à Manon pour avoir partagé avec moi bien plus que son bureau. Merci au personnel de GM : vous assurez, toujours avec le sourire.

Enfin un remerciement tout spécial à mes deux collocs pour m'avoir enseigné la nécessité d'une alimentation équilibrée, les bienfaits du sport, et les qualités musicales de Manu Chao. Vous êtes au top !

2 Introduction

Dans les Pyrénées, au niveau de la haute vallée du Gave du Brousset, située au Sud du Pic du midi d'Ossau, on observe de grandes nappes de plis couchés dont la mise en place est attribuée à une tectonique d'avant pays de la chaîne Hercynienne [Mirouse, 1966, Matte, 2002].

De telles structures sont caractéristiques des avant-pays de prismes orogéniques. On les retrouve par exemple dans les nappes du Versant Sud de la Montagne Noire [Arthaud, 1970] où seuls les flancs inverses sont conservés. Ces plis ont comme particularité de présenter très peu de schistosité et pratiquement pas de métamorphisme, suggérant qu'ils se sont développés à des profondeurs qui n'ont jamais excédé 4 ou 5 km. Les mécanismes de plissement sont pourtant associés à des déformations ductiles caractéristiques des niveaux structuraux profonds. Cela pose la question de la détermination du mécanisme de leur genèse dans un contexte de prisme orogénique.

Cette question a été abordée par Perrin et al. [2013] à l'échelle d'un prisme orogénique, grâce à une approche expérimentale. Des modèles analogiques dans lesquels un multicouche fragile-plastique est déformé dans un contexte de prisme soumis à l'érosion, ont permis de proposer une hypothèse originale. Dans la dynamique de formation d'un prisme orogénique, les alternances de couches fragiles/plastiques entraînent la formation et le déversement de grands plis, tandis que l'érosion les maintient à faible profondeur. Le mécanisme proposé de mise en place de ces plis est un déroulement des charnières synclinales, au sein de larges bandes de cisaillement, permettant l'augmentation de l'amplitude de ces plis.

Ces expériences nécessitent l'utilisation d'un matériau très différent de ceux, granulaires, habituellement utilisés dans les modèles analogiques de type boîte à sable. En effet, la croûte supérieure, soumise au plissement dans les prismes d'accrétion, est constituée de divers matériaux, présentant des caractéristiques rhéologiques différentes. Ce contraste lithologique est essentiel pour permettre le plissement [Biot, 1961, Kobberger and Zulauf, 1995, Cobbold, 1975, Bazalgette and Petit, 2007]. Le sable a un comportement fragile [Perrin et al., 2013, Graveleau et al., 2012, Malavieille, 2010] et forme seulement des failles. Pour former des plis, il faut introduire une couche de plasticine plus ductile et plus résistante. Un tel matériau avait déjà été utilisé par Pastor-Galán et al. [2012] pour l'étude des mécanismes de plissement.

L'étude de la rhéologie de certaines plasticines [Zulauf and Zulauf, 2004] a mis en évidence son comportement plastique. Néanmoins, la plasticine utilisée dans les modèles analogiques de Perrin et al. [2013] a un comportement et une résistance mal connus. Cela limite notre estimation du contraste rhéologique entre la plasticine et le sable, et empêche un dimensionnement correct des expériences.

Pour valider l'utilisation de la plasticine dans les modèles analogiques, et confirmer la validité des mécanismes de plissement proposés, il faut dimensionner ce matériau pour s'assurer qu'il peut servir d'analogie de roches. Cette étude présente quelques tests réalisés sur cette plasticine pour mieux connaître sa résistance et son comportement. De nouveaux matériaux moins résistants à base de plasticine et d'huile de vaseline, mis au point dans le but d'améliorer le dimensionnement, sont également testés.

La compréhension des mécanismes de formation des plis couchés, et la validation de l'hypothèse de déroulement de la charnière synclinale, nécessitent une comparaison entre les modèles analogiques et les objets naturels. Les indices de déformations qui pourraient être les témoins de la cinématique du plissement Hercynien au Sud des Pyrénées, ont fait l'objet d'une étude tectonique et micro-tectonique sur le terrain, au Pic de Moustardé.

Ce travail permet une meilleure compréhension du rôle de la rhéologie dans les mécanismes de plissement, et des processus de déformation actifs lors de la croissance des prismes orogéniques.

3 Caractérisation de la rhéologie de la plasticine

3.1 Généralités sur la plasticine

La plasticine est une pâte à modeler industrielle composée d'huiles minérales, de cires, et de charges, minérales (calcite, dolomie) ou organiques (féculé de pomme de terre). La taille de ces charges varie de 0,5 à 10 microns [McClay, 1976, Peltzer, 1983]. Sa composition exacte est tenue secrète par les industriels.

Elle suit une loi de fluage « power law creep » dépendante du temps, du taux de déformation [Ji et al., 2009] et de la température [Zulauf and Zulauf, 2004, McClay, 1976],

$$\dot{\epsilon} = C(T) \cdot \sigma^n \quad (1)$$

où $\dot{\epsilon}$ est le taux de déformation (s^{-1}), C est la constante de matériel (fonction de la température), σ la contrainte différentielle (Pa), et n l'exposant de contrainte. [Peltzer, 1983, Zulauf and Zulauf, 2004].

L'exposant de contrainte n est généralement compris entre 3 et 5 pour les roches en général d'après Fossen [2010], et entre 2 et 5 pour les matériaux granulaires [Zulauf and Zulauf, 2004]. Il est également compris entre 6 et 9 pour la plasticine, et pour certaines roches (marbres, calcaires) [McClay, 1976, Barnhoorn et al., 2004].

Il a été montré que la résistance de ce matériau est dépendante du taux de déformation, et qu'elle augmente lorsque la température diminue. [Zulauf and Zulauf, 2004, Ji et al., 2009]. Nous allons donc contrôler la température ambiante de la pièce durant nos expériences.

3.2 Matériels et méthodes

3.2.1 Plasticines utilisées

La plasticine utilisée dans les expériences de Perrin et al. [2013] est de la marque Plastiline® du groupe J.Herbin, de dureté 40 (appellation "très souple"), et de couleur grise. Elle est composée de charges minérales d'une granulométrie moyenne de 15 *microns*. Sa densité est de 1,6 à 1,7, et sa viscosité de 20 *dPa.s* à $T = 100\text{ °C}$ et de 30 *dPa.s* à $T = 80\text{ °C}$ (informations du fabricant).

C'est une plasticine de fabrication française, ce qui permet un approvisionnement facile. Il est possible de la faire fondre en la chauffant : cela permet de l'homogénéiser, et de faire des mélanges, ce qui représente un avantage considérable. Les mélanges sont réalisés à partir d'huile de vaseline de la marque Degryp'oil®.

Un autre type de plasticine (Beck's red du groupe Allemand ©Becks Plastilin) a également été testé. Celle-ci est composée de charges organiques sous forme de fécule de pomme de terre. Il est donc impossible de la faire fondre en la chauffant au risque de la cuire et de modifier ses propriétés. Sa mise en place dans les cellules de déformation est difficile car elle reste très visqueuse, même en la ramollissant dans un bain marie avec une eau relativement chaude.

Elle a pour inconvénient supplémentaire de garder en mémoire les déformations successives héritées des phases de pétrissage et de mise en place dans les machines. Le pétrissage entraîne la formation de plans de discontinuité au sein du matériau (zones de faiblesse) qui modifient son comportement. Cependant, des tests en compression uniaxiale avaient déjà été réalisés sur cette plasticine par Zulauf and Zulauf [2004]. Aussi nous a-t-il semblé essentiel de tester la Beck's Red afin de valider notre démarche, par comparaison avec les valeurs obtenues par ces auteurs.

La plasticine industrielle initiale est supposée trop résistante pour que le contraste rhéologique avec le sable dans les expériences soit représentatif des conditions observées dans la nature. J'ai donc également procédé au dimensionnement et à la caractérisation de nouveaux matériaux, composés d'un mélange de plasticine et d'huile de vaseline, à la fois ductiles et moins résistants.

3.2.2 Machine à paramètres

La plasticine a tout d'abord été testée dans un appareil à cisaillement annulaire, normalement conçu pour l'étude des sols et des argiles. L'avantage de cet appareil est qu'il permet d'imposer un régime en cisaillement simple sur de grandes déformations.

L'inconvénient d'un tel dispositif est qu'il est impossible de voir ce qui se passe dans l'échantillon. Au vu des tests effectués, on soupçonne que le matériau ne se déforme pas uniformément, et qu'il pourrait bien se produire des glissements difficiles à détecter entre le couvercle et la plasticine. De plus, les matériaux les plus faibles ont tendance à fluer du fait du confinement et sont expulsés de la boîte pendant le cisaillement. Enfin, les capteurs de force n'ont pas la précision suffisante pour mesurer le cisaillement des matériaux les plus faibles.

Il est enfin impossible de tester la Beck's Red avec cet appareil, car la cellule est trop petite pour qu'on puisse l'y mouler. C'est pourquoi nous avons mis au point un nouveau protocole expérimental pour effectuer des tests de déformation en utilisant la machine à paramètres conçue et réalisée au sein du Laboratoire GM.

Cette machine permet un suivi visuel et photographique de la déformation de l'échantillon. Ce prototype permet de tester plusieurs modes de déformation (cisaillement annulaire, traction et compression pure, voir Fig.1) et laisse le choix de l'épaisseur de matériau à cisailier. En

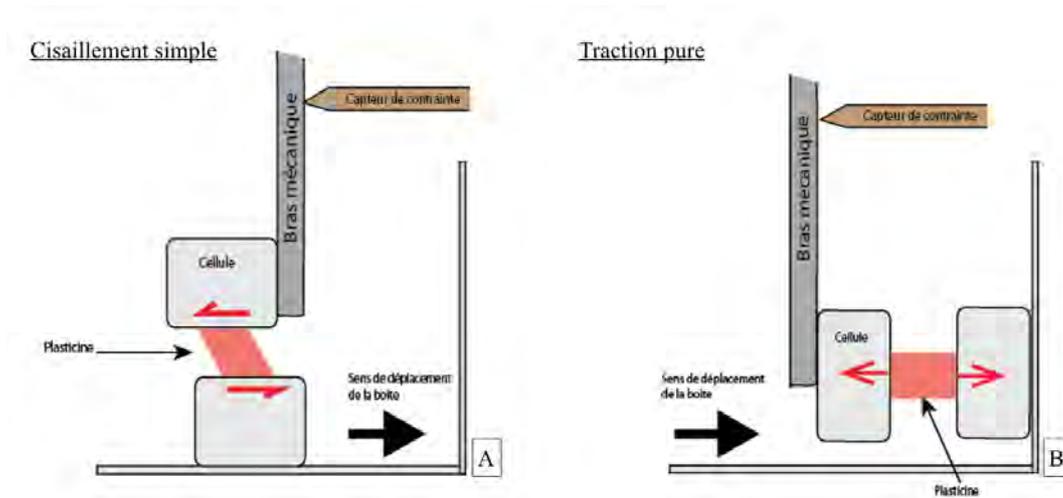


FIGURE 1 – Schéma du montage expérimental sur la machine à paramètres. A : Configuration en cisaillement simple. B : Configuration en traction pure.

revanche, les temps de préparation de la cellule sont longs (le processus étant plutôt artisanal), et les éprouvettes sont fragiles, ce qui complique le transport et la mise en place.

Les modèles analogiques de plissement mettent en évidence un déroulement des charnières synclinales. L'évolution de la déformation pendant le plissement suggère que les charnières de plis pourraient se dérouler selon deux modes : soit selon un mode en traction assisté par la couche plastique résistante, soit à cause de la compression induite par le cisaillement d'une large bande de matériau affecté par les chevauchements liés à la croissance du prisme. Afin d'améliorer les modèles expérimentaux et tenter de répondre à ces questions, nous avons testé la plasticine selon les deux configurations suivantes :

- En cisaillement simple (Fig.1.A.) : c'est la configuration la plus efficace. La plasticine ne se déchausse pas de la cellule, et le suivi photographique est facile.
- En traction pure (Fig.1.B.) : les résultats de ce dispositif sont moins concluants car la plasticine a tendance à se déchausser de la cellule. Il semble que la déformation se concentre plus rapidement sur les plans de faiblesse de l'éprouvette que dans les tests en cisaillement simple.

Les éprouvettes de plasticine sont testées dans une cellule en forme de pavé, comportant un compartiment supérieur et un inférieur de même dimension, séparés d'une épaisseur régulière de matériel à tester (quelques centimètres).

Nous avons dû mettre au point un protocole de mise en place de la plasticine à l'intérieur de la cellule de déformation : la plasticine grise est chauffée jusqu'à ce qu'elle atteigne un état liquide, garantissant son homogénéité, puis elle est coulée à chaud à l'intérieur de la cellule de déformation. Elle refroidit durant quelques heures. En utilisant des guides de quelques centimètres de largeur, on façonne l'éprouvette de plasticine à l'aide d'un fil à découper. On obtient alors une éprouvette aux dimensions désirées, parfaitement couplée aux deux parties de la machine. Les expériences sont réalisées à une température constante de 20 °C (pièce climatisée du laboratoire dans laquelle sont réalisées toutes les expériences.).

La partie inférieure de la cellule est fixée à une base mobile, tandis que la partie supérieure est fixée à un bras mobile, qui appuie sur un capteur de contraintes (Fig.1 et Fig.2).

Un système de pilotage par ordinateur (à l'aide du programme Charly Param. X) permet

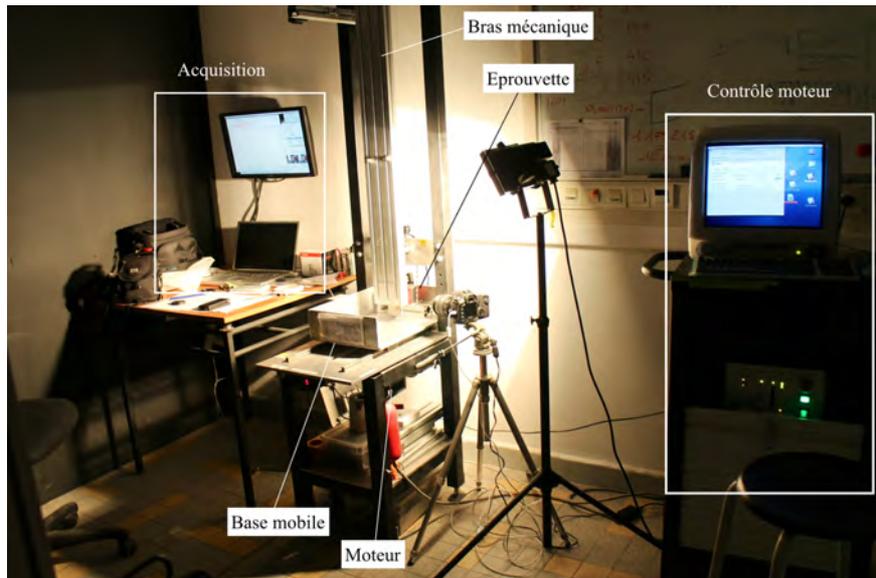


FIGURE 2 – Photographie commentée du dispositif expérimental. La machine à paramètres se situe au centre de l'ensemble. L'échantillon est actuellement déformé par le déplacement du compartiment inférieur, contrôlé par ordinateur, et suivi photographiquement. Un autre ordinateur assure l'acquisition des données.

d'imposer le déplacement en *pas*, et la vitesse en *Hz* du moteur, qui le transmet à la base. La déformation se produit lorsque le compartiment inférieur se déplace, alors que le bras appuie sur le capteur qui enregistre alors la résistance du matériau (au cisaillement ou à la traction, suivant la configuration choisie).

Dans le cas de l'expérience en cisaillement simple (Fig.1.A.), l'ensemble cellule inférieure, cellule supérieure, et éprouvette de matériau, sont placés à la verticale du côté du bras mécanique inverse au capteur. Lorsque le moteur est lancé, la base se déplace dans le sens du capteur de force, tandis que la cellule supérieure reste fixe. Le cisaillement se produit entre les deux cellules.

Dans le cas de la configuration en traction pure (Fig.1.B.), l'ensemble cellule inférieure-cellule supérieure, et éprouvette de matériau, sont placés à l'horizontale, du côté du capteur. La base se déplace vers le capteur, et la plasticine est étirée entre les deux cellules, dont l'une est fixe, tandis que l'autre s'éloigne de la première.

Un autre programme permet l'acquisition des données de forces enregistrées par le capteur en fonction du temps. Un appareil photo placé sur un des bord de la machine prend des photographies à intervalle de temps régulier au cours de l'expérience (Fig.2).

3.2.3 Rhéologie et mesures

Lors de ces expériences, deux types de déformations sont imposés : une déformation en cisaillement simple, et une déformation en traction.

Dans le cas du cisaillement simple (voir Fig.3), on calcule un cisaillement γ et un taux de cisaillement $\dot{\gamma}$.

$$\gamma = \frac{u}{h} \quad (2)$$

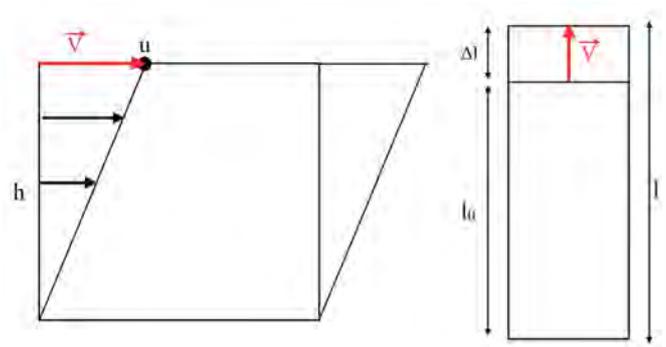


FIGURE 3 – Schéma récapitulatif des éléments considérés dans les calculs de déformation dans le cas du cisaillement simple (à gauche) et dans le cas de la traction (à droite). V (m/s) est la vitesse de cisaillement (respectivement, de déformation), u le déplacement (m), h l'épaisseur de matériau cisailé (m), l_0 la longueur initiale de matériau (m), l la longueur de matériau en fonction du temps (m), et Δl l'allongement du matériau ($l_0 - l(m)$)

$$\dot{\gamma} = \frac{d u}{d t h} = \frac{1}{h} \frac{d u}{d t} = \frac{V}{h} \quad (3)$$

où γ est la valeur du cisaillement, u le déplacement (m), h la hauteur de matériel cisailé (m), V la vitesse de cisaillement ($m.s^{-1}$), et $\dot{\gamma}$ le taux de cisaillement (s^{-1}).

Dans le cas de la traction (voir Fig.3), on calcule une déformation ϵ et un taux de déformation $\dot{\epsilon}$ (s^{-1}).

$$\epsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (4)$$

$$\dot{\epsilon} = \frac{d \Delta l}{d t l_0} = \frac{1}{l_0} \frac{d \Delta l}{d t} = \frac{V}{l_0} \quad (5)$$

où V correspond à la vitesse de déformation ($m.s^{-1}$), l_0 à la longueur initiale de matériau (m), l la longueur du matériau au cours du temps (m), et $\Delta l = l_0 - l$ l'allongement du matériau.

La résistance au cisaillement τ_{max} est la force F (N) enregistrée par le capteur par unité de surface :

$$\tau_{max} = \frac{F}{S} \quad (6)$$

où S est la surface de la section de l'éprouvette cisailée (m^2).

Dans le cas d'un cisaillement simple, la viscosité dynamique η ($Pa.s$) est calculée en accord avec la configuration en cisaillement simple du cercle de Mohr (Fig.4.A.), sur un plan horizontal tel que la contrainte cisailante τ_{max} est maximale.

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad (7)$$

Dans le cas d'une traction pure, la viscosité dynamique η ($Pa.s$) est calculée en accord avec la configuration en traction du cercle de Mohr (Fig.4.B.), pour une valeur de déformation donnée.

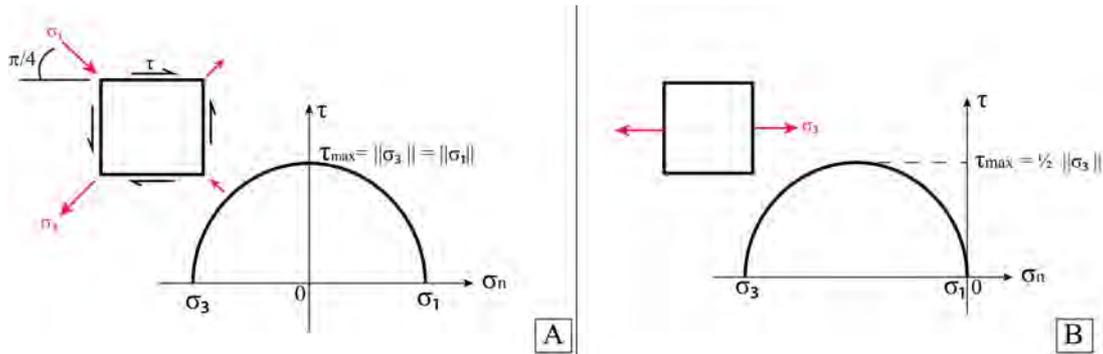


FIGURE 4 – Représentation du cercle de Mohr pour une déformation A) en cisaillement simple B) en traction.

$$\eta = \frac{\sigma}{2\dot{\epsilon}} \quad (8)$$

où σ contrainte normale (Pa), et $\dot{\epsilon}$ le taux de déformation (s^{-1}).

La configuration de la machine à paramètres, et le protocole de fabrication des éprouvettes de plasticine, nous ont permis de caractériser la plasticine grise pure, ainsi qu'un mélange 95% plasticine - 5% de vaseline, et la plasticine rouge Beck's Red, déjà testée par [Zulauf and Zulauf \[2004\]](#).

Nous avons procédé à plusieurs expériences en faisant varier les vitesses de déformations ($10^{-4} s^{-1}$, $10^{-3} s^{-1}$, $2.10^{-3} s^{-1}$), selon les modes de déformation en cisaillement simple et en traction pure.

Les courbes obtenues à partir de ces tests ont la même forme, caractéristique des déformations plastiques (voir Fig.5) : la première partie de la courbe montre une pente positive extrêmement raide, correspondant au passage du comportement élastique au comportement plastique jusqu'à un seuil de 2 à 5% de déformation, comme l'avait montré [McClay \[1976\]](#).

Le comportement est ensuite plastique jusqu'à ce que la résistance atteigne un plateau pour des valeurs de déformation de 30 à 50%, comme observé par [McClay \[1976\]](#) et [Peltzer \[1983\]](#).

Les valeurs de résistance décroissent alors régulièrement. Cette dernière phase « adoucissante » est interprétée par [Peltzer \[1983\]](#) et [Zulauf and Zulauf \[2004\]](#) comme étant liée à l'apparition d'inhomogénéités dans la plasticine (zones de localisation), ce que l'on peut effectivement observer sur les photographies d'expériences présentées sur la Fig.5

La Fig.6 est un schéma expliquant le comportement d'un matériau plastique en fonction de la forme de la courbe contrainte-déformation. Après le chargement élastique, la phase plastique peut s'exprimer selon trois comportements :

Le comportement durcissant est caractérisé par une augmentation de la résistance avec la déformation. Le comportement est stable (« steady-state ») lorsque la courbe contrainte - déformation présente un plateau dans sa partie plastique. Enfin, le comportement est dit adoucissant lorsque la résistance diminue avec la déformation.

Lorsque le comportement est durcissant, cela signifie que le matériau résiste à la contrainte. Ce phénomène serait dû aux interactions entre les particules composant les charges minérales. Plus il y a de particules rigides dans la plasticine, plus elle est résistante [[Zulauf and Zulauf, 2004](#)]. A l'échelle atomique, cela correspond à la formation et au déplacement de dislocations

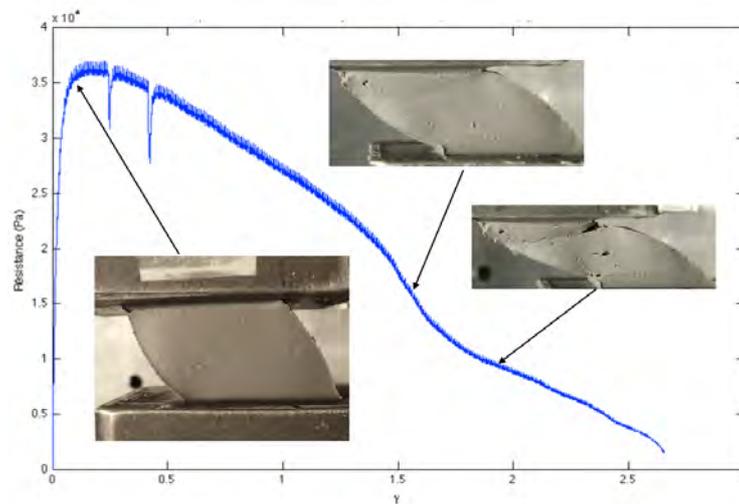


FIGURE 5 – Résistance de la plasticine dans la machine à paramètres, configuration en cisaillement simple. Les photos illustrent les déformations observées dans le matériau lors de grands cisaillements, à différents stades de l'expérience.

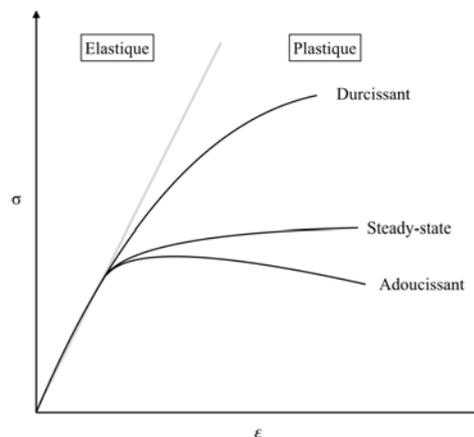


FIGURE 6 – Courbe schématique typique des déformations plastiques. Après un chargement élastique, la déformation devient plastique, selon trois modes : durcissant, steady-state, ou adoucissant (modifié d'après Fossen [2010] .)

durant la phase de déformation plastique. Elles s'enchevêtrent, ce qui rend la déformation plus difficile à accumuler, nécessitant plus de contraintes pour déformer le matériau [Fossen, 2010].

En revanche, le comportement adoucissant concerne surtout les plasticines dont les charges sont organiques (ce qui limite les interactions évoquées ci dessus), et les mélanges plasticines huiles (dans lesquelles les charges minérales sont « diluées » dans la matrice, et donc interagissent moins entre elles) [Zulauf and Zulauf, 2004]. Ce comportement s'explique à l'échelle atomique par un mode de dislocation de type « climb ».

Cependant, les quantités de déformation subies par la couche de plasticine dans la charnière des plis sont très petites. De plus, comme il est expliqué dans le paragraphe précédent, les

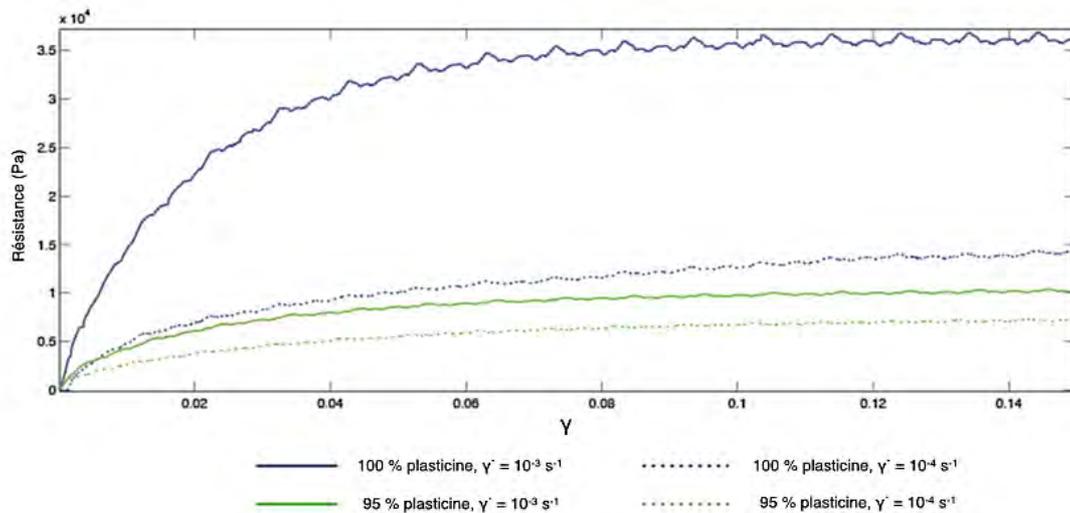


FIGURE 7 – Influence du taux de cisaillement et de la composition sur la résistance de la plasticine en fonction du cisaillement, dans la configuration en cisaillement simple de la machine à paramètres. Plus le taux de cisaillement est élevé, plus la résistance augmente. Plus la plasticine est pure, plus elle est résistante. La plasticine rouge est moins sensible au taux de cisaillement que la plasticine grise.

déformations pour lesquelles la plasticine se déforme de façon plastique et homogène sont inférieures à 30% [McClay, 1976, Peltzer, 1983]. Dans son étude sur la plasticine, Zulauf and Zulauf [2004] ne se s'intéressent au comportement mécanique de la plasticine que pour des déformations inférieures à 15%. Afin de rester cohérents avec ces auteurs et avec notre démarche, nous ne considérerons plus que les résultats obtenus pour de faibles déformations :

La Fig.7 représente la résistance de la plasticine pure, et celle du mélange 95% plasticine - 5% vaseline, en fonction du taux de cisaillement dans le matériau, pour les tests en cisaillement simple, pour de faibles déformations.

Comme nous l'avons discuté pour la Fig.5, et à l'aide de la Fig.6, on constate que la plasticine adopte un comportement plastique durcissant après une phase de chargement élastique.

La forme irrégulière "en marche d'escalier" des courbes, est due à l'utilisation d'un moteur pas à pas. Même si l'effet est infime, la déformation n'est pas totalement continue. Cet effet est d'autant plus présent que la vitesse de déformation est lente. Dans un cas idéal, il faudrait utiliser un moteur continu.

Les valeurs de résistance de la plasticine pour des vitesses de cisaillement plus élevées sont plus grandes que pour des vitesses plus faibles : la plasticine est donc bien un matériau dépendant du taux de déformation, résistant à la contrainte, caractéristique d'un comportement visqueux.

Pour les mêmes vitesses de déformation, les valeurs de résistance d'un mélange à 95% de plasticine - 5% de vaseline sont très inférieures à celles de la plasticine pure. Nous avons donc confirmation que nous pouvons créer de nouveaux matériaux beaucoup plus faibles que la plasticine industrielle pure qui nous sert de matériau de base.

Nous avons également effectué des tests sur la plasticine Beck's red, afin de valider nos résultats en les comparant avec des études déjà réalisées. Zulauf and Zulauf [2004] avait testé la "Beck's orange", qui a la même composition que la "Beck's red". Une valeur de viscosité avait été calculée pour 10% de déformation, à un taux de déformation de $4,10^{-3} \text{ s}^{-1}$ et pour une température de 20°C : $8,10.10^6 \text{ Pa.s}$. Dans les mêmes conditions, nous trouvons pour la plasticine rouge une

viscosité de $8,50 \cdot 10^6 \text{ Pa.s}$.

Bien que l'écart puisse être justifié par les différences de protocole expérimental, et par le fait que la plasticine rouge comporte des plans préférentiels de déformation, ces valeurs restent néanmoins très proches. Cela nous permet de valider à la fois notre protocole, les valeurs de résistance obtenues précédemment, et les conclusions associées.

Les courbes des essais en traction montrent des résistances assez faibles. On ne constate pas de différence de résistance selon le taux de déformation appliqué, et parfois même des comportements adoucissants. Le protocole expérimental en traction n'est pas encore assez fiable et satisfaisant pour que nous puissions présenter des résultats consistants dans cette étude.

3.3 Discussion : La Plasticine comme analogue de roches

L'intérêt de notre étude de caractérisation de la plasticine est de déterminer dans quelle mesure elle peut être assimilée à une roche se déformant dans la croûte supérieure, et ainsi mieux dimensionner nos expériences de plissement à l'échelle d'un prisme d'avant-pays.

La déformation plastique est associée aux mécanismes de déformation à l'échelle atomique, tels les dislocations, et dépend donc de nombreux paramètres physiques (température, énergie d'activation, . . .) [Fossen, 2010].

Ces modes de déformation se retrouvent également dans les roches. En particulier, certaines roches (marbres et calcaires par exemple) se déforment de façon plastique, selon une loi de puissance, tout comme la plasticine [Zulauf and Zulauf, 2004, Barnhoorn et al., 2004]. De même, dans les domaines structuraux qui nous concernent, les processus de déformation par des mécanismes de dissolution sous pression - recristallisation peuvent être très efficaces [Gratier, 1984].

Ainsi, pour pouvoir utiliser la plasticine comme analogue de roche, il est nécessaire que les deux matériaux aient le même exposant de contrainte n , et que les courbes contraintes - taux de déformation aient la même forme pour l'axe des contraintes [Zulauf and Zulauf, 2004, Schöpfer and Zulauf, 2002]. Cela permet de vérifier que les deux matériaux se déforment selon les mêmes processus à l'échelle atomique.

Lorsque l'on compare les courbes de résistance du marbre de Carrare en fonction de la déformation en cisaillement simple, par Barnhoorn et al. [2004], on constate qu'elles ont la même forme que les courbes de résistance de la plasticine que nous avons testée, ce qui est un premier argument pour valider l'utilisation de la plasticine comme analogue de ces roches.

De plus, d'après Zulauf and Zulauf [2004], les roches qui se déforment par fluage, avec des mécanismes de déformation associés par dislocation « climb », ont des comportements adoucissants, plutôt caractéristiques du comportement des roches crustales en profondeur (croûte inférieure et manteaux supérieur). Pour modéliser ces déformations, on utilisera alors des mélanges plasticines-huiles, ou les plasticines très souples ne présentant pas de durcissement [Schöpfer and Zulauf, 2002]. En revanche, les plasticines ayant un comportement durcissants seront de bons analogues du comportement mécanique dans la croûte supérieure de certaines roches telles que les marbres, le quartz, et certains calcaires dans la croûte supérieure.

D'après Zulauf and Zulauf [2004] les comportements durcissants sont particulièrement caractéristiques des roches soumises à une diminution de températures lors d'une exhumation depuis des niveaux structuraux plus profonds. Lors de ce processus, les dislocations par climb sont inhibées du fait de l'abaissement de la température, et le matériau résiste. Un tel comportement correspond à celui que l'on souhaite reproduire dans les modèles analogiques de prismes

soumis à l'érosion. Les plasticines ayant un comportement durcissant sont donc plus adaptées pour de telles expériences que les plasticines trop faibles.

Barnhoorn et al. [2004] montrent que dans le marbre de Carrare, les déformations se font essentiellement par des processus de dislocation creep (dans les gammes de températures et de taux de déformation qui nous intéressent). La déformation est essentiellement plastique, et la phase de durcissement est associée à un mûlage de la calcite. Lorsque les déformations deviennent plus grandes, le début d'une phase de recristallisation marque le début de l'adoucissement à la contrainte.

Les plasticines testées montrent des comportements plutôt durcissants, bien qu'on puisse adapter leur résistance. Elles se déforment plastiquement de la même manière que des roches carbonatées, soumises à une surrection depuis des niveaux structuraux plus profonds. Il existe donc un vrai contraste rhéologique entre ces plasticines et le sable au comportement fragile.

4 Amélioration des modèles analogiques de plissement à grande échelle.

4.1 Les problèmes de dimensionnement dans les expériences précédentes.

Les modèles analogiques réalisés par Perrin et al. [2013] ont permis d'obtenir des plis couchés dans un contexte de prisme orogénique, grâce à l'insertion d'une couche de plasticine commerciale (celle testée dans le chapitre précédent) dans une alternance multicouche de sable et de microbilles de verre. L'utilisation de ce matériau pose un problème de dimensionnement entre les modèles analogiques et la nature. Bien qu'il existe un contraste rhéologique entre les différents matériaux (calcaires, shales,...) qui constituent les séries d'avant-pays de chaînes impliquées dans le plissement, les résistances des matériaux restent du même ordre de grandeur.

On considère le cas simple de la croissance d'un prisme orogénique sans érosion et sans niveau de décollement (Fig.8) : une couche de plasticine de 1 mm d'épaisseur repose sur une épaisseur de 1 cm de sable, et est recouverte par 2,2 cm de sable.

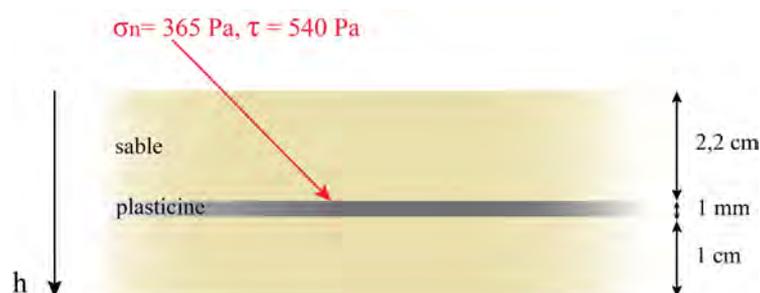


FIGURE 8 – Configuration de la plasticine au sein d'un prisme orogénique constitué de sable, lors de la réalisation de modèles analogiques par Perrin et al. [2013] avec de la plasticine pure, repris dans cette étude avec un mélange 95% plasticine - 5% vaseline.

La résistance au cisaillement τ_{max} (Pa) du sable à la profondeur à laquelle se situe la couche de plasticine est calculée grâce au critère de Coulomb :

$$\tau = \sigma_n \tan(\phi) + C \quad (9)$$

où σ_n est la contrainte normale (Pa), ϕ est l'angle de friction interne du sable ($\approx 30^\circ$), et C est la cohésion du matériau (Pa).

La contrainte verticale σ_V équivaut à une pression lithostatique :

$$\sigma_V = \rho gh \quad (10)$$

où ρ est la masse volumique du sable ($kg.m^{-3}$), g l'accélération de la pesanteur ($\approx 9,81 m.s^{-2}$) et h l'épaisseur de sable sus-jacente (m).

L'angle de friction du sable ϕ est déduit de la relation :

$$\mu = \tan(\phi) \quad (11)$$

avec μ coefficient de friction interne du sable.

Le sable utilisé dans les expériences a une masse volumique de $1690 kg.m^3$, un coefficient de friction interne $\mu = \tan(\phi) = 0,57$ et une cohésion C de 100-200 Pa. La couche de plasticine se situe à une profondeur de $2,2.10^{-2} m$.

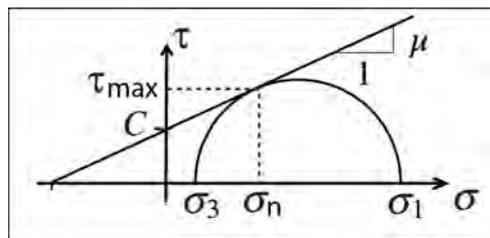


FIGURE 9 – Schéma théorique du cercle de Mohr et de l'enveloppe de rupture d'un matériau cassant. L'enveloppe de rupture est définie par la cohésion C (Pa) du matériau, et par le coefficient de friction μ , déterminé à partir d'essais de cisaillement. τ (Pa) est la résistance au cisaillement, en fonction de σ (Pa), la contrainte normale. σ_1 et σ_3 représentent respectivement la contrainte horizontale (σ_H) et la contrainte verticale σ_V (Pa) en régime compressif. τ_{max} est la résistance au cisaillement du matériau le long d'un plan de rupture néoformé (Pa), i.e., situé à l'intersection entre le cercle de Mohr et l'enveloppe de rupture.

On en déduit que la contrainte verticale σ_3 subie par le sable à proximité de la plasticine est de 365 Pa. En prenant une cohésion C moyenne de 150 Pa, et en supposant une rupture en cisaillement le long d'un plan néoformé à pendage 30° , on déduit que la contrainte normale sur ce plan est de 677 Pa, et la résistance au cisaillement sur ce plan $\tau_{max} = 540$ Pa. Le tenseur de contrainte sur un petit élément de volume situé au voisinage de la couche de plasticine est donné par une contrainte verticale $\sigma_3 = 365$ Pa et une contrainte horizontale $\sigma_1 = 1615$ Pa. L'état de rupture est caractérisé par un cercle de Mohr qui est tangent à l'enveloppe de rupture définie par une droite avec un pendage de 30° , décalé de 150 Pa sur l'axe des ordonnées (cohésion C du matériau) (Fig.9).

Lors des expériences réalisées par Perrin et al. [2013], la plasticine était utilisée pure. La figure 7 montre que, en admettant un taux de déformation de $10^{-3} s^{-1}$, la résistance de cette plasticine pure est de 35000 Pa, soit 65 fois trop importante par rapport à la résistance au cisaillement du sable.

Il existe un contraste rhéologique beaucoup trop important entre la couche de plasticine et le sable qui l'encadre. C'est ce problème de dimensionnement qui a motivé ces tests sur la plasticine, et la réalisation de mélanges moins résistants. Le mélange 95% plasticine - 5% vaseline

a une résistance d'environ $7000 Pa$. Bien que cette valeur soit encore trop importante d'un ordre de grandeur par rapport à la résistance du sable, nous avons amélioré le dimensionnement de l'expérience.

Afin de mesurer l'impact de cette diminution de résistance dans les modèles analogiques, nous avons réalisé la même expérience que Perrin et al. [2013], en remplaçant la couche de plasticine pure par une couche de mélange 95% plasticine - 5% vaseline.

4.2 Matériels et méthode

4.2.1 Elaboration d'une couche de 1 mm de plasticine faible

La boîte à sable dans laquelle l'expérience est réalisée est longue $300 cm$ et large de $10 cm$. La couche de mélange plasticine - vaseline doit être la plus mince possible (dans notre cas, $1 mm$) pour se rapprocher au maximum des conditions naturelles. C'est néanmoins un matériau très faible, difficile à manipuler.

On plaque une feuille de papier sulfurisé sur une plaque de verre d'une vingtaine de centimètres de large, et de plus de deux mètres de long. Deux baguettes métalliques de $1 mm$ d'épaisseur sont alors fixées sur les deux rebords de la plaque de verre recouverte de papier sulfurisé.

Le mélange plasticine - vaseline est réalisé à chaud, puis coulé à l'état liquide sur la plaque, entre les deux baguettes métalliques, de façon à légèrement déborder par dessus. Une fois la plasticine refroidie, le surplus est raclé à l'aide d'une plaque en PVC en appui à la verticale sur les deux baguettes métalliques qui servent de guides. Lorsque le surplus est retiré, il ne reste plus que la couche de plasticine d' $1 mm$ d'épaisseur qu'on peut alors tailler à la largeur souhaitée ($9,7 cm$ pour éviter les effets de frottement de plasticine contre les vitres de la boîte à sable) et démouler facilement grâce au papier sulfurisé.

4.2.2 Réalisation du modèle en boîte à sable

Nous avons repris la même configuration que l'expérience avec plasticine, sans érosion, et sans niveau de décollement réalisée par Perrin et al. [2013].

La longueur de la boîte à sable (Fig.10) est de $300 cm$, sa largeur est de $10 cm$. Elle est composée d'une base rigide (correspondant dans la nature à la plaque chevauchée), inclinée vers la butée rigide (qui est l'équivalent de la plaque chevauchante) afin de mieux reproduire les conditions observées dans les zones de subduction continentales. Le modèle est soumis à la gravité naturelle.

Le multicouche de matériaux analogues (représentant les sédiments accrétés à l'avant de la plaque chevauchante) est entraîné vers la butée rigide du fait de l'enroulement à l'arrière de celle-ci d'un film plastique (Mylar) grâce à un moteur pas à pas. La haute friction basale à la base du prisme permet d'obtenir la forte composante cisailante de déformation, nécessaire à sa croissance.

Pour notre expérience, nous avons repris les mêmes dimensions que Perrin et al. [2013] pour l'empilement multicouches (voir Fig.8) à savoir $1 cm$ de sable, puis $1 mm$ de plasticine, surmonté par $2,2 cm$ de sable. Les propriétés du sable ont été décrites dans la partie 4.1, et celle du mélange plasticine - vaseline dans la partie 3. Le sable est soupoudré à l'aide de "salières". Des marqueurs colorés passifs sont déposés au sein du multicouches ; l'un à la base, un autre au niveau de la couche de plasticine, un dernier à $2 cm$ de la base. On construit un pré-prisme au niveau de la flexure de la plaque inférieure, d'une longueur de $90 cm$, et dont l'angle α est de 0° . On insère une couche de microbilles de verre induisant une faible friction à la base du pré-prisme pour

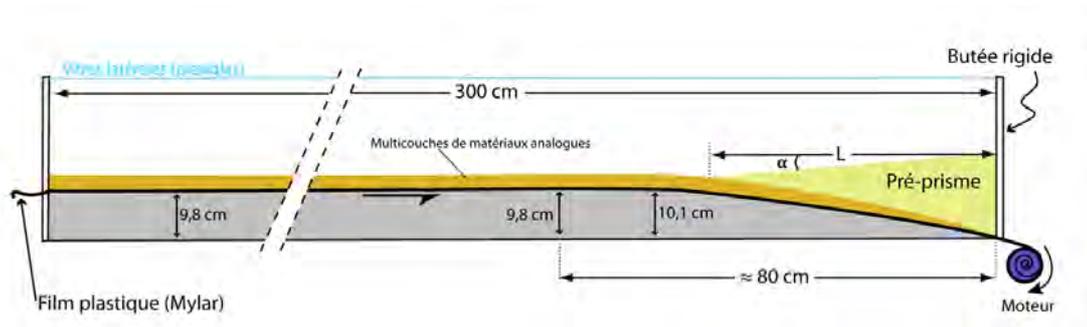


FIGURE 10 – Schéma du dispositif expérimental. L représente la longueur du pré-prisme et α sa pente. D'après Perrin et al. [2013]

permettre une propagation de la déformation plus en avant du prisme. La couche de plasticine est déposée à 25 cm du backstop. Une vitesse de 1 cm/min, soit 1000 Hz est imposée moteur pas à pas. La température ambiante est de 21°C.

4.3 Résultats

La Fig.11.B montre l'état du prisme orogénique à l'équilibre après 228 cm de raccourcissement.

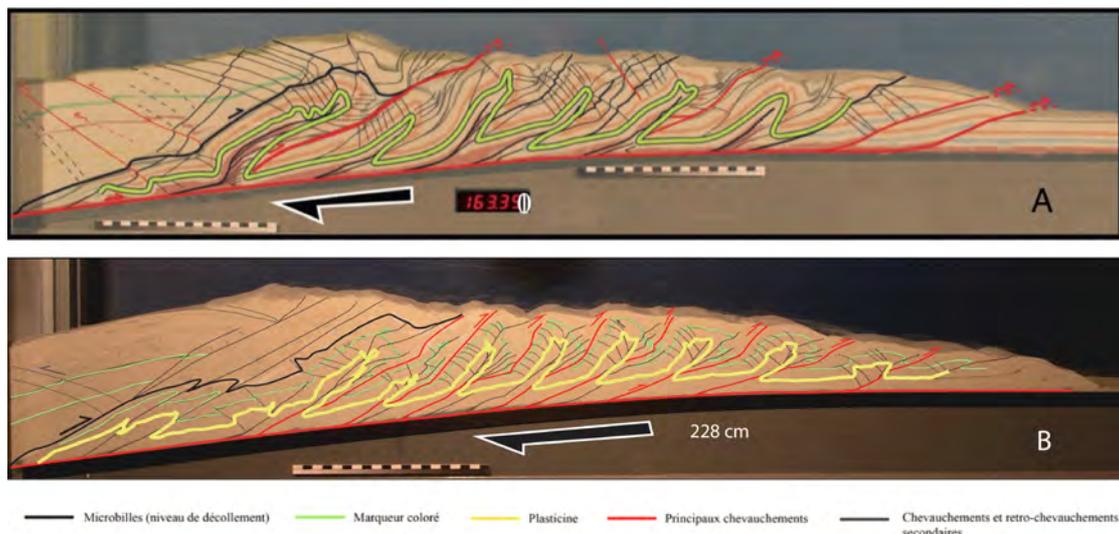


FIGURE 11 – Modèle analogique en boîte à sable d'avant-pays plissé, sans érosion et sans niveau de décollement, impliquant un empilement multicouche de sable et de plasticine. (A) Réalisation de Perrin et al. [2013] avec une couche de plasticine pure ; (B) Expérience réalisée dans le cadre de cette étude, avec une couche de mélange 95% plasticine - 5% vaseline.

Les chevauchements imbriqués se propagent depuis la butée vers l'avant du prisme, comme dans les modèles de prismes orogéniques sans niveau plastique. Les chevauchements commencent à progresser depuis la base à haute friction basale au sein du pré-prisme, jusqu'à ce qu'ils rencontrent la couche de plasticine. Après avoir dégagé le sable en fin d'expérience (Fig.12), on constate que la couche de plasticine plissée est continue, c'est à dire que les zones de chevauchement ne recoupent pas le niveau plastique. Le prisme se propage alors en formant des plis déversés associés aux chevauchements issus du décollement basal.



FIGURE 12 – Photographie de la couche de plasticine dégagée du sable après l'expérience. Cette couche est effectivement plissée mais ne semble pas amincie et n'est pas traversée par les chevauchements en base de charnière.

Comme décrit précédemment dans Perrin et al. [2013] les plis se forment par flambage de la couche de plasticine, généralement en deux microplis, induits par le développement de chevauchements et retro-chevauchements sous-jacents. Le développement du pli, le déversement et son amplification sont contrôlés par le déroulement de la charnière synclinale.

Dans la partie 3, nous discutons de deux mécanismes permettant d'expliquer le déroulement de cette charnière, à savoir la traction et le cisaillement simple qui affecte l'épaisse bande de sable qui encadre la couche de plasticine. A la fin de l'expérience, après avoir dégagé la couche de plasticine du sable qui l'entoure, nous n'avons pas constaté d'amincissement de cette dernière, pourtant très fine (1 mm) et peu résistante. Ceci est un argument en défaveur du mécanisme de déformation en traction.

Les plis sont encadrés par un ensemble de chevauchements - retro-chevauchements, qui accommodent la déformation dans le sable. Ces failles peuvent être redressées à l'arrière par les plissements en avant du prisme.

On peut également voir sur la Fig.11 que le sable situé à l'intérieur de la structure anticlinale est affectée par de nombreux chevauchements. Le premier à être actif est situé dans la partie supérieure du pli, près de la charnière anticlinale, le dernier à être actif est au plus près de la charnière synclinale. Ces chevauchements sont progressivement abandonnés au cours de la croissance du flanc inverse du pli. On retrouve des structures identiques au dessus de la couche de plasticine. Ces chevauchements semblent induire un cisaillement du sable à la base du flanc inverse, près de la charnière anticlinale, de part à d'autre de la couche de plasticine qui se retrouve déformée à l'intérieur d'une zone de déformation diffuse (c'est le déplacement relatif des grains de sable qui induit le cisaillement diffus de la couche plastique, et pas directement la faille inverse, qui localise la déformation).

Des résultats préliminaires de corrélation d'image non présentés ici montrent une zone de déformation diffuse dans le sable en flanc inverse au dessus d'un chevauchement principal actif au niveau de la charnière synclinale, de part et d'autre de la couche de plasticine. En revanche, le matériel du flanc normal ne montre pas de déplacement. Ceci est un argument supplémentaire en faveur du mécanisme en cisaillement diffus évoqué dans le paragraphe précédent.

Les deux premiers plis à se former ont des formes très irrégulières : ils présentent des replis. Le tout premier plis a des flancs plus longs que le deuxième, ce qu'on observe également dans l'expérience réalisée par Perrin et al. [2013] (Fig.11.A.). Dans notre expérience, les plis les plus en avant du prisme sont très réguliers, ce qui n'est pas le cas sur la figure 11.B. Il semble que les

plis ne se développent plus au delà d'une certaine longueur de flanc (dans notre cas environs 7 cm)

Ces deux plis les plus proches de la butée rigide ne se sont pas formés dans des conditions identiques à ceux à l'avant du prisme. En effet, la résistance du sable calculée à l'emplacement de la couche de plasticine (voir partie 4.1) était valable pour une épaisseur de sable sus-jacente de 2,2 cm. Les deux premiers plis s'établissent sous le pré-prisme, c'est à dire à une profondeur d'environ 6,5 cm. La contrainte verticale σ_3 dans le sable à la profondeur où se situe la couche de plasticine est cette fois de 1093 Pa. La résistance au cisaillement τ_r d'un petit élément de sable à proximité de la couche de plasticine au niveau de ces plis est alors de 1177 Pa, soit 6 fois moins importante que la résistance du mélange 95% plasticine - 5% vaseline (7000 Pa) pour un taux de déformation de $10^{-3} s^{-1}$. La plasticine est ici mieux dimensionnée qu'à l'avant du modèle. La forme des plis est donc dépendante du contraste rhéologique entre les matériaux. Il est donc probable que les formes de ces plis (flancs plus longs, replis,...) soient plus proches des formes observées dans la nature.

Dans notre expérience, les plis sont largement déversés, mais pas couchés. Cela s'explique par l'absence de niveau de décollement intermédiaire, qui permet de former des duplex en arrière du prisme par sous-placage. C'est l'accrétion basale, induisant un empilement antiforme d'unités à l'arrière du prisme, combinée à l'érosion, qui permet un fort soulèvement de l'arrière du prisme et par conséquent, un basculement supplémentaire des plis déjà formés. Ils évoluent ainsi vers de grandes structures en nappes de plis couchés, comme observés dans les expériences de [Perrin et al., 2013].

De grands plis se développent dans le modèle malgré la forte réduction de résistance de la couche de plasticine. L'alternance de matériaux à comportement plastique avec des matériaux cassants, est bien la cause formation de telles structures. Le nouveau contraste rhéologique entre le sable et la plasticine, plus proche de celui qui existe dans la nature, confirme que les mécanismes de plissement suggérés précédemment sont mécaniquement réalistes.

5 Caractérisation de la déformation sur le terrain

5.1 Contexte géologique régional

La zone d'intérêt a été déterminée à partir de l'étude réalisée par Matte [2002], présentant des coupes au travers de grands plis couchés kilométriques, affectant un ensemble de roches sédimentaires stratifiées n'ayant que peu ou pas subi de métamorphisme. Pour cette étude, nous avons ciblé un pli, celui du Moustardé, qui se situe à l'Ouest des Pyrénées Centrales, dans la Zone Axiale, au Sud du Pic du Midi d'Ossau, entre le col du Pourtalet et le col du Somport.

Dans cette zone, la tectonique hercynienne responsable de la formation de ces grands plis est très bien préservée, malgré la superposition de la tectonique pyrénéenne.

La tectonique hercynienne, qui a débutée à la fin du Carbonifère dans la région, correspond à la collision du continent Gondwana lors de sa remontée vers le Nord, avec le continent Laurussia. Notre zone d'étude se situe dans les bassins-d'avant pays associés à cet événement, au niveau de la virgation ibéro-armoricaine [Matte, 2002]. Comme nous avons pu le voir dans la partie 2, des systèmes de nappes et de plis couchés se développent au front de telles chaînes.

La phase Alpine s'amorce au Crétacé inférieur après une phase de volcanisme Permien (à l'origine du Pic du Midi d'Ossau). Elle est associée à la formation de bassins dans un contexte de décrochements sénestres.

La dérive vers l'Est de la plaque Ibérique lors de l'ouverture de l'océan Atlantique s'accompagne

d'une phase de compression durant laquelle la plaque Ibérique est subductée sous la plaque Européenne. Ce contexte en tranpression sénestre est particulièrement présent dans la région au niveau du couloir de décrochement E-W de Bielle-Accous. La compression pyrénéenne entraîne dans notre zone d'étude le chevauchement des unités paléozoïques et des calcaires crétacés sus-jacents sur l'avant-pays Sud Pyrénéen.

5.2 Description des unités sédimentaires

La figure 13 présente un schéma du plis du Moustardé réalisé à partir d'une photographie prise depuis la Cabanne de Peyrelue au Sud de la D934. Les couleurs respectent celles utilisées sur la carte géologique de Laruns-Somport [Ternet et al., 2004].

Les unités impliquées dans le plissement au Pic de Moustardé sont constituées de séries sédimentaires allant du Dévonien au Westphalien, caractéristiques des bassins d'avant-pays de chaînes. De telles déformations ne sont pas observées dans les unités permienne, ce qui permet d'associer ces plis à la tectonique hercynienne [Matte, 2002]. Les lithologies sont détaillées dans la notice de la carte géologique Laruns Somport [Ternet et al., 2004].

L'empilement stratigraphique commence sur la rive nord du Gave du Brousset par des barres de calcaires massifs du Dévonien supérieur (Frasnien), de couleur rouge sur la figure 13, qui passent à des alternances de pélites et grès lorsqu'on remonte les pentes du Moustardé (en orange sur la figure 13)

On peut suivre l'empilement des unités suivantes en position inverse dans le flanc inverse inférieur du Moustardé :

Le coeur de la charnière anticlinale est occupé par des calcaires à Polypiers, dits "calcaires à griottes", datés de l'Eifélien au Famennien (en vert sur la figure 13, voir Fig.15.B. & G.).

Ils sont suivis par un empilement de calcaires du Famennien au Tournaisien (en gris sur la figure 13, voir Fig.15.C., E., & H.), constitué dans le flanc inverse par des calcaires massifs à patine gris clair et à cassure fraîche gris foncé. Les bancs sont décimétriques à métriques, et la stratification très irrégulière. Dans le flanc inverse, ils surmontent des calcaires dits "à joints" plus jeunes, de patine gris clair, voire orangée. Nous les nommerons ainsi car les bancs de 1 cm à 10 cm d'épaisseur, sont séparés par des joints de matériel argileux de couleur ocre, probablement dûs à une dissolution sous pression des niveaux carbonatés lors de la diagénèse (nous y reviendrons). Cette formation renferme des niveaux à lydiennes qui, bien que nous n'en n'ayons pas observé en place, se retrouvent en abondance sur les flancs du Moustardé. Nous avons pu trouver de très nombreux fossiles à l'intérieur de ces calcaires.

Au dessus de la passerelle qui enjambe le Gave du Brousset, au niveau de la chute du Tourmont, se trouvent les calcaires du Namurien qui succèdent à cette formation, (en bleu sur la figure 13, voir Fig.15.B.). Ils présentent une patine noire à gris clair, et comportent des amygdales de quartz dans des bancs centimétriques à pluri-centimétriques, surmontés par des calcaires en dalles, également amygdalaires.

Enfin, la charnière synclinale inférieure, et les flancs du Moustardé s'étendant vers l'Est, sont constitués d'une épaisse formation schisto-gréseuse du Culm (Fig.15.D. & F.), qui apparaît en relief négatif par rapport aux calcaires (en bleu-gris pâle sur la figure 13). Ils se présentent en bancs centimétriques à métriques. La couleur de patine est marron foncée, et les schistes sont très noirs à la cassure. J'ai pu y trouver des fossiles d'algues.

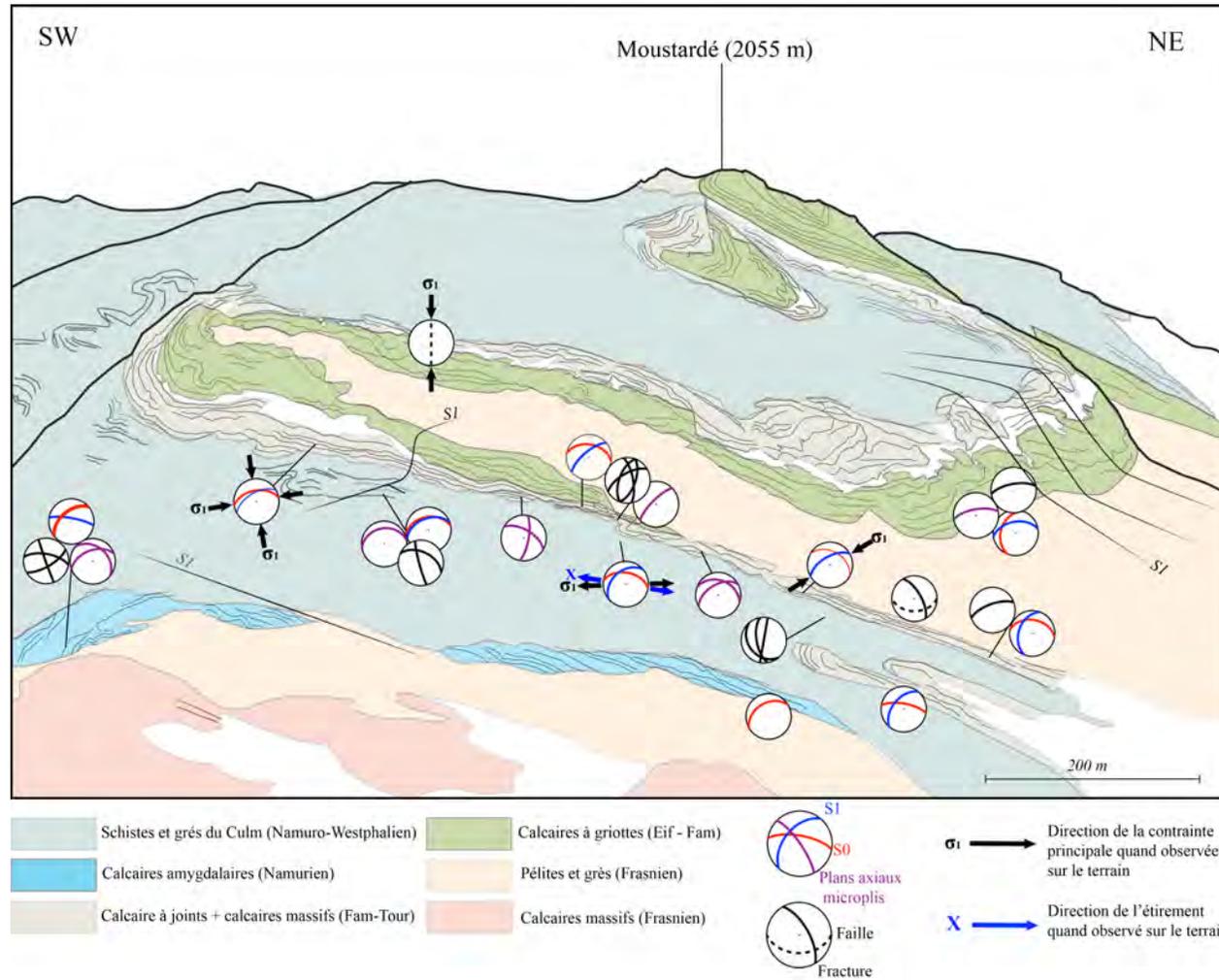


FIGURE 13 – Schéma de synthèse des caractéristiques stratigraphiques et des déformations observées dans les plis couché du Pic de Moustardé. Les couleurs des lithologies correspondent à celles de la carte géologique Laruns-Somport. Les projections stéréographiques de la stratification (S0), de la schistosité (S1), des principales familles de fractures, et des failles, sont rapportées aux sites où les mesures ont été réalisées. Les flèches noires et bleues donnent les directions respectives de la contrainte principale σ_1 (fentes en échelons, stylolites), et de l'étirement X (boudinage, fibres recristallisées) quand ils ont pu être déduits des observations de terrain.

5.3 Etude tectonique et micro-tectonique des plis du Moustardé

Le Moustardé, en photographie sur la figure 15.A., et schématisé sur la figure 13, présente deux charnières synclinales. La première se situe à l'est (côté inférieur gauche de la figure) au niveau du Gave du Brousset, et seuls ses replis sont accessibles. La seconde charnière modèle la crête qui part du pic à l'est de la figure. Elles sont séparées par un flanc inverse de presque 1 km de long, par une impressionnante charnière anticlinale à l'ouest, et par un flanc normal de 600 à 700 m de long, le tout souligné par les calcaires viséens. Cette structure impressionnante n'est pourtant que le replis d'un pli couché pluri-kilométrique déversé vers l'W-SW. Le pli couché du Moustardé est lui aussi déversé vers l'W à SW, avec un plongement axial vers l'WNW à NW [Mirouse, 1966, Matte, 2002].

On peut vérifier le sens de déversement du pli directement sur la figure 13. Le pli kilométrique est lui-même affecté par de nombreux replis. On trouve ainsi un pli de second ordre en "z" à mi-longueur du flanc inverse inférieur, et un autre en "s" dans les calcaires amygdalaires du flanc normal au dessus du défilé du Tourmont (Fig.15.B.). Tous deux confirment un déversement du pli vers l'W.

On constate sous la charnière anticlinale supérieure, culminant à 2055 m, un cœur de calcaires à griotte, enveloppé de calcaires du Famennien au Tournaisien. Il s'agirait d'après Mirouse [1966] d'une superposition de deux phases de plissements hercyniennes.

Le Culm gréso-pélique, situé à l'Ouest de la charnière synclinale inférieure, est déformé d'une manière très particulière (limite supérieure gauche de la figure 13). Les bancs gréseux dessinent de nombreux plis couchés de plus petite taille que le grand pli kilométrique du Moustardé. Cela nous montre que la lithologie est donc un des facteurs qui contrôle les modes de plissement. Certains de ces plis présentent une charnière très serrée tandis que d'autres sont en forme de champignons. Ces deux formes rappellent respectivement le grand pli du Moustardé, et la structure évoquée au paragraphe précédant. Cette diversité des formes de plissement pourrait être expliquée par le même phénomène de superposition des phases de déformations.

Les mesures de stratification (S0, en rouge) et de schistosité (S1, en bleu) sont reportées sur la figure 13 en projection stéréographique (réalisé à l'aide du programme OSXStereonet basé sur Stereonet 6 par Richard Allmendinger).

La stratification est marquée sur la figure 13 par la limite des bancs en lignes fines au sein des unités. Cette S0 est NE-SW avec un pendage vers le NW dans le flanc normal pluri-kilométrique au niveau du défilé du Tourmont. Elle s'oriente E-W dans le flanc inverse du plis, avec un pendage vers le N, alors que sa direction est pratiquement N-S à pendage vers l'W au niveau de la charnière synclinale supérieure. Il ne semble pas y avoir de différences entre les stratifications mesurées dans le Culm schisto-gréseux, et celles dans les calcaires devono-dinantiens. Les valeurs de pendage varient peu (en général 50°). La projection des pôles des couches de part et d'autre de la charnière synclinale sur un stéréogramme confirme le plongement axial vers le NW déterminé par Mirouse [1966] et appuyé par Matte [2002].

La schistosité est représentée en bleu sur les stéréogrammes, mais on peut en voir une représentation en trait noirs courbes sur la figure 13. La direction de S1 est généralement NNE-SSW, à fort pendage (70-80°) vers l'W dans les calcaires, et à plus faible pendage (50°) dans les schistes du Culm. Elle se présente sous des formes variées selon les lithologies. Dans les niveaux tendres schisteux du Culm, il s'agit d'une schistosité de flux (Fig.14.A). Dans les "calcaires à joints" du Famennien au Tournaisien, elle déforme des stylolites dessinant les inter-lits riches en matériel argileux, probablement formés par dissolution durant la diagénèse (Fig.14.B.). Enfin, dans les niveaux calcaires très compétents (à griottes, ou les calcaires amygdalaires), elle se présente sous forme de schistosité de fracture (Fig.14.D.) On observe également des plans de dissolution

de calcite dans les calcaires amygdalaires (Fig.14.C.), à valeur de schistosité (en éventail au niveau de la charnière du repli appartenant au flanc normal).

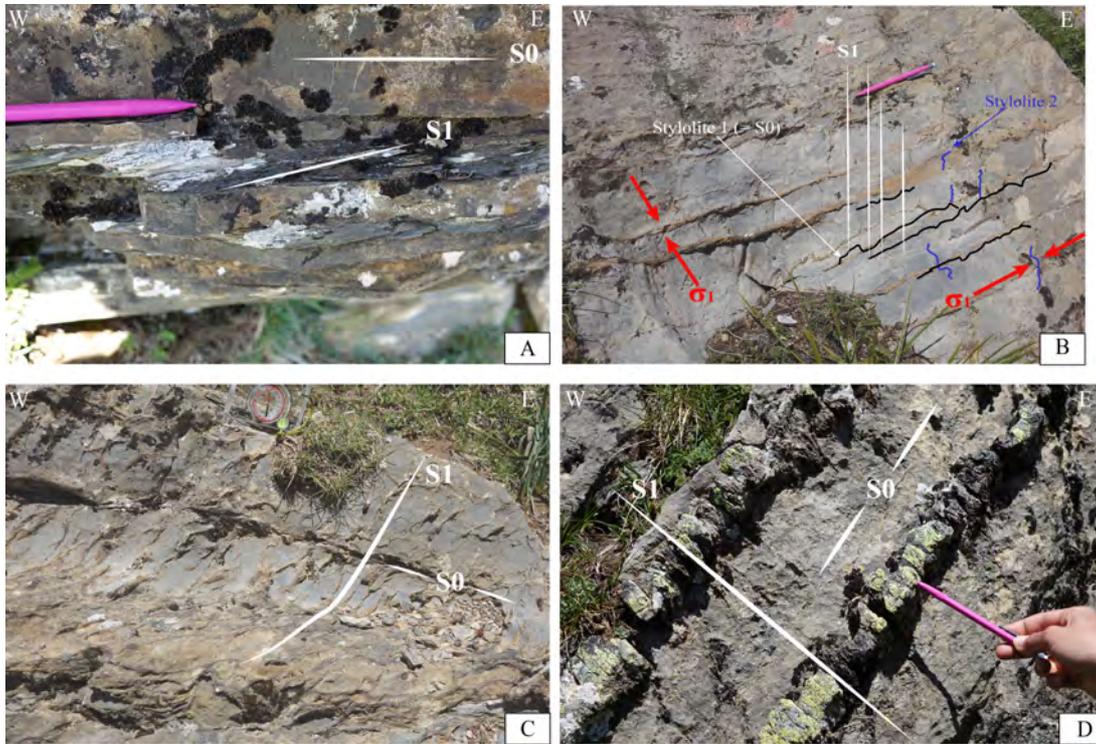


FIGURE 14 – Différentes expressions de la schistosité en fonction de la lithologie. A) Schistosité de flux dans les schistes du Culm. B) Décalage des pics stylolitiques associés à la diagénèse dans les calcaires à joints du Famennien à Tournaisien (en noir). En bleu, une deuxième famille de stylolites. Les pics stylolitiques donnent la direction de σ_1 . C) Plan de dissolution dans les calcaires amygdalaires ayant valeur de schistosité (plan axial d'un replis dans le flanc normal au-dessus du défilé du Tourmont) D) Schistosité de fracture dans les niveaux amygdalaires compétents des calcaires du Namurien.

Des plis à différentes échelles affectent toutes les lithologies (Fig.15). Leurs plans axiaux sont recensés en mauve sur la figure 13.

On remarque deux directions principales. La première, NE-SW à pendage vers le NW, suit la direction et le plongement de la schistosité S1, elle-même plan axial des plis couchés du Moustardé. Cette famille de micro-plis est donc associée à la mise en place de ces structures kilométriques durant la phase hercynienne. [Mirouse \[1966\]](#), [Matte \[2002\]](#), [Muller and Roger \[1977\]](#) associent de telles structures à une schistosité de flux ou de crénulation de plan axial, ce que nous avons observé également, notamment dans la charnière synclinale supérieure. Dans les calcaires à joints du flanc inverse, un plan axial de direction N-S serait lié d'après [Mirouse \[1966\]](#), et [Muller and Roger \[1977\]](#), à une phase précoce de déformations hercynienne.

La seconde famille de micro-plis montre des directions E-W à NW-SE à pendage vers le N à NE, et n'est donc pas en relation avec la schistosité. D'après [Matte \[2002\]](#), on trouve dans la région des plis d'axes N90 à 100, qui présentent une schistosité à pendage Nord, affectant des unités permienne. [Mirouse \[1966\]](#) et [Muller and Roger \[1977\]](#) proposent deux origines possibles, pour une telle direction de plis : l'une résultant de la phase hercynienne, où les plis WNW-ESE à E-W, sont très redressés (ce qui n'est pas le cas de ceux que nous considérons), la seconde résultant de la phase pyrénéenne, où les plis sont plutôt à pendage 40° à 60° vers le N, ce qui correspond

plus aux plans axiaux représentés sur les stereogrammes. Cette seconde famille de micro-plis serait donc attribuée à la phase tectonique alpine.

Nous avons pu constater que toutes les lithologies montrent de nombreuses déformations à l'échelle de la micro-tectonique, ceci même dans les flancs du pli, très loin des charnières.

Les bancs gréseux plus compétents du Culm sont boudinés et sont criblés de fractures et de veines. Sur certains sites, là où les fibres de calcite sont bien visibles, on a pu mesurer une direction d'étirement X : WNW-ESE (voir Fig.13), qu'il est difficile d'associer à la phase pyrénéenne. Une telle direction concorde en revanche très bien avec la direction de la stratification dans le flanc inverse dans lequel les veines ont été retrouvées. On peut imaginer que les séries qui constituent ce flanc inverse ont été étirées à un certain moment de sa formation. Même si cet argument n'est pas suffisant pour trancher entre le mécanisme en traction ou en cisaillement simple qui en est à l'origine, il est en revanche certain qu'il y a trop de déformation dans ces flancs pour que les modèles de plissement impliquant seulement une déformation aux voisinage des charnières soient suffisants pour rendre compte des observations.

Les stéréogrammes de fracturation font état, dans le Culm et dans les calcaires Viséens, d'une famille de fracture NW-SE à pendage N, et sa conjuguée à pendage S. Cette fracturation est cohérente avec celle décrite par [Mirouse \[1966\]](#) et par [Muller and Roger \[1977\]](#), associée à la phase de paroxysme hercynien.

Les calcaires à joints du Famennien présentent deux familles de stylolites (voir Fig.14.B., & Fig.15.C. & E.). La première famille est mise en valeur par la concentration de matériel limoneux au niveau des plans de dissolution parfois épais de quelques centimètres. Les pics sont déformés et cisailés selon l'obliquité des plans de schistosité qui traversent ces calcaires. Ces pics, qui ont du naître perpendiculaires à la stratification, se sont formés lors de la compaction diagénétique des calcaires, et donnent une direction de la contrainte principale σ_1 verticale (Fig.13).

La seconde famille de stylolites (sur la figure 14.B., en bleu), perpendiculaire à celle évoquée précédemment, permet de déduire une direction de σ_1 E-W à N120E. Un des stéréogrammes de fractures, situé dans le flanc inverse du pli, montre une famille de fractures conjuguées de direction N-S, qui pourrait confirmer une direction E-W de σ_1 à un certain moment de l'évolution tectonique locale. Les fossiles dans ces calcaires sont à la fois dissous au niveau des bordures et déformés (Fig.15.E.& H.).

Dans ces calcaires, un boudinage d'échelle pluri-métrique de direction à peu près E-W, est de plus en plus marqué lorsqu'on se rapproche de la charnière synclinale, dans le flanc inverse inférieur.

Les directions de fractures resensées dans ces calcaires et dans ceux sous-jacents présentent une grande dispersion, qui atteste de la complexité de l'histoire tectonique locale. On peut néanmoins relier une première famille de ces fractures à la schistosité S1, qui, comme nous l'avons vu, peut s'exprimer sous forme de fracturation (ceci est également vrai pour les calcaires amygdalaires au dessus de la passerelle du Tourmont (Fig.14.D.), et très systématique au niveau de la charnière synclinale supérieure, voir Fig.15.G.).

Les calcaires massifs du Famennien et les calcaires à griottes, très compétents, sont boudinés à plusieurs échelles (Fig.15.C.). A l'échelle de l'affleurement, ils sont très fracturés. Dans la partie supérieure de la charnière synclinale, un système de faille en échelon donne une direction de σ_1 N-S provoquée par de l'extension N-S durant la phase pyrénéenne [[Mirouse, 1966](#)].

Dans les calcaires à joints situés au dessus de la passerelle du Tourmont et dans le Culm en flanc inverse, une famille de fractures subverticales pratiquement N-S pourrait être rattachée à une phase hercynienne tardive à mettre en relation avec des chevauchements à plongement vers le Nord [[Mirouse, 1966](#)].



FIGURE 15 – Photographies interprétatives de terrain. S0 : stratigraphie, S1 : schistosité, PA : plan axial. A) Vue depuis la cabanne de Peyrelue du pli du Moustardé. B) Replis du flanc normal dans les calcaires amygdalaires au dessus de la passerelle du Tourmont. C) Boudinage intense des calcaires à joints Faméniens. X donne une direction approximative de l'étirement. D) Microplis dans le Culm. E) Fossiles (entourés en rouges) aux bords dissous et déformés. Stylolites de diagénèse déformés par la schistosité dans les calcaires à joint. F) Microplis de second ordre en "z" dans le Culm en flanc inverse. G) Plissement associé à une schistosité de fracture très marquée dans les calcaires à griottes, au niveau de la charnière synclinale. H) Fossiles aux bords dissous et déformé dans les calcaires à joint Faménien.

Le flanc normal supérieur est recoupé, à proximité de la charnière, par un plan subvertical de roches broyées, interprété comme une faille de direction N-S. Elle serait liée à une phase d'extension tardive de la phase Alpine, à l'origine de telles failles dans la région [Mirouse,

1966]. Une autre faille de direction E-W à pendage vers le Sud recoupe les calcaires dans le flanc inverse inférieur du Moustardé. Cette structure se rapproche des failles normales WNW-ESE tardi-pyrénéennes décrites par [Mirouse \[1966\]](#).

Les plis kilométriques du Moustardé sont intensément déformés, autant dans les charnières que dans les flancs (qui semblent avoir subi de l'étirement). Ces déformations reflètent plusieurs phases de déformation durant les orogénèses hercynienne et pyrénéenne. Elles appartiennent à la fois aux domaines cassant (fracturation, schistosité de fracture) et plastique (schistosité, plissement à plusieurs échelles), et ce, en fonction des lithologies. Le Moustardé est donc un lieu privilégié pour l'étude des mécanismes de plissement en contexte de prisme orogénique. Cette courte étude a permis d'avoir des indices (déformation dans le flanc inverse) en faveur du mécanisme de déroulement de charnière synclinale proposé à partir des modèles analogiques.

6 Discussion et perspectives

La modélisation est un très bon outils pour l'étude des paramètres mécaniques et de la cinématique qui contrôlent les processus tectoniques actifs dans la nature. Notre étude a permis d'obtenir un meilleur dimensionnement mécanique des matériaux utilisés dans les expériences, par rapport à la rhéologie de ceux impliqués dans les nappes de plis couchés d'avant-pays. Afin d'améliorer encore le dimensionnement, il faudra réduire la résistance de la plasticine d'un ordre de grandeur, ou réaliser des expériences où l'épaisseur du sable sus-jacente est assez importante pour obtenir une résistance au cisaillement du sable équivalente à celle de la couche de plasticine, à proximité de celle-ci. Il existe de plus des incertitudes sur le dimensionnement des vitesses de déformation. D'après [Mandel \[1977\]](#), le dimensionnement des matériaux visqueux tels la plasticine est donné par :

$$\eta^* = \frac{\sigma^*}{\dot{\epsilon}^*} \quad (12)$$

où η^* est le rapport de la viscosité (Pa) de la plasticine utilisée dans les modèles avec celle du matériau dont elle est analogue, σ^* est le rapport entre de les contraintes lithostatiques (Pa) dans le modèle et dans la nature, et $\dot{\epsilon}^*$ le rapport entre le taux de déformation (s^{-1}) dans l'expériences et ceux dans la nature.

Lors du dimensionnement, nous avons considéré un taux de déformation $\dot{\epsilon}^*$ de $10^{-3} s^{-1}$, estimé à partir du taux de raccourcissement global appliqué à l'expérience. Il est en revanche très difficile d'estimer un taux de déformation au sein des charnières de pli, qui n'est pas nécessairement le même que celui appliqué à l'ensemble du prisme. Cela est d'autant plus vrai que ce qu'on visualise à travers la vitre n'est pas la déformation de la couche de plasticine elle-même, mais celui du marqueur coloré soupoudré entre la vitre et la plasticine. Néanmoins, les déformations dans la charnières sont faibles, et donc les taux de déformations considérés ne sont pas incohérents en terme d'ordre de grandeur. Le travail de corrélation d'images de la gènes et de l'évolution du pli, entrepris actuellement, pourrait donner des informations concrètes sur les taux de déformation dans la charnière.

La définition de [Mandel \[1977\]](#) pose la question du caractère visqueux des matériaux naturels impliqués dans le plissement. Supposons que la plasticine est un analogue de roches types calcaires, comme nous l'avions discuté dans la partie 3.3. Il est facile d'imaginer qu'aux faibles profondeurs où l'on se situe dans le contexte de prisme orogénique, ce matériau calcaire est peu résistant à la contrainte s'il est cisailé très rapidement. En revanche, si ce calcaire se déforme lors de son passage dans la charnière synclinale, comme nous le supposons, il est probablement déformé à très faible vitesse et peut se comporter ainsi comme un matériau plastique visqueux,

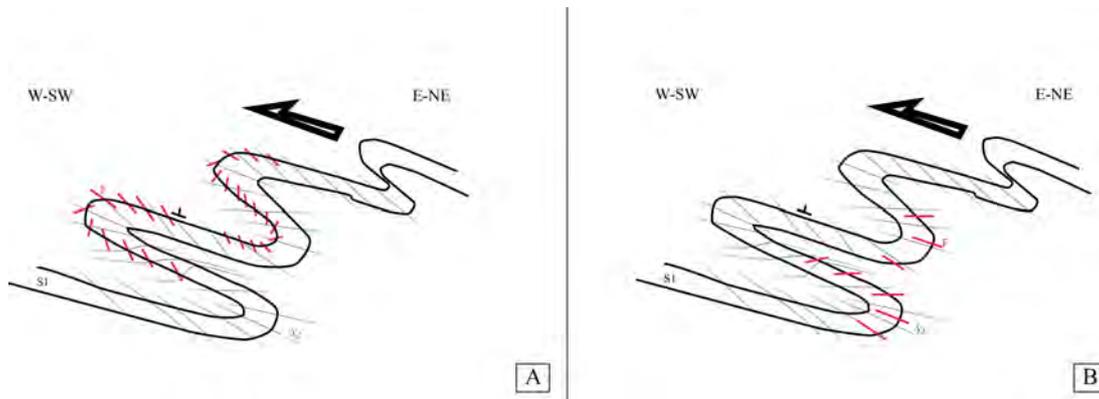


FIGURE 16 – Modèles hypothétiques de l'évolution des directions de fractures lors du passage par la charnière synclinale des fractures à valeur de schistosité WNW-ESE observées sur le terrain. A) Transport passif. B) Transport actif.

impliquant des processus de déformation à petite échelle comme la dissolution sous pression. On a pu observer de telles déformation dans les calcaires du Faménien à joints stylolitiques.

Les niveaux compétents au Moustardé montrent pourtant une intense fracturation. Cela conforte l'hypothèse de la formation de ces plis à faible profondeur, à la limite entre le domaine cassant et le domaine plastique. Ces deux modes de déformation semblent bien se répartir selon les variations de lithologies.

Les déformations enregistrées dans la charnière doivent se manifester en passant dans le flanc inverse, comme l'on conserve les stylolites. Nous avons pu recenser un grand nombre de directions de fracturation. A l'aide du travail de différents auteurs, réalisé à l'échelle globale, nous avons tenté de discerner celles issues de la tectonique hercynienne de celles formées pendant la phase alpine de l'orogénèse pyrénéenne. Toutes les familles de fractures ne trouvent pourtant pas d'équivalent à l'échelle régionale. On peut donc imaginer qu'elles se sont formées dans des conditions particulières locales inhérentes à la déformation dans les plis.

Dans la partie inférieure (en flanc normal) de la charnière synclinale supérieure du Moustardé, on a pu observer une fracturation très bien marquée et systématique à valeur de schistosité de direction WNW-ESE (voir Fig.13 et Fig.15.G.). Dans l'hypothèse d'un déroulement de la charnière synclinale, on peut formuler des hypothèses sur le transport de ces marqueurs, et sur l'évolution de la direction de cette fracturation une fois passée en flanc inverse.

Un premier modèle (Fig.16.A.) suppose la formation de ce marqueur au niveau de la charnière synclinale et son transport passif lors du déroulement. Les directions de fractures obtenues le long du flanc sont assez dispersées, ce qui fait de cette hypothèse une bonne piste pour expliquer la variabilité des directions de fractures observées sur le terrain. Le second modèle (Fig.16.B.) considère également la formation de cette fracturation au niveau de la charnière, mais son transport est plus actif, tel celui qu'on l'obtient en déroulant une charnière dans un empilement de feuilles de papier. Il en résulte une orientation de la fracturation identique à celle de la schistosité. Ces deux modèles ne sont pour l'instant que des hypothèses, permettant d'envisager des travaux supplémentaires. Une étude plus systématique des familles de fracture dans le pli du Moustardé, et à différentes échelles (microtectoniques à régionales) serait nécessaire pour discriminer ces hypothèses. Arriver à insérer un marqueur de déformation à l'intérieur de la couche de plasticine dans les modèles analogiques serait aussi une piste intéressante à explorer.

7 Conclusion

Grâce à un modèle analogique multi-couche plastique/cassant bien dimensionné mécaniquement, nous avons pu prouver qu'un tel contraste rhéologique est essentiel pour la formation des grandes nappes de plis couchés observés dans les avant-pays de prismes orogéniques. Ces nouvelles expériences confirment l'hypothèse proposée d'un mécanisme de plissement dans lesquelles le déroulement de la charnière synclinale joue un rôle majeur. Celui-ci serait causé dans les modèles par une déformation diffuse cisailante affectant la large bande de sable qui encadre les flancs inverses des plis. L'étude tectonique et micro-tectonique sur le terrain du pli couché hercynien du Moustardé met en évidence un étirement important affectant le flanc inverse, ainsi que de nombreuses déformations qui pourraient être acquises lors du passage des matériaux par la charnière. Ces observations vont dans le sens des hypothèses proposées pour la genèse des grands plis couchés.

Références

- F. Arthaud. *Etude tectonique et microtectonique comparée de deux domaines hercyniens : les Nappes de la Montagne Noire (France) et l'anticlinorium de l'Iglesiente (Sardaigne) : style des déformations successives, notions de sous-faciès de faciès et de profils tectoniques*. PhD thesis, 1970.
- A. Barnhoorn, M. Bystricky, L. Burlini, and K. Kunze. The role of recrystallisation on the deformation behaviour of calcite rocks : large strain torsion experiments on carrara marble. *Journal of Structural Geology*, 26(5) :885–903, 2004.
- L. Bazalgette and J. Petit. Fold amplification and style transition involving fractured dip-domain boundaries : buckling experiments in brittle paraffin wax multilayers and comparison with natural examples. *Special Publication Geological Society of London*, 270 :157, 2007.
- M. A. Biot. Theory of folding of stratified viscoelastic media and its implications in tectonics and orogenesis. *Geological Society of America Bulletin*, 72 :1595–1620, 1961.
- P.R. Cobbold. Fold propagation in single embedded layers. *Tectonophysics*, 27(4) :333 – 351, 1975.
- H. Fossen. *Structural geology*. Cambridge University Press, 2010.
- J. Gratier. *La déformation des roches par dissolution-cristallisation : aspects naturels et expérimentaux de ce fluage avec transfert de matière dans la croûte supérieure*. PhD thesis, 1984.
- F. Graveleau, J. Malavieille, and S. Dominguez. Experimental modelling of orogenic wedges : A review. *Tectonophysics*, 538 :1–66, 2012.
- H. Ji, E. Robin, and T. Rouxel. Compressive creep and indentation behavior of plasticine between 103 and 353k. *Mechanics of Materials*, 41(3) :199–209, 2009.
- G. Kobberger and G. Zulauf. Experimental folding and boudinage under pure constrictional conditions. *Journal of Structural Geology*, 17(7) :1055–1063, 1995.
- J. Malavieille. Impact of erosion, sedimentation, and structural heritage on the structure and kinematics of orogenic wedges : Analog models and case studies. *GSA Today*, 20(1) :4–10, 2010.
- J. Mandel. Essais sur modèles réduits en mécanique des terrains, étude des conditions de similitudes. *Revue de l'industrie minière*, 44(2) :611–620, 1977.
- P. Matte. Les plis hercyniens kilométriques couchés vers l'ouest-sud-ouest dans la région du pic du midi d'osau-col du somport (zone axiale des pyrénées occidentales). *Comptes Rendus Geoscience*, 334(10) :773–779, 2002.
- KR McClay. The rheology of plasticine. *Tectonophysics*, 33(1) :T7–T15, 1976.
- R. Mirouse. *Recherches géologiques dans la partie occidentales de la zone primaire axiale de Pyrénées*. PhD thesis, 1966.
- J. Muller and P. Roger. L'évolution structurale des pyrénées (domaine central et occidental). le segment hercynien, la chaîne de fond alpine. *Géologie alpine*, 53(2) :149–191, 1977.
- D. Pastor-Galán, G. Gutiérrez-Alonso, G. Zulauf, and F. Zanella. Analogue modeling of lithospheric-scale orocline buckling : Constraints on the evolution of the iberian-armoric arc. *Geological Society of America Bulletin*, 124(7-8) :1293–1309, 2012.

- G. Peltzer. *Etude tectonique et microtectonique comparée de deux domaines hercyniens : les Nappes de la Montagne Noire (France) et l'anticlinorium de l'Iglesiente (Sardaigne) : style des déformations successives, notions de sous-faciès de faciès et de profils tectoniques*. PhD thesis, 1983.
- C. Perrin, L. Clemenzi, J. Malavieille, G. Molli, A. Taboada, and S. Dominguez. Impact of erosion and décollements on large-scale faulting and folding in orogenic wedges : analogue models and case studies. *Journal of the Geological Society*, 170(6) :893–904, 2013.
- M. PJ Schöpfer and G. Zulauf. Strain-dependent rheology and the memory of plasticine. *Tectonophysics*, 354(1) :85–99, 2002.
- Y Ternet, C Majesté-Menjoulas, J Canérot, T Baudin, A Cocherie, C Guerrot, and P Rossi. *Notice explicative, Carte géol. France (1 : 50 000), feuille Laruns-Somport (1069)*. BRGM, Orléans, 2004.
- J. Zulauf and G. Zulauf. Rheology of plasticine used as rock analogue : the impact of temperature, composition and strain. *Journal of Structural Geology*, 26(4) :725–737, 2004.

