

Les réactions de fusion : un autre point de vue sur la formation des magmas par fusion partielle

J.-François Moyen

14 janvier 2004

Depuis longtemps, les géologues savent que les roches magmatiques se forment par fusion partielle d'autres roches, produisant tout en même temps un résidu solide et un magma, qui migre vers la surface.

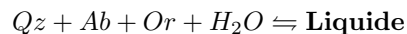
Le développement des méthodes de pétrologie expérimentale, à partir des années 80, a permis d'étudier plus en détails ces processus; on est maintenant capable de décrire assez précisément ce qui se passe réellement lors de la fusion partielle d'une roche, quels sont les minéraux formés et ceux qui disparaissent, etc.

Une notion centrale a émergé à l'occasion de ces travaux, celle de "réaction de fusion" : c'est une réaction chimique entre différentes espèces minérales, analogue aux réactions métamorphiques mais impliquant un liquide. Raisonner en terme de réaction de fusion permet d'expliquer et d'unifier un bon nombre de notions de la pétrologie magmatique : solidus, différence entre solidus anhydre et hydraté, origine des séries magmatiques et plus généralement des différents types de magmas . . . Cette approche amène aussi à traiter de la même façon métamorphisme et magmatisme, et à abolir la différence quelque peu arbitraire faite entre les deux domaines !

1 – Les réactions de fusion

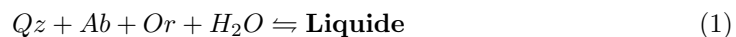
1.1 Que sont les réactions de fusion ?

La fusion partielle des roches peut être décrite par des réactions chimiques, tout à fait analogues aux réactions métamorphiques (mais impliquant un liquide magmatique comme un des produits de la réaction). Par exemple, la réaction "classique" de formation de liquides granitiques à l'eutectique du système Quartz—Albite—Orthose peut s'écrire¹



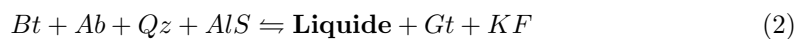
1.1.1 Congruent, incongruent

Par définition, on qualifie de *congruente* une réaction de fusion durant laquelle seul du liquide est formé, par exemple



A l'inverse, si une nouvelle phase solide se forme au cours de cette réaction, on parle de fusion *incongruente*, par exemple

1. Les abréviations suivantes sont utilisées pour les espèces minérales : Qz : quartz ; Ab : albite ; Or : orthose ; Pg : plagioclase ; KF : feldspath potassique ; Bt : biotite ; Gt : grenat ; Cd : Cordiérite ; AlS : Silicates d'alumine (andalousite, sillimanite ou disthène, selon les conditions P—T) ; Ms : muscovite ; Opx : orthopyroxène ; Cpx : clinopyroxène ; Ol : olivine ; Hb : hornblende ; Amp : amphibole ; Sp : Spinelle ; Ep : épidote ; Coe : coésite, forme de haute pression du quartz ; Phg : phengite, mica de haute pression ; Par : paragonite, mica de haute pression ; Jd : jadéite, pyroxène sodique de haute pression

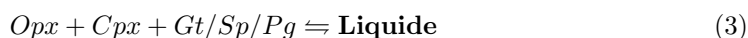


1.2 Fusion hydratée ou anhydre

La présence ou l'absence d'une phase fluide (en général l'eau, mais aussi le CO_2 ou parfois le fluor) joue un rôle important dans le contrôle des réactions de fusion qui se déroulent. Schématiquement, on peut distinguer trois cas :

1.2.1 La fusion en condition complètement anhydres

L'eau est absente du système (même en tant qu'eau liée à des minéraux comme les micas). C'est par exemple le cas des réactions de fusion partielle dans le manteau, comme



1.2.2 La fusion en présence d'une phase liquide libre

Il existe de l'eau liquide (ou gazeuse, ou supercritique) dans le système, en plus de l'eau liée aux minéraux. C'est par exemple le cas de la réaction de "fusion eutectique" du système granitique :

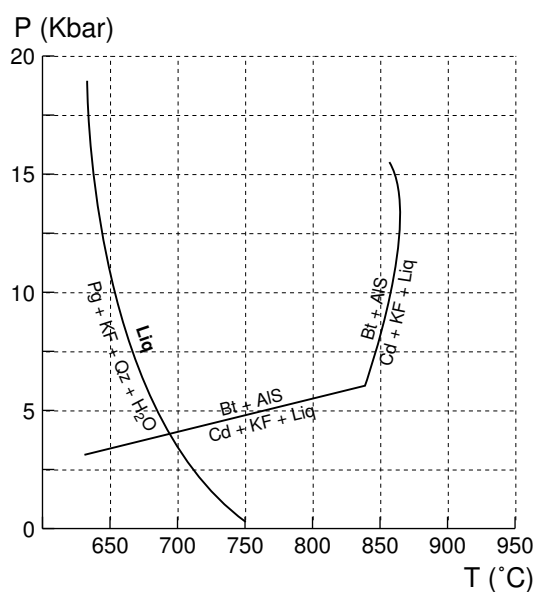
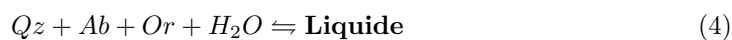
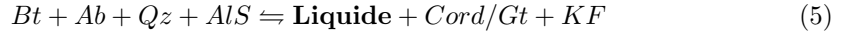


FIG. 1 – Deux réactions de fusion possibles pour les roches crustales : fusion en présence d'eau (équation 4) et fusion-déshydratation de la biotite (équation 5).

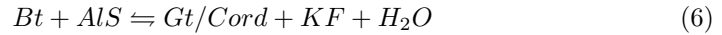
1.2.3 La “fusion-déshydratation”

La seule eau du système est celle qui est liée à des minéraux comme les micas ou les amphiboles. Dans ce cas, les réactions de fusion sont souvent liées à la destruction d’un minéral hydraté, et la formation d’un nouveau minéral contenant à peu près les mêmes éléments chimiques, mais anhydre (il s’agit donc, nécessairement, d’une réaction de fusion incongruente). Dans une mauvaise traduction de l’anglais “dehydration melting”, on parle de “fusion-déshydratation”. La réaction suivante décrit par exemple la fusion-déshydratation de la biotite :



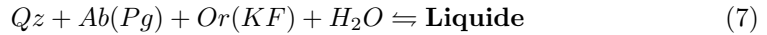
On peut mieux comprendre cette réaction si on essaye de la décomposer :

– D’une part, en une réaction métamorphique “normale” de déstabilisation du mica :



C’est une réaction métamorphique que l’on peut en effet observer dans la formation de certaines granulites. Selon la pression, le produit sera la cordiérite (à basse pression) ou le grenat (à plus haute pression).

– D’autre part, en une réaction de fusion “eutectique”



dans laquelle l’eau et le KF ont été apportés par la réaction précédente.

Le bilan de ces deux réactions correspond bien à celle écrite plus haut (équation 5).

1.3 Quelle réaction a effectivement lieu ?

Parmi ces réactions, on peut se demander laquelle va effectivement se dérouler lors du réchauffement progressif d’une roche (par exemple, à l’occasion d’un épisode métamorphique). Le facteur principal à prendre en compte est la composition minéralogique de la roche source.

Considérons les réactions évoquées plus haut (5 à 7, et appliquons-les à trois systèmes simples (à 10 kbar) :

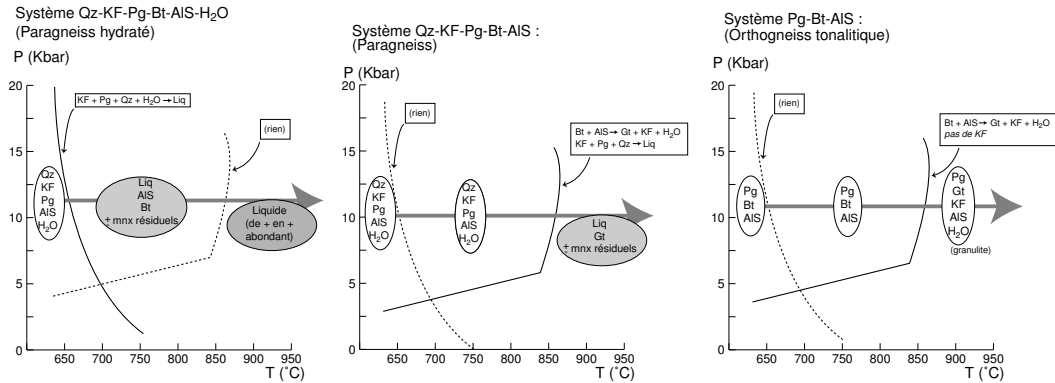


FIG. 2 – Comportement de trois systèmes simplifiés lors des réactions 4 et 5. 1. Paragneiss hydraté ; 2. Paragneiss sans eau ; 3. Orthogneiss tonalitique. La flèche grise dans les trois cas indique un réchauffement progressif (métamorphisme prograde) conduisant à la fusion. Les assemblages minéraux successifs sont indiqués.

1. Un paragneiss hydraté (et avec du feldspath potassique) ;
2. Un paragneiss sec ;
3. Un orthogneiss tonalitique, sec.

Dans le cas du paragneiss hydraté, lors du réchauffement de cette roche, la fusion commence dès qu'elle atteint la première réaction (équation 4), vers 650 °C; en effet, ce gneiss contient tout les réactifs nécessaires pour que cette réaction se déroule. Lors de la traversée de la courbe de la réaction 5, le seul effet est d'incorporer les produits de la destruction de la biotite au liquide.

Pour un paragneiss sec, en revanche, rien ne se passe sur la courbe correspondant à la réaction 4; en effet, un des réactifs, l'eau, fait défaut. Cependant, lorsque la température dépasse 850 °C, cette roche franchit la courbe correspondant à la réaction 5 et les deux réactions couplées décrites plus haut se déroulent: la biotite se décompose pour libérer de l'eau (et du feldspath potassique supplémentaire, ce qui aurait permis à cette réaction d'avoir lieu même dans une roche initialement privée de ce minéral) (équation 6); dès lors, on se trouve dans une situation où la température est supérieure à celle nécessaire à la réaction 7 (on est à droite de cette courbe), et où tout les produits nécessaires sont présents: la fusion peut donc avoir lieu.

Pour un système tonalitique, enfin, l'absence d'eau empêche bien évidemment la fusion sur la courbe correspondant à la réaction eutectique 4. Au passage de la courbe correspondant à la déstabilisation de la biotite, la biotite se décompose selon la réaction 6, libérant ainsi de l'eau, du grenat et du feldspath potassique; mais, en l'absence de quartz, la réaction 4 ne peut pas avoir lieu, bien qu'on soit à des températures supérieures à celles nécessaires pour cette réaction.

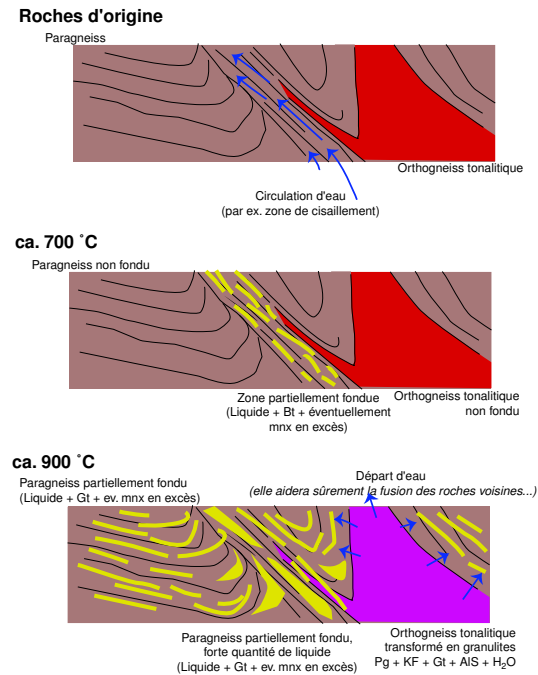


FIG. 3 – Fusion partielle d'une croûte composite, formée d'un socle tonalitique sur lequel sont déposés des sédiments (paragneiss). Une zone de cisaillement draine de l'eau dans une partie du système. Les roches correspondent aux systèmes de la figure 2

De cette façon, on voit que si l'on chauffe une croûte composite (figure 3), on peut très bien se retrouver avec des secteurs complètement fondus cohabitant avec d'autres qui ne le sont pas, alors même que l'ensemble de la région a été portée dans les mêmes conditions de pression et de température...

1.4 Observations de terrain

Dans certains terrains migmatitiques, cette séquence de réactions s'observe directement, et on retrouve la trace de deux épisodes de fusion successifs, en présence d'eau puis par fusion-déshydratation. La figure 4 montre un affleurement situé sur la bordure Sud du complexe migmatitique du Velay. On y observe des gneiss, plus ou moins migmatitiques, avec ici et là des nodules de cordiérite.

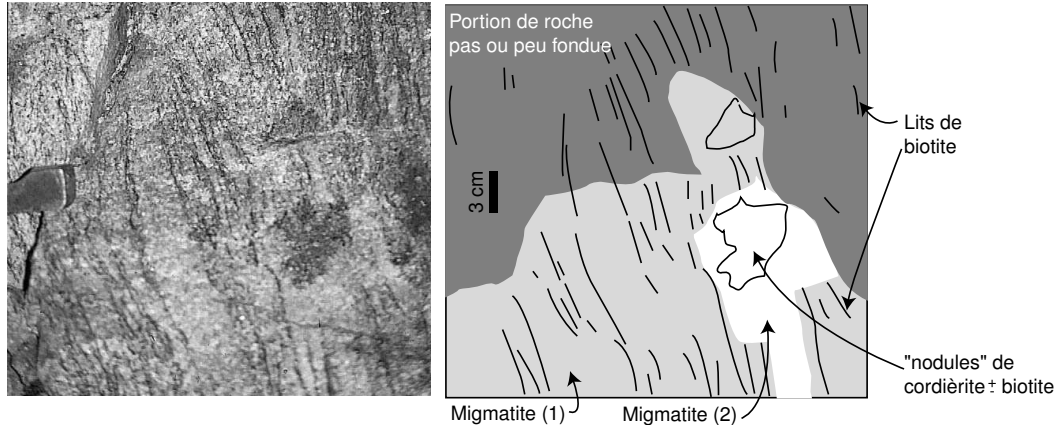


FIG. 4 – Un affleurement migmatitique à Meyras (07), Sud du massif granitique du Velay. On y distingue deux générations de fusion; les liquides migmatitiques de la génération (1) se sont formés par la réaction $Qz + Ab + Or + H_2O \rightarrow \text{Liquide}$, qui n'implique pas la biotite: on obtient donc des films de liquides granitiques, piégés entre des lits de biotite; celles de la seconde génération se sont formés par la réaction $Bt + Ab + Qz + Al_2SiO_5 \rightarrow \text{Liquide} + Cord + KF$, où la formation de liquide s'accompagne de la destruction de biotite: on obtient donc des zones de liquide autour des nodules de cordiérite, et il n'existe plus de lits de biotite résiduelle dans ces zones.

Une observation plus attentive montre que les nodules de cordiérites sont entourés d'une auréole très claire, correspondant à des roches sans biotites: ces régions sont des anciens liquides, formés par une réaction de fusion-déshydratation de la biotite, qui a donc disparu au profit de la cordiérite (équation 5).

Ces secteurs sont sécants sur la foliation générale de la roche, qui est portée par une alternance de lits de micas, et de lits leucocrates à quartz et feldspath. Cette alternance correspond probablement à des lits de liquides, séparés par des amas de biotites restitiques, il s'agirait donc d'une fusion partielle n'entraînant pas la disparition de la biotite, c'est à dire la fusion en présence d'eau de l'équation 4.

Cet affleurement porte donc la trace de deux générations successives de fusion partielle, d'abord en présence d'eau puis par fusion-déshydratation de la biotite.

2 – A propos de quelques notions “classiques”

La présentation habituelle des problèmes de fusion partielle se fait en terme de solidus sec ou hydraté, de liquidus, ou encore d'eutectique. Comment ces notions se rattachent-elles aux réactions de fusion que l'on vient d'évoquer?

2.1 A propos des solidus...

Le petit exemple précédent montre qu'un paragneiss hydraté va fondre à relativement basse température, selon la réaction de fusion eutectique en présence d'eau 4.

En revanche, le même paragneiss, en l'absence d'eau, va fondre par fusion-déshydratation de la biotite 5.

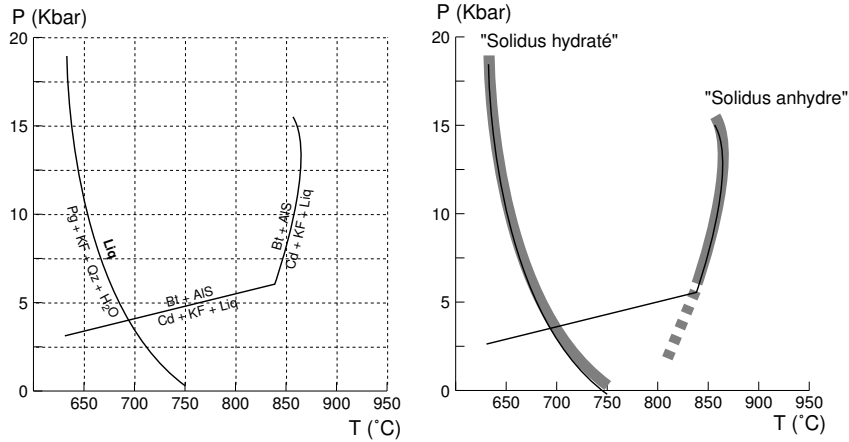


FIG. 5 – La signification réelle des “solidus sec” et “solidus hydraté” dans les systèmes acides : il s’agit en réalité des réactions de fusion eutectique en présence d’eau (eq. 4) et de fusion-déshydratation de la biotite (eq. 5) !

En d’autres termes, un système hydraté va fondre (franchir son solidus) à plus basse température qu’un système sans eau libre : les deux réactions correspondent respectivement au “solidus hydraté” et au “solidus sec” du système granitique !

Les choses sont en réalité, évidemment, un peu plus compliquées; en effet, il existe de nombreuses autres réactions de fusion que celles rapidement évoquées ici (voir paragraphe 4 –).

2.2 Le liquidus

Par définition, le liquidus sépare le domaine où coexistent solide et liquide, du domaine purement solide; c’est en fait une notion qui est surtout utile dans le cas des processus de cristallisation fractionnée, ou on cherche à savoir comment un magma initialement totalement liquide évolue. Dans le cas de la fusion partielle, on n’atteint jamais le liquidus (il reste toujours une phase solide).

Dans le cas de la fusion partielle, une ou plusieurs réaction(s) de fusion successives vont opérer, qui vont amener à incorporer successivement les minéraux au liquide magmatique. Ainsi par exemple, dans le cas de la fusion du manteau (sec) (équations 28 et suivantes, plus bas), va-t-on d’abord créer un liquide à partir de la fusion incongruente de pyroxènes; puis, quand un des réactifs (le clinopyroxène, en général) sera épuisé, la fusion progressera par le biais d’une réaction d’incorporation progressive de l’orthopyroxène au liquide; enfin, aux températures proches du liquidus, la réaction sera la fusion progressive de l’olivine et son incorporation au liquide.

Par conséquent, le liquidus du système sera défini comme étant le point (ou la courbe) où le dernier minéral finit par fondre; la question qui se pose alors est celle de la nature de ce dernier minéral (dernier solide présent au liquidus).

Dans la partie 4 –, on se focalise sur les processus proches du liquidus, et on n’essaie pas systématiquement de décrire les réactions d’incorporation successives de minéraux au liquide à l’approche du liquidus.

2.3 Les eutectiques

On sait que, pour de larges gammes de compositions, les premiers liquides formés ont à peu près la même composition, quelle que soit en détail la composition de la roche source; cette composition est celle de l’eutectique, ou minimum thermique du système. Ainsi, les

systèmes “acides” (quartz, plagioclase, feldspath alcalin) ont-ils un eutectique qui correspond à des liquides granitiques, tandis que les péridotites ont un eutectique de composition basaltique.

Du point de vue des réactions de fusion, cet eutectique correspond à une ou plusieurs réactions, qui toutes vont produire des liquides de composition analogue. Les proportions stoechiométriques de ces réactions sont telles que le mélange des minéraux qui fondent donne une composition qui est celle du liquide eutectique.

De ce fait, il semble bien que la stoechiométrie d’une même réaction soit très variable selon la composition des minéraux et de la roche source. En réalité, tout se passe comme si la seule constante est la composition chimique du liquide formé lors de la fusion, et que les coefficients stoechiométriques s’adaptent pour que le liquide garde la composition eutectique.

Le mieux qu’il soit possible de faire est donc de définir la gamme de coefficients réalistes dans les conditions naturelles.

Dans la nature ou au laboratoire, on constate cependant des variations, mineures mais significatives, des compositions des liquides formés autour de l’eutectique; on conçoit bien en effet que, par exemple dans la réaction 4, la quantité de quartz dans les produits aura un effet direct sur la teneur en SiO_2 du magma.

3 – Aspects quantitatifs

La discussion ci-dessus est très qualitative, à la fois au point de vue des conditions P—T dans lesquelles ces réactions ont lieu, et des proportions de minéraux impliquées. Il est tentant d’utiliser une approche plus quantitative . . . elle n’est hélas pas très fructueuse, pour diverses raisons.

3.1 Dans quelles conditions se déroulent-elles ?

Même la détermination des conditions de pression et de température où ces réactions ont lieu est délicate. Dans le métamorphisme “classique”, on peut, à partir de bases de données contenant les propriétés thermodynamiques des différentes espèces minérales, calculer de façon précise les conditions P—T d’une réaction.

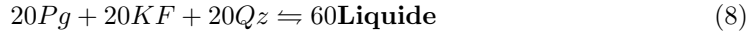
En toute rigueur, on ne peut tracer une ligne sur un diagramme P—T que si la réaction implique des produits et des réactifs dont la composition ne varie pas du tout (réaction univariante). Or, les réactions de fusion affectent des minéraux à la composition très variable, et des liquides magmatiques, encore plus variables ! Les réactions de fusion sont donc en général multivariantes, et ne correspondent pas à une ligne dans un diagramme P—T, mais plutôt à un domaine, plus ou moins large. Les dessins des figures suivantes sont donc très simplifiés, puisqu’ils assimilent les réactions à des lignes univariantes.

Pour pouvoir déterminer exactement la position des réactions de fusion dans l’espace P—T, il faudrait que les compositions des liquides et des minéraux soient précisément connues, et fixes. Dans quelques cas simples (fusion d’un manteau anhydre en particulier), il a été possible de construire une base de données thermodynamique permettant de “fixer” les réactions et de calculer leur position dans l’espace P—T . . . mais pas dans le cas général !

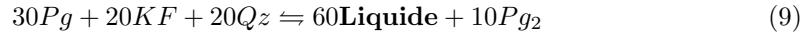
3.2 Comment ces réactions sont-elles déterminées ?

Comme on l’a vu, il n’est pas possible de calculer de façon thermodynamiquement rigoureuse la positions P—T des réactions de fusion. Leur détermination est, pour l’essentiel, complètement empirique, et se base sur les résultats des expériences de “pétrologie expérimentale” : on place dans un four ou une presse chauffée un assemblage de minéraux correspondant à la roche dont on veut étudier la fusion; on porte cet assemblage dans les conditions de pression et de température appropriées; on étudie alors les produits formés.

Pour définir une réaction de fusion, on effectue en général un bilan de masse à partir des réactifs et des produits : ainsi, si on a mis dans une capsule 40 % de plagioclase, 40 % de feldspath potassique, et 20 % de quartz; et que l'on retrouve 20 % de plagioclase, 20 % de feldspath potassique, plus de quartz mais 60 % de liquide, on peut supposer que la réaction de fusion impliquée dans cette expérience en particulier s'écrit



En réalité, les choses ne sont pas forcément aussi simple, il faut en particulier prendre en compte le fait que la composition de nombreux minéraux est largement variable; il faut donc considérer la composition précise des minéraux. Dans l'exemple ci-dessus, par exemple, si une moitié seulement du plagioclase final est analogue au minéral initial, alors que la seconde moitié en est différente, on peut penser que la réaction s'écrit plutôt



Souvent, pour plus de précision on détermine les réactions de fusion en effectuant un bilan de masse pour chaque élément entre les réactifs et les produits.

4 – Quelques réactions de fusion géologiquement importantes

4.1 Dans les roches de la croûte

La croûte continentale est principalement formée de gneiss, de composition typiquement granodioritique ($FK + Pg + Qz + Bt \pm Amp$); un composant mineur, mais dont on va voir qu'il peut fondre facilement, est représenté par les sédiments et métasédiments ($Qz + Pg \pm KF + Bt \pm Ms \pm Als$). Les deux systèmes sont donc, minéralogiquement et chimiquement, assez voisins.

En réalité, ce sont les métasédiments qui ont attiré le plus d'attention, les orthogneiss n'ont été que peu étudiés; il semble possible d'extrapoler les processus décrits dans les sédiments.

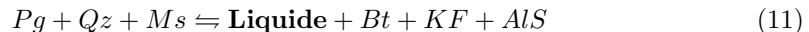
4.1.1 Réactions de fusion

Par ordre de température croissante, 4 réactions principales ont été décrites :

Fusion en présence d'eau à relativement basse température (vers 600 °C). Cette réaction correspond à la classique fusion eutectique, déjà évoquée plus haut (équation 4); les études expérimentales montrent qu'il est possible d'incorporer au liquide d'autres composants que ceux présentés dans l'équation 4, si bien que la forme généralisée peut s'écrire :



Fusion-déshydratation de la muscovite. Cette réaction, qui s'écrit



est l'équivalent de la réaction métamorphique "normale" de formation des silicates d'alumine :



Bien entendu, selon le secteur du diagramme P-T où l'on se situe, le silicate d'alumine formé sera l'andalousite, le disthène ou la sillimanite.

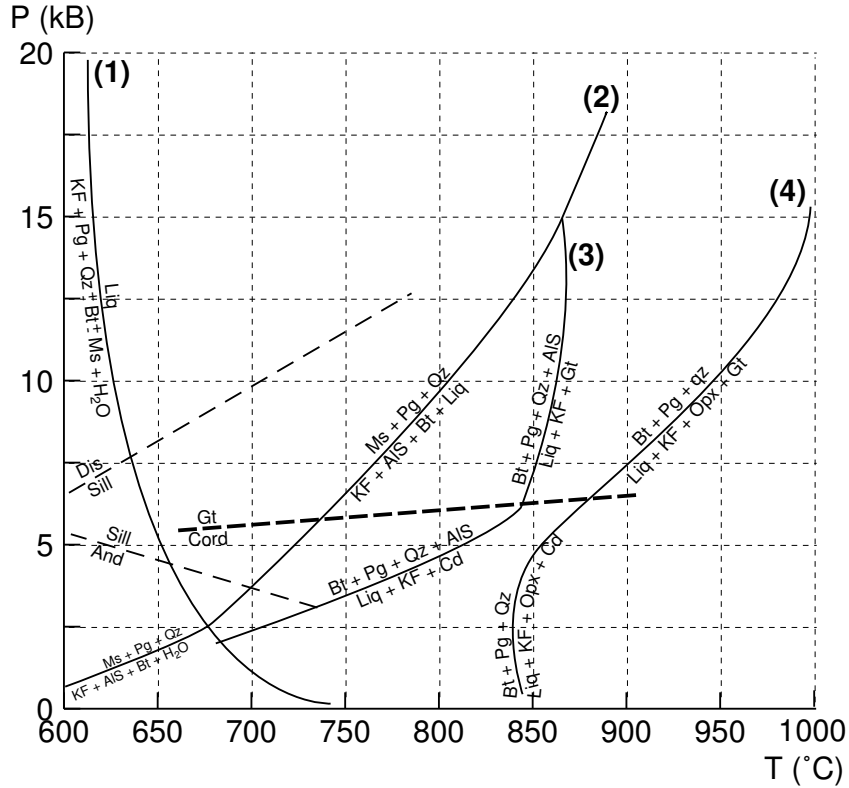
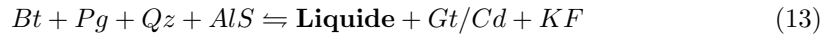
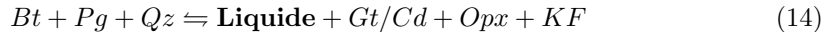


FIG. 6 – Quelques réactions impliquées dans la fusion partielle de métasédiments et, par extension, de roches crustales en général. Les réactions principales sont : 1. Fusion en présence d'eau (solidus hydraté). 2. Fusion-déshydratation de la muscovite. 3. et 4. Fusion déshydratation de la biotite; ces réactions sont celles qui produisent le plus de liquide.

Fusion-déshydratation de la biotite. Il y a en réalité deux réactions successives, d'abord celle de l'équation 5 :



puis celle-ci :



Dans ces deux cas, le minéral formé (grenat ou cordiérite) dépendra de la pression : en dessous de 5–10 kB (variable, selon les études), la cordiérite est stable; au dessus, c'est le grenat.

Comme expliqué plus haut, ces réactions sont l'équivalent de réactions métamorphiques "normales".

4.1.2 Solidus et liquidus

Le solidus "hydraté" des roches acides correspond à la réaction de fusion eutectique (équation 10 ou sa variante 11). Le solidus sec, quant à lui, correspond ici à la fusion-déshydratation de la biotite (équations 13 et 14); les roches crustales contiennent presque toute de l'eau, en quantité au moins suffisante pour former des micas, il n'y a donc pas de roches crustales absolument sèches.

Le dernier minéral au liquidus est vraisemblablement le grenat ou la cordiérite, formé lors des réactions de fusion incongruentes.

4.1.3 Magmas formés

Les deux premières réactions (fusion à saturation d'eau, et fusion-déshydratation de muscovite) produisent généralement assez peu de liquide, peut-être 10 % au total. Ce sont les réactions de fusion-déshydratation de la biotite qui produisent de larges volumes de liquides granitiques : ces deux réactions sont donc d'importance capitale pour l'évolution de la croûte continentale !

Les réactions 11 et 12 produisent des liquides très acides ($> 70\%$ SiO_2), potassiques et alumineux, en faibles quantités (voir compositions en annexe); sur le terrain, ils correspondent le plus souvent à de petits filons ou massifs de leucogranites (en particulier, des leucogranites à deux micas), ou encore aux parties granitiques de migmatites.

Les réactions 13 et 14 produisent des liquides moins acides (65–70 % SiO_2), également alumineux, mais plus calciques et moins potassiques. Ces liquides forment des granites à cordiérite ou à grenat (sans qu'on sache bien si le grenat ou la cordiérite qu'on y observe a cristallisé depuis le liquide, ou correspond à celui formé par les réactions incongruentes). Il peut s'agir de très grands massifs, comme celui du Velay par exemple.

4.2 Dans les roches basiques

La fusion partielle de roches basiques (basaltes, et leurs dérivés : amphibolites, éclogites ...) est sans doute un phénomène mineur comparé aux deux autres cas décrits ; de ce fait, les études sur le sujet ont été moins nombreuses.

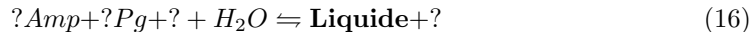
4.2.1 Réactions de fusion

De façon assez analogue au cas des roches crustales, il semble que le processus principal soit la déshydratation-fusion de l'amphibole. Mais l'amphibole n'est pas stable dans la totalité du champ de pression et de température, et on est amené à distinguer plusieurs cas :

A basse pression en dessous de la limite de stabilité du grenat (10 kBar environ), la réaction principale est la fusion-déshydratation de l'amphibole, de la forme



La réaction de fusion correspondant au solidus hydraté



semble n'être capable de produire que des quantités mineures de liquide, et elle est de ce fait à peu près impossible à étudier expérimentalement (et sans doute de peu d'importance géologique).

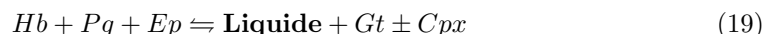
A moyenne pression le grenat est stable; mais son apparition se fait par des réactions impliquant aussi l'épidote, de la forme



Il faut donc prendre en compte, non seulement la fusion-déshydratation de l'amphibole, mais aussi celle de l'épidote. Ces deux réactions s'écrivent respectivement



et



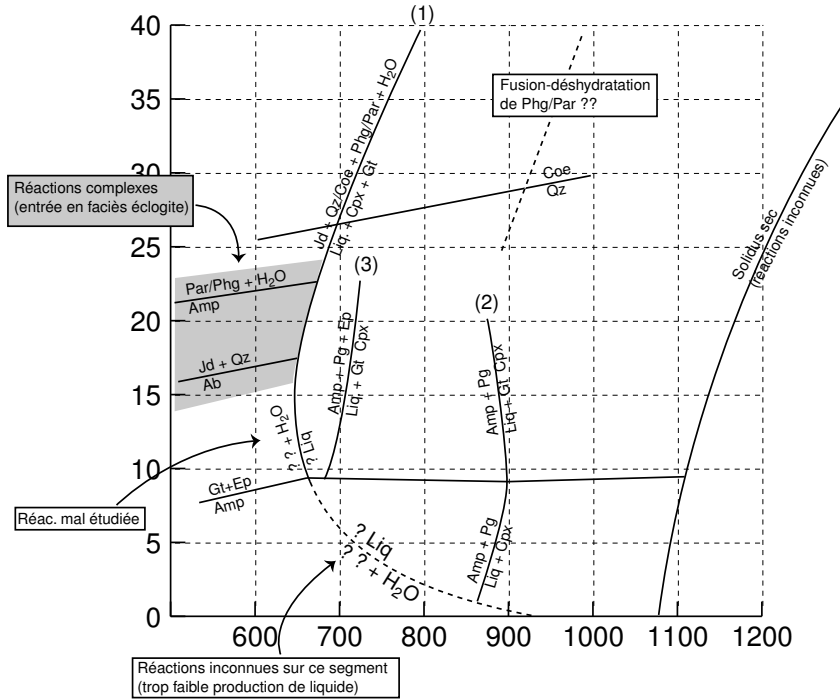
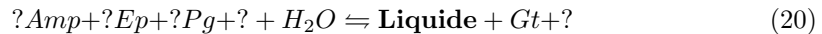


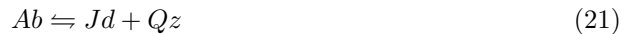
FIG. 7 – Quelques réactions impliquées dans la fusion partielle de roches basiques (avec suffisamment d’eau pour contenir des amphiboles). Le système est complexe et mal étudié ... Les réactions importantes semblent les suivantes : 1. fusion en présence d’eau (solidus hydraté), selon des modalités différentes suivant la pression. Les réactions qui se déroulent sont mal connues. 2. Fusion-déshydratation de l’amphibole. 3. Fusion déshydratation de l’amphibole et de l’épidote ; cette réaction est très proche de la réaction 1 dans l’espace P-T, et il est difficile de les distinguer expérimentalement !

La fusion-déshydratation de l’épidote est très voisine, dans l’espace P-T, des réactions de fusion hydratées

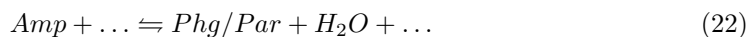


et, ici aussi, il est à peu près impossible de décrire convenablement cette réaction, qui est en pratique toujours confondue avec la précédente.

Dans le faciès éclogite les réactions de fusion sont encore moins bien connues (3 études à ma connaissance ...). L’entrée dans le faciès des éclogites (en dessous du solidus) se fait par les réactions suivantes :



ce qui correspond à la disparition du plagioclase et à l’apparition de quartz (ou de son polymorphe de haute pression, la coésite), et

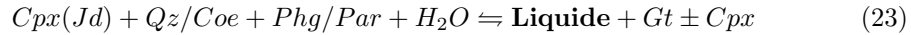


qui est la destruction de l’amphibole lors de réactions complexes au profit, finalement, de micas blancs de haute pression. Cette réaction libère de l’eau, ce qui implique que les réactions de fusion à haute et très haute pression se font toujours en présence d’eau (même si le système initial n’en contenait pas, à part celle présente dans les amphiboles).

Si l’eau libérée par le passage en faciès éclogite quitte le système, ce qui est sans doute le cas par exemple dans les zones de subduction, on obtient un assemblage éclogitique sec.

Les réactions de fusion complètement anhydre, ou de fusion-déshydratation de la phengite ne sont pas décrites dans la littérature scientifique à ce jour . . .

Les réactions de fusion en présence d'eau sont donc probablement de la forme



4.2.2 Solidus et liquidus

Le solidus "hydraté" des roches basiques correspond à une série de réactions variant en fonction de la pression (équations 16, 20 et 22). Il s'agit bien de réactions de fusion en présence d'eau libre. Mais les réactions de fusion-déshydratation sont très voisines de ce solidus à saturation d'eau, en particulier dans le secteur à moyenne pression (fusion-déshydratation de l'épidote).

Le solidus "sec" ne figure pas sur le diagramme fig. 7 ; il correspondrait à la fusion d'un basalte ne contenant pas suffisamment d'eau pour former des amphiboles (donc composé uniquement de pyroxène et de plagioclase). Les réactions de fusion de ces assemblages n'ont pas ou peu été étudiées.

Le dernier minéral au liquidus est le grenat ou le clinopyroxène, formés lors des réactions de fusion incongruentes.

4.2.3 Magmas formés

Dans tout les cas, les liquides formés sont des liquides intermédiaires à acides (60 à 70 % de SiO₂), dont la principale caractéristique est le rapport Na/K élevé (voir annexe). A ce jour, personne n'a encore décrit de variations systématiques de composition en fonction de la réaction qui opère.

4.3 Dans les péridotites

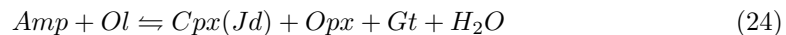
Dans les péridotites, de nombreuses réactions de fusion sont possibles; cette variété est en partie causée par la très large gamme de conditions de pression et de température du manteau. De nombreuses phases accessoires peuvent aussi jouer un rôle dans la fusion, ainsi que les fluides comme l'eau ou les carbonates.

De nombreuses études se sont intéressées à la fusion des péridotites, dans une multitude de cas; ici, on se restreindra au cas d'un manteau lherzolitique "normal", avec ou sans eau; on laisse de côté les cas de manteaux très appauvris (restitiques) ou au contraire très enrichis (avec carbonates, micas, etc.).

4.3.1 Réactions de fusion

Dans le cas d'un manteau hydraté, aux températures voisines du solidus la phase hydratée stable est l'amphibole. Ce sont donc des réactions de fusion-déshydratation de l'amphibole qui vont définir le solidus de la péridotite hydratée.

Cependant, l'amphibole n'est stable que jusqu'à une vingtaine de kb; aux pressions plus élevées, elle se décompose selon la réaction



D'autre part, le grenat est stable à des pressions supérieures à 15 kb environ; pour des pressions moindres, c'est le spinelle qui est stable.

Il y a donc trois réactions possibles dans le cas du manteau hydraté :

1. Dans les conditions où l'amphibole est stable, les réactions de fusion seront



et

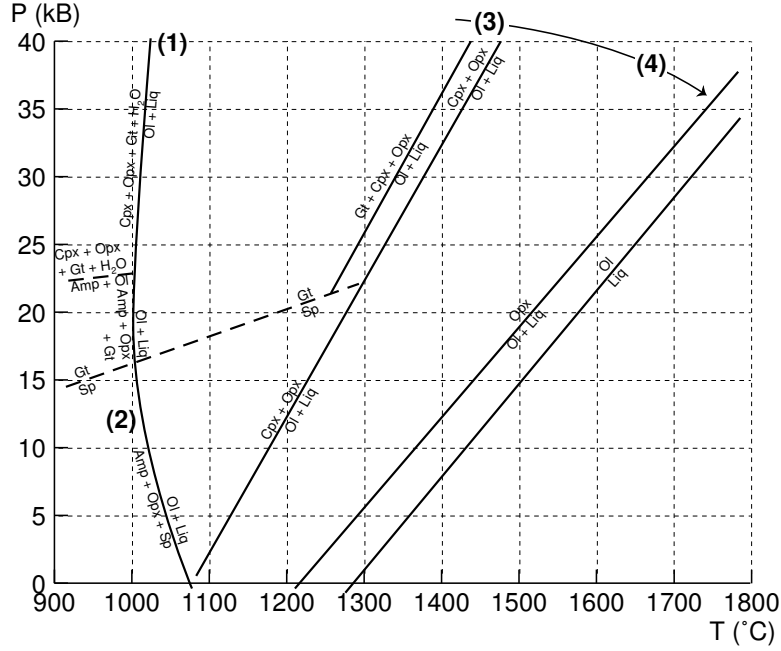
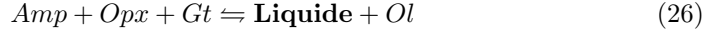
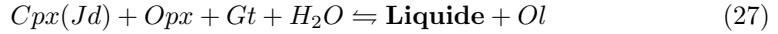


FIG. 8 – Quelques réactions impliquées dans la fusion partielle de péridotites. 1. et 2. sont les réactions de fusion du manteau en présence d'eau; 1 se situe au dessus de la limite de stabilité de l'amphibole, de l'eau libre est présente au solidus; dans 2, la réaction impliquée est une fusion-déshydratation de l'amphibole. 3. correspond au solidus sec, et 4 à l'augmentation du taux de fusion, par implication successive de minéraux de plus en plus réfractaires.



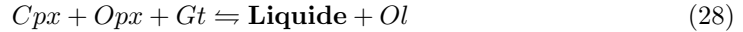
selon qu'on est au dessus, ou en dessous de la limite grenat—spinelles ;

2. Dans les conditions où l'amphibole n'est pas stable, la réaction sera



de la même façon qu'avec les éclogites, cette réaction ne se déroule bien sûr que si l'eau de déstabilisation de l'amphibole reste piégée dans le système; ici cependant, la déstabilisation de l'amphibole se fait dans des conditions très voisines de la fusion, si bien que l'eau reste très facilement présente pour permettre la fusion partielle.

En l'absence d'eau, les réactions de fusion seront les suivantes au solidus :



à haute pression, et



à basse pression (le spinelle ne semble pas être impliqué dans cette réaction, contrairement au cas du manteau hydraté).

Puis, à plus haute température, les minéraux seront les uns après les autres incorporés aux liquides. C'est d'abord le clinopyroxène qui est incorporé (réaction 29), puis l'orthopyroxène selon la réaction



et enfin l'olivine



4.3.2 Solidus et liquidus

Contrairement aux deux cas précédents, le solidus “hydraté” du manteau correspond à basse pression aux réactions de fusion-déshydratation de l'amphibole en présence d'olivine et de pyroxènes (réaction 25 et suivantes). A plus haute pression, il peut y avoir de l'eau libre. Le solidus “sec”, quant à lui, correspond réellement au cas où l'eau est totalement absente du système, même sous forme d'eau constitutive de minéraux; il est matérialisé par les réactions 28 et suivantes.

Le dernier minéral au liquidus est l'olivine, comme discuté plus haut.

4.3.3 Magmas formés

La grande variété des réactions de fusion, ainsi que la large gamme P—T concernée, explique la diversité des magmas d'origine mantellique.

Les magmas formés en présence d'eau seront de toutes façons, évidemment, hydratés; en raison de l'implication de l'amphibole ou de la jadéite dans leur formation, ils seront aussi relativement riches en Ca, Na et K: ce sont des magmas calco-alcalins. Le rôle de minéraux relativement riches en silice (par comparaison avec l'olivine ou le pyroxène) leur confère aussi une teneur en silice relativement élevée, de l'ordre de 55 %.

Les magmas formés en conditions anhydres sont naturellement plus basiques (ce sont des basaltes, $\text{SiO}_2 \simeq 50\%$), et plus pauvres en Ca, Na et K que les magmas calco-alcalins. A haute pression, l'implication du grenat dans leur formation leur permet néanmoins d'être relativement riches en alcalins: ce sont des basaltes alcalins. Aux pressions plus basses en revanche, on forme des basaltes pauvres en alcalins, qui appartiennent à la série tholéitique.

Plus généralement, la stoechiométrie des réactions semble très dépendante de la pression, si bien que, toutes choses égales par ailleurs, les basaltes formés à plus haute pression tendent à être plus pauvres en silice que ceux formés à basse pression.

D'autre part, l'implication progressive de minéraux de plus en plus pauvres en silice au fur et à mesure que la fusion progresse (clinopyroxène \rightarrow orthopyroxène \rightarrow olivine) implique que les magmas sont de plus en plus pauvres en SiO_2 au fur et à mesure que la fusion progresse; on forme donc à basse température des basaltes saturés en quartz, puis des basaltes à olivine, puis des komatiites si le taux de fusion est suffisant.

Annexe : comparaison de quelques liquides formés par les réactions décrites

| | Fusion du manteau | | | Fusion de la croûte | | Fusion d'amphibolite |
|--------------------------------|-------------------|-----------------|---------------------|---------------------|----------------------|----------------------|
| | Andésite | Basalte alcalin | Basalte tholéitique | Granite à 2 micas | Granite à cordiérite | |
| SiO ₂ | 59.89 | 47.52 | 48.77 | 73.83 | 68.76 | 67.24 |
| Al ₂ O ₃ | 17.07 | 15.95 | 15.90 | 14.57 | 15.08 | 15.99 |
| Fe ₂ O ₃ | 6.64 | 13.04 | 10.90 | 1.32 | 3.30 | 2.50 |
| MgO | 3.25 | 5.18 | 9.67 | 0.62 | 1.31 | 1.15 |
| CaO | 5.67 | 8.96 | 11.16 | 0.83 | 1.56 | 4.10 |
| Na ₂ O | 3.95 | 3.56 | 2.43 | 4.32 | 3.85 | 4.13 |
| K ₂ O | 2.47 | 1.29 | 0.08 | 3.81 | 4.18 | 1.43 |
| TiO ₂ | 0.95 | 3.29 | 1.15 | 0.14 | 0.57 | 0.77 |
| $\frac{Al}{Ca+Na+K}$ | 0.88 | 0.68 | 0.65 | 1.15 | 1.10 | 1.01 |
| $\frac{K}{Na}$ | 0.41 | 0.24 | 0.02 | 0.58 | 0.75 | 0.23 |
| Mg # | 49 | 44 | 64 | 47 | 43 | 46 |