

CHAPITRE VII

DISCUSSION DES RESULTATS, CONFRONTATION AUX OBSERVATIONS GEOLOGIQUES

VII.1. Rappels sur la réalité géologique brute. Évolutions naturelles de la composition des grenats et pyroxènes de skarns

VII.2. Résultats généraux concernant l'échange chromatographique de deux constituants indépendants; règles de prévision des comportements; comportements qualitativement nouveaux par rapport à l'échange d'un constituant (cas scalaire)

VII.3. Discussion sur les données thermodynamiques utiles à la prédiction des isothermes

VII.4. Discussion des expériences numériques; problème direct, problème inverse.

Au terme de ce travail, essayons de faire pour le lecteur géologue une synthèse des principaux résultats utiles pour lui, avec au besoin quelques redites par rapport au texte qui précède.

VII.1. Rappels sur la réalité géologique brute. Évolutions naturelles de la composition des grenats et pyroxènes de skarns

Nous ne reprendrons pas en détail la description d'exemples de roches formées par les phénomènes de réaction et transport par infiltration qui nous intéressent dans ce travail. Nous pouvons en rappeler certaines caractéristiques: les roches se transforment très souvent par étapes, visibles dans l'espace, et définissant des zones séparées par des limites nettes ou "fronts"; au travers de ces fronts de transformation, on observe des changements brutaux dans la composition minéralogique et chimique des roches de part et d'autre. A l'intérieur des différentes zones, on peut aussi observer des variations spatiales continues des compositions des minéraux et des roches. Ces différents phénomènes s'observent depuis l'échelle millimétrique (taille des grains) jusqu'à l'échelle plurimétrique à pluridécamétrique (affleurement). Nous mettrons ces variations discontinues et continues des compositions des roches en relation avec les ondes de choc et de détente analysées dans les chapitres précédents. Un exemple est donné en Figure 7.1, tiré de (Guy, [16a]).

Pour des raisons de simplification d'une part, et de possible relation au modèle de la chromatographie à deux constituants indépendants discuté dans cette thèse d'autre part, nous limiterons notre intérêt aux variations de composition à l'intérieur de deux catégories de minéraux: les grenats et les pyroxènes de skarns, sans regarder la question des changements de composition de roches polyminérales.

Grenats

Une revue de la littérature permet de préciser les évolutions de composition des grenats de skarns fréquemment rencontrés; les variations les plus significatives concernent les pôles andradite, grossulaire, almandin et spessartite. Bien que les variations de la composition en andradite soient souvent importantes (voire les plus importantes) nous ne les regarderons pas ici: la modélisation développée ne les concerne pas, l'échange $Fe^{III} - Al$ concernant un seul constituant indépendant. Nous nous limiterons aux échanges dans le triangle grossulaire-almandin-spessartite (ou grossulaire + andradite - almandin - spessartite) correspondant à

deux constituants indépendants. Nous n'examinerons pas les liens éventuels entre ces échanges et ceux concernant le fer trivalent. Dans la littérature, les données sur les échanges dans le seul site du calcium sont moins fréquentes que celles concernant le pourcentage d'andradite (on trouve souvent la représentation dans un triangle grossulaire - andradite - almandin + spessartite où les deux derniers pôles ne sont pas séparés). Dans Shimazaki ([39]), Einaudi et Burt ([9]), le Guyader ([27]), Vény ([39]) on trouve directement des données dans le triangle grossulaire - almandin - spessartite.

Au total, il y a de nombreuses évolutions différentes représentées sommairement sur la figure 7.2. Une évolution très fréquemment rencontrée est la succession: grenat riche en grossulaire, puis enrichissement en fer ferreux et manganèse avec évolution finale vers des teneurs plus riches encore en manganèse. Il n'est pas toujours aisé de positionner les éventuels sauts de composition le long de ces évolutions; en effet les données de la littérature permettent difficilement de se rendre compte de l'échelle de variation de composition des minéraux et de discuter de la présence de fronts; ceux-ci sont une fonction de l'échelle d'observation. On n'a de continuité spatiale le plus souvent qu'à l'échelle de la traversée à la microsonde d'un même minéral (quelques dizaines de microns), échelle à laquelle on peut tout de même avoir des variations brutales; la collecte des échantillons à l'échelle de l'affleurement ne permet pas de suivre les choses de façon continue à cause des multiples générations de minéraux. A Costabonne, on observe un front avant les dernières compositions les plus riches en manganèse (Fig. 7.3).

Pyroxènes

De même, on trouve dans la littérature des données sur les compositions des pyroxènes de skarns (Einaudi et Burt, [9]; Guy, [16a], [16b]). Les variations de composition les plus significatives sont représentées dans le triangle diopside-hédenbergite-johannsenite (Fig. 7.4). Sur la figure 7.5, on idéalise une évolution type.

Nous supposons que les évolutions de composition repérées dans les triangles précédents ont été produites par un phénomène synchrone, au cours duquel s'est opéré un rééquilibrage constant (plus ou moins bien réalisé) entre la composition du fluide et celle des solides, et non une simple précipitation dans des vides. Ces hypothèses ne peuvent être qu'imparfaitement réalisées; nous idéaliserons la réalité de cette façon cependant et raisonnerons sur des cas modèles permettant d'étudier les variations de composition dans le cadre théorique de l'échange de deux constituants indépendants.

VII.2. Résultats généraux concernant l'échange chromatographique de deux constituants indépendants; règles de prévision des comportements; comportements qualitativement nouveaux par rapport à l'échange d'un constituant (cas scalaire)

Les développements théoriques des chapitres précédents permettent de formuler des règles relativement simples (et portant sur des cas 'simples' dans un sens qui a été discuté¹). On se place dans le cas du problème dit de Riemann où l'on recherche à relier deux états constants; il correspond à étudier la transformation d'une roche homogène (milieu aval ou à droite; le fluide circule de gauche à droite) par un fluide de composition constante (milieu amont, à gauche); on positionne les points extrêmes droit (d) et gauche (g) sur les triangles de composition (Fig. 7.6). La théorie montre que l'on peut relier ces points entre eux par l'intermédiaire d'autres points qui ne peuvent être situés que sur des courbes (deux fois deux) aboutissant à chacun des points (d) ou (g). La restriction à des courbes d'évolution dans l'espace de composition résulte de la condition dite de cohérence; celle-ci exprime le bilan matière ou encore la simultanéité des échanges, régie par l'égalité des rapports $\Delta C_f / \Delta C_s$ pour tous les constituants. Ces quatre courbes se raccordent deux à deux de part et d'autre des points (Fig. 7.6) définissant deux types d'ondes, indexées par 1 et 2: 1-choc et 1-détente et 2-choc et 2-détente. Les vitesses sur les ondes 1 sont moins rapides que sur les ondes 2 (c'est ce qui permet de les classer; les vitesses sont données par les valeurs propres λ qui vérifient $\lambda_1 < \lambda_2$). Chaque paire de courbes associées est constituée de deux portions différentes, d'un côté la courbe de détente (en trait plein, tous les points sont parcourus) et de l'autre la courbe de choc (en pointillé, on passe brutalement d'un point extrême à l'autre). Le caractère donné à une portion de courbe (détente ou choc) dépend de la position dans l'espace (amont ou aval) des points à relier au point pivot (d) ou (g) et des évolutions des vitesses de ces points le long des courbes. Les courbes aboutissant à (g) relieront ce point à des points à droite (en aval) (et les courbes aboutissant à (d) relieront ce point à des points à gauche). Les vitesses des compositions des points que l'on relie à (d) ou (g) doivent croître de l'amont vers l'aval (les compositions concernées par les évolutions sont des combinaisons de concentrations appelées invariants de Riemann). Ceci s'exprime en disant que si les vecteurs propres sont notés r_1 et r_2 pour les deux types d'ondes, on a une 1-détente si on évolue dans le sens de r_1 et un 1-choc dans le cas contraire, et de même pour les 2-détente et 2-choc. Pour un point M en aval d'un point (g), dans la configuration représentée sur la figure 7.6, les vitesses croissent de (g) à M et toute la courbe sera suivie (détente); pour le cas du point N sur la figure, on ne peut avoir qu'un choc pour relier (g) à N (aval) car on ne pourrait pas respecter la condition sur les vitesses. De même pour l'autre courbe. Chaque point voit donc autour de lui quatre secteurs

¹ Ces cas supposent certaines régularités des fonctions utilisées ou, dans le cas général, une proximité entre les valeurs des compositions à gauche et à droite dans le problème de Riemann (voir texte).

délimités par les 2x2 courbes. Les natures (choc ou détente) des portions de courbes aboutissant aux points (g) et (d) s'échangent.

L'étape suivante consiste à relier deux points (g) et (d) par des portions de courbes; les différents cas se déterminent en fonction de la situation relative de (d) par rapport à (g) dans les régions I, II, III et IV définies précédemment. On a une onde de type 1 puis une onde de type 2 en allant de (g) vers (d). Les quatre cas sont représentés sur la figure 7.7. En fonction de la règle onde-1 puis onde-2 et de la nature choc ou détente de l'onde, on représente sur la figure les trajets retenus qui respectent les lois de croissance des vitesses de même que les lois de vitesses des chocs qui en constituent des généralisations. On indique aussi sur la figure les évolutions correspondantes des concentrations en fonction de x et t . On voit donc que dans le cas général, on observe un plateau de composition séparé des deux états extrêmes, soit par deux chocs, soit par deux détentes, soit un choc et une détente, soit une détente et un choc.

Tous ces résultats reposent uniquement sur les données à l'équilibre: on montre que les paramètres des solutions solides guident le caractère plus ou moins rectiligne des courbes d'évolution dans les triangles, et que les constantes de dissociation des équilibres minéral-solution régissent les orientations des courbes, orientations elles-mêmes responsables de la valeur des compositions intermédiaires des paliers.

On voit donc le type de comportements auxquels on peut s'attendre dans le cas de deux constituants indépendants. Si le cas scalaire reste le paradigme de l'application de la chromatographie aux problèmes d'échanges fluides-roches (par exemple, Korzhinskii, [23]; Guy, [18]), il convient d'en nuancer les conclusions lorsque plus d'un constituant indépendant s'échangent car ce dernier cas n'est pas une simple juxtaposition des comportements des constituants pris séparément. Si l'on se place dans le cadre du problème de Riemann, c'est à dire celui qui correspond à la transformation d'une roche homogène par un fluide de composition constante en déséquilibre avec la roche, les résultats principaux que nous venons de mettre en évidence sont:

- l'apparition d'un état intermédiaire entre les deux états extrêmes;
- la rupture de l'évolution monotone des compositions par couplage avec le troisième constituant, même si ce constituant est en quantité mineure; c'est à dire que l'état intermédiaire dans l'espace entre les compositions extrêmes n'est pas forcément intermédiaire en composition. L'interprétation d'un front concernant deux constituants majeurs A et B ne doit pas porter uniquement sur la concavité de l'isotherme de l'échange A-B mais sur la possible intervention d'un troisième constituant...
- l'augmentation localisée d'un constituant à une teneur plus élevée que celles des états extrêmes, ce qui est une autre façon de décrire le résultat précédent.

VII.3. Discussion sur les données thermodynamiques utiles à la prédiction des isothermes

L'application quantitative aux résultats de la section VII-1 de la méthode de la section VII-2 demande de connaître diverses données thermodynamiques; on est limité par le manque de données sur les constantes de dissociation de certains pôles purs des solutions solides de grenat et pyroxène, ainsi que sur les paramètres des solutions solides. Ceci a été discuté dans les chapitres précédents.

Pour ce qui est des paramètres des solutions solides, nous retiendrons comme cas standard une solution solide de paramètre a de l'ordre de 0.2 à 1, avec $a = w_{123}/3RT$ où w est le paramètre du développement polynomial de la solution solide. L'on pourra faire varier a dans les exemples (ce qui revient aussi à faire varier la température).

Pour les constantes de dissociation, nous raisonnerons de façon semi-quantitative; les constantes de dissociation des divers pôles de grenats sont classées dans l'ordre suivant

$$K_{\text{spe}} < K_{\text{gro}} < K_{\text{alm}}$$

avec les ordres de grandeur des ratios: $1 < 10 < 100$

Dans le modèle on utilise les racines cubiques de ces paramètres que l'on appelle K , L et M ; en se restreignant aux évolutions semi-quantitatives on norme les constantes à K avec $1 < L/K < M/K$; les ratios L/K et M/L sont appelés L et M respectivement. Rappelons que dans le cas des grenats, on a négligé les variations possibles des teneurs en Fe^{II} et Fe^{III} en fonction de fO_2 et les échanges possibles entre andradite et almandin. On considère que l'on se limite à l'échange $Fe^{\text{II}} - Mn - Ca$ à fO_2 constant.

Pour les pyroxènes on prend:

$$K_{\text{dio}} < K_{\text{hed}} < K_{\text{joh}}$$

avec les ordres de grandeur $1 < 300 < 700-1500$; on peut aussi prendre $K_{\text{dio}} < K_{\text{hed}} = K_{\text{joh}}$ dans l'ordre $1 < 50 = 50$; par normalisation on se ramène à deux ratios L et M comme pour les grenats. Avec ces choix de valeurs, Fe et Mn ont apparemment des rôles échangés entre grenat et pyroxène.

Les ordres de grandeur des constantes de dissociation peuvent être modifiés par la présence d'autres cations, ce qui peut expliquer certaines contradictions rencontrées dans la littérature. Ainsi pour les pyroxènes, en restant dans le cas de l'échange binaire $Fe-Mg$, l'isotherme (Fe, Mg) de la série Diopside Hédenbergite donné par Iiyama ([21]) fournit un rapport moyen $(Mg/Fe)_{\text{fluide}} / (Mg/Fe)_{\text{solide}}$ (peu différent de $K_{\text{dio}}/K_{\text{hed}}$) de l'ordre de 0.05, alors que d'autres données thermodynamiques de la littérature indiquent un rapport $K_{\text{dio}}/K_{\text{hed}}$ de l'ordre de 5.

Une explication de ces différences (Pascal, comm. écrite, 1996) est que le chlorure de fer est sujet à de fortes interactions avec d'autres chlorures, en particulier avec les chlorures alcalins et le chlorure de calcium; ainsi les rapports Fe/Mg des solutions en équilibre avec des minéraux ferromagnésiens augmentent fortement avec la concentration en $NaCl$, KCl et $CaCl_2$ des solutions (voir Korzhinskii, [24]). On retiendra que les rapports des facteurs K , L , M dans les isothermes sont susceptibles de varier notablement en fonction de la chimie des solutions dans les divers sites étudiés et qu'il ne faut sans doute pas prendre une seule isotherme comme une donnée universelle caractéristique des minéraux considérés. L'écriture des isothermes a été discutée précédemment. L'originalité est ici que l'on a des isothermes voisines des isothermes de Langmuir. Pour des hautes températures d'échange, on se ramène à des isothermes équivalents strictement à ceux de Langmuir. Dans le cas général, il y a une distorsion due à l'effet des solutions solides. L'écriture des équations d'échange permettant d'utiliser les ratios L/K et M/K suppose que la somme des concentrations des cations dans la solution est constante, ce qui suppose que les transformations se réduisent aux échanges de cations.

VII.4. Discussion des expériences numériques; problème direct, problème inverse.

Le problème direct consiste à vouloir retrouver les évolutions observées ou retenues (section VII.1) avec des données thermodynamiques convenablement choisies et pour des conditions initiales et aux limites spécifiées.

Pour les grenats, on prendra par exemple les données de la section VII.3 et un grenat aval (roche de départ) calcique proche du grossulaire, et un grenat amont (fluide métasomatique) riche en almandin et spessartite. Diverses simulations sont données sur la figure 7.8 (on représente les évolutions dans le triangle des grenats); dans tous les cas on a respecté l'ordre $K < L < M$, mais on a fait un peu varier les ratios, de même que les positions des points (d) et (g). Sur la figure 7.8-1, on a un petit saut de composition puis une évolution continue, avec un palier. Sur la figure 7.8-2., le point (g) n'a pas la même situation relative par rapport à (d) et l'on a une évolution continue avec un palier intermédiaire.

Dans la nature, les paliers se manifesteront par un regroupement des points de mesure (la zone correspondante sera plus étalée dans la colonne métasomatique et l'on aura plus de chance d'analyser les points correspondants). C'est une autre interprétation de groupes de compositions séparés pour les roches métasomatiques dans les espaces de composition: ils peuvent exprimer non pas forcément des chocs ou fronts nets mais de possible paliers. L'état intermédiaire (palier) est plus éloigné de la ligne reliant les états extrêmes (d) et (g) lorsque les ratios L et M sont voisins. Plus ces paramètres sont différents, plus la composition du palier est proche du segment reliant les points extrêmes. Pour a petit, les tronçons de l'évolution

sont proches de droites (isotherme de Langmuir). On remarque en tout cas que le jeu de ratios choisis pour K , L , M ne redonne pas l'évolution de la figure 7.3.

Dans le cas des pyroxènes, nous prendrons aussi les données thermodynamiques discutées plus haut ($K_{\text{dio}} < K_{\text{hed}} < K_{\text{joh}}$) et, comme conditions aux limites: à l'aval un pyroxène magnésien avec un peu de fer et un peu de manganèse; en amont, un pyroxène riche en manganèse et par teneur décroissante, en fer et en magnésium (Fig. 7.9). Les simulations faites (Fig. 7.9, triangles de composition) conduisent à des remarques identiques à celles proposées pour les grenats. On constate aussi que les évolutions trouvées ne correspondent pas à celles de la figure 7.5. Les trajets ne se coudent pas assez vers le pôle hédenbergite.

Autres expériences

Différentes expériences peuvent être faites en faisant varier les divers paramètres et les points de départ et d'arrivée. On peut aussi partir d'une roche de départ non homogène et voir comment le trajet se déforme au cours du temps. Quelques exemples sont donnés sur la figure 7.10 tirés du travail de Baudouy et Marco ([2]) (évolutions dans les triangles et profils $C(x)$ à t donné). A ce stade on se restreint à l'étude des comportements dans l'espace des compositions ou aux profils qualitatifs dans l'espace; l'étude quantitative des comportements dans le plan (x, t) demanderait de connaître les valeurs exactes des constantes K , L , M alors que nous nous sommes contentés de ratios, ainsi que l'introduction de valeurs pour la vitesse du fluide et la porosité. Rappelons que les vitesses de migration des fronts sont de l'ordre du mètre par 10 000 ans ce qui donne une idée des échelles des dessins.

Problème inverse

Les variations des constantes de dissociation en fonction de la chimie des solutions (en particulier lorsqu'elles contiennent du fer, ce qui est notre cas) nous autorise une autre démarche: chercher les valeurs relatives de K , L , M qui permettent, pour une condition initiale donnée (position des point (d) et (g)) de retrouver la forme du trajet souhaité dans le triangle de composition. On peut discuter aussi de la valeur du paramètre a (et de la température qui intervient indirectement dans les paramètres des solutions solides) et qui jouera sur la courbure des portions de trajet. Mais l'effet de a est moins crucial que ceux des ratios K , L et M (et, au niveau des données, le caractère rectiligne des évolutions repérées dans les nuages des points d'analyses est plus ou moins arbitraire).

Il s'agit d'un problème inverse que nous ne formalisons pas ici de façon abstraite mais que nous discutons de façon qualitative. La figure 7.11-1 représente une évolution de composition tirée d'une expérience numérique. En permutant la représentation ($Ca-Fe-Mn$) en

(*Fe-Mn-Ca*), on obtient la figure 7.11-2 dont l'évolution redonne celle qui avait été sélectionnée figure 7.5. Le choix d'une hiérarchie $K_{Mn} < K_{Ca} < K_{Fe}$ (conforme aux données) redonne une évolution présentant une détente puis un choc pour aller du grenat grossulaire vers le grenat riche en manganèse. Si nous sommes sûrs de toutes les observations et conditions d'application du modèle, nous sommes donc conduits à un classement des K différents de celui que nous avons supposé. Dans cette situation, le fait qu'un grenat serait plus calcique que manganésifère ne vient pas du fractionnement plus important du calcium pour le solide mais de la plus grande abondance du calcium dans la solution; le pôle final de l'évolution correspond à des solutions plus riches en manganèse.

Si on fait le même raisonnement pour le pyroxène (Figure 7.12, envisagée à partir de la figure 7.11-1) et que l'on veut obtenir une discontinuité de composition entre les salites de composition intermédiaire et le pôle johannsénite alors il faut une hiérarchie des constantes de dissociation telle que $K_{Mg} < K_{Mn} < K_{Fe}$, ce qui revient aussi à changer le classement que l'on s'était donné au départ.

On pourrait de la même manière (méthode inverse) étudier d'autres évolutions (par exemple celle montrant deux chocs encadrant le domaine de composition intermédiaire, ce qui peut être une façon de comprendre certaines évolutions de composition des grenats et pyroxènes de skarns).

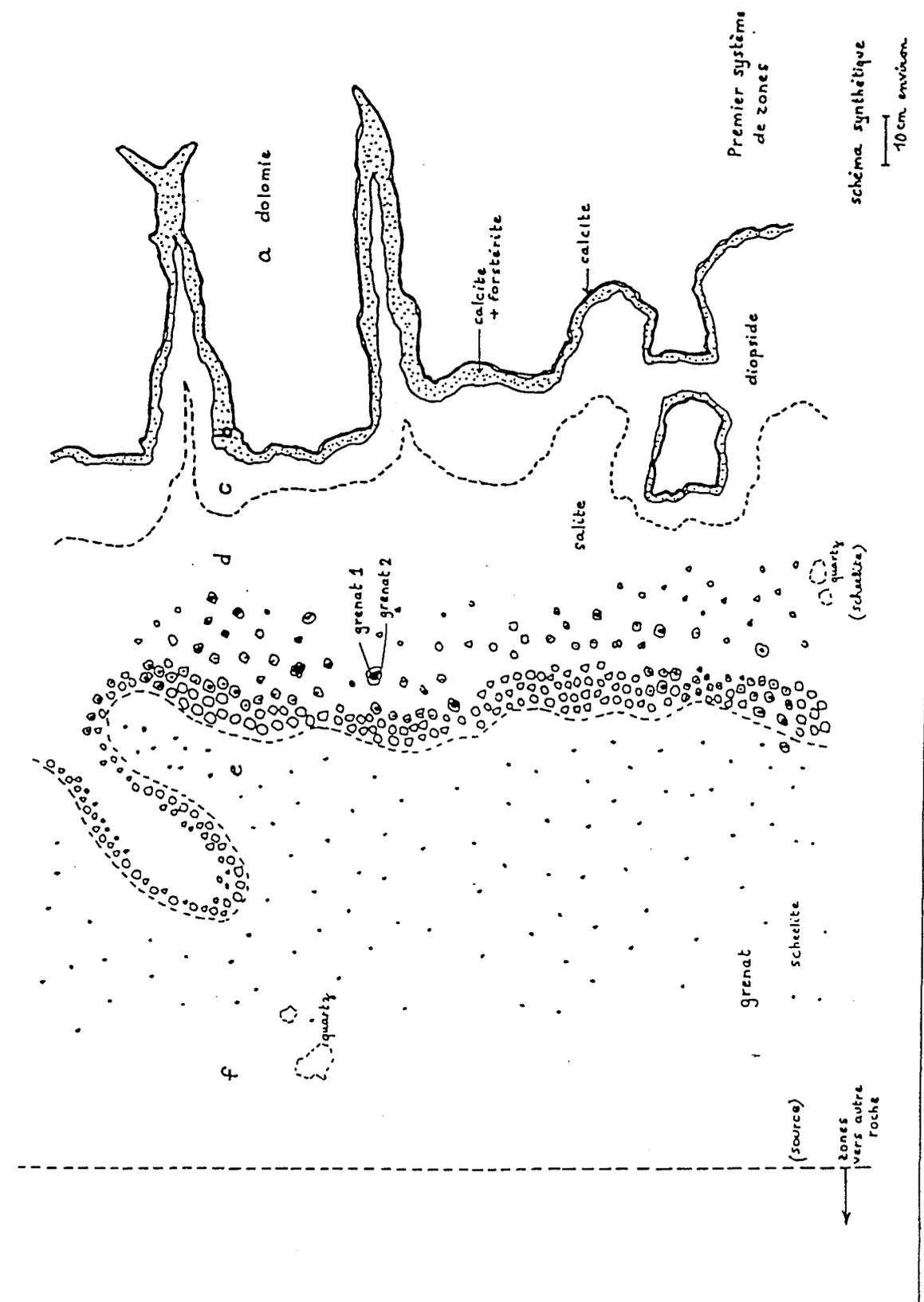


Figure 7.1 Suite des zones formées par transformation d'une dolomie à Costabonne (Pyrénées Orientales) tiré de Guy, [16a]. Ce système de zones n'est pas synchrone dans son ensemble (voir l'analyse détaillée dans Guy, [16b]) mais donne une représentation voisine de la réalité brute: on observe les zones suivantes séparées par des fronts: dolomie, calcite + forstérite, diopside, salite, grenat.

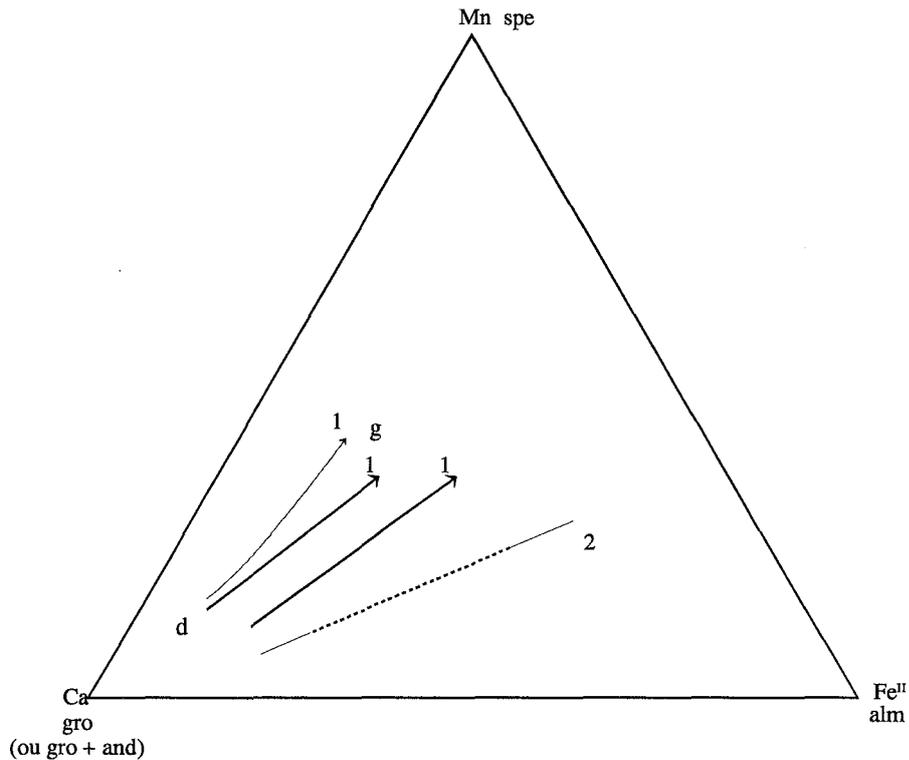


Figure 7.2 Quelques évolutions de composition de grenats de skarns dans le triangle grossulaire- almandin - spessartite. Les flèches indiquent le sens de l'évolution précoce → tardif (ou centre - core - et bordure - rim -) ce qui correspond à l'évolution spatiale aval → amont. Ou encore en utilisant le vocabulaire utilisé pour la modélisation (d) (droite) (g) (gauche). En continu: évolution continue; en pointillés: choc. **1** Japon (modifié d'après Shimazaki, [39]); **2** Mac Tung (Canada) (modifié d'après Einaudi et Burt, [9])

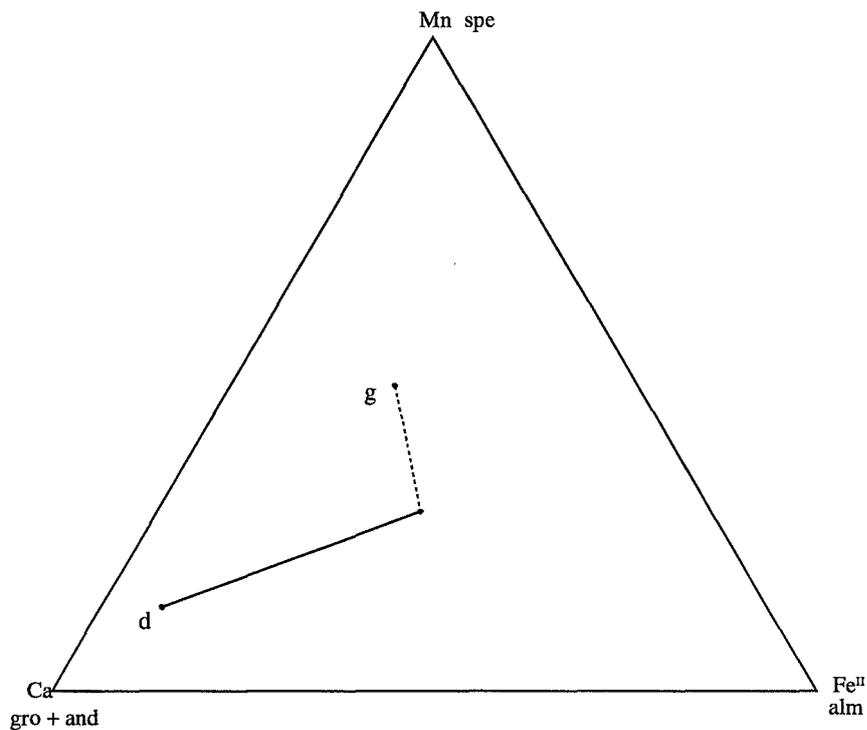


Figure 7.3 Idéalisé de l'évolution de composition des grenats de Costabonne; on propose de retenir une portion d'évolution continue suivie d'un front aboutissant aux dernières compositions riches en manganèse.

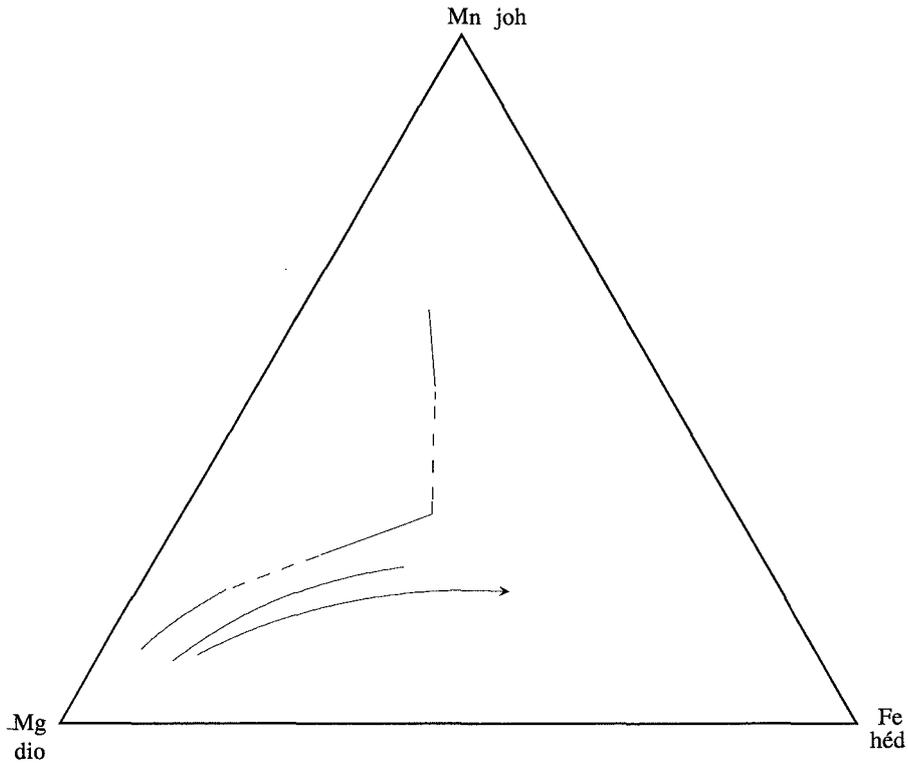


Figure 7.4 Quelques évolutions de composition de pyroxènes de skarns dans le triangle diopside -hédénbergite - Johannsénite (références données dans le texte). Mêmes remarques que pour la figure 7.2.

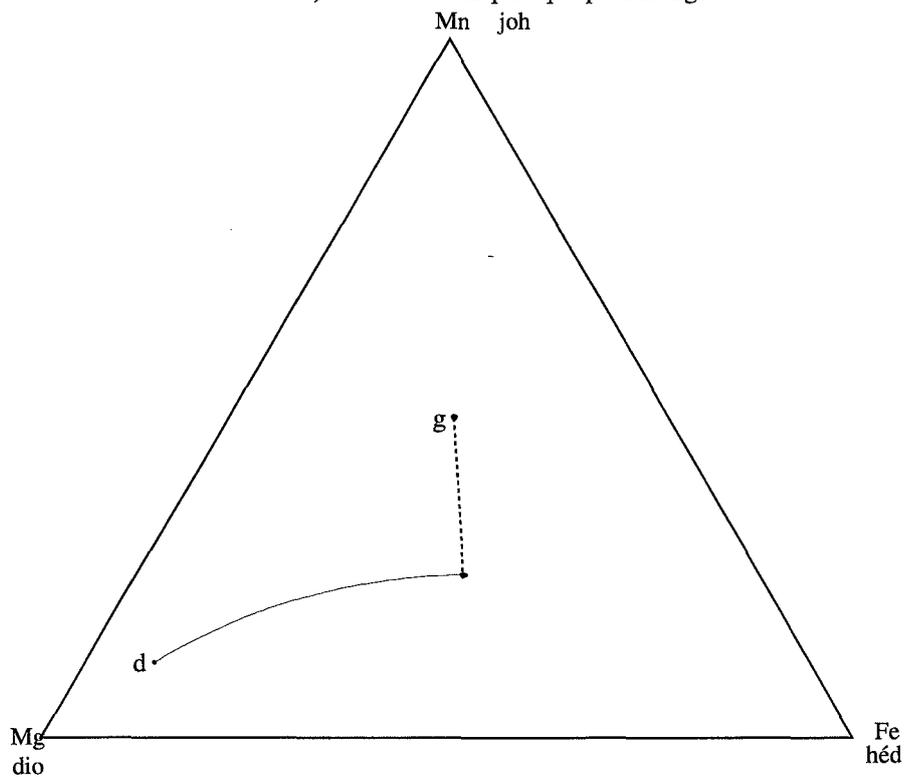


Figure 7.5 Idéalisation d'une évolution de composition de pyroxène de skarns. On distingue une portion continue allant du pôle magnésien vers une composition salitique, suivie d'un saut menant à des compositions proche du pôle Johannsénite.

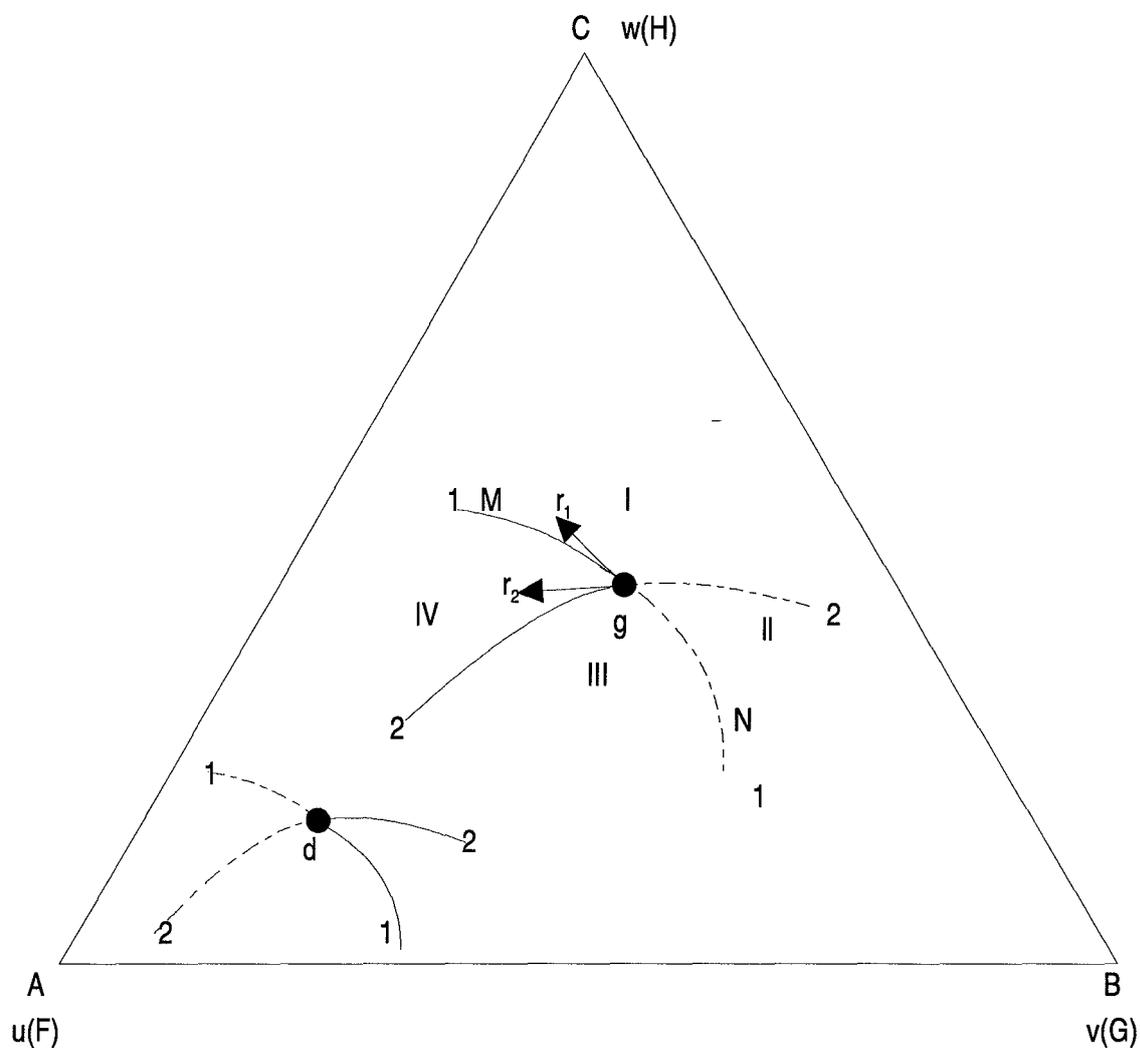


Figure 7.6 Positionnement des points aval ou droit (d) et amont ou gauche (g) dans les triangles de composition A, B, C. Les variables sont notées u, v, w (pour les C_s) auxquelles correspondent les fonctions isothermes F, G et H . Chaque point peut être atteint par quatre courbes (deux chocs et deux détente) se raccordant deux à deux (raccord C^2). On indique les courbes aboutissant à un point de type (d) ainsi que celles aboutissant à un point de type (g) (il y a échange choc - détente pour le changement (d) - (g)). Autour de chaque point, les courbes délimitent quatre secteurs dans lesquels le trajet complet d'évolution est différent.

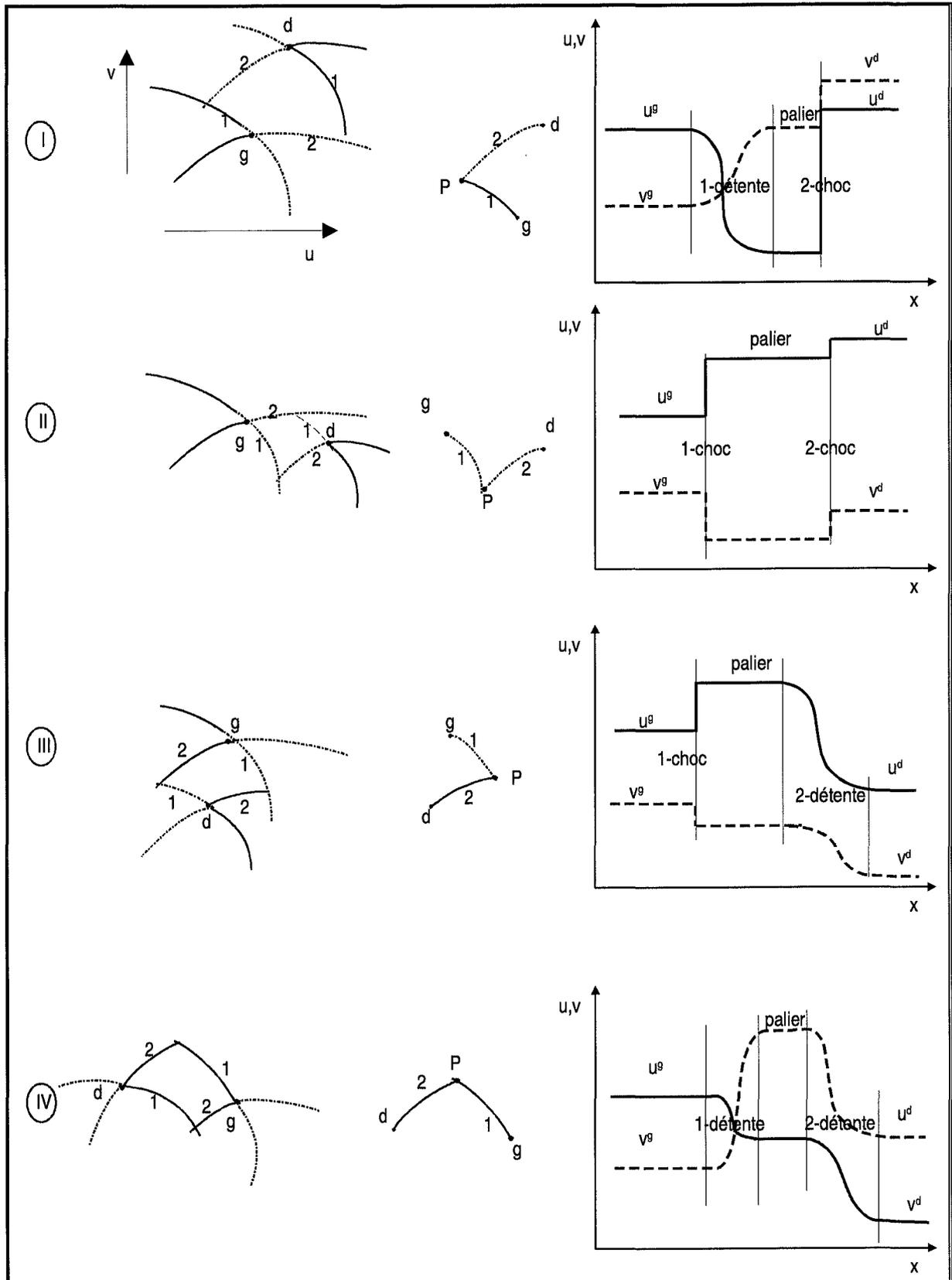


Figure 7.7 Détermination des trajets d'évolution reliant deux états (g) et (d) dans les triangles de composition. Dans la série de schémas de la colonne de gauche, on représente les différentes positions du point (d) par rapport au point (g), dans la colonne du milieu, les différents trajets, et, dans la colonne de droite, les évolutions x/t correspondantes pour les concentrations. Les règles de construction des trajets sont discutées dans le texte.

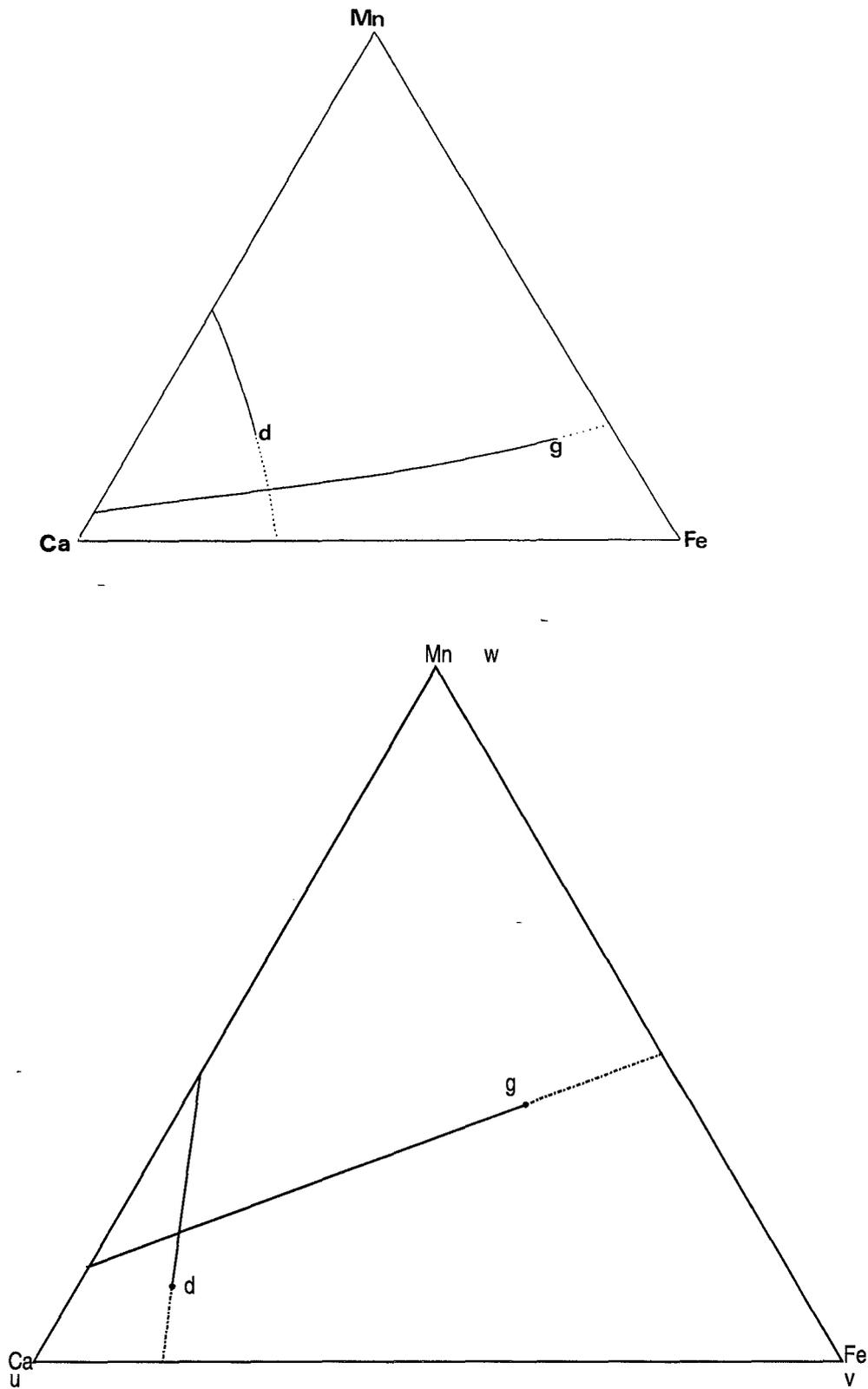


Figure 7.8 Deux exemples d'expériences numériques pour l'évolution de la composition des grenats dans le triangle grossulaire - spessartite - almandin. Le grenat de départ est indexé par la lettre (d) et le grenat en équilibre avec le fluide métasomatique par la lettre (g). Les paramètres choisis pour les expériences 7.8-1 et 7.8-2 sont indiqués sur les suivants: **7.8-1**: $a = 0.9$, $K = 1$, $L = 2.6$, $M = 4.6$. **7.8-2**: $a = 0$ (isotherme de Langmuir), $K = 1$, $L = 2.6$, $M = 6$.

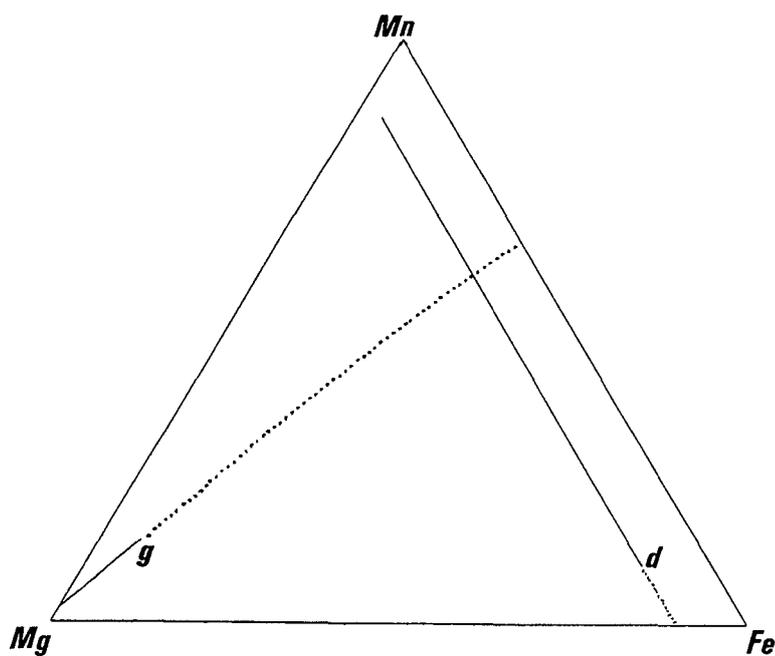
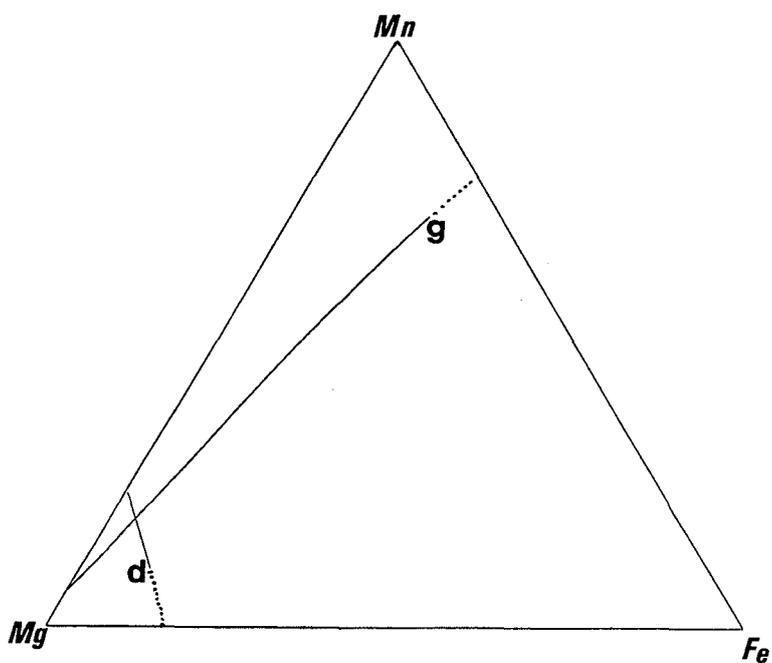


Figure 7.9 Deux exemples d'expériences numériques pour l'évolution de la composition des pyroxènes dans le triangle diopside - hedenbergite - johannsenite. Les paramètres utilisés sont les suivants: **7.9-1**: $a = 0.9$, $K = 1$, $L = 20$, $M = 50$; **7.9-2**: $a = 0.9$, $K = 1$, $L = 20$, $M = 80$.

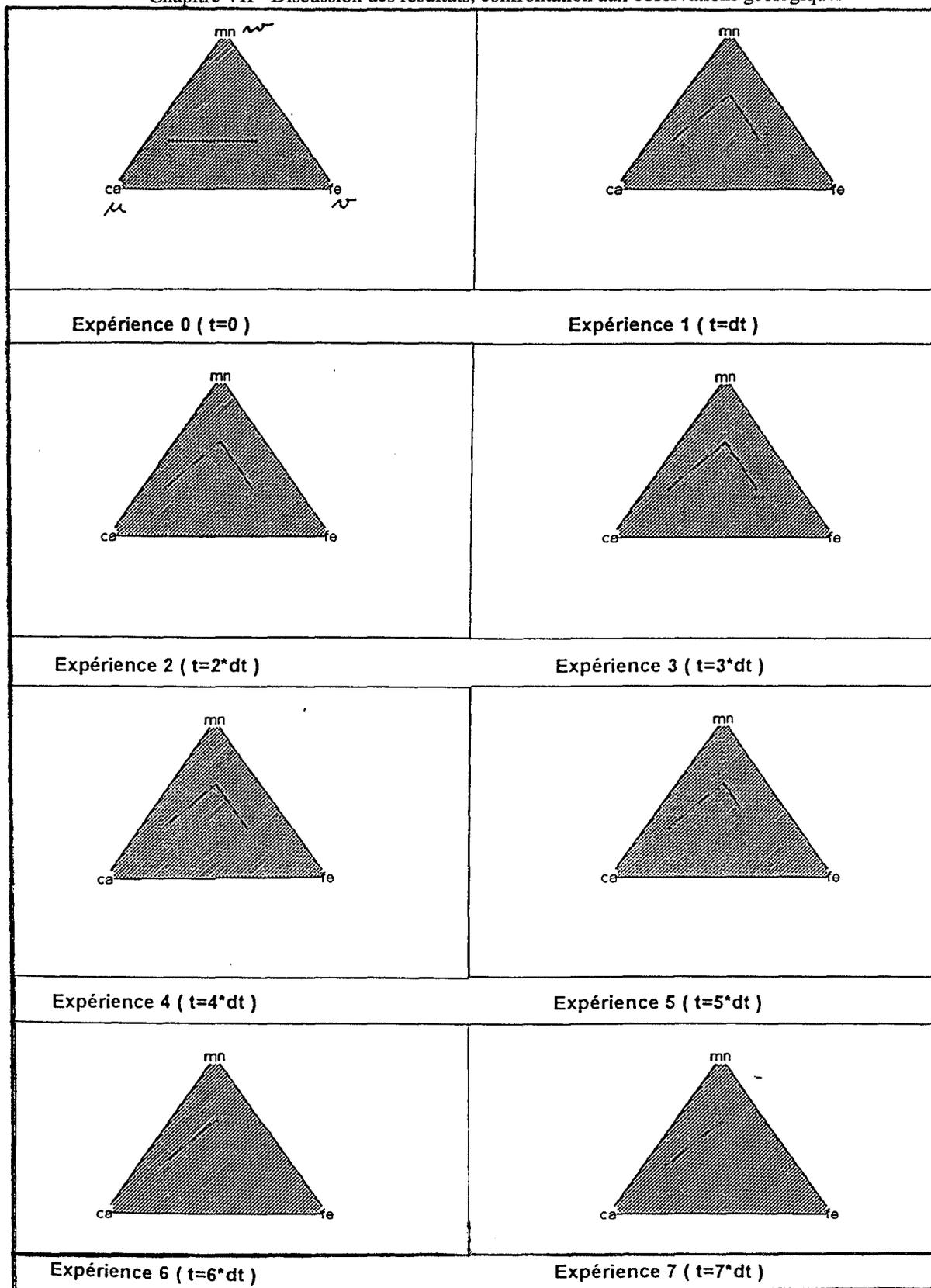


Figure 7.10 Deux séries d'exemples d'expériences numériques (évolutions dans les triangles de composition et évolutions (x, t)) tirées du catalogue de Baudouy et Marco ([2]). **7.10-(1a)**: $a = 0.2$, $L/K = 8$, $M/K = 9$. On donne ici représentations sur les triangles ([2], exp. 17).

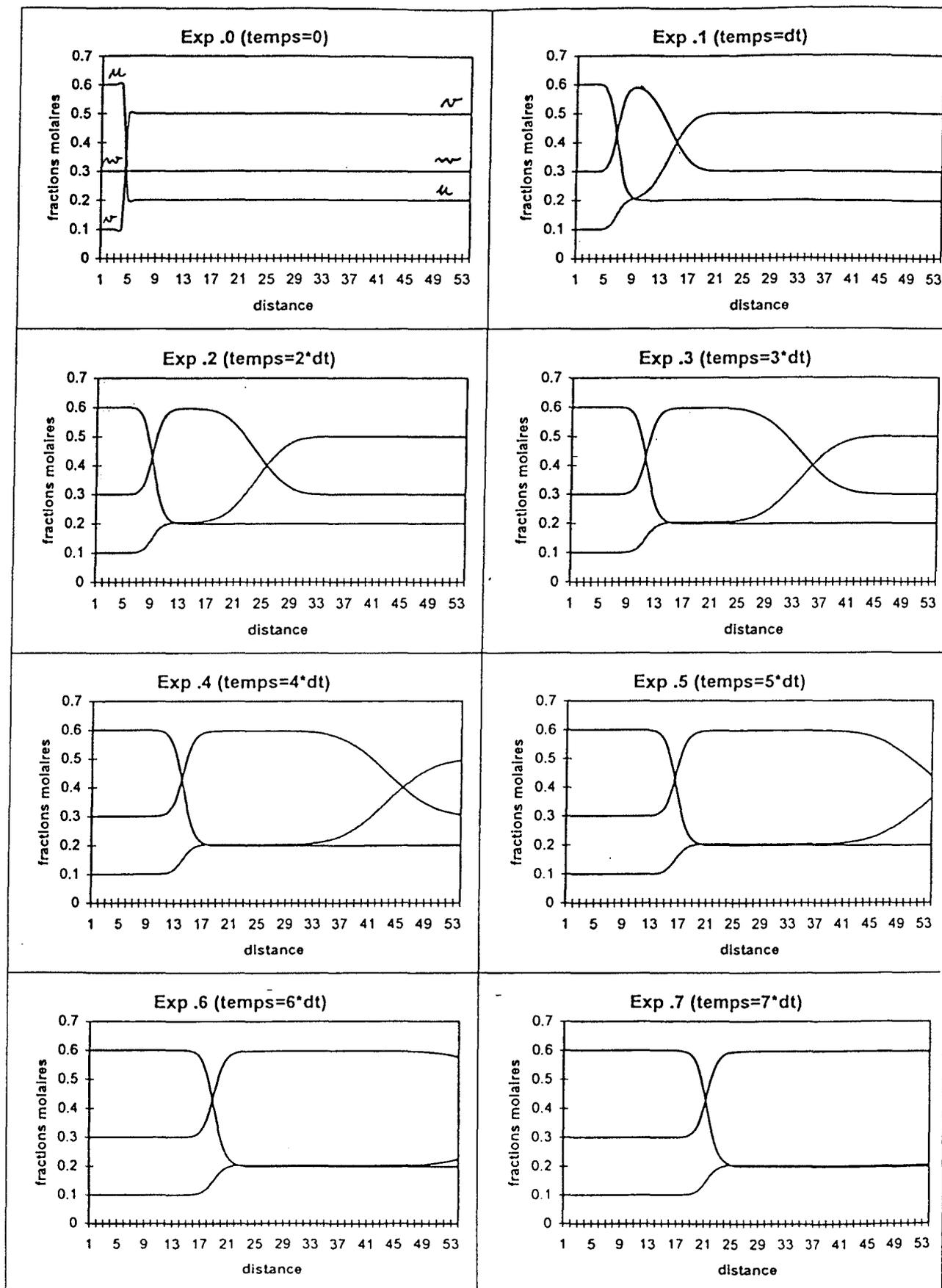


Figure 7.10-(1b) profils de $C(x)$ pour 8 valeurs de t . Même données que pour 7.10-(1a) ([2], exp. 17).

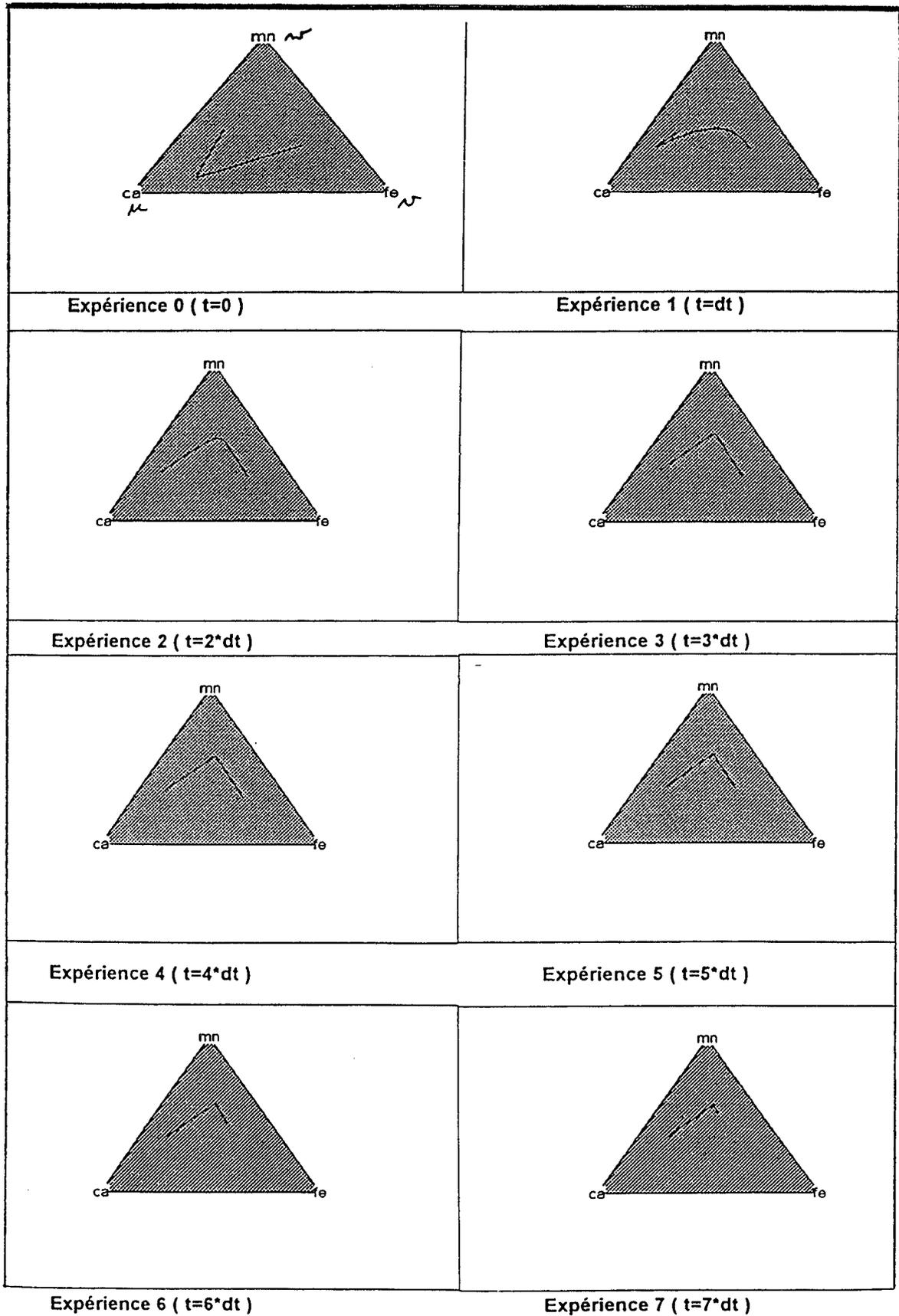


Figure 7.10-(2a): $a = 0.2$, $L/K = 4$, $M/K = 8$. La condition initiale ne correspond pas à un problème de Riemann. On donne ici les représentations sur les triangles. ([2], exp. 23).

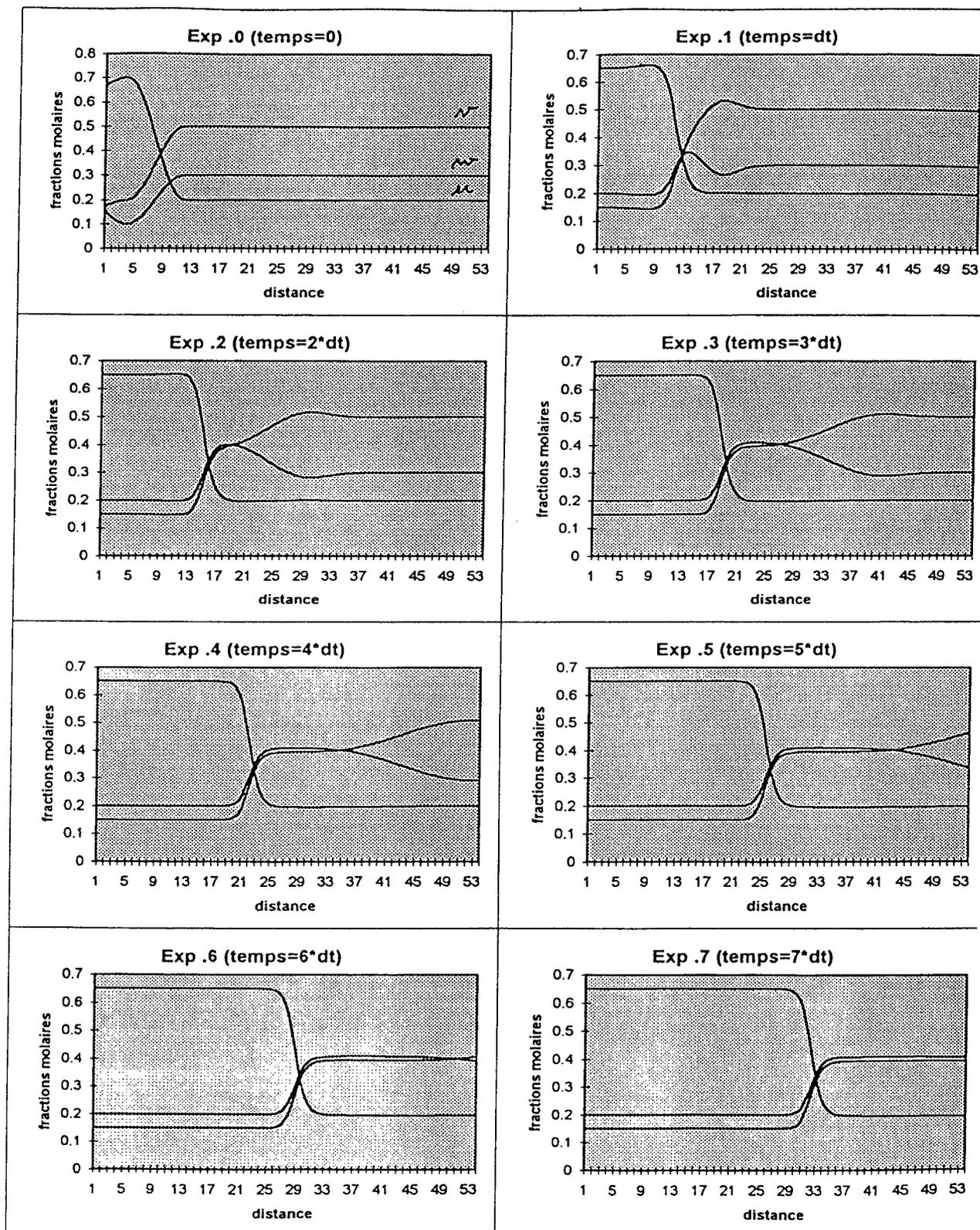


Figure 7.10-(2b): profils de $C(x)$ pour 8 valeurs de t . Même données que pour 7.10-(2a) ([2], exp. 23).

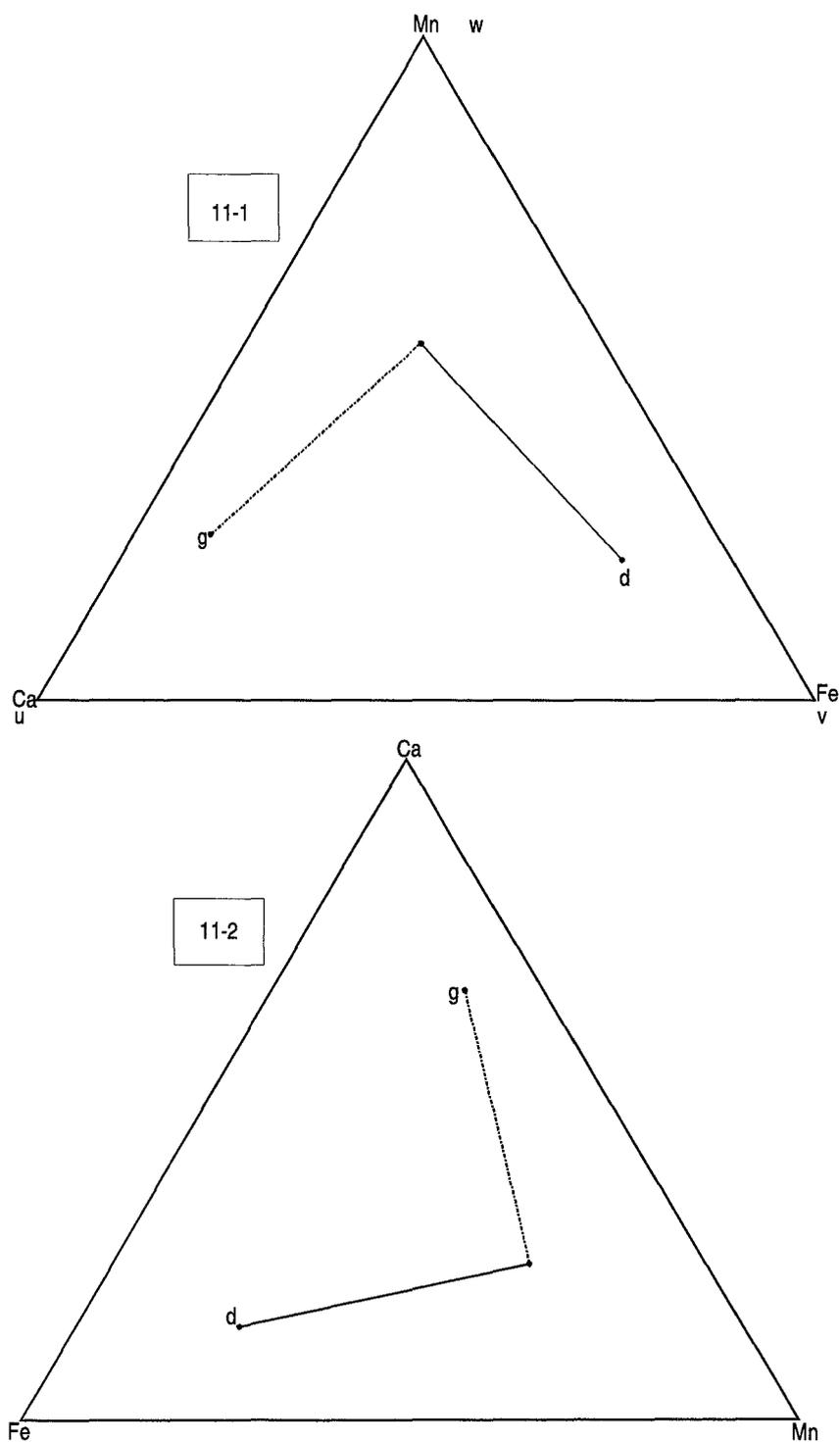


Figure 7.11 11-1 Expérience numéro 1 du catalogue de Baudouy et Marco ([2]).
11-2 Profil obtenu par permutation des coordonnées (*Ca - Fe - Mn*) en (*Fe - Mn - Ca*).