



HAL
open science

La ségrégation et la migration des liquides de fusion lors de la déformation des migmatites : modélisation analogique, numérique et exemples de terrain

Joseph Barraud

► To cite this version:

Joseph Barraud. La ségrégation et la migration des liquides de fusion lors de la déformation des migmatites : modélisation analogique, numérique et exemples de terrain. Géologie appliquée. Université Joseph-Fourier - Grenoble I, 2001. Français. NNT: . tel-00003225

HAL Id: tel-00003225

<https://theses.hal.science/tel-00003225>

Submitted on 31 Jul 2003

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

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

Thèse

La ségrégation et la migration des liquides de fusion lors de la déformation des migmatites : modélisation analogique, numérique et exemples de terrain

Pour obtenir
Le grade de docteur de l'université
Joseph Fourier de Grenoble

Discipline
Sciences de la Terre

Par
Joseph Barraud

Soutenue le 14 décembre 2001 devant la commission d'examen

Jury

P. Allemand	Directeur de thèse
J.-L. Bouchez	Examineur
A.-M. Boullier	Examineur
V. Gardien	Directrice de thèse
N. Mancktelow	Rapporteur
J.-L. Vigneresse	Rapporteur

Remerciements

La modélisation analogique, c'est avant tout une boîte, un moteur, des vis, de la colle, des fils, et un tas de bougies à l'intérieur. Je remercie chaleureusement Philippe Grandjean qui a fabriqué cette machine infernale, qui m'a aidé à l'améliorer et qui a partagé sincèrement mes réussites et mes petits soucis.

Je remercie Véronique Gardien et Pascal Allemand d'avoir eu l'idée un jour de faire fondre de la paraffine pour modéliser des migmatites. Ces quatre années de recherche sur la fusion crustale ont été pour moi quatre années de découvertes et de passion. Qu'ils soient aussi remerciés pour avoir accepté que j'encadre avec eux de nombreux stages de terrain.

Olivier Vanderhaeghe a bien voulu m'initier au Massif Central. Le jeu en valait la chandelle ! Merci à lui d'avoir partagé sa recherche avec moi. Son aide a donné une nouvelle dimension à mon travail. Je remercie aussi Patrick Ledru pour le coup de main sur le terrain.

Je remercie Jean-Louis Vignerresse pour les discussions « devant le poster », pour ses commentaires avisés sur les expériences et pour sa suggestion du « multicouche ». Jean-Luc Bouchez et lui sont chaudement remerciés pour avoir accepté de juger ce travail.

Merci aussi à Anne-Marie Boullier et Neil Mancktelow d'avoir bien voulu compléter le jury. Ils m'ont déjà prouvé à d'autres occasions leur intérêt pour les paraffines écrasées...

Dans le laboratoire Dynamique de la Lithosphère, la bonne humeur est reine. Cette sympathique équipe m'a appris des tas de choses et m'a fait aussi bien rigoler. Je remercie donc David pour m'avoir fait voyagé sur Mars, Gweltaz et Stéphane G. pour toutes nos discussions sur l'Himalaya et tant d'autres sujets, Stéphane S. pour avoir partagé ses découvertes sur les Alpes. Merci aussi à Marie-Paule, Christophe, Bérange, Jean-Philippe, Cristina, Nicolas, Matthieu, Silvia, Frank, Lenka, Denis et Isabelle pour leur amitié, pour les encouragements et pour tous les éclats de rire.

Merci à Jean-Marc Lardeaux de nous permettre ainsi de travailler dans la liberté et la gaieté. Il y a aussi Mme Clermont et Paul que je remercie pour leur assistance technique. Je n'oublie pas aussi tous ceux de l'ENS, et notamment Maud, Laurent, Hervé, Sébastien, Eva et Carmen.

Je remercie tous les étudiants « d'en dessous ». Merci à Hélène, Célia, Radovan, Antoine et Julie pour les pique-niques, les soirées et les week-end au labo. Merci aussi à Jan, Andréa, Romain, Marine, Bérange, Philippe, Matthieu, Loïc, Olivier et Samuel.

Merci à Dominique Barbe pour sa patience et pour la qualité de ses photocopies.

Il y a encore un bon nombre d'amis à remercier, pardon à ceux que j'oublie : Bertrand, Matthieu, Philippe, Sandrine, Alexandra, Christophe, Myrtille, Stéphane, Alice, Juan, Loïc, Fabien, etc., etc. Merci encore pour les encouragements et pour tous ces bons moments.

Après tout ce monde, il me reste à remercier mes parents pour leur soutien bien sûr, mais aussi pour m'avoir donné le goût du travail bien fait. Je pense aussi à tout le reste de la famille (qui s'agrandit...).

TABLE DES MATIERES

Résumé.....	1
Abstract	3
Introduction	5

Première partie : La différenciation de la croûte continentale

1 INTRODUCTION	11
2 CONTEXTES TECTONIQUES FAVORABLES À LA GÉNÉRATION ET LA MIGRATION DES MAGMAS GRANITIQUES.....	12
2.1 Un arc magmatique continental : l'exemple des Andes.....	12
2.2 La collision continentale.....	12
2.3 Après la collision, l'effondrement post-orogénique	15
3 ANATEXIE ET RÉACTIONS DE FUSION	16
3.1 Modèles thermiques.....	16
3.2 Les réactions de fusion des roches crustales.....	18
4 SÉGRÉGATION DU LIQUIDE DE FUSION	21
4.1 Définitions.....	21
4.2 La distribution du liquide de fusion à l'échelle du grain.....	21
4.3 Perméabilité et mouvement local du liquide.....	22
4.4 La ségrégation sans déformation imposée	24
4.5 La ségrégation assistée par la déformation.....	25
4.5.1 La compaction	25
4.5.2 La microfracturation.....	27
4.6 Les migmatites : le lien entre la ségrégation et l'ascension du magma granitique.....	28
5 LES MIGMATITES	29

5.1	Définitions.....	29
5.2	La pétrologie des migmatites	30
5.3	La forme des leucosomes.....	30
5.3.1	Forme plane.....	30
5.3.2	Forme linéaire	33
5.3.3	Les microplutons	34
5.3.4	Les formes diffuses	35
5.4	La position des leucosomes par rapport aux structures	35
5.4.1	Leucosomes et plis	36
5.4.2	Leucosomes et bandes de cisaillement	39
5.4.3	Leucosomes et hétérogénéités mécaniques	40
5.5	La formation des migmatites	41
5.6	Conclusion	46
6	LA RHÉOLOGIE DES MIGMATITES	46
6.1	Le « Rheological Critical Melt Percentage » ou RCMP	46
6.2	Les mécanismes de déformation dans les migmatites	49
6.2.1	Mécanismes de fluage	49
6.2.2	Fracturation	49
7	LA MIGRATION DU LIQUIDE DANS LES MIGMATITES	52
7.1	Définition	52
7.2	La migration du liquide dans des réseaux de leucosomes	52
7.3	L'extraction du liquide de fusion : migmatites et sources des granites.....	53
8	CONCLUSIONS : NÉCESSITÉ ET BUTS DE LA MODÉLISATION ANALOGIQUE	55

Deuxième partie: la modélisation analogique

1	INTRODUCTION	59
2	MATÉRIAUX	59
2.1	Les différentes paraffines	60
2.2	La structure microscopique des paraffines et de la cire	61
2.3	La fusion des paraffines et de la cire	61

2.4	La rhéologie des paraffines	64
2.5	Conclusion : modéliser les migmatites avec de la cire.....	67
3	SIMILARITÉ	67
4	DISPOSITIF ET CONDITIONS EXPÉRIMENTALES	69
4.1	Appareil expérimental	69
4.2	Fabrication des modèles	71
5	RÉSULTATS DES EXPÉRIENCES	73
5.1	Introduction.....	73
5.2	Comportement de base de la cire foliée.....	75
5.3	Expériences avec couche de cire foliée ou non foliée.....	75
5.3.1	Expériences sans fusion.....	76
5.3.2	Expériences avec fusion	77
5.4	Expériences multicouches.....	82
5.5	Expériences avec couches verticales	82
5.6	Expériences avec couches obliques	87
6	RÉSEAUX MACROSCOPIQUES DE VEINES	88
6.1	Introduction.....	88
6.2	La forme et la taille des veines remplies de liquide	88
6.3	La position des veines dans la couche de cire	88
6.3.1	Fentes dispersées	88
6.3.2	Concentration de fentes	89
6.4	Le réseau en 3D	90
6.5	La connectivité du réseau et la perméabilité.....	91
6.6	Evolution dans le temps	93
7	LA SÉGRÉGATION DU LIQUIDE DE FUSION DANS LES VEINES	94
7.1	Introduction.....	94
7.2	Traitement et analyse des images	94
7.3	Mécanismes de ségrégation	95
7.3.1	Cas des veines	97
7.3.2	Cas des plis dans les expériences multicouche.....	98
7.3.3	Problème des veines non remplies	99
7.4	Conclusions.....	100

8	LA FORMATION DES BANDES DE CISAILLEMENT	101
8.1	Introduction.....	101
8.2	Influence du taux de fusion sur le comportement mécanique.....	102
8.3	Influence de l'anisotropie mécanique et de la foliation de la cire	103
8.3.1	Couche foliée ou non foliée.....	103
8.3.2	Multicouches	105
8.4	Influence de l'épaisseur sur la forme des plis	105
8.5	Combinaison de paramètres.....	107
8.6	Conclusions : mécanismes de localisation de la déformation	107
9	L'EXTRACTION DU LIQUIDE DE FUSION.....	112
9.1	Introduction : la quantité de liquide extraite.....	112
9.2	L'extraction dans les modèles multicouches	113
9.2.1	Mesure directe de l'évolution du volume expulsé.....	113
9.2.2	Mesure des surfaces	115
9.2.3	Relations ségrégation – extraction.....	116
9.2.4	Les « feedback loops ».....	117
9.3	Rôle de la localisation de la déformation sur l'extraction	119
9.4	Un modèle d'extraction	120
9.5	Application du modèle d'extraction à la nature.....	121
9.5.1	Nécessité du raccourcissement.....	121
9.5.2	Périodicité de l'extraction	122
9.5.3	Evolution temporelle du réseau de leucosomes.....	122
10	LIMITATIONS ET DÉFAUTS DES EXPÉRIENCES	126
11	ARTICLES	127
11.1	Analog modelling of melt segregation and migration during deformation.....	129
11.2	Strain-dependence of the melt migration in partially molten crustal rocks.	137
11.3	Evolution of the melt-flow network during folding of stromatic migmatites: an analog modelling approach.....	145
12	CONCLUSIONS.....	181

Troisième partie: comparaison avec un exemple naturel

1	INTRODUCTION	185
2	CONTEXTE GÉOLOGIQUE	186
3	DESCRIPTION DE L’AFFLEUREMENT	187
3.1	Structure générale.....	187
3.2	Pétrographie des migmatites.....	190
3.3	Relations entre leucosomes et plis.....	193
3.4	Les enclaves	195
3.4.1	Positions, tailles et formes.....	195
3.4.2	Origine des enclaves.....	197
4	LES PHASES DE DÉFORMATION	198
4.1	L’ellipsoïde de la déformation finie	199
4.2	Scénario interprétatif.....	201
5	RELATIONS ENTRE LEUCOSOMES ET ENCLAVES	202
6	MODÉLISATION ANALOGIQUE DE LA SÉGRÉGATION AUTOUR D’UNE ENCLAVE	204
6.1	Dispositif expérimental.....	204
6.2	Premier cas : couche de cire massive horizontale.....	204
6.3	Deuxième cas : couche de cire litée horizontale.....	205
6.4	Troisième cas : couche de cire massive verticale	208
7	MODÉLISATION NUMÉRIQUE	211
7.1	Introduction.....	211
7.2	Logiciel utilisé.....	211
7.3	Géométrie et maillage	211
7.4	Choix des matériaux	211
7.5	Les conditions limites.....	214
7.6	Le cas élastique.....	215
7.6.1	Paramètres rhéologiques.....	215
7.6.2	Résultats	215
7.6.3	Conclusions	218

7.7	Le cas élasto-plastique	218
7.7.1	Paramètres rhéologiques.....	218
7.7.2	Résultats	218

7.8	Discussion et conclusions	222
-----	--	------------

8	CONCLUSIONS	224
----------	--------------------------	------------

	Conclusions générales	225
--	------------------------------------	------------

	Bibliographie	229
--	----------------------------	------------

	Annexe	245
--	---------------------	------------

Résumé

Les zones de collision continentale présentent à la fois un champ de déformation en raccourcissement et des anomalies thermiques susceptibles de faire fondre partiellement la croûte. Ainsi, la ségrégation du liquide de fusion de sa source est un processus dynamique que nous avons modélisé de façon analogique en utilisant une cire de paraffine partiellement fondue. L'analogie avec les migmatites est assurée par la structure foliée de la cire, les contrastes de viscosité entre liquide et solide et par le rapport entre les forces dues à la charge lithostatique et les forces nécessaires au raccourcissement horizontal. Le dimensionnement des expériences autorise l'application des résultats à des objets naturels dont les échelles sont comprises entre la dizaine de centimètres et la centaine de mètres.

Le raccourcissement horizontal d'environ 30 à 40% de couches horizontales montre que le plissement s'accompagne de l'ouverture de veines parallèles à la foliation permettant la ségrégation du liquide. Alors que celle-ci a lieu par compaction de la matrice à l'échelle microscopique, la migration du liquide fonctionne grâce aux gradients de pression qui naissent des changements de géométrie du réseau macroscopique de veines. Etant lié à une progression continue de la déformation, ces processus s'arrêtent avec la fin du raccourcissement. Les veines se concentrent soit dans les flancs, soit dans les plans axiaux, rendant la distribution du liquide hétérogène. Dans ces zones, la diminution de la résistance localise la déformation et amplifie en conséquence le taux d'extraction.

Les structures visibles sur un affleurement de migmatites étudié dans la chaîne hercynienne sont cohérentes avec les résultats expérimentaux. De plus, cet affleurement montre une grande quantité d'enclaves auréolées de leucosomes. Le rôle de l'hétérogénéité mécanique sur le collectage du liquide est mis en évidence et expliqué analogiquement et numériquement par la perturbation locale du champ de pression.

Abstract

We have modelled the formation and the horizontal shortening of stromatic migmatites in order to record the evolution of the melt-flow network and of the extraction processes. Thin superposed layers of partially molten wax reproduce the main characteristics of metatexites: anisotropic tensile and shear strength, moderate melt fraction (15-30 vol.%), negative buoyancy of the melt, and very high viscosity contrast between the melt and the solid matrix.

The melt moves through the microscopic porosity of the wax and is expelled from compacting regions into dilatant veins. At low strain, the model shows that foliation-parallel leucosomes in flat stromatic migmatites may be veins attesting of a small amount ($< 8\%$) of foliation-parallel shortening. During folding, inflation of melt-filled veins in the limbs (kink bands) or at the hinge (saddle reefs) generates an heterogeneous distribution of the melt and a rapid increase of the permeability in a highly anisotropic manner.

With further shortening, the collapse of the macroscopic network of veins causes the melt expulsion, perpendicularly to the shortening direction. Both strain and melt extraction are increasingly localised in the axial planes of folds. The horizontal movement of the melt occurs by pulses, producing periodic extraction. If the shortening stops, the extraction rate decreases rapidly, even if the permeability high. Static extraction occurs only if a sufficiently high pressure gradient exists with a nearby low-pressure site.

In the French variscan belt, an outcrop of migmatites has been studied and show structures that are comparable with the experimental ones. It shows also numerous competent enclaves that are surrounded by leucosomes. Thanks to specific analog experiments and numerical modelling, we show that this geometry is due to the pressure shadows that exist around a rigid objet in a soft matrix. This confirms that the perturbations of the pressure field govern the melt movement.

INTRODUCTION

La fusion des roches a lieu dans des contextes variés, mais essentiellement aux frontières des plaques tectoniques, que ce soit aux rides médio-océaniques, dans les zones de subduction ou de collision continentale. D'énormes quantités de matière sont ainsi fondues, transportées et recyclées pour former en fin de compte la croûte terrestre (Wilson, 1989; Nicolas, 1990; Brown, 1994). Cependant, la fusion est toujours partielle, et même souvent faible. La ségrégation de la source sera donc une première étape difficile du mouvement du liquide de fusion.

Dans le contexte complexe de la collision continentale, le mécanisme permettant la ségrégation reste encore mal compris. Cependant, les nombreuses études sur ce sujet ont permis de comprendre que la déformation joue donc un rôle fondamental d'assistance et de contrôle de cette ségrégation (Brown et al., 1995; Ricard et al., 2001; Rosenberg & Handy, 2001). Les migmatites sont l'objet privilégié pour élaborer et tester des modèles réunissant fusion, ségrégation et migration. L'hétérogénéité pétrologique, mécanique et structurale y est la règle et nécessite de concevoir les phénomènes en trois dimensions.

Concernant les liens entre mouvements du liquide de fusion et déformation, des questions majeures restent posées :

- Quelle est la part de la déformation sur la distribution des leucosomes à l'affleurement ?
- Quelle est la quantité de déformation nécessaire à l'établissement d'un réseau de conduits permettant l'extraction ?
- Cette extraction est-elle continue ou discontinue ?

Les systèmes biphasés comme les roches partiellement fondues résistent encore à la mise en équation et à la modélisation numérique (Ricard et al., 2001). Ainsi, pour répondre à ces questions, et à d'autres encore, l'approche de la modélisation analogique, très utilisée en sciences de la Terre (Ranalli, 2001), a été souvent choisie. Des expériences remarquables nous éclairent sur le mouvement du liquide autour des cristaux, ainsi que sur la mise en place des plutons (Roman-Berdiel et al., 1995; Benn et al., 1998; Rosenberg & Handy, 2000, 2001). Cependant, l'échelle intermédiaire des migmatites n'a pas encore reçu l'attention qu'elle mérite, alors qu'elle fait le lien entre les processus se produisant à l'échelle du minéral et ceux qui opèrent à l'échelle de la croûte.

La démarche qui a présidé à ce travail a donc été de mettre au point des expériences de modélisation analogique simulant les conditions de la déformation des migmatites. De cette manière, l'évolution spatiale et temporelle des processus de ségrégation et de migration du liquide a été enregistrée.

Ce mémoire est organisé autour de trois parties :

1. Tout d'abord, je présente une synthèse bibliographique sur la différenciation de la croûte continentale, vue sous l'angle des mouvements du liquide de fusion à différentes échelles. Cette revue n'existe pas à ma connaissance en lan-

gue française. Elle permettra de détailler les problèmes et de contraindre la modélisation analogique.

2. Les résultats et interprétations des expériences sont exposés dans la deuxième partie.

3. La dernière partie propose une comparaison entre des observations de terrain dans la chaîne hercynienne et des résultats de modélisations analogiques et numériques. L'étude du rôle des hétérogénéités mécaniques sur le collectage du liquide sera plus particulièrement abordée.

PREMIÈRE PARTIE

La différenciation de la croûte continentale

-

*Revue des connaissances sur la ségrégation et la migration
des liquides de fusion*

1 Introduction

La différence entre la croûte supérieure et la croûte inférieure est au premier ordre une différence de densité qui se traduit géophysiquement par une différence de vitesse des ondes sismiques. La plus grande densité de la croûte inférieure est attribuée à une composition plus mafique. Cette différence de composition chimique est due à des transferts de matière rapides et efficaces, surtout dans les zones orogéniques (Sawyer, 1994; Vigneresse, 1995; Ord & Henley, 1997; Brown & Solar, 1998a ; Connolly & Podladchikov, 1998). Ces transferts de matière s'effectuent sous la forme d'éléments dissous dans des phases aqueuses (Thompson & Connolly, 1990; Oliver, 1996) ou des liquides de fusion silicatés (Clemens & Vielzeuf, 1987; Brown, 1994; Thompson & Connolly, 1995).

En ce qui concerne les transferts de magmas, Vigneresse (1999) a résumé dans le schéma de la figure 1-1 les quatre étapes de la genèse d'un pluton granitique : (1) fusion partielle d'une source profonde, (2) ségrégation du liquide, (3) ascension du magma et enfin (4) sa mise en place dans la croûte supérieure. Chaque étape a lieu à une échelle différente, de celle du grain (millimètre) à celle de la croûte (kilomètre et dizaine de kilomètres). Le rôle de la déformation et des contraintes différentielles est actif et essentiel à chaque étape. Ce rôle serait même de plus en plus important à mesure de l'évolution du processus. Ceci fait dire à Vigneresse (1999) que tous les granites sont syntectoniques en ce sens que les *granites ont besoin de la déformation* pour être générés, suggérant même qu'ils soient considérés, au même titre que les plis et les failles, comme des objets tectoniques.

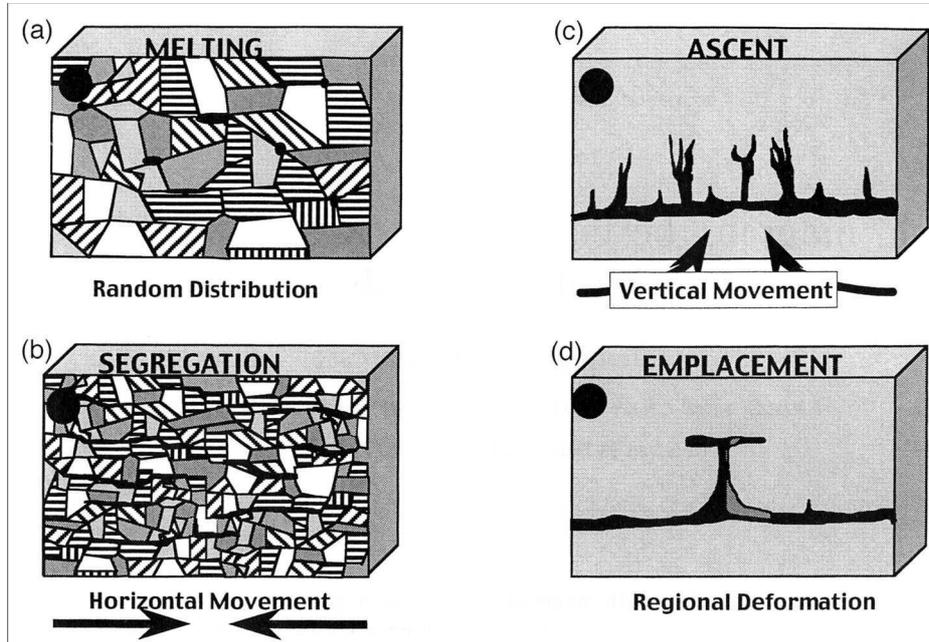


Figure 1-1 : Représentation schématique de la genèse des plutons granitiques (Vigneresse, 1999). L'échelle varie d'un schéma à l'autre. **a)** Fusion initiale (en noir) aux limites des grains. **b)** Ségrégation du liquide de fusion. **c)** Ascension verticale du magma. **d)** Mise en place du pluton dans la croûte supérieure en plusieurs étapes (portions noires et grises) conduisant à une zonation pétrographique.

Dans les chapitres suivants, les environnements tectoniques qui permettent la différenciation de la croûte continentale seront répertoriés. Ensuite, les différentes étapes de ce processus seront décrites. Je me suis attaché à étudier en détail les processus de ségrégation et de migration des liquides de fusion dans les migmatites à travers une approche expérimentale. Cependant, il est important d'envisager le processus dans son ensemble pour pouvoir relier les résultats expérimentaux à une compréhension globale des orogènes. Les contraintes géométriques et cinématiques, ainsi que les ordres de grandeur des principaux paramètres physiques concernant la fusion partielle et la migration des liquides dans les migmatites seront exposés. La rhéologie des roches partiellement fondues et des migmatites seront présentés aussi. Tous ces paramètres ont été pris en compte dans la conception des expériences de modélisation analogique.

2 Contextes tectoniques favorables à la génération et à la migration des magmas granitiques

Les granites se trouvent dans tous les contextes issus de la tectonique des plaques. Dans ce chapitre, je laisserai néanmoins de côté les granites (au sens large) associés en très petite quantité à la croûte océanique, ainsi que ceux qu'on trouve en contexte intraplaque. La grande majorité des granites résident en fait dans les arcs continentaux et dans les zones de collision (Brown et al., 1995b).

2.1 Un arc magmatique continental : l'exemple des Andes

Les Andes sont l'archétype d'une chaîne de montagne produit par la subduction d'une croûte océanique sous une croûte continentale. D'énormes quantités de granite ont été ajoutées à la croûte continentale supérieure et forment les grands batholithes andins (Atherton & Petford, 1996). L'épaisseur de la croûte a augmenté aussi grâce au raccourcissement tectonique et au sous-placage de magmas mantelliques (Giese et al., 1999). Ces derniers permettent l'anatexie de la croûte sus-jacente et des taux de fusion entre 20 et 27% sont nécessaires pour expliquer les grandes valeurs de conductivité électrique observées dans les Andes centrales (Schilling et al., 1997; Schilling & Partzsch, 2001). *Le raccourcissement et la fusion partielle de la racine de la chaîne sont donc synchrones.*

2.2 La collision continentale

L'exemple le plus connu de synchronisme entre plutonisme et collision se trouve dans la chaîne himalayenne où de nombreux leucogranites récents (< 25 Ma) jalonnent l'ensemble de la chaîne (France-Lanord & Fort, 1988; Guillot, 1993; Schneider et al., 1999). Nombre de ces granites sont des laccolites concordants dans les séries sédimentaires téthysiennes, et leurs dykes d'alimentation sont souvent bien visibles (Guillot, 1993; Scaillet et al., 1995). L'âge autour de 20-25 Ma de ces plutons impose que la déformation régionale ait assisté leur mise en place (Harrison et al., 1997). Le jeu normal de la zone de cisaillement nord Himalayenne permet la fusion par décompression isotherme puis contrôle la mise en place des magmas (Scaillet et al., 1995) (Fig. 1-2). Proche de ce grand détachement, le granite du Manaslu se serait mis en place dans un contexte décro-exten-

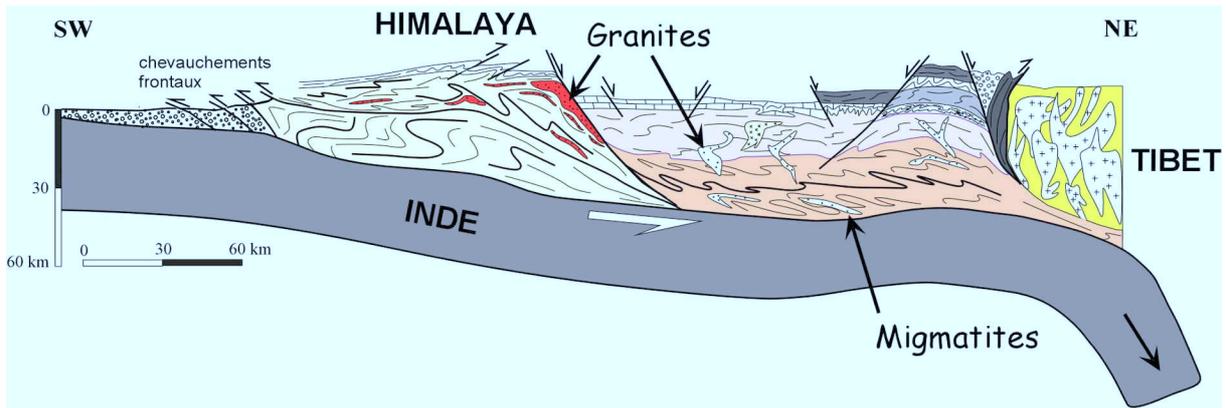


Figure 1-2 : Coupe projetée dans le système collisionnel Inde/Himalaya/Tibet (modifiée d'après Guillot, 2000), montrant les relations entre les granites syntectoniques himalayens et les structures comme les plis, les chevauchements et les failles normales. MBT = Main Boundary Thrust, MCT = Main Central Thrust, HHC = High Himalayan Crystalline, LH = Lesser Himalaya, STDS = South Tibetan Detachment System.

sif (Guillot, 1993). A l'opposé, des modèles d'extrusion syn-raccourcissement de dômes de migmatites associées génétiquement aux leucogranites ont aussi été proposés (Burg et al., 1997; Dèzes, 1999; Rolland et al., 2001). Ces extrusions sont associées à des plissements d'échelle crustale, en contexte transpressif.

Le contexte transpressif domine dans la plupart des zones orogéniques. Il est présent dans la chaîne himalayenne au niveau des deux syntaxes, est et ouest (Hubbard et al., 1995; Burg et al., 1997; Schneider et al., 1999; Rolland et al., 2001). On le trouve aussi dans la chaîne cadomienne du massif armoricain à la fin du Précambrien (Brown, 1995). Dans les deux cas, le raccourcissement horizontal oblique aux structures majeures était synchrone de l'anatexie. Cette cinématique produit des zones en raccourcissement horizontal qui s'épaississent et qui sont exhumées, bordées par des zones de cisaillement verticales, à jeu décrochant et normal (Thompson et al., 1997). Proche de la surface, le système transpressif permet de créer facilement des sites de mise en place (pull-apart). En profondeur, l'anatexie a une forte influence sur la rhéologie (voir plus bas), ce qui permettrait de déclencher l'exhumation (Rolland et al., 2001).

En contexte transpressif également, la chaîne centrale du Maine (« Central Maine Belt », CMB) dans les Appalaches présente une proportion importante de migmatites associées à des corps granitiques de petits volumes (Brown & Solar, 1998b; Brown & Solar, 1998a; Solar et al., 1998; Solar & Brown, 2001b). La CMB est composée d'une alternance de couches de pélite et de psammite qui furent déformées et métamorphisées dans les conditions du faciès schistes verts et amphibolite supérieur lors de l'orogénèse acadienne du Dévonien inférieur (Solar et al., 1998) (Fig. 1-3). Ces métasédiments furent intrudées de plutons granitiques syntectoniques au Dévonien inférieur et moyen. A l'échelle de la croûte, la déformation est hétérogène. Un système de zones de cisaillement d'échelle kilométrique est composé de ceintures rectilignes montrant une déformation par aplatissement prépondérant. Ces zones s'anastomosent autour de losanges dans lesquels la déformation fut principalement en constriction (Fig. 1-3b).

Dans la CMB, les migmatites sont soit stromatitiques (voir glossaire sur les migmatites, section 5.1), soit hétérogènes en fonction de la zone à laquelle elles appartiennent. Ainsi, les stromatites se trouvent plutôt dans les zones d'aplatisse-

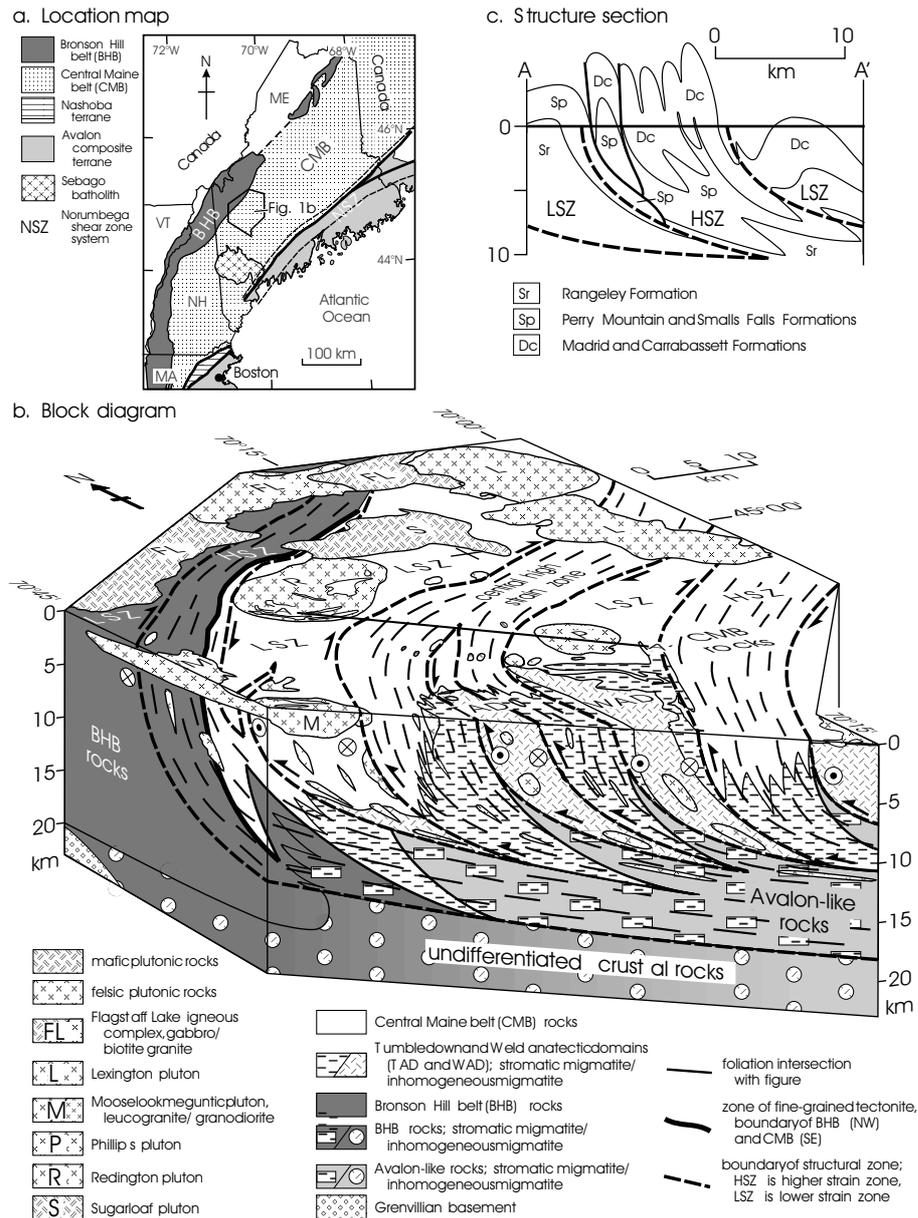


Figure 1-3 : Exemple d'unité crustale migmatisée dans la 'Central Maine Belt', Appalaches, USA (Solar et al., 1998). **a)** Carte du contexte géologique régional. **b)** Bloc diagramme montrant les relations entre les plutons granitiques et les grandes zones de cisaillement. Ces dernières délimitent des zones de fortes déformations (HSZ) et des zones de faibles déformations (LSZ). Dans les HSZ, la foliation est verticale, pénétrative et une forte composante de déformation non coaxiale est présente, tandis que dans les LSZ, la foliation est moins marquée et son pendage est variable. En profondeur, ces zones se parallélisent à un décollement horizontal. Les migmatites sont stromatitiques dans les HSZ, tandis qu'elles sont hétérogènes (résiduelles ou diatexites) dans les LSZ qui concentrent aussi les plutons de leucogranites. **c)** Coupe montrant une interprétation en plis kilométriques associés aux zones de cisaillement. Pour plus de détails, voir Brown & Solar (1998a et b), Solar et al. (1998), Solar & Brown (2001).

ment, tandis que les migmatites hétérogènes, souvent des diatexites, apparaissent dans les régions où la constriction fut importante. De même, les plutons granitiques de petits volumes ont une forme plane ou cylindrique respectivement dans les zones de cisaillement ou de constriction. Ainsi, la forme, la taille et la nature des structures encaissantes influencent la forme, la taille et la position des corps granitiques, des leucosomes aux plutons kilométriques. Cette correspondance avec

le régime de déformation suggère que *les migmatites et les plutons ont enregistré un flux de liquide de fusion granitique synchrone de la déformation de la croûte.*

Cet exemple des Appalaches renseigne aussi sur les conditions aux limites et sur la cinématique lors de la déformation de la croûte inférieure et moyenne partiellement fondues. Ce type d'informations est indispensable pour calibrer les expériences de modélisation analogique ou numérique qui sont présentées dans ce mémoire. La coupe de la figure 1-3c montre ainsi que les unités migmatisées ont été déformées en *raccourcissement subhorizontal au-dessus d'un niveau de décollement profond*. Des plis d'échelle kilométrique se sont formés et leurs flancs ont été verticalisés. La composante décrochante a certainement accentué cette verticalisation des structures. Ces zones localisent des cisaillements majeurs qui ont fonctionné à la fois en jeu inverse et dextre. Elles se branchent en profondeur sur le plan de décollement profond.

2.3 Après la collision, l'effondrement post-orogénique

Durant la collision continentale, tous les magmas granitiques produits en profondeur ne vont probablement pas se mettre en place dans la croûte supérieure. Bien qu'encore controversée, l'idée qu'environ 20% de liquide de fusion stagnent en profondeur sous le Tibet se développe (Partzsch et al., 2000; Schilling & Partzsch, 2001). Une telle quantité de liquide a des conséquences rhéologiques importantes qui se traduisent par la diminution de la résistance des croûtes inférieure et moyenne (Thompson et al., 2001; Vanderhaeghe, 2001) (voir aussi la section « rhéologie »). Le matériel crustal peut alors être à nouveau raccourci (« rajeunissement ») de la chaîne, Thompson et al., 1997) ou s'effondrer (Burg et al., 1994; Gardien et al., 1997; Vanderhaeghe et al., 1999). Dans les deux cas, la phase de déformation qui s'ensuit permet d'exhumer des roches de haut degré

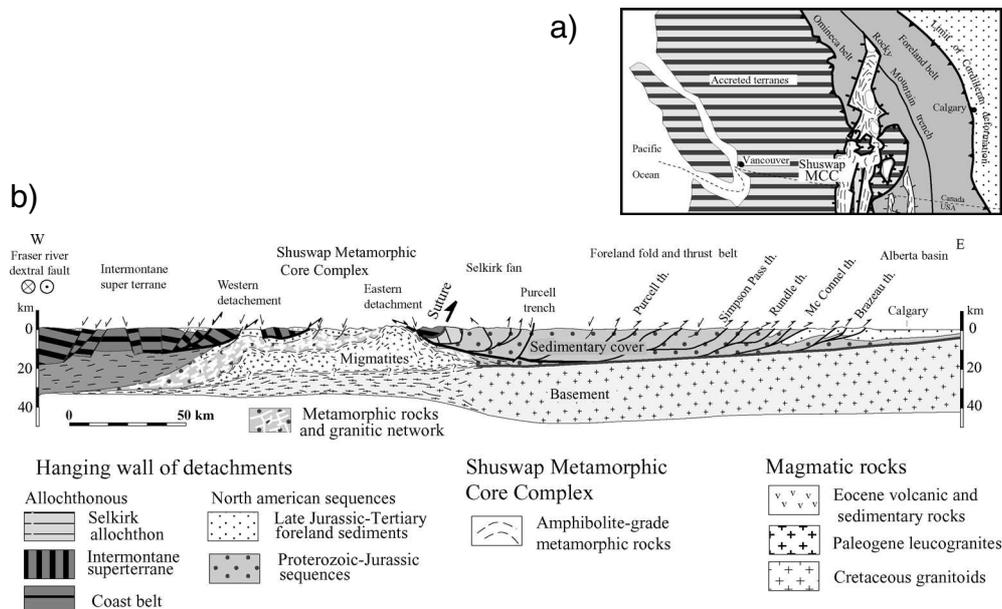


Figure 1-4 : Exemple d'unité crustale migmatisée, le 'Shuswap Metamorphic Core Complex' dans les Cordillères canadiennes (Vanderhaeghe & Teyssier, 1997; Vanderhaeghe et al., 1999). **a)** Carte du contexte géologique régional. Le dôme migmatitique est bordé par des détachements qui ont permis son exhumation par rapport aux séries allochtones à l'ouest ('accreted terranes') et sédimentaires autochtones à l'est. **b)** Coupe montrant l'épaisseur importante des migmatites et leur relations avec les leucogranites environnants.

métamorphique telles que les migmatites et les granulites. Dans le cas de l'effondrement post-orogénique, l'extension généralisée permet l'amincissement de la croûte épaissie.

Les coupes et cartes de Vanderhaeghe & Teyssier (1997) et Vanderhaeghe (1999) dans le sud de la Cordillère Canadienne présentent le « Shuswap Metamorphic Core Complex » qui est un exemple typique d'orogène qui s'est effondrée à la fin de son histoire (Fig. 1-4). Cet ensemble comprend des dômes migmatitiques exhumés et des leucogranites mis en place dans des roches métamorphisées dans le faciès amphibolite. Un autre exemple bien connu de ce type de contexte géologique est le complexe du Velay dans le Massif Central Français (e.g., Malavieille et al., 1990; Vanderhaeghe et al., 1999; Ledru et al., in press). Sa description et l'étude d'un affleurement de migmatites appartenant à la ceinture de roches métamorphique du granite du Velay fera l'objet de la quatrième partie.

En conclusion de ce tour d'horizon rapide, il semble indispensable d'intégrer la fusion partielle et les transferts de magmas granitiques dans l'évolution des orogènes. Les migmatites, comme source possible de ces magmas et comme zones de faible résistance, ont un rôle clé qui est encore mal compris. Les sections suivantes vont donc s'attacher à résumer les connaissances sur le sujet et à montrer l'intérêt de mon étude.

3 Anatexie et réactions de fusion

La fusion partielle est avant tout une réaction entre des minéraux à une température et une pression données. Le but de ce chapitre n'est pas de citer de manière exhaustive toutes les réactions de fusion et leurs effets, mais de répondre à un certain nombre de questions de base :

- *De quelle façon la température nécessaire à la fusion est-elle atteinte ?* Pour répondre à cette question, je ferai appel aux modélisations thermiques des domaines orogéniques.
- *Quelles roches crustales fondent ?*
- *Quels sont les taux de fusion ?* Pour répondre à ces deux dernières questions, je ferai appel aux résultats de la pétrologie expérimentale.

3.1 Modèles thermiques

Les granites crustaux peuvent être générés dans divers contextes orogéniques et anorogéniques, pourvu qu'une *anomalie thermique* existe et que les lithologies en jeu soient *fertiles*. La source de chaleur nécessaire peut être de deux sortes : (1) interne, c'est la désintégration radiogénique des éléments comme le potassium ou l'uranium ; (2) externe, l'apport de matériel chaud en provenance du manteau lithosphérique ou asthénosphérique.

Il s'ensuit que dans les zones de convergence (subduction et collision continentale), les trajets *P-T* suivis par les roches crustales peuvent aussi être de deux types (Brown, 1993) : trajets horaires (« *clockwise* », CW) ou anti-horaires

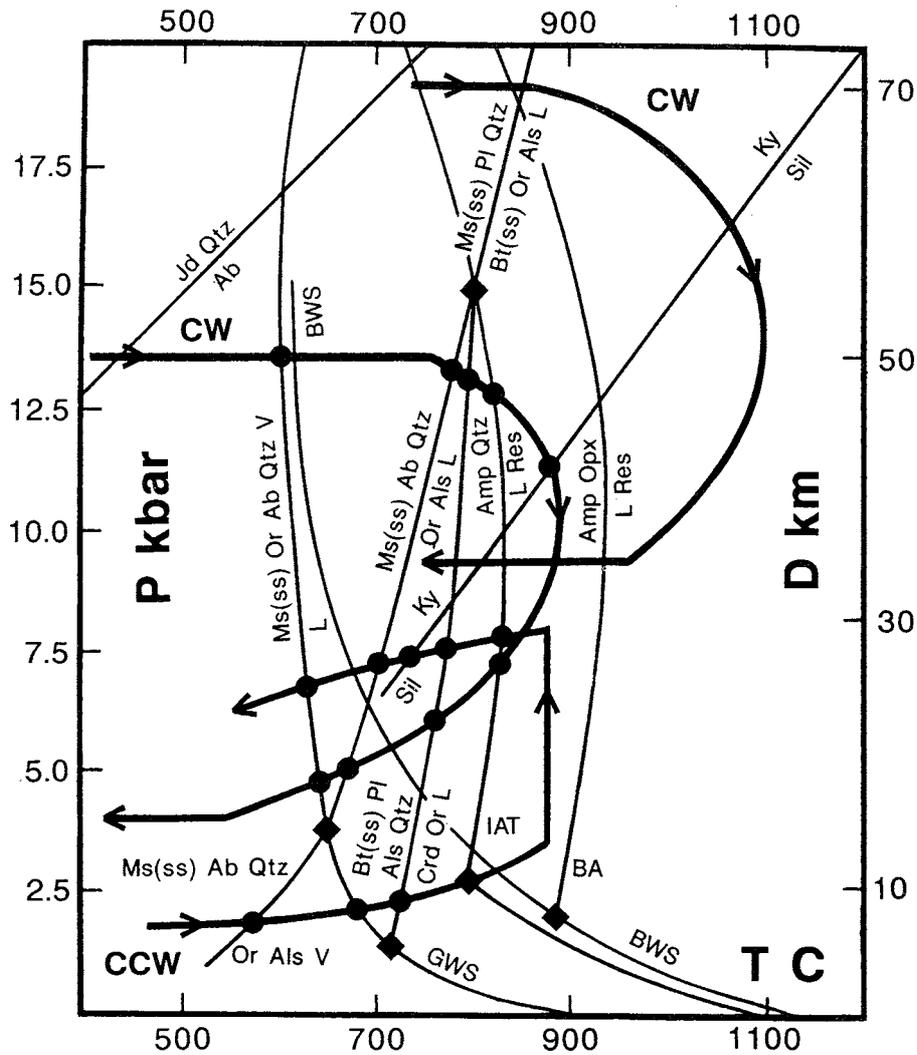


Figure 1-5 : Diagramme pression–température (d’après Thompson (1990), tiré de Brown (1994)) montrant : (1) quelques réactions de fusion dans les métapelites. (2) Quelques réactions de fusion dans les amphibolites. (3) Des chemins P-T synthétiques pour l’épaississement de la croûte continentale (CW ; deux cas : 50 et 70 km de croûte épaissie), suivi par un réchauffement isobare de 20 Ma et d’un amincissement par érosion en 100 Ma, ceci pour un géotherme initial chaud amenant les roches dans le faciès granulite. (4) Un chemin P-T synthétique (CCW) pour un réchauffement suivi d’un épaississement crustal et d’un refroidissement pratiquement isobare. CW = clockwise path ; CCW = counterclockwise path ; GWS = Granite Wet Solidus ; BWS = Basalt Wet Solidus ; IAT = Island Arc Tholeiite ; BA = Basalte alcalin ; L = liquide de fusion ; Res = résidu de fusion.

(« counterclockwise », CCW). Les trajets CW de la figure 1-5 ont été modélisés pour un épaississement de la croûte continentale jusqu’à 50 ou 70 km, suivi d’un amincissement par érosion en 100 Ma. Une période post-épaississement de 20 Ma à pression constante est intégrée au calcul (Brown, 1993). Pendant cette période, la température augmente fortement à cause de la production de chaleur par désintégration radiogénique (England & Thompson, 1986; PatinoDouce et al., 1990). Lors de la décompression, de nombreuses réactions de fusion sont croisées. Le trajet P-T atteint un pic de température situé entre 800 et 900°C, pour une pression de 10 kbar. Pour des géothermes initiaux très chauds et un très fort épaississement, la température peut atteindre plus de 1000°C (Fig. 1-5).

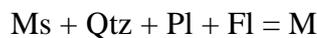
Les trajets CCW, moins courants, supposent que le réchauffement précède ou est synchrone de l’épaississement (Sandiford & Powell, 1991). Des modèles

d'orogènes qui impliquent un trajet CCW mettent en jeu le sous-placage et l'intrusion dans la croûte de magmas dérivés du manteau (Bergantz, 1989). Une augmentation du flux mantellique à cause du détachement d'une partie du manteau lithosphérique associé à la remontée de l'asthénosphère chaude produit aussi ce type de trajet (Bird, 1979; Sandiford & Powell, 1991).

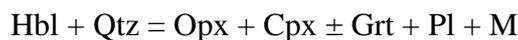
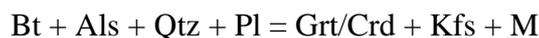
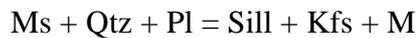
3.2 Les réactions de fusion des roches crustales

Une fois la température nécessaire ($> 650^{\circ}\text{C}$) atteinte, la roche peut commencer à fondre. Les réactions de fusion sont très variées en fonction de la paragenèse initiale et de la présence ou non d'une phase riche en eau libre (fluide aqueux supercritique). Un paramètre essentiel dans l'étude des migmatites et plus généralement de la fertilité des zones orogéniques est la quantité de liquide produite à une certaine température. La pétrologie expérimentale a permis de répondre à ces questions dans la plupart des cas. Elle a démontré notamment que la présence d'eau libre dans la roche favorise la fusion (Clemens & Droop, 1998; PatinoDouce & Harris, 1998; Gardien et al., 2000). Cependant, les réactions de fusion par déshydratation des micas et des amphiboles paraissent les plus importantes (« dehydration melting », Clemens & Vielzeuf, 1987; Le Breton & Thompson, 1988; Vielzeuf & Holloway, 1988; Rushmer, 1991; Stevens & Clemens, 1993; Gardien et al., 1995; Gardien et al., 2000). Voici quelques exemples de réactions :

- Avec fluides :



- Sans fluides :



Abréviations de minéraux d'après (Kretz, 1973), M = liquide de fusion silicaté hydraté et Fl = fluide aqueux supercritique.

Les droites de ces réactions (Fig. 1-5) montrent que, si la roche possède un peu ($< 2\text{-}3$ vol.%) d' H_2O libre dans ses pores, la fusion peut débuter à $600\text{-}650^{\circ}\text{C}$ pour des pressions allant de 5 à 15 kbar. Ceci correspond au solidus d'un granite hydraté (première réaction ci-dessus). Cependant, la porosité des roches qui ont déjà subi un métamorphisme important avant l'anatexie est très faible ($< 0.1\%$, Thompson & Connolly, 1990). De plus, le liquide de fusion produit va dissoudre très facilement l'eau libre qui reste présente. C'est pourquoi la fusion en présence de fluides ne produit que très peu de liquide de fusion (< 5 vol. %, Stevens & Clemens, 1993), mais elle assure un système chimique dépourvu d'eau libre pour les réactions suivantes.

Avec l'augmentation de la température, les réactions de fusion impliquent l'eau issue de la déshydratation des minéraux hydratés. Ces réactions sont caractérisées par des pentes dP/dT fortement positives susceptibles d'être recoupées durant le trajet prograde des roches (Fig. 1-5). La décompression adiabatique ou à

température croissante augmente ensuite significativement la production de liquide dans de nombreuses orogènes.

Parmi les réactions de fusion par déshydratation, celle mettant en jeu la muscovite est essentielle dans la production de magmas granitiques (Harris et al., 1995; Patino Douce & Harris, 1998; Solar & Brown, 2001b). Elle commence à environ 700-750°C à 5 kbar et à 800°C à 10 kbar (Clemens & Vielzeuf, 1987; PatinoDouce & Harris, 1998) et permet une fusion importante quand l'orogène accumule en profondeur une grande quantité de métasédiments pélitiques. La quantité de liquide sera cependant limitée par la quantité de muscovite disponible et on arrive parfois à l'épuisement complet du contenu en muscovite (exemple du Velay, Montel et al., 1992). La déshydratation de la biotite requiert une température plus élevée, de l'ordre de 800-950°C à 10 kbar (Le Breton & Thompson, 1988; Gardien et al., 1995). Enfin, la déstabilisation de l'amphibole n'est possible que pour des températures supérieures à 850-950°C (Rushmer, 1991).

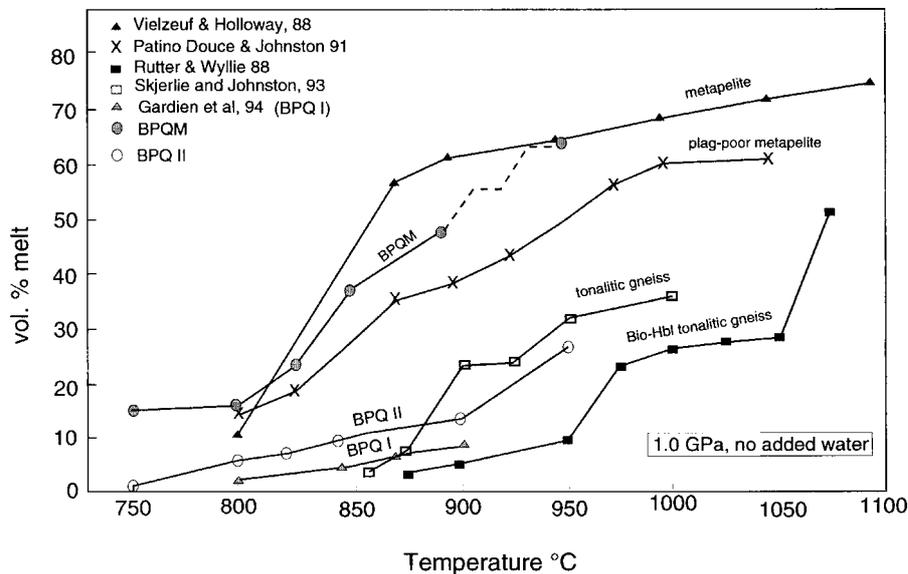


Figure 1-6 : Pourcentage de liquide de fusion en fonction de la température pour des expériences de fusion partielle de muscovite et de biotite dans des métapélites et des graywackes et d'amphibole dans des tonalites (Gardien et al., 1995). La pression est de 1 GPa et il n'y a pas d'ajout d'eau. Cette compilation montre l'énorme disparité en terme de production de liquide en fonction de la composition de la roche. Cela conduit à la notion de fertilité des roches.

Si le trajet $P-T$ suivi par les roches se caractérise par une augmentation de température isobare, la quantité de liquide produit augmente avec la température (Gardien et al., 1995), et des températures de l'ordre de 800-850°C sont indispensables pour atteindre un taux de fusion important, supérieur à 30% (Fig. 1-6). La figure 1-6 montre aussi l'importance de la paragenèse initiale dans la quantité de liquide de fusion produite. Gardien et al. (1995) ont montré que le ratio quartz/feldspath ou la présence conjointe des deux micas, muscovite et biotite, sont des paramètres essentiels.

On comprend donc qu'à l'échelle de l'affleurement, une roche hétérogène du point de vue chimique et minéralogique fondra d'une façon hétérogène. Ce contrôle de la lithologie est primordial sur la répartition du liquide de fusion au début de l'anatexie.

Pour résumer, le tableau 1-1 rassemble pression, température et taux de fusion maximum atteints dans des migmatites. Les modélisations thermiques qui ont permis de définir les trajets *P-T* synthétiques de la figure 1-5 corroborent les estimations thermobarométriques effectuées sur ces différents cas réels.

Pour simplifier, on peut retenir qu'une migmatite « standard » a enregistré les conditions suivantes : des températures de l'ordre de **800±50°C**, pour des pressions de **4-7 kbar**, et un taux de fusion autour de **20-30%**.

Tableau 1-1 : Conditions P-T lors de l'anatexie et taux de fusion maximum dans sept environnements comprenant des migmatites avec ou sans intrusions de granites de même âge. Dans tous les cas, la collision continentale a épaissi fortement la croûte. Dans le cas du Shuswap et du Velay, un effondrement gravitaire post-orogénique a suivi la période de fusion maximale.

Où ?	P (kbar)	T (°C)	Vol. %	Références
Appalaches, USA	6	750-800	30%	Brown & Solar, 1999; Solar & Brown, 2001b
Turku area, Finlande	5-6	800	20%	Mengel et al., 2001
Shuswap, cordillère canadienne	4.5-5	850	30% ?	Vanderhaeghe & Teyssier, 1997; Vanderhaeghe et al., 1999
Revelstoke, cordillère canadienne	7.5-9	720-820	40-50%	Nyman et al., 1995
St. Malo, massif armoricain	4-7	< 800	< 40%	Milord et al., 2001
Migmatites de Yaoundé, Cameroun	10-12	800	20%	Barbey et al., 1990
Velay, Massif Central Français	1) > 5 2) 4-5	< 750 760-850	<20% 60-70%	Montel et al., 1992

4 La ségrégation du liquide de fusion

4.1 Définitions

La fusion commence au joints et aux points triples entre les minéraux réactants. Des magmas granitiques se forment quand la fraction de liquide a été drainée de la partie résiduelle solide. Dans cette étude, les définitions suivantes seront utilisées :

La ségrégation du liquide de fusion désigne la séparation de la phase liquide et de la phase solide par le mouvement du liquide des poches infra-millimétriques entre les grains à des sites d'accumulation primaires plus grands d'au moins un ordre de grandeur et où le liquide est majoritaire.

La migration est un mouvement sous forme de magma (liquide majoritaire + cristaux entraînés) à travers un réseau de conduits à l'échelle métrique à kilométrique sur des distances du même ordre.

En bref, c'est après sa ségrégation que le liquide de fusion pourra migrer. Dans tout ce chapitre consacré à la ségrégation, le mouvement du liquide est donc supposé très faible, opérant à l'échelle du grain ou du leucosome, c'est-à-dire de quelques centimètres tout au plus. Ségrégation et migration sont deux phénomènes liés, mais distincts, opérant à des échelles différentes et mettant en jeu divers mécanismes. Ces mécanismes seront décrits dans les chapitres suivants.

4.2 La distribution du liquide de fusion à l'échelle du grain

Pour bien comprendre les processus de ségrégation, une vision claire de la topologie du liquide à l'échelle de la lame mince est nécessaire. Dans les systèmes partiellement fondus, la distribution du liquide à l'équilibre est gouvernée par le principe de minimisation de l'énergie interfaciale. Dans une roche « idéale », monominérale et sous pression hydrostatique, l'angle de mouillage contrôle la topologie du liquide de fusion à un taux de fusion donné (Laporte & Watson, 1995). Cependant, les roches crustales métamorphisées sont plus complexes du fait des différents types de minéraux qui les composent, ainsi que de leur forme et de leur taille variées. Tout ceci rend la caractérisation théorique de cette topologie très difficile.

Dans des expériences de fusion partielle de roches crustales, il est possible de tremper le matériau et de préserver les textures caractéristiques. Les minéraux qui ont réagis sont typiquement corrodés et arrondis (Rushmer, 1991; Gardien et al., 1995). Si l'anisotropie est forte et le taux de fusion faible, le liquide forme des petites poches isolées au points triples de grains (Laporte & Watson, 1995). A mesure de l'augmentation de la fusion, des films de liquide aux frontières de grain s'élargissent et s'interconnectent. Les poches de liquides ont des bords arrondis pointant vers l'intérieur (« *cusped margins* », Fig. 1-7a). Si les minéraux bordant la poche ont recristallisés au contact du liquide, ils présentent des faces rectilignes (Jurewicz & Watson, 1985).

Dans les migmatites, la reconnaissance d'anciennes poches de liquide est difficile car le refroidissement lent lors d'un métamorphisme régional a tendance à effacer ces structures. Cependant, il existe quelques exemples dans lesquelles ce type de textures s'observent (Brown et al., 1999; Rosenberg & Riller, 2000;

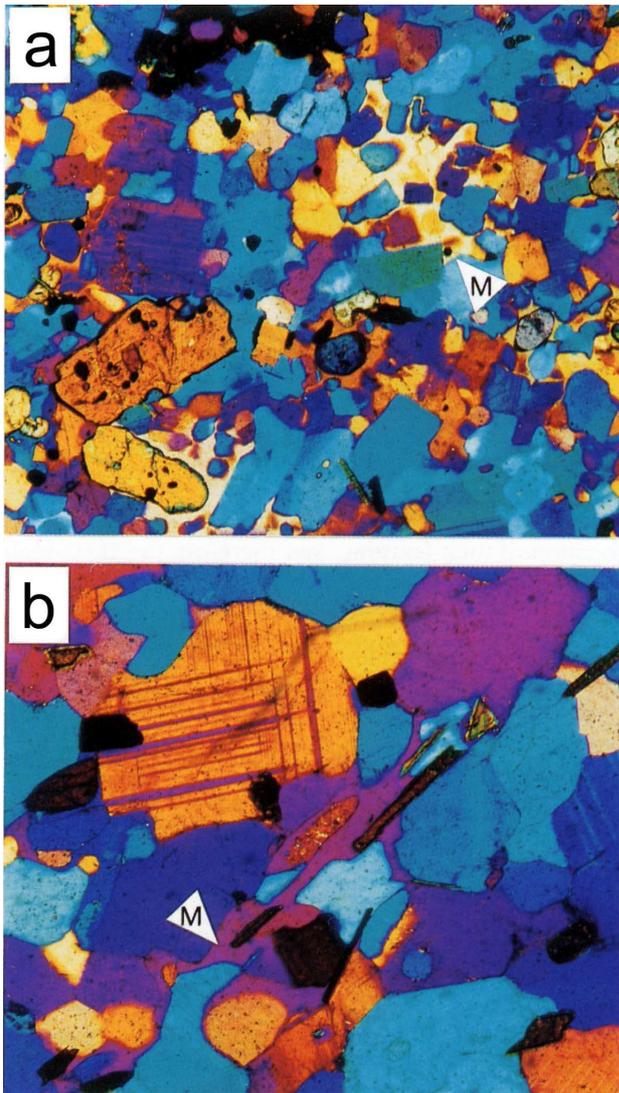


Figure 1-7: Microphotographies montrant les textures permettant de déduire la présence ancienne de liquide de fusion dans des roches métamorphiques de haut degré (d'après Sawyer, 2001). Les polariseurs sont croisés et la lame de quartz onde est intercalée. (a) Métapélite partiellement fondue. (M) Ancienne poche de liquide avec des bords en tablettes ("blocky outlines"), indiquant une cristallisation à partir du liquide. (b) Métagreywacke granulitique. Poches de liquide (M) reliées entre elles le long de cristaux de biotite corrodés ayant réagi lors de la fusion. Cet exemple montre que la fusion est localisée dans le plan de foliation.

Marchildon & Brown, 2001; Sawyer, 2001). La cartographie sur une lame mince de ces anciens films de liquide est alors possible (Sawyer, 2001, Fig. 1-7). La distribution du liquide peut être homogène sur de grandes surfaces. La foliation de la roche contrôle l'orientation des films si la réaction de fusion implique la déstabilisation des micas (Fig. 1-7b). En effet, la fusion débute seulement au contact des muscovites ou des biotites qui se déstabilisent.

En conclusion, à l'échelle du grain, la distribution du liquide de fusion est homogène si la répartition des minéraux réagissants est homogène. En cas d'anisotropie de la roche, la topologie du liquide mimera la structure de cette dernière. Si les poches de liquide sont trop peu nombreuses et isolées les unes des autres, aucune ségrégation n'est possible. On doit donc s'intéresser à la connectivité de ces poches de liquide.

4.3 Perméabilité et mouvement local du liquide

Le degré d'interconnexion (ou « connectivité ») d'un réseau de tubes et films remplis de liquide entre les grains fixe la valeur de la *perméabilité* de la roche partiellement fondue. Plusieurs auteurs ont montré expérimentalement qu'un taux de fusion relativement faible (< 10%) est nécessaire pour assurer l'interconnexion et donc la ségrégation (Rushmer, 1995; Rutter & Neumann, 1995). Plus précisément, dans le cas des roches basiques et ultrabasiques, ce taux est inférieur à 5% (Laporte & Watson, 1995; Daines & Kohlstedt, 1997), et dans le cas des gneiss, ce seuil est à 8% et caractérise le « *Liquid Percolation Threshold* » (LPT, Vigneresse et al., 1996).

Au delà du LPT, le liquide forme un film continu le long des frontières de grain (Fig. 1-

8a). La perméabilité peut être anisotrope si la texture de la roche est anisotrope. La foliation guide alors le liquide et la perméabilité est plus forte dans les directions incluses dans le plan de foliation (Laporte & Watson, 1995). Inversement, la perméabilité est très faible perpendiculairement aux lits riches en biotite des migmatites (les mélanosomes, voir le glossaire sur les migmatites dans la section suivante).

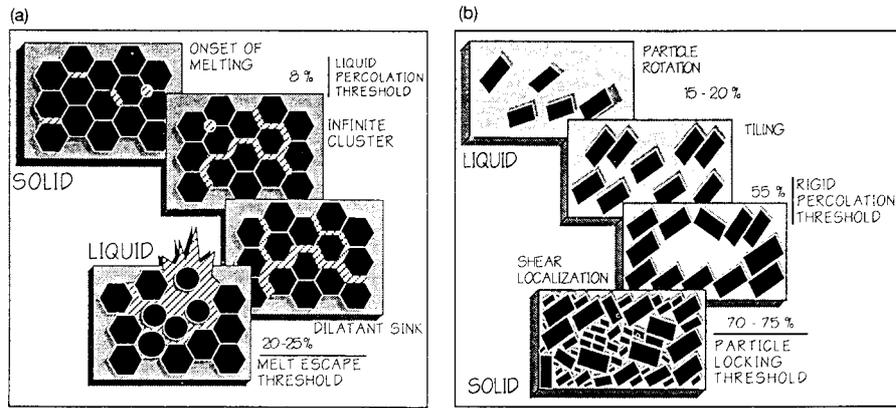


Figure 1-8 : Transitions rhéologiques dans un système partiellement fondu (Vigneresse et al., 1996). Ces transitions contrôlent aussi les facultés de mouvement du magma. **a)** Transition du solide au liquide. Lors de l'avancement de la fusion, les films de liquide mouillant les grains se connectent pour permettre une libre percolation à travers la roche (LPT). Le MET est le seuil à partir duquel le liquide et des cristaux résiduels peuvent s'échapper de la matrice. **b)** La transition du liquide au solide n'est pas l'inverse de la précédente. Quand leur pourcentage est faible, les particules en suspension peuvent tourner librement. Le tuilage et l'agrégation de cristaux crée une charpente solide qui peut soutenir les contraintes (RPT). Ensuite, la localisation de la déformation et la dilatation peuvent encore intervenir jusqu'au PLT qui traduit le début d'un comportement de solide.

Une fois le seuil de connectivité passé, le mouvement du liquide est subordonné à l'existence d'un gradient de pression entre les pores remplis de liquide et un site d'accumulation en dépression relative. Le mouvement a lieu par écoulement à travers la porosité (« porous flow ») selon la loi de Darcy :

$$\phi(\mathbf{v} - \mathbf{V}) = -\frac{k}{\eta_m} \text{grad}P \quad (1)$$

où ϕ est la porosité, \mathbf{v} et \mathbf{V} les vitesses respectives du liquide et de la matrice, k la perméabilité, η_m la viscosité du liquide (« Melt ») et P la pression (Richardson, 1998). L'utilisation des deux vitesses, pour le liquide et la matrice, vient de l'idée qu'il peut y avoir mouvement en masse de l'ensemble liquide + matrice ($\mathbf{v} = \mathbf{V}$) et donc pas de ségrégation (Sawyer, 1994). Ce cas peut se présenter lors d'instabilités gravitaires à grande échelle. Généralement, $|\mathbf{v}| \gg |\mathbf{V}|$. \mathbf{V} et \mathbf{v} peuvent aussi être de sens opposé, comme dans le cas de la compaction (voir ci-dessous).

De forts gradients de pression, une forte perméabilité et une faible viscosité du liquide augmentent la vitesse de séparation des deux phases. La viscosité du liquide de fusion varie en fonction de la concentration en silice et de la teneur en eau. Dans le cas des systèmes granitiques, on a classiquement des valeurs de 10^4 Pa s (magma granitique hydraté) à 10^{10} Pa s (magma granitique sec). Scaillet et al. (1998) ont cependant montré qu'une valeur moyenne de $10^{4.5}$ Pa s est satisfaisante pour la plupart des magmas granitiques (avec un maximum de 10^6 Pa s).

Pour une migmatite donnée, la composition moyenne en silice et en eau du liquide de fusion varie très peu, il en sera donc de même pour la viscosité.

La valeur de la perméabilité dépend de la porosité suivant une relation du type :

$$k = k_0 \phi^n \quad (2)$$

où n égale 2 ou 3 et k_0 a la dimension d'une aire et est lié à la taille des grains ($k_0 \sim 10^{-9} - 10^{-10} \text{ m}^2$). La perméabilité varie donc dans la fourchette $10^{-10} - 10^{-16} \text{ m}^2$. (Pour une discussion sur la perméabilité, voir par exemple McKenzie (1984) et Brown et al., (1999)). C'est donc un paramètre déterminant dans la loi de Darcy mais qui est fixée pour un système donné.

La question centrale de l'étude de la ségrégation est donc de savoir quels sont ces gradients de pression et comment naissent-ils. Il peut y avoir des causes internes et des causes externes au système. Les forces internes sont les tensions de surface tandis que les forces externes sont le champs de gravité et les contraintes tectoniques. Cela revient à examiner le cas d'une ségrégation sans déformation imposée et le cas où des discontinuités de vitesse aux limites du système sont imposées.

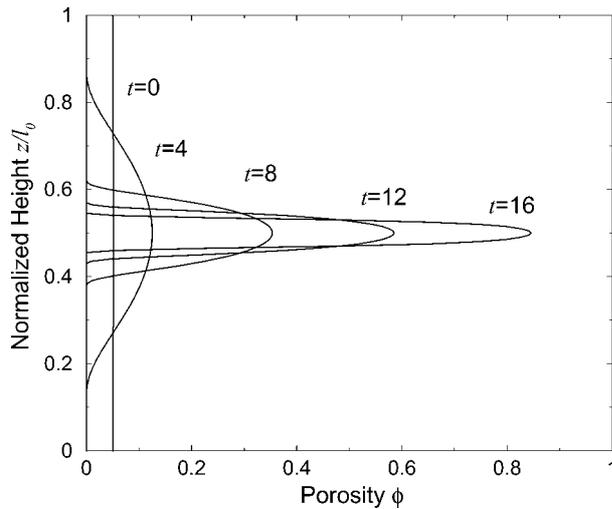


Figure 1-9: Porosité (= taux de fusion) en fonction de la profondeur à différents temps (normalisés) (Ricard et al., 2001). La différence de densité entre liquide et solide est nulle et la résistance à l'écoulement due à la loi de Darcy est négligée. Seules les tensions de surface permettent le mouvement et génèrent l'instabilité. La porosité initiale est 0.05 et présente une perturbation sinusoïdale de longueur d'onde l_0 et d'amplitude 0.001 avec son maximum à $l_0/2$. En laissant le système évoluer, un sill de liquide pratiquement pur est produit.

4.4 La ségrégation sans déformation imposée

A pression et température fixes, un ajustement textural s'opère pour réduire l'énergie libre interfaciale totale (Laporte & Watson, 1995). Il existe les énergies entre grains et les énergies entre grain et liquide. Ces dernières créent une pression dans le liquide dont l'intensité dépend du rayon de courbure des grains et donc de la porosité. Il s'établit donc une différence de pression entre deux régions de porosités différentes. L'écoulement du liquide se fera vers la région de plus forte porosité (Ricard et al., 2001). Ainsi, le phénomène s'auto-entretient puisque la différence de pression augmentera entre la région qui draine et la région qui perd son liquide. La figure 1-9 montre un cas simple unidimensionnel où la porosité initiale dépend de la profondeur suivant une loi sinusoïdale (Ricard et al., 2001). De cette manière, la porosité est en moyenne de 5% avec une très légère perturbation positive au milieu du système. Avec le temps et grâce aux seules tensions de surface, cette perturbation s'intensifie jusqu'à ce que tout le liquide forme une seule couche de liquide pur (un sill).

L'efficacité du phénomène dépend du contexte géologique. A l'aplomb d'une ride océanique, (Ricard et al., 2001) montrent qu'il est possible de séparer complètement le liquide contenu dans une couche de 50 m d'épaisseur dans le manteau, en un temps relativement court (1 Ma). Dans la croûte continentale, le même phénomène nécessitera dix à cent fois plus de temps. Pour des périodes de temps de l'ordre du million d'années, ce processus semble donc restreint à des microtransferts autour des grains permettant de former des poches de liquide millimétriques (Jurewicz & Watson, 1985). Dans des conditions statiques, une ségrégation efficace est donc impossible.

4.5 La ségrégation assistée par la déformation

La déformation augmente les distances parcourues par le liquide. Plusieurs modèles existent et s'appliquent à différents environnements en fonction de l'orientation des contraintes, de la température, des tailles de grains et de la rhéologie (viscosité du liquide et comportement mécanique du solide). Une revue des différents modèles est donc indispensable.

4.5.1 La compaction

Dans le cas de la compaction, le liquide de faible densité monte vers la surface tandis que la matrice solide se compacte de façon visqueuse. Un couplage est assuré entre les variations de porosité liée à cette compaction et les facultés de se mouvoir du liquide. Le mouvement du liquide de fusion provient de la différence de pression entre le liquide et la matrice solide.

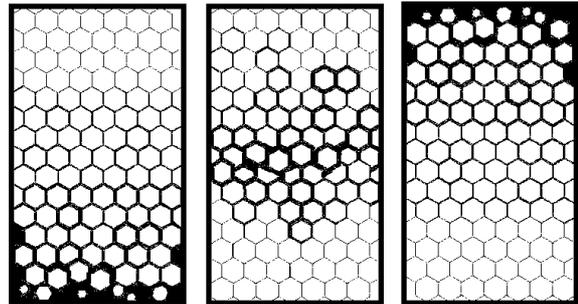


Figure 1-10: Principe de la compaction assistée par la gravité.

Les équations régissant ce modèle ont été établies pour la première fois par Sleep (1974). McKenzie (1984) a traité le cas unidimensionnel d'une couche partiellement fondue qui expulse le liquide présent près de sa base imperméable (Fig. 1-10). Scott & Stevenson (1986) proposent un modèle plus sophistiqué en deux dimensions qui décrit des bulles enrichies en liquide qui traversent le système. Récemment, Ricard et al. (2001) ont proposé une nouvelle approche physique du phénomène qui assure, contrairement à McKenzie (1984), une réelle incompressibilité au liquide et à la matrice solide (fluide visqueux), ainsi que la prise en compte des tensions de surface.

Le processus a une efficacité sur une longueur de l'ordre de la longueur de compaction (« *compaction length* ») :

$$\delta_c = \sqrt{\frac{4k\eta_s}{3\eta_m}} \quad (3)$$

où η_s et η_m sont respectivement les viscosités de la matrice Solide et du liquide de fusion (« Melt » en anglais). Au delà de δ_c les forces doivent être énormes pour extraire le liquide, comme le montre par une expérience simple unidimensionnelle de compaction dans une « presse à café » (Fig. 1-11). Ricard et al. (2001) ont démontré que ce système était équivalent à un amortisseur (fluide visqueux) avec durcissement (« strain hardening »). Le piston est contraint de descendre à vitesse constante et une couche de liquide pur se forme petit à petit au sommet de la couche (près du piston). La porosité décroît rapidement et principalement sous la couche de liquide pur, ce qui a tendance à fermer les chemins de percolation du liquide à travers la matrice. La force à appliquer pour compacter augmente avec la déformation jusqu'à devenir infinie et le processus doit s'arrêter (Fig. 1-11c). La porosité varie alors de zéro au sommet jusqu'au quart de la porosité initiale à la base de la couche. Plus l'épaisseur initiale de la couche est grande (par rapport à δ_c), plus les forces doivent être grandes pour faire fonctionner la presse (Fig. 1-11b). La ségrégation n'est pas totale : à la fin de l'expérience, il reste encore 17% de la quantité totale de liquide dans le mélange.

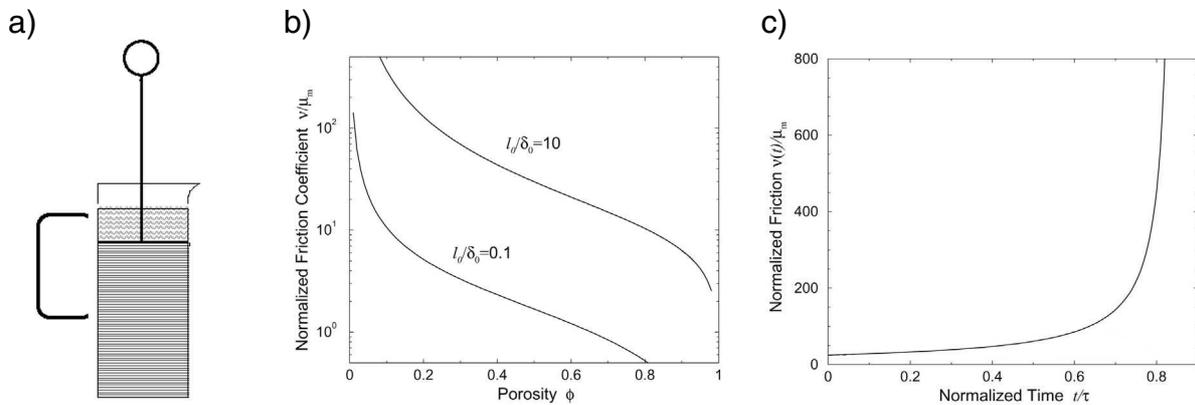


Figure 1-11 : Principe et résultats de la compaction unidimensionnelle (simplifié d'après Ricard et al., 2001). **a)** Exemple de la cafetière à piston. **b)** Coefficient de friction normalisé v/μ_m en fonction de la porosité, pour deux hauteurs du système compacté, exprimées par rapport à la longueur de compaction δ_0 . Le coefficient de friction traduit la résistance à faire descendre le piston dans l'exemple (a). Il diminue avec la porosité et augmente avec la hauteur du système. **c)** Evolution du coefficient de friction en fonction du temps normalisé au temps nécessaire pour séparer complètement liquide et solide. Ce coefficient est proportionnel à la pression à appliquer au piston pour extraire le liquide à une vitesse constante. Il devient infini quand la porosité atteint 0 près du piston. A ce moment, il reste encore 17% de liquide dans le système.

Les valeurs de la longueur de compaction δ_c sont toujours plus grandes dans le manteau que dans la croûte continentale. En effet, pour $k \sim 5 \times 10^{-10} \text{ m}^2$, $\eta_s \sim 10^{18} \text{ Pa s}$, et $\eta_m \sim 10 \text{ Pa s}$ (magma basaltique), 10^4 Pa s (magma granitique hydraté), 10^{10} Pa s (magma granitique sec très siliceux), les longueurs de compaction d_c égalent respectivement à 8 km, 250 m et 30 cm (Ricard et al., 2001). Ainsi, la compaction sous l'effet simple du poids de la matrice est considérée comme réaliste dans le manteau et de grande quantité de liquide pur peuvent être extraite. Dans la croûte continentale au contraire, il est impossible de séparer par ce seul biais le volume de liquide nécessaire à la fabrication d'un pluton.

4.5.2 La microfracturation

Ce terme désigne des petites fractures et bandes de cisaillement qui se forment entre ou dans les minéraux. (Rosenberg & Handy, 2000, 2001) ont effectué des expériences de modélisation analogique de la déformation d'une roche partiellement fondue à l'échelle du grain. Le matériau analogue est le norcamphor (un composé organique azoté) qui fond en présence d'une autre phase. A l'eutectique, un liquide est réparti de manière homogène aux points triples des cristaux de norcamphor. La déformation est enregistrée en continu sous le microscope. Le régime de déformation est soit en cisaillement simple (« *simple shear* »), soit en aplatissement pur (« *pure shear* » ; Fig. 1-12).

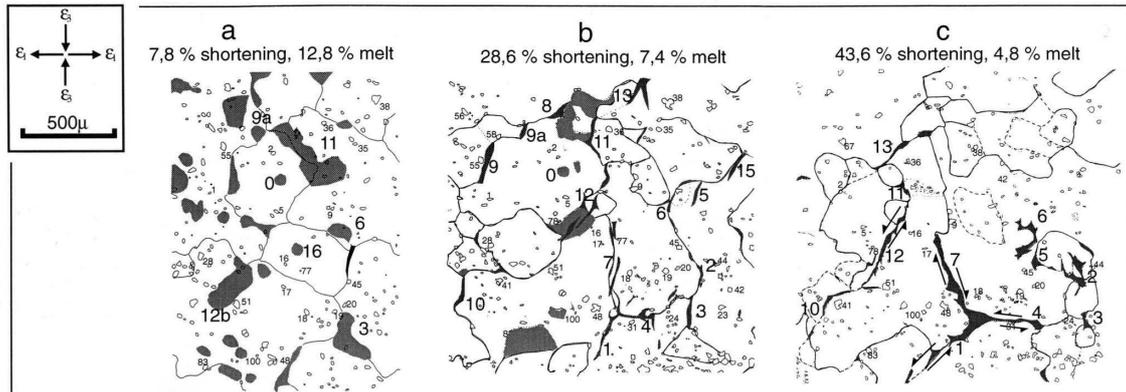


Figure 1-12 : Séquence montrant comment la forme et la distribution des poches de liquide de fusion changent pendant la déformation progressive en aplatissement pur d'un agrégat de norcamphor contenant un liquide eutectique benzamide-norcamphor (Rosenberg, 2001). Gris sombre : fractures remplies de liquide. Gris clair : poches de liquide créées avant déformation. Lignes en pointillé : sous-grains. Petits ronds blancs : particules de corindon servant de marqueurs. Les demi-flèches indiquent le glissement grain sur grain.

Bien que le mécanisme de déformation du norcamphor en condition subsolidus soit une combinaison de fluage par diffusion et par migration des dislocations, on observe la formation de microfractures remplies de liquide. La plupart de ces microfractures s'ouvrent à l'interface entre deux grains. Plus rarement, un grain est véritablement fracturé. *Ces microfractures sont parallèles à la direction de raccourcissement* (Fig. 1-12). En cisaillement simple, elles se connectent et forment une bande de cisaillement qui draine le liquide de fusion alentour. Le liquide migre à travers cette bande vers l'extérieur de l'échantillon qui n'est pas déformé et *a priori* à plus faible pression (Fig. 1-12). Dans le cas de l'aplatissement pur, les zones d'accumulation sont symétriques, de chaque côté de l'échantillon, c'est-à-dire que *le liquide a migré perpendiculairement à la direction de raccourcissement*. Ce ne sont donc pas les microfractures *parallèles* à la direction de raccourcissement qui permettent cette migration. Des microfractures *perpendiculaires* à la direction de raccourcissement, donc en position défavorable pour une ouverture, sont créées de manière *transitoire*, drainent de liquide et se referment ensuite rapidement (Fig. 1-12). La perméabilité fluctue et montre donc parfois des augmentations soudaines et transitoires.

En résumé, le raccourcissement facilite la ségrégation du liquide vis-à-vis du solide résiduel. La direction du mouvement du liquide est contrôlée essentiellement par les conditions aux limites : le liquide migre vers la surface libre et descend les gradients de pression. Dans le cas de la compaction assistée par la gravité, le mouvement est vertical, vers la surface. Dans le cas de la microfracturation, le mouvement dépend du champ local de déformation.

4.6 Les migmatites : le lien entre la ségrégation et l'ascension du magma granitique

Durant la phase d'*ascension*, le magma granitique devra parcourir au moins 10 km entre sa source et le pluton final (Clemens & Mawer, 1992; Brown, 1994; Harris et al., 2000). Cette ascension est considérée de plus en plus comme ayant lieu par écoulement très rapide dans des dykes verticaux qui alimentent un site d'accumulation (Clemens & Mawer, 1992; Petford et al., 1994; Weinberg, 1996; Petford & Koenders, 1998; Rubin, 1998). Pour un contraste de densité entre le liquide et son encaissant $\Delta\rho = 200\text{-}400 \text{ kg m}^{-3}$, la largeur minimale critique des dykes d'alimentation doit être de 2 m à 20 m pour éviter une solidification précoce du liquide avant le site de mise en place (Petford et al., 1994). Il y a donc un saut d'échelle entre le réseau de dykes de hauteur kilométrique et le leucosome centimétrique dans la migmatite. Par conséquent, il semble donc difficile de faire naître ces dykes d'alimentation directement sur les poches de liquides centimétriques qui se sont créées lors de la ségrégation. Une étape intermédiaire s'effectuant à l'échelle métrique est nécessaire : c'est la *migration* du liquide de fusion dans l'unité partiellement fondue, qui doit permettre de rassembler le liquide à une échelle intermédiaire entre le pluton et le leucosome. Les migmatites sont le lieu privilégié pour l'étude de la migration à cette échelle.

5 Les migmatites

5.1 Définitions

Le vocabulaire est un problème en soi dans l'étude des migmatites. Suivant les auteurs, un même mot aura une signification descriptive ou génétique. Devant l'abondance de modèles expliquant la formation des structures observables dans les migmatites, un terme génétique apportera la confusion si l'accord n'est pas trouvé avant sur le processus de formation (ou de destruction) de cette structure.

Pour cette étude, la nomenclature suivante est utilisée, basée sur les travaux de McLellan (1983), Johannes (1988), Brown et al. (1995a) et Kriegsman (2001) :

Anatexie : développement d'un liquide de fusion par fusion in situ.

Anatexite : roche ayant subi une anatexie.

Diatexite : migmatite dont le litage est désagrégé. La proportion de leucosome est plus forte que dans une métatexite et sa rhéologie est proche d'un magma. Cependant, la ségrégation du liquide de fusion peut produire une diatexite résiduelle mélanocrate.

Leucosome : corps leucocrate faisant partie d'une migmatite ; riche en quartz et en feldspath(s).

Mélanosome : corps mélanocrate faisant partie d'une migmatite ; riche en minéraux mafiques.

Mésosome : corps mésocrate faisant partie d'une migmatite, d'apparence métamorphique (gneiss ou schiste).

Métatexite : migmatite qui possède un litage métamorphique de type foliation gneissique, généralement accentué par les alternances leucosome-mélanosome-mésosome. Sa rhéologie est proche d'une roche métamorphique non fondue. Le terme s'oppose à diatexite.

Migmatite : roche composite comprenant à l'échelle macroscopique deux (ou plus) domaines pétrographiquement différents, l'un est la roche encaissante plus ou moins métamorphisée, l'autre a une apparence granitique, de texture aplitique ou pegmatitique. Il existe des migmatites *anatectiques* produites lors de la fusion partielle de la roche et des migmatites *subsolidus* dans lesquelles le transfert de matière qui conduisit à la différenciation est attribué à la diffusion à travers un fluide métamorphique statique.

Migmatisation : formation d'une migmatite par n'importe quel processus.

Néosome : corps produit lors de la migmatisation.

Paléosome : protolithe de la migmatite.

Schlieren : masse irrégulière avec des bords diffus, généralement riches en minéraux mafiques, qui baigne dans un leucosome. La migmatite correspondante possède plus de 50% de leucosomes.

Stromatite : une migmatite avec une structure litée due à l'alternance leucosome-mélanosome-mésosome. Synonyme de migmatite *lit-par-lit*.

5.2 La pétrologie des migmatites

Le but de ce chapitre est de rappeler quelques informations sur la pétrographie et la pétrologie des migmatites. Le lecteur se reportera à Brown (1994) et aux références citées pour plus de détails.

La première observation que l'on peut faire est que la taille moyenne des grains est largement supérieure dans le leucosome que dans le mésosome. Dans celui-ci, qui est pétrographiquement assez peu différent d'un gneiss (para ou ortho) ou d'un schiste, les minéraux ont subi une déformation plastique à l'état solide et généralement une réduction de la taille des grains (Johannes & Gupta, 1982; Dallain et al., 1999; Sawyer, 2001). Les cristaux, en particulier les micas, ont souvent une orientation préférentielle de forme qui définit la foliation. Le mélanosome est presque exclusivement constitué de minéraux mafiques, surtout la biotite mais aussi parfois l'amphibole ou la cordiérite. La taille des biotites est souvent plus grande dans les mélanosomes que dans les mésosomes. La sillimanite peut être présente dans le mésosome ou le mélanosome.

Le leucosome contient $Qtz \pm Kfs \pm Pl$ dans des proportions de granite (*s.s.*), de monzogranite, de tonalite ou de trondhjémite. La biotite, le grenat et la cordiérite peuvent aussi être présents. La texture grenue, parfois microgrenue, est considérée généralement comme magmatique, suggérant un état liquide du leucosome au temps de sa formation. Cependant, une grande taille de grain peut être aussi atteinte par diffusion lors d'un métamorphisme subsolidus (McLellan, 1983; Sawyer & Robin, 1986; Dallain et al., 1999). Il faut des critères très précis pour prouver que le leucosome est bien le résultat de la cristallisation d'un magma granitique : (1) des points triples à 120° , (2) des faces rectilignes de feldspaths au contact du quartz, (3) des feldspaths potassiques en « pointe » (« *cusped* ») (Vernon & Collins, 1988; Sawyer, 1999; Marchildon & Brown, 2001; Sawyer, 2001; voir section 4.2).

5.3 La forme des leucosomes

Les leucosomes sont souvent bien individualisés dans les migmatites, ce qui permet de repérer facilement leur forme et leur position dans l'affleurement. Celles-ci sont très variées en fonction surtout du degré de déformation de la migmatite. Dans la suite, les leucosomes sont classés suivant leur forme (plane ou linéaire), leur taille et leur position par rapport à une structure comme un pli ou une hétérogénéité mécanique.

5.3.1 Forme plane

C'est la géométrie la plus commune. Les leucosomes forment des couches plus ou moins épaisses, plus ou moins larges, plus ou moins continues et plus ou moins rectilignes (Fig. 1-13). Cette diversité semble liée à leur mode de formation. Avant de passer en revue les modèles de formation, les Figs. présentent quelques exemples caractéristiques. Les leucosomes plans se trouvent majoritairement dans les stromatites et sont parallèles à la foliation. Une distinc-

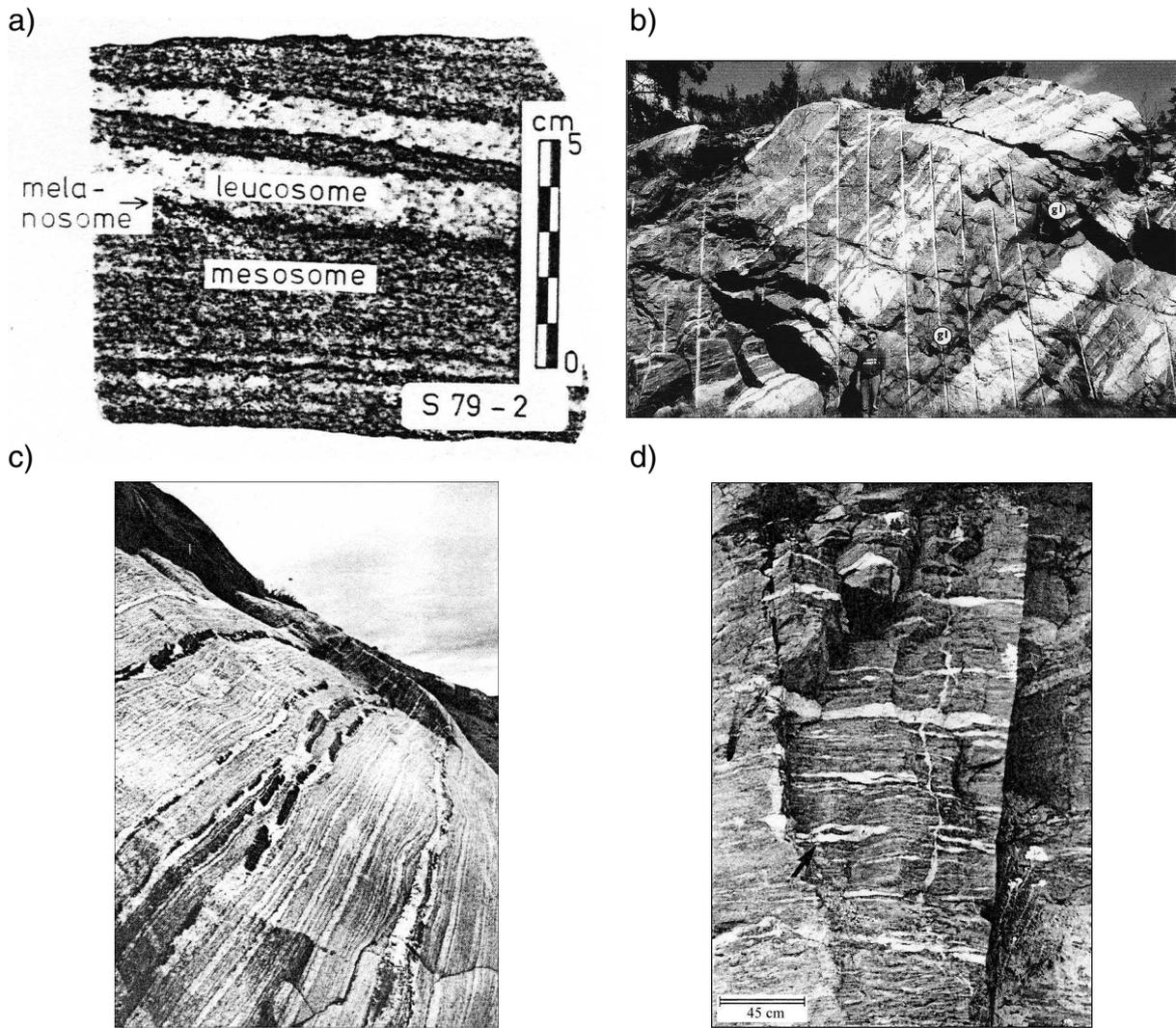


Figure 1-13 : Leucosomes plans. **a)** Migmatite stromatitique montrant le triplet mésosome/mélanosome/leucosome (Johannes & Gupta, 1982). **b)** Leucosome-sills ou leucosome très épais (> 1 m) dans une stromatite massive, Finlande (Mengel et al., 2001). **c)** Stromatite montrant des leucosomes fins ou épais, très continus, contenant des couches d'amphibolites boudinées. Ce pourrait être un intermédiaire entre stromatites fines et stromatites massives (Van der Molen, 1985). **d)** Leucosomes plans et discontinus dans une stromatite fine (Nyman et al., 1995).

tion est proposée entre stromatites *finement litées* ou *fines* et stromatites *massives*, selon l'épaisseur des leucosomes.

Les stromatites finement litées

Dans les stromatites fines, les leucosomes font entre 0.5 et 5 cm d'épaisseur, et la plupart moins de 3 cm (Maaloe, 1992). Cette épaisseur est indépendante de la proportion de leucosome à l'affleurement (Maaloe, 1992). Ils sont généralement bordés par deux mélanosomes très fins (1-5 mm, Fig. 1-13a), mais en rapport avec l'épaisseur du leucosome : il y a une certaine proportionnalité entre les deux épaisseurs. Enfin, le mésosome de couleur (proportion de minéraux mafiques) intermédiaire entre le leucosome clair et le mélanosome sombre est le plus épais

de la trilogie, de 1 à 50 cm (Maaloe, 1992; Brown, 1994). L'alternance de ces trois éléments est plus ou moins systématique mais cependant rarement régulière. L'ensemble définit une foliation migmatitique (Vanderhaeghe, 2001).

Les leucosomes ne sont pas continus la plupart du temps (Fig. 1-13d). Ils ont en fait une forme lenticulaire en 3D. On imagine généralement que le leucosome est elliptique dans le plan de foliation (Maaloe, 1992; Vanderhaeghe, 1999). Il aurait alors son grand axe parallèle à la linéation. On a cependant rarement accès à la troisième dimension sur un affleurement de migmatites, ce qui fait qu'il existe très peu d'études systématiques sur cette question. Le leucosome sera donc considéré dans la suite comme circulaire dans le plan de foliation et le diamètre sera la longueur mesurée à l'affleurement. Le rapport diamètre sur épaisseur est très élevé, entre 10 et 1000 environ (Fig. 1-13c).

Les stromatites massives

Dans certains cas, les leucosomes sont massifs, tabulaires et font entre 0.1 et 2 m d'épaisseur (Fig. 1-13b et c). Mengel et al. (2001) proposent le terme de « *leucosome sill* » pour les désigner. Ils sont généralement à grain grossier, et peuvent contenir des schlierens dispersés à l'intérieur (Solar et al., 1998). Sur l'affleurement, ils ont un aspect continu car leur longueur dépasse la dizaine de mètres. Leur rapport diamètre sur épaisseur reste cependant du même ordre que pour les leucosomes fins : entre 10 et 100 (voir 1000 dans le cas de la Fig. 1-13c). Il est possible qu'il n'existe donc qu'un rapport d'échelle entre leucosomes fins et massifs, ce qui suggère qu'ils ont le même mode de formation. Néanmoins, ils n'ont pas la même signification en terme de débit et de quantité de liquide déplacé.

Les dykes

Le terme « dyke » est génétique. Il désigne des fractures à bords rectilignes remplies de liquide. Ce terme implique donc une injection à partir d'une source qu'on ne voit malheureusement presque jamais. Leur épaisseur varie entre 1 cm et 2 m, ou plus. Il existe des faisceaux denses de dykes fins ou alors des dykes larges et très espacés. De nombreux exemples de réseaux de dykes existent (Hollister & Crawford, 1986; Sawyer & Barnes, 1988; Allibone & Norris, 1992; Maaloe, 1992; Davidson et al., 1994; Lucas & St-Onge, 1995; Vanderhaeghe, 1999).

Les leucosomes-sills des stromatites massives pourraient être confondus avec les dykes. Cependant, il existe des points qui font penser que leur mode de formation est différent :

- Les dykes sont pour la plupart discordants sur la foliation. Les leucosomes massifs sont toujours parallèles à la foliation.
- L'épaisseur des « leucosomes sills » est souvent variable et leurs bords sont courbes. Ils sont parfois clairement boudinés. Un dyke a généralement des bords rectilignes.
- Le matériau qui constitue le leucosome massif est identique à celui des « petits » leucosomes qui le bordent, en terme de composition chimique et minéralogique, de taille des grains. Le dyke transporte souvent un matériau « exotique ».

Autres leucosomes plans

Il existe d'autres leucosomes plans, *discordants* sur la foliation, et que l'on n'appelle pas « dykes » par usage. Ce sont les plans axiaux de plis et les bandes de cisaillement. Nous reviendrons plus bas sur ces structures particulières.

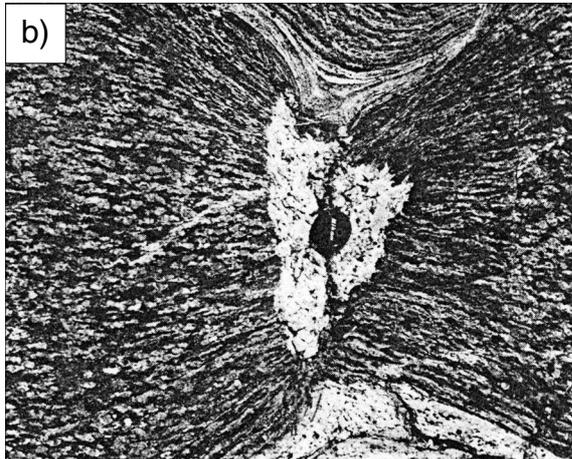


Figure 1-14 : Boudins dans les migmatites. **a)** Boudins de différentes échelles dans une roche amphibolitique litée, Péninsule de Tolstik, Russie. Le liquide de fusion a migré essentiellement le long de la foliation vers les interboudins (Brown, 1994). **b)** Interboudin rempli de tonalite dans une amphibolite partiellement fondue. Des leucosomes très fins forment des queues autour des grenats de l'amphibolite et sont étirés en direction de l'interboudin (Williams et al., 1995).

5.3.2 Forme linéaire

Une structure très commune est le leucosome remplissant la zone entre deux boudins (Fig. 1-14) (Williams et al., 1995; Brown, 1997; Vanderhaeghe, 2001). En 3D, ce type de leucosome est cylindrique. Il est généralement perpendiculaire aux directions d'étirement et d'aplatissement maximum (direction intermédiaire de l'ellipsoïde de la déformation). Son diamètre est d'environ 1 à 10 cm.

C'est seulement récemment que le caractère cylindrique et linéaire de certains autres leucosomes a été reconnu (Brown & Solar, 1999; Brown et al., 1999; Solar & Brown, 2001a). On les trouve dans les zones de constriction. Ils sont alors parallèles à la linéation d'étirement et ont un diamètre compris entre 1 et 5 cm. Cependant, une grande variété d'intermédiaires est possible entre la structure parfaitement plane et l'aiguille très allongée ; tout dépend du régime et de l'ellipsoïde de la déformation.

5.3.3 Les microplutons

Les leucosomes sont des granites au sens large, mais quand leur dimension devient importante, il peut être difficile de les nommer encore leucosome, terme qui désigne plutôt une structure de petite taille (dans les limites vues ci-dessus). Certains auteurs ont donc choisi le terme *micropluton* pour désigner des corps granitiques de taille intermédiaire entre le leucosome et le pluton (Allibone & Norris,

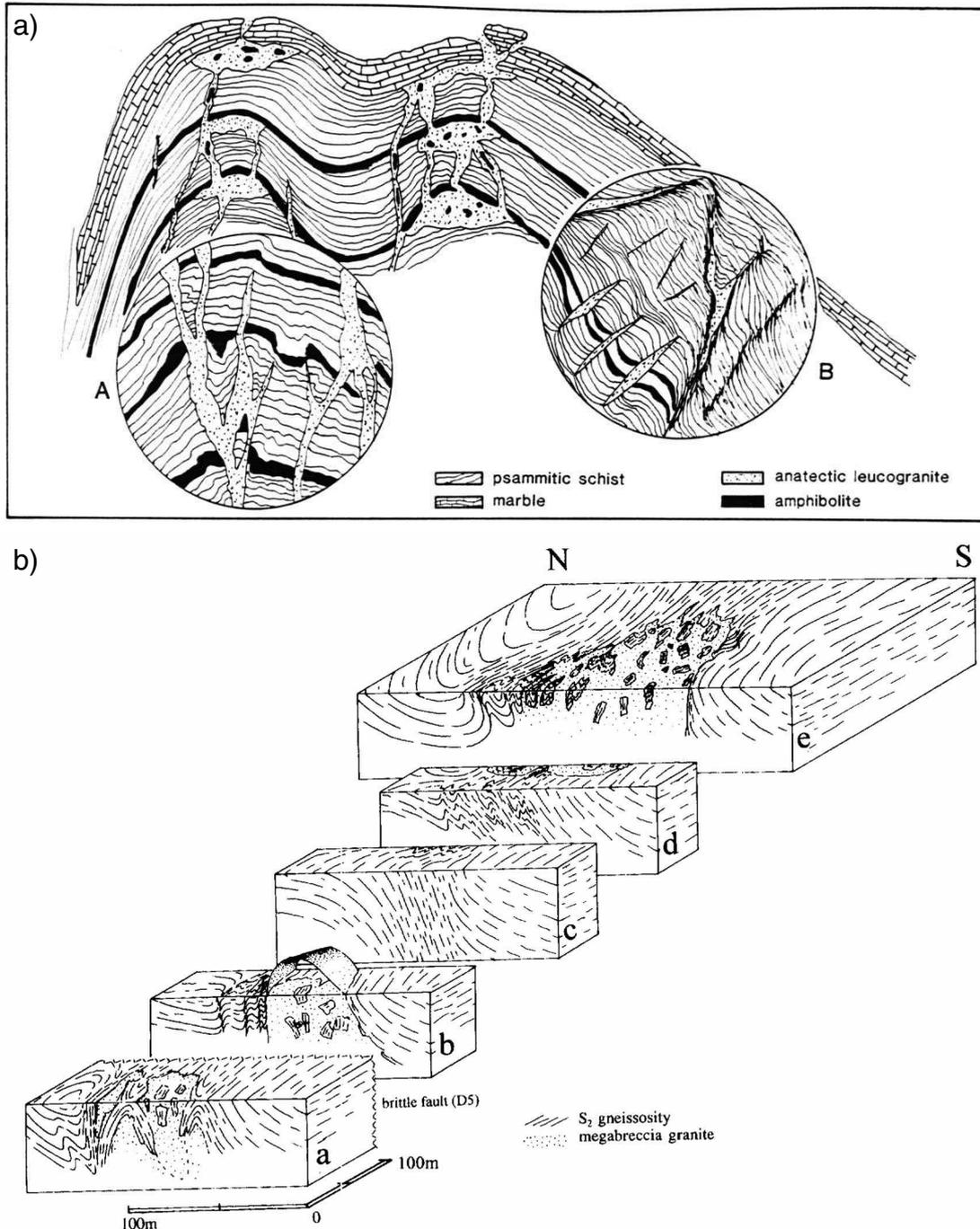


Figure 1-15 : Corps granitiques dans les coeurs de grands plis anticlinaux. Exemples des microplutons. **a)** Schéma structural en coupe des migmatites de la vallée Taylor, Antarctique (Allibone & Norris, 1992). Dans les flancs des plis, les leucosomes sont concordants ou discordants sur la foliation. Les charnières abritent des « microplutons » d'environ 50 m de large qui se mettent en place sous des couches imperméables comme les amphibolites ou les marbres. **b)** Granites à enclaves d'encastants dans le plan axial de plis affectant des gneiss migmatisés. Les flancs sont verticalisés. Ces structures traduisent une forte localisation de la déformation à l'échelle régionale (Kisters et al., 1998).

1992). Leur forme sera généralement du type ellipsoïde plus ou moins régulier. Leur plus grande dimension est d'environ 50 m. Ils sont généralement concordants et se trouvent souvent dans les charnières de plis (Fig. 1-15), (Allibone & Norris, 1992; Kisters et al., 1998; Weinberg & Searle, 1998).

5.3.4 Les formes diffuses

Les leucosomes ne sont pas toujours bien définis dans l'espace. Ils ont une forme diffuse qui se traduit par un enrichissement plus ou moins homogène en minéraux clairs comme le quartz et les feldspaths. Les termes de « bouffées » ou « patches » sont utilisés. Quand la structure métamorphique de la roche (la foliation généralement) est disloquée ou a disparu, on parle de *diatexites* (Fig. 1-16). Elles signent alors une augmentation locale du taux de fusion et leur rhéologie se rapproche de celles des magmas (voir section 6).

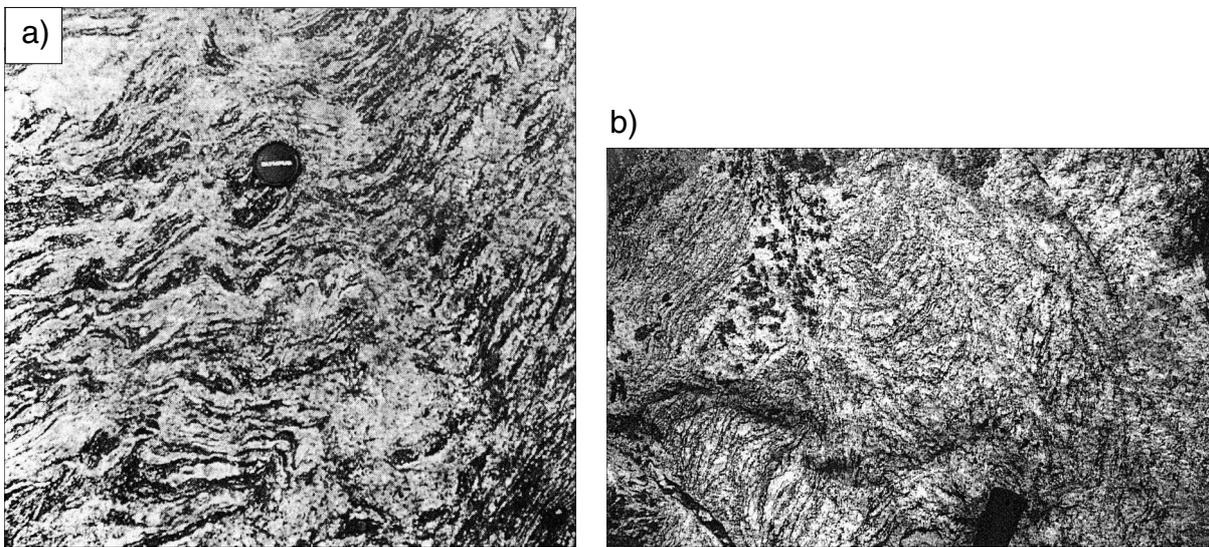


Figure 1-16 : Diatexites. **a)** Un exemple d'érosion «anatectique» du mésosome conduisant à la transformation de métatexite en diatexite (Brown, 1997). **b)** Diatexite montrant l'effacement de la structure métamorphique ainsi qu'une bouffée de granite à cordiérite sur la gauche (Vanderhaeghe, 1999).

5.4 La position des leucosomes par rapport aux structures

La position des leucosomes n'est pas aléatoire. Ils occupent au contraire des positions bien précises par rapport aux plis, aux zones de cisaillement et aux hétérogénéités mécaniques comme des enclaves compétentes. Les exemples qui suivent illustrent le contrôle structural de la déformation sur la localisation des leucosomes.

5.4.1 Leucosomes et plis

Les leucosomes se trouvent à la fois dans les flancs et dans la charnière d'un pli, mais ils privilégient parfois une zone à une autre. Leur forme et leur taille sont en fait différentes suivant la zone.

Dans les charnières, quatre types peuvent être distingués : (1) le leucosome type saddle reef, (2) le micropluton, (3) le leucosome de plan axial et (4) l'accumulation diffuse de liquide.

Les saddle reefs

Une « *saddle reef* » (« voûte anticlinale » en français) est un vide qui se forme dans la charnière d'un anticlinal quand les couches ont des courbures différentes (Fig. 1-17). Il est en fait possible de produire ce genre d'espace dans un synclinal, mais c'est singulièrement moins courant. Dans les environnements sédimentaires riches en fluides, le vide est ensuite comblé par des dépôts de quartz, de calcite avec souvent des minerais (or, argent, cuivre, etc.). Cette structure est bien connue des géologues miniers dans les zones de sédiments plissés (Cosgrove, 1993;

Smith, 1999). Par exemple, le champs aurifère de la « Lachlan Fold Belt » dans la province Victoria en Australie est l'un des plus importants du monde (2500 tonnes d'or, Ramsay et al., 1998).

Les saddle reefs naissent lors de la compression des systèmes très lités, multicouches, à cause des contraintes en tension locales normales aux couches (ouverture) et d'incompatibilités de déformation d'une couche à l'autre (variation de courbure). Les interfaces entre deux lithologies différentes (grès et silt par exemple) glissent facilement. Cela donne naissance à des plis en chevrons suivant un mécanisme dénommé « *flexural-slip folding* » (Ramsay & Huber, 1987; Tanner, 1989). En terrain sédimentaire, l'abondance de stries sur les surfaces de bancs est aussi un des indices de « *flexural-slip folding* ».

En terrain migmatitique, le terme est peu utilisé. Pourtant, de nombreux exemples de terrain montrent une géométrie identique (Fig. 1-18c, voir aussi les parties 2 et 3). On les trouve à toutes les échelles et à divers degré de déformation. Les plis qui les contiennent ne sont pas forcément en chevron et peuvent être isopaques ou de classe 1C ou 2 (charnière épaissie, Ramsay & Huber, 1987). En fin

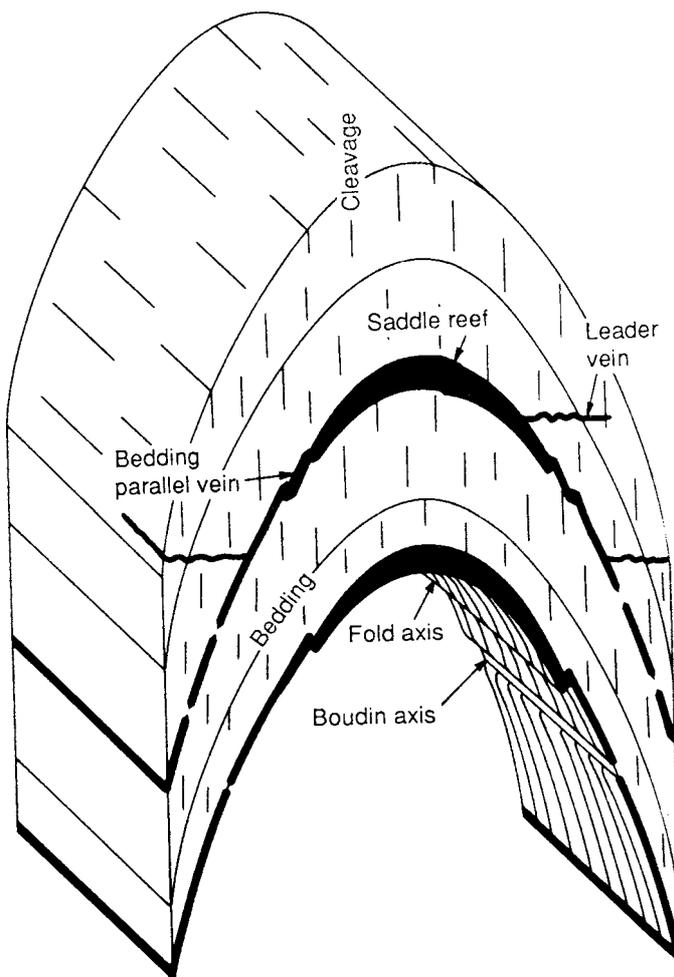


Figure 1-17 : Bloc diagramme montrant la nature et la position d'une « saddle reef » dans un pli. Les relations avec les autres structures sont indiquées (d'après (Windh, 1995)).

de compte, il suffit que l'épaisseur du leucosome soit plus forte au niveau de l'axe de pli que dans les flancs (Fig. 1-18c).

A une échelle hectométrique, Kisters et al. (1996, 1998) décrivent des intrusions granitiques dans le cœur de plis anticlinaux droits affectant des gneiss migmatisés (Fig. 1-15b). Ces plis sont espacés de 100 à 500 m et leurs flancs sont verticalisés. Entre les plis, la formation encaissante (gneiss migmatisés) repose horizontalement sur un *niveau de décollement* riche en quartzite. Ces plis anticlinaux apparaissent donc comme des pincements étroits qui ont localisé la déformation et le raccourcissement. Dans ces structures sub-verticales, on trouve des granites riches en enclaves de gneiss encaissant ainsi que des migmatites dykyonitiques, c'est-à-dire des mésosomes intensément disséqués dans toutes les directions par des leucosomes.

Les microplutons et les plis

Les microplutons d'Allibone & Norris (1992) sont en fait l'expression du même type de géométrie que les saddle reefs. A une échelle plus petite encore, il existe des preuves de plutons granitiques kilométriques mis en place dans des charnières de plis et donc du type saddle reef (Collins & Sawyer, 1996; Yenes et al., 1999; Vines & Law, 2000; Kalakay et al., 2001). *La voûte anticlinale est ainsi de plus en plus reconnue comme une réponse au problème de création d'espace pour la mise en place des plutons.* Cette ressemblance géométrique entre microplutons, plutons et saddle reefs dans les migmatites ne semble pas fortuite et pourrait indiquer que leurs mécanismes de formation sont identiques. Ceci fera l'objet d'une discussion plus détaillée dans la deuxième partie.

Les plans axiaux

Le plan axial des plis est parfois souligné par un leucosome fin qui traverse les couches (Fig. 1-18) (Allibone & Norris, 1992; Hand & Dirks, 1992; Rosenberg et al., 1995; Collins & Sawyer, 1996; Vernon & Paterson, 2001). Ils sont obliques ou perpendiculaires à la foliation et sont généralement fins (1 à 5 cm d'épaisseur).

Cette accumulation de liquide de fusion est très localisée et contraste avec des accumulations plus *diffuses* qui concernent tout le volume de la zone charnière, de part et d'autre du plan axial. Dans ce dernier cas, on remarque simplement une augmentation du contenu en minéraux « felsiques », quartz et feldspaths (*s.l.*) et la foliation est plus ou moins disloquée à cette endroit. Cette augmentation de la fraction felsique et la disparition de la structure dans le cœur du pli marque une *transformation de métatexite en diatexite*.

Les flancs de plis

Dans les *flancs des plis*, il arrive qu'il y ait une moins de leucosomes que dans les charnières (Allibone & Norris, 1992; Collins & Sawyer, 1996). Mais c'est peut-être une impression liée à leur épaisseur plus faible. En effet, les leucosomes y sont soit plans et parallèles à la foliation, soit cylindriques dans des interboudins.

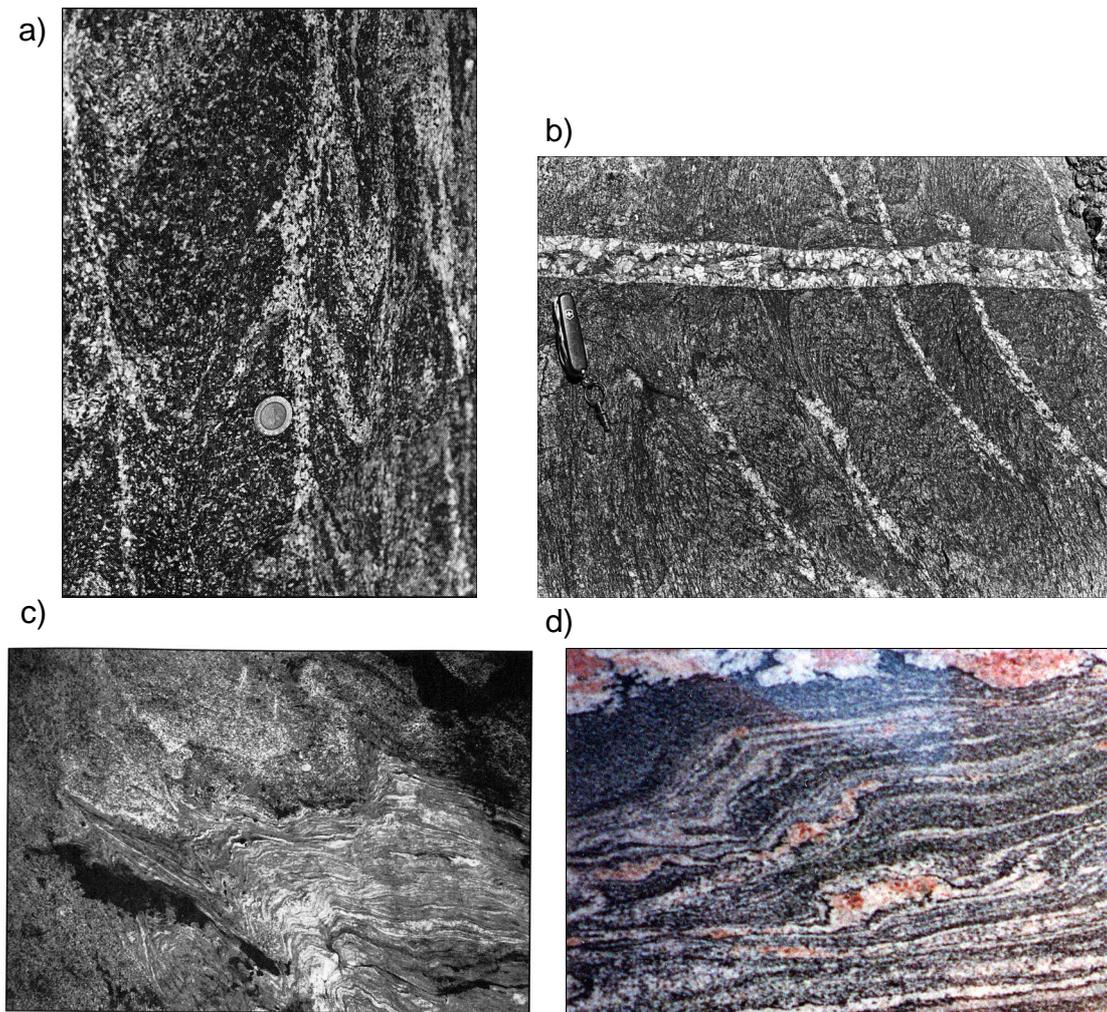


Figure 1-18 : Relations entre leucosomes et plis. **a)** Leucosomes de plan axial dans une tonalite plissée. Pluton de Bergell, Alpes Centrales (Rosenberg et al., 1995). **b)** Leucosomes de plan axial dans les plis d'un paragneiss montrant aussi une veine pegmatitique tardive, Australie (Vernon & Paterson, 2001). **c)** Leucosomes en position de saddle reef dans un pli affectant le contact entre le pluton de Bergell et son encaissant migmatisé (Rosenberg et al., 1995). **d)** Leucosomes disposés en échelon dans le flanc d'un pli en kink band, devanture d'un magasin, Sicile (merci à Gweltaz Mahéo). La longueur de la photo est environ 30 cm.

Le flanc d'un pli est souvent sujet à un fort étirement parallèle à la foliation qui produit soit un boudinage, soit la formation de bandes de cisaillement conjuguées (Fig. 1-19a).

Les leucosomes sont parfois disposés en échelons. L'enveloppe de ces veines mime alors une « kink band » (Fig. 1-18d). Dans ce cas, le mécanisme de formation du pli ne peut plus être le « flexural-slip folding ». En effet, les sens de cisaillement dans les flancs sont inversés dans un cas par rapport à l'autre (comparer les figures 1-17 et 1-18d). Dans les flancs en kink band, le cisaillement joue dans le sens « haut vers l'extérieur du pli ». Au contraire, dans les plis en chevron impliquant un glissement banc sur banc, le sens du cisaillement est « haut vers l'intérieur du pli ». De plus, les plis qui possèdent ce type de flancs en kink band sont généralement coffrés.

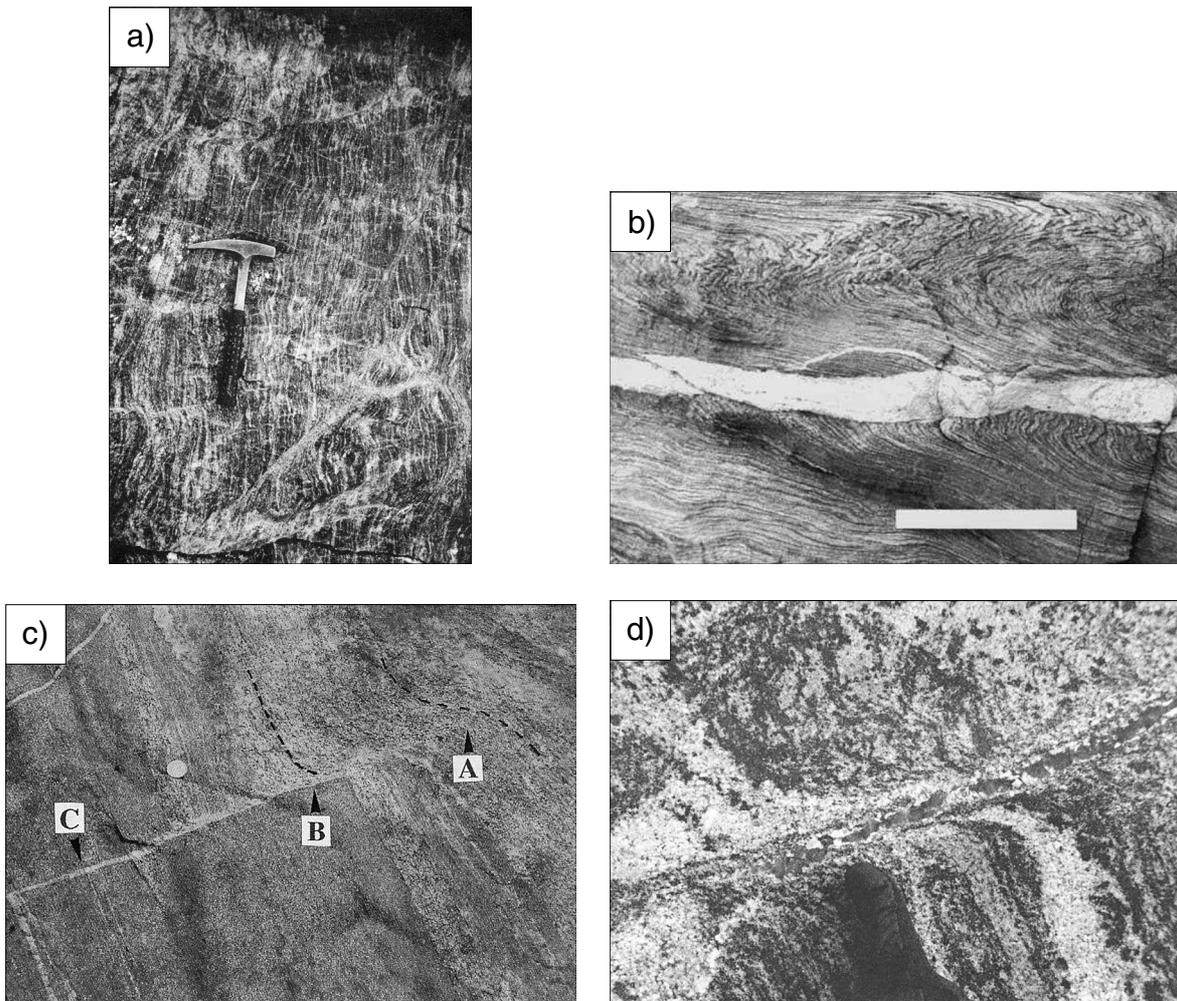


Figure 1-19 : Zones et bandes de cisaillement dans les migmatites. **a)** Stromatolites (leucosomes concordants) découpées par des leucosomes discordants dans des zones de cisaillement et des boudins, Vallée Taylor, Antarctique (Allibone & Norris, 1992). **b)** Leucosome dans le plan axial d'un pli asymétrique. Noter ses bords très nets, Pyrénées hercyniennes (Druguet et Hutton, 1998). **c)** Zone de cisaillement montrant le caractère à la fois cassant et ductile des migmatites. On peut observer la transition d'un cisaillement ductile (A), à une fracture semi-ductile (B), puis à une fente de tension complètement fragile en ouverture (C) (Davidson et al., 1994). **d)** Bande de cisaillement discordante remplie de granite (Vignerresse & Tikoff, 1999).

5.4.2 Leucosomes et bandes de cisaillement

Les bandes de cisaillement sont une structure commune des migmatites (Fig. 1-19). Elles témoignent de l'intense localisation de la déformation typique dans les roches biphasées solide-liquide (Vignerresse & Tikoff, 1999; Bercovici et al., 2001). Un leucosome de 1 à 3 cm d'épaisseur souligne souvent le plan de cisaillement, mais ce n'est pas systématique. Cela suggère que la bande de cisaillement n'est pas une zone d'accumulation du liquide de fusion mais plutôt un lieu de passage transitoire.

Les bandes de cisaillement sont fréquemment associées à des plis asymétriques ou déversés. Le leucosome se place alors dans le flanc cisailé (Fig. 1-19b). Ces relations ont été étudiées par Hudleston (1989), Druguet & Hutton (1998) et Passchier (2001). Nous reviendrons en détails sur cet aspect dans la deuxième partie, section 8.1.

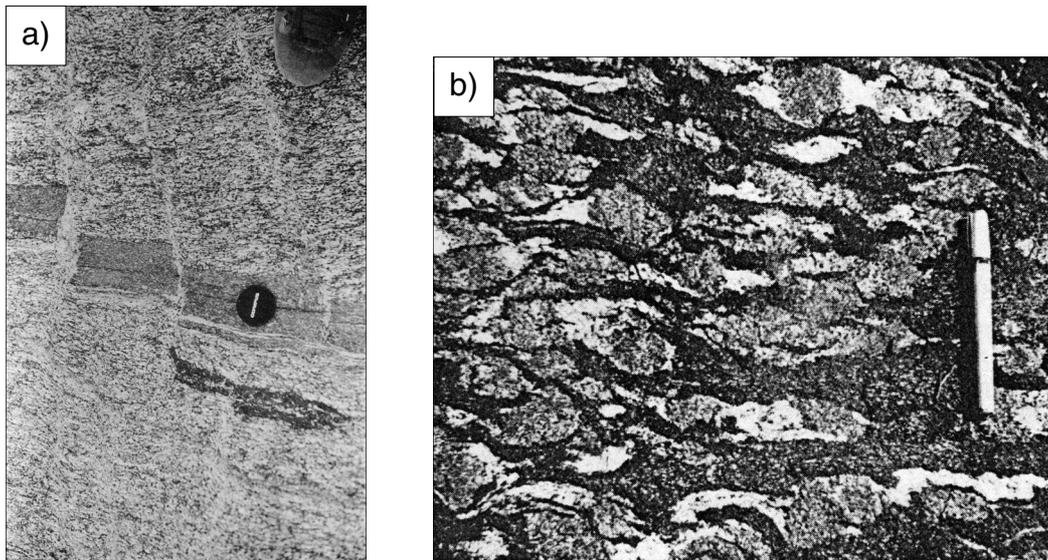


Figure 1-20 : Leucosomes et hétérogénéités mécaniques. **a)** Couche d'amphibolite boudinée dans un orthogneiss migmatisé. Les interboudins sont soulignés par des leucosomes (Allibone & Norris, 1992). **b)** Leucosomes associés à des grenats en position d'ombre de pression. Les grenats et le liquide de fusion sont produits lors de la même réaction : $Hbl + Pl = Grt + Cpx + Melt$ (Williams et al., 1995).

5.4.3 Leucosomes et hétérogénéités mécaniques

Les migmatites sont des roches hétérogènes du point de vue chimique et textural, mais aussi rhéologique. Les roches qui ne fondent pas ou mal, ainsi que les restites qui ont perdu leur phase liquide ont une résistance mécanique supérieure aux roches partiellement fondues qui les entourent. C'est par exemple le cas des amphibolites qui restent solides dans des métapélites migmatisées à 750-800°C. A l'échelle du grain, des minéraux réfractaires comme le grenat ou de gros feldspaths potassiques peuvent aussi jouer ce rôle d'objets « durs ».

Les leucosomes se placent au contact de ces hétérogénéités, de façon symétrique ou asymétrique. Par exemple, des leucosomes occupent souvent les ombres de pression autour des grenats (Fig. 1-20a). Les couches d'amphibolite sont fréquemment boudinées avec des leucosomes dans les interboudins (Fig. 1-20b). Les microplutons décrits par Allibone & Norris (1992) se sont mis en place sous des couches imperméables d'amphibolites (Fig. 1-15). Enfin, les enclaves de restites de l'affleurement du Pont de Bayzan dans le sud du Massif Central Français sont bordées d'un leucosome très clair. Ce leucosome se situe d'un seul ou des deux cotés de l'enclave, sans logique *a priori* évidente.

L'étude spécifique de cette question fait l'objet de la troisième partie.

5.5 La formation des migmatites

Il n'existe pas encore de consensus sur la formation des trois éléments principaux des migmatites que sont le leucosome, le mélanosome et le mésosome (Kriegsman, 2001). Ces trois éléments se forment conjointement. Vernon & Paterson (2001) recensent par exemple neuf mécanismes possibles expliquant la formation des leucosomes parallèles aux plans axiaux des plis. La figure 1-21 et les paragraphes suivants présentent les modèles les plus courants.

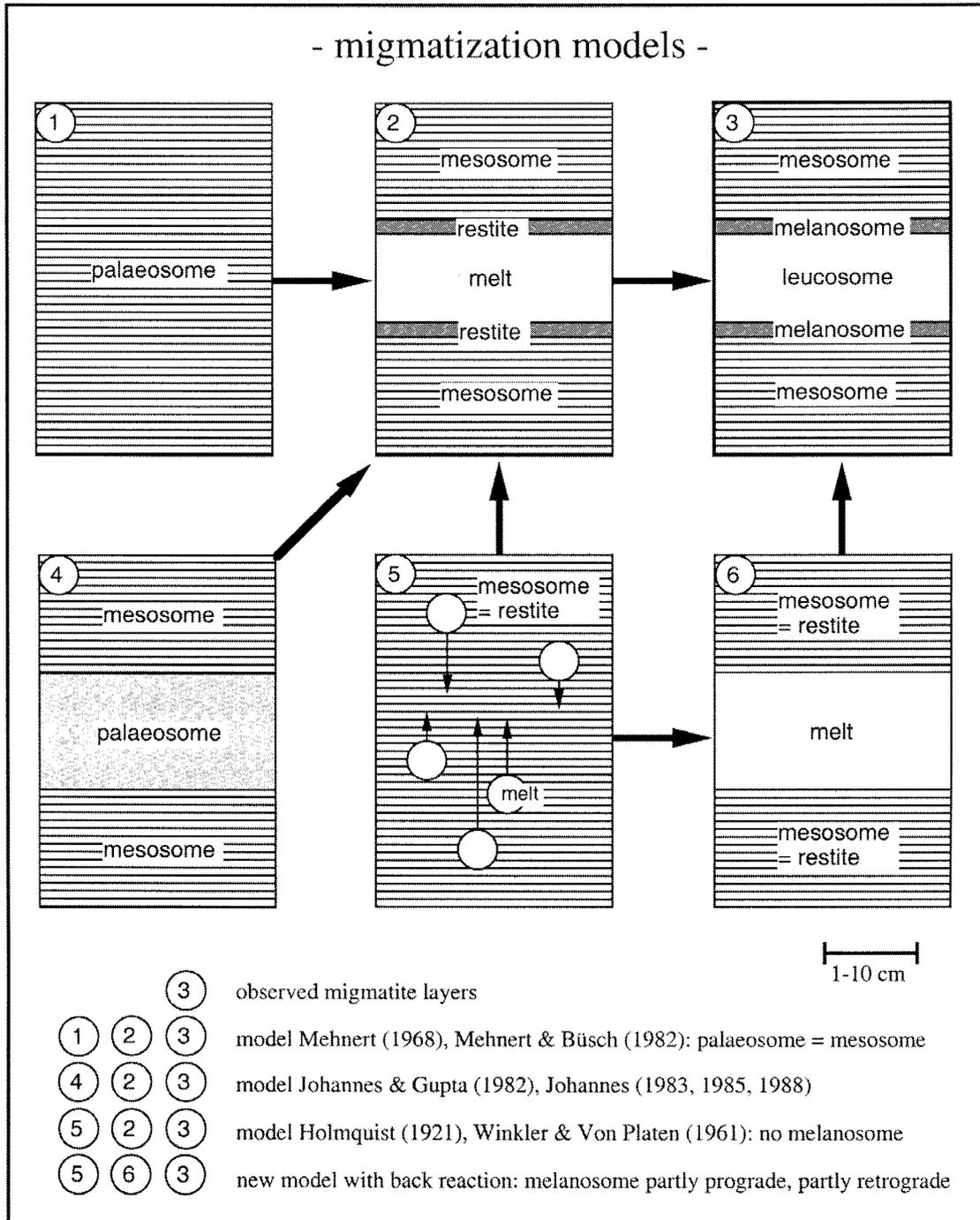


Figure 1-21 : Modèles expliquant le processus de migmatisation (Kriegsman, 2001). Voir le texte pour les détails.

Fusion partielle d'un protolithe homogène

Classiquement, les études géochimique et pétrographique suggéraient une relation du type : mésosome = 75 vol.% leucosome + 25 vol.% mélanosome (Mehnert, 1968) (modèle 1-2-3, Fig. 1-21). Cette relation suppose que le protolithe n'a fondu qu'à certains endroits. Cependant, une relation linéaire n'est pas toujours possible comme l'a observé Ashworth (1976). Ainsi, de nombreux auteurs ont noté que la composition chimique du leucosome ne correspond pas toujours à une composition de liquide de fusion minimum (à l'eutectique), c'est-à-dire qu'il manque du plagioclase ou du feldspath potassique (e.g., Johannes & Gupta, 1982; Johannes, 1988; Kriegsman, 2001; Marchildon & Brown, 2001). Ceci serait dû à des réactions postérieures (rétrogrades) entre le liquide et la restite (Kriegsman, 2001). Les processus d'extraction du liquide peuvent aussi modifier la chimie du leucosome final (Nyman et al., 1995).

Contrôle par la lithologie

Une paragenèse est plus ou moins fertile en fonction du mode et de la présence d'eau libre. Lors de la fusion partielle d'un protolithe issu d'une roche sédimentaire qui présente des alternances de lithologies plus ou moins fertiles, les leucosomes miment ces alternances (modèle 4-2-3, Fig. 1-21). Le mésosome serait alors un paléosome, c'est-à-dire le protolithe inchangé. Ce contrôle de la lithologie est indiscutable dans le cas où le protolithe métasédimentaire est présent à l'affleurement (Johannes & Gupta, 1982; Johannes, 1988; Sawyer, 2001).

Plusieurs observations vont à l'encontre de ce modèle :

- Les leucosomes sont souvent discontinus et lenticulaires, alors qu'ils devraient être continus, comme les couches fertiles initiales.
- Le protolithe peut être une roche homogène.
- Le mésosome contient souvent des produits de fusion comme le grenat et la cordiérite dans le mésosome, ainsi que des reliques d'assemblage de minéraux réactants (biotite, sillimanite, quartz et plagioclase). Il a une composition restitutive qui prouve que du liquide en a été extrait.
- La présence d'eau libre n'est pas un facteur limitant quand elle est partout dans la même proportion ou alors complètement absente. Dans ce dernier cas, c'est la déstabilisation des micas qui fournit l'eau, et comme ils sont présents dans le mésosome, on comprend mal pourquoi ils n'ont pas réagi aussi.

Origine du mélanosome

Avant toute chose, sa présence n'est pas systématique, ce qui serait le signe d'une fusion débutante et sans suite (Sawyer, 2001). Kriegsman (2001) recense trois modèles possibles expliquant l'origine des mélanosomes :

1. Le mélanosome est le site d'extraction du liquide et est par conséquent restitutive.
2. Le mélanosome s'est formé grâce à des réactions rétrogrades entre le liquide et la restite (~ entre le leucosome et le mésosome, c'est d'ailleurs sa place). Ces réactions peuvent être tout simplement les inverses des réactions de fusion.

3. Le mélanosome est le lieu où s'accumulent les minéraux mafiques cristallisant à partir du liquide.

La proposition la plus réaliste est (une fois de plus) une combinaison de ces trois modèles limites.

L'injection de magma

Une origine extérieure du liquide de fusion est toujours possible et est difficile à identifier sans l'aide de la géochimie (Weber & Barbey, 1986; Barbero et al., 1995). Le magma choisira généralement les plans de faiblesses comme les plans de foliation ou les plans axiaux des plis, même s'ils sont perpendiculaires à la contrainte principale maximale σ_1 . En effet, par le jeu de la pression propre du fluide et de l'anisotropie de résistance à la tension, ces plans *a priori* moins favorables peuvent s'ouvrir (Wickham, 1987; Lucas & St-Onge, 1995).

Formation du leucosome grâce à la ségrégation

Un modèle complet de formation *in situ* des leucosomes doit prendre en compte le fait que tous les éléments de la migmatite ont fondu (même les mésosomes) et que le liquide peut migrer d'une couche à l'autre (modèles 5-2-3 et 5-6-3, Fig. 1-21). On a vu dans une section précédente les processus microscopiques à l'œuvre lors de la ségrégation. À l'échelle du mètre, la cartographie de zones riches en leucosomes et des zones appauvries (mélanocrates) a permis à Sawyer (2001) de proposer un scénario de la formation d'un leucosome prenant en compte la fusion aux joints de grains et la percolation du liquide à travers un réseau de film (Fig. 1-22). Le mésosome change de nature pétrographique et devient soit un mélanosome, soit un leucosome.

Le liquide migre en suivant les gradients de pression vers les zones de basse pression. Cependant, les auteurs ne sont pas d'accord sur l'origine de ces gradients de pression. Pourtant, ils s'accordent sur le caractère syntectonique des leucosomes cylindriques dans les interboudins. On comprend que dans un régime d'aplatissement normal aux couches susceptible de produire du boudinage, une zone en dilatation grandisse perpendiculairement à la direction de compression. Personne¹ ne conteste que cet étirement localisé d'une couche relativement compétente crée une zone de dépression qui attire le liquide des alentours.

Ces gradients naissent à cause de l'application de contraintes différentielles sur la migmatite hétérogène. Ce mécanisme est connu dans la littérature sous le nom de « tectonic pumping ». Cependant, deux approches existent :

- Dans un premier modèle, les zones de basse pression sont microscopiques (des films autour des grains) et se situent dans les couches les plus compétentes (Robin, 1979; Brown et al., 1995a). La compression maximale est *normale* aux

¹ Brown (1997) rappelle qu'il est possible que le boudin préexiste à la fusion partielle. Le leucosome de l'interboudin serait alors le résultat de la fusion du remplissage initial. Cependant, le remplissage de l'interboudin en condition subsolidus est souvent très riche en quartz, une lithologie très résistante à la fusion.

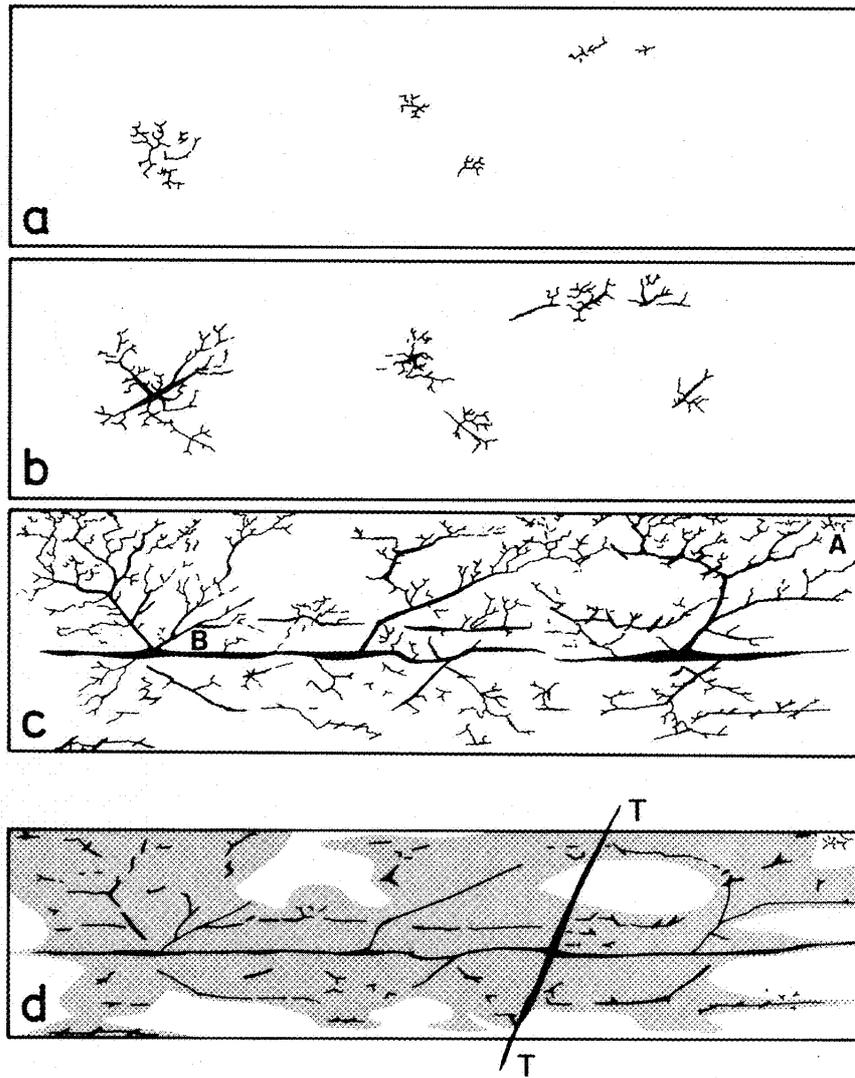


Figure 1-22 : Schéma du développement d'un réseau de drainage et de transfert du liquide de fusion dans une couche de 50 cm d'épaisseur (Sawyer, 2001). **a**) Début de la fusion (liquide en noir). **b**) Les conduits de liquide s'élargissent avec l'augmentation du taux de fusion. **c**) Etape de drainage. La roche présente des zones non encore fondues, de zones de fusion débutante (A). Le liquide est drainé dans des sites en dilatation parallèles ou obliques à la foliation, laissant des canaux se refermer (B). **d**) Etape de transfert pendant laquelle le liquide est extrait de la couche grâce à une fracture ouverte discordante. Les parties de la roche qui ont perdues du liquide sont en gris. Le liquide qui n'est pas extrait est préservé dans des leucosomes.

couches. Les couches les plus compétentes (ou les plus visqueuses) supportent les contraintes différentielles les plus fortes et ont donc la contrainte moyenne (la pression) la plus faible (Fig. 1-23). Les leucosomes sont supposés plus compétents que les mésosomes ou les mélanosomes car ils contiennent plus de quartz et de feldspaths et moins de micas. Les leucosomes ne seraient donc jamais purement liquide (Marchildon & Brown, 2001). De plus, si la proportion de liquide augmente dans le leucosome lors de ce processus alors le contraste de viscosité diminue avec le mésosome et la redistribution du liquide s'arrête. Ainsi, le liquide ne peut jamais être extrait de la migmatite car la redistribution est interne. Le système est considéré *fermé*.

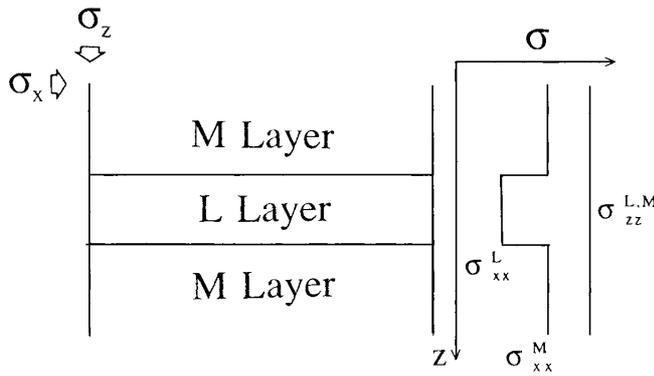


Figure 1-23 : Principe du «filter pressing» (Robin, 1979, Brown et al., 1995a). Les couches L (leucosomes) à gros grains sont plus résistantes que les couches M (mafiques) à grains fins et à biotite. La contrainte moyenne est donc plus faible dans les couches L.

- Dans le deuxième modèle, le leucosome est une veine qui s'ouvre et qui est la zone macroscopique de basse pression (Sleep, 1988; Petford, 1995; Rutter & Neumann, 1995; Simakin & Talbot, 2001a, b). Ces veines sont *parallèles* à la direction de compression. Elles contiennent du liquide pur ou presque et sont donc moins visqueuses que leur encaissant. Le liquide peut ensuite s'écouler dans la veine ou dans un réseau interconnecté de veines et nourrir ensuite un site d'accumulation car le système est *ouvert*. (Sleep, 1988; Simakin & Talbot, 2001a, b) ont développé des modèles numériques prenant en compte la *compaction locale* de la matrice autour de la veine. (Simakin & Talbot, 2001a, b)

montrent qu'une veine perpendiculaire à la direction de compression se ferme tandis qu'une veine oblique est déformée.

L'applicabilité de ces modèles dépend donc du contexte tectonique et du pendage des couches par rapport au champ de contrainte. Il semble que la compression parallèle aux leucosomes (deuxième modèle) permettent une meilleure extraction du liquide puisque le système reste ouvert. Ce modèle permet d'associer intimement la ségrégation, la création de sites en dilatation et la déformation ductile de l'encaissant.

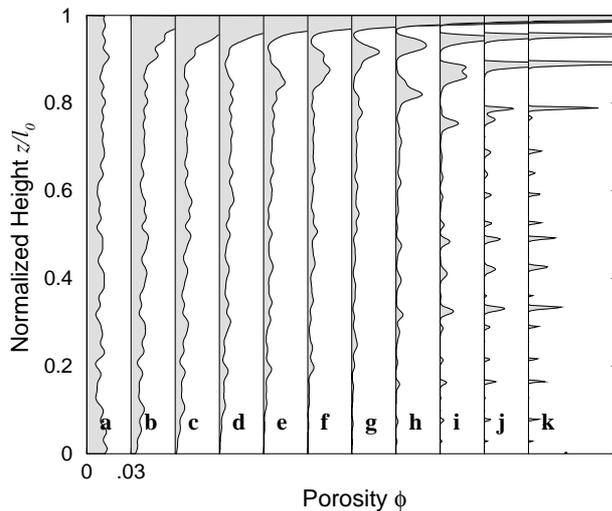


Figure 1-24 : Développement d'une alternance de couches solides et liquide par l'action de la compaction assistée par la gravité et les tensions de surface (Ricard et al., 2001). La distribution de la porosité initiale (temps a) est aléatoire autour d'une valeur moyenne de 1%. A la fin du processus (temps k), des couches purement liquide se sont formées au sommet.

Le rôle de la compaction

La réputation des modèles avec compaction de ne pas s'appliquer aux roches crustales (Wickham, 1987; Brown et al., 1995a) a été remise en question par (Ricard et al., 2001). Ce type de modèle voit sa pertinence grandement liée aux valeurs numériques choisies pour les paramètres physiques des roches telles que la viscosité, les tensions de surface et la perméabilité. Or, nous ne disposons pas à l'heure actuelle de certitudes sur ce sujet. Le facteur limitant semble être surtout la viscosité du solide, considérée généralement entre 10^{18} et 10^{20} Pa s, ou plus (Carter & Tsenn, 1987; Talbot, 1999). Pourtant, le liquide de fusion semble accélérer les mécanismes de déformation par diffusion et par glissement (Rosenberg, 2001). Si des valeurs autour de 10^{16} Pa s sont atteintes, la compaction assistée par la gravité et les tensions de surface est un mécanisme viable de ségrégation dans les migmatites (Ricard et al., 2001). La figure 1-

24 montre que l'on peut obtenir une ségrégation du liquide en couches centimétriques qui miment parfaitement une stromatolite.

Cependant, il reste encore à faire migrer le liquide vers des zones d'ascension puis à mettre en place le pluton. Géométriquement et rhéologiquement, la compaction n'est alors plus possible.

5.6 Conclusion

Le caractère hétérogène des migmatites a été décrit sous son aspect pétrographique, chimique et structural. L'effet de la déformation n'en sera que plus complexe. Les différents modèles de la formation des leucosomes mettent en lumière les contrôles réciproques de la présence de liquide et de la déformation. Avant d'étudier la migration à l'échelle de toute l'unité migmatisée, il est donc indispensable de traiter de la rhéologie des migmatites.

6 La rhéologie des migmatites

L'hétérogénéité des migmatites implique une complexité à l'origine d'une mauvaise connaissance de la rhéologie des migmatites. De nombreux auteurs se sont pourtant penchés sur la question depuis Arzi (1978) qui a été un des premiers à donner un cadre quantitatif à la rhéologie des roches partiellement fondues. Le lien entre rhéologie des roches partiellement fondues et ségrégation du liquide est étroit car :

1. la fraction volumique de liquide contrôle (en partie) la résistance de la roche ;
2. l'écoulement d'un magma dépend de la concentration en cristaux et est une forme de migration du liquide de fusion ;
3. la perméabilité dépend de la porosité mais aussi de la création, lors de la déformation, de structures en dilatation, microscopiques et macroscopiques.

Les deux premiers points sont liés à l'existence d'un pourcentage critique de liquide (*RCMP*). Le troisième point met en jeu les mécanismes de déformation d'une roche partiellement fondue. Les migmatites présentent à la fois un caractère cassant et ductile et cette appréciation est très dépendante de l'échelle d'observation.

6.1 Le « Rheological Critical Melt Percentage » ou RCMP

Lors de la fusion d'une roche, le passage d'une structure solide dominée par les cristaux à une suspension dense de cristaux dans le liquide marque un changement radical de comportement mécanique (Arzi, 1978; Van der Molen & Paterson, 1979; Lejeune & Richet, 1995; Vigneresse et al., 1996; Vanderhaeghe, 2001). Ce passage a lieu lors de la perte de continuité de la matrice solide et est donc lié au pourcentage volumique de liquide dans la roche. Arzi (1978) a proposé une fourchette large sur des bases expérimentales et théoriques d'un seuil compris entre 10 et 30% de liquide. Il a nommé cette *transition critique* le « Rheological Critical Melt Percentage » ou RCMP. Ainsi, quand le taux de fusion est moindre

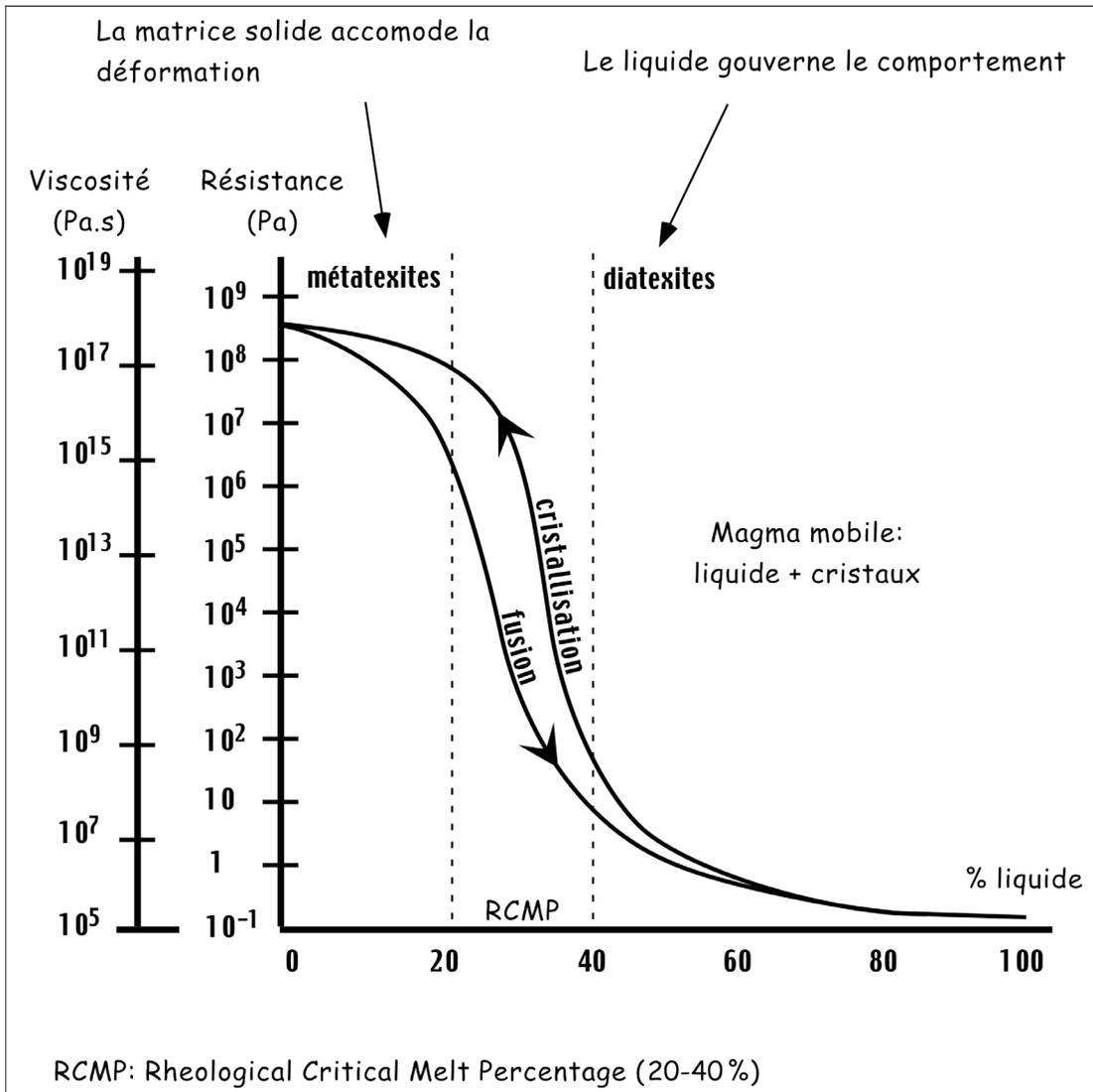


Figure 1-25 : Viscosité effective et résistance des roches partiellement fondues en fonction de la quantité de liquide de fusion (d'après Vanderhaeghe, 2001). La viscosité sera plutôt employée pour la roche dominée par le liquide (comportement visqueux), tandis que la résistance caractérise plutôt le comportement plastique des roches dominées par la phase solide. Le seuil rhéologique (RCMP) est très large pour prendre en compte la variabilité due au contexte ainsi que la différence entre fusion et cristallisation. Le RCMP sépare aussi théoriquement métatexites et diatexites.

que le RCMP, les cristaux ne sont pas libres de glisser les uns sur les autres et la déformation est accommodée par la matrice par le biais de mécanismes de fluage similaire à ceux de l'état solide. Par conséquent, la résistance de la roche reste élevée et très proche d'une roche non fondue. Quand la proportion de liquide est plus grande que le RCMP, les cristaux ne se touchent plus, baignent dans le liquide et glissent les uns sur les autres. La résistance de la roche partiellement fondue chute et son comportement devient visqueux et proche de celui du liquide.

Les travaux d'Arzi (1978) ont fait faire de grands progrès à la compréhension du comportement mécanique des roches partiellement fondues. Cependant, des études récentes contestent la valeur et même la pertinence du RCMP (Rutter & Neumann, 1995). Le rôle de l'anisotropie des minéraux et le fait qu'une transition d'un liquide à un solide (cristallisation) est très différente de la transition

inverse du solide au liquide (fusion), doivent être pris en compte (Wickham, 1987; Brown et al., 1995a; Vigneresse et al., 1996). L'existence de mécanismes supplémentaires pas forcément annexes comme la fracturation et le fluage par diffusion, tous deux assistés par le liquide, peuvent également avoir une influence sur la rhéologie des migmatites (Rutter & Neumann, 1995; Rosenberg & Handy, 2000, 2001). Ces différents points sont maintenant examinés.

Une des contraintes sur la valeur du RCMP est la densité d'un arrangement *compact* de sphères (Arzi, 1978). L'équation de Einstein-Roscoe prévoit que la viscosité effective d'un ensemble de sphères de diamètre identique est maximale quand elles sont rangées suivant la disposition la plus compacte (Roscoe, 1953). Il reste alors un vide de 26% en volume. La porosité devra cependant être un peu supérieure et l'arrangement un peu plus lâche pour que l'ensemble de sphères puisse s'écouler sans verrouillage précoce dû à des interactions entre sphères (VanderMolen & Paterson, 1979). La porosité devrait même atteindre 45% d'après Brown et al. (1995a). Dans les roches, les grains de quartz, feldspaths, grenat et cordiérite peuvent être idéalisés par des sphères. Par contre, les micas, la sillimanite et les amphiboles ressemblent plutôt à des disques ou des aiguilles. Cette *anisotropie de forme* permet de diminuer la valeur du seuil de transition pour un mélange de sphères, disques et aiguilles qui correspondrait plus à une roche réelle. Brown et al. (1995a) concluent que le RCMP varie dans la fourchette 17-45% en fonction du mode et que dans un protolithe folié, la résistance (à un taux de fusion donné) change donc d'une couche à l'autre.

Vigneresse et al. (1996) proposent un « seuil rhéologiquement critique » est plus faible lors de la fusion que lors de la cristallisation. A taux de fusion égal, le comportement d'un liquide dans lequel se forme des cristaux est très différent de celui d'une roche métamorphique partiellement fondue qui a été très structurée lors de son histoire anté-anatexie. Comme le montrent expérimentalement Lejeune & Richet (1995), quand 40% de cristaux ont cristallisé (60% de liquide), un squelette rigide se forme par les interactions des cristaux entre eux. Ils forment des chaînes très allongées de cristaux qui peuvent soutenir les contraintes. La viscosité augmente rapidement de plusieurs ordres de grandeur. A 55% de cristaux, c'est le « *Rigid Percolation Threshold* » ou RPT de Vigneresse et al. (1996) (Fig. 1-8b). On peut noter que le tuilage et la création de la texture fluidale dans les roches volcaniques se font donc toujours avec moins de 55% de cristaux, au maximum 60% (Scaillet et al., 1998). Un réarrangement peut encore se faire par des cisaillements locaux aux endroits les plus faibles de la structure naissante. C'est quand 70 à 75% de la roche a cristallisé (25-30% de liquide) que le système est verrouillé. La résistance est alors celle d'une roche solide (à haute température cependant).

Lors de la fusion, on a déjà vu qu'un premier stade est franchi à 8% de fusion (LPT) à partir duquel une ségrégation par percolation du liquide est possible (Fig. 1-8a, Vigneresse et al., 1996). Ce n'est cependant pas un seuil rhéologique. Vigneresse et al. (1996) placent un deuxième seuil (le « *Melt Escape Threshold* », MET) à 20-25 vol. % de liquide (Fig. 1-8a). La valeur est plus faible que le RPT car la faible viscosité relative du liquide favorise la localisation de la déformation et la création de fractures inter- et intra-granulaire, de micro-zones de cisaillement, et les glissements grain sur grain. En présence de contraintes différentielles, la roche contenant environ 20% de liquide subit donc un endommagement accéléré et sa résistance chute rapidement (Vigneresse & Tikoff, 1999; Rosen-

berg & Handy, 2000; Ricard et al., 2001). Vigneresse et al. (1996) associent ce seuil avec la migration des magmas et proposent que cela marque le début du mouvement sur de longues distances du liquide entraînant des cristaux résiduels (Fig. 1-8a). On comprend que cette notion de MET intègre à la fois la migration du liquide, le taux de fusion, la perméabilité et la résistance de la roche. Vanderhaeghe (2001) associe ce seuil à un *passage de la métatexite à la diatexite*.

Finalement, le graphe de la viscosité effective de la roche partiellement fondue en fonction de la teneur en liquide montre une *hystérésis* correspondant aux deux transformations : cristallisation et fusion (Fig. 1-25). Les deux extrêmes sont le liquide de fusion granitique pur (viscosité entre 10^4 et 10^6 Pa s, Scaillet et al., 1998) et la roche solide à une température proche du solidus (viscosité effective entre 10^{18} et 10^{20} Pa s, Carter & Tsenn, 1987; Paterson, 1987; Talbot, 1999). Pour le processus de cristallisation, le seuil rhéologique est placé à $45 \pm 5\%$ de liquide, tandis que pour la fusion, la transition se situe à $25 \pm 5\%$.

6.2 Les mécanismes de déformation dans les migmatites

6.2.1 Mécanismes de fluage

La matrice solide non fondue est à très haute température et se déforme de façon ductile. (Dell'Angelo & Tullis, 1988) reportent des expériences dans lesquelles elles observent avec le début de la fusion partielle la transition d'un fluage par migration des dislocations vers un fluage par dissolution assisté par la diffusion dans le liquide de fusion. Dans un analogue du quartz (le norcamphor), Rosenberg & Handy (2000, 2001) observent aussi cette transition ainsi que des glissements grain sur grain assistés par les films de liquide. Dans des migmatites naturelles, des cas de déformation cristalline plastique du quartz, de recristallisation dynamique, et de fluage par migration des dislocations ont été reporté aussi (Gapais & Barbarin, 1986; Rosenberg & Riller, 2000).

Ainsi, la présence de liquide active les mécanismes de déformation plastique des roches partiellement fondues. Cependant, les conditions du laboratoire (vitesses trop rapides, pression de confinement trop faible) et le manque de données expérimentales sur les métapélites (qui contiennent plus de micas que les granites habituellement étudiés) limitent nos connaissances sur le sujet.

6.2.2 Fracturation

La présence d'hétérogénéités de très faible viscosité dans un solide crée des instabilités mécaniques (Hand & Dirks, 1992; Vigneresse & Tikoff, 1999; Bercovici et al., 2001). Ce principe de « fragilisation » de la roche partiellement fondue par la présence de liquide (« *melt-enhanced embrittlement* ») à inciter d'autres auteurs à diminuer encore la valeur du RCMP (Davidson et al., 1992; Rosenberg & Handy, 2000). Les processus de localisation ont de plus une importance capitale dans la migration du liquide car ils fournissent des échappatoires au liquide sous forme de plans de fracture ou de veines ouvertes qui augmentent localement la perméabilité.

Principe de la fracturation assistée par les fluides

Une roche n'est jamais homogène et parfaitement cristallisée. Elle contient de nombreux défauts microscopiques qui sont autant de point de départ à des fractures plus grandes. En effet, le champ de contraintes est complètement perturbé au voisinage d'une pointe de fissure. Dans cette zone, des contraintes en tension très fortes peuvent exister même si le champ de contraintes est partout ailleurs (aux limites du système) en compression (Fig. 1-26a). L'intensité du phénomène dépend de la forme du défaut, de sa taille, d'une pression interne éventuelle et des propriétés du solide environnant (Fig. 1-26b). On regroupe généralement ces différents aspects dans le paramètre K appelé *facteur d'intensité de contrainte* (Rubin, 1995) (Fig. 1-26b). Dans le cas d'une roche partiellement fondue, ces « défauts » sont naturellement les pores et autres films de liquide entre les grains. A l'échelle du mètre ou du kilomètre, la même théorie est utilisée pour rendre compte de la formation des dykes (Spence & Turcotte, 1985; Petford et al., 1994; Rubin, 1998).

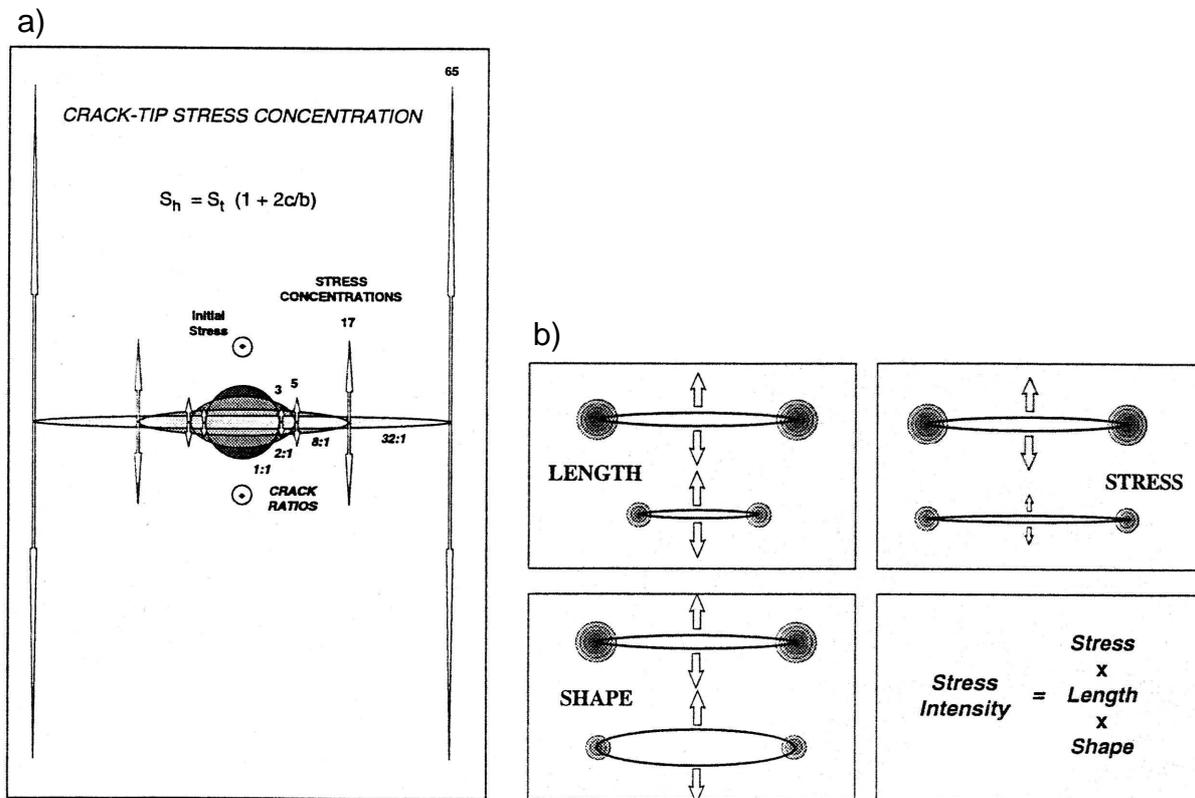


Figure 1-26 : Perturbation du champ de contraintes autour d'une fissure (d'après Engelder, non publié). **a)** Coefficient d'amplification de la contrainte « régionale » en fonction de l'ellipticité de la fissure. **b)** Paramètres contrôlant la valeur du facteur d'intensité de contrainte (« stress intensity factor »). La pression fluide serait un quatrième paramètre à prendre en compte.

La pression propre du fluide dans le pore amplifie le phénomène. Le principe de la « fracturation assistée par les fluides » désigne communément l'effet de la pression fluide sur le critère de fracturation (et de glissement) de Mohr-Coulomb. A contrainte différentielle égale, une roche contenant un fluide sous pression peut se fracturer tandis que la roche « sèche » reste intacte. Le liquide de fusion dans la migmatite est un fluide comme un autre avec sa pression propre qui s'op-

pose aux contraintes externes. Le principe de fracturation hydraulique peut donc s'appliquer aux migmatites (Wickham, 1987; Davidson et al., 1994; Lucas & St-Onge, 1995). C'est un critère à l'échelle macroscopique mais qui trouve microscopiquement son fondement dans le principe d'amplification des contraintes en pointe de fissure. Le rôle de l'échelle d'observation est donc primordial. Dans les deux paragraphes suivants, je reporte des observations à l'échelle millimétrique puis métrique qui semblent contradictoires.

La déformation expérimentale des roches partiellement fondues

La plupart des expériences de déformation de roches granitiques partiellement fondues montrent une fracturation rapide et à des taux de fusion inférieur à 5-10% (Arzi, 1978; VanderMolen & Paterson, 1979; Paquet et al., 1981; Dell'Angelo & Tullis, 1988; Rushmer, 1995; Rutter & Neumann, 1995). Une *cataclase* du matériau a lieu avec une intense fragmentation des cristaux et la formation de couloirs de cisaillement millimétriques. Ce régime cassant à haute température jette un doute sur l'applicabilité de ces expériences au cas naturel. Rosenberg (2001) rappelle que ce type de microstructure n'est pas répandu dans les roches anatectiques naturellement déformées, et que des processus de restauration à haute température ont pu l'oblitérer. Le consensus actuel entre les différents auteurs est qu'il faut nuancer les résultats des expériences : la cataclase intense et généralisée (dans le sens de bréchification) des cristaux est rare, des microfractures *entre* les grains peuvent néanmoins s'ouvrir parallèlement à la direction principale maximale de compression, *surtout si la vitesse de déformation est forte* (Rosenberg & Riller, 2000; Rosenberg & Handy, 2001; Sawyer, 2001). Ces ouvertures peuvent servir, comme vu précédemment, à la ségrégation locale du liquide.

Comparaison avec la nature

A l'échelle du mètre, le caractère cassant des migmatites est beaucoup plus net. En fait, déformation ductile et cassante ont lieu ensemble (Davidson et al., 1994), et l'on passe de l'une à l'autre de façon abrupte ou transitionnelle (Fig. 1-19c). La présence de zones bréchifiées, de dykes, de veines discordantes et de couches compétentes tronçonnées attestent de ce caractère cassant dans les migmatites (Figs. 1-15, 1-19, 1-20a).

De plus, les migmatites possèdent une anisotropie mécanique plane très importante. La résistance à une tension perpendiculaire au plan de foliation peut être très faible. La présence de liquide entre les plans de foliation fait encore chuter la cohésion. Il est difficile d'avoir une mesure précise, mais Davidson et al. (1994) estiment la résistance à la tension (« tensile strength ») inférieure à 20 MPa, voire à 1 MPa. Par conséquent, l'ouverture de veines parallèles à la foliation est favorisée par rapport à la déformation plastique ductile. Rosenberg & Berger (2001) décrivent ainsi la déformation d'un orthogneiss amené à la fusion partielle par l'intrusion proche du granite du Bergell dans les Alpes centrales. A l'échelle du grain, des microfractures existent dans plusieurs directions. Par contre, à l'échelle de l'affleurement, les leucosomes centimétriques sont presque exclusivement parallèles à la foliation (Fig. 1-18c).

Le point faible de l'expérimentation : la taille des échantillons

L'application des expériences au cas naturel doit être faite avec quelques précautions. Il faut noter que les échantillons utilisés dans les tests rhéologiques à haute pression sont minuscules et font environ 1 cm³. Dans ce cas, il est difficile de rendre compte de l'hétérogénéité métrique d'une migmatite qui comprend une foliation pénétrative et des couches plus ou moins fondues. Une poche circulaire de 10 cm de diamètre de liquide de fusion pur peut être le site d'initiation d'une fracture de plusieurs mètres (Ingraffea, 1987). La surface de cette poche ne représente pourtant que 0.8% de la surface d'un carré de 1 m de côté qui entourerait cette poche. En supposant que la roche de ce mètre carré n'est pas fondue, alors le taux de fusion est inférieur à 1%. Le taux de fusion est donc très faible, pourtant ce mètre carré de roche a changé radicalement, après fracturation, de propriétés en terme de perméabilité, de drainage du liquide et de résistance mécanique. En raisonnant en volume de roche, le pourcentage aurait été encore plus faible. Ce calcul simpliste montre *qu'il est impossible d'expliquer à l'aide d'un seul paramètre, le taux de fusion, toutes les propriétés d'une migmatite*. Autrement dit, les migmatites n'ont pas une seule perméabilité, une seule viscosité ou un seul seuil de début de migration du liquide.

En conclusion, le contraste de viscosité entre liquide et solide devra être suffisant pour initier des fractures et localiser la déformation. De plus, un système analogue aux migmatites devra posséder une anisotropie mécanique importante. Le modèle devra fonctionner à l'échelle macroscopique pour rendre compte de la déformation ductile couplée à la déformation localisée.

7 La migration du liquide dans les migmatites

7.1 Définition

La *migration* du liquide de fusion s'entend ici comme un transport du liquide pur ou d'un magma pauvre en cristaux à travers la source partiellement fondue sur des distances métriques à kilométriques. Cette étape permet l'*extraction* du liquide de la migmatite et précède l'*ascension* véritable du magma granitique vers le site de mise en place final dans la croûte supérieure.

La compréhension de ce phénomène nécessite d'expliquer la connexion (ou non) des leucosomes en réseaux, et de clarifier le lien entre la déformation et l'extraction du liquide dans les migmatites. Avant d'exposer les résultats de cette thèse sur ces sujets, il convient de faire le point sur les modèles déjà existants.

7.2 La migration du liquide dans des réseaux de leucosomes

L'enjeu de l'interconnexion des réseaux de leucosomes est d'expliquer le lien entre la ségrégation centimétrique et les dykes d'alimentation des plutons granitiques. Weinberg (1999) imagine un réseau de drainage similaire à celui des riviè-

res et des bassins versants, avec de multiples embranchements et ramifications de différents ordres. Dans la source, l'espacement des fractures verticales devrait alors être compris entre 0.5 et 1 m (Rutter & Neumann, 1995). La faiblesse de ce modèle est qu'il suppose que le réseau s'établit d'abord complètement avant que la migration et l'ascension ne commencent.

Vanderhaeghe (1999) et Weinberg (1999) décrivent des réseaux interconnectés de leucosomes concordants et discordants. Le liquide de fusion migrerait de façon pénétrative à travers l'unité migmatisée pour nourrir des laccolites kilométriques situés à un niveau structural supérieur. Le réseau de veines granitiques décrit par Vanderhaeghe (1999) comprend un ensemble dense de leucosomes parallèles à la foliation, de bandes de cisaillement, de dykes et de couches compétentes boudinées (Fig. 1-4b). Ces leucosomes maintenant à l'affleurement doivent être considéré comme un liquide résiduel puisqu'une grande partie du volume total de liquide de fusion a servi à construire les plutons de leucogranite adjacents (Vanderhaeghe, 1999).

Néanmoins, les leucosomes d'une migmatite à l'affleurement ne constituent pas forcément un réseau interconnecté. Dans le cas des stromatolites, les leucosomes sont parallèles à la foliation et séparés les uns des autres par des lits de micas et par des couches de mésosomes ou même de couches non fondues (« *resisters* »). Les leucosomes discordants sont souvent relativement rares (Figs. 1-13, 1-16, 1-18c). *Un espacement de 1 mètre de ces conduits d'échappement semble irréaliste dans de nombreux cas. L'interconnexion du réseau ne serait alors pas assurée.* Par rapport au problème de la migration et de l'extraction du liquide de fusion, deux options sont alors envisageables : soit l'absence d'interconnexion du réseau signifie que l'extraction du liquide est impossible, soit l'interconnexion doit être envisagée à une plus petite échelle et dans ce cas une migration sur de longues distances parallèlement à la foliation est indispensable pour permettre de réaliser l'extraction.

La question se pose donc de savoir si les migmatites perdent du liquide et sont bien la source des magmas granitiques.

7.3 L'extraction du liquide de fusion : migmatites et sources des granites

Migmatites = sources des granites

La quantité de liquide de fusion qui a été extraite d'une migmatite est très difficile à estimer car on ne connaît pas souvent le protolithe initial. De plus, la minéralogie des granites et des migmatites est généralement trop simple (biotite + quartz + feldspaths) pour quantifier l'avancement des réactions. Dans une migmatite à sillimanite, Nyman et al. (1995) ont réussi à déterminer qu'entre 16 et 29 vol. % de liquide avait été extrait (une incertitude demeure car la concentration en eau libre est inconnue).

Par ailleurs, la perte en liquide est d'au moins 20% dans les migmatites de la « Central Maine Belt » (CMB, Fig. 1-3) (Solar & Brown, 2001b). L'étude géochimique complète (majeurs et traces) du protolithe métasédimentaire, des migmatites et des plutons de leucogranite plus superficiels montre leur lien étroit dans un processus complexe mêlant fusion, transport, cristallisation fractionnée,

contamination et mise en place. Les migmatites sont appauvries en liquide par rapport aux métapelites voisines. Grâce à la modélisation géochimique, les leucogranites peuvent être créés à partir des leucosomes après une certaine différenciation, du fractionnement, et l'assimilation de cristaux résiduels de biotite et de plagioclase (Solar & Brown, 2001b). Sur la base de ces arguments géochimiques et structuraux entre migmatites et plutons (Fig. 1-3), ces auteurs proposent que les migmatites sont la source des leucogranites dans ce cas.

Un autre exemple est la portion de croûte archéenne de Closepet en Inde, mise à l'affleurement par l'érosion (Moyen et al., 2001). Les relations géochimiques et structurales entre migmatites et plutons sont claires. De plus, ces auteurs mettent en avant le rôle d'un réseau de zones de cisaillement à plusieurs échelles pour la migration du magma.

Migmatites = « granites ratés »

Le principal argument permettant de faire des migmatites des granites avortés est que le taux de fusion dans les migmatites est trop faible pour que l'extraction du liquide soit possible (PatinoDouce et al., 1990; Clemens & Droop, 1998). Le liquide produit in situ reste sur place, il est tout au plus ségrégué dans des leucosomes. Ce raisonnement est basé sur le RCMP et sur l'idée que le liquide ne peut pas se séparer du solide si la structure solide n'est pas détruite. Le taux de fusion devrait donc être supérieur à 25-30%, d'où la proposition généralement admise que la fusion par déshydratation des muscovites produit des migmatites (taux de fusion faible) tandis que la fusion par déshydratation des biotites produit des granites (taux de fusion fort ; PatinoDouce et al., 1990).

Cependant, des études ont montré que des granites peuvent être issus d'une source riche en muscovite (PatinoDouce & Harris, 1998; Milord et al., 2001; Solar & Brown, 2001b). Brown & Pressley (1999) ont montré qu'un des leucogranites de la CMB avait cristallisé à partir d'un liquide issu de la cristallisation fractionnée de 20 vol. % d'un magma produit par la fusion de seulement 20 vol. % de la source. De plus, de nombreux granites ont une composition déséquilibrée qui signifie que le magma est issu d'une fusion faible et que la ségrégation a été rapide, empêchant l'équilibre chimique de s'établir (Sawyer, 1991; Barbero et al., 1995; Davies & Tommasini, 2000).

Conclusions

Ainsi, la chimie montre qu'il n'est pas nécessaire d'invoquer la fusion partielle généralisée de la source pour produire des granites. Ceci est d'autant plus vrai que la fusion est généralement synchrone de la déformation. Or, les mécanismes de compaction, de diffusion, de création de veines et de cataclase sont efficaces avec moins de 10 vol. % de liquide. L'application d'une contrainte différentielle sur la migmatite hétérogène permettrait donc une ségrégation et une extraction efficace du liquide à un taux de fusion bien inférieur au RCMP. Il s'ensuit que sous un régime constant de déformation, la roche partiellement fondue expulserait son liquide en continu et que celui-ci pourrait ne jamais être supérieure à environ 10 vol. % (Brown & Rushmer, 1997). Ainsi, le liquide serait toujours facilement ségrégué du mésosome. Celui-ci ne contiendrait donc que la dernière

fraction de liquide qui n'a pas été déplacé dans les leucosomes environnants, et en proportion inférieure à un certain seuil, par exemple le LPT à 8 vol.% (Vigneresse et al., 1996; Kriegsman, 2001).

Quant à l'extraction, son efficacité est très variable. *De nombreux paramètres contrôlent potentiellement l'efficacité de l'extraction : le taux de fusion, la densité de conduits d'extraction, la quantité de déformation, le contexte tectonique, la structure initiale, etc.* A l'affleurement, le réseau de leucosomes est le témoin du chemin qu'a suivi le liquide de fusion pour s'extraire de sa source (les auteurs anglo-saxons emploient le terme « *plumbing* » ou plomberie pour désigner ce réseau interconnecté de conduits). Ce réseau change probablement de géométrie pendant l'histoire de la migmatite et celui qui est à l'affleurement est le dernier avant la cristallisation.

L'extraction du liquide est plus ou moins efficace et tous les intermédiaires existent entre la source totalement appauvrie (une granulite) et la roche qui a peu fondu et qui a recristallisé sans perdre son liquide. Ces intermédiaires nous aident à comprendre la différenciation de la croûte puisque les processus de ségrégation, de migration et d'extraction du liquide apparaissent alors à différentes étapes.

8 Conclusions : nécessité et buts de la modélisation analogique

En conclusion, cette longue revue bibliographique des connaissances sur la ségrégation et la migration des magmas crustaux a mis en évidence quelques points-clés incontournables :

- Les orogènes enregistrent un plutonisme granitique important lors des grandes phases de déformation.
- Les conduits permettant le transport du liquide de fusion forment des réseaux plus ou moins bien interconnectés, du petit film autour des grains jusqu'aux dykes, en passant par les leucosomes.
- Les leucosomes ont des formes variées, entre la sphère et le plan, et ont toutes les tailles, du centimètre au kilomètre.
- La compaction à l'échelle du mètre semble possible.
- La localisation de la déformation est la règle dans les migmatites.

Toutes les échelles, du cristal à la croûte, sont concernées. Cependant, l'échelle macroscopique, entre le centimètre et la centaine de mètres, semble délaissée par les expérimentateurs. Cette fourchette d'échelles spatiales pose de plus de nombreuses difficultés à la mise en équations et à la modélisation numérique. En effet, la complexité géométrique et rhéologique des migmatites oblige à une simplification trop importante des paramètres. La modélisation analogique, même si elle oblige aussi à un certain nombre de simplifications, laisse à la nature le soin de créer les conditions particulières qui sont peut-être justement celles qui prévalent lors de la déformation des migmatites.

Lors de cette revue, les points suivants sont apparus problématiques :

- Le comportement mécanique d'une unité migmatisée de plusieurs dizaines de mètres d'épaisseur ne peut pas être ramené à la seule variable « taux de fusion » puisque l'hétérogénéité et l'anisotropie sont la règle dans les migmatites.
- La viscosité seule ne peut pas décrire ce comportement mécanique puisqu'il existe des phénomènes non linéaires comme, entre autres, la compaction, la fracturation et la migration de liquide.
- La ségrégation, la migration et l'extraction sont, certes, assistées par la déformation, mais comment évoluent ces processus avec la *quantité* de déformation ?
- Concernant l'extraction du liquide, une contradiction existe entre la nécessité d'un réseau interconnecté de chemins de migration et l'absence sur le terrain d'une réelle interconnexion. Une extraction sans destruction de la structure est-elle possible ?

Les expériences qui sont décrites dans la partie suivante tentent d'apporter des réponses et des éléments de solutions à ces problèmes. Le but de la modélisation analogique sera donc d'apporter une vision dynamique et continue dans le temps de ces processus de ségrégation, de migration et d'extraction du liquide de fusion.

DEUXIÈME PARTIE

Modélisation analogique de la déformation des migmatites

1 Introduction

Cette deuxième partie présente les expériences de modélisation analogique de la déformation des migmatites. Les nécessités d'une telle modélisation ont été énoncées précédemment et les objectifs principaux sont les suivants:

- Préciser le rôle du liquide de fusion sur le comportement mécanique de la roche.
- Étudier l'évolution de la distribution du liquide en fonction de la quantité de déformation et du champ de déformation.
- Déterminer les lieux de ségrégation du liquide et les chemins de migration.
- Mesurer l'efficacité de l'extraction en fonction du raccourcissement.
- Caractériser le rôle des différents paramètres géométriques et mécaniques (foliation, épaisseur, taux de fusion, nombre de couches, présence d'hétérogénéités, etc.).

Trois articles (deux publiés et un soumis) présentent de manière synthétique les conditions et les résultats des expériences. Le lecteur impatient pourra directement se reporter à ces articles qui sont insérés plus bas. Cependant, de nombreuses informations sur les propriétés des matériaux, sur la fabrication des modèles et sur les résultats des expériences non publiées doivent être décrits. De plus, les interprétations des expériences seront un peu plus poussées dans les sections suivantes. Le lecteur voudra bien excuser les inévitables redites qu'il trouvera entre les articles et le texte en français. C'est dans un souhait d'exhaustivité et de clarté que ces quelques répétitions sont apparues.

2 Matériaux

Une expérience de modélisation analogique est principalement basée sur le matériau utilisé qui doit avoir des propriétés mécaniques qui satisfont aux critères de similarité entre le modèle et la nature. Dans les simulations antérieures de la déformation des roches partiellement fondues, deux matériaux différents, un pour le liquide et un autre pour la matrice solide ont été utilisés (Grujic & Mancktelow, 1998). Dans ces expériences, des inclusions de vaseline dans une plaque de paraffine simulent des zones riches en liquide (Fig. 2-1a). Le seul critère de similarité qu'ils utilisent est le contraste de viscosité entre liquide et solide, qui n'atteint que 10^2 dans ce modèle. C'est insuffisant puisque nous avons vu dans la partie précédente que ce contraste est au minimum de 8 ordres de grandeur, mais plus généralement de 14 ordres de grandeur. Grujic & Mancktelow (1998) obtiennent pourtant une localisation claire de la déformation, sous la forme de zones de cisaillement connectant les inclusions de vaseline (Fig. 2-1b). L'application à l'échelle crustale restent cependant restreinte à cause de l'absence du traitement du dimensionnement.

La seule autre tentative à ma connaissance de modéliser expérimentalement des migmatites a été faite par Bons et al. (2001a). Là encore, deux matériaux sont utilisés : un gaz de fermentation pour le liquide et du sable pour la partie solide.

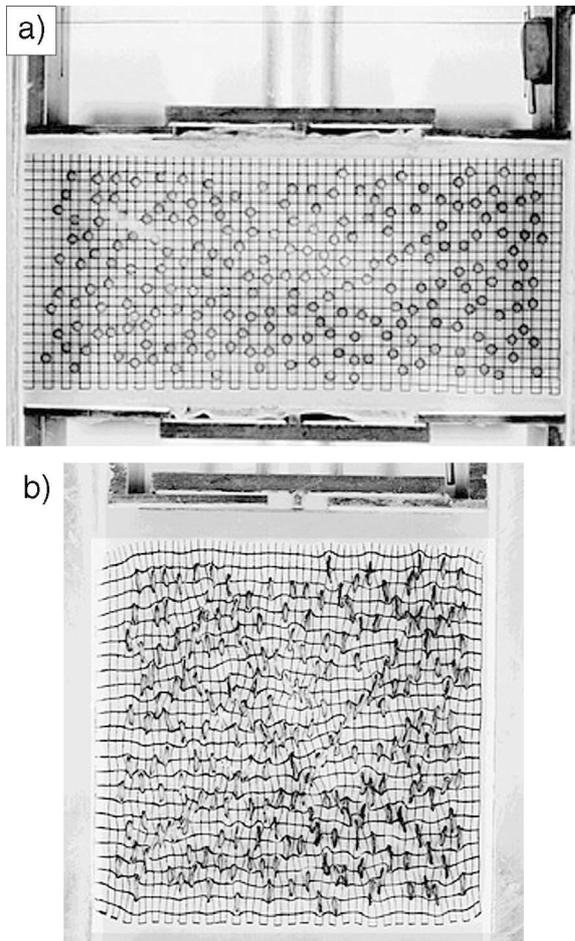


Figure 2-1 : Expérience analogique de Grujic & Mancktelow (1998). **a)** Etat initial. Des inclusions de vaseline sont disposées au hasard dans une couche de paraffine. **b)** Le raccourcissement produit des zones de cisaillement connectant les inclusions étirées.

L'intérêt réside dans la production *in situ* d'un « liquide » de faible densité grâce à la décomposition, par des levures, de sirop de glucose mélangé au sable. Il n'y a pas de déformation imposée aux limites du système mais l'on observe cependant la ségrégation du gaz dans des poches mobiles. L'utilisation du sable permet de simuler un écoulement dans une porosité interconnectée mais est incorrecte du point de vue du mécanisme de la déformation. Le sable se déforme par glissement des grains les uns sur les autres et répond au critère de Mohr-Coulomb concernant la fracturation. Les roches partiellement fondues ont avant tout un comportement visqueux, même si des possibilités de localisation et de glissement grain sur grain par l'intermédiaire du liquide existent (voir partie précédente).

Le choix que nous avons fait d'utiliser la cire partiellement fondue comme matériau analogue est donc une combinaison de ces deux précédentes expériences. Il semble en effet plus naturel d'utiliser un matériau analogue qui pourra partiellement fondre lui aussi. Dans la suite, j'expose les propriétés des paraffines et démontre la validité de ce choix.

2.1 Les différentes paraffines

Les paraffines sont issues du raffinage du pétrole. Elles font partie des résidus les plus lourds avec le bitume. Outre leurs utilisations traditionnelles sous la forme de bougies, d'emballages (enduits de papiers et cartons), ou dans les cosmétiques, la paraffine entre dans la fabrication de certains plastiques, dans le traitement du bois, des textiles, du cuir, etc. Elle est formé d'un mélange d'alcane C_nH_{2n+2} dans des proportions variables. Le nombre n varie entre 20 et 60, avec une moyenne autour de 30 (Dorset & Basson, 2000). Cette variété de composition donne une grande variété de propriétés physiques et mécaniques. La température de fusion, variant de 45°C à 80°C, sert donc à classer sommairement les différentes paraffines, les plus lourdes fondant à plus haute température. Ainsi, Total-Fina-Elf, notre fournisseur de paraffine, propose une gamme de 4 paraffines (50/52, 56/58, 60/62 et 68/70) et une cire. La paraffine 50/52 fond donc entre

50 et 52°C. La cire est quant à elle un produit spécial¹, plus lourd, qui fond autour de 80°C d'après nos mesures (voir plus bas).

2.2 La structure microscopique des paraffines et de la cire

La paraffine et la cire sont des matériaux dont la cristallinité est inférieure à 100%. (Dorset & Basson, 2000) donnent le chiffre de 80% pour une paraffine fondant autour de 56°C. Il existe une transition de phase α - β qui a des conséquences sur la rhéologie (Mancktelow, 1988; Rossetti et al., 1999). Concernant la taille des cristaux, la paraffine est dite *macrocrystalline*, tandis que la cire est *microcrystalline* (Mancktelow, 1988). Les longues chaînes linéaire d'alcane se polymérisent et

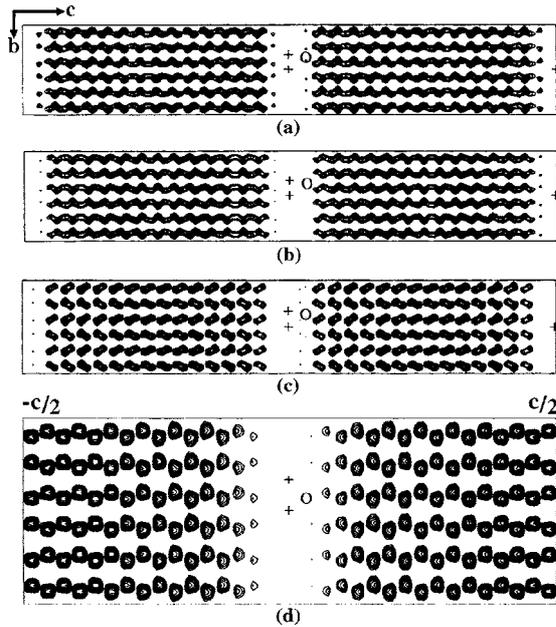


Figure 2-2 : Structure cristalline de la paraffine obtenue par diffraction électronique (Dorset & Basson, 2000).

forment une structure lamellaire extrêmement fine (Fig. 2-2). L'espacement moyen est de l'ordre de 45 Å (Dorset & Basson, 2000). Ceci expliquerait l'obtention aisée d'une structure « foliée » par cristallisation sous une contrainte différentielle de la cire. Ce procédé qui sera utilisé pour *simuler la foliation des roches métamorphiques*, ne fait donc, en fait, qu'accentuer une structure naturelle. La figure 2-3 schématise la méthode pour produire une couche de cire foliée. On obtient une structure plane bien visible au M.E.B. (Fig. 2 de Barraud et al., 2001), mais invisible à l'œil nu. Une anisotropie mécanique en découle.

Il est important de noter que le processus de formation de la foliation dans la cire est difficilement reproductible à l'identique d'une expérience à l'autre, c'est-à-dire que ce traitement pré-déformation ne réussit pas toujours. Or, le seul moyen de vérifier et de mesurer l'intensité de cette foliation est de faire une expérience. C'est pourquoi l'observation et l'interprétation des résultats renseignent *a posteriori* sur les conditions initiales.

2.3 La fusion des paraffines et de la cire

Il est indispensable de connaître l'évolution du taux de fusion en fonction de la température. Ce paramètre est en effet essentiel dans la discussion sur les mécanismes de ségrégation. Il est très difficile de séparer physiquement liquide et solide, surtout à un faible taux de fusion. C'est d'ailleurs le but de la ségrégation assistée par la déformation dans les expériences ! C'est pourquoi j'ai utilisé une technique indirecte en exploitant les propriétés optiques de la paraffine et du liquide de fusion. Les principaux résultats sont dans l'article soumis au *Journal of Structural Geology (JSG)*.

¹ Dans la suite, je distingue la *cire* de la *paraffine*, bien qu'elles soient toutes deux des produits paraffineux, c'est-à-dire formés d'hydrocarbures. En anglais, la paraffine issue du pétrole se dit « *paraffin wax* » alors que « *wax* » désigne les autres cires, comme la cire d'abeille. Dans les articles, j'utilise cependant les termes « *wax* » et « *paraffin* » avec la même distinction qu'en français.

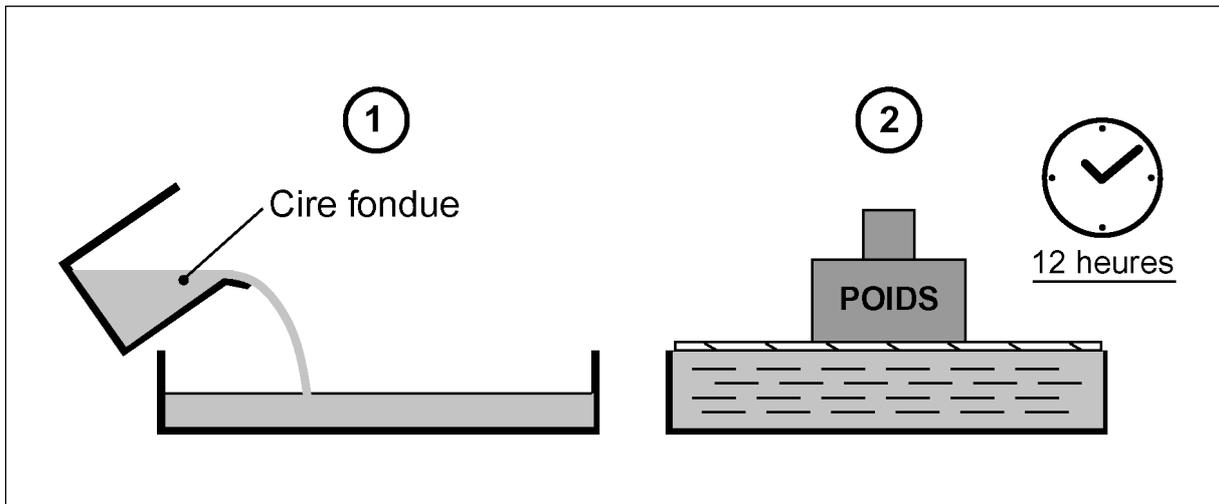


Figure 2-3 : Fabrication de la foliation intrinsèque de la couche de cire utilisée dans les expériences dites avec «couche foliée».

Une platine chauffante utilisée normalement pour l'étude des inclusions fluides piégées dans les minéraux permet de faire varier très précisément et par palier la température d'un petit échantillon. Pour obtenir une fine couche translucide de paraffine, j'ai versé une goutte de paraffine fondue sur une lame de plastique porte-échantillon. L'effet de trempe produit peu de cristaux. Il faut donc appliquer plusieurs cycles de fusion et cristallisation lente pour obtenir de beaux cristaux et procéder ensuite aux mesures. Celles-ci consistent à prendre des photos à des paliers rapprochés de température puis ensuite à mesurer sur chaque photo la quantité de pixels sombres. En effet, le liquide est isotrope et apparaît noir sur une image prise avec les polariseurs croisés (Fig. 2-4a et Fig. 1 de l'article soumis à *JSG*). Le nombre de pixels noirs donne donc la teneur en liquide (Fig. 2-4b).

Deux problèmes se posent pour obtenir une mesure fiable. Premièrement, il existe des plages sombres sur les photos, même à température ambiante. Ce sont vraisemblablement des fragments de paraffine mal cristallisée, ou alors des cristaux à l'extinction. Il suffit donc de retrancher le nombre de pixels concernés à la valeur mesurée en condition de fusion partielle. Deuxièmement, un pixel apparaît noir sur une image numérique même si son niveau de gris (son intensité) n'est pas maximal. Ce problème se pose aussi dans l'analyse des images des modèles déformés. Il faut donc procéder par seuil et déterminer une intensité limite qui sépare celle du liquide de celle du cristal.

Cire

Pour la cire, le graphe de la figure 2-4c montre que le taux de fusion augmente exponentiellement avec la température. La fusion débute entre 45 et 50°C. A 80°C, quelques cristaux restent en suspension. Cependant, macroscopiquement, la cire se présente à cette température comme un liquide pur. Des mouvements internes de convection doivent probablement homogénéiser la cire qui se comporte alors comme un liquide. J'ai donc choisi la valeur 80°C comme température du liquidus.

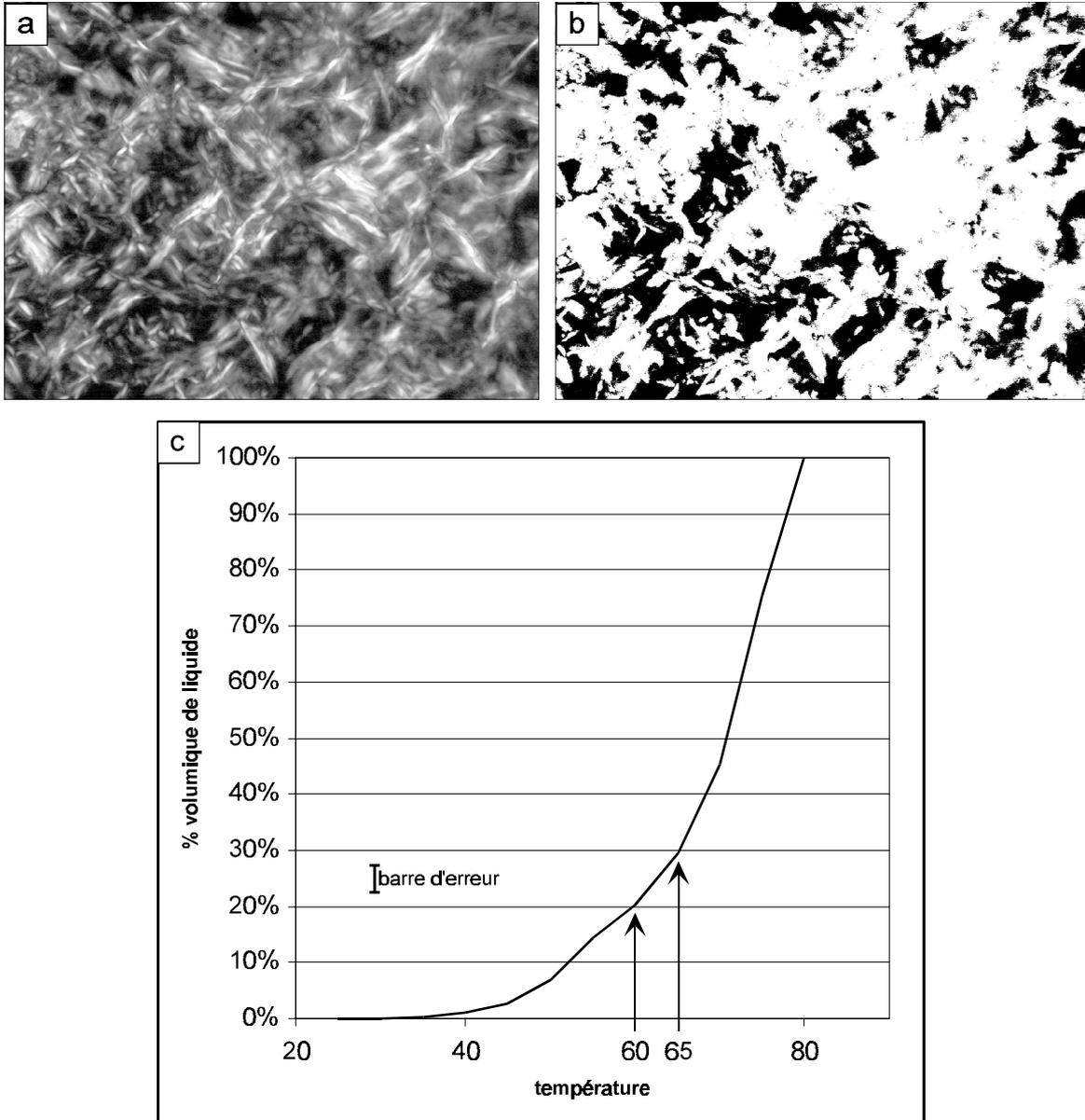


Figure 2-4 : Fusion de la cire. **a)** Vue au microscope avec les polariseurs croisés à 65°C. Le liquide de fusion isotrope apparaît en noir. La base de l'image mesure 0,1 mm. **b)** Image a) sur laquelle a été appliqué un « seuillage » ne faisant apparaître que les pixels sombres. Noter que la porosité microscopique de la cire est interconnectée. **c)** Taux de fusion en fonction de la température obtenu grâce à cette technique.

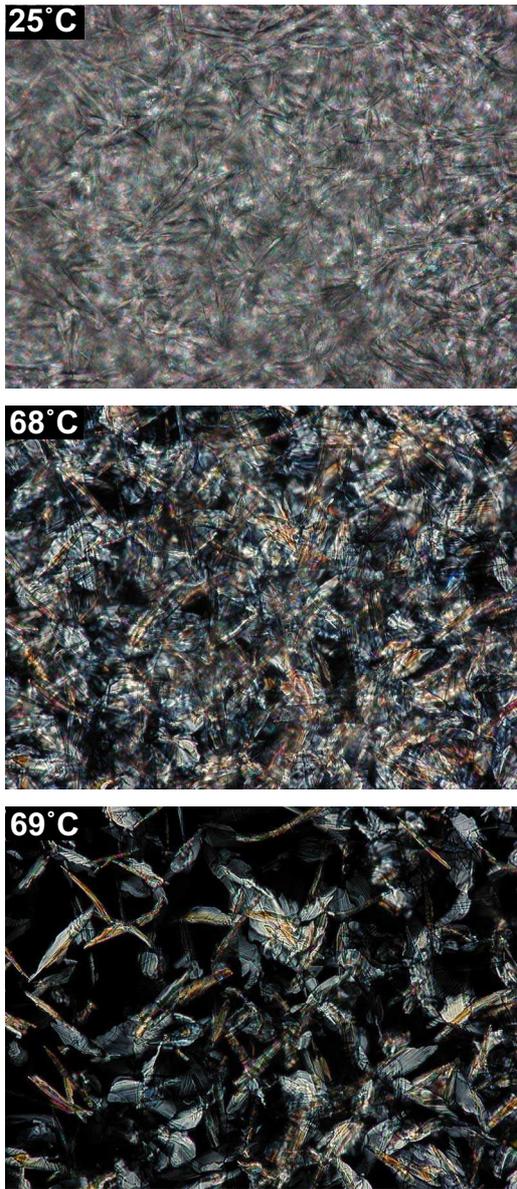


Figure 2-5 : Paraffine 68/70 vue au microscope avec les polariseurs croisés et chauffée grâce à une platine chauffante. Noter les cristaux plus gros que dans le cas de la cire et l'augmentation abrupte de la quantité de liquide entre 68 et 69°C. La base de l'image mesure 0,5 mm.

Paraffine

En ce qui concerne la paraffine, je ne montre que les résultats de la fusion de la paraffine 68/70 qui est utilisée dans les modèles. On voit au microscope que les cristaux sont plus gros que ceux de la cire (Fig. 2-5). La courbe de fusion montre une augmentation du taux de fusion beaucoup plus abrupte que pour la cire. Le taux de fusion reste stable autour de 3% à partir de 45°C. Cela doit correspondre à une phase légère que les chimistes nomment « huile » et qui est toujours présente dans les paraffines (Dorset & Basson, 2000). Conformément au nom de la paraffine 68/70, la fusion véritable débute à 68°C pour se terminer à 70°C (Fig. 2-5).

2.4 La rhéologie des paraffines

Données existantes

A température ambiante, les paraffines et la cire sont des solides cassants. Les paraffines s'effritent à la cassure en une poudre grossière tandis que la cire produit plutôt de petites esquilles, signe de leur structure naturellement plus foliée. A des température plus élevées, les paraffines ont déjà fait l'objet de tests rhéologiques (Neurath & Smith, 1982; Mancktelow, 1988; Abbassi & Mancktelow, 1992; Rossetti et al., 1999). Par contre, seuls Neurath & Smith (1982) ont étudié une cire microcristalline. L'application de ces précédents résultats pose cependant problème car les propriétés mécaniques varient grandement avec la composition chimique de la paraffine, et même d'un fournisseur à l'autre pour une paraffine de point de fusion donné (Abbassi & Mancktelow, 1992). De plus, nos expériences impliquent des températures beaucoup plus élevées que les expériences antérieures.

Rossetti et al. (1999) ont étudié entre 30°C et 52°C une paraffine dont le point de fusion T_m est $53 \pm 1^\circ\text{C}$ (Fig. 2-6). Ce matériau se comporte comme un fluide non-linéaire ($1.6 < n < 2.1$) pour des températures homologues $T/T_m < 0.70$, et est approximativement un fluide Newtonien ($1 < n < 1.3$) pour $T/T_m = 0.70$. La limite 0.70 serait due à la transition de phase α - β de la paraffine. Les valeurs de la viscosité effective est très dépendante de la température et varie de 10^{10} à 10 Pa.s (Fig. 2-6). Cette propriété a permis de construire un modèle analogique de la croûte continentale qui prend en compte, avec un seul matériau, la stratification rhéologique en fonction de la profondeur (Rossetti et al., 2000).

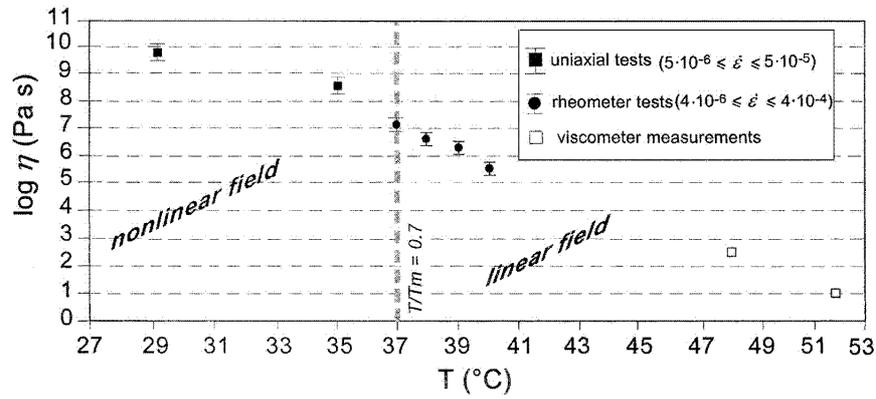


Figure 2-6 : Viscosité de la paraffine en fonction de la température (Rossetti et al., 1999).

Le caractère non linéaire du comportement rhéologique des paraffines à relativement basse température avait déjà été mesuré par Neurath & Smith (1982), Mancktelow (1988) et Abbassi & Mancktelow (1992). L'exposant n variait toutefois de 1.8 à 3.8. Abbassi & Mancktelow (1992) ont noté un fort adoucissement (diminution de la résistance avec la quantité de déformation) d'une paraffine 58/60 à 26°C. Cet adoucissement n'existe pas pour la paraffine 52/54 de Rossetti et al. (1999), mais il l'est dans le cas de la cire microcristalline étudiée par Neurath & Smith (1982) à 40°C. Cette cire a une viscosité effective entre $2 \cdot 10^8$ et $8 \cdot 10^6$ Pa.s à 40°C.

Nouvelles données

Le comportement mécanique de la cire et de la paraffine a été étudié dans le cadre de cette thèse avec un dispositif très simple de test uniaxial (Fig. 2-7). La vitesse de déformation est mesurée à contrainte constante (un poids « mort »). Les tests furent menés à 60°C et 65°C sur des cylindres de 44 mm de diamètre et de hauteur comprise entre 60 et 90 mm (Fig. 2-7). Dans ce cas, la viscosité effective est donnée par (Neurath & Smith, 1982; Rossetti et al., 1999) :

$$3\eta_{eff} = \sigma / \dot{\epsilon} \quad (4)$$

Cire

On obtient les graphes de la figure 2-7 et des valeurs de viscosité, quand le taux de déformation se stabilise, de $2 \pm 1 \cdot 10^8$ Pa.s à 60°C et $6 \pm 1 \cdot 10^7$ Pa.s à 65°C. Le fait qu'on obtienne à peu près la même valeur de viscosité pour deux poids différents (0.5 et 1 kg) montre que le comportement est pratiquement linéaire. Cependant, un adoucissement est sensible à 65°C puisque la viscosité diminue respectivement à $4 \pm 1 \cdot 10^7$ Pa.s et à $2 \pm 1 \cdot 10^7$ Pa.s aux environs de 5% et 10% de raccourcissement.

On remarque aussi la grande dépendance avec la température : une baisse de 2°C augmente la viscosité à $7 \pm 1 \cdot 10^8$ Pa.s et une augmentation de 5°C la diminue d'un ordre de grandeur. L'investigation du rôle de la température n'a pas été poussée plus loin pour l'instant. Il semble cependant que le « RCMP » (seuil rhéologique

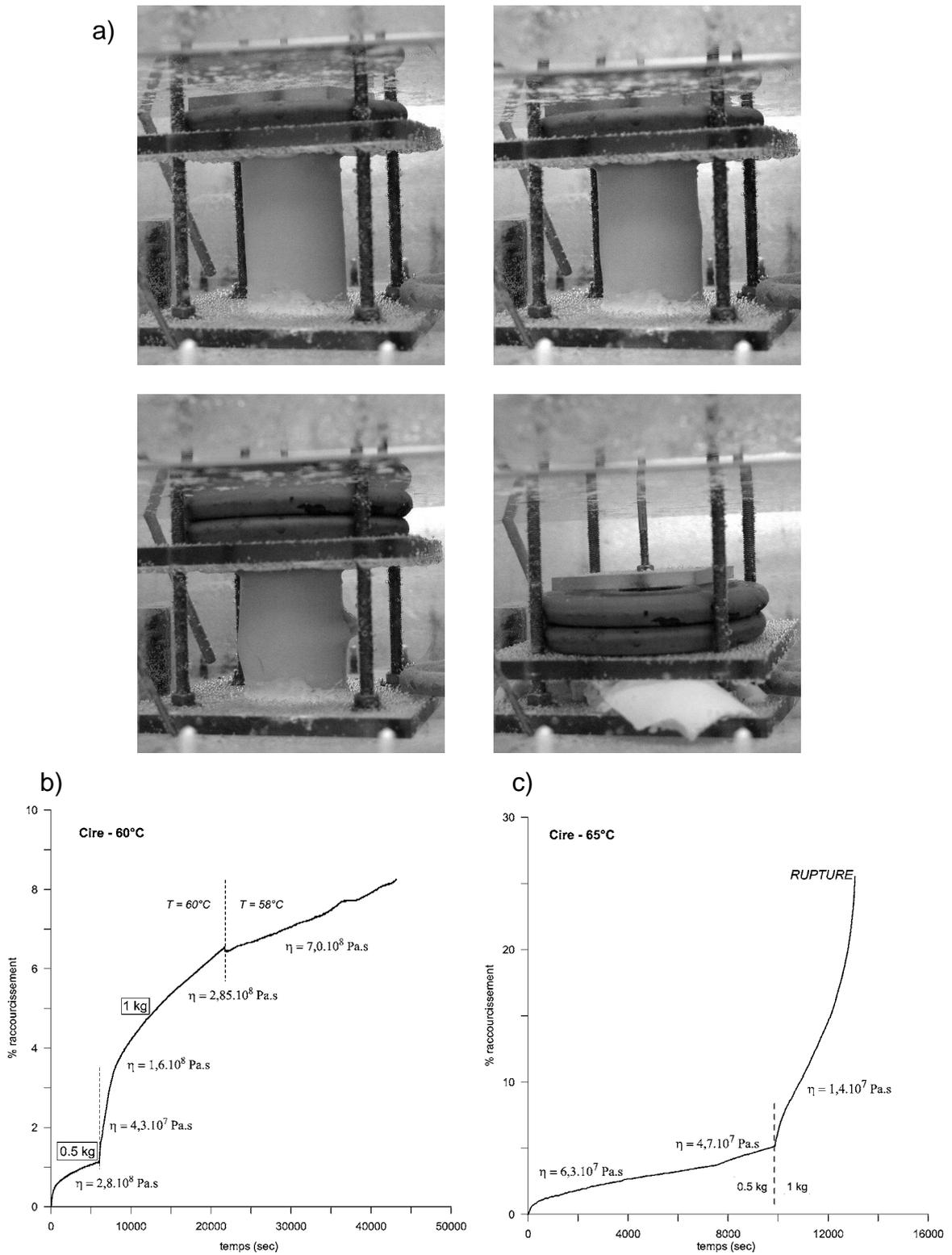


Figure 2-7 : Tests de rhéologie. a) Séquence montrant le raccourcissement d'un cylindre de cire à 65°C. Le poids double entre les images du haut et du bas. La rupture a lieu sur des fractures en cisaillement conjuguées. b) et c) Courbes de la quantité de raccourcissement en fonction du temps pour la cire à 60 et 65°C. Des changements de température ou de poids imposé sont faits. Des phases transitoires à fortes vitesses de déformation précèdent des phases où la vitesse est constante et où la viscosité est calculée par régression linéaire.

critique) de la cire ne se situe pas à un taux de fusion de 30% puisqu'elle garde toute sa cohésion à 65°C.

La rupture finale s'effectue sur une ou deux fractures conjuguées, ce qui montre que la déformation se localise facilement. Des tests triaxiaux devraient être menés pour obtenir un comportement plus ductile. Cependant, nous ne possédons pas de presse nécessaire à ce type de test.

Paraffine

Pour la paraffine 68/70, un comportement pratiquement Newtonien est confirmé et le coefficient de viscosité s'établit à 4 ± 1.10^7 Pa.s. Cette valeur est plus forte d'un ordre de grandeur que la valeur indiquée par Barraud et al. (2001). Ainsi, le contraste de viscosité entre la cire et la paraffine n'est que de un ordre de grandeur environ au lieu de deux.

2.5 Conclusion : modéliser les migmatites avec de la cire

Les différentes propriétés de la cire et des paraffines sont adéquates pour modéliser de façon analogique la déformation des migmatites.

La cire sera utilisée pour comme analogue d'une roche foliée partiellement fondue, du type gneiss migmatisé. Les conditions de fusion partielle seront telles que la cohésion et la structure seront conservées. Les modèles permettront donc d'observer la déformation et la migration du liquide de fusion dans une métatexite.

La paraffine, moins résistante, constituera un environnement de déformation pour la cire. Elle permettra d'obtenir de beaux plis dans la couche de cire. Cependant, sa perte de volume constitutif au raccourcissement limitera son utilisation (voir la section résultats).

3 Similarité

Nous avons dimensionné nos modèles grâce à des rapports sans dimension dans le cadre de la théorie exposée par Ramberg (1981). Le lecteur se reportera à l'article soumis au *Journal of Structural Geology* pour tous les détails. Les principaux résultats de la comparaison nature/modèle sont :

- Les processus gravitaires ne sont pas correctement reproduits. La flottabilité forte du liquide de fusion permet cependant d'observer des mouvements ascendants du liquide par rapport au solide, mais à des vitesses théoriquement trop faibles par rapport à une expérience en centrifugeuse correctement dimensionnée.
- Nos expériences simulent convenablement des structures dont la longueur caractéristique se situe entre 10 cm et 100 m. A chaque échelle spatiale est associé un couple vitesse de raccourcissement/viscosité du solide.
- Le contraste de viscosité liquide/solide est le même dans la nature et le modèle.
- Les effets de lubrification et de localisation de la déformation dus à la présence de liquide s'observent dans le modèle.

En ce qui concerne les échelles spatiales, la figure 2-8 précise quels types de contextes le modèle expérimental permet de reproduire. La couche de cire analogue des migmatites a une longueur initiale de 25 cm et une épaisseur comprise entre 3 et 7 cm, suivant les expériences. Les expériences multicouches sont composées de « lamines » de 4 ± 1 mm d'épaisseur. Par conséquent, la foliation est nette et régulière. Du point de vue mécanique, cela produit des plans de faiblesse tous les 4 ± 1 mm. Etant donné le rôle majeur dans les résultats de l'anisotropie mécanique, il est important de préciser à quoi correspondent ces plans particuliers dans la nature en fonction des échelles. De la grande échelle (longueur caractéristique = 10 cm) à la petite échelle (100 m), leur espacement augmente (Fig. 2-8) :

- Dans le cas d'un protolithe schisteux, riche en micas, les plans de foliation sont très serrés et leur espacement peut être inframillimétrique. Dans ce cas, le modèle est plus grand que l'objet naturel : l'échelle sera $4/1$ et la cire multicouche reproduira une couche de migmatite épaisse de $7/4 = 1.75$ cm et longue de $25/4 = 6.25$ cm.
- Cependant, même dans une roche métamorphique très foliée, tous les plans de foliation ne sont pas des plans de faiblesse et tous ne vont pas être le lieu d'une

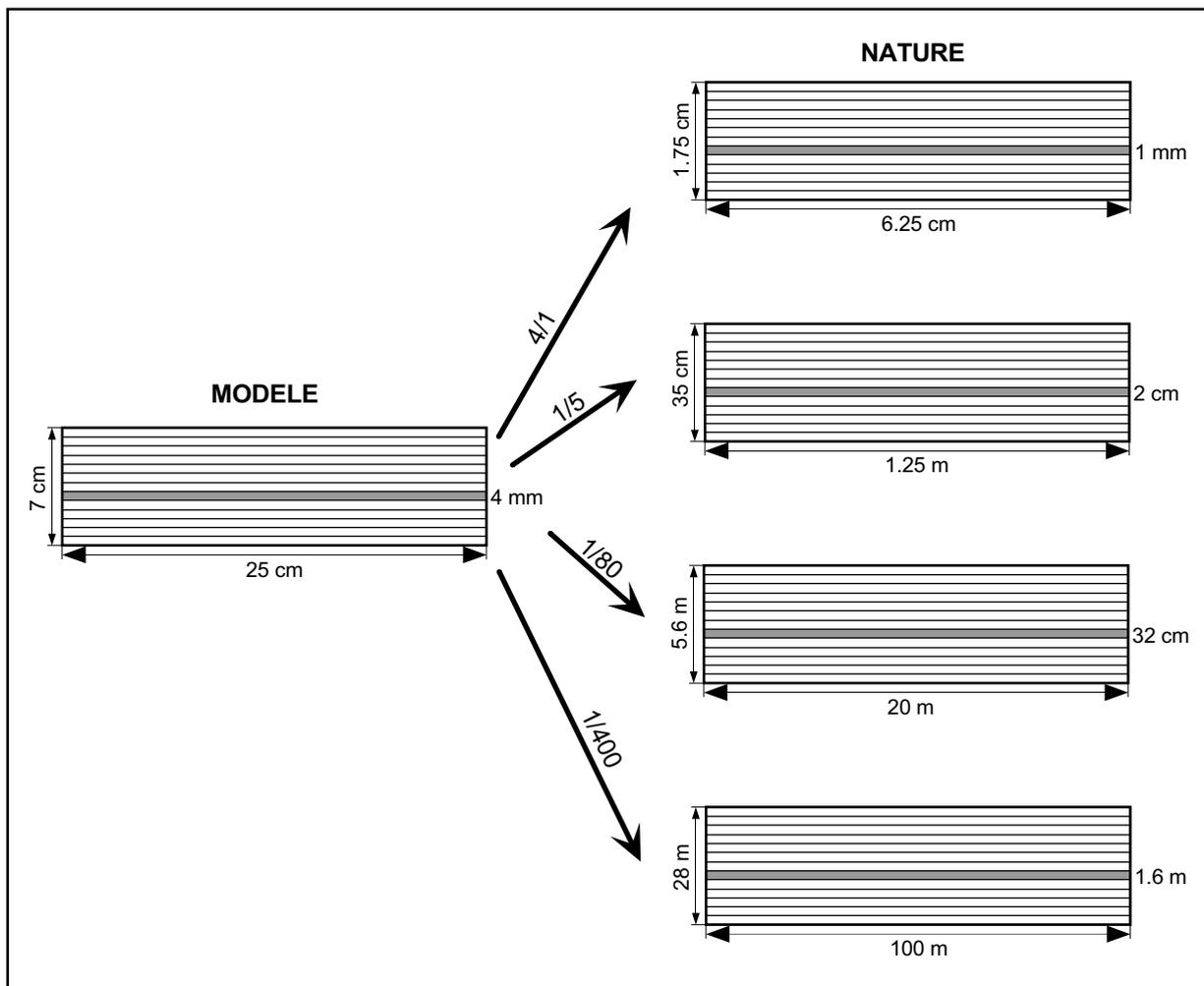


Figure 2-8 : Dimensions des objets naturels modélisés pour quatre échelles différentes entre le modèle et la nature (flèches noires). Voir l'article soumis au Journal of Structural Geology pour la justification de ces différentes échelles.

ouverture de veines ou d'un cisaillement. De plus, lorsque la fusion opère par déshydratation des micas, le liquide est localisé entre les minéraux réactants, donc dans les plans de foliation au contact des micas (Sawyer, 2001). A l'échelle de quelques centimètres, certains plans sont donc vraisemblablement plus fragilisés que d'autres. Pour un espacement de ces plans de 2 cm, l'échelle du passage modèle/nature est $4/20 = 1/5$. Le modèle simulera donc une couche de 35 cm d'épaisseur et de 1.25 m de long.

- Pour une échelle plus petite, le litage en cire reproduit un litage lithologique initial plutôt que la foliation. Le rôle de l'hétérogénéité de la fusion est important : une couche un peu plus fertile que les autres localise la déformation (Vignerresse & Tikoff, 1999; Sawyer, 2001). Leur espacement est de l'ordre de la dizaine de centimètres. Pour une échelle de 1/80, la couche de métatexites modélisée aura donc une longueur de 20 m, une épaisseur de 5.6 m et l'espacement des plans de faiblesse est 32 cm.
- Lorsque la longueur caractéristique est de 100 m, l'effet du litage compositionnel, ainsi que de l'héritage sous forme de zones de cisaillement ou de plis préexistants à l'anatexie est primordial. En appliquant une échelle de 1/400 au modèle, l'espacement moyen des zones de moindre résistance est alors 1.6 m et l'épaisseur de l'unité migmatisée simulée est 28 m.

4 Dispositif et conditions expérimentales

4.1 Appareil expérimental

L'appareil expérimental a été imaginé par Véronique Gardien, dessiné et construit par Philippe Grandjean, D. Brechot et S. Victor (Brechot & Victor, 1997). Il est fabriqué en Plexiglas et Makrolon, une sorte de Plexiglas résistant à la température et aux attaques chimiques. Les couches de paraffines reposent dans une boîte dont les parois en Makrolon font 1 cm d'épaisseur. Cette boîte est plongée jusqu'à mi-hauteur environ dans un bain d'eau chaude qui assure le chauffage du modèle (Figs. 2-9a). Ses dimensions sont : 15 cm de large, 35 cm de long et 25 cm de haut.

Cette géométrie implique une déformation plane des modèles.

Système de raccourcissement

Le système permettant le mouvement de la paroi mobile est composé d'un moteur électrique, d'un réducteur, d'une transmission flexible, d'un renvoi d'angle et d'une vis sans fin permettant la transformation de la rotation en déplacement rectiligne. La vitesse du moteur est commandée par un fréquencemètre. La vitesse est *constante* pendant une expérience et ne peut être ajuster automatiquement.

La vitesse utilisée dans toutes les expériences est de 2.45 mm/h et c'est la plus faible possible.

Système de chauffage

L'eau du « bain-marie » est chauffée par une résistance. La température est contrôlée au dixième de degré près par un thermostat électronique « intelligent » permettant une montée en température régulière. Pour éviter les pertes de chaleur, l'ensemble de la machine est isolé par un capot en polystyrène expansé doublé d'une feuille d'aluminium (Fig. 2-9c). Ce système permet d'obtenir une température stable dans le modèle.

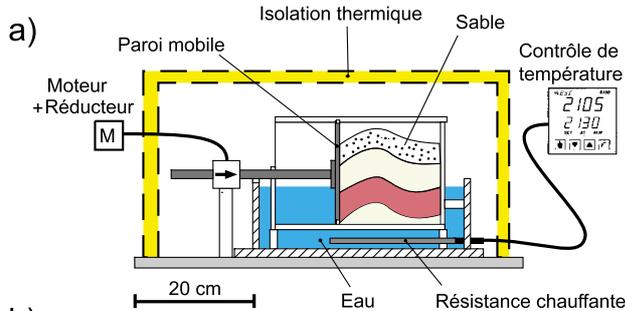


Figure 2-9 : Dispositif expérimental au laboratoire Dynamique de la Lithosphère, université Claude Bernard. a) Schéma de l'appareil. b) Vue d'ensemble avec l'ordinateur et le système d'acquisition. c) La machine sous son capot de polystyrène isolant.

La quantité d'eau utilisée n'est pas toujours la même :

- Pour les premières expériences (1 à 15), le niveau de l'eau se situe sous le modèle. Dans ce cas, *un fort gradient de température*, de l'ordre de $1^{\circ}\text{C}/\text{cm}$, existe entre le bas et le haut des couches. La température de l'eau est donc réglée plus haute que la température voulue dans la couche de cire.

- Pour palier à ce problème de gradient, le niveau de l'eau est toujours plus haut que le sommet de la couche de cire dans toutes les autres expériences. Le gradient de température est alors limité à la couche de paraffine supérieure, quand elle existe. La température dans le modèle est néanmoins 1°C inférieure à la température de l'eau. Ceci est dû aux propriétés isolantes du Plexiglas. Avec l'épaississement du modèle dû au raccourcissement, le sommet de la couche de cire peut se retrouver au dessus de l'eau. Dans ce cas, l'expérience est arrêtée.

La chauffe du modèle dure entre 36 et 48 heures. Cela permet de stabiliser le gradient de température et de s'assurer que la réaction de fusion dans la cire est à l'équilibre.

La capacité calorifique des paraffines et de la cire est élevée ($3 \text{ J}/\text{g}/^{\circ}\text{C}$, comme l'eau). Ainsi, la température ne diminue pratiquement pas quand le capot isolant est retiré quelques instants pour pouvoir prendre des photos pendant l'expérience. Ce capot doit cependant être en place la grande majorité du temps, ce qui empêche toute prise de vue automatisée. Ce détail est à l'origine

des « périodes de repos » des dernières expériences. Elles correspondent aux nuits pendant lesquelles la prise de vue est suspendue, et donc dans le même temps la déformation.

Système d'enregistrement numérique

Des capteurs de déplacement, de force et de température ont été installés sur la machine à partir de l'expérience 18. Les valeurs mesurées par ces capteurs étaient enregistrées par un ordinateur PC *via* des cartes d'acquisition (Fig. 2-9b). Le logiciel *Labview* a permis de gérer l'acquisition et l'enregistrement (Fig. 2-10).

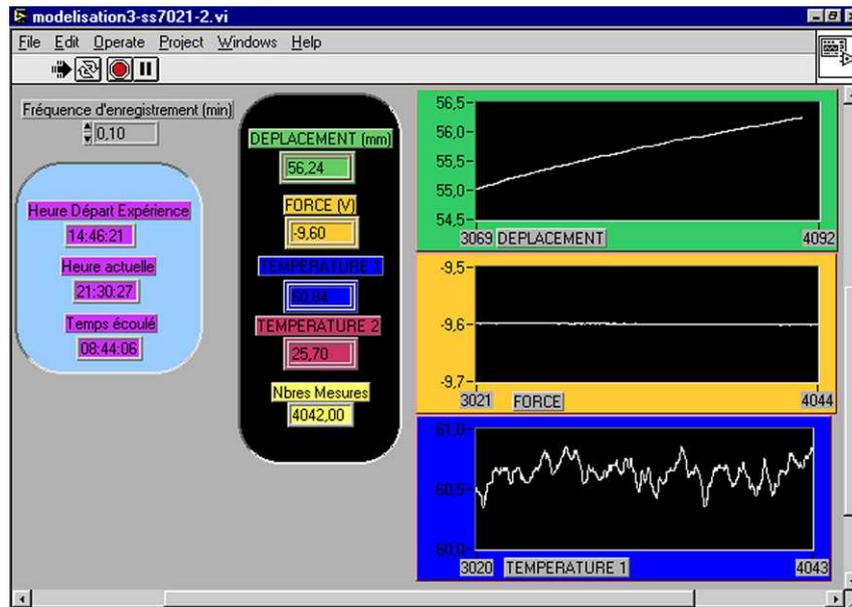


Figure 2-10 : Panneau de contrôle Labview montrant les données acquises lors d'un test de rhéologie. La force n'est pas mesurée.

Le capteur de déplacement a parfaitement fonctionné, à une précision de l'ordre du dixième de millimètre (inutile). Les capteurs de température ont permis de contrôler et d'enregistrer les périodes de chauffage et de refroidissement. En revanche, le capteur de force n'était pas assez sensible. Calibré à 2000 N, il a surtout enregistré les frottements énormes qui existaient au niveau du mur mobile. Les forces mises en jeu à l'intérieur de la cire ne sont vraisemblablement pas plus élevées que 10 N :

$$F = \eta VL \tag{5}$$

Avec $\eta = 10^8$ Pa.s, $V = 2.4$ mm/h = 6.7×10^{-7} m/s et $L = 0.2$ m, on obtient $F = 13$ N.

Le but de la mesure de la force était de caractériser une chute possible de la résistance de la cire partiellement fondue avec la déformation, notamment lors de la formation de bande de cisaillement (voir les résultats). Une amélioration notable de la machine serait de pouvoir réaliser des expériences à force constante. Il

faudrait pour cela un capteur bien calibré et une commande numérique de la vitesse du moteur qui devrait alors s'adapter à la réponse mécanique du modèle.

4.2 Fabrication des modèles

L'ensemble du protocole expérimental est expliqué en annexe A, et l'essentiel est résumé dans les articles.

5 Résultats des expériences

5.1 Introduction

J'ai utilisé cet appareil expérimental pendant mon stage de DEA en 1998. Les expériences correspondantes sont reproduites dans Barraud (1998) et constituent la genèse des expériences décrites ici.

Durant les trois années de cette thèse, 43 expériences ont été effectuées. Le tableau liste les paramètres et les structures majeures observées. Un certain nombre d'expériences portent la mention « ECHEC », ce qui veut dire que le résultat est inexploitable, soit à cause d'un arrêt prématuré de l'expérience, soit à cause du manque d'intérêt. C'est pourquoi un certain nombre d'expériences ne seront pas décrites.

Les paramètres dont le rôle a fait l'objet d'une investigation sont rassemblés dans le tableau 2-1.

Tableau 2-1 : Classement des expériences en fonction des différents paramètres étudiés.

		EXPERIENCES
Taux de fusion	Pas de fusion	11, 12
	Faible (<10%)	15
	Modéré (10-20%)	6, 8, 9, 10, 16 – 41
	Fort (25-30%)	14, 42, 43
Pendage	Horizontal	Toutes sauf :
	Vertical	21 – 24, 36, 39
	Oblique	25, 29
Paraffine	Avec	6 – 18, 20 – 23, 26 – 28, 38, 40, 41
	Sans	19, 24, 25, 29 – 31, 35 – 37, 39, 42 – 43
Structure	Non foliée	26, 30, 31, 38, 40, 41
	Foliée	La plupart
	Multicouche	32, 33, 36, 39, 42, 43
Enclave	Oui	30, 31, 33, 38, 40, 41
	Non	Les autres

☆ Le paramètre « taux de fusion » fait l'objet de l'article publié à *Physics and Chemistry of the Earth (Part A)* (Barraud et al., 2001), qui discute de la comparaison entre les expériences 12 (sans fusion) et 17 (fusion modérée, foliation). Son rôle est aussi discuté dans la section « bande de cisaillement ».

☆ Le paramètre « pendage » donnera lieu à une section consacrée aux expériences avec des couches non horizontales.

☆ Le paramètre « paraffine » indique en fait combien le modèle contient de couches. Tous les modèles contiennent une couche de cire, à laquelle s'ajoute zéro, une ou deux couches de paraffine.

☆ Le paramètre « structure » est celui qui engendre le plus de différences dans le résultat final :

- « **Non foliée** » signifie que la couche de cire n'a pas cristallisé sous contrainte.
- « **Foliée** » signifie que la couche de cire a cristallisé sous contrainte et qu'elle a alors acquis une foliation interne (voir section 2.2).
- « **Multicouche** » signifie que la couche de cire est formée d'une dizaine de sous-couches de 4 ± 1 mm d'épaisseur. Les sous-couches sont formées successivement par cristallisation de 200 mL de cire. La foliation est donc très régulière et l'anisotropie mécanique très forte.

L'article publié au *Journal of the Virtual Explorer* présente seulement l'expérience 32 (1 cire multicouche + 2 couches de paraffine).

L'article soumis au *Journal of Structural Geology* reprend l'expérience 32 et présente deux autres expériences multicouches : l'expérience 43, ainsi qu'un résultat de l'expérience 42.

Dans la suite, le terme couche « massive » sera utilisé par opposition à « multicouche ».

Les modèles contenant des enclaves compétentes seront traitées dans la troisième partie.

On comprend que ce sont les expériences les plus réussies qui sont décrites dans les articles. Par « réussite », j'entends que l'origine des phénomènes observés est clairement identifiable et sans ambiguïté. De plus, les paramètres comme le taux de fusion, la structure et le comportement mécanique sont mieux maîtrisés, ainsi que le dimensionnement. Le suivi de la déformation et de l'extraction du liquide sont aussi mieux contrôlés grâce à la confection de films et à la mesure quasiment continue de la quantité de liquide extraite (exp. 32, 42 et 43 dans l'article soumis à *JSG*).

Cependant, les autres expériences apportent aussi leur résultats puisqu'elles confirment les propriétés du modèle conceptuel final quand un phénomène devient systématique. Les articles apportent une vision synthétique des résultats mais sont limités quant à l'étendue des comparaisons possibles entre expériences. Pour apporter plus de précision et de nuances, j'ai choisi de présenter les interprétations de ces autres expériences en les classant par rapport aux thèmes abordés dans les articles :

- **la ségrégation dans les veines**
- **les réseaux de veines**
- **la formation des zones de cisaillement**
- **l'extraction du liquide**

L'influence sur ces phénomènes des paramètres tels que taux de fusion, pendage, et structure sera analysée dans chaque cas.

5.2 Comportement de base de la cire foliée

Les deux premières expériences ont permis de tester la cire partiellement fondue comme matériau analogique (Fig. 2-11). Ces expériences ne sont pas dimensionnée correctement car elles consistent au raccourcissement d'une seule couche fine de cire sans la couche de sable qui assure une pression verticale suffisante.

Dans les deux cas, le taux de raccourcissement est 22%. Il n'y a pas de plis mais un léger épaissement hétérogène dû à l'ouverture de fentes parallèles à la couche. Ces fentes sont remplies de liquide de fusion qui apparaît en gris foncé sur les images. La forme sigmoïdale de certaines fentes suggère que des rotations internes se produisent autour des fentes.

Ces expériences initiales ont permis de comprendre *qu'une ségrégation du liquide, de la matrice aux fentes en ouverture, se produisaient pendant la déformation*. Les mécanismes de cette ségrégation seront décrits dans une section spéciale. Ces expériences montrent aussi la nécessité de faire des expériences à plusieurs couches pour permettre le développement libre d'un pli dans la couche de cire centrale. Les couches de paraffines encaissantes joueront ce rôle dans les expériences suivantes.

5.3 Expériences avec couche de cire foliée ou non foliée

Le modèle présente une couche de cire surmontée d'une couche de paraffine (expériences à 2 couches), ou alors une couche de cire centrale entourée de deux couches de paraffines (expériences à trois couches). La paraffine est moins visqueuse que la cire (contraste entre 2 et 15 suivant la température). Cette matrice peu résistante joue le rôle de milieu de déformation qui transmet les contraintes à la cire.

Plusieurs paramètres ont été combinés : fusion ou non, épaisseur de la couche de cire, structure foliée ou non. Tous ces paramètres jouent sur le comportement

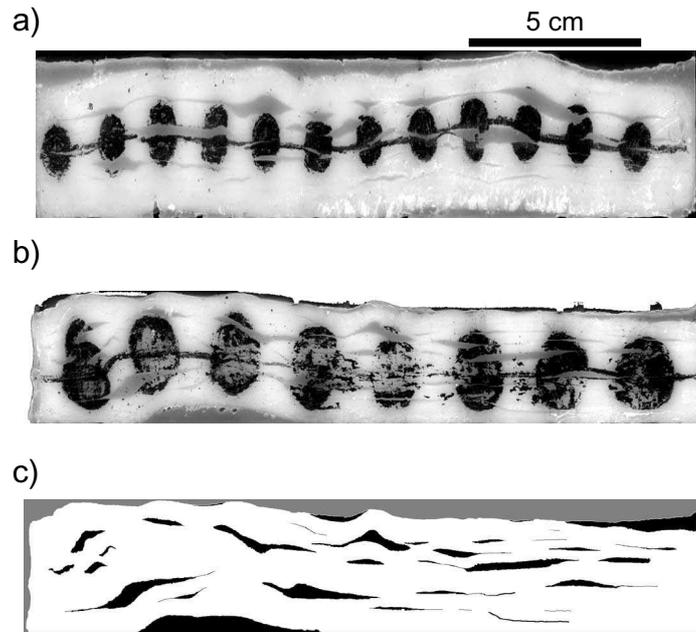


Figure 2-11 : Comportement de base de la cire foliée. Les ellipses noires étaient des ronds avant la déformation. Il n'y avait pas de couche de sable au-dessus de la cire. **a)** Expérience 1. **b)** Expérience 2. **c)** Cartographie des veines remplies de liquide lors de l'expérience 2. Ces tests montrent que le raccourcissement ouvre des veines de tension dans la foliation. Ces veines sont ensuite déformées par la progression de la déformation.

mécanique du modèle et notamment sur la formation ou non d'une bande de cisaillement. C'est pourquoi les expériences sont classées ci-après en fonction du degré de localisation de la déformation.

5.3.1 Expériences sans fusion

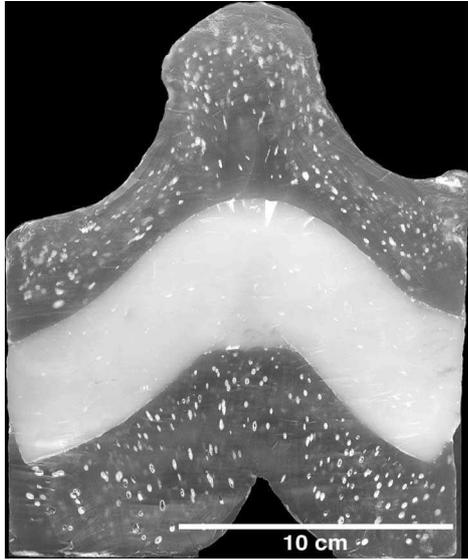
Dans ces deux expériences (11 et 12), la couche de cire a une température comprise entre 46 et 48°C, c'est-à-dire quelques degrés au-dessus de la température du solidus. Le taux de fusion est inférieur à 4-5% et macroscopiquement, la présence de liquide est invisible. C'est pourquoi ces expériences ont été classées dans la rubrique « sans fusion² ». De plus, leur comportement lors de la déformation est suffisamment distinct pour qu'on puisse considérer que le liquide de fusion ne joue aucun rôle.

Le pli que l'on obtient après 35 à 42% de raccourcissement est typique d'un pli en flambage (« *buckling* »), avec une légère localisation dans la charnière (Tab. 2-2). Aucune fente interne à la cire n'est apparue. Seules quelques fractures en tension radiales, à l'extrados, se sont ouvertes en fin d'expérience.

A la fin de l'expérience, la couche de paraffine supérieure a pris une forme saillante à cause de l'écoulement du sable de chaque côté de l'anticlinal (Tab. 2-2). Il semble que le poids du sable n'est plus alors réparti de façon homogène et qu'il amplifie la pointe de paraffine centrale. Ce phénomène se retrouve dans d'autres expériences.

²De plus, à l'époque à laquelle ces expériences ont été effectuées, la mesure du taux de fusion n'avait pas encore été faite.

Tableau 2-2 : Expériences sans fusion. Voir le texte pour plus de détails.

EXP.	TYPE	TEMP.	PARAF.	CIRE	SABLE	RACC.	RESULTAT
11	3 couches sans fusion	D - 54°C	68/70 3 cm	4 cm	3 cm	42%	 <p>Pli sans fentes</p>
12	3 couches sans fusion	D - 55°C	68/70 3 cm	4 cm	3 cm	35%	 <p>Pli sans fentes</p>

5.3.2 Expériences avec fusion

Treize expériences sont présentées dans cette section. Elles mettent en œuvre des couches de cire « massives » qui ont subi ou non, avant la déformation, le traitement qui crée une foliation interne dans la cire (voir section 2.2). Deux familles de résultats se distinguent en fonction du degré de localisation :

1. Dans six expériences, la couche de cire a été plus ou moins épaissie de façon homogène, soit avec beaucoup de *fentes dispersées* dans la couche, soit avec très peu de fentes.

2. Dans sept expériences, la déformation s'est localisée dans une *zone de cisaillement* à jeu inverse, plus ou moins large, située dans un des flancs du pli.

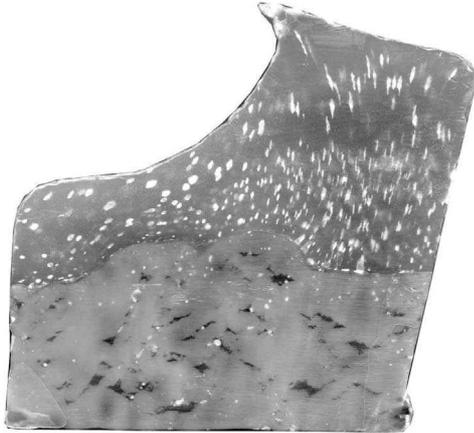
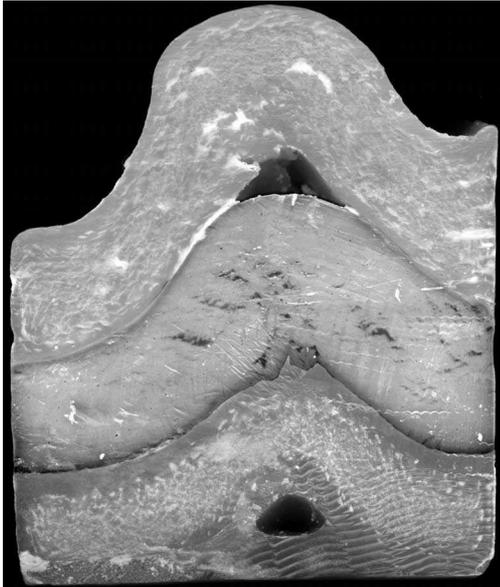
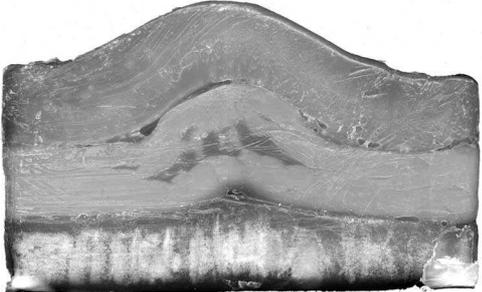
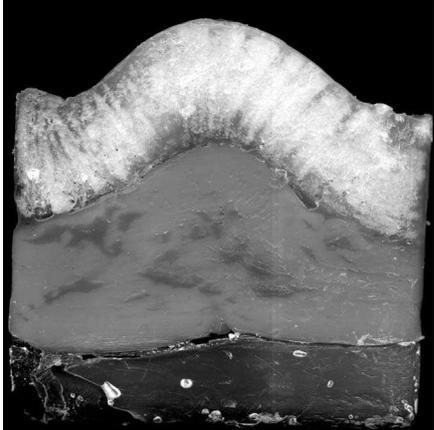
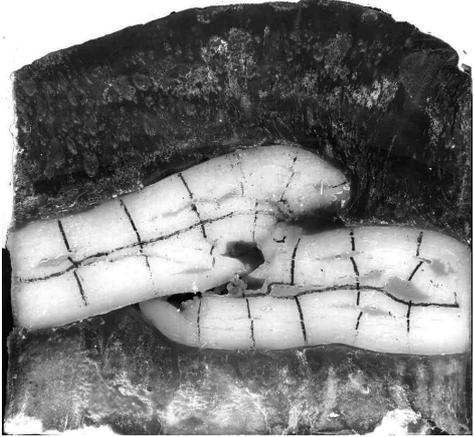
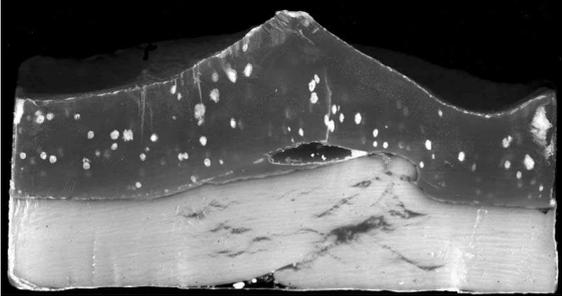
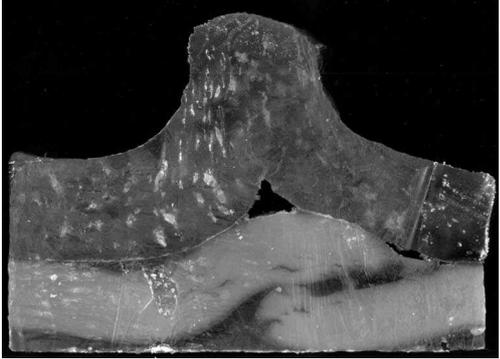
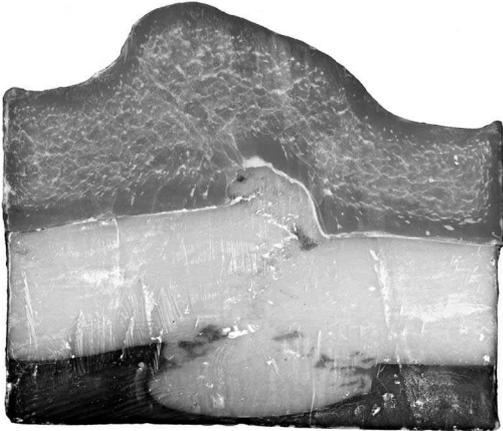
EXP.	TYPE	TEMP.	PARAF.	CIRE	SABLE	RACC.	RESULTAT
9	2 couches	D - 60°C	50/52 4 cm	4 cm	5 cm	50%	 <p>Épaississement - Fentes dispersées</p>
15	3 couches	D - 66°C	68/70 4 cm	4 cm	4 cm	35%	 <p>Pli - peu de fentes - pas de zone de cisaillement</p>
18	3 couches	A - 61°C	68/70 4 cm	3,4 cm	4 cm	40%	 <p>Épaississement - Fentes dispersées</p>

Tableau 2-3 (et page précédente): Expériences avec fusion de la couche de cire montrant un plissement ou un épaissement sans localisation franche de la déformation. Généralement, de larges fentes remplies de liquide se sont ouvertes. La cire n'est pas toujours foliée (exp. 26) et le taux de fusion varie d'une expérience à l'autre.

EXP.	TYPE	TEMP.	PARAF.	CIRE	SABLE	RACC.	RESULTAT
19	1 couche	A - 61°C	-	3,5 cm	4 cm	42%	 <p>Larges fentes</p>
26	3 couches	A - 60°C	68/70 2,4 cm	2,4 cm	4 cm	36%	 <p>Une fente centrale - pas de SZ</p>
28	3 couches	A - 60°C	68/70 4 cm	3,8 cm	4 cm	40%	 <p>Epaissement - Fentes dispersées</p>

Dans un cas, deux zones de cisaillement conjuguées sont apparues (exp. 14). La zone de cisaillement a évolué dans certains cas en chevauchement franc d'une partie de la couche sur l'autre.

Un point commun de toutes ces expériences est que des veines remplies de liquide de fusion se sont ouvertes parallèlement à la couche. La forme, la taille et la position de ces veines varient beaucoup et nécessitent une attention particulière car elles sont à l'origine des bandes de cisaillement (voir sections 6 et 7). Les mécanismes de formation de celles-ci seront ensuite discutés en fonction des particularités des expériences (voir section 8).

EXP.	TYPE	TEMP.	PARAF.	CIRE	SABLE	RACC.	RESULTAT
6	3 couches	D - 70°C	68/70 3 cm	3 cm	non	46%	 <p>Chevauchement</p>
8	2 couches	D - 60°C	50/52 4 cm	3 cm	2 cm	25%	 <p>Pli coffré - Zone de cisaillement</p>
10	3 couches	D - 60°C	50/52 4 et 1 cm	2,5 cm	4 cm	35%	 <p>Chevauchement</p>
14	3 couches	D - 66°C	50/52 4 cm	4 cm	4 cm	35%	 <p>2 zones de cisaillement conjuguées</p>

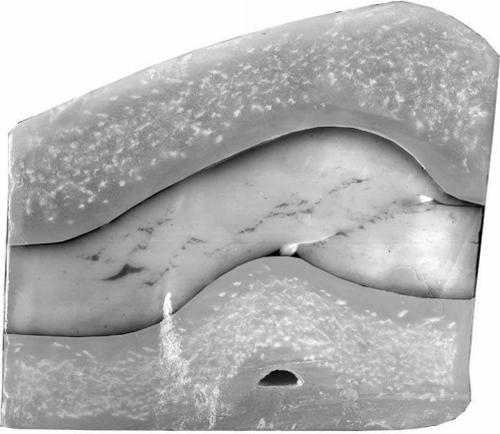
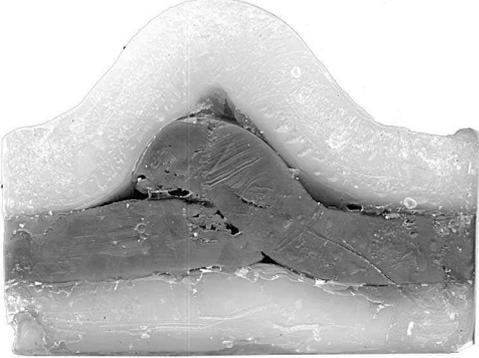
EXP.	TYPE	TEMP.	PARAF.	CIRE	SABLE	RACC.	RESULTAT
16	3 couches	A - 62°C	68/70 4 et 2 cm	3,2 cm	4 cm	40%	 <p>Fentes dispersées - zone de cisaillement large</p>
17	3 couches	A - 61°C	68/70 4 cm	3 cm	4 cm	36%	 <p>Fentes et une zone de cisaillement</p>
27	3 couches	A - 60°C	68/70 2,4 cm	2,2 cm	4 cm	37%	 <p>Fentes et chevauchement</p>

Tableau 2-4 (et page précédente): Expériences avec fusion de la couche de cire foliée montrant une localisation de la déformation sous forme de bande de cisaillement inverse. Celle-ci permet généralement le chevauchement d'une partie de la couche sur l'autre.

5.1 Expériences multicouches

Cette section concerne les expériences 32, 42 et 43.

L'idée de fabriquer une couche litée constituée de fines lamines fabriquées une par une vient de la constatation que le traitement produisant la foliation est mal reproductible. De plus, cette foliation n'est ni régulière, ni continue, ce qui induit parfois des effets plus ou moins aléatoires et difficilement contrôlables.

Avec le multicouche, l'anisotropie mécanique est extrêmement forte. Cela s'observe très bien sur les expériences (Tab. 2-5), voir aussi les films des exp. 32, 42 et 43). L'interface entre deux sous-couches peut jouer facilement en cisaillement, ainsi qu'en ouverture. On observe ainsi que les sous-couches peuvent glisser les unes sur les autres et que les veines s'ouvrent généralement à l'interface entre deux sous-couches. Les veines ne s'ouvrent à l'intérieur d'une sous-couche que si la contrainte en tension locale est sub-parallèle à celle-ci, c'est-à-dire dans les extradors de plis ou quand la sous-couche est fortement pentée.

Ces expériences ont fait l'objet de deux articles : celui publié au *Journal of the Virtual Explorer*, et celui soumis à *JSG*. Les descriptions et interprétations sont donc à lire dans ces articles (voir à la fin de cette partie). Cependant, des figures et explications supplémentaires se trouvent dans les sections suivantes.

5.2 Expériences avec couches verticales

Pour tester l'influence du pendage sur la migration du liquide de fusion dans la cire, six expériences avec des couches verticales ont été effectuées.

Cire foliée

Une expérience qui comportait une seule couche de cire n'a rien donné (exp. 24). Par contre, quand la couche de cire était flanquée de deux couches de paraffine de même épaisseur environ, on a pu observer le *boudinage* de la couche de cire (Tab. 2-6). Des fentes disposées *en échelon* se sont ouvertes. Leur enveloppe forme des zones de cisaillement conjuguées qui accommodent le boudinage. Il y a peu de fentes en dehors de ces zones de cisaillement.

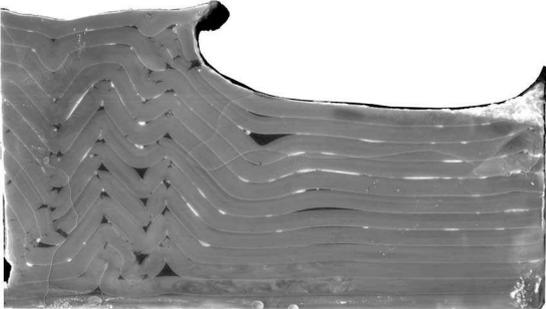
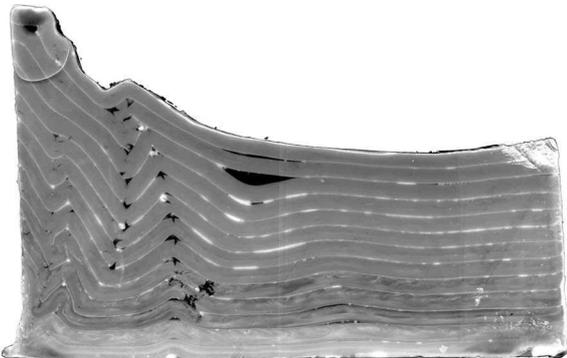
Cire multicouche

Deux expériences (exp. 36 et 39) avec cire multicouche composée de respectivement 14 et 18 lamines d'épaisseur 4 ± 1 mm ont été menées. Des films sont disponibles dans les deux cas (voir CD joint).

L'expérience 39 est la plus significative et montre (Fig. 2-12):

- L'apparition de fentes de tension horizontales dès le début du raccourcissement. Ces fentes sont remplies de liquide et sont disposées en échelon à l'intérieur de 2 zones de cisaillement conjuguées. L'angle entre ces deux zones est d'environ 60° , et sa bissectrice est la direction horizontale de raccourcissement.

Tableau 2-5 : Expériences avec cire multicouche. Ces trois expériences font l'objet d'un film (voir CD joint).

EXP.	TYPE	TEMP.	PARAF.	CIRE	SABLE	RACC.	RESULTAT
32	Multicouche	A - 60°C	68/70 2,5 cm	3,3 cm	4 cm	33%	 <p>Fentes et pli - Kink band</p>
42	Multicouche	A - 65°C	-	6,4 cm	8 cm	30%	 <p>Fentes et plis</p>
43	Multicouche	A - 65°C	-	6,5 cm	9 cm	30%	 <p>Fentes et plis</p>

- Après 10% de raccourcissement, peu de nouvelles fentes se créent. Les précédentes se déforment et prennent une forme sigmoïdale. En conséquence, leur volume augmente. La déformation se localise de plus en plus dans les zones de cisaillement, qui voient leur pendage augmenter.
- Après 25% de raccourcissement, deux plans accommodent majoritairement la déformation : une des deux bandes de cisaillement initiales et un plan de foliation vertical (Fig. 2-12). Ces deux plans délimitent un bloc de cire qui est expulsé vers le haut. Ce déplacement se fait d'autant mieux qu'il n'y a pas de couche de sable dans ce modèle.
- Pendant les derniers incréments de raccourcissement, de nombreuses fentes sont refermées et ont disparues. Le taux de raccourcissement final est 41%.

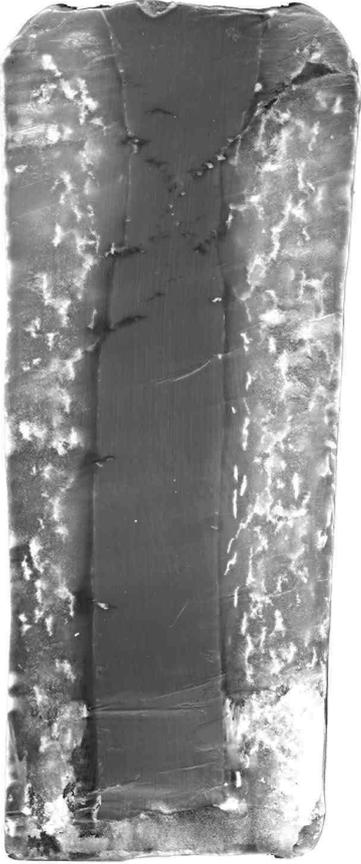
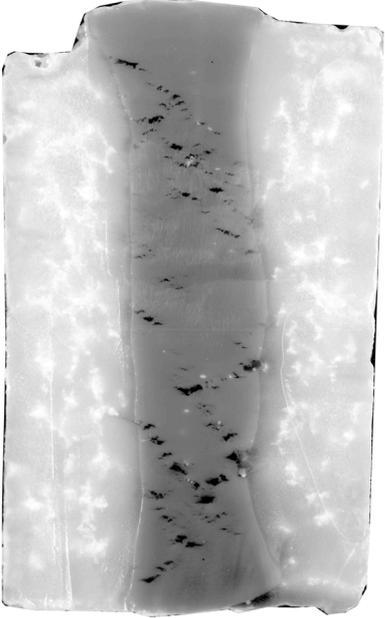
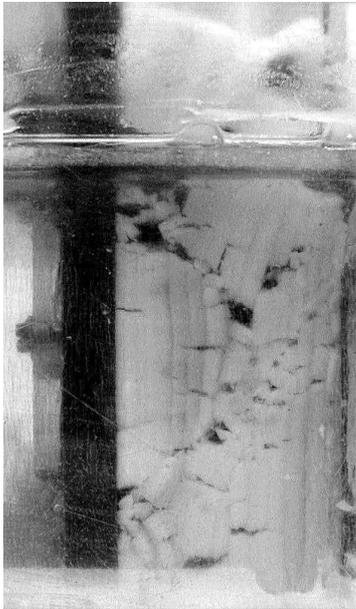
EXP.	TYPE	TEMP.	PARAF.	CIRE	SABLE	RACC.	RESULTAT
21	3 couches verticales	A - 60°C	68/70 3,2 cm	3,5 cm	-	28%	 <p>Boudins - Fentes</p>
22	3 couches verticales	A - 60°C	68/70 3,2 cm	3,5 cm	-	27%	 <p>Boudins - Fentes</p>

Tableau 2-6 (et page suivante): *Expériences avec cire verticale. La couche est soit foliée, soit multicouche. L'expérience 39 fait l'objet d'un film (voir CD joint).*

EXP.	TYPE	TEMP.	PARAF.	CIRE	SABLE	RACC.	RESULTAT
23	3 couches verticales	A - 56-66°C	68/70 3,2 cm	3,5 cm	-	27%	 <p>Peu de fentes</p>
36	Multicouche verticale	A - 62°C	-	5,9 cm	6 cm	40%	 <p>Fentes en échelon</p>
39	Multicouche verticale	A - 62°C	-	8 cm	-	40%	 <p>Fentes en échelon</p>

Cette expérience a montré une localisation très précoce. Dans ces zones de cisaillement, le mouvement du liquide de fusion est supposé important car (1) la perméabilité est supérieure, et (2) les fentes changent de volume constamment. Par ailleurs, des blocs de cire ont été protégés de la déformation, et on peut remarquer des fentes qui n'ont pratiquement pas bougé entre le début et la fin de l'expérience (Fig.2-12).

Pour finir, aucune veine ne s'est ouverte parallèlement au litage. Ces expériences n'ont donc pas reproduit le mécanisme d'ouverture de veines perpendiculaires à la contrainte principale maximale (Wickham, 1987; Lucas & St-Onge, 1995; Vernon & Paterson, 2001). L'explication se trouve peut-être dans la pression du liquide qui ne serait pas assez forte.

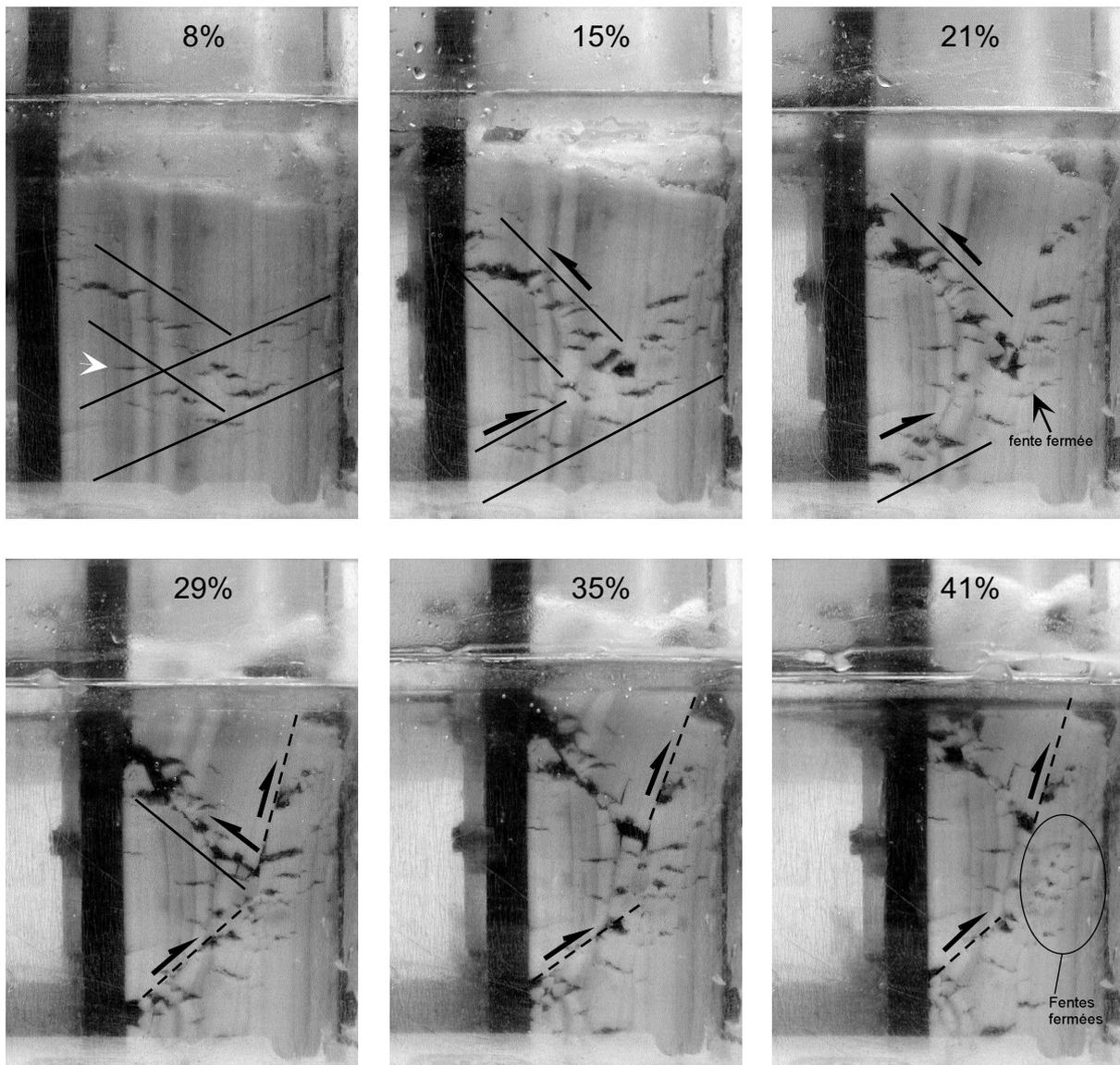


Figure 2-12 : Expérience 39 avec cire multicouche verticale. Elle fait l'objet d'un film (voir CD joint). La séquence montre une localisation de la déformation de plus en plus poussée. Des zones de cisaillement se forment dans lesquelles de nombreuses fentes s'ouvrent. La flèche blanche montre une veine qui restera ouverte pendant toute l'expérience, alors que dans les zones de cisaillement, les veines se referment généralement («fentes fermées»). Noter aussi que la zone de cisaillement pentée vers la droite s'arrête de fonctionner après 35% de raccourcissement. Il faut remarquer enfin que les veines ne s'ouvrent pas dans le litage du multicouche, mais perpendiculairement.

5.3 Expériences avec couches obliques

A défaut d'avoir pu développer une nouvelle machine pour le cisaillement simple d'une couche de cire, j'ai conduit deux expériences où la couche de cire est déformée au milieu de deux blocs de bois taillés en biseau (Fig. 2-13). Un poids de sable sur le bloc supérieur assure une pression verticale importante. Ce dispositif produit une sorte de « transpression ».

Le résultat est assez décevant car il est clair que la déformation consiste surtout en un étirement parallèlement à la couche. Celle-ci est littéralement tronçonnée par des veines perpendiculaires ou parfois légèrement obliques (Fig. 2-13). La quantité de cisaillement est donc faible. Le couplage entre le bloc de bois et la cire n'est probablement pas suffisant. Sur la surface de la couche, on peut voir l'ensemble des veines et le motif complexe qu'elles dessinent.

En poids, le pourcentage de liquide expulsé représente 12% de la couche initiale. Le nombre important de veines explique ce chiffre assez fort.

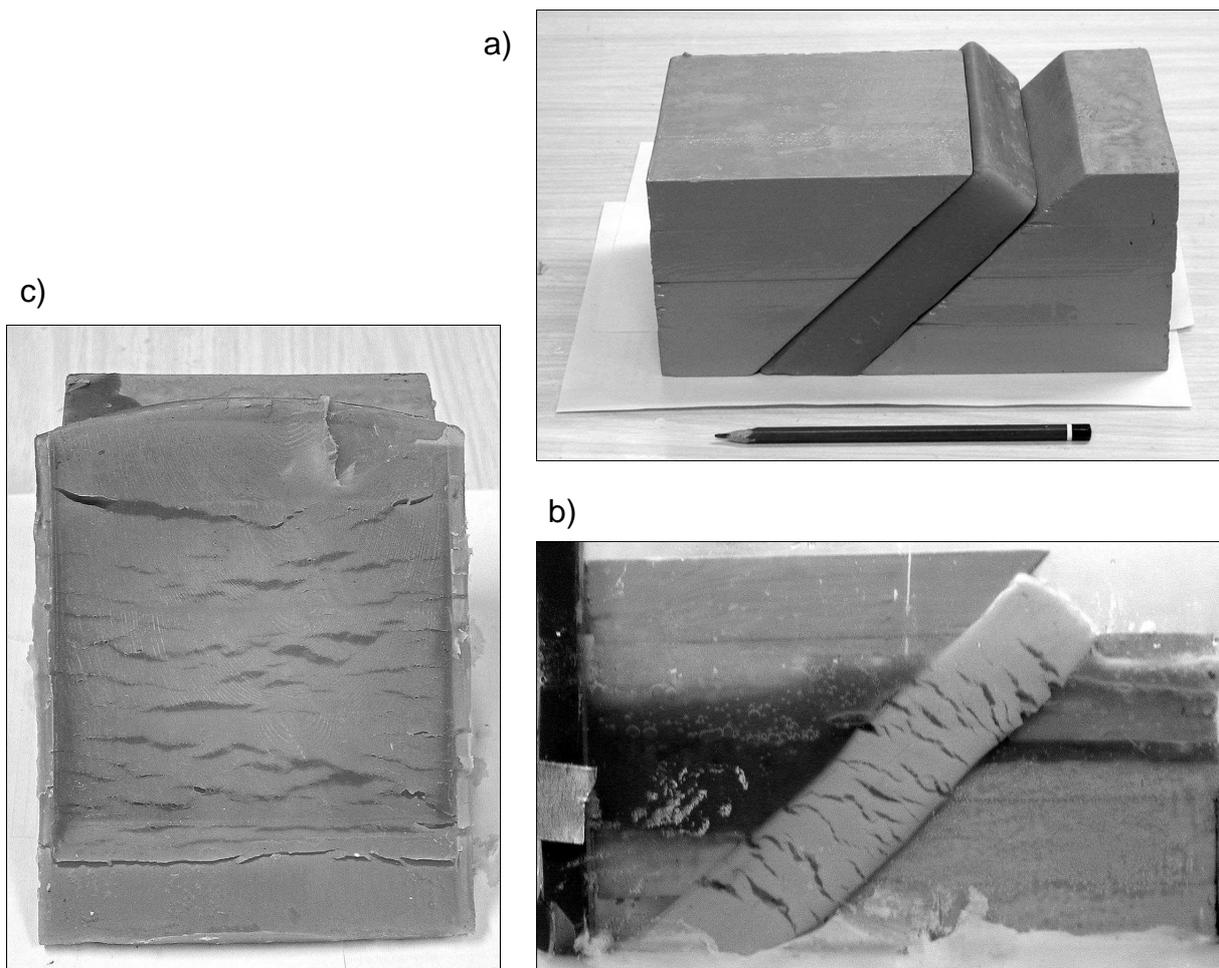


Figure 2-13 : Expérience 25 avec couche oblique par rapport à la direction horizontale de raccourcissement. **a)** Etat initial. La couche sera déformée par deux blocs de bois taillés à 45°. **b)** Etat final après environ 20% de raccourcissement. **c)** Surface supérieure de la couche après l'expérience. Le bloc de bois a poinçonné une partie de la couche.

6 Réseaux macroscopiques de veines

6.1 Introduction

Dans la cire partiellement fondue, le raccourcissement horizontal produit des fentes horizontales. C'est une *fracturation en tension*, avec la fracture parallèle à la direction locale de la contrainte principale maximale σ_1 .

Les ensembles de veines forment un réseau macroscopique de chemins de migration. Ce réseau est créé par la déformation et se surimpose au réseau microscopique constitué par la porosité de la cire. Étant donné la taille de ces veines et le fait qu'elles sont remplies de liquide pur, la vitesse de l'écoulement est probablement beaucoup plus rapide dans le réseau macroscopique. Ce réseau permet donc la migration et l'extraction du liquide. *L'extraction sera étudiée section 9.*

Les veines étant remplies de liquide de faible viscosité, elles sont le point de départ possible de fractures ou de bandes de cisaillement. *Leur rôle dans la localisation de la déformation sera étudiée dans la section 8.*

Le remplissage des veines a lieu par la ségrégation du liquide de la matrice dans la veine en dilatation. *La ségrégation sera étudiée en section 7.*

Cette présente section est consacrée à la géométrie de cette porosité macroscopique, en 2D et en 3D, ainsi qu'à son évolution temporelle. Cette géométrie dépend fortement de la structure de la cire (foliée ou non, multicouche) et de l'épaisseur initiale.

6.2 La forme et la taille des veines remplies de liquide

La forme et la taille des veines varient avec la quantité de déformation. Au départ de l'expérience, elles sont planes, dans la foliation. Leur rapport de forme (longueur sur épaisseur) est souvent le même d'une expérience à l'autre. Il varie entre 10 et 20 dans les expériences avec cire « massive », et peut atteindre facilement 50 dans les « multicouches ».

Ensuite, avec le plissement, elles raccourcissent et gagnent en épaisseur. La déformation hétérogène autour de ces veines leur donne généralement une forme sigmoïdale, ou alors plus quelconque (Fig. 2-14). Le raccourcissement fait soit enfler la veine qui contient alors de plus en plus de liquide, soit la fait disparaître.

6.3 La position des veines dans la couche de cire

6.3.1 Fentes dispersées

Dans ce cas, la couche de cire est épaissie fortement et de nombreuses veines dispersées dans toute la couche se sont ouvertes. La déformation n'est alors pas localisée (Tab. 2-3). Ce cas concerne les expériences 9, 15, 18, 19, 26 et 28. La figure 2-15 reproduit à l'échelle 1 le résultat de l'expérience 9.

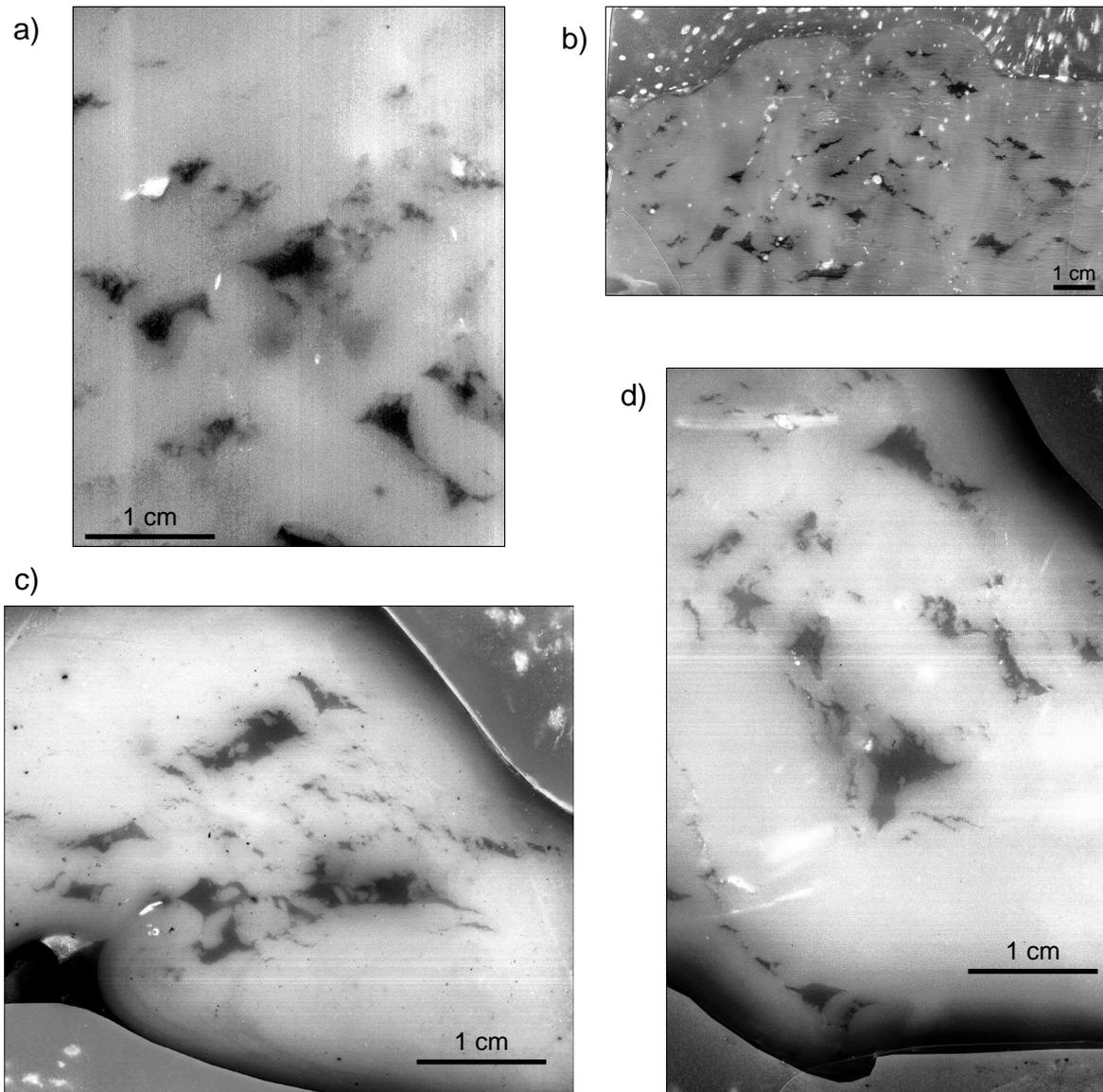


Figure 2-14 : Veines remplies de liquide dans des expériences avec couches de cire foliée. **a)** Expérience 18. **b)** Expérience 9. **c)** Expérience 17. **d)** Expérience 16. L'échelle diffère d'une image à l'autre. Les images sont traitées numériquement en jouant sur la balance des niveaux de gris pour faire ressortir les zones appauvries en liquide (en clair) et les zones enrichies en liquide ou inchangées (plus ou moins sombre). L'ancien liquide est noir. Voir section 7 pour plus de détails sur le traitement des images.

6.3.2 Concentration de fentes

Quand la couche de cire commence à se plisser, les fentes s'ouvrent principalement dans les flancs des plis. Ceux-ci ont alors une géométrie de *kink band* (Tab. 2-4, Figs. 2-14c,). Les fentes sont parallèles entre elles. La déformation peut se localiser dans ces *kink bands*, qui évoluent ensuite en zones de cisaillement oblique et en chevauchement (voir section 8). Ce cas concerne les expériences 6, 8, 10, 14, 16, 17 et 27.

Dans le cas particulier des « multicouches » horizontaux (exp. 42 et 43), les veines ne se localisent pas dans les flancs, mais dans les plans axiaux des plis. Elles ont alors une géométrie de « *saddle reefs* ». Une localisation de la déformation a

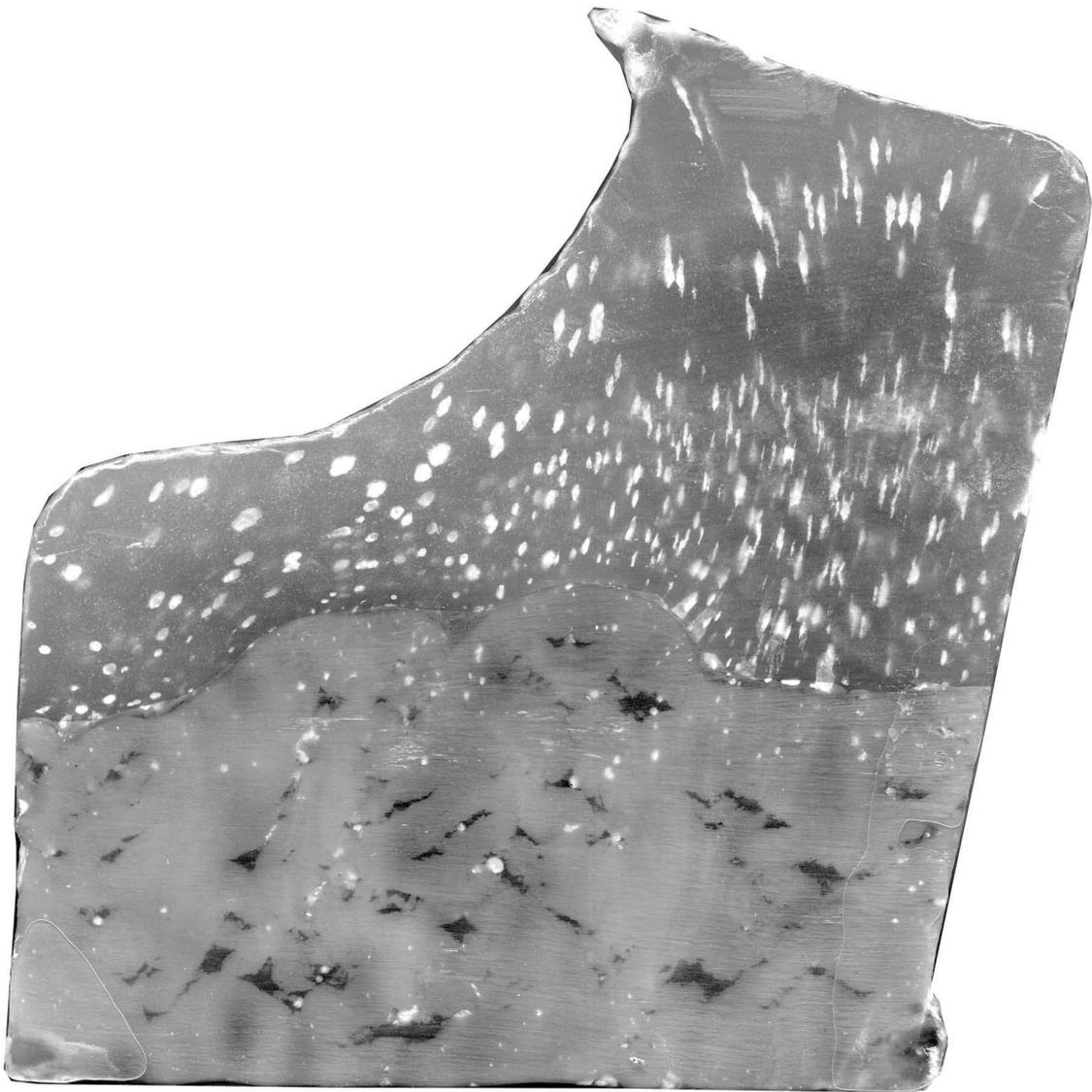


Figure 2-15 : Expérience 9 grandeur nature. C'est un bon exemple d'épaississement homogène de la couche avec de nombreuses fentes dispersées. La cire était foliée au départ. Noter les nuances de gris qui indiquent que le liquide a été ségrégué. Les taches blanches dans la couche de paraffine supérieure sont des bulles d'air déformées. Ce sont de bons marqueurs de la déformation. La forme étrange de cette couche vient du fait qu'une partie du sable s'est accumulée sur la partie gauche du modèle, facilitant l'épaississement de la partie droite.

lieu, mais cette fois-ci dans les plans axiaux. L'article soumis à *JSG* et la section 9 apportent plus de précisions.

6.4 Le réseau en 3D

Une observation générale est que la taille des veines est plus faible au *centre* du modèle qu'en ses *bords* (par exemple Figs. et). C'est ce qu'on appelle communément un « *effet de bord* ». C'est pourquoi l'interprétation des résultats ne devrait porter que sur des coupes dans les modèles. Cependant, la coupe n'est possible qu'après la fin de l'expérience. Il faut donc garder à l'esprit en regardant les

images du bord d'un modèle que les veines devraient être en réalité moins nombreuses et moins grosses.

Cette observation peut cependant être exploitée en remarquant que, dans la nature, les structures sont rarement cylindriques : l'amplitude et l'ouverture d'un pli varient dans la direction de son axe. L'effet de bord peut donc être interprété comme mimant l'effet de la déformation hétérogène, ce qui est la règle dans les terrains migmatisés (McLellan, 1984; Brown, 1994; Brown & Solar, 1998a; Weinberg, 1999).

La « non cylindricité » implique que les veines ne joignent pas toujours les deux bords du modèle. En 3D, les veines planes sont lenticulaires (Fig.). Les veines de forme quelconque (plus ou moins ronde en plan), sont des cylindres allongés horizontalement dont la surface de section varie d'un bord à l'autre du modèle (Fig.).

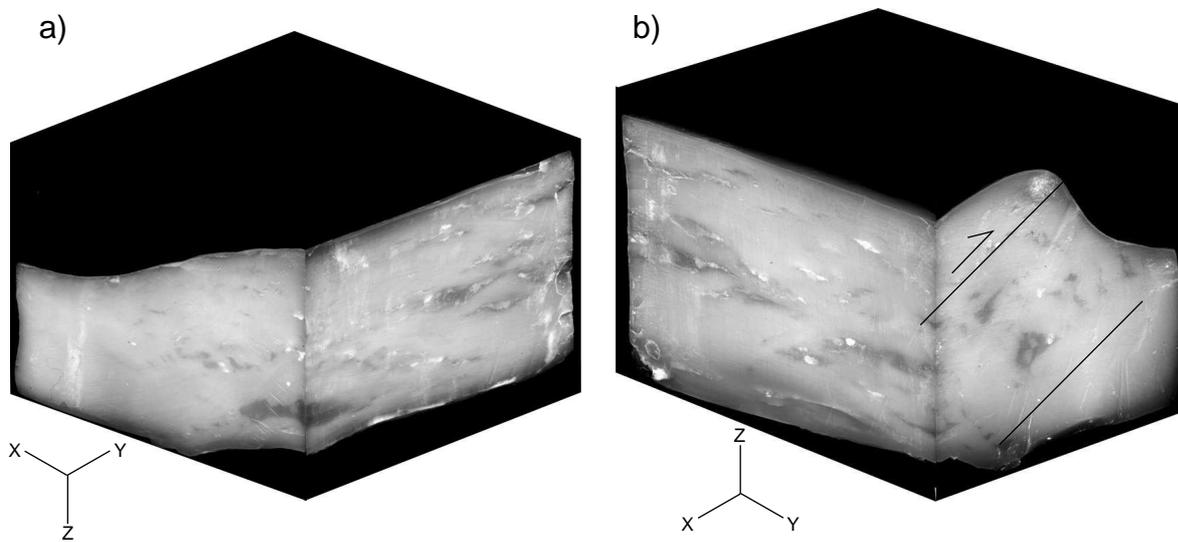


Figure 2-16 : Blocs 3D de l'expérience 16 obtenus grâce à une coupe perpendiculaire à la coupe habituellement montrée. Les deux plans YZ se correspondent pratiquement. La zone de cisaillement inverse est indiquée sur la bloc de droite (voir Tab. 2-4).

6.5 La connectivité du réseau et la perméabilité

Le réseau de veine est très anisotrope puisque les veines restent parallèles à la foliation. La perméabilité a donc une valeur très forte dans la direction horizontale perpendiculaire à la direction de raccourcissement. Dans l'autre direction horizontale (parallèle à la direction de raccourcissement), la perméabilité est relativement plus faible.

Verticalement, elle est minimale quand il n'y a pas de bande de cisaillement qui connecte le bas et le haut de la couche, et la connectivité du réseau n'est alors pas assurée. Par contre, s'il y a une veine oblique dans la zone de cisaillement, la connectivité est réelle, mais seulement *autour* de ce drain.

La connectivité est donc seulement partielle dans le volume de cire. Cependant, en considérant l'ensemble de l'appareil expérimental, le réseau de veines est con-

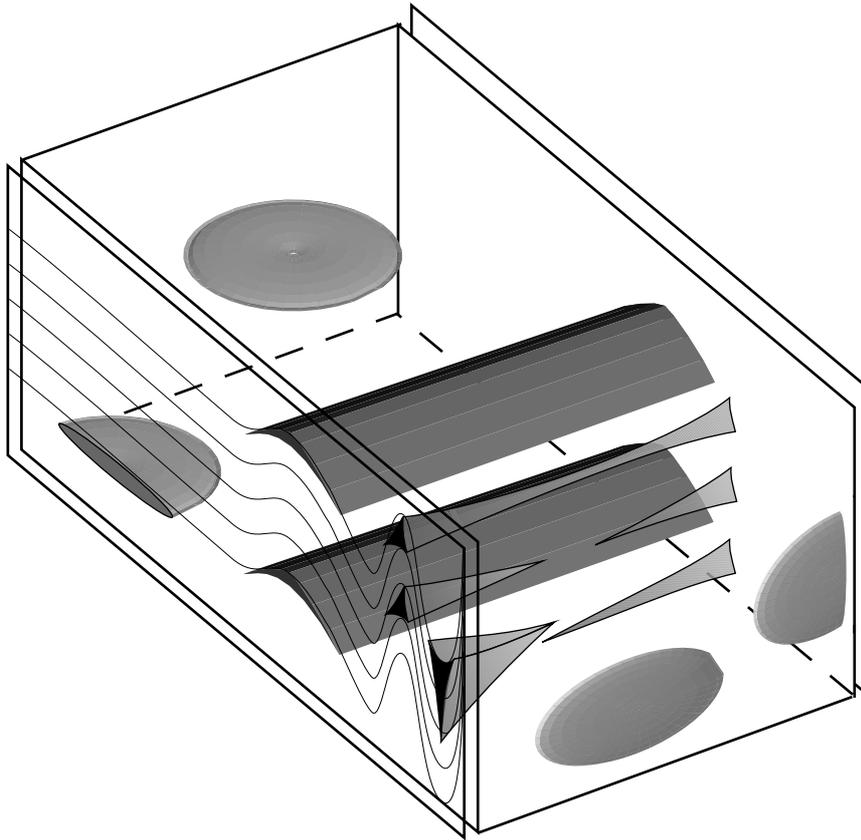


Figure 2-17 : Bloc diagramme schématisant le réseau macroscopique de veines dans la couche de cire. L'exemple pris est celui des multicouches où le plissement s'accroît d'un côté à l'autre. Les veines passent donc d'une forme lenticulaire horizontale (veines concordantes) à une forme plane verticale (surface axiale des plis). Les formes intermédiaires sont les saddle reefs plus ou moins allongées. Cet ensemble de veines produit une perméabilité anisotrope. Dans le système expérimental, les deux parois de la boîte connectent toutes ces veines avec l'extérieur.

necté avec l'extérieur par l'intermédiaire des deux parois verticales de la boîte de Plexiglas (Fig. 2-17). Le système est donc *ouvert*.

Par conséquent, toutes les expériences ont donné lieu à la fuite d'une certaine quantité de liquide de fusion dans le tank rempli d'eau. La boîte contenant le modèle n'est pas étanche au niveau de la paroi mobile et le liquide peut s'échapper par là après avoir longer la paroi verticale (voir les films sur CD joint). L'explication de ce petit espace vertical qui existe entre le modèle et les parois de la boîte est la suivante :

☆ Un léger jeu (~ 3 mm) est indispensable pour permettre la mise en place dans la boîte des couches de cire et paraffine. Ce jeu est ensuite pratiquement comblé quand les couches se dilatent avec la chaleur. Le pourcentage de dilatation est environ 8% pour la cire, et 3% pour la paraffine. Cependant, il reste un vide dont l'épaisseur est difficile à mesurer mais que j'estime être entre 0.5 et 1 mm.

Pour interpréter les résultats des expériences et les comparer avec la nature, deux options sont possibles :

- Les conditions limites du modèle doivent être identiques à celles de l'objet naturel. Dans ce cas, des équivalents naturels aux parois verticales de la boîte

doivent exister. Ce sont des zones de cisaillement (voir discussion de la section « extraction »).

- Le modèle doit être imaginé *infini* horizontalement. C'est normalement un pré-supposé puisque la déformation est plane par construction. Dans ce cas, le réseau n'est pas globalement interconnecté, mais seulement partiellement autour des veines discordantes.

Un certain nombre de précautions doivent donc être prises pour appliquer les modèles à la nature. Les discussions à ce sujet se trouvent dans les articles et dans la section « extraction ».

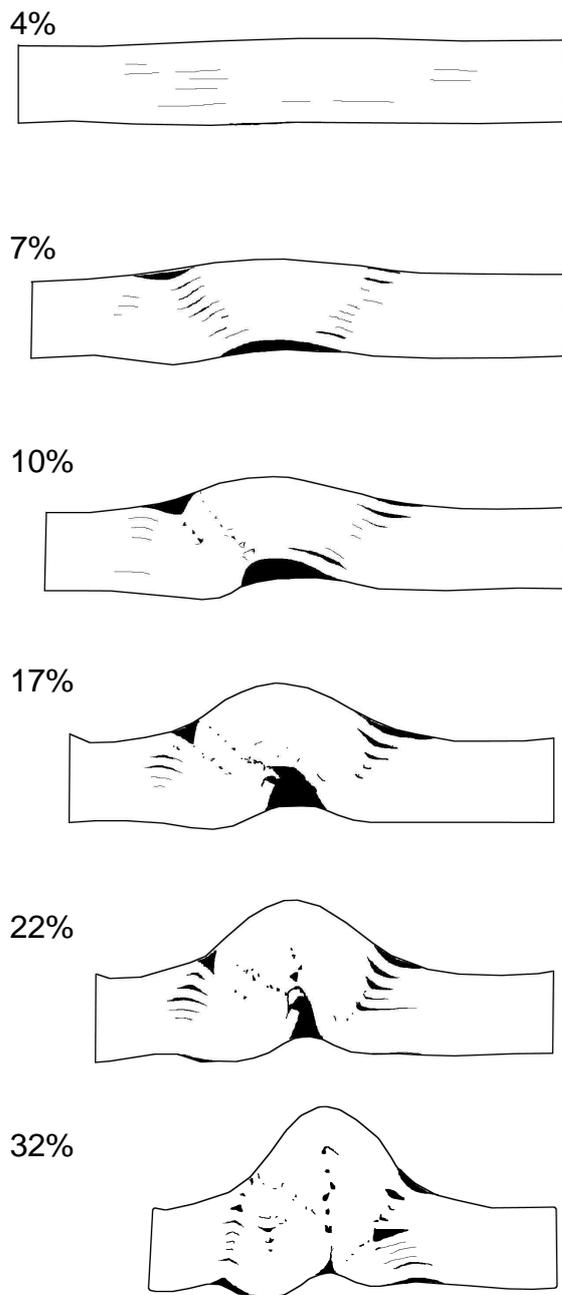


Figure 2-18 : Expérience 32. Les veines ont été dessinées manuellement. Voir texte pour les détails.

6.6 Evolution dans le temps

La déformation progressive donne accès à l'évolution temporelle du réseau de veines.

Pour l'expérience 32 « multicouche », la cartographie des veines a été effectuée à chaque incrément de la déformation (toutes les heures).

On peut observer successivement (Fig. 2-18):

1. la naissance des veines horizontales,
2. la formation des kink bands,
3. la formation des saddle reefs,
4. la fermeture du pli et des saddle reefs,
5. l'étirement vertical final du pli et des veines.

Un certain nombre de veines s'ouvrent puis se ferment tout au long du raccourcissement.

La géométrie du réseau de veines se transforme donc radicalement entre le début et la fin de l'expérience. On passe d'une forme globalement plane et horizontale, à une forme plane et verticale, en passant par un stade intermédiaire cylindrique horizontal. Cette évolution est bien visible aussi dans les expériences 42 et 43 (multicouche, Tab. 2-5, Fig. 2-17). Les différentes formes de veines sont visibles en même temps sur le modèle déformé, puisque le train de plis se propage de la gauche vers la droite et qu'on peut observer tous les stades de la déformation.

Le dernier stade montre l'importance des *plans axiaux des plis* dans le processus de migration

et d'extraction du liquide de fusion. Le rôle des interactions réciproques entre migration, localisation et résistance est discuté dans l'article soumis à *JSG*, ainsi que dans la section « extraction ».

7 La ségrégation du liquide de fusion dans les veines

7.1 Introduction

Les veines sont remplies de liquide de fusion. Elles représentent donc des leucosomes dans l'objet naturel simulé. Pour comprendre comment se remplissent ces veines, le mouvement du liquide dans la cire a été suivi *a posteriori* en déterminant après l'expérience les zones qui ont été enrichies en liquide et celles qui ont été appauvries. Pour cela une analyse fine des images des modèles a été nécessaire.

7.2 Traitement et analyse des images

La concentration ou l'appauvrissement en liquide est visible à la couleur de la cire. En effet, le liquide est plus sombre que le solide, même après recristallisation. L'effet est accentué avec l'utilisation d'un colorant organique rouge. Il est à noter qu'à partir de l'expérience 19, les couches de cire sont toujours colorées en rouge tandis que les couches de paraffines restent blanches. Pour les expériences précédentes, sauf la 9, c'est l'inverse et la cire a alors une couleur jaune pâle. *Les gradients de concentration en liquide se traduisent donc en gradients d'intensité de couleur.* Sur une image numérique en niveaux de gris, c'est la valeur des pixels sur l'échelle de 0 (blanc) à 255 (noir) qui change. Pour que les différences de concentration soient plus évidentes, les images sont traitées avec les logiciels Photoshop et ENVI, un logiciel professionnel d'analyse d'image. Le traitement consiste essentiellement à étirer l'histogramme des niveaux de gris pour augmenter l'ampleur des gradients (Figs. 2-19 et 20b).

D'autres traitements sont possibles :

- Sur une image RVB (scan ou photo numérique) du modèle, les fentes remplies de liquide apparaissent mieux sur le canal vert, tandis que le canal rouge fait mieux ressortir les gradients de coloration.
- La classification des images est aussi possible et plus subtile. Elle permet d'associer une couleur quelconque à une plage de niveaux de gris. L'intérêt est surtout visible en couleur (Fig. 2-20a).

La carte des veines est aussi un outil intéressant pour avoir une idée de la position des veines dans la couche et pour obtenir une valeur de la porosité macroscopique (par ex. Fig. 2-18 et l'article soumis à *JSG*). Les techniques automatiques sont inefficaces à ce sujet et le dessin doit être fait manuellement.

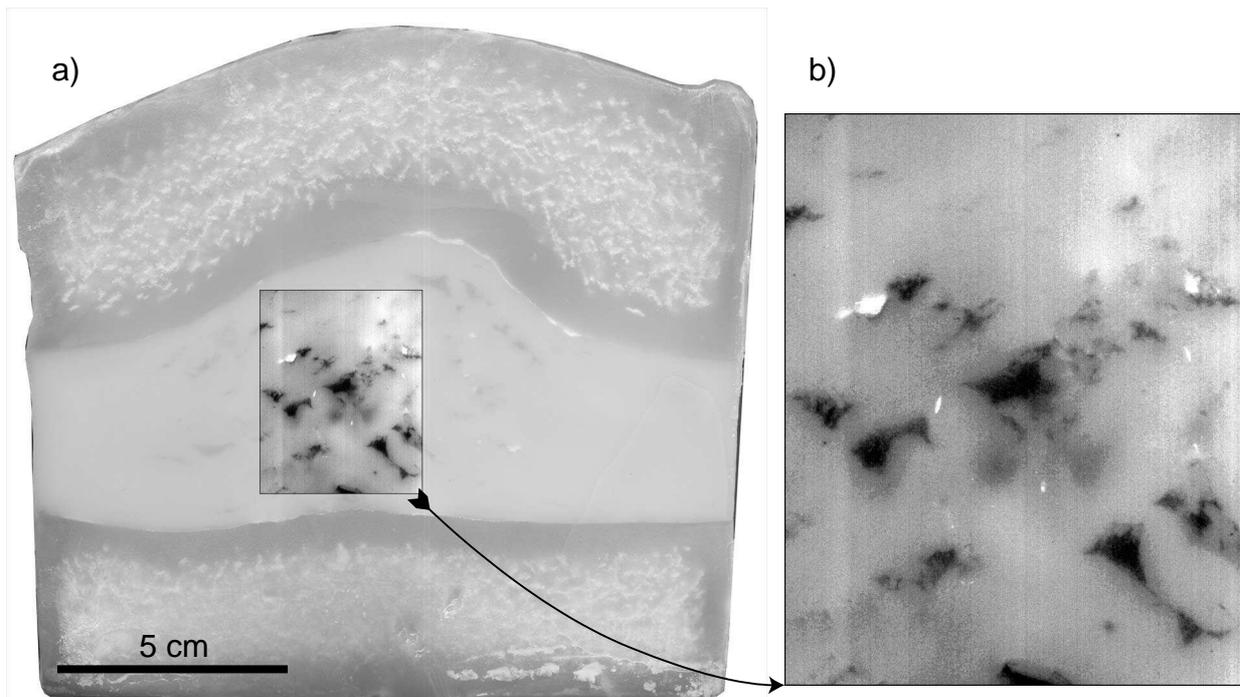


Figure 2-19 : Amélioration du contraste par le déséquilibre des niveaux de gris (exemple de l'exp. 18). Cela revient à étirer fortement l'histogramme des niveaux de gris. Noter que toutes les images des modèles (à part les photos pendant les expériences) sont des scans de leur surface.

7.3 Mécanismes de ségrégation

A l'échelle *macroscopique*, la ségrégation du liquide a donc les conséquences suivantes :

- Les zones appauvries en liquide perdent leur couleur.
- Les zones enrichies en liquide deviennent plus foncées.

A l'échelle *microscopique*, les images de la cire partiellement fondue montrent que le liquide de fusion forme un réseau interconnecté (Fig. 2-4 et article soumis à *JSG*). La porosité microscopique de la cire, constituée par ce réseau, a pour valeur le taux de fusion. Un écoulement « poreux » du type Darcy est donc supposé possible dans la cire. Autrement dit, le « *Liquid Percolation Threshold* » (LPT, Vigneresse et al., 1996) est atteint dans la cire. La vitesse de l'écoulement du type Darcy est fonction entre autres des gradients de pression.

Pour démontrer que le mouvement du liquide dans la cire est dû aux gradients de pression nés de la déformation hétérogène, il faut montrer que la position de ces zones n'est pas aléatoire ou alors un effet de la gravité. Le champ de pression dans un système en déformation dépend de nombreux paramètres, notamment de la rhéologie des matériaux (élastique, plastique, visqueux) et de la quantité de déformation. Le champ de pression est en fait *géométriquement* très proche du champ de déformation (Twiss & Moores, 1992; Ord & Henley, 1997; Zhang et al., 2000). La modélisation analogique ne nous donne pas accès au champ de pression mais aux champs de déformation et de déplacements.

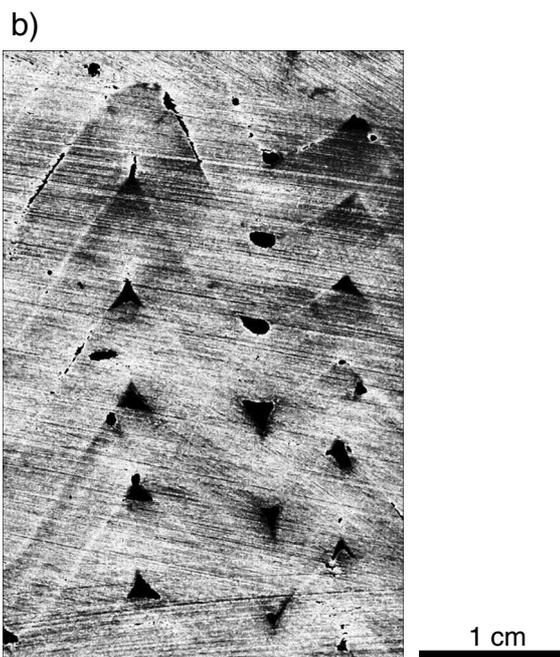
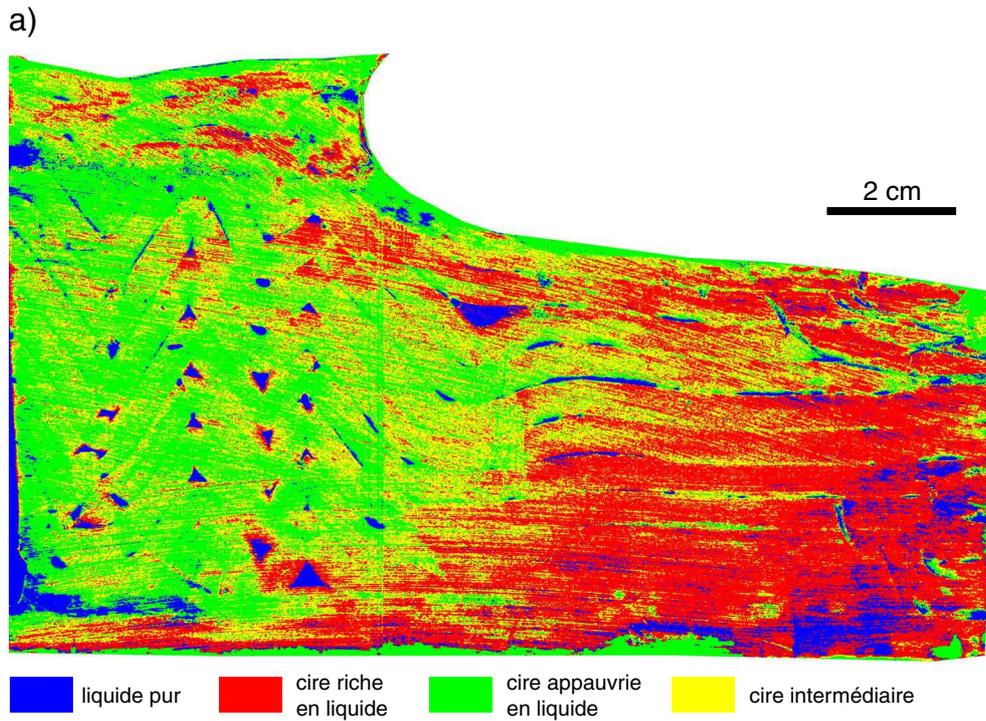


Figure 2-20 : Effets de la ségrégation du liquide sur la couleur de la cire. **a)** Classification de la coupe de l'expérience 42 en quatre classes en fonction du niveau de gris des pixels, et donc de la quantité de liquide présente dans la cire. **b)** Vue rapprochée de la partie plissée. Le traitement de l'image consiste ici en un simple étirement de l'histogramme. Les plans axiaux présentent un appauvrissement en liquide (couleur claire), ainsi qu'une perte de volume (charnières pincées).

Ainsi, une des preuves de l'écoulement du liquide et de son extraction de certaines zones serait la correspondance entre les gradients de coloration de la cire et les gradients de quantité de déformation.

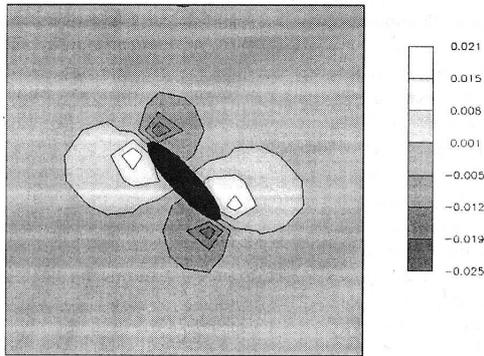


Fig.2. Incremental porosity after deformation in a shortened matrix. Total strain 0.025, permeability $k = 4 \cdot 10^{-14} \text{m}^2$, $\alpha=0.3$, Skempton's coefficient $B=0.85$.
a) around horizontal vein

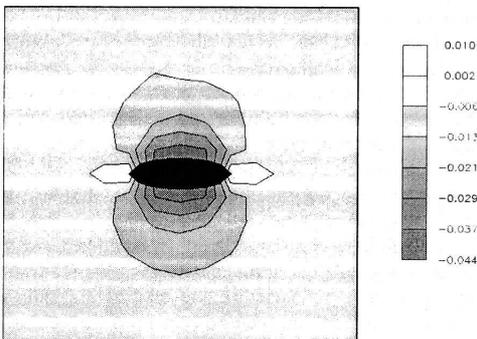


Fig.2. b) around tilted vein

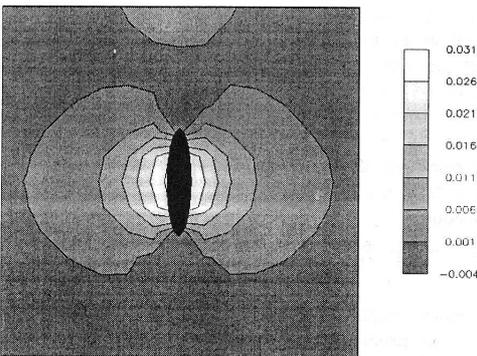


Fig.2. c) around vertical vein

Figure 2-21 : *Compaction autour d'une veine (Simakin & Talbot, 2001b). Les niveaux de gris indique les variations de porosité, augmentation en clair et diminution en sombre. Un raccourcissement horizontal est imposé dans chaque cas, si bien que les trois types de veines ne répondent pas de la même façon. Par exemple, la veine horizontale (cas b) s'ouvre encore plus et draine la matrice environnante.*

7.3.1 Cas des veines

Autour des veines, la couleur de la cire est plus foncée (Fig. 2-14). Par contre, entre les veines, des zones plus diffuses sont blanches et ont perdu du liquide (Fig. 2-14). Deux interprétations sont possibles :

1. Le liquide à l'intérieur d'une veine ne provient pas de ses environs immédiats puisque dans ce cas, une bordure *appauvrie* en liquide entourerait la veine. Par conséquent, le liquide provient de plus loin. Il est attiré vers la veine et la remplit, mais une certaine quantité reste dans la porosité au bord de la veine.

2. Après l'arrêt de l'expérience, la cire se contracte d'environ 8% en refroidissant. La veine, en perdant du volume, deviendrait un fournisseur de liquide qui retournerait dans la cire autour de la veine.

La première interprétation entre en contradiction avec les modélisations numériques de Sleep (1988) et de Simakin & Talbot (2001a, b). Ces auteurs ont modélisé l'ouverture d'une veine et la compaction de la roche proche (Fig. 2-21). D'après leur calculs, la quantité de liquide dans la matrice diminue autour de la veine et la diminution varie de manière exponentielle en partant des bords de la veine. C'est donc l'inverse de la situation observée dans nos expériences.

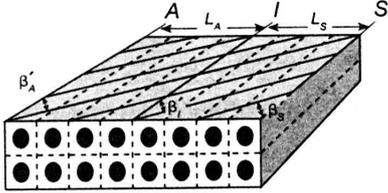
Dans le cadre de la théorie de la compaction, l'influence de la veine est notable sur une distance de l'ordre de *la longueur de compaction*. Celle-ci détermine la capacité de la cire à pouvoir être drainée (voir première partie). Dans les roches crustales, cette longueur se situe entre 1 cm et 1 m environ, c'est-à-dire de l'ordre de la longueur des leucosomes. Le calcul de la longueur de compaction dans la cire permet de mieux comprendre la différence qui existe à ce niveau entre la cire et les roches. Rappelons sa définition :

$$\delta_c = \sqrt{\frac{4k\eta_s}{3\eta_m}} \quad (3)$$

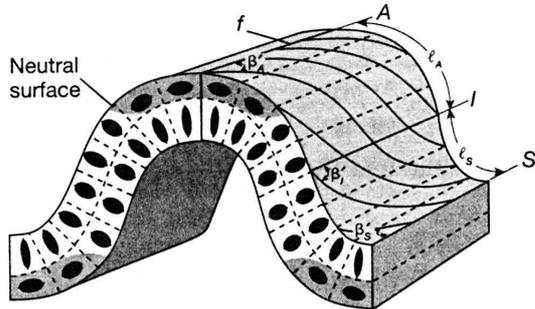
La perméabilité k de la cire n'a pas été mesurée mais peut être calculée avec la formule :

$$k = k_0 \phi^n \quad (2)$$

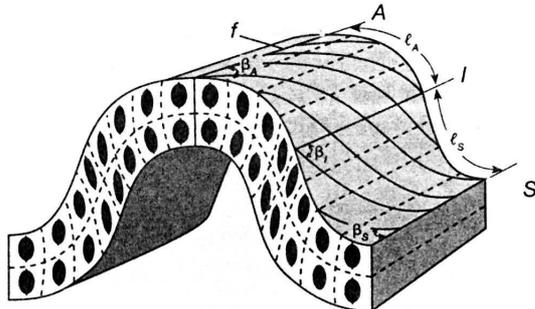
Avec une surface de section des pores $k_0 = 10^{-9} \text{ m}^2$, une porosité égale à un taux de fusion moyen de 20 vol.% et $n = 2$, on obtient $k = 4.10^{-11} \text{ m}^2$. Ensuite, avec $\eta_s = 10^8 \text{ Pa.s}$ et $\eta_m = 10^{-2} \text{ Pa.s}$, la longueur de compaction dans la cire atteint 70 cm. Cette valeur bien au dessus de la dimension du modèle implique que la compaction est très efficace dans toute la couche de cire et que l'influence des veines ne s'arrête pas à leur voisinage immédiat.



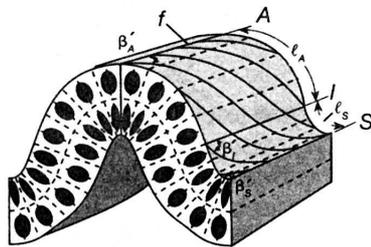
A.



B. Buckling by orthogonal flexure



C. Buckling by flexural shear



D. Buckling by volume-loss flexure

Figure 2-22 : Champs de déformation associés à différents types de plissement (Twiss & Moores, 1992). a) Etat initial. b) Flexure orthogonale. La zone subissant une extension est en grisé. c) Plissement par cisaillement des flancs. Il correspond au glissement bancs sur bancs dans le cas d'une forte anisotropie. d) Plissement par perte de volume.

En conclusion, la ségrégation est très facile dans la cire. Le liquide fuit les zones en contraction. A l'échelle de la couche, la correspondance est très bonne entre champ de déformation et distribution du liquide. Au voisinage immédiat des veines, l'observation est plus ambiguë. A nous d'interpréter les résultats des expériences en conséquences.

7.3.2 Cas des plis dans les expériences multicouche

Le champ de déformation dans une couche plissée dépend du mécanisme de formation du pli : flambage (« buckling »), flexion (« bending »), glissement bancs sur bancs (« flexural-slip folding »), etc. (Mercier & Vergely, 1992; Twiss & Moores, 1992).

Dans le cas des expériences « multicouche », le mécanisme de plissement est en fait une combinaison de trois mécanismes de « buckling » :

1. Flexure orthogonale. La présence de petites fractures radiales aux extrados prouve qu'il y a eu un étirement parallèle à la couche dans cette zone. C'est le signe d'un plissement par « flexure orthogonale » (Fig. 2-22b) (Twiss & Moores, 1992). Dans ce cas, des lignes perpendiculaires à la couche restent perpendiculaires avant et après le plissement. La zone en étirement est séparée du reste du pli en raccourcissement par une « ligne neutre ».
2. Glissement couches sur couches. Son action se traduit par l'ouverture des « saddle reefs » (Fig. 1-17).

3. Plissement par perte de volume. L'intrados montre une géométrie particulière, il est comme pincé avec un point de rebroussement (« *cusp* » en anglais, comparer les figures 2-22d et 20b). Ce très fort raccourcissement localisé dans la charnière des plis est excessif par rapport au taux de raccourcissement global. C'est le signe d'une perte de matière localisée et donc de *compaction* associée au plissement (Twiss & Moores, 1992).

Sur les images en niveaux de gris de l'expérience 42, on distingue très bien une ligne neutre entre des zones appauvries et des zones enrichies en liquide (Fig. 2-20b). Cette concordance avec le champ de déformation dans un pli par « flexure orthogonale » (Fig. 2-22b) montre que *le mouvement du liquide dans la matrice est contrôlé par le champ de déformation*. Le champ de densité de gris est cependant plus complexe, à cause des deux autres types de plissement, ainsi que par des perturbations locales.

7.3.3 Problème des veines non remplies

Il arrive que le remplissage d'une veine ne soit pas total. Dans ce cas, une petite bulle d'air se forme dans la veine. Cela peut s'expliquer de trois manières :

1. Il n'y a parfois pas assez de liquide disponible autour de la veine pour la remplir.
2. Une veine ne pourrait pas drainer tout le liquide de la cire partiellement fondue autour d'elle.
3. Le volume d'une veine augmente trop vite par rapport à la vitesse de percolation du liquide dans la porosité microscopique.

Pour confirmer la première hypothèse, il faut calculer le volume de liquide disponible autour d'une veine et le comparer au volume de celle-ci. En supposant un taux de fusion de 20%, une veine doit drainer 5 fois son volume de cire partiellement fondue. Dans le cas de veines isolées, cela ne pose pas de problème. Par contre, dès que les veines se concentrent, par exemple dans les zones de cisaillement, la quantité de liquide disponible n'est parfois pas suffisante. De plus, les phénomènes d'extraction du liquide peuvent aussi empêcher une veine d'être pleine. D'ailleurs, ce sont plutôt les veines du bord de la couche qui présentent ce défaut de remplissage (Fig. 2-28c par exemple).

Le calcul de la longueur de compaction infirme la deuxième hypothèse (voir plus haut). Pour adopter la troisième explication, il faudrait connaître la vitesse de ségrégation du liquide. Celle-ci n'a pas pu être mesurée réellement, mais l'observation attentive des expériences suggèrent que la ségrégation est suffisamment rapide.

En conclusion, ce problème de similarité entre l'expérience et la nature met en lumière l'intensité des mouvements du liquide dans la cire. Dans la nature, ces vides ne peuvent bien sûr pas exister, et cela sous-entend que de forts gradients de pression sont créés latéralement pour faire migrer le liquide à travers les veines vers les zones qui se dilatent le plus.

7.4 Conclusions

- Le volume de liquide disponible n'est parfois pas suffisant pour remplir complètement une veine. C'est souvent vrai dans la croûte supérieure. A St Christophe en Oisans, il existe des géodes ou « four à cristaux » de la taille d'un homme tapissées de quartz palissadique. Dans les migmatites, cela renforce l'idée d'une grande ampleur des mouvements du liquide.
- La distribution du liquide dans le matériau partiellement fondu est commandée par le champ de déformation. La force motrice de la ségrégation est le gradient de pression entre une veine en dilatation et son voisinage en compaction.
- Des zones enrichies en liquide naissent avec le raccourcissement. L'enrichissement se traduit par un nombre plus important de veines, ainsi qu'une plus grande concentration moyenne en liquide.
- L'appauvrissement se traduit par une perte de volume.
- Certaines zones restent préservées de la déformation et ne perdent ni ne gagnent de volume.

Ces modèles expérimentaux suggèrent donc une origine purement tectonique des leucosomes, avec une ségrégation du liquide de la matrice dans des sites en dilatation créés par la déformation hétérogène. La cire appauvrie en liquide autour des veines sont les mésosomes.

Il est important de noter que nos expériences ne remettent pas forcément en cause les autres modèles de formation des leucosomes (voir première partie). En effet, le dispositif expérimental ne permet pas de tester le modèle de contrôle par la lithologie (différence de fertilité, Johannes, 1988), ni le modèle de ségrégation dans des couches perpendiculaires à la contrainte maximale (Brown et al., 1995).

Cependant, concernant la forme, la taille et la position des leucosomes, la concordance géométrique entre le modèle et la nature incite à accorder une certaine confiance au modèle.

8 La formation des bandes de cisaillement

8.1 Introduction

Dans la précédente partie, nous avons rappelé que les roches partiellement fondues localisent fortement la déformation. Sur le terrain, cette localisation se traduit par des zones et bandes de cisaillement à toutes les échelles, par exemple :

- Lithosphérique : la faille du Fleuve Rouge associée à la collision himalayenne (Leloup et al., 1995; Leloup et al., 1999).
- Crustale : les zones de cisaillement de la CMB (Appalaches, Brown & Solar, 1998b).
- Métrique : les bandes de cisaillement dans les migmatites (Vigneresse & Tikoff, 1999).
- Microscopique : c'est le glissement grain sur grain assisté par le liquide (Rosenberg & Handy, 2001).

Mis à part le cas microscopique, il n'a pas été prouvé dans les exemples donnés que c'est la présence de liquide de fusion qui a permis la nucléation de la zone de cisaillement. Néanmoins, on a trouvé dans tous ces cas des leucosomes ou des granites qui prouvent que du magma a circulé à l'intérieur. Dans les migmatites, les zones de cisaillement sont fréquemment associées à des plis (Hudleston, 1989; Druguet & Hutton, 1998; Passchier, 2001) (Fig. 1-19). Un leucosome souligne alors le plan de cisaillement qui passe par un des flancs du pli.

Passchier (2001) présente des mécanismes de création de ce type d'association. Il relie le champ de déformation dans un pli asymétrique et la création de la bande de cisaillement (Fig. 2-23). Un des flancs est cisailé et localise la déformation. Passchier (2001) distingue tout d'abord les cas où l'anatexie intervient *après* la formation de la zone de cisaillement (Fig. 2-23a et b). Le leucosome qui souligne la zone de cisaillement apparaît soit parce que la zone de cisaillement est plus riche en micas ou en eau (Fig. 2-23a), soit parce que du liquide s'injecte dans cette zone de moindre résistance (Fig. 2-23b). Dans le premier cas, le leucosome devrait avoir des bordures floues et ne pas présenter de déformation interne. La deuxième explication est basée sur le fait que le liquide de fusion emprunte prioritairement des plans de faiblesse dans la roche. Ce type de leucosome dans les flancs de plis montrent alors souvent des bords bien nets (Fig. 1-19) parce que la migration dans le conduit « nettoie » ou « ramone » la zone déformée.

Le troisième mécanisme invoqué par Passchier (2001) a lieu quand le plissement est synchrone de la fusion partielle (Fig. 2-23c). L'étirement dans le flanc produit l'ouverture d'une veine qui se remplit de liquide. Cependant, Passchier (2001) ne relie pas clairement ségrégation et formation de la zone de cisaillement. Des paramètres comme l'épaisseur de la couche plissée ou la structure de la roche ne sont pas pris en compte.

Nos expériences permettent de préciser le rôle des différents paramètres dans la nucléation d'une zone de cisaillement dans un pli.

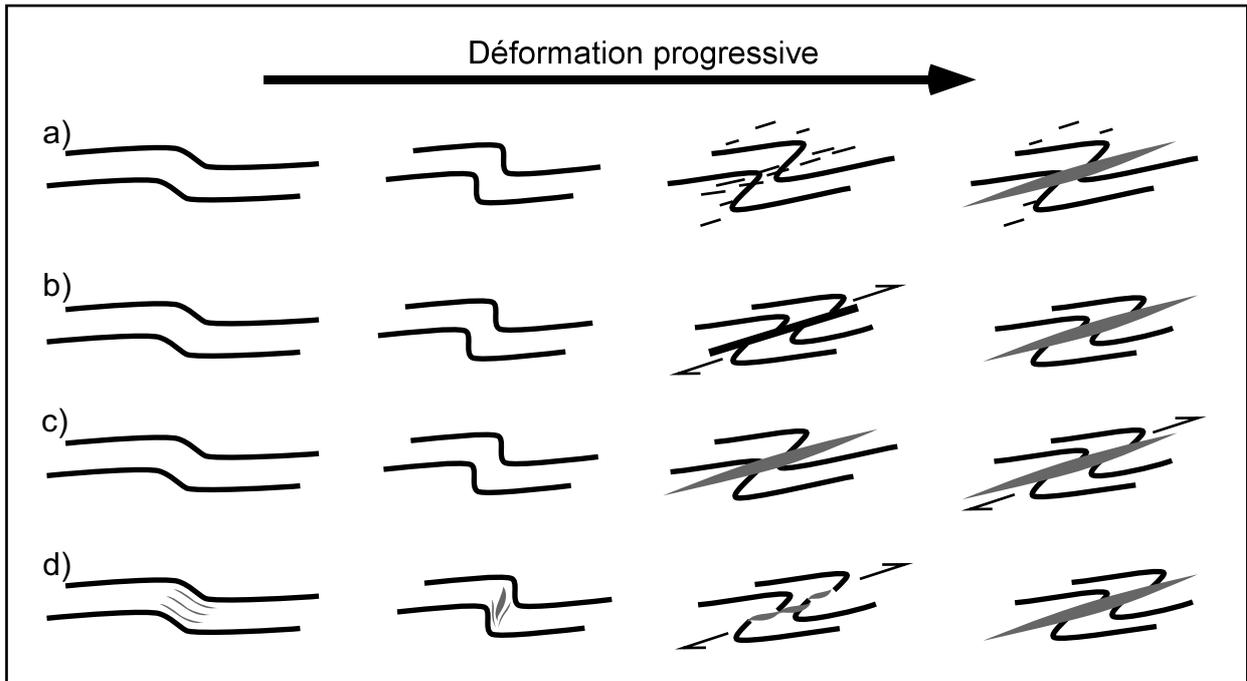


Figure 2-23 : Mécanismes de formation des bandes de cisaillement soulignées par des leucosomes dans le flanc des plis. Les mécanismes a, b, et c sont de Passchier (2001). Le mécanisme d est issu des résultats de la modélisation analogique.

8.2 Influence du taux de fusion sur le comportement mécanique

L'étude systématique de l'influence du taux de fusion n'a pas été possible. Il n'y a que quatre degrés pour ce paramètre : pas de fusion, fusion faible (<10%), fusion modérée (15-20%) qui concerne 90% des cas, et fusion forte (25-30%) qui concerne trois expériences.

Comparaison expériences 12 et 17

Pour préciser le rôle du liquide de fusion sur le comportement mécanique de la roche, une comparaison entre deux expériences, une avec cire non fondue (exp. 12) et une autre avec cire partiellement fondue (fusion modérée, exp. 17), a été menée. Les autres paramètres (épaisseur, structure, nombre de couches) sont par ailleurs identiques. Cette comparaison fait l'objet de l'article publié à *PCE* (Barraud et al., 2001a).

Expérience 15

A un stade de fusion intermédiaire (fusion faible) entre les deux expériences précédentes, l'expérience 15 montre un pli très similaire au pli de l'expérience 12 sans fusion, mais avec de petites fentes remplies de liquide dans les flancs et autour du plan axial (Tab. 2-3). Ces veines sont fines et étroites et ne se connectent pas entre elles pour fracturer la couche.

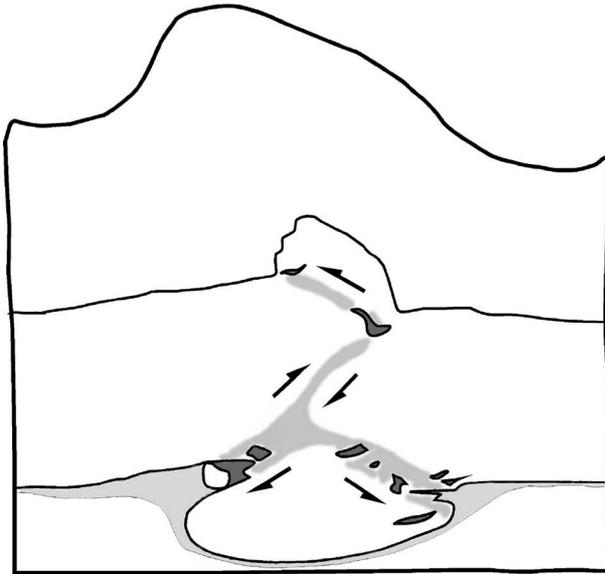


Figure 2-24 : Interprétation de l'expérience 14. Le taux de fusion important (25-30%) a permis la création de deux bandes de cisaillement. Le liquide (en gris) s'est accumulé sous la couche de cire. Les veines remplies de liquide sont en gris sombre.

Expérience 14

Quand la fusion est importante (25-30%), la localisation s'effectue très facilement (exp. 14, Tab. 2-4, Fig. 2-24). Une fois de plus, au début du plissement, les veines se sont concentrées dans les flancs. Le pli était un synclinal coffré avec deux flancs en kink bands. Une fois que les bandes de cisaillement se sont formées, trois blocs ont été individualisés. La partie centrale du pli a été expulsée vers le bas. En fin d'expérience, une petite écaille de cire a été raclée au sommet de la couche.

Une grande quantité de liquide de fusion a quitté la couche. Une partie importante s'est accumulée *sous* la couche de cire (Fig. 2-24).

8.3 Influence de l'anisotropie mécanique et de la foliation de la cire

La grande majorité des veines s'ouvrent dans la foliation de la cire. Etant donné la grande différence à ce sujet entre les couches de cire « massives » et les multicouches, les deux cas sont distingués.

8.3.1 Couche foliée ou non foliée

Pour caractériser l'intensité ainsi que les effets de l'anisotropie mécanique de la cire « foliée », deux expériences (26 et 27) ont été menées avec pour seule différence le fait que la couche de cire avait fait l'objet ou non du traitement pré-déformation (Fig. 2-25).

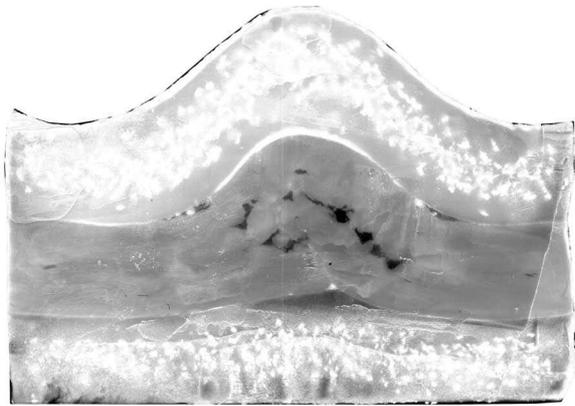
Ce sont des expériences à trois couches d'égales épaisseur, à 60°C, de raccourcissement final identique ($36 \pm 1\%$). La figure 2-25 montre les résultats des deux expériences. La forme générale des plis est très similaire d'un cas à l'autre. Concernant les deux couches blanches de paraffine enveloppantes, le comportement est identique : raccourcissement sans épaissement pour la couche du bas et pli anticlinal quasi isopaque pour la couche du haut (charnière légèrement épaissie, classe 1B à 1C d'après Ramsay & Huber, 1987).

Dans le cas *sans* foliation (exp. 26), quelques grosses fentes parallèles au litage se sont ouvertes au milieu de la couche de cire, puis ont été plissées avec elle. Dans le cas *avec* foliation (exp. 27), de nombreuses petites fentes se sont ouvertes, plutôt localisées dans les flancs. Comme précédemment décrit, ces veines se sont disposées en échelon dans une kink band. Après environ 25% de raccourcissement, leur connexion dans le flanc gauche a donné naissance à une *zone de*

EXPERIENCE 26
Pas de foliation

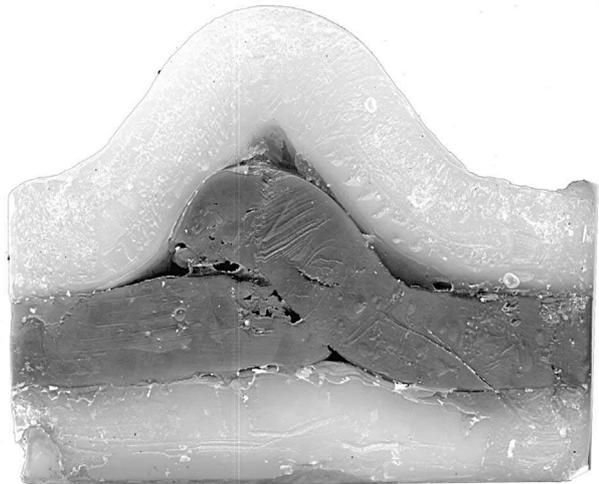


Bord

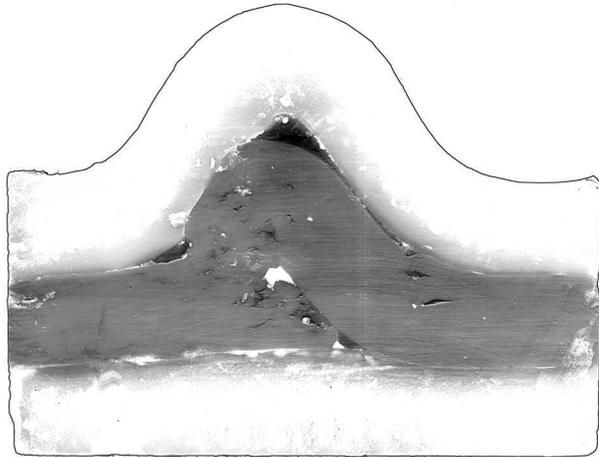


Coupe

EXPERIENCE 27
Foliation



Bord



Coupe

Figure 2-25 : Comparaison entre l'expérience 26 avec cire non foliée et l'expérience 27 avec cire foliée.

cisaillement qui a permis le chevauchement de la partie droite sur la partie gauche. De plus, la zone de cisaillement est plus riche en liquide de fusion.

Cette comparaison suggère qu'une foliation pénétrative permet de générer un grand nombre de veines et donc d'augmenter considérablement la possibilité de localiser la déformation. A l'échelle de la couche, c'est donc le *pourcentage local de veines* qui contrôle la résistance de la cire et donc la position de la zone de cisaillement. Le taux de fusion est secondaire puisque les deux expériences décrites (26 et 27) se sont passées à la même température.

La localisation de la déformation est favorisée en présence de la foliation.

8.3.2 Multicouches

Dans ces expériences, on n'observe pas de bande de cisaillement (voir films et Tab. 2-5), ce qui contredit le fait qu'une foliation pénétrative favorise la localisation. Deux explications :

- La déformation est accommodée par des glissements couches sur couches. L'expérience 32 est à ce sujet démonstrative puisqu'une kink band avec veines s'est formée mais les veines ne se sont pas connectées entre elles. La déformation s'est reportée dans la charnière du pli. Dans les cas précédents, la fracturation du flanc du pli demandait moins d'énergie que la poursuite du plissement. Avec le multicouche, il semble que le plissement soit favorisé parce que chaque couche peut ajuster sa position par rapport aux autres.
- Les multicouches des expériences 42 et 43 sont très épais. En plus du glissement entre couches, le rôle de l'épaisseur intervient (voir plus bas).

8.4 Influence de l'épaisseur sur la forme des plis

La grande majorité des expériences ont produit des plis dans la ou les couches de cire. Mais dans certains cas, la couche de cire s'est plutôt épaissie de façon plus ou moins homogène (exp. 9, 18, 19, 28). L'épaississement est généralement maximal au centre du modèle et le nombre de veines est important.

Ce type de résultat semble lié à l'épaisseur de la couche de cire. Par exemple, les conditions initiales des expériences 17 et 18 étaient identiques à part l'épaisseur de cette couche qui était respectivement de 3 et 3,4 cm. Dans le premier cas, un pli asymétrique avec une bande de cisaillement s'est formé (Barraud et al., 2001a), tandis que dans le deuxième cas, seul un épaississement a eu lieu et les veines étaient dispersées dans toute la couche (Fig. 2-26).

Ainsi, quand l'épaisseur est grande par rapport à la longueur, le plissement est défavorisé par rapport à l'épaississement. En effet, la longueur d'onde d'un pli augmente avec l'épaisseur et le contraste de viscosité couche/matrice (Mercier & Vergely, 1992; Twiss & Moores, 1992). Si la longueur d'onde théorique du pli attendu est plus grande que la longueur initiale de la couche, seul un épaississement est possible. A l'intérieur de la couche épaissie, il peut néanmoins y avoir une déformation interne hétérogène : c'est le cas des expériences 18, 19 et 28 dans lesquelles de petits plis *dysharmoniques* se sont formés (Tab. 2-3). C'est aussi le cas dans les expériences « multicouches » (Tab. 2-5).

Par conséquent, une épaisseur faible de la couche de cire favorise la formation de bande de cisaillement. En effet, la formation de la zone de cisaillement est fortement associée à la rotation du flanc du pli. Quand l'un des flancs est vertical ou même renversé, le raccourcissement horizontal produit le cisaillement responsable de la localisation de la déformation. Une faible longueur d'onde facilite cette rotation. De plus, lorsque son épaisseur est faible, la couche est moins résistante, ce qui facilite davantage la nucléation d'une bande de cisaillement.

8.5 Combinaison de paramètres

Une des preuves que le taux de fusion n'est pas le seul paramètre contrôlant la formation des zones de cisaillement est le fait qu'il faut la bonne combinaison de paramètres. Par exemple, l'expérience 26 ne montre pas de localisation alors que l'épaisseur de la cire est faible. L'expérience 18 non plus alors que le nombre de veines est très important. De même enfin les expériences avec « multicouches » qui présentent pourtant une foliation très forte.

8.6 Conclusions sur les mécanismes de localisation de la déformation

- Des paramètres jouant sur la comportement mécanique des roches partiellement fondues, autres que le taux de fusion, ont été identifiés. Il s'agit de l'intensité de la foliation et de l'épaisseur de la couche (qui joue sur la forme des plis).
- Néanmoins, la ségrégation du liquide de fusion et sa concentration dans certaines zones du pli, jouent un rôle majeur.

La formation d'une *bande* de cisaillement intervient en 4 étapes (Tab. 2-7).

Tableau 2-7: Etapes de la formation d'une bande de cisaillement.

ETAPE	MECANISMES	LOCALISATION DE LA DEFORMATION	DISTRIBUTION DU LIQUIDE
1. Formation de veines horizontale remplies de liquide	Microfracturation Ségrégation du liquide	Faible	Homogène
2. Rotation des flancs du pli	Déformation ductile Migration du liquide	Modérée	Hétérogène
3. Formation d'une zone de cisaillement	Diminution locale de la résistance	Forte	Hétérogène
4. Localisation finale dans une bande de cisaillement	Connexion des veines Fracturation	Très forte	Très hétérogène

Ce processus s'ajoute à ceux proposés par Passchier (2001) (Fig. 2-23d).

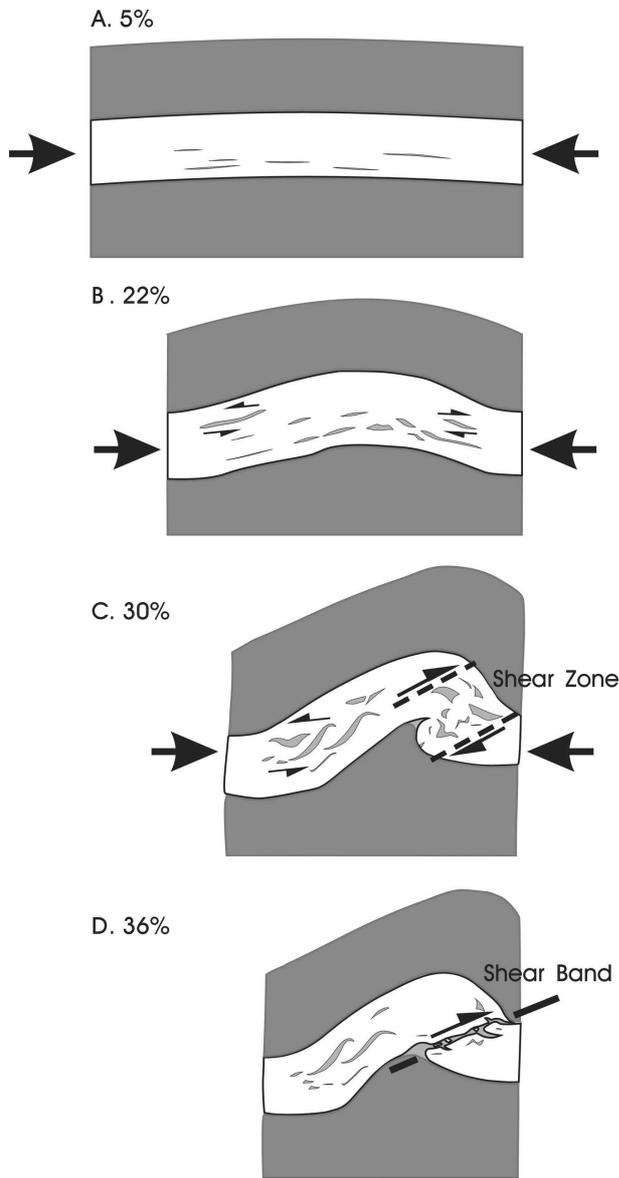


Figure 2-27: Etapes de la la formation d'une bande de cisaillement, basées sur l'expérience 17 (Barraud et al., 2001a).

La *microfracturation* désigne ici la rupture des liaisons entre les cristaux de cire. La veine prend naissance sur une micro-poche de liquide et se propage dans un plan (souvent celui de la foliation). Dans un matériau granulaire, ce processus a été très efficacement modélisé par Rosenberg & Handy (2000, 2001, voir première partie). Ensuite, la veine draine le liquide environnant en prenant du volume. La ségrégation a lieu par compaction suivant les mécanismes décrits par Sleep (1988), Petford (1995), Simakin & Talbot (2001a, b).

Avec la progression de la déformation, la *largeur* de la zone concernée est de plus en plus faible. Une nouvelle fracturation intervient quand les veines se connectent les unes aux autres. La bande de cisaillement se matérialise et à la fin du processus, les deux parties du pli se chevauchent de façon pratiquement rigide (Fig. 2-27).

Le passage de *zone* à *bande* de cisaillement correspond à une localisation de plus en plus poussée de la déformation, à l'échelle macroscopique. Plus précisément, les déplacements et les rotations augmentent dans la zone de cisaillement à cause, vraisemblablement, d'une baisse *locale* de la résistance. Cette diminution de la résistance peut s'expliquer à la fois par la ségrégation de liquide dans la zone, mais aussi par l'endommagement lié à l'ouverture des veines.

La présence de la foliation implique deux effets opposés : d'une part, une foliation pénétrative permet l'ouverture de nombreuses veines *dispersées* dans toute la couche ; d'autre part, ces veines sont autant d'inclusions de relative faible viscosité responsable d'une baisse de résistance *locale* et de la localisation de la déformation. Ainsi, *le principal paramètre est plutôt la répartition de ces inclusions*. Le taux de fusion moyen peut être élevé et identique dans deux systèmes dans lesquels la distribution du liquide est complètement différentes, soit diffuse soit hétérogène (Fig. 2-28a et b). Les possibilités de localisation de la déformation seront beaucoup plus accentuées si la distribution est hétérogène. C'est pourquoi l'épaisseur et la forme du pli interviennent.

La taille, le nombre, l'orientation et la position des veines sont des facteurs qui contrôlent la formation de la zone de cisaillement. Le rapport entre le volume de ces inclusions et le volume de cire solide peut atteindre localement une valeur critique au delà de laquelle la déformation se localise. Ce seuil est autour de 15% (Barraud et al., 2001a). C'est un pourcentage de liquide de fusion à l'échelle macroscopique. Sur l'affleurement, il peut être assimilé à un pourcentage de

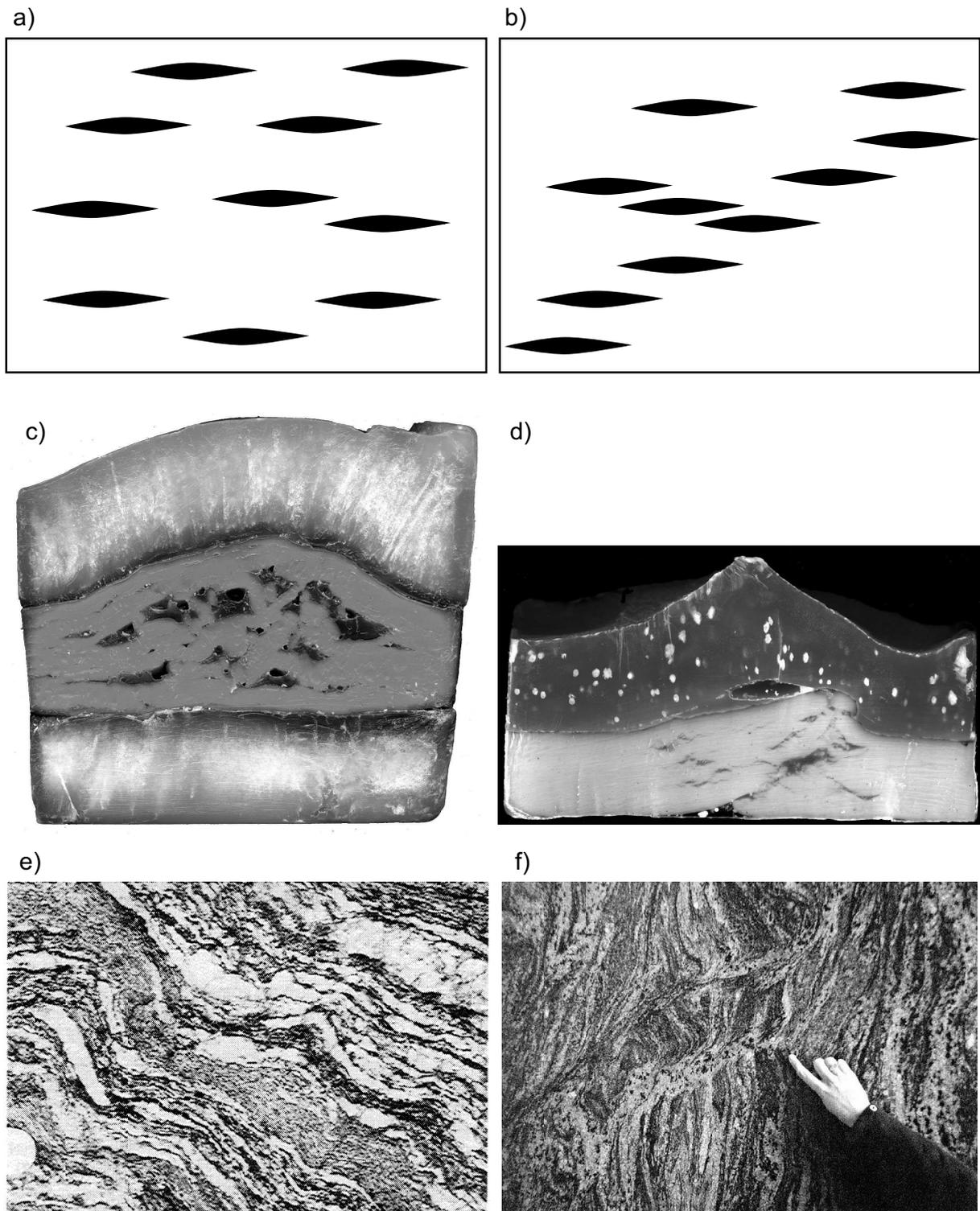


Figure 2-28: Influence de la répartition du liquide sur la localisation de la déformation. **a)** Distribution de veines uniforme (8% environ de liquide). **b)** Distribution hétérogène. **c)** Expérience 18 (bord). La forte épaisseur, associée à la foliation a permis l'ouverture de veines dispersées dans la couche. **d)** Expérience 8 (coupe). L'épaisseur est plus faible que dans le cas précédent. **e)** Exemple de plis sans localisation. Noter que le taux de fusion semble important et qu'il n'y a pas de zones de cisaillement (Brown et al., 1995a). **f)** Exemples de bandes de cisaillement dans des stromatolites (Vigneresse et Tikoff, 1999).

leucosomes. Ce pourcentage de 15% est plus faible que le RCMP (Arzi, 1978), et que le MET (Vigneresse et al., 1996 ; voir première partie). Cela signifie qu'un

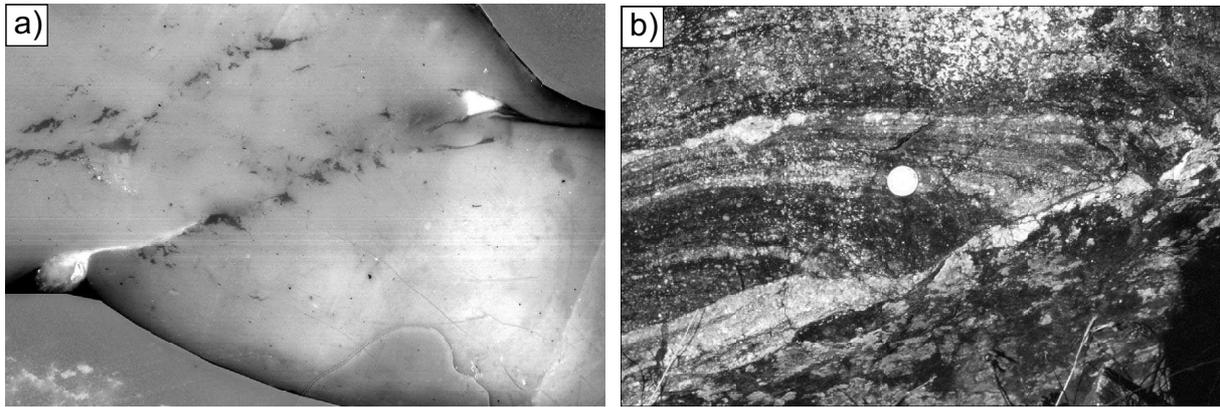


Figure 2-29: Comparaison modèle/nature. **a)** Vue rapprochée du flanc cisailé du pli de l'expérience 17. **b)** Bande de cisaillement dans des migmatites du dôme du Velay, Massif Central français.

taux de fusion moyen n'exprime pas complètement les réelles propriétés de la roche. Avec le raccourcissement, la distribution du liquide évolue et son comportement mécanique devient hétérogène. Cela a d'importantes conséquences concernant la migration et l'extraction du liquide de fusion (voir section suivante).

Des comparaisons modèles/nature sur ce sujet de la localisation et des bandes de cisaillement des flancs des plis sont rassemblées dans les figures 2-27 et 28. La figure 2-29 récapitule l'ensemble des paramètres pris en compte dans cette discussion.

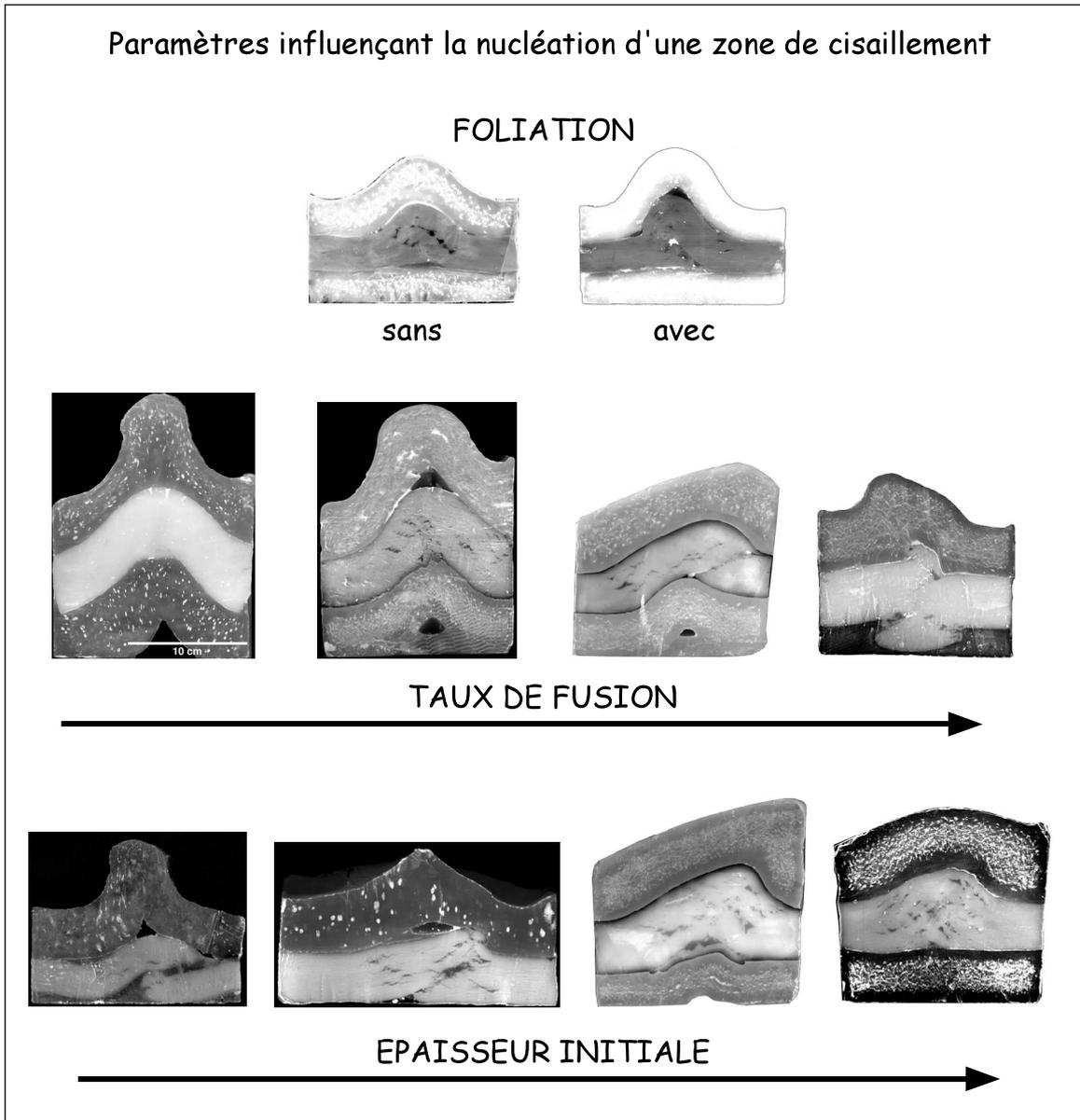


Figure 2-30 : Synthèse de l'influence des paramètres « foliation », « taux de fusion » et « épaisseur initiale » sur la localisation de la déformation.

9 L'extraction du liquide de fusion

9.1 Introduction : la quantité de liquide extraite

Dans nos modèles, l'extraction n'est en fait qu'une migration vers l'extérieur. Dans le système naturel modélisé (dont la taille dépend de l'échelle considérée, voir section 3), il n'y a pas « d'extérieur » et l'extraction s'entend comme une migration vers un réservoir ou puits, de taille supérieure.

A la fin d'une expérience, une couche de matériau fondu flotte sur l'eau du tank qui entoure le modèle. Dans les expériences avec paraffine (2 ou 3 couches), cette couche fondue est un *mélange* de liquide de fusion issu de la cire et de paraffine 68/70. En effet, bien que la paraffine 68/70 ne fonde pas normalement à la température de nos expériences, elle perd beaucoup de volume avec le raccourcissement. Cela se traduit généralement par le fait que la couche inférieure de paraffine garde la *même* épaisseur tout le long de l'expérience. La perte de volume est dans ce cas égale au taux de raccourcissement (Tab. 2-8). A cause du gradient de température entre le bas et le haut du modèle, la couche de paraffine supérieure perd moins de volume. Un exemple typique est l'expérience 18 (Fig. 2-28c).

Tableau 2-8: Pourcentages (en poids) de paraffine et de cire liquides expulsées pendant les expériences.

EXPERIENCE	TYPE	RACC.	% paraffine expulsée	% cire expulsée
17	3 couches	36%	?	11,6%
18	3 couches	40%	40%	22,5%
19	1 couche	42%	-	16%
21	3 couches verticales	28%	-	4,4%
23	3 couches verticales	27%	?	5%
25	1 couche en cisaillement	-	-	12,6%
26	3 couches	36%	?	1,3%
27	3 couches	37%	40%	3,2%
28	3 couches	40%	47%	10%
29	1 couche en cisaillement	-	-	6,2%
30	1 couche - ENCLAVE	32%	-	1%
31	1 couche - ENCLAVE	13%	-	5%
32	Multicouche	33%	30%	5%
33	Multicouche - ENCLAVE	33%	30%	5,3%
36	Multicouche verticale	40%	-	7%
39	Multicouche verticale	40%	-	6,5%
40	2 couches - ENCLAVE	17%	17%	8%
41	2 couches - ENCLAVE	54%	30%	30%
42	Multicouche	30%	-	15,2%
43	Multicouche	30%	-	17,2%

Le poids de matériau échappé à la fin d'une expérience est donc la somme des quantités de liquide échappées de chaque couche. On peut ensuite calculer chaque quantité en comparant les volumes initiaux et finaux des couches. Le tableau 2-8 récapitule les pourcentages en poids de matériau expulsé.

Ce tableau montre que le pourcentage de liquide expulsé est fort (> 15%) quand la couche de cire s'est déformée par épaissement (exp. 18, 19, 42, 43). Dans ces cas, de nombreuses veines se sont ouvertes. Leur ouverture était associée à une importante déformation interne de la couche. Ainsi, ces expériences allient une importante ségrégation (déformation) à un réseau efficace d'extraction (veines).

La comparaison entre les expériences 26 et 27 confirme le rôle de la bande de cisaillement en tant que chemin de migration puisque le taux d'extraction augmente significativement en sa présence.

Ces pourcentages de perte de volume sont à rapporter à la quantité initiale de liquide dans la couche de cire. On voit que l'extraction peut être très efficace.

Pour mieux comprendre les mécanismes d'extraction, il faut tout d'abord avoir une idée de l'évolution temporelle de la quantité de liquide expulsé. Est-elle continue ou discontinue ? Ensuite, puisqu'il existe un lien avec la déformation, les zones de la couche qui perdent le plus de liquide doivent être repérées. Une relation extraction – localisation de la déformation sera identifiée et explicitée. Enfin, un modèle conceptuel de l'extraction du liquide dans les migmatites sera proposé.

N.B. : L'étude complète de l'extraction n'a pu être menée à bien que dans les modèles « multicouches ».

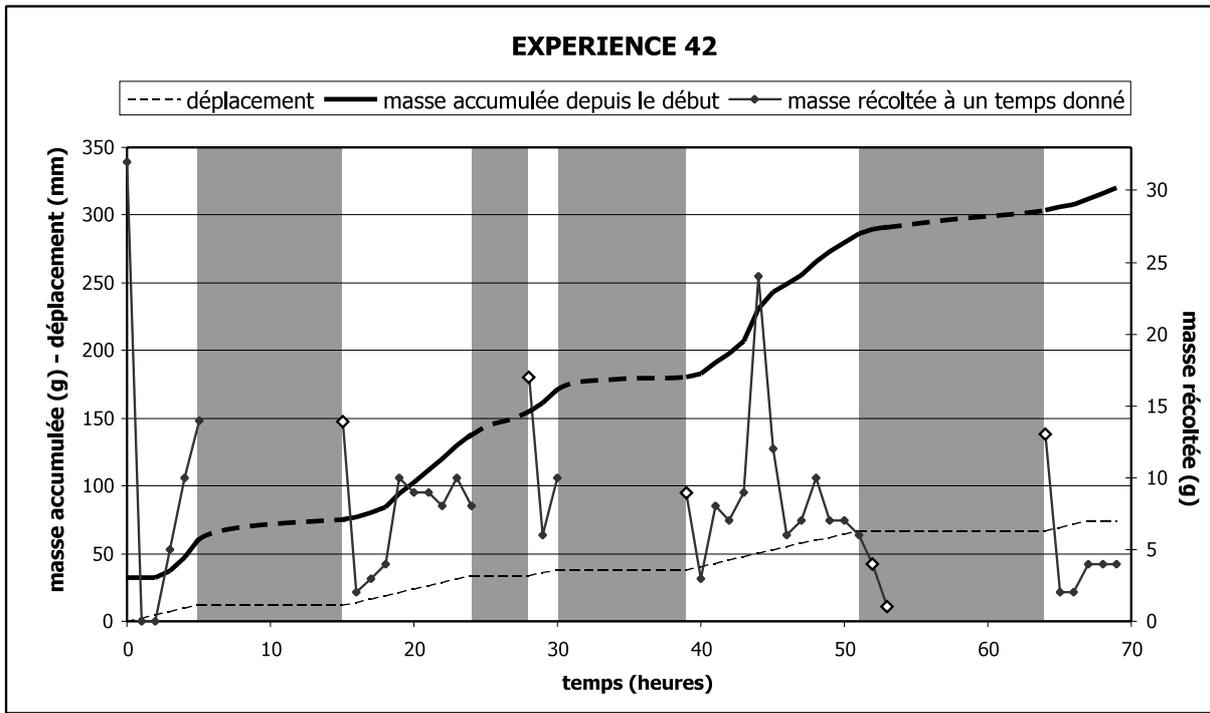
9.2 L'extraction dans les modèles multicouches

9.2.1 Mesure directe de l'évolution du volume expulsé

La mesure directe de la quantité de liquide qui sort du modèle a été effectuée toutes les heures pour deux expériences, les 42 et 43. Les résultats de l'expérience 43 sont décrits dans l'article soumis à *JSG*. Ceux de l'expérience 42 sont rapportés ici et sont très proches (Figs. 2-31 et 32).

Dans les deux expériences, la quantité de raccourcissement est identique et la quantité totale de liquide extraite est similaire : 322 g pour l'expérience 42 (15.3% en poids) et 374 g pour l'expérience 43 (17.2% en poids). De plus, le taux d'extraction moyen en période de raccourcissement est d'environ 10 g/h. *Les périodes d'arrêt du raccourcissement correspondent dans les deux cas à un fort ralentissement de l'extraction.* Après chaque période de repos, le taux ne reprend pas tout de suite une valeur moyenne. Il est d'abord faible (2-3 g/h) puis augmente rapidement. Ce délai signifie qu'une nouvelle quantité de liquide doit d'abord être ségréguée de la cire dans des veines pour être ensuite expulsée.

Les graphes montrent aussi que *l'extraction du liquide est périodique*, avec des pics suivis de minima. Pour l'expérience 42, le pic principal arrive après 20%



périodes d'arrêt de la déformation

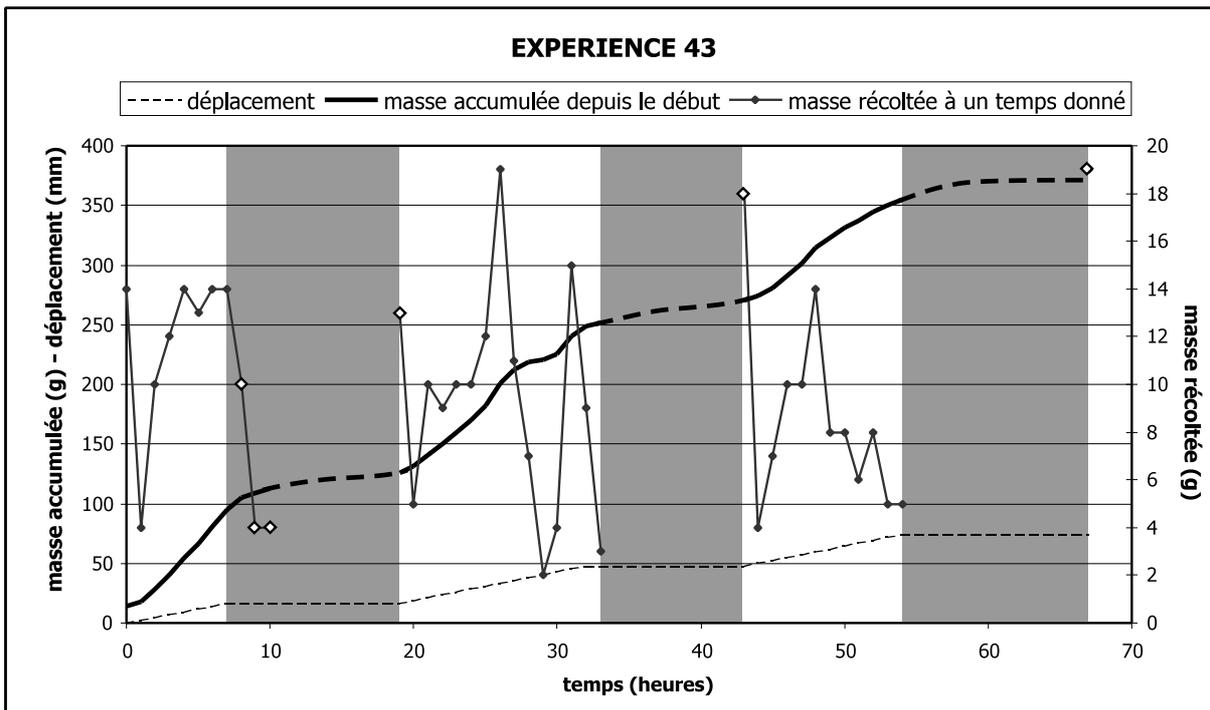


Figure 2-31 : Mesure de la quantité de liquide extraite en fonction du temps lors des expériences 42 et 43. La mesure « instantanée » (toutes les heures) et le cumul depuis le début de l'expérience sont indiqués. Les diamants indiquent une mesure effectuée pendant l'arrêt de la déformation. Le déplacement de la paroi mobile est aussi affichée.

de raccourcissement. Cette période de la déformation est caractérisée par un écrasement (« *flattening* ») des plis qui sont déjà bien formés dans la partie gauche du modèle (film correspondant sur CD joint). Pour l'expérience 43, le pic principal arrive plus tôt, peu après le début du plissement (13.4%). Il existe tout de même un pic secondaire à 24% de raccourcissement qui a lieu lui aussi dans une phase d'aplatissement des plis (voir article *JSG*). Ces deux expériences confirment donc le rôle de la fermeture (« *collapse* ») des veines dans le processus d'extraction, et que la quantité extraite dépend du taux de déformation.

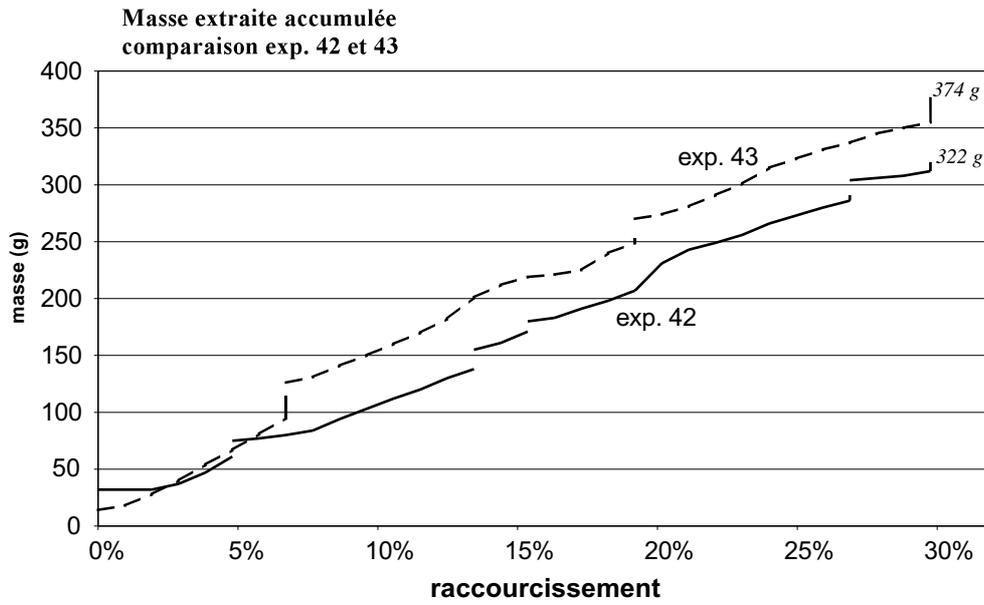


Figure 2-32 : Cumul de liquide expulsé du modèle depuis le début de l'expérience, comparaison entre les expériences 42 et 43.

9.2.2 Mesure des surfaces

Un autre moyen de mesurer l'activité de l'extraction en fonction de la quantité de raccourcissement est de mesurer la surface de la couche de cire. Cette technique permet de plus de savoir qu'elles sont les zones qui perdent le plus de volume. Dans l'article soumis à *JSG*, une comparaison droite – gauche (zones non plissée et plissée) est présentée pour l'expérience 43. En complément, la figure 2-33 montre l'évolution de la surface d'un seul pli, le premier anticlinal en partant de la paroi mobile, à gauche (courbe continue). Le pourcentage de pixels sombres, c'est-à-dire ceux qui dessinent les veines et les lentilles de liquide échappé, est affiché aussi (courbe en pointillé). Ce graphe montre que la surface décroît dès le début du plissement, après 10% de raccourcissement. La petite contraction du pli au moment de l'arrêt du raccourcissement est bien visible. Enfin, la surface (et donc le volume) chute brutalement après 22% de raccourcissement, signe que l'extraction s'accroît avec l'aplatissement du pli. Par ailleurs, la quantité de liquide présente au bord de la couche (courbe en pointillé) fluctue, mimant la succession de pulses de liquide en provenance de l'intérieur du modèle.

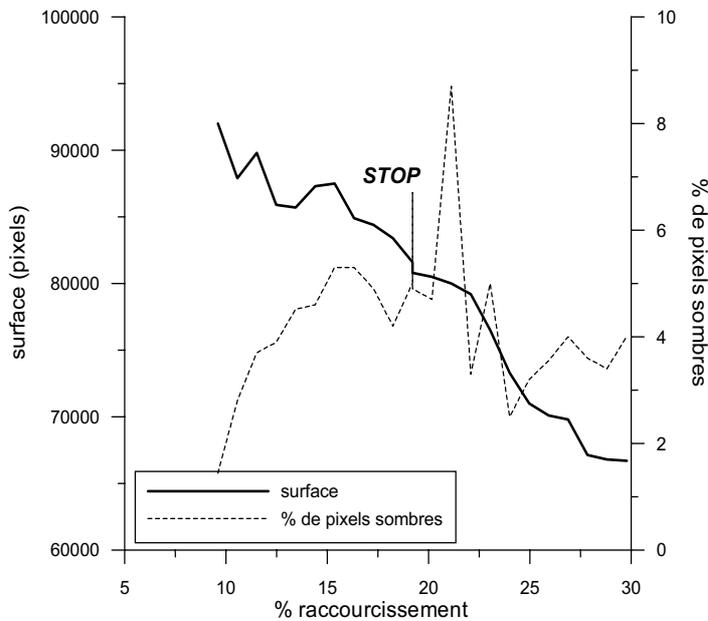


Figure 2-33: Mesure numérique (sur les images du film) de la surface d'un seul pli (celui de la figure 2-35) en fonction de la quantité de raccourcissement. La diminution de la surface est constante (les augmentations sont dans la barre d'erreur) et s'accélère après 22% de raccourcissement. Le pourcentage de pixels sombres correspond à la surface des lentilles de liquide expulsé du pli mais encore centrées sur le pli. Sa valeur varie en fonction des arrivées de liquide. Le stop est à 19,2%.

9.2.3 Relations ségrégation – extraction

Les gradients de coloration de la cire ont été utilisés plus haut (section 7) pour suivre la ségrégation du liquide de la matrice vers les veines. La technique de la classification permet d'obtenir une image en couleur des zones appauvries en liquide, à comparer avec le champ de déformation.

La coupe de l'expérience 42 montre ainsi deux parties distinctes : une partie gauche plissée et appauvrie, une partie droite non plissée et non appauvrie (Fig. 2-20a). Ce résultat confirme la mesure des surfaces. *Le lien entre plissement et extraction est ici manifeste.*

J'ai montré au paragraphe 7.3.2 la relation entre le champ de déformation dans un pli et la ségrégation. Le plissement permet donc à la fois la ségrégation et l'extraction. Les relations ségrégation – extraction sont donc les suivantes :

- La ségrégation s'effectue dans des veines et ces veines permettent ensuite la migration et l'extraction.
- Les veines permettent la nucléation de bandes de cisaillement qui favorisent l'extraction.
- Un accroissement de la quantité de liquide ségrégué, c'est-à-dire plus libre et plus mobile, accentue les possibilités d'extraction.
- D'une manière générale, ségrégation et extraction sont liées grâce aux boucles auto-entretenues (« *feedback loops* ») qui associent les évolutions temporelles du champ de déformation, de la résistance et du mouvement du liquide (voir l'article *JSG* et la section suivante).

Dans les expériences « multicouches », la plupart des veines s'ouvrent dans les plans axiaux des plis, sous forme de « saddle reefs ». De plus, le liquide extrait, qui est piégé entre le modèle et la paroi verticale de la boîte, forme des lentilles sombres qui sont systématiquement centrées sur les plans axiaux des plis (Fig. 7 de l'article *JSG*, films sur CD joint). Les anticlinaux montrent plus de lentilles que les synclinaux.

Ainsi, les plans axiaux sont les chemins de migration privilégiés vers l'extérieur.

9.2.4 Les « *feedback loops* »

Un phénomène peut s'« *auto-entretenir* » si ses conséquences alimentent les processus qui sont à son origine. Ce type de relation peut engendrer un développement catastrophique du phénomène en question. Ce concept nouveau d'« *auto-organisation* » a permis par exemple de décrire le comportement d'un tas de sable (Bak, 1996). Des événements mineurs en eux-mêmes, comme l'ajout de quelques grains sur le tas, peuvent déclencher des fluctuations de grande amplitude.

Les observations suivantes, tirées des expériences 42 et 43, indiquent que des boucles auto-organisées peuvent être définies :

- Le plissement s'accroît, à un temps donné, près de la paroi mobile. C'est le signe d'une diminution de la résistance de la cire avec le plissement.
- Les plus grandes veines s'ouvrent dans les plis (saddle reefs), augmentant localement la perméabilité des plans axiaux.
- L'extraction a lieu surtout dans la partie plissée.
- L'extraction augmente après 20% de raccourcissement, avec l'aplatissement des plis et la fermeture de nombreuses veines.
- Une compaction importante de la cire au voisinage du plan axial a lieu.

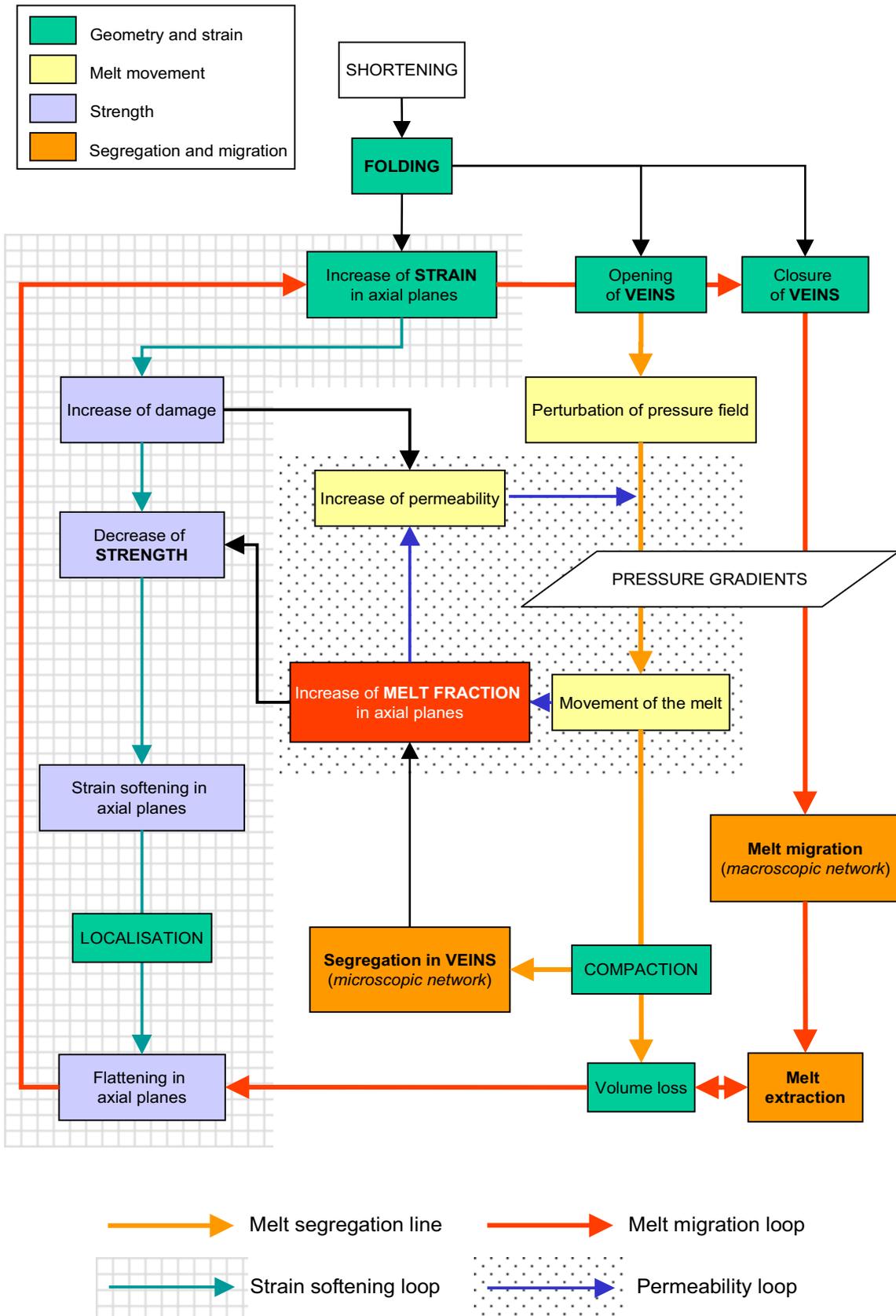
Deux boucles semblent se dégager :

1. Une boucle classique entre résistance, quantité de déformation et localisation de la déformation. La cire présente un adoucissement avec la déformation (« *strain softening* », voir section « rhéologie »). Le plissement accentue la déformation dans les charnières. Par conséquent, une localisation de la déformation a lieu dans les plans axiaux.

2. Une boucle entre le mouvement du liquide, le pourcentage de liquide et la perméabilité. La perméabilité augmente avec la quantité de liquide ségrégué dans des veines, ce qui favorise le mouvement de ce liquide.

Ces deux boucles sont reliées par la résistance de la cire, qui diminue avec le pourcentage de liquide. *Les zones les plus déformées et les zones où le mouvement du liquide est le plus intense sont donc les mêmes.* La ségrégation, la migration et l'extraction du liquide sont dépendantes de l'ouverture et de la fermeture des veines. De plus, la compaction et la perte de matière favorise la localisation de la déformation. Ainsi, tous ces processus sont totalement imbriqués et une troisième boucle concernant la migration et l'extraction du liquide apparaît.

Ces « *feedback loops* » sont schématisées sur la figure 2-34.



9.3 Rôle de la localisation de la déformation sur l'extraction

Deux types de structures localisent la déformation dans nos expériences :

1. Les zones et bandes de cisaillement dans les couches « massives »
2. Les plans axiaux des plis dans les couches « multicouche »

Même si ces structures sont discordantes, il est important de noter que la direction de migration du liquide est assez peu affectée et qu'elle reste globalement *horizontale et perpendiculaire à la direction de raccourcissement*. En effet, la formation de poches de liquide aux extrémités de zone de déformation localisée n'est pas systématique. Les seuls exemples visibles sont dans les expériences 14 et 17 (Figs. 2-24 et 2-29a). Même s'il est vrai que dans la nature, ce type de structure facilitera la migration verticale du liquide, on voit qu'une part importante de l'écoulement pourra aussi se faire latéralement.

Tableau 2-9: Etapes du mécanisme d'extraction du liquide.

ETAPE	RESEAU	FORCE MOTRICE	PREUVES
Ségrégation	Microscopique	Gradients de pression	Compaction - pertes localisées de volume Gradients de coloration de la cire
Migration (1)	Macroscopique	Gradients de pression	Echappement de liquide sans raccourcissement
Migration (2)	Macroscopique	Fermeture ou mouvement de la veine	Pulses d'extraction après 20% de raccourcissement Migration des flancs vers les charnières des plis
Extraction finale	Plan vertical entre modèle et boîte	Gradients de pression Flottabilité	Présence de liquide dans le bain d'eau et dans la couche de sable supérieure

Figure 2-34 (page précédente): « *Feedback loops* » dans les plans axiaux des plis. Ce diagramme rassemble l'ensemble des processus à l'oeuvre pendant la déformation de la couche de cire partiellement fondue. Ceux-ci sont classés en fonction d'un paramètre (géométrie, résistance) ou d'un phénomène (mouvement du liquide ou ségrégation). Deux boucles sont imbriquées: celle conduisant à la localisation de la déformation (*strain softening loop*) et celle accentuant le mouvement du liquide (*permeability loop*). L'endommagement et la diminution de résistance avec l'augmentation de la quantité de liquide relie ces deux boucles. Les autres processus (ségrégation et migration du liquide) sont dépendants de ces deux boucles. Par conséquent, ils sont amplifiés et se localisent de plus en plus dans les plans axiaux à mesure que le raccourcissement général augmente.

9.4 Un modèle d'extraction

Ces deux expériences permettent de proposer un mécanisme d'extraction qui a lieu en trois étapes : (1) ségrégation du liquide dans une veine, (2) migration du liquide horizontalement dans cette veine et (3) extraction et accumulation dans le réservoir d'eau. Le tableau 2-9 résume les étapes de l'extraction et les forces mises en jeu.

La ségrégation a été étudiée en section 7.

La « **Migration (1)** » s'effectue par écoulement horizontal du liquide le long de la veine du cœur du modèle vers le bord. *La force motrice est alors simplement la différence de pression entre le modèle et l'extérieur.* Cette force agit constamment, même quand le raccourcissement est stoppé puisque l'extraction n'est alors pas arrêtée mais simplement ralentie (Fig. 2-31). Le liquide s'écoule simplement dans la veines immobile. Cette perte de volume est visible sur une séquence de trois photos prises en période d'arrêt pendant l'expérience 43 (Fig. 2-35). Une lentille de liquide, centrée sur un anticlinal (le même que celui de la Fig. 2-33), grossit et dans le même temps le pli se contracte légèrement d'environ 1% (Fig. 2-33).

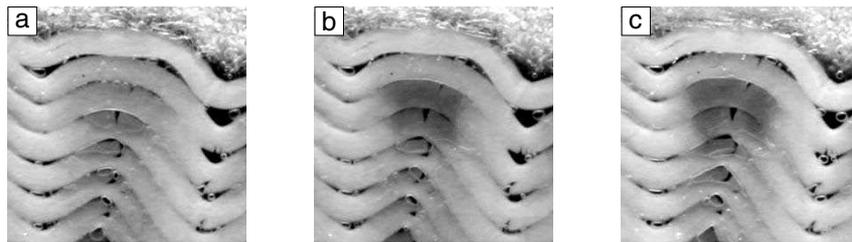


Figure 2-35 : Séquence montrant la migration du liquide de l'intérieur de la couche vers l'extérieur par les seules forces dues au gradient de pression entre le modèle et l'extérieur. Une lentille de liquide sombre grossit et est centrée sur le plan axial d'un pli. Le pli se contracte très légèrement alors que le raccourcissement général est arrêté. La base d'une image mesure environ 3 cm.

Il est important de remarquer tout de même que, dans la nature, l'établissement de cette force suppose de mettre en relation la migmatite avec une zone en dépression proche, soit latéralement, soit à un niveau supérieur.

L'étape « **Migration (2)** » dure en fait pendant toute la déformation progressive et correspond à l'évolution du réseau de veines. Ces veines sont dans les plans entre les sous-couches de cire et elles changent de taille et de forme, ce qui fournit une autre force motrice. La fermeture d'une veine et l'ouverture d'une autre un peu plus loin, dans le même plan de foliation, peut être assimilées à *un mouvement en masse de la veine avec son liquide*. Le mouvement s'effectue dans le plan de foliation sous l'effet des changements de volume des différentes parties du pli. Le mouvement horizontal conduit le liquide à l'extérieur et donc à l'extraction définitive. C'est pourquoi la fermeture de nombreuses veines après 20% de raccourcissement produit un pulse d'extraction. C'est une sorte d'« *expulsion forcée* ».

Ce mécanisme de migration (2) opère aussi lors du transfert de liquide des flancs vers la charnière des plis (article soumis à *JSG*). Ce transfert est lié à la transition géométrique qui a lieu dans les flancs pendant le plissement : ces derniers sont d'abord des zones en dilatation (rôle de puits) puis se transforment en zone en contraction (rôle de source). C'est un exemple typique de mouvement du liquide grâce à des gradients de déformation. Cependant, la composante verticale de ce mouvement implique que *la flottabilité du liquide favorise l'accumulation dans les points hauts, et donc les charnières d'anticlinaux*. Dans l'expérience 43, les synclinaux perdent en effet du liquide au profit des anticlinaux. Dans l'expérience 42, c'est beaucoup moins net et un des synclinaux a drainé aussi beaucoup de liquide (voir film correspondant).

Ainsi, la force motrice du liquide et des veines résulte d'une combinaison de trois types de gradients de pression :

1. Différence de pression entre l'extérieur et l'intérieur.
2. Gradients de pression nés de la déformation hétérogène.
3. Gradients de pression dus à la différence de densité solide/liquide.

Enfin, l'extraction finale s'accomplit facilement dans le modèle expérimental puisque le système est largement ouvert. Le liquide migre horizontalement et verticalement dans le plan vertical entre la cire et la paroi de la boîte. Une grande partie du liquide sort dans l'eau. Une très petite quantité (négligée) s'accumule au niveau de la couche de sable supérieure. Celle-ci est protégée par un film en Cellophane et le liquide reste coincé dans les plis de Cellophane.

Ce modèle est schématisé sur la figure 14 de l'article *JSG*.

9.5 Application du modèle d'extraction à la nature

L'application des résultats des expériences à la nature est aussi abordée dans l'article soumis à *JSG*. J'apporte ici des précisions et des figures supplémentaires en ce qui concerne les trois points du modèle que sont : la nécessité du raccourcissement pour la migration, la nature périodique de l'extraction, la forme et l'évolution des réseaux de leucosomes.

9.5.1 Nécessité du raccourcissement

Au sujet de l'action du raccourcissement sur l'efficacité de la ségrégation et de l'extraction, la démonstration sur le terrain a été apportée par les nombreuses études récentes sur le synchronisme entre la période d'anatexie, le plutonisme et les grandes phases de déformation (Vigneresse et al., 1991; Karlstrom & Williams, 1995; Roman-Berdiel et al., 1995; Vigneresse, 1995; Brown & Solar, 1998b; Brown & Solar, 1998a; Davis et al., 1998; Solar et al., 1998; Sawyer et al., 1999; Harris et al., 2000; Brown, 2001; Rosenberg & Berger, 2001; Vanderhaeghe, 2001). Dans les migmatites, c'est la concordance entre les structures, la forme et la position des leucosomes qui suggère que la déformation assiste la ségrégation et la migration (voir la première partie).

Nos expériences suggèrent qu'un processus dynamique à l'échelle des leucosomes est nécessaire pour faire migrer et extraire le liquide des migmatites. *Le raccourcissement permet à la fois la création de gradients de pression, des chemins de migration et des zones d'accumulation du liquide.* Cette hypothèse s'oppose à la vision statique de la migration, c'est-à-dire sans déformation aux limites du système.

Une autre évidence est que si la porosité était interconnectée à toute les échelles, alors la migration en conditions statiques serait possible et se traduirait par une compaction de toute l'unité migmatisée. Or, la compaction, même assistée par la gravité et les tensions de surface, ne permet dans les migmatites que la ségrégation à l'échelle centimétrique ou métrique (voir la première partie).

9.5.2 Périodicité de l'extraction

La nature périodique du transfert du magma dans la croûte est une idée qui a pour origine l'observation courante de l'hétérogénéité chimique, minéralogique, structurale et isotopique de nombreux plutons granitiques (France-Lanord & Fort, 1988; Stephens, 1992; Améglio et al., 1997). Le transfert du volume total de magma se ferait donc par étapes, par l'ascension successive de multiples quantités finies (« *batches* » en anglais) de différents magmas (Bons et al., 2001b). Les étapes antérieures à la mise en place du magma devraient donc être également et logiquement de nature périodique (Clemens & Mawer, 1992).

Dans les migmatites, les preuves de la périodicité de l'extraction sont rares et difficiles à apporter (Sawyer, 1998). La modélisation numérique de Vigneresse & Burg (2000) tend à démontrer la migration discontinue du liquide de fusion dans les migmatites par la compétition qui existe entre la production de liquide et son échappement gouverné par le passage de seuils de connectivité du réseau. Les expériences décrites ici expliquent plutôt la périodicité par le fait que *le processus d'extraction par étapes liées à la quantité de déformation implique forcément une fluctuation du volume extrait quand la déformation est hétérogène à l'échelle de l'unité migmatisée.*

9.5.3 Evolution temporelle du réseau de leucosomes

Dans nos expériences, la perméabilité est très anisotrope puisque les veines sont pour la plupart parallèles à la foliation. La migration du liquide est donc guidée par un réseau macroscopique constitué de ces veines horizontales, de quelques fractures discordantes et de zones ou bandes de cisaillement. Cependant, en considérant tout le modèle, ce réseau est complètement interconnecté par les deux plans verticaux des deux parois de la boîte (voir section 6, Fig. 2-17). Ces deux plans permettent *l'extraction* en connectant le modèle à la zone de basse pression extérieure, mais n'ont pas de rôle dans la *migration*.

Pour replacer le volume du modèle dans un contexte naturel (en faisant le changement d'échelle adéquate, voir section 3.3 et la figure 2-8), on doit se poser la question de l'interconnexion éventuelle du réseau de leucosome. L'existence des plans verticaux qui traversent et bordent l'unité migmatisée déformée est discutée dans l'article soumis à *JSG*. Dans la suite, pour discuter simplement des

processus de migration, l'extension horizontale des structures est supposée infinie. L'interconnexion s'entend donc en 2 dimensions dans le plan vertical perpendiculaire à la foliation et parallèle à la direction de raccourcissement.

Des réseaux interconnectés du pore microscopique au dyke d'alimentation de chambre magmatique ont été décrit (Vanderhaeghe, 1999; Weinberg, 1999). Cependant, *l'interconnexion parfaite* semble impossible et il reste toujours des zones isolées dont les exemples sont justement les migmatites non appauvries. Par ailleurs, toutes les migmatites appauvries ne présentent pas de réseau interconnecté (voir première partie). Rappelons qu'un tel réseau serait par exemple constitué de canaux continus de 1 cm d'épaisseur tous les mètres (Rutter & Neumann, 1995). Dans la première partie, deux options semblaient envisageables :

1. l'absence d'interconnexion du réseau signifie que l'extraction du liquide est impossible,

2. l'interconnexion doit être envisagée à une plus petite échelle et dans ce cas une migration sur de longues distances parallèlement à la foliation est indispensable pour permettre de réaliser l'extraction.

Les expériences analogiques nous apprennent que le réseau de leucosomes n'a pas besoin d'être interconnecté pour qu'une migration ait lieu. Pendant le développement de structures comme les plis et les zones de cisaillement, le liquide de fusion est ségrégué dans des poches de liquide pratiquement pur, qui ont ensuite une existence propre indépendante du réseau microscopique. Ces poches grandissent et peuvent se connecter entre elles. De plus, l'évolution géométrique du réseau de veines constitue elle-même une migration du liquide. Autrement dit, les veines sont transportées pendant le développement des plis.

Sur le terrain, ce mécanisme doit se traduire par des zones appauvries et des zones enrichies en leucosomes, sans que la structure plane de la migmatite soit détruite par des leucosomes discordants. Les expériences analogiques montrent que la tendance des veines est de passer des flancs vers les charnières des plis pendant la première partie du plissement (flambage ou « *buckling* »), puis de migrer le long du plan axial du pli pendant la phase d'aplatissement du pli. La figure 2-36 montre de tels exemples dans des plis. Ces exemples sont tirés de l'étude d'un affleurement de paragneiss migmatisé du sud du Massif Central Français qui sera décrit plus précisément dans la troisième partie.

En conclusion de ces comparaisons entre les résultats des expériences et les migmatites naturelles, les figures 2-37 et 2-38 présentent des images de terrain où la géométrie des leucosomes est très similaire à celle des veines dans la couche de cire.

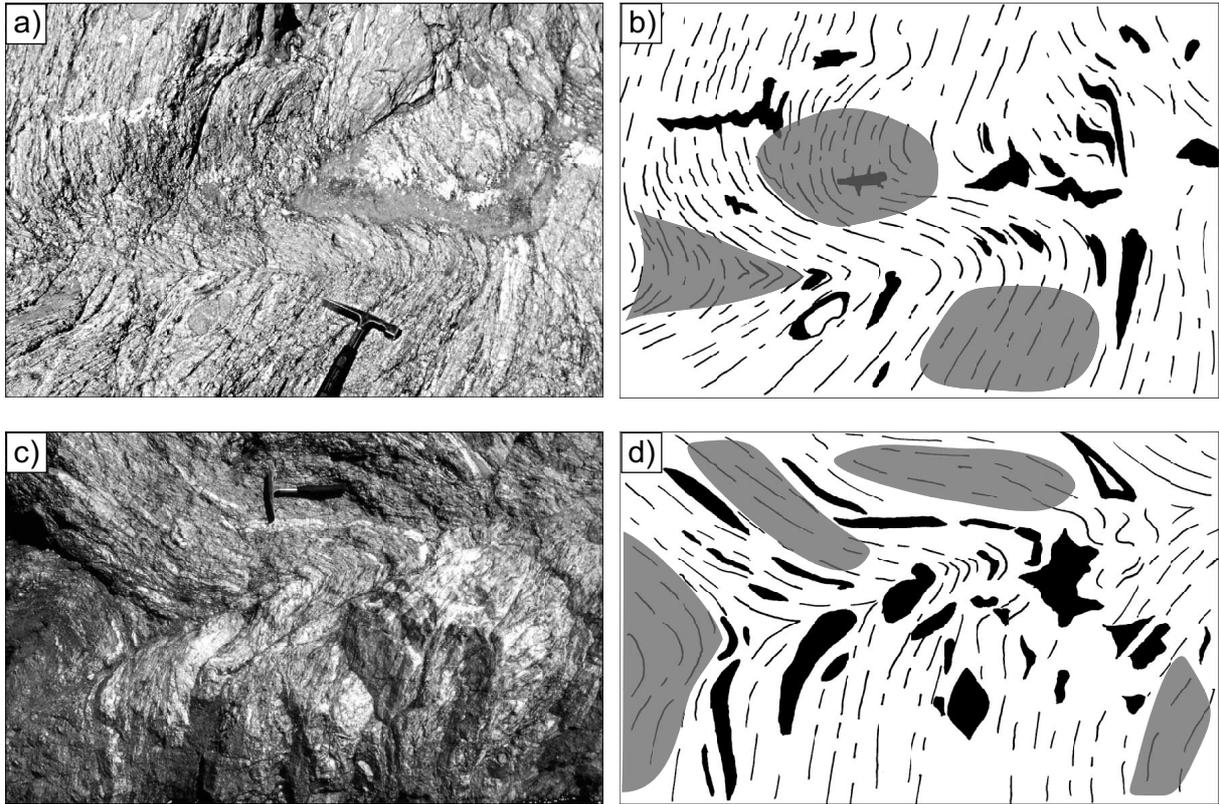
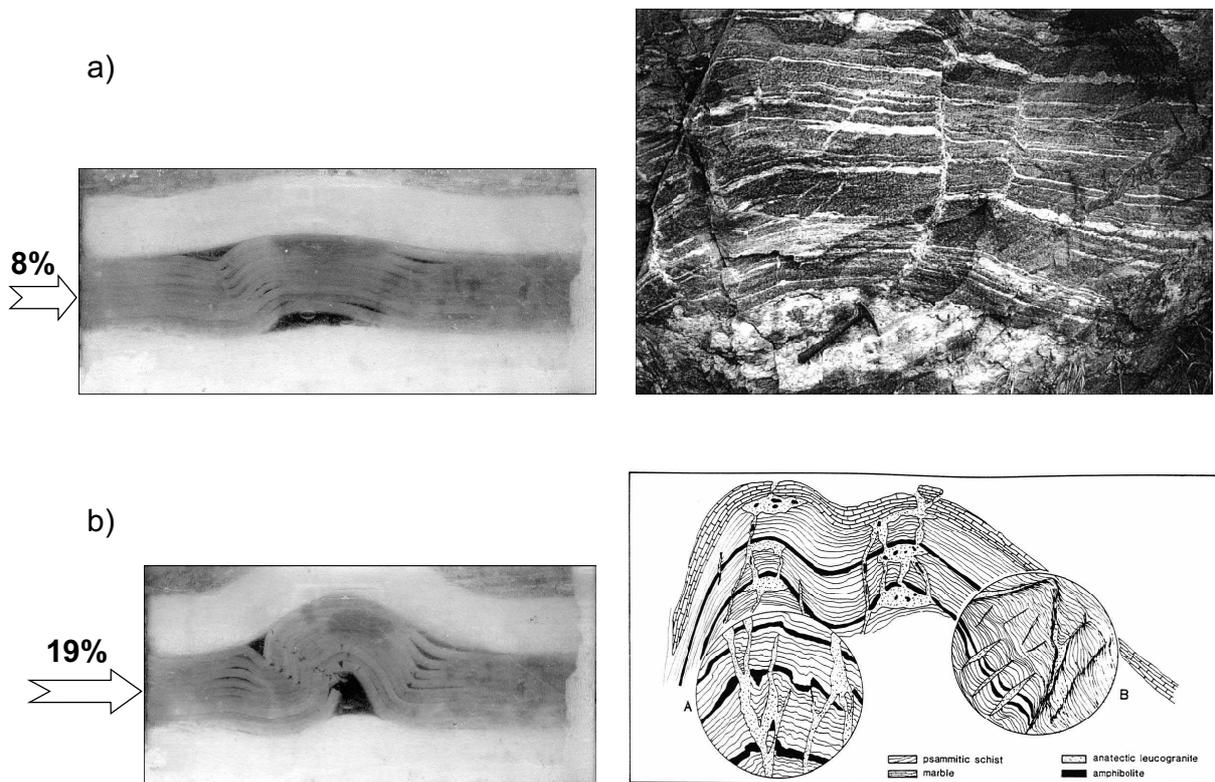
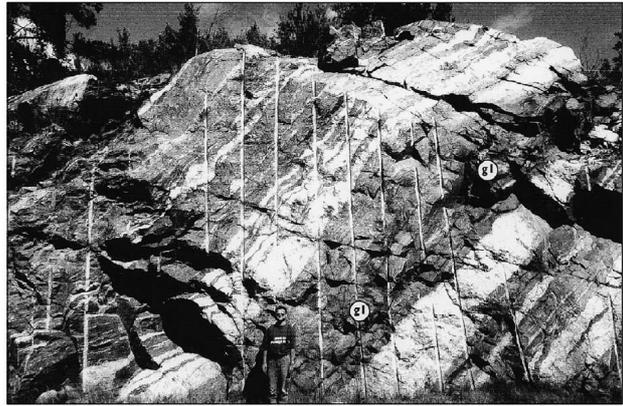
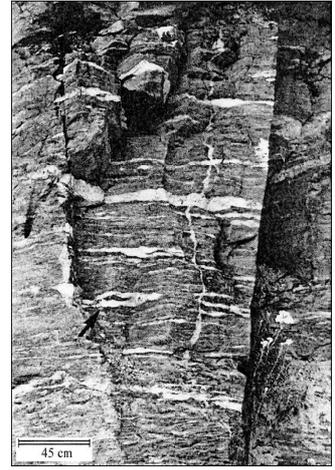
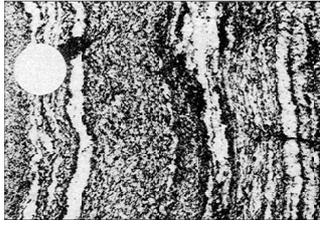


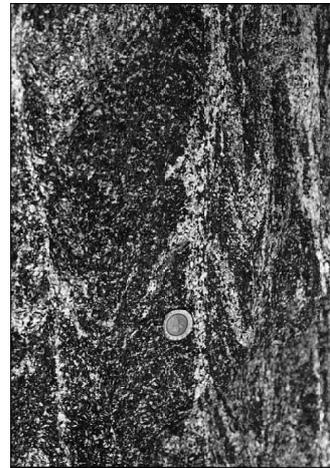
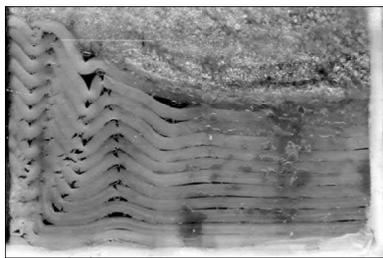
Figure 2-36 : Plis dans les migmatites du Pont de Bayzan, Massif Central français. Cet affleurement est décrit dans la troisième partie. Les interprétations indiquent les leucosomes en noir et les zones très mélanocrates en gris. Celles-ci sont placées soit dans les parties les plus pincées du pli, soit dans les flancs. Par comparaison avec les modèles analogiques, il semble que les zones mélanocrates soient la source des leucosomes. Le liquide de fusion aurait migré vers les charnières où se sont ouvertes des saddle reefs, mais aussi des fractures discordantes radiales (cas a et b).



10%
⇒



28%
⇒



10 Limitations et défauts des expériences

Les expériences décrites dans ce mémoire ne prétendent pas reproduire parfaitement la réalité. Cependant, la connaissance des défauts et des limitations des modèles expérimentaux permet de mieux comprendre leur portée et leur applications avec le terrain.

On peut recenser les problèmes suivants :

- Dans la cire, les veines sont remplies de liquide pur, ce qui assure une forte perméabilité et des vitesses de migration élevées. Or, les leucosomes ne sont pas forcément issus d'un liquide. Des cristaux résiduels, des fragments de mésosomes contribuent à une baisse de la perméabilité et une augmentation de la viscosité.
- La compaction et la percolation sont aisées dans la cire. Dans un gneiss, les fortes viscosités et la faible porosité freinent ces processus. Cependant, ce sujet fait l'objet d'un ardent débat et d'une recherche active aujourd'hui.
- Mécaniquement, quelques défauts subsistent dans le dimensionnement. Le caractère cassant de la cire semble parfois trop prédominant. L'hétérogénéité des migmatites n'ai pas encore suffisamment simulée.
- Les conditions limites comme le raccourcissement horizontal et le plan de décollement ont une importance fondamentale dans les résultats. De plus, les quantités de déformation dans les migmatites sont souvent bien supérieures à celles de nos expériences. La comparaison avec le terrain doit donc s'accompagner d'une certaine extrapolation des résultats.
- Enfin, il est manifeste que la déformation active la fusion de la cire. Cette propriété favorise la localisation. Il est probable que ce phénomène existe dans la nature mais nous manquons de données fiables.

Figure 2-37 (page 124): Comparaison entre le résultat de l'expérience 32 et des exemples de terrain à différentes échelles. Photo du haut d'après Vanderhaeghe (2001). Coupe du bas d'après Allibone & Norris

Figure 2-38 (page 125): Comparaison entre le résultat de l'expérience 43 et des exemples de terrain à différentes échelles. Ceux-ci ont déjà été présentés dans la partie 1 et sont tirés de Mengel et al. (2001), Rosenberg et al. (1995), Nyman et al. (1995) et Brown et al. (1995).

11 Articles

Les pages suivantes sont consacrées aux articles qui ont été écrits lors de cette thèse. Dans l'ordre :

11.1 Analog modelling of melt segregation and migration during deformation

Barraud, J., Gardien, V., Allemand, P. and Grandjean, P., 2001. *Physics and Chemistry of the Earth, Part A: Solid Earth and Geodesy* 26, 317-323.

11.2 Strain-dependence of the melt migration in partially molten crustal rocks.

Barraud, J., Gardien, V., Allemand, P. and Grandjean, P., 2001. *Journal of The Virtual Explorer* 4, <http://www.virtualexplorer.com.au/VEjournal/Volume4/>

11.3 Evolution of the melt-flow network during folding of stromatic migmatites: an analog modelling approach

Barraud, J., Gardien, V., Allemand, P. and Grandjean, P., soumis au *Journal of Structural Geology*.

Analog modelling of melt segregation and migration during deformation

J. Barraud, V. Gardien, P. Allemand, P. Grandjean

Laboratoire Dynamique de la Lithosphère, Université Claude Bernard ENS LYON, UMR 5570, 43 bd du 11 novembre, Bat GEODE, 69622 VILLEURBANNE CEDEX, France.

Abstract. Analog experiments of melt segregation and migration in lower crustal rocks have been conducted using paraffin wax. The wax has a mechanical planar anisotropy which reproduces the pervasive foliation of high-grade metamorphic rocks. The shortening of a layer of partially molten wax (melt fraction between 15 and 20%) results in the movement of a part of the liquid from the microscopic porosity of the wax to the outside of the layer in large accumulation sites. Four stages can be identified: (1) from the beginning of the shortening, melt segregates into dilatant foliation-parallel veins; (2) the development of a fold occurs with an increasing accumulation of liquid in the limbs; (3) strain localization and vein connection allows the nucleation of shear bands; (4) melt migration is channelled by the shear band toward external pockets. The first two stages involve melt percolation from kinematically controlled high-stress areas around growing veins. The third stage is associated with local attainment of a segregated melt critical concentration estimated at 14-15%. The last point involves both horizontal and upward migration of the melt. Melt segregation and migration are highly scale- and strain-dependent mechanisms.

between the formation of these melt accumulation sites and the rheology of partially molten rocks are not well understood. Indeed, our current knowledge on the mechanical behaviour of these rocks relies partly on experimental deformation of centimetric to millimetric samples (e.g., van der Molen and Paterson, 1979; Rushmer, 1995; Rutter and Neumann, 1995; Rosenberg and Handy, 2000). These studies have shown that at the grain scale, a drop in strength is observed because of the development of melt-bearing shear bands. This may occur at the onset of melting or at low melt fraction, below 10 vol.% (Rushmer, 1995; Rutter and Neumann, 1995; Rosenberg and Handy, 2000). When 10 to 30% of melt is present, the rock becomes a dense suspension of solid crystals and its viscosity is close to that of a liquid (« Rheological Critical Melt Percentage » or RCMP of Arzi (1978)). The vagueness of the RCMP concept has been improved by Vigneresse et al. (1996) who defined two thresholds for the melting transition: (1) the « Liquid Percolation Threshold » (LPT) at 8% allows local melt movement by wetting of grain boundaries and (2) the « Melt Escape Threshold » (MET) at 20-25% corresponds to « the onset of transport over large distances of the melt and part of the residual solid phase ». Vigneresse et al. (1996) emphasize the difference between the solid to liquid (melting) and liquid to solid (crystallization) transitions. Thresholds are higher for crystallization, as shown also by Lejeune and Richet (1995): around 45% melt, a rigid skeleton is constructed by interaction of the crystals, increasing by several orders of magnitude the viscosity of the system. This study focuses on the deformation of migmatites and thus deals with the melting transition and melt fractions lower than 25%.

This paper presents analog experiments which have been conducted in order to study the relationships between the presence of melt and the development of folds. At the scale of a rock exposure, melt is not homogeneously distributed. Physical parameters such as viscosity, tensile strength, stresses and deformation rate are anisotropic because of the structural heterogeneities of high-grade rocks such as the

1 Introduction

It is a common observation in migmatitic terrains that melt generally occupied sites created by heterogeneous deformation, as for example shear zones, foliation-parallel veins, boudin necks and hinges of folds (e.g., Macaudière et al., 1992; Hand and Dirks, 1992; Davidson et al., 1994; Nyman et al., 1995; Brown and Solar, 1998; Vanderhaeghe, 1999). At centimetric to metric scale, melt segregation and migration are synchronous with the deformation (Vigneresse et al., 1996; Brown and Rushmer, 1997). However, the links

Correspondence to: Joseph Barraud, barraud@univ-lyon1.fr

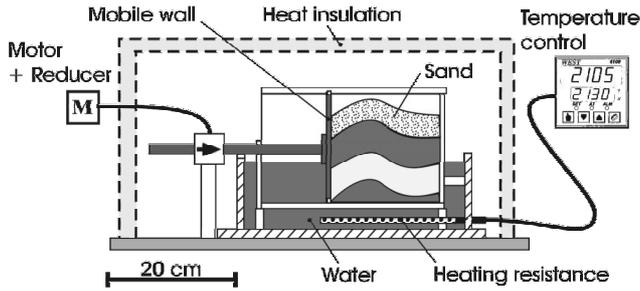


Fig. 1. Sketch of the experimental apparatus. The mobile wall moves at 2 mm per hour and deforms the multilayer model consisting of a layer of partially molten wax embedded between two layers of soft paraffin. The upper layer is sand. This model is heated by a water bath maintained at constant temperature.

heterogeneous mineralogical and petrological composition, the pervasive foliation and the heterogeneous deformation (Hand and Dirks, 1992; Collins and Sawyer, 1996; Brown and Solar, 1998). Thus, in the case of compressional tectonics, the shortening of partially molten series involves different processes occurring at different times and different places within metric to kilometric-scale structures. For example, ductile and brittle behaviours are observed together in a shear zone (Davidson et al., 1994) or leucosomes are concentrated sometimes in the hinge of folds (Collins and Sawyer, 1996; Kisters et al., 1998) or sometimes in the limbs (Macaudière et al., 1992).

Analog models have been designed to reproduce the melt segregation and migration processes occurring at the metric scale. The analog material is partially molten wax. Its planar mechanical anisotropy simulates foliation. This paper presents this new analogue material and the experimental conditions under which it was deformed. Experiments in which melting occurred are compared with experiments without melting. The effects of melt segregation and migration processes on the mechanical behaviour are then addressed.

2 Experimental conditions and materials

2.1 Experimental apparatus

The experimental apparatus consists of a Plexiglas box, 350 mm long, 150 mm width and 250 mm height with one mobile wall fixed to a screw jack (Fig. 1). This screw jack is coupled to an electric motor through a reducer. In each experiment, the mobile wall has a constant velocity of 2 mm per hour. The deformation rate, averaged on both the length and duration of the run, was around $2 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$.

The experimental apparatus was placed in a tank containing water maintained at a constant temperature and was surrounded by a polystyrene case to minimise large thermal gradients in the model. With this device, the temperature of the wax layer could be set within the range 45-

65°C with a precision of 2-3°C. As the heat capacity of both paraffin and wax is high ($3 \text{ J/g/}^\circ\text{C}$), the temperature was stable during an experiment. This allows the insulating case to be temporarily removed in order to observe the state of the deformation, without cooling off the model.

2.2 Materials

The analog materials used were wax and paraffin, which are mixtures of hydrocarbons (alkanes macromolecules $\text{C}_n\text{H}_{2n+2}$ with n from 14 to 70). One of the main advantages of using paraffins in analog modelling is their ductile behaviour at the laboratory scale for temperatures above 30°C, while they are solid at room temperature. Paraffin has previously been used to reproduce small-scale structures such as folds, boudins or shear zones (Neurath and Smith, 1982; Abbassi and Mancktelow, 1992; Grujic and Mancktelow, 1998). Mancktelow (1988) and Rossetti et al. (1999) have studied the rheology of paraffin with melting points around 50°C. At homologous temperatures (T/T_m as defined by Rossetti et al. (1999) where T_m is the melting temperature in °C) higher than 0.7, paraffins behave as Newtonian fluids (Rossetti et al., 1999). We used a macrocrystalline paraffin with melting point of $69 \pm 1^\circ\text{C}$ and a microcrystalline wax with a liquidus temperature around 75°C, both supplied by Total Fina. Wax is a more complex mixture than paraffin, with more components. At 50°C, the lightest components of wax begin to melt. The amount of liquid increases with temperature. At 60°C, wax is a two-phase material, consisting of a liquid phase and a solid viscous phase. At 75°C, the wax is completely liquid. A complete separation between liquid and solid matrix is not possible. Thus, at the temperature of the experiments ($60 \pm 2^\circ\text{C}$), the melt fraction is difficult to measure. Prior to deformation, the liquid was homogeneously distributed in the layer. In comparison with the thresholds defined by Vigneresse et al. (1996), the melt fraction was inferred to be above the LPT because melt percolation was observed during the experiments (see below). On the other hand, the MET was not reached because the solid matrix kept its cohesion. Moreover, the volume of melt that migrated outside the layer during the experiments was between 10 and 20% of the initial volume of wax. For these reasons the melt fraction was estimated to be between 15 and 20 vol.% during the experiments described below (Fig. 3 and 4). The viscosity of the liquid lies in the range 10^2 - 10^3 Pa s (Total Fina Documentation).

The rheology of paraffin and wax has not been systematically investigated. Simple uniaxial tests with dead weights showed that they have a viscous behaviour. At 50-55°C (homologous temperature of 0.71-0.78), the viscosities of paraffin and wax are about 10^6 Pa s and 10^8 Pa s , respectively. Thus, the viscosity contrast between paraffin and wax is around 100. Therefore, wax can be used as an analogue of a partially molten rock and paraffin is used as a solid soft medium in which wax is embedded.

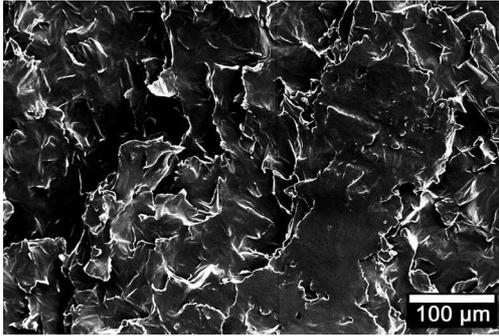


Fig. 2. S.E.M. image of the wax prior to deformation showing its planar fabric.

The pervasive foliation of high-grade metamorphic rocks has also been taken into account. This foliation induces an anisotropy in the tensile strength. The formation of foliation-parallel fractures is easier than the formation of foliation-perpendicular fractures, which is important in vein localization. In order to reproduce this behaviour, before the experiment, the wax layer was subjected to an operation that created a horizontal mechanical intrinsic anisotropy. The layer was molded by pouring liquid wax in a rectangular mold. During the 12 hours corresponding to the entire crystallization of the wax, a dead weight of 4 kg was applied at the surface of the mold. The S.E.M. image of the figure 2 shows the planar fabric of the wax.

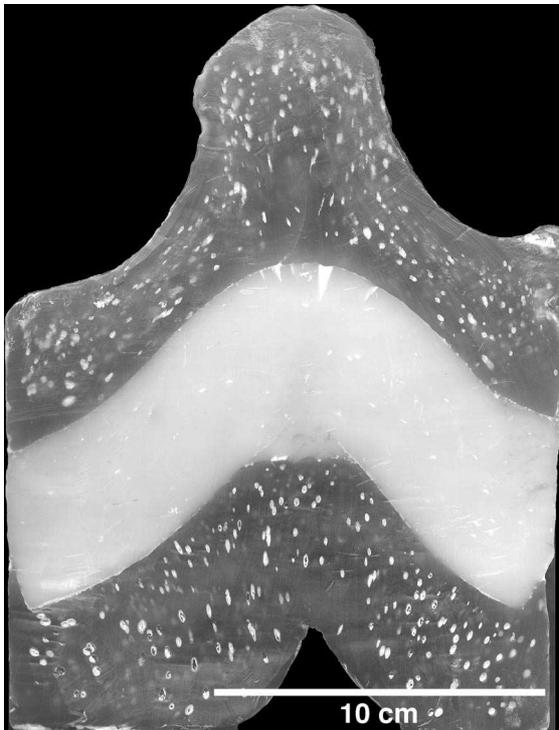


Fig. 3. Model without melting after a shortening of 36%. This view is a scan of a cross-section made in the model after having removed the upper layer of sand. The white dots in the paraffin layers are deformed bubbles. The fold has a regular shape with a thickened hinge. The strain is distributed throughout the whole of the folded layer.

2.3 Standard execution of an experiment

Each model consisted of a stack of four layers, from the bottom to the top, these are a layer of paraffin, a layer of wax, a layer of paraffin and a layer of sand. Each layer had a thickness of 3.5 centimeters. The sand was used as a load to increase the vertical stress. After installation in the experimental box, the layers were annealed at the chosen temperature for 2 days. Initially, the layers were 250 mm long and 150 mm wide. The shortening was applied during 45 hours at 2 mm/h, so the final length became 160 mm and the shortening percentage was 36%. Although no photos were taken during the experiment, the progression of the deformation was monitored regularly. After the end of the experiment, the model was cooled to room temperature during 24 hours and then cut vertically. The cross-section was digitized for image processing. The contrast and the clarity of sections could be enhanced with commercial image processor software. The dark-gray liquid oil could then be easily distinguished from the light-gray wax. Measurements of the areal proportions of liquid to solid were made with the NIH Image program (Rasband, 1997).

3 Experimental results

3.1 Liquid-free deformation experiment

At temperatures below 50°C, no liquid is present in the wax layer. Figure 3 shows the result of the buckling of a multilayer model consisting of a wax layer embedded between two paraffin layers. The temperature of the wax layer is $48 \pm 1^\circ\text{C}$. An antiformal fold has developed in the middle of the model. The wave length of the fold is 170 mm at the end of the experiment. The class of the fold is 1C (Ramsay, 1967). The wax layer has been thickened of about 15% in the limbs and 40 to 50% in the hinge of the fold. The convex side of the fold is affected by radial open cracks that appear after 30% of shortening, showing the effect of a strong stretching that the ductility of the wax is unable to accommodate. On the concave side of the hinge, horizontal shortening and vertical stretching occurred. These features are common in natural folds (Ramsay, 1967; Twiss and Moores, 1992; Abbassi and Mancktelow, 1992).

This experiment shows that the mechanical behaviour of the wax is overall ductile under subsolidus conditions. Moreover, even if the hinge region is the most deformed zone within the fold, the deformation is distributed throughout the whole layer. This experiment is our reference in investigating the role of the liquid on the style of the deformation.

3.2 Experiments in the presence of liquid phase

As previously discussed, a liquid phase develops at temperature above 50°C. Figure 4 displays the result of the

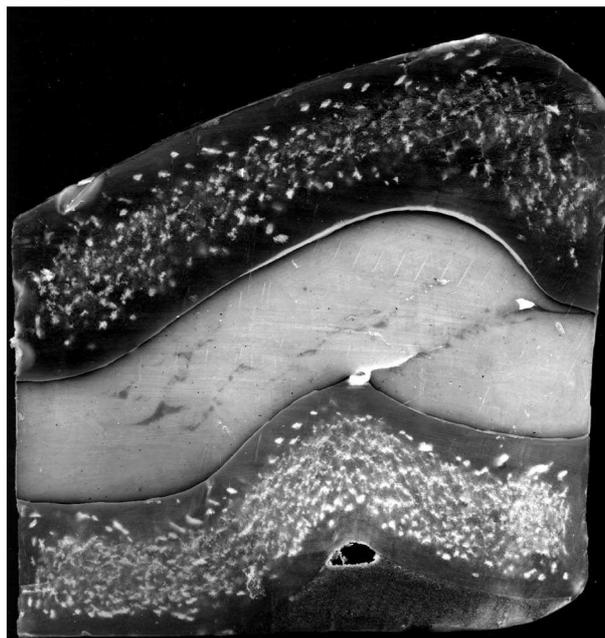
buckling of the model with the wax layer at 60°C. The following description of the progress of the experiment has been done by analyzing 4 experiments with different amounts of shortening. Each stage described here is therefore the result of one single experiment. Figure 5 summarizes the observed evolution of the deformation and proposes a model for the deformation of partially molten rocks and for melt migration at the metric scale.

The first step of the deformation (0-5% of shortening) is a homogeneous thickening of the layer. From the beginning of the shortening many dilatant cracks filled with the liquid open parallel to the horizontal foliation (Fig. 5A). These cracks are long (10-50 mm) and thin (< 1 mm). The development of these fractures is produced by two combined factors: (1) the liquid pressure in the cracks and (2) the horizontal compressive stress which is parallel to the cracks at this stage of deformation. Both factors amplify stresses at the tips of cracks. This development is favoured by the mechanical anisotropy of wax.

A buckling instability occurs and the fold begins to develop with a rotation of the limbs and an elevation of the hinge (Fig. 5B). During this stage, the aperture of the former cracks increases and therefore can be considered as veins. These veins acquire a sigmoidal shape which results from the rotation and shearing of the cracks in the limbs (Fig. 5B). This process involves deformation of the solid wax around and between nearby veins. The liquid segregates from these deforming areas into the opening veins because the liquid flows down the pressure gradients (Brown and Rushmer, 1997; Ruben, 1998). The position of the veins is not random. They are concentrated below the finite neutral surface, i.e. on the concave side of the fold, and in the limbs. After 22% of shortening, veins represent about 5% of the surface area of the external side of the wax layer. In the internal part of the layer, the amount and aperture of veins are always lower, and lies in the range 3-4%.

The enlargement of the veins implies an increasing heterogeneity. The system gradually evolves from a homogeneous distribution of liquid in microscopic sites to a heterogeneous collection of pockets of liquid in a more and more deformed solid layer. These pockets localize increasingly the deformation and nucleate shear bands (Fig. 5C and 5D). When the shortening amount becomes greater than 25%, the fold becomes asymmetric. The process of nucleation of a shear band begins at about 30% of shortening, when one limb of the fold is vertical or reversed. This limb thus defines a reverse shear zone in which the vein density relative to matrix is 8-10% (Fig. 5C). Next, a shear band develops by veins interconnection (Fig. 5D). This shear band is filled by liquid and fragments of wax. Shortening is then accommodated on this shear band only. Limb rotation induces a deformation of veins. According to their position and orientation with respect to the shear planes, their aperture increases or decreases. The closing veins expel the melt toward the sides of the model, perpendicularly to the shortening direction. These veins are therefore obliterated.

A. Center



B. Side

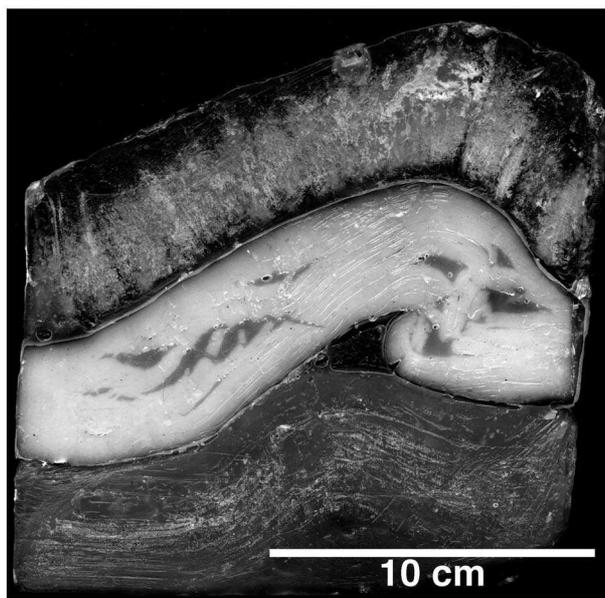


Fig. 4. Model with melting (15-20% of melt) after shortening of 36%. These views are scans of the model after having removed the upper layer of sand. The white dots in the paraffin layers are deformed bubbles. The melt is dark gray and has segregated in layer-parallel veins. (A) Cross-section in the center of the model. The fold is asymmetric with a shear band developed in the reverse limb. The areal proportion of veins with respect to the total surface of the layer is 3%. However, with respect to the surface of the shear band, it reaches 14%. (B) Side view of the model. A comparison with the central cross-section shows the deformation is not cylindrical. The veins are larger and more numerous. The breaking of the layer in the shear zone has not occurred in the short limb.

When the shear band is formed, two pockets of melt parallel to the fold hinge line develop at each extremity of the shear band (Fig. 5D). These pockets are a path for horizontal

melt migration. The largest pocket is located on the concave side of the fold.

Grujic and Mancktelow (1998) showed that inclusions of very weak material in paraffin can nucleate shear zones. Our experiments agree with these results but also show that a more complex and complete process occurs: (1) with increasing strain the segregation of the liquid into dilatant sinks (veins) creates weak inclusions; (2) these pockets of liquid are concentrated in the limbs of the fold; (3) the nucleation of the shear bands occurs in these particular places; (4) the liquid migrates through the shear band to the concave side of the fold. Horizontal melt migration occurs also at each step of this process.

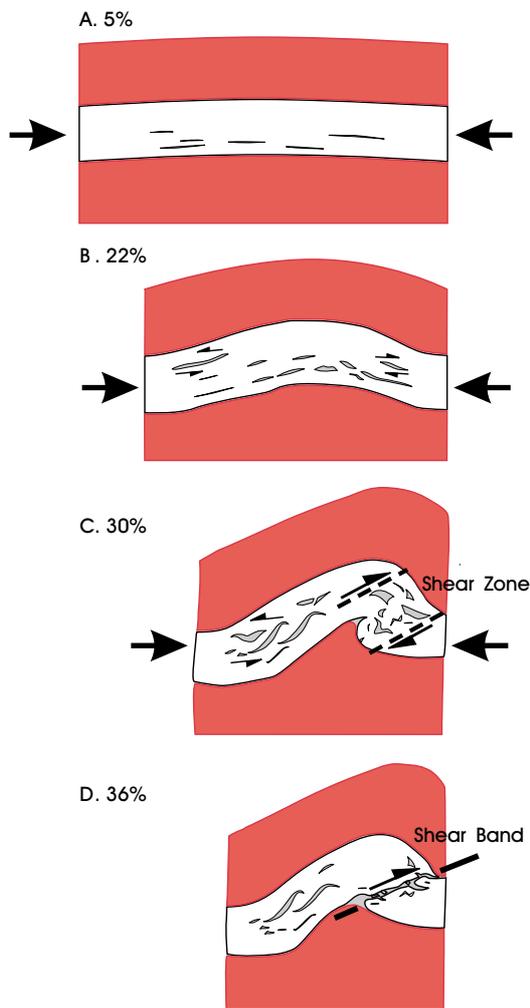


Fig. 5. Evolution of the deformation of the partially molten wax layer. (A) From the beginning of the shortening, melt segregates into dilatant foliation-parallel veins. (B) The development of the fold occurs with an increasing accumulation of liquid in the limbs and in the concave side of the hinge. The shape of the veins becomes sigmoidal with the rotation of the limbs. The melt migrates horizontally through interconnected veins toward the sides of the model. (C) The fold becomes asymmetric and the short limb evolves as a shear zone. In the shear zone, the veins open or close according to their position and orientation with respect to the shear planes. (D) Strain localization and veins connection allows the nucleation of a shear band. Two pockets of liquid form at the tips of the shear band.

4 Discussion

4.1 Similarity between model and nature

These experiments are relevant in the discussion on the melt migration processes in naturally deformed rocks only if geometric, kinematic and dynamic similarities are achieved between nature and model (Ramberg, 1981). The quantities which describe the geometry, kinetics and dynamics of melt migration processes are the characteristic length l , the shortening velocity V , the melt viscosity η_m , the viscosity of the solid matrix η_s , the melt density ρ_m , the density of the solid matrix ρ_s and the depth h at which the processes occur in the crust. The melt pressure and the tensile strength are also important but very little is known about their value in the model and in nature (Davidson et al., 1994). These quantities are thus not taken into account.

This study is focused on processes which occur at centimetric to metric scale in nature. So the ratio between the characteristic length in the model and in the natural object is 1 to 10^2 . To achieve dynamic similarity, the ratio Ψ between the vertical force due to gravity (i.e. the weight of the column of height h) and the viscous force is used:

$$\Psi = \frac{\rho_s g h l^2}{\eta_s V l} = \frac{\rho_s g h l}{\eta_s V}$$

This ratio must be equal in model and in nature for the structures to be dynamically similar. The values of the parameters are listed in Table 1. These parameters are not independent but linked by Ψ , which reinforce the geometric and kinematic similarity. For nature, two orders of magnitude are permitted for the viscosity, the velocity and the length because of the variability of the natural settings. Moreover, the values of viscosity of lower crustal rocks are still matter of debate (Carter and Tsenn, 1987).

Two other ratios, ρ_s/ρ_m and η_s/η_m , should be equal both in nature and experiments. For densities, both ratios are around 1.2. The gravity processes are therefore correctly scaled. Our experiments show that the pressure gradients due to the heterogeneous deformation are more important to drive the melt segregation than the buoyancy forces. For viscosities, a difference of at least ten orders of magnitude has been demonstrated in nature between melt and solid (Scaillet et al., 1998). In the experiments, the contrast of viscosity is similar, so we assume that the natural melt-enhanced phenomena are reproduced. The similarity is also based on the similarity in mechanical behaviour observed between the analog material and natural migmatitic rocks. In the experiments, ductility, liquid-assisted fractures and mechanical anisotropy were observed. These features have been often described in migmatitic terrains (McLellan, 1984; Brown, 1994; Davidson et al., 1994; Vanderhaeghe, 1999).

Table 1. Physical parameters controlling the melt migration processes in nature and in the model.

	Length (m)	Depth (m)	Shortening velocity (m y ⁻¹)	Density of the solid ρ_s (kg m ⁻³)	Density of the liquid ρ_m (kg m ⁻³)	Viscosity of the solid η_s (Pa s)	Viscosity of the liquid η_m (Pa s)
Nature	0.2-20	30-40×10 ³	0.001-0.1	2800-3000	2400-2500	10 ¹⁶ -10 ¹⁸	10 ⁴ -10 ⁶
Model	0.2	0.1	18	950	800	10 ⁸	10 ² -10 ³

Table 2. Ratios used to constrain the similarity between nature and the model. These ratios should be equal for similarity to be achieved.

	Ψ	ρ_s/ρ_m	η_s/η_m
Nature	10 ² -10 ⁴	1.12-1.25	10 ¹⁰ -10 ¹⁴
Model	4	1.2	10 ¹⁰ -10 ¹¹

4.2 Segregation and migration of the melt

Two types and two scales of melt migration were observed in the experiments: (1) the percolation of the liquid from the solid matrix to the veins at the millimetric scale; (2) the flow of the liquid through veins and shear bands to the outside at the centimetric scale. The microscopic properties of the wax are difficult to determine. No information is available concerning the flow of the liquid through the porosity of the wax. In rocks and at the grain scale, Vigneresse et al. (1996) argue that a liquid percolation threshold (LPT) at 8% by volume must be reached to allow felsic melt to wet grain boundaries and form a continuous film throughout the material. A similar threshold is assumed to be overcome in the wax. During the development of the fold, the veins take a sigmoidal or a bell shape (Figs. 5B and 5C), which implies an heterogeneous deformation around the veins. The flow of the liquid is always down the pressure gradients (Brown and Rushmer, 1997; Rubin, 1998). Thus, overpressured zones expel the liquid into the dilatant veins. The second point is related to the fact that in the experiments, the areal proportion of veins in cross-section increases from the core (3%) to the sides of the model (5-7%, compare Figs. 4A and 4B). The larger proportion is not related to a higher degree of melting of the sides because the temperature is almost the same in the whole layer. Thus, an horizontal migration occurs from the core to the sides through interconnected veins toward the vertical sides of the box on which pressure is lower than inside the model. Next, this melt migrates upwards and laterally along the model edge toward the outside which is therefore the main sink in the experiments. This implies that natural vertical shear bands existing in transpressional systems may be sinks for melt (Vigneresse and Tikoff, 1999).

In addition, horizontal and upward movement of melt occurs in the shear bands which affect the fold limbs. A dilatancy-pumping process seems to be the motor of this phenomenon. Although we did not record each step of the progressive deformation, we assume that the apertures of some veins, especially around the developing shear band, decrease after a maximum. When the inclination of the limbs

exceed 30-40°, the veins close and expel the melt. Cosgrove (1993) discussed a similar process occurring in anisotropic fluid-rich sediments.

4.3 Rheology of partially molten anisotropic rocks

In the melt-free experiment, shear band development did not occur. The strain became relatively uniformly distributed in the whole layer of wax, but with a concentration in the hinge of the fold. After the same shortening amount (36%), a shear band crosscuts the melt-bearing wax layer. The percentage of veins in comparison with the total surface of the folded layer was estimated just before the development of a shear band (Fig. 6), to be 4 to 5%. With respect to the shear zone, the percentage increases to 7-8%. It is 14 to 15% if only the region around the future shear band is considered (Fig. 6). The width of this zone is defined as being the vein characteristic length. The length of this zone is the thickness of the folded layer. One can notice that the values 14-15% are within the RCMP range which is 10-30% melt (Arzi, 1978). However, the RCMP is defined for an increasing proportion of particles in a liquid (Arzi, 1978; Vigneresse et al., 1996). In our experiments, the percentage is defined as a proportion of weak inclusions and depend on the scale of observation. The value of the RCMP is associated with geometrical and mineralogical parameters. In our experiments, the number and size of veins depend on the deformation history that a given zone has followed.

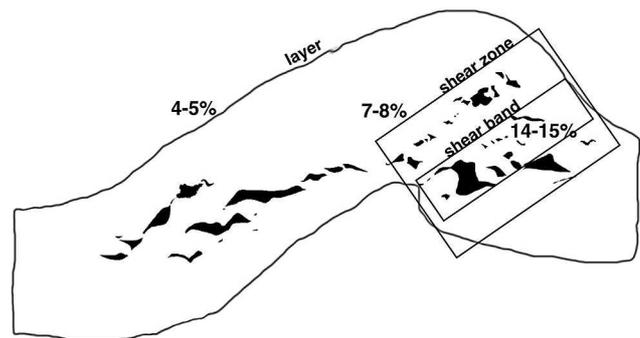


Fig. 6. Evolution of the areal proportion of melt segregated in veins as a function of the reference area. The contour is the wax layer at the end of the shortening. The areal proportion of veins increases when the reference area diminishes. It is 4-5% in the total surface, 7-8% in the shear zone surface defined by the boundaries of the reverse limb and 14-15% in the region around the future shear band. Concerning the rheological behaviour of partially molten materials, these observations emphasize the scale-dependence of a critical percentage of liquid phase in the solid before weakening.

5 Conclusions

Paraffin wax is a good analogue for partially molten crustal rocks. Analog experiments of melt segregation and migration can be scaled using this material. The shortening of a layer of partially molten wax results in the movement of a part of the liquid from the microscopic porosity of the wax to the outside of the layer in large accumulation sites. Four stages can be identified: (1) from the beginning of the shortening, melt segregates into dilatant foliation-parallel veins; (2) the development of the fold occurs with an increasing accumulation of melt in the limbs and a horizontal migration of melt through interconnected veins toward the outside; (3) strain localization and vein connection allows the nucleation of shear bands; (4) melt migration is channelled by the shear band toward external pockets. The mechanical anisotropy is important during the first stage. The first two stages involve melt percolation from kinematically controlled high-stress areas around growing veins. The melt migrates to the vertical sides of the model which are the sites of lowest pressure in the experimental system. The third stage is associated with local attainment of an areal proportion of veins estimated at 14–15%. The last point involves both horizontal and upward migration of the melt. Finally, the results of our experiments have shown that melt segregation and migration are highly scale- and strain-dependent mechanisms.

Acknowledgements. We thank John Grocott and an anonymous reviewer for their helpful and constructing comments.

References

- Abbassi, M.R. and Mancktelow, N.S. Single layer buckle folding in non-linear materials I. Experimental study of fold development from an isolated initial perturbation. *J. Struct. Geol.*, *14*, 85–104, 1992.
- Allibone, A.H. and Norris, R.J. Segregation of leucogranite microplutons during syn-anatectic deformation: an example from the Taylor Valley, Antarctica. *J. Metam. Geol.*, *10*, 589–600, 1992.
- Arzi, A.A. Critical phenomena in the rheology of partially melted rocks. *Tectonophysics*, *44*, 173–184, 1978.
- Brown, M. The generation, segregation, ascent and emplacement of granite magma: the migmatite-to-crustally-derived granite connection in thickened orogens. *Earth-Science Reviews*, *36*, 83–130, 1994.
- Brown, M. and Rushmer, T. The role of deformation in the movement of granitic melt: views from the laboratory and the field. In: Holness, M.B. (Editor), *Deformation-enhanced Fluid Transport in the Earth's Crust and Mantle*. Chapman & Hall, London, 1997.
- Brown, M. and Solar, G.S. Shear-zone systems and melts: feedback relations and self-organization in orogenic belts. *J. Struct. Geol.*, *20*, 211–227, 1998.
- Carter, N.L. and Tsenn, M.C. Flow properties of continental lithosphere. *Tectonophysics*, *136*, 27–63, 1987.
- Collins, W.J. and Sawyer, E.W. Pervasive granitoid magma transfer through the lower-middle crust during non-coaxial compressional deformation. *J. Metam. Geol.*, *14*, 565–579, 1996.
- Cosgrove, J.W. The interplay between fluids, folds and thrusts during the deformation of a sedimentary succession. *J. Struct. Geol.*, *15*, 491–500, 1993.
- Davidson, C., Schmid, S.M. and Hollister, L.S. Role of melt during deformation in the deep crust. *Terra Nova*, *6*, 133–142, 1994.
- Grujic, G. and Mancktelow, N. Melt bearing shear zones: analogue experiments and comparison with examples from southern Madagascar. *J. Struct. Geol.*, *20*, 673–689, 1998.
- Hand, M. and Dirks, P.H.G.M. The influence of deformation on the formation of axial-planar leucosomes and the segregation of small melt bodies within the migmatitic Napperby Gneiss, central Australia. *J. Struct. Geol.*, *14*, 591–604, 1992.
- Kisters, A.F.M., Gibson, R.L., Charlesworth, E.G. and Anhaeusser, C.R. The role of strain localization in the segregation and ascent of anatectic melts, Namaqualand, South Africa. *J. Struct. Geol.*, *20*, 229–242, 1998.
- Lejeune, A.-M. and Richet, P. Rheology of crystal-bearing silicate melts: an experimental study of high viscosities. *J. Geophys. Res.*, *100*, 4215–4229, 1995.
- Macaudière, J., Barbey, P., Jabori, J. and Marignac, C. Le stade initial de fusion dans le développement des dômes anatectiques: le dôme du Velay (Massif Central français). *C.R. Acad. Sci.*, *315*, 1761–1767, 1992.
- McLellan, E. Deformational behaviour of migmatites and problems of structural analysis in migmatite terrains. *Geol. Mag.*, *121*, 339–345, 1984.
- Mancktelow, N.S. The rheology of paraffin wax and its usefulness as an analogue for rocks. *Bulletin of the Geological Institutions of the University of Uppsala*, *14*, 181–193, 1988.
- Neurath, C. and Smith, R.B. The effect of material properties on growth rates of folding and boudinage: experiments with wax models. *J. Struct. Geol.*, *4*, 215–229, 1982.
- Nyman, M.W., Pattison, D.R.M. and Ghent, E.D. Melt extraction during formation of K-Feldspar + Sillimanite migmatites, West of Revelstoke, British Columbia. *J. Petrol.*, *36*, 351–372, 1995.
- Ramsay, J.G. *Folding and fracturing of rocks*. McGraw-Hill, New York, 1967.
- Rasband, W. Image 1.61. National Institute of Health. Research Services Branch NIMH, 1997.
- Rosenberg, C.L. and Handy, M.R. Syntectonic melt pathways during simple shearing of a partially-molten rock analogue (norcamphor-benzamide). *J. Geophys. Res.*, *105*, 3135–3149, 2000.
- Rossetti, F., Ranalli, G. and Faccenna, C. Rheological properties of paraffin as an analogue material for viscous crustal deformation. *J. Struct. Geol.*, *21*, 413–417, 1999.
- Rubin, A.M. Dike ascent in partially molten rock. *J. Geophys. Res.*, *103*, 20901–20919, 1998.
- Rushmer, T. An experimental deformation study of partially molten amphibolite: application to low-melt fraction segregation. *J. Geophys. Res.*, *100*, 15681–15695, 1995.
- Rutter, E. and Neumann, D. Experimental deformation of partially molten Westerly granite under fluid-absent conditions with implications for the extraction of granitic magmas. *J. Geophys. Res.*, *100*, 15697–15715, 1995.
- Scaillet, B., Holtz, F. and Pichavant, M. Phase equilibrium constraints on the viscosity of silicic magmas, 1. Volcanic-plutonic comparison. *J. Geophys. Res.*, *103*, 27257–27266, 1998.
- Twiss, R.J. and Moores, E.M. *Structural geology*. W.H. Freeman and Company, New York, 1992.
- Vanderhaeghe, O. Pervasive melt migration from migmatites to leucogranite in the Shuswap metamorphic core complex, Canada: control of regional deformation. *Tectonophysics*, *312*, 35–55, 1999.
- Vigneresse, J.-L., Barbey, P. and Cuney, M. Rheological transitions during partial melting and crystallization with application to felsic magma segregation and transfer. *J. Petrol.*, *37*, 1579–1600, 1996.
- Vigneresse, J.L. and Tikoff, B. Strain partitioning during partial melting and crystallizing felsic magmas. *Tectonophysics*, *312*, 117–132, 1999.