



UNE VISITE A COSTABONNE

Quelques documents issus des travaux de Autran, Baetens, Dubru, Guitard, Guy, Le Guyader, Sheppard, Toulhoat, Van Marcke etc.

Compilation B. Guy, Mai 1999

LE GITE DE TUNGSTENE DE COSTABONNE

Les quelques documents qui suivent sont destinés à servir de support à une brève visite sur le terrain. Ils ne prétendent pas à l'exhaustivité ; pour davantage de données, on se reportera aux travaux cités dans la liste de références. La lisibilité n'est pas non plus parfaite, raison de plus de retourner aux sources !

Les documents sont répartis selon les rubriques suivantes :

- 1) Géologie : les Pyrénées, le cadre géologique du gisement
- 2) Les skarns : zonations sur divers substrats
- 3) Les skarns : minéralogie
- 4) Géochimie des éléments majeurs et traces
- 5) Géochimie des isotopes stables
- 6) Interprétation thermodynamique, inclusions fluides

Références

1) GÉOLOGIE :
LES PYRÉNÉES, LE CADRE GÉOLOGIQUE
DU GISEMENT

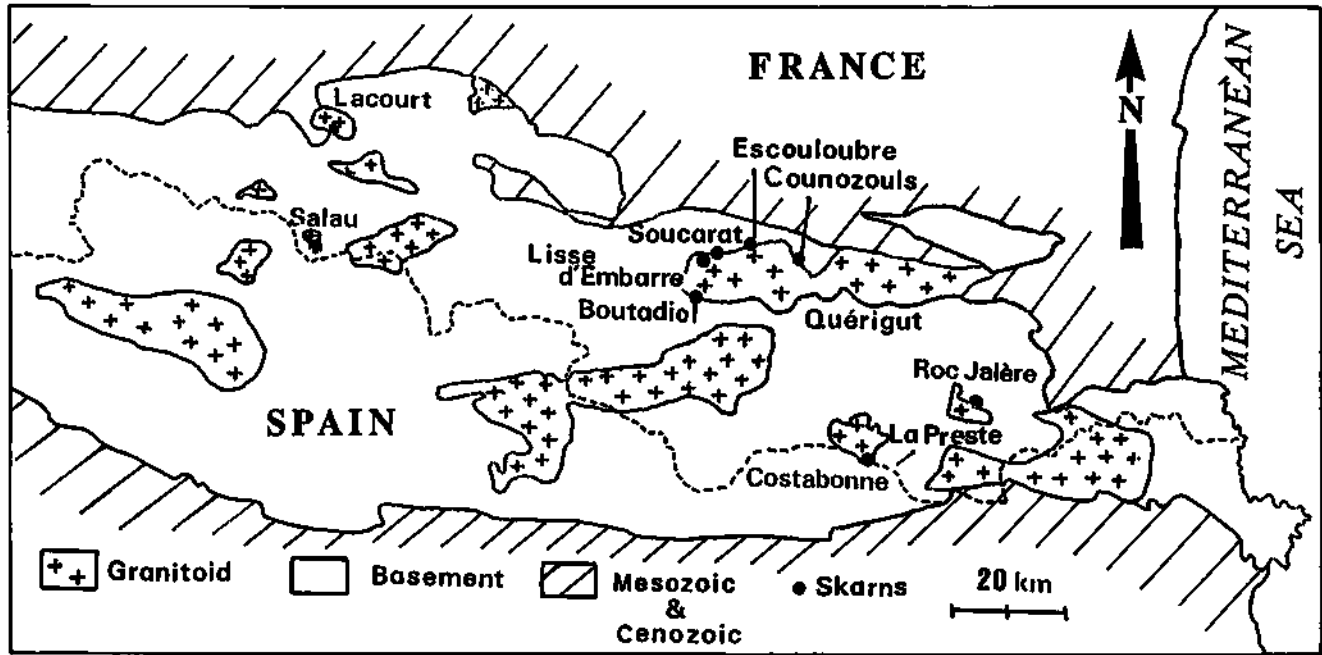


Fig. 1. Simplified geological map of the Central and Eastern Pyrenees showing the location of the principal granitoid massifs and the barren and mineralized skarns discussed in the text



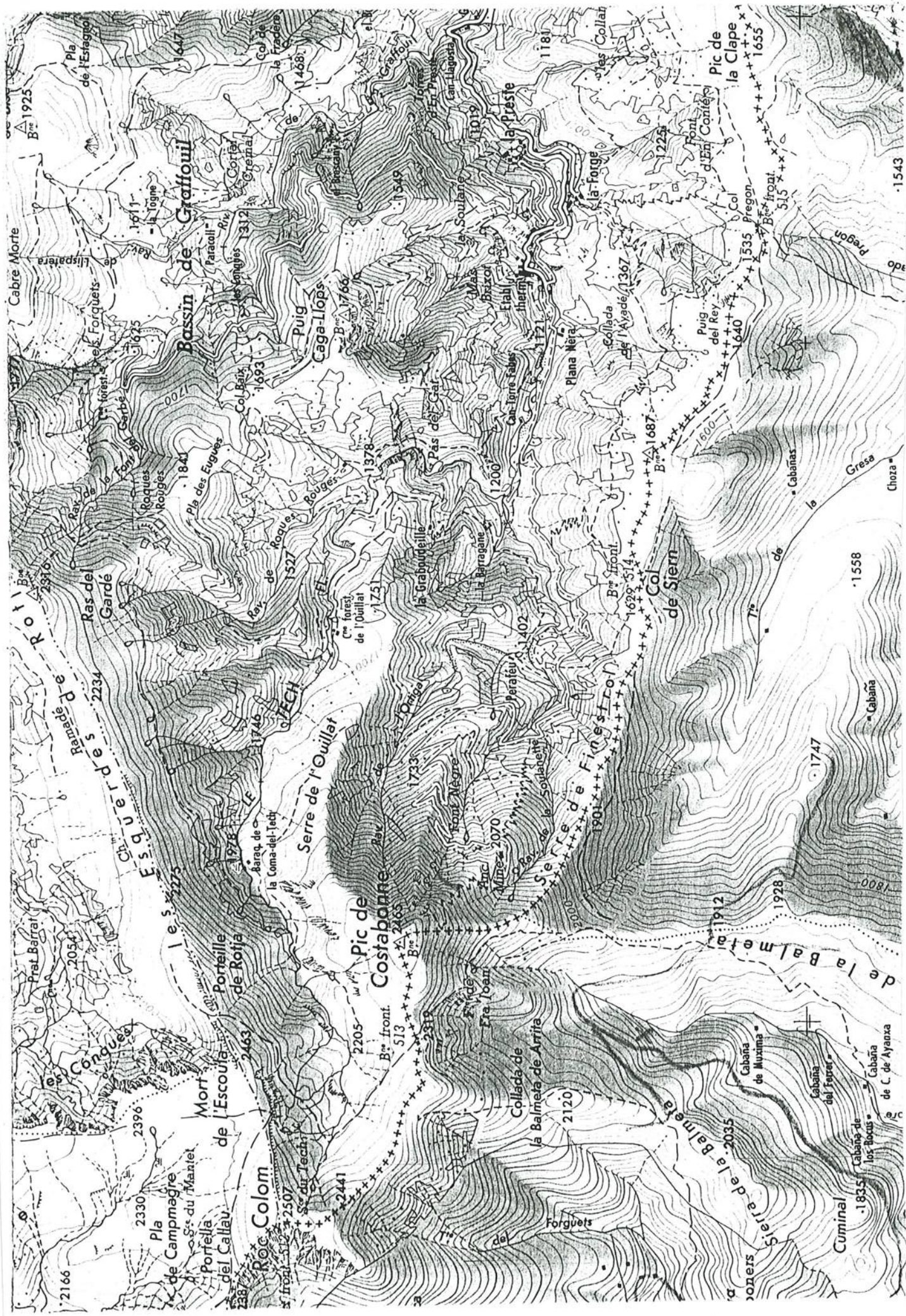
Figure 1.1 : Carte de situation des massifs du Canigou et de la Carança dans le domaine du métamorphisme hercynien des Pyrénées orientales (d'après les levés d'Autran, Fontelles et Guitard).
In. Guitard 1970.

A : Terrains de l'enveloppe paléozoïque. 1, zone de la chlorite; 2, zone de la biotite; 3, zone de la cordiérite et de l'andaloussite; 4, zone de la sillimanite associée à la muscovite passant à la zone de la sillimanite associée au feldspath potassique dans les massifs des Albères et de l'Agly.

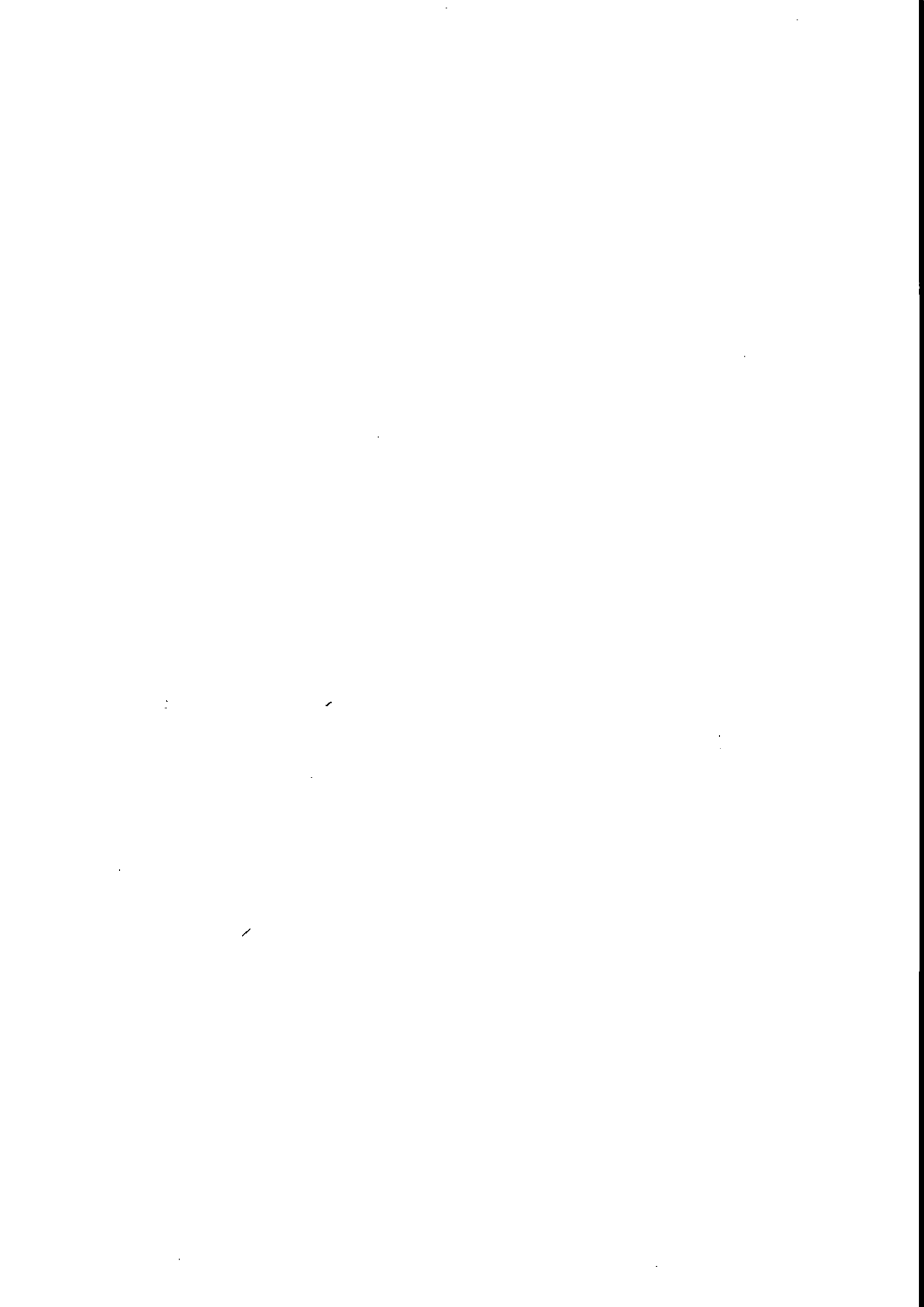
B : Terrains dérivant du socle précambrien sensu lato. 5, gneiss généralement ocellés (le plus souvent orthogneiss) dérivant des granites calco-alcalins précambriens (granites rapakivi du Canigou); 6, paragneiss à silicates alumineux de la zone silicatée feldspath potassique; 7, paragneiss appartenant au faciès des granulites à orthopyroxène et grenat; 8, massifs charnockitiques.

C : 9, granitoïdes hercyniens.
D : 10, terrains post-hercyniens; 11, failles.
N.B.-Sur le cartouche 2 (zone à biotite) l'orientation des traits est à l'envers.

A, massif des Albères; B, zone de Llansa; C, massif du Roc de France; D, massif du Canigou et de la Carança; E, massif de Mont-Louis; F, massif de l'Aston et de l'Hospitalet; G, massif de l'Agly; H, granite de Costabonne; I, granite profond du Canigou.



agrandissement carte IGN 1/50000



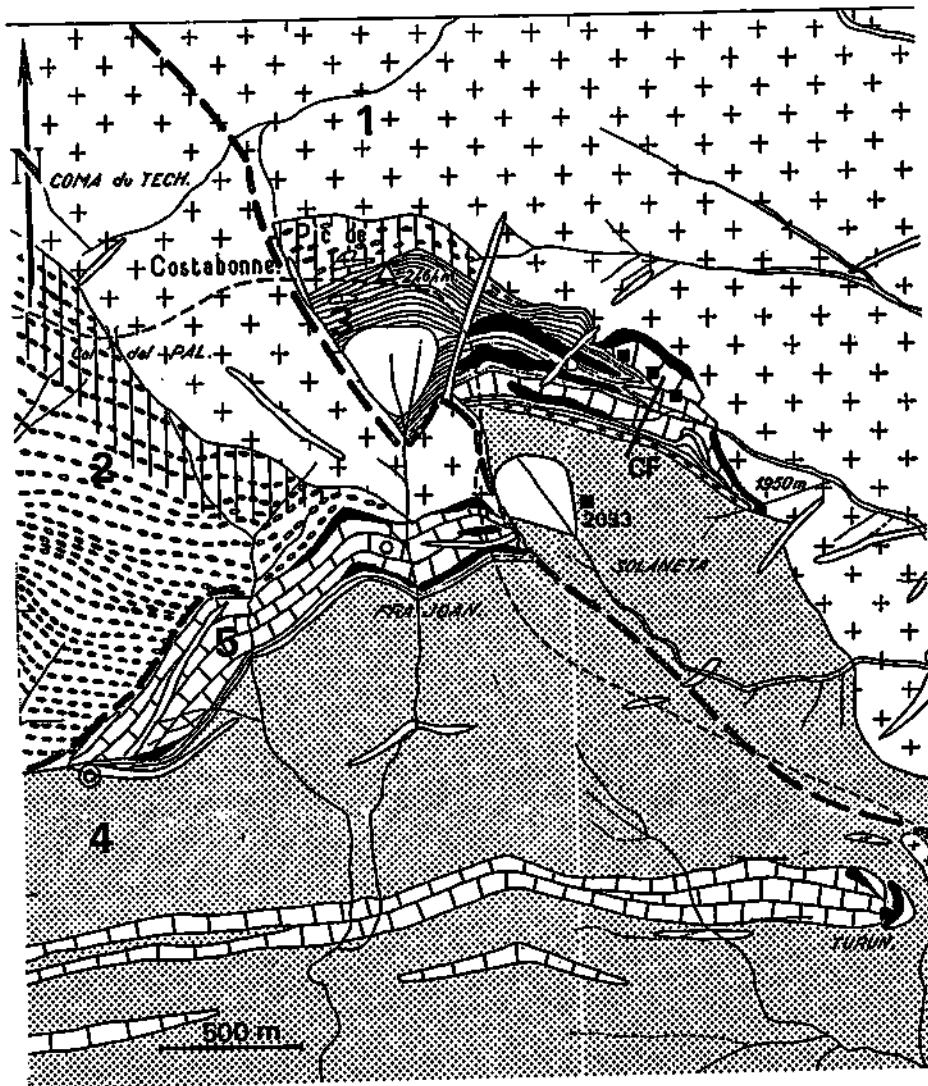


Fig. 19. — Carte géologique du contact sud du granite de Costabonne (G. GUITARD et P. LAFFITTE, 1960).
 1. granite; 2. gneiss ocellés; 3. cornéennes calco-alumineuses; 4. micaschistes; 5. calcaires métamorphiques.
 Les skarns sont en noir. Les carrés noirs indiquent l'entrée des galeries. Le niveau du chemin de fer (CF),
 indiqué par le trait noir, conduit à la galerie 2185.

Guy, 1980

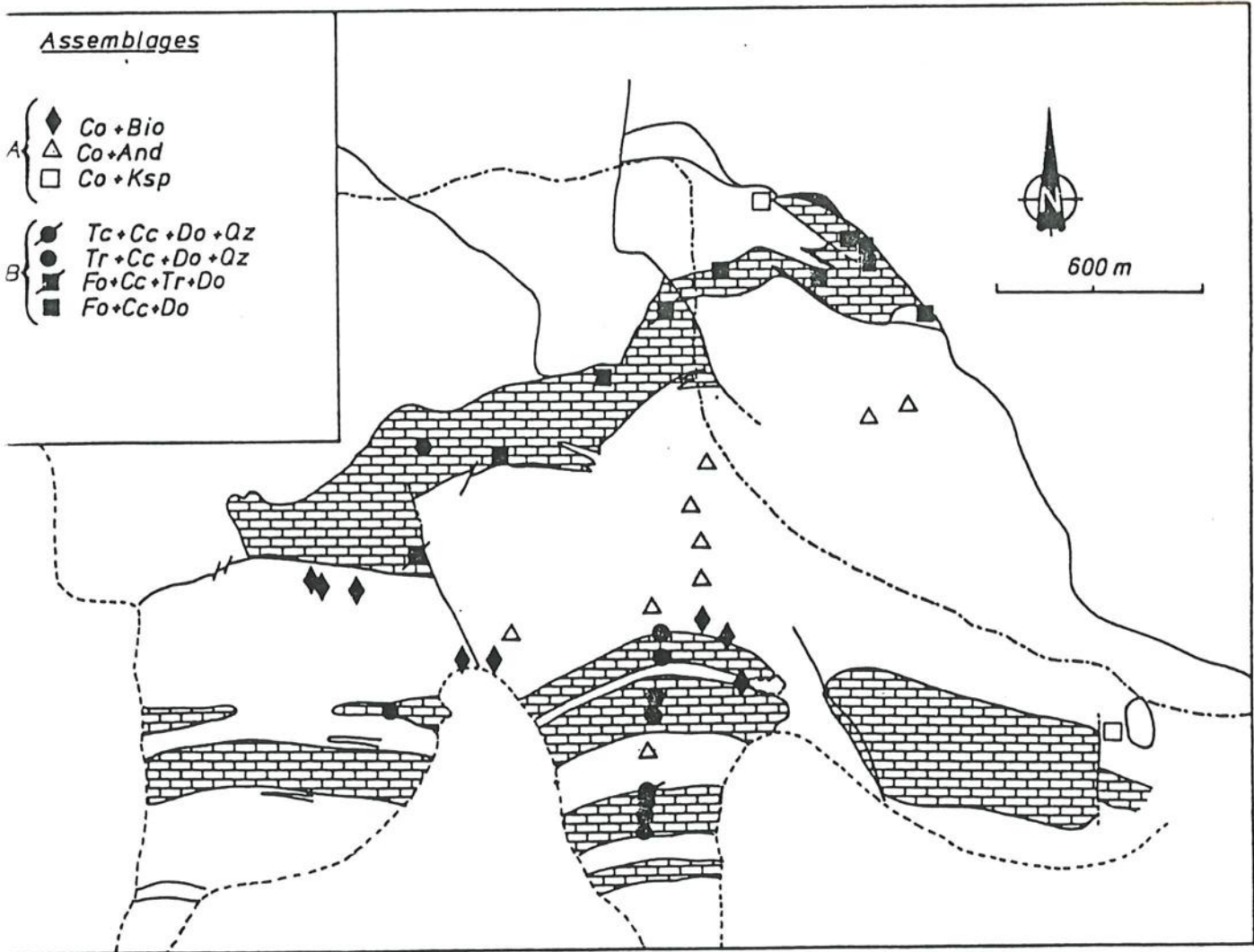
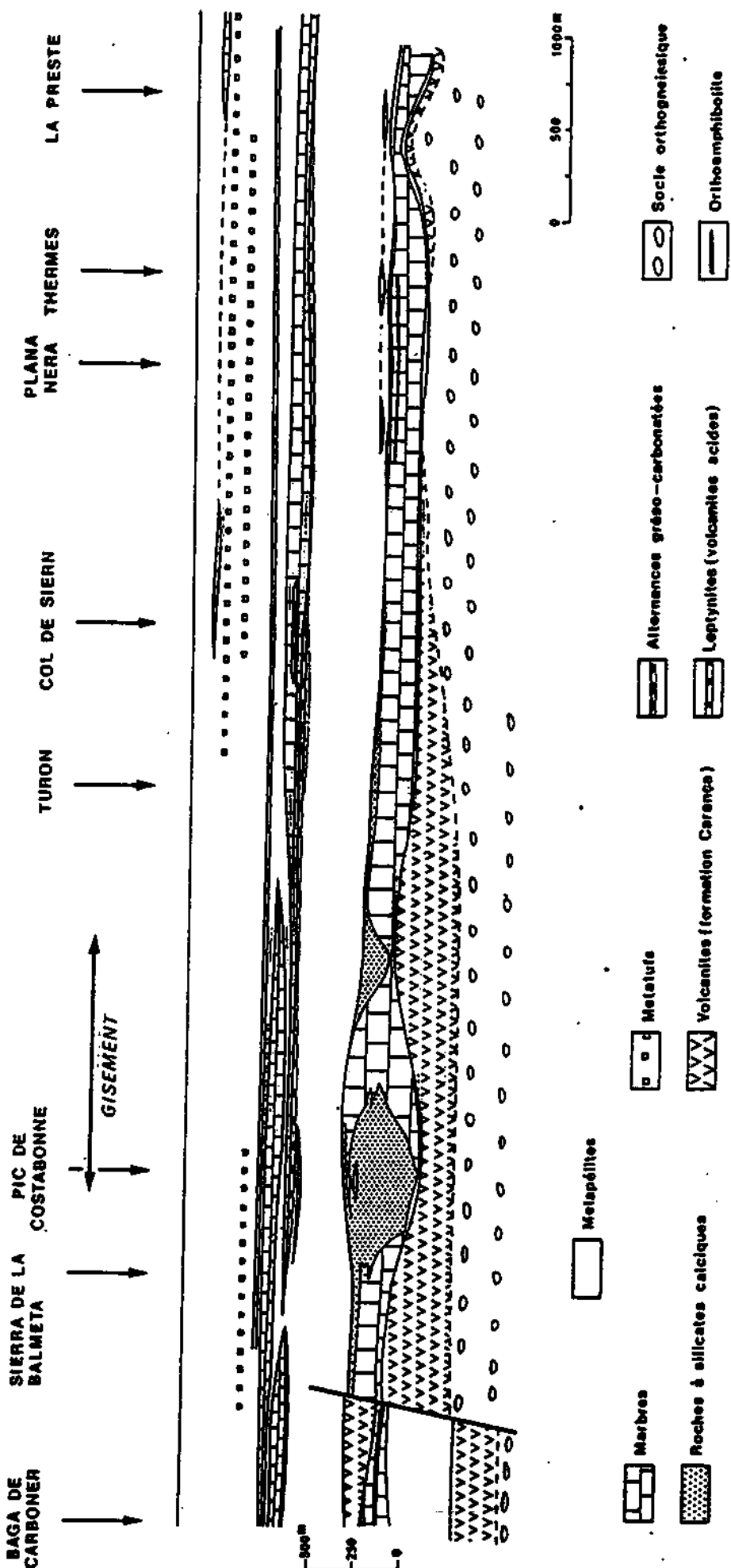


Fig. 2.1 Assemblages observés dans les marbres métamorphiques de Costabonne comparés aux pélites (van Marcke 1983). Même légende que fig.1.1.

W

E



Reconstitution stratigraphique schématique de la base de la serie de Canaveilles entre le Baga de Carboner et La Preste

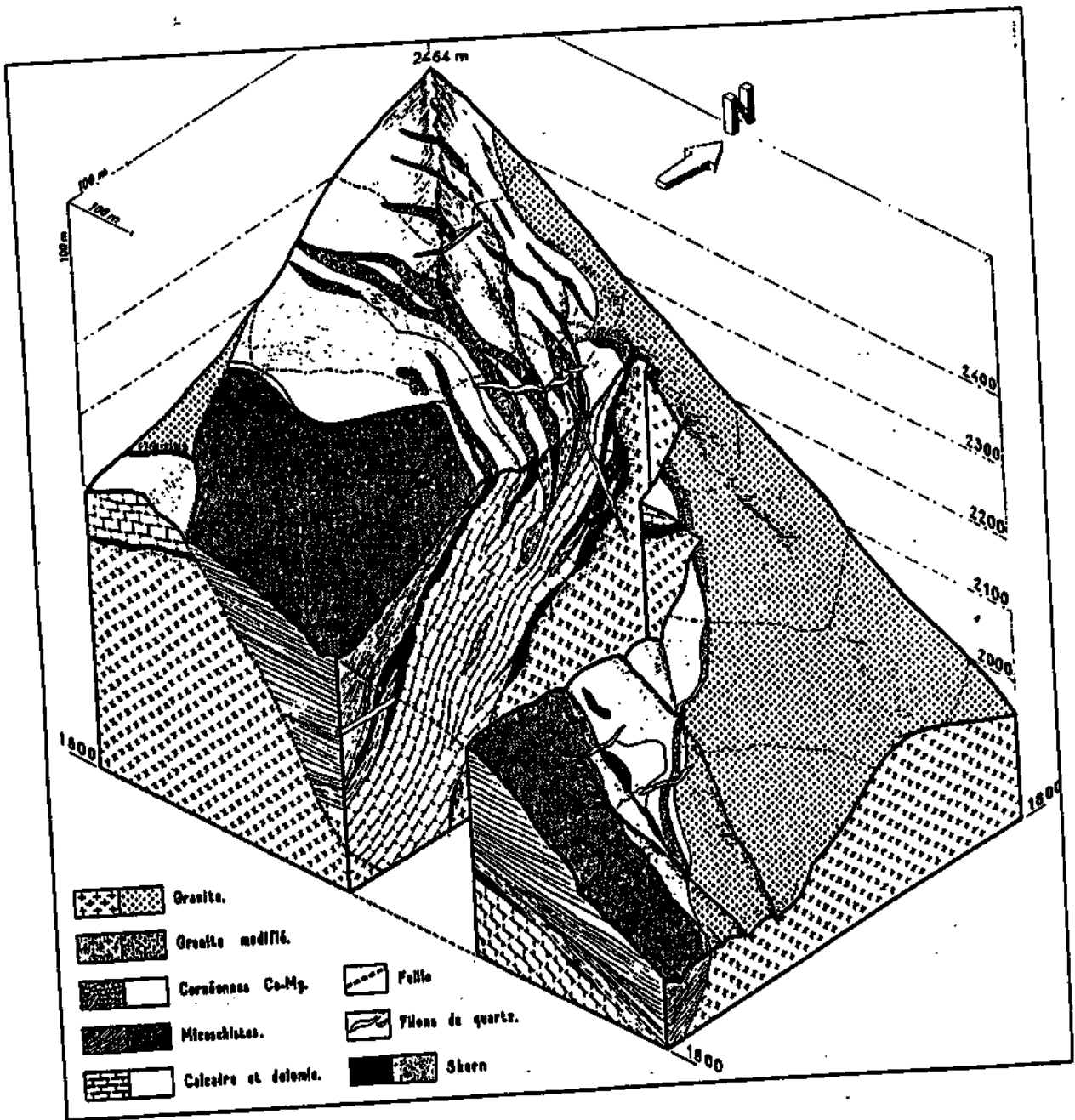
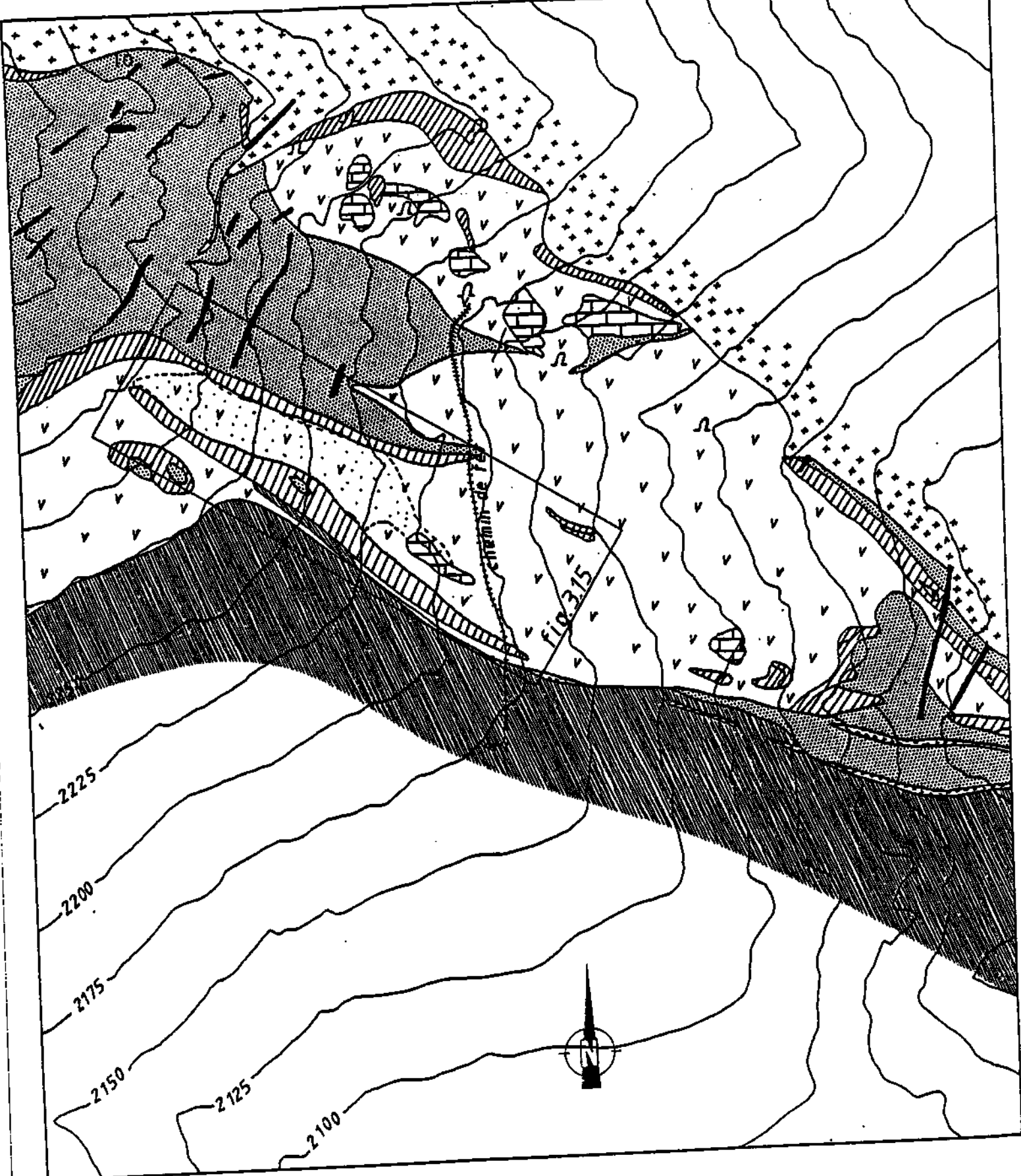












Fig. 1.1d Bloc-diagramme de l'indice du pic de Costabonne.
 Figure empruntée à Guitard et Laffitte (1958).



- | | | | |
|---|---|---|----|
|  | 1 |  | 7 |
|  | 2 |  | 8 |
|  | 3 |  | 9 |
|  | 4 |  | 10 |
|  | 5 | | |
|  | 6 | | |

0 100 m

Fig 11b
 Carte de détail du gisement de Costabonne d' après Deremetz et Guitard (1957)
 1: marbre calcitique; 2: marbre dolomitique; 3: granite de Costabonne; 4:
 roches silico-alumineuses en partie skarnifiées (voir van Marcke de Lummen,
 1983); 5: grenato-pyroxénites (skarns massifs); 6: micaschistes de l'encaissant
 7: filons de quartz; 8: filons d'aphtas, pegmatites et alaskites (granites
 blancs); 9: entrées de galerie; 10: marbres à brucite.

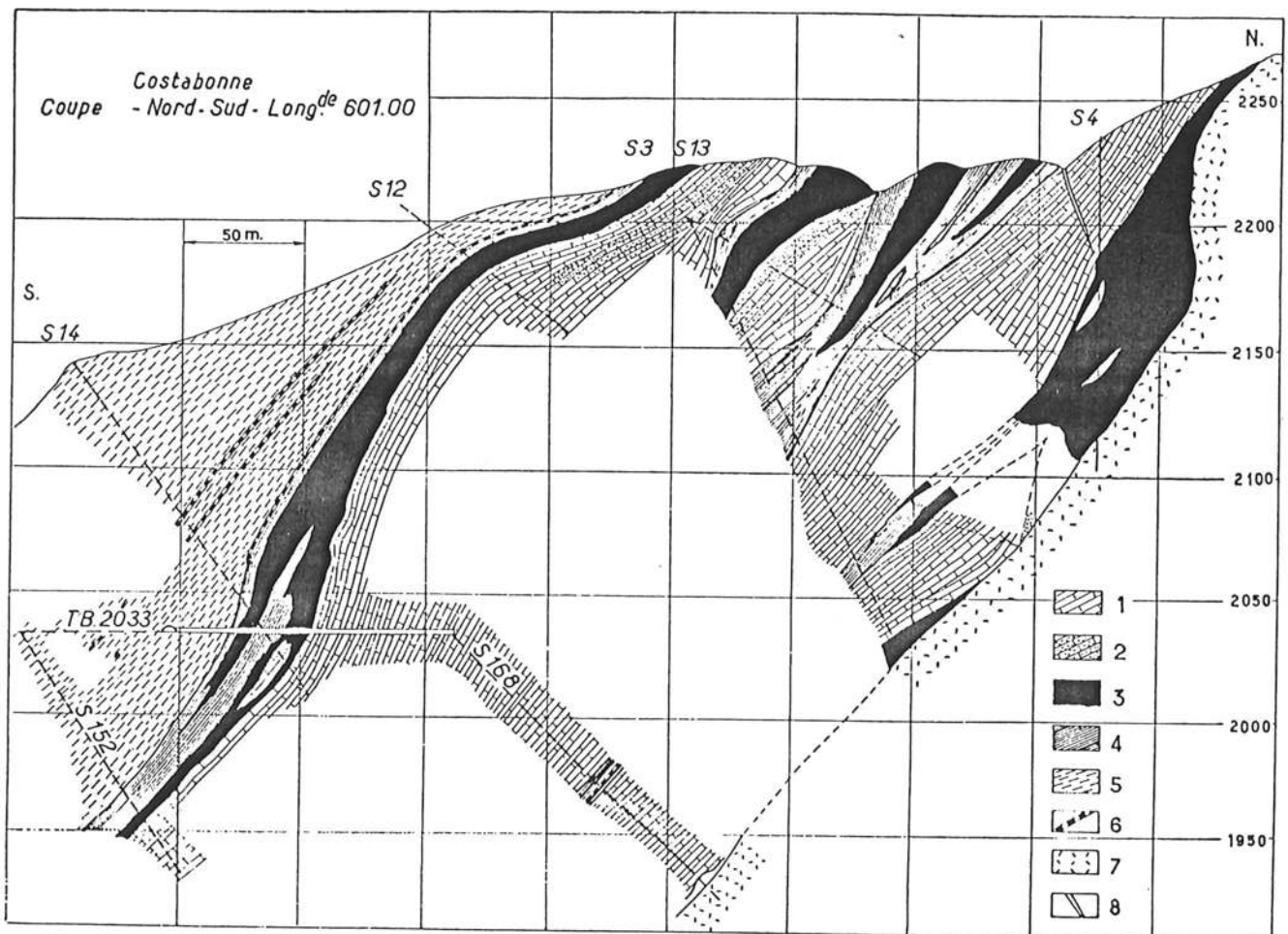


Fig. 20. — Coupe N-S du gisement (G. GUITARD et P. LAFFITTE, 1960).

1 : dolomies et calcaires métamorphiques; 2 : marbres à brucite; 3 : skarns; 4 : cornéennes calciques; 5 : micaschistes; 6 : alaskite; 7 : granite; 8 : filon de quartz.

ETUDE GEOLOGIQUE ET PETROLOGIQUE DU GISEMENT DE COSTABONNE

239

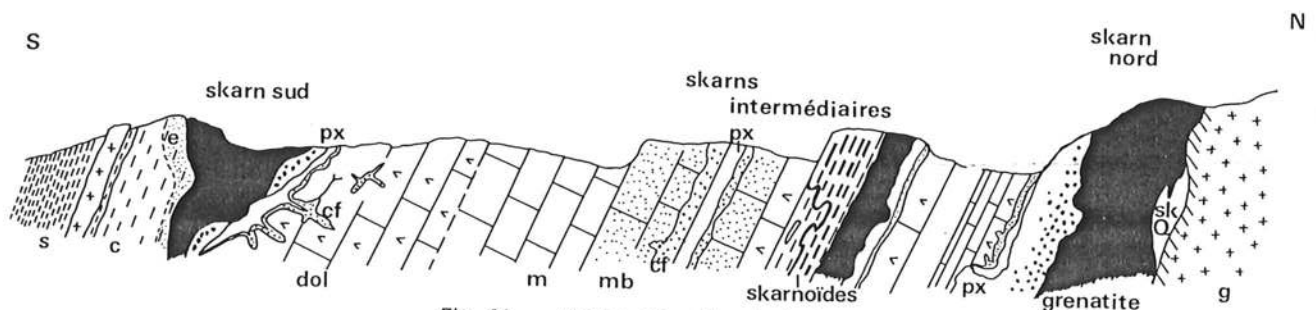


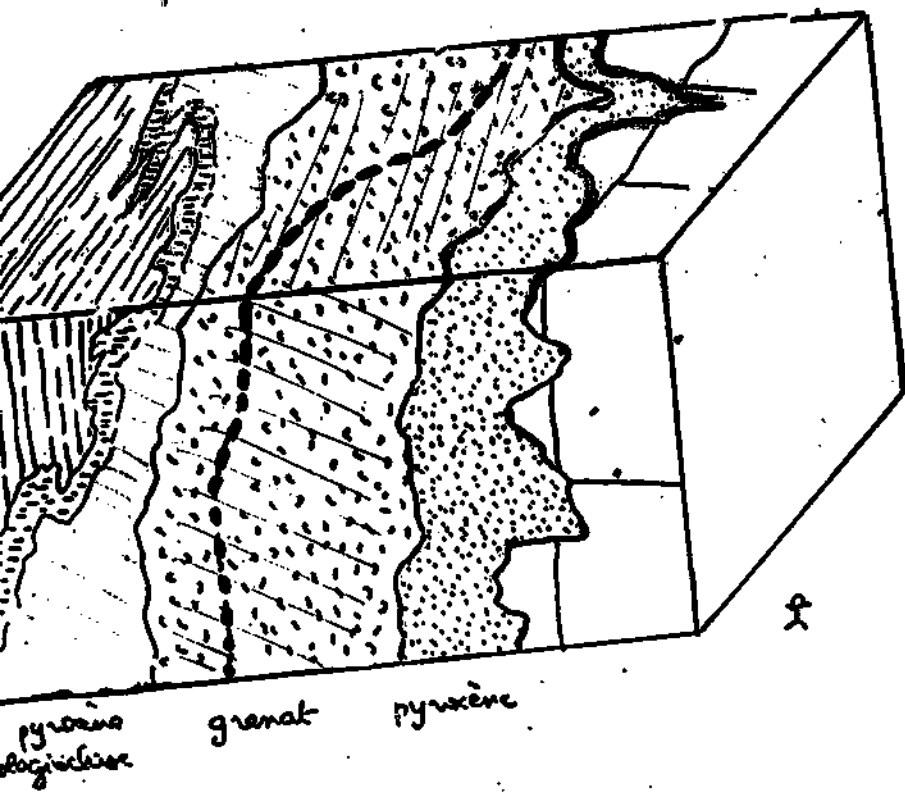
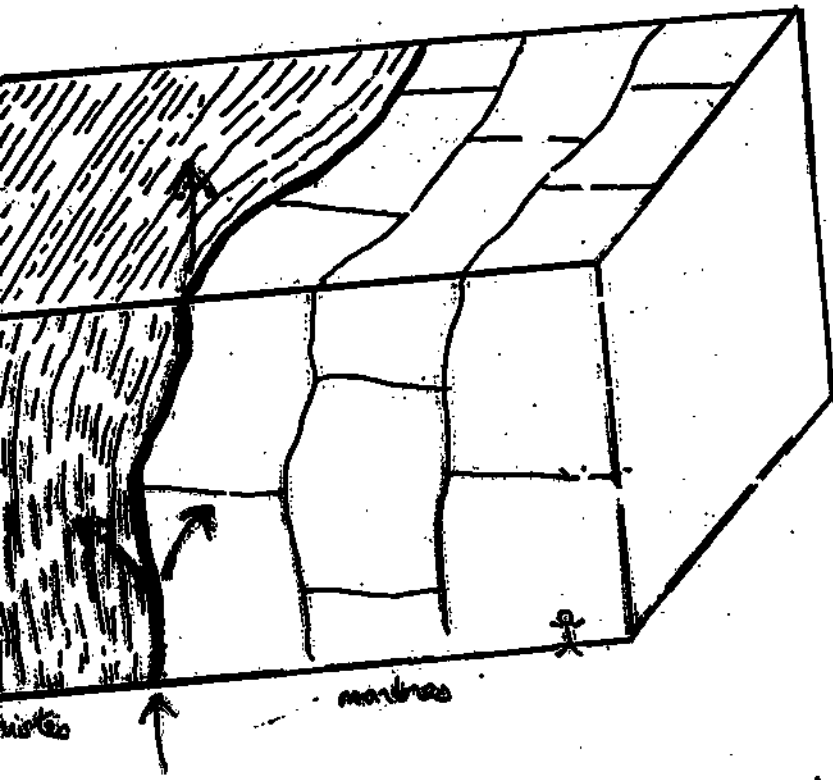
Fig. 21. — Coupe du « chemin de fer ».

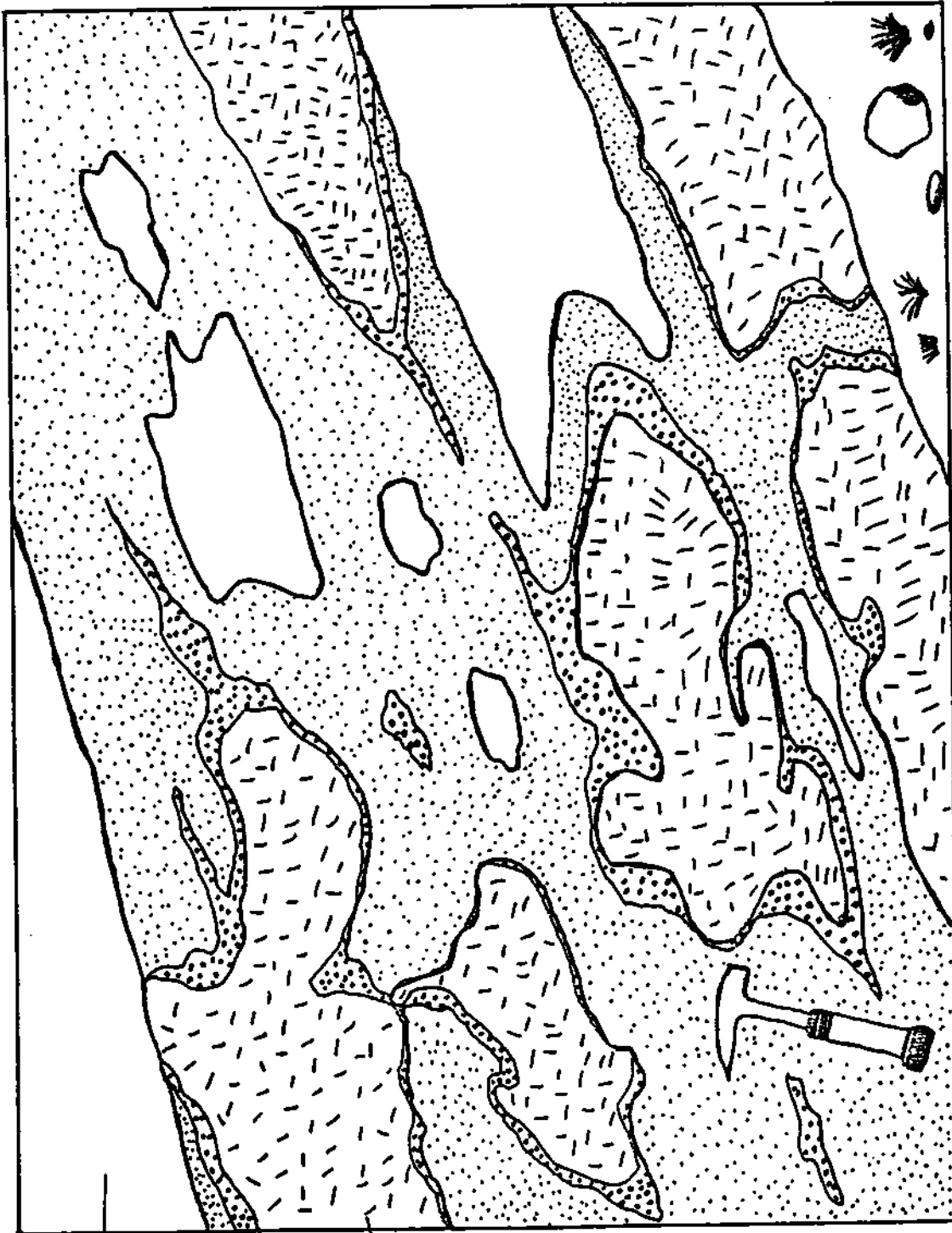
Coupe très schématique du gisement au niveau du « chemin de fer » (cote 2180 m). La coupe fait 400 m environ. Les skarns intermédiaires sont situés à mi-chemin entre les skarns nord et sud.

s) micaschistes; c) cornéennes calciques; e) zone épidotisée; px) pyroxène (salite (gros points noirs) et diopside (blanc)); cf) calcite + forstérite; dol) dolomie; m) marbres calcaires; mb) marbre à brucite; g) granite; skQ) skarn quartzique. Les grenatites sont en noir.

Guy, 1980

**2) LES SKARNS :
ZONATIONS SUR DIVERS SUBSTRATS**





DOLOMIE

Calcite
+ forstérite
en petits grains

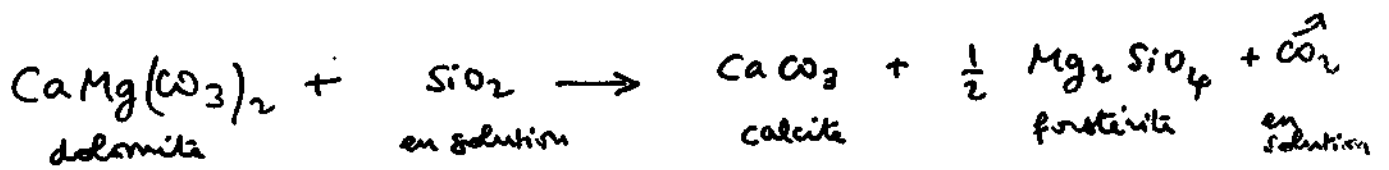
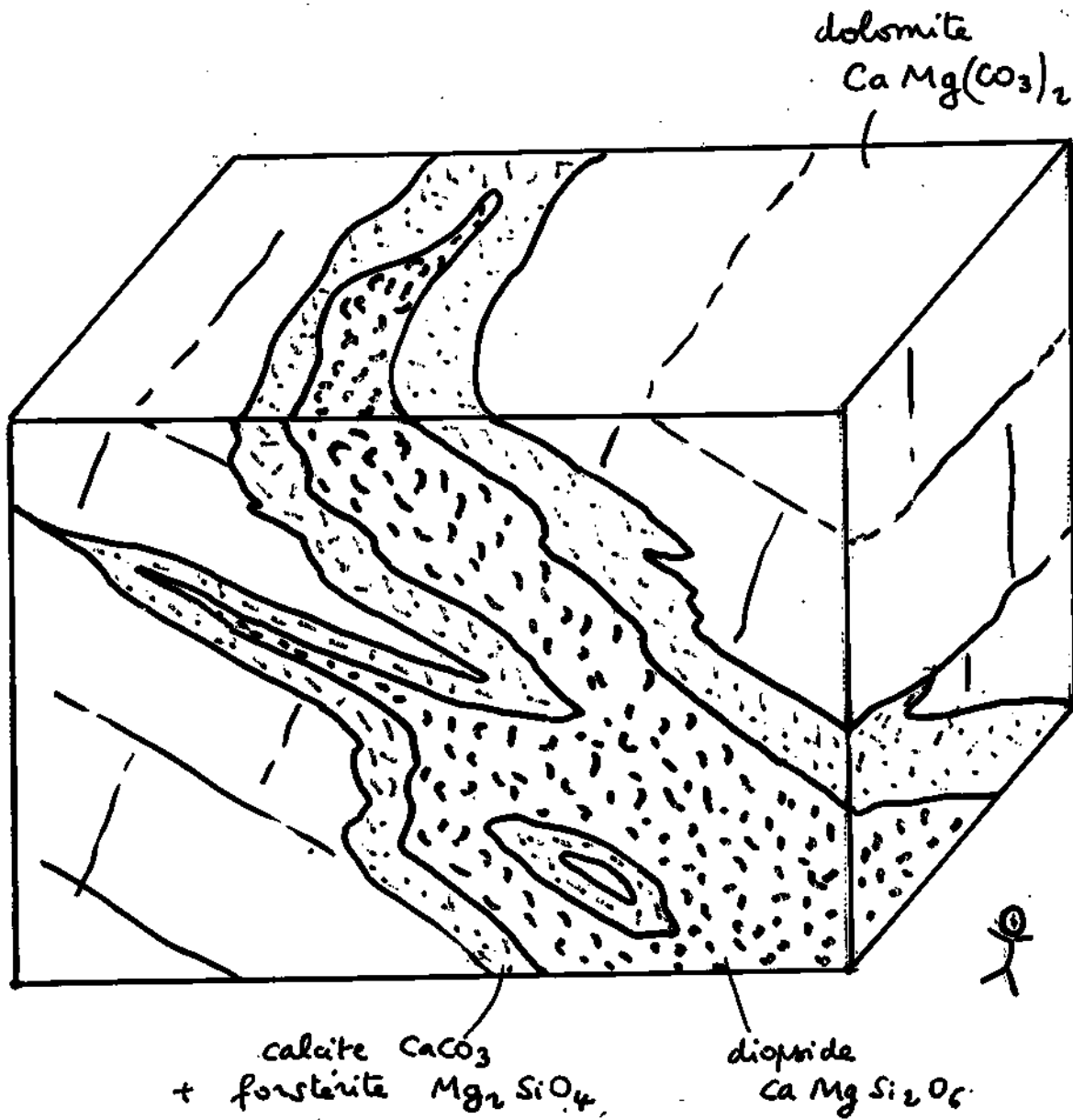
Calcite
+ forstérite
en gros grains

DIOPSIDE

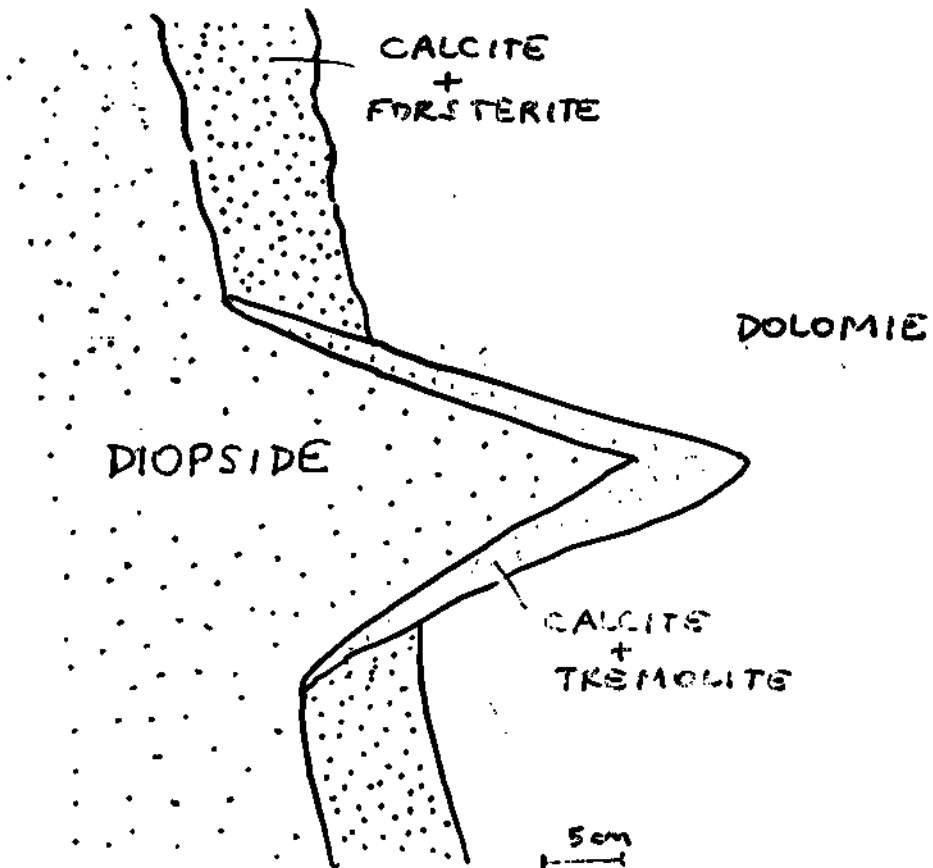
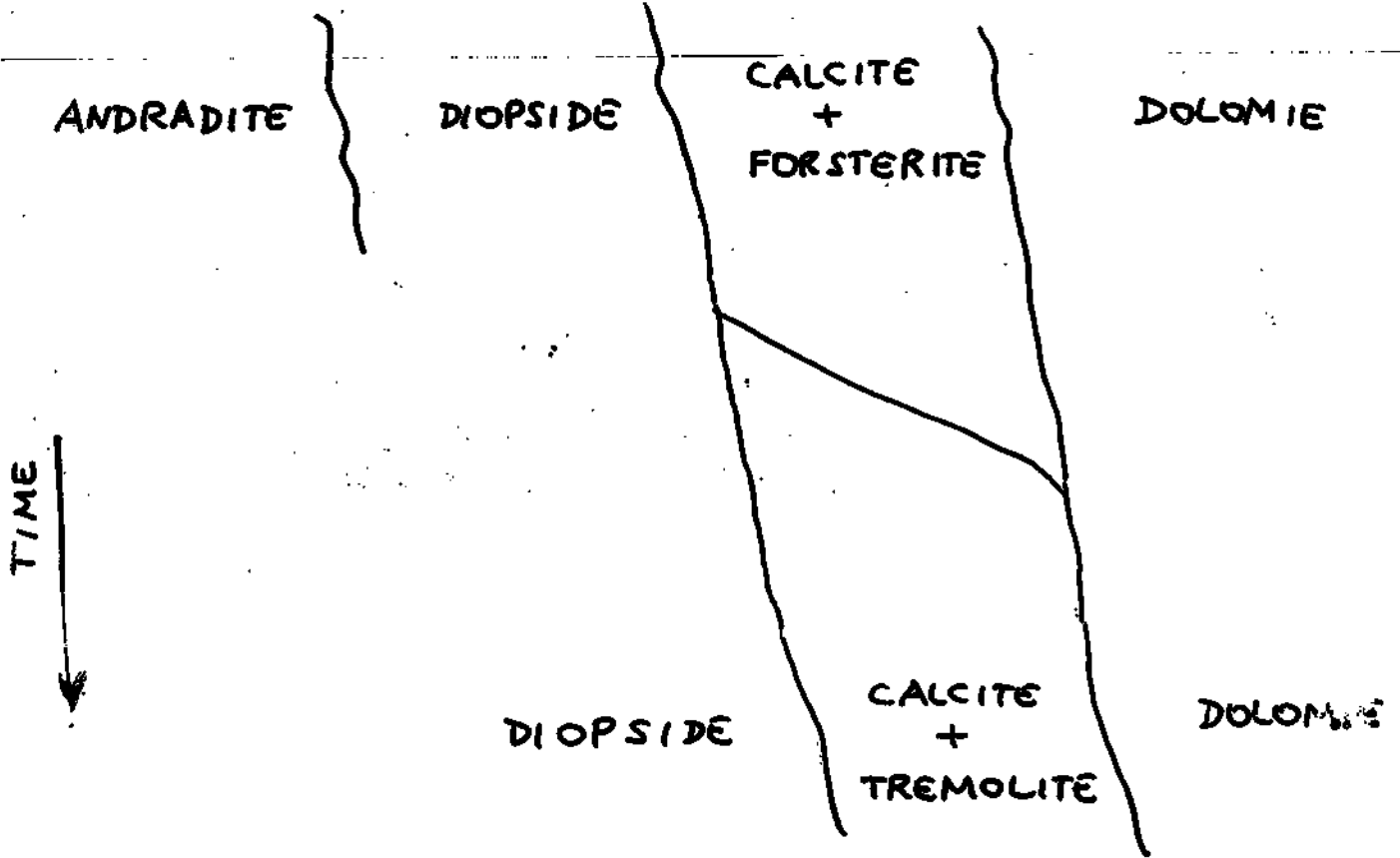
FIGURE 1: UN EXEMPLE DE SYSTEME DE ZONES DEVELOPPE SUR DOLOMIE

Ce dessin représente de façon schématique un affleurement de Costabonne (chemin 2200, skarn sud; voir aussi les photographies de la planche 7 de l'annexe II). La dolomie figurée en blanc est transformée le long d'un front net en un skarn à calcite et petits cristaux de forstérite. Après un nouveau front net on observe un skarn à calcite et gros cristaux de forstérite: le front se définit ici par un changement brutal de la granulométrie du skarn. La dernière zone visible sur l'affleurement est la zone à diopside (sur un autre affleurement on voit une zone supplémentaire d'andradite au centre du diopside). Le marteau donne l'échelle.

2891 Rnz



ESPACE
→



guy

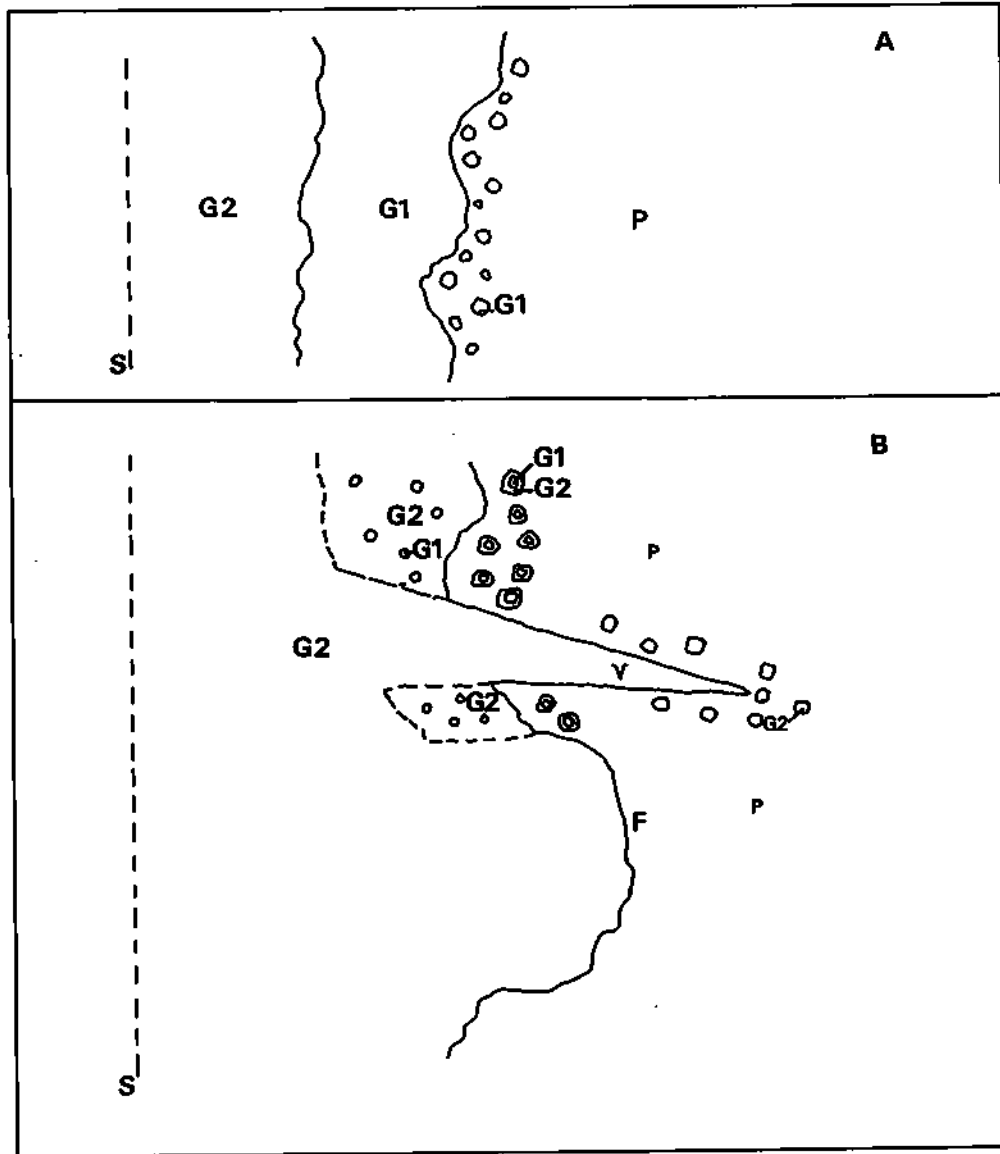


Fig. 29. — Schéma explicatif sur les relations observées entre les grenats; G1, G2 : grenats; P : pyroxène. En A on représente la colonne métasomatique initiale montrant l'avancée de deux zones synchrones de grenats. En B la zone arrière télescope la première qui ne continue plus à se développer. Un nouveau front F peut être observé, ainsi que des veines (V) de grenat G2, directement dans le pyroxène. S représente la zone source.

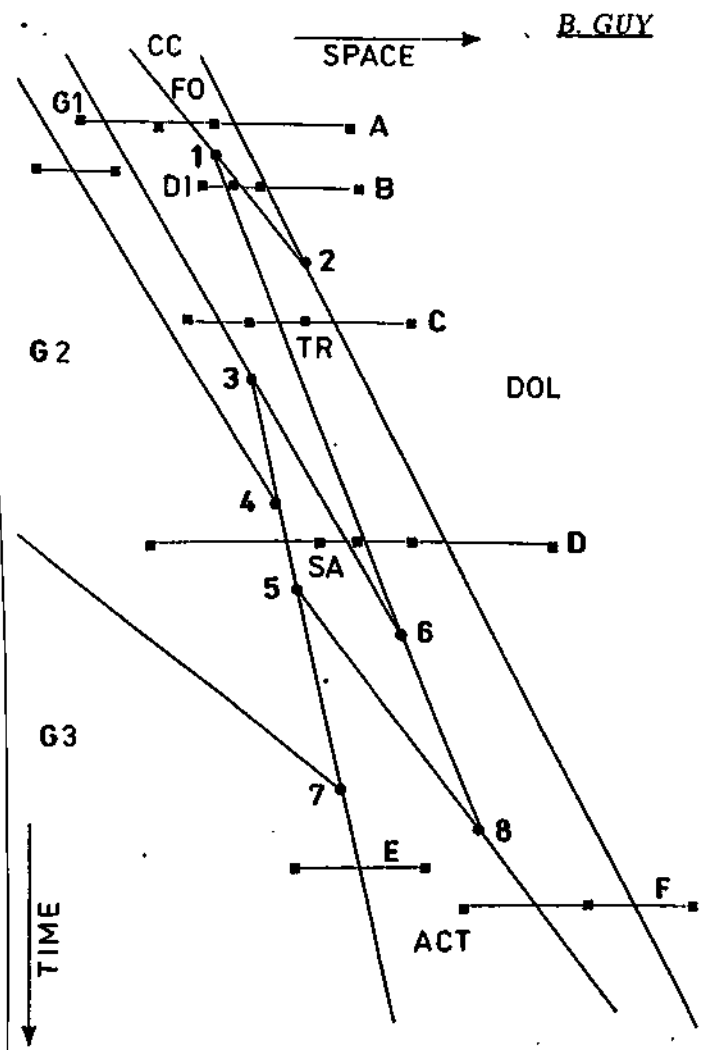
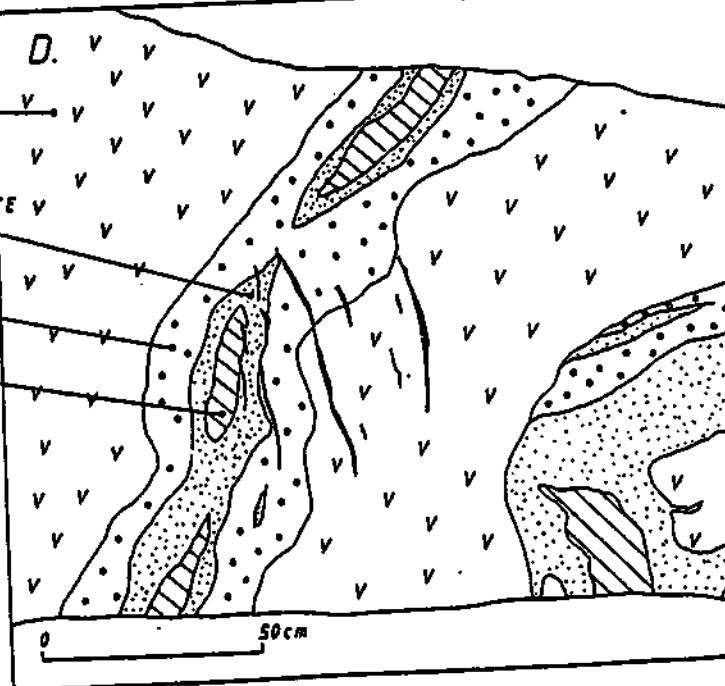
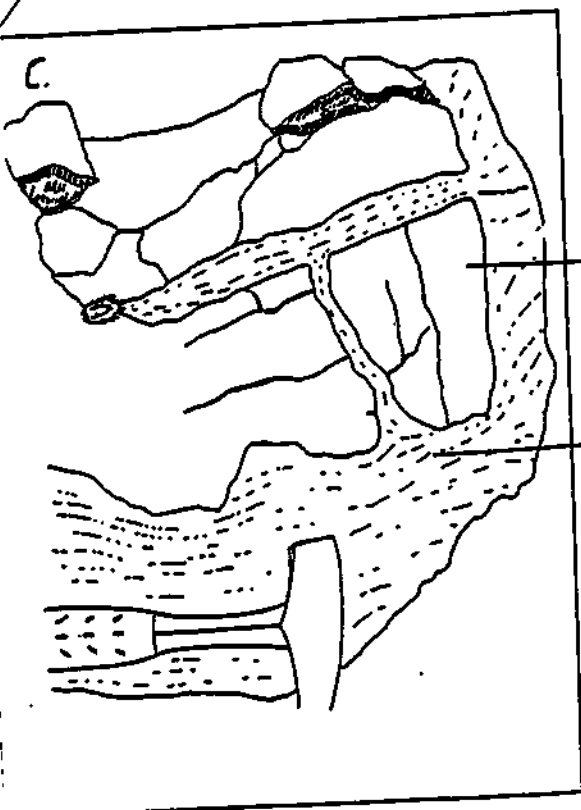
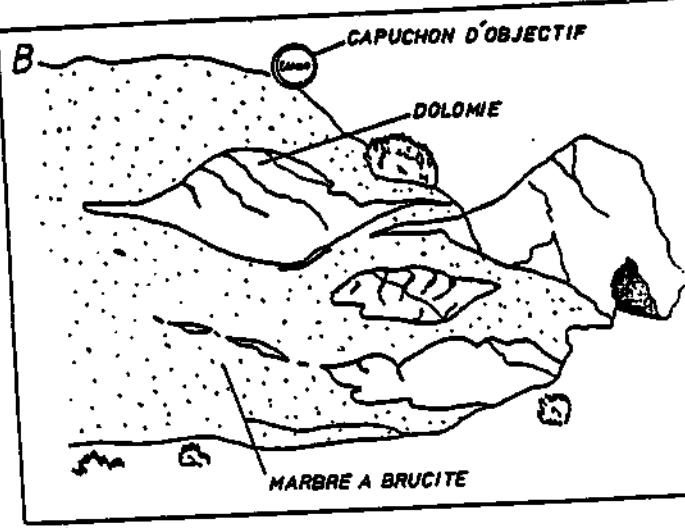
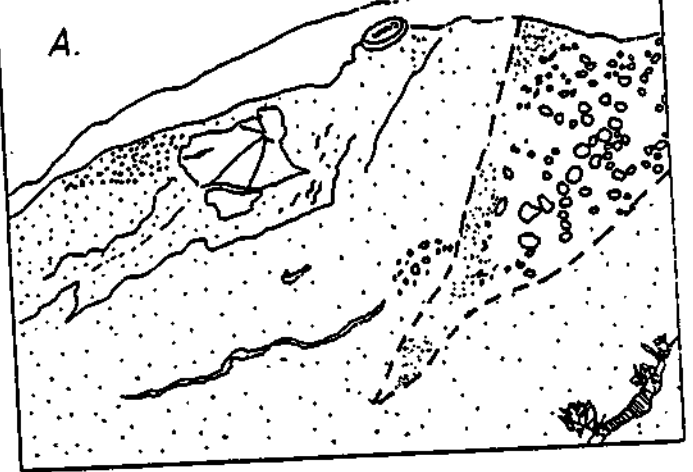
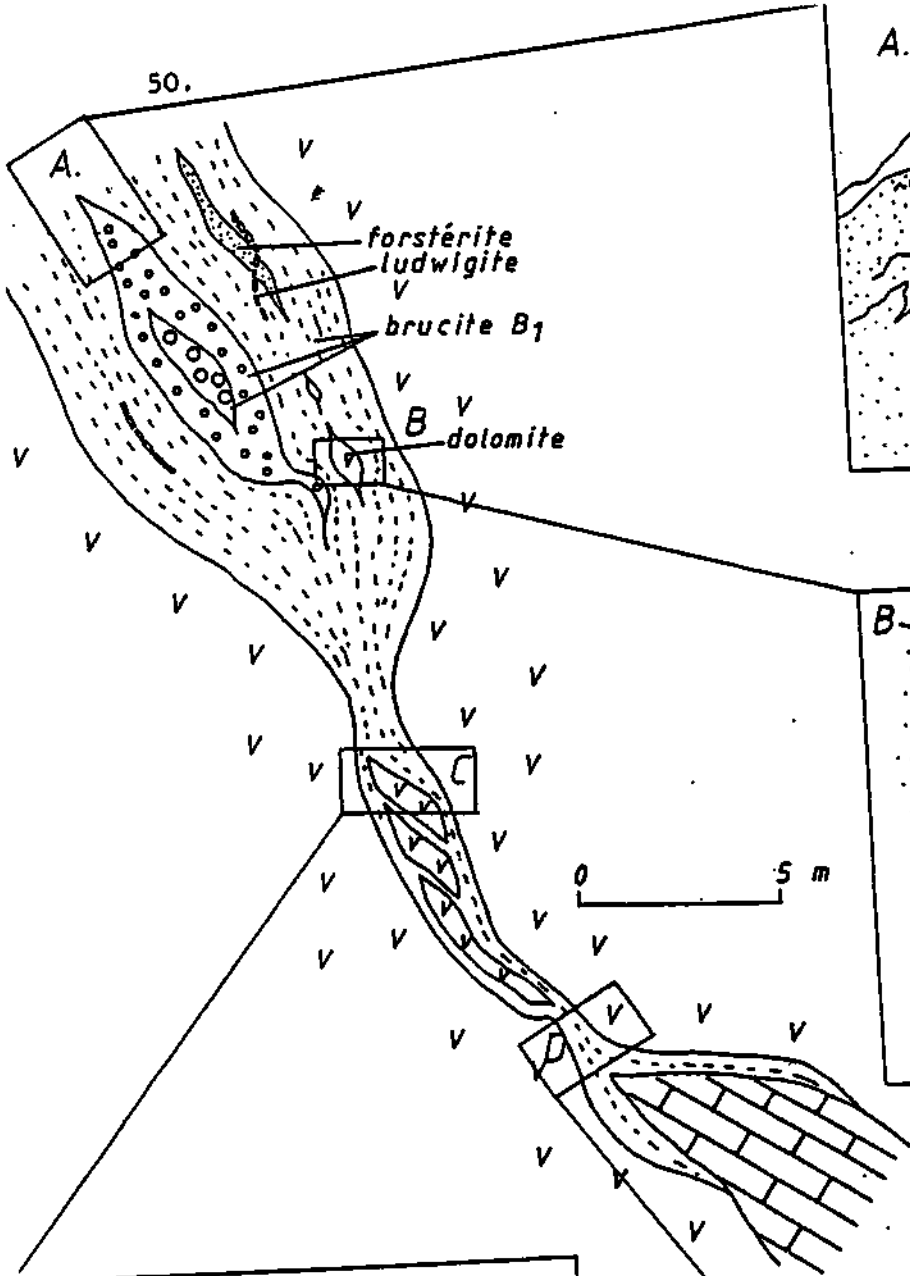


Fig. 1 - The several types of zonings on dolomitic starting materials and their temporal relationships. Space is indicated in abscissa, time in co-ordinate. The figure represents the sequence with time of the zonings that could be observed at a given locality: during the pervasion of the fluid at the same place, zoning is evolving and overprinting itself. The movement of the fluid is from the left (feeding vein) to the right (dolomite). The different zonings are not simultaneous: a zoning replaces the preceding as one progresses downward along the vertical axis. The correlative increase with time of thickness of the zones is indicated by the obliquity NW-SE of the different fronts (a front that ceases to progress would be indicated by a vertical limit). Spatial scale: the width of the drawing represents a few tens of centimeters to a few tens of meters. Temporal scale: it is difficult to give an estimate; according to what is known on advection velocities for the fluids and on the thermal evolution in perigranitic contexts (Guy, 1979) one can image that the length of the figure, starting with the early skarns at the top to the last stages at the bottom, represents a few hundreds of thousands of years. Zonings A, B etc. have been observed in the field (see Tab.1). Triple points corresponding to the temporal end or beginning of zonings are numbered 1, 2 etc. Typical compositions of minerals are given in Table 2.

ABBREVIATIONS: CC = calcite, FO = forsterite, DI = diopside, G1 = first type garnet, andradite, G2 = second type garnet of grandite type (average composition: Gro 65, And 25, Alm + Sp 10), TR = tremolite, ACT = actinolitic amphibole, SA = salite, Gr3 = late garnet, Grossular rich with Almandine + Spessartine from 30 to 50 %.



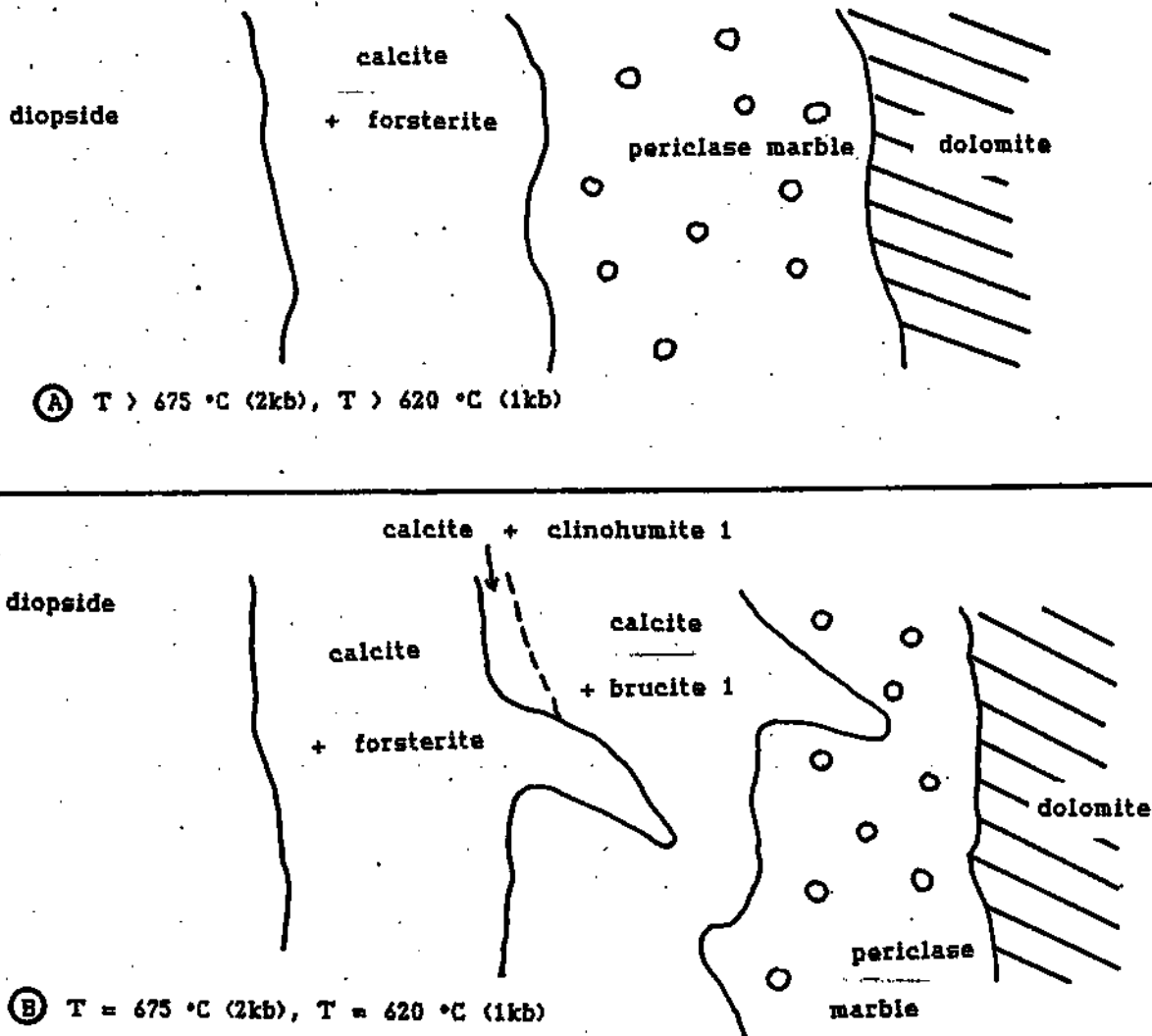
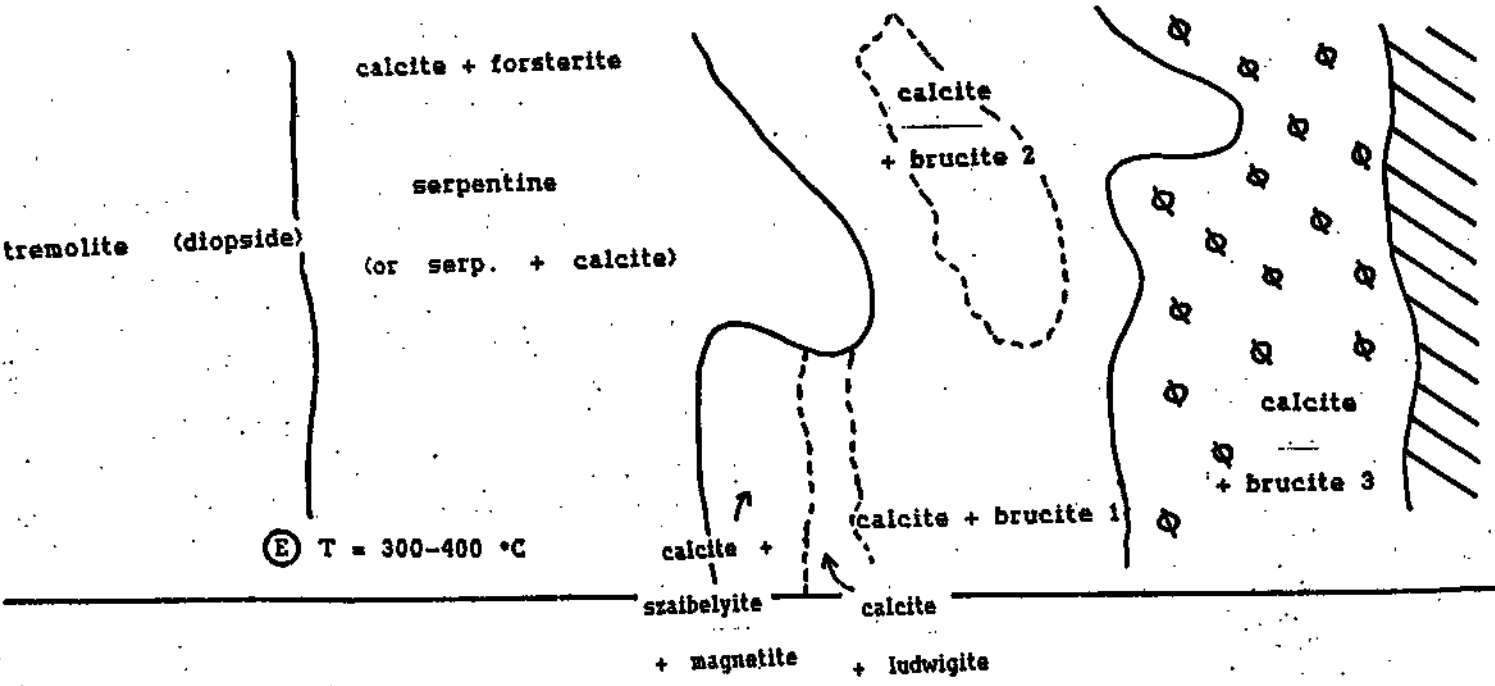
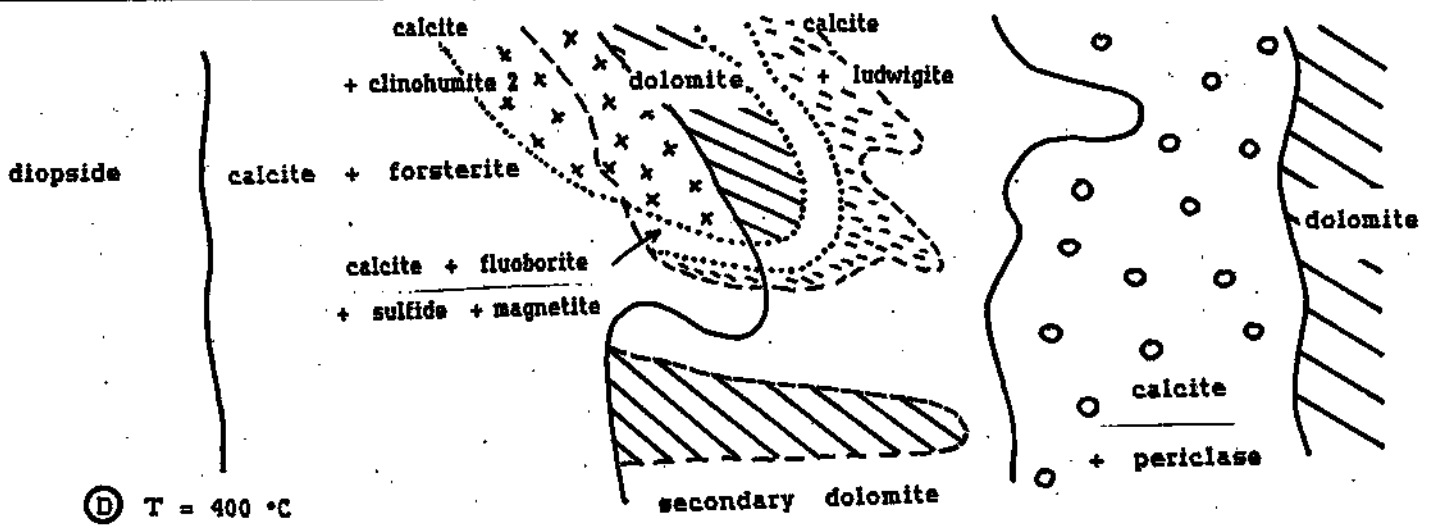
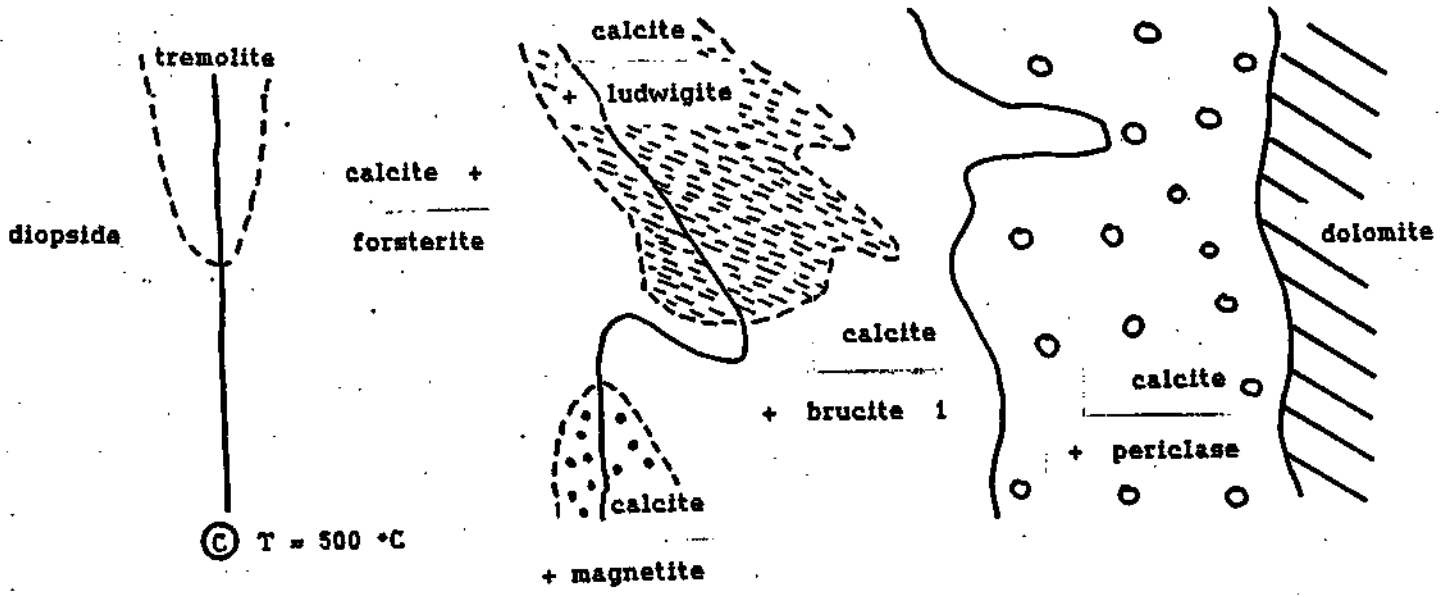


FIGURE 29

Zonations of the "brucite marbles" of Costabonne. These are actually particular skarns developing on dolostones and in close relation with the skarns described in previous studies. In order to understand the complexity of such skarns one must have in mind two main points: a) several transformation zonings are possible, depending on the temperature of formation (according to thermodynamic data); b) the minerals that have been formed at a given stage may be altered in situ in a subsequent stage. Knowing that the metasomatic fluid may have pervaded in the same place during a long time interval (and that in consequence the corresponding interval of temperatures may have been broad, we are led to the idea that zonations themselves may alter one another. The drawings given here give a provisionnal interpretation of several cases of "brucite marbles" at Costabonne. Taken in M. Dubru's work; see document 7.

FIGURE 29



Guy et al.

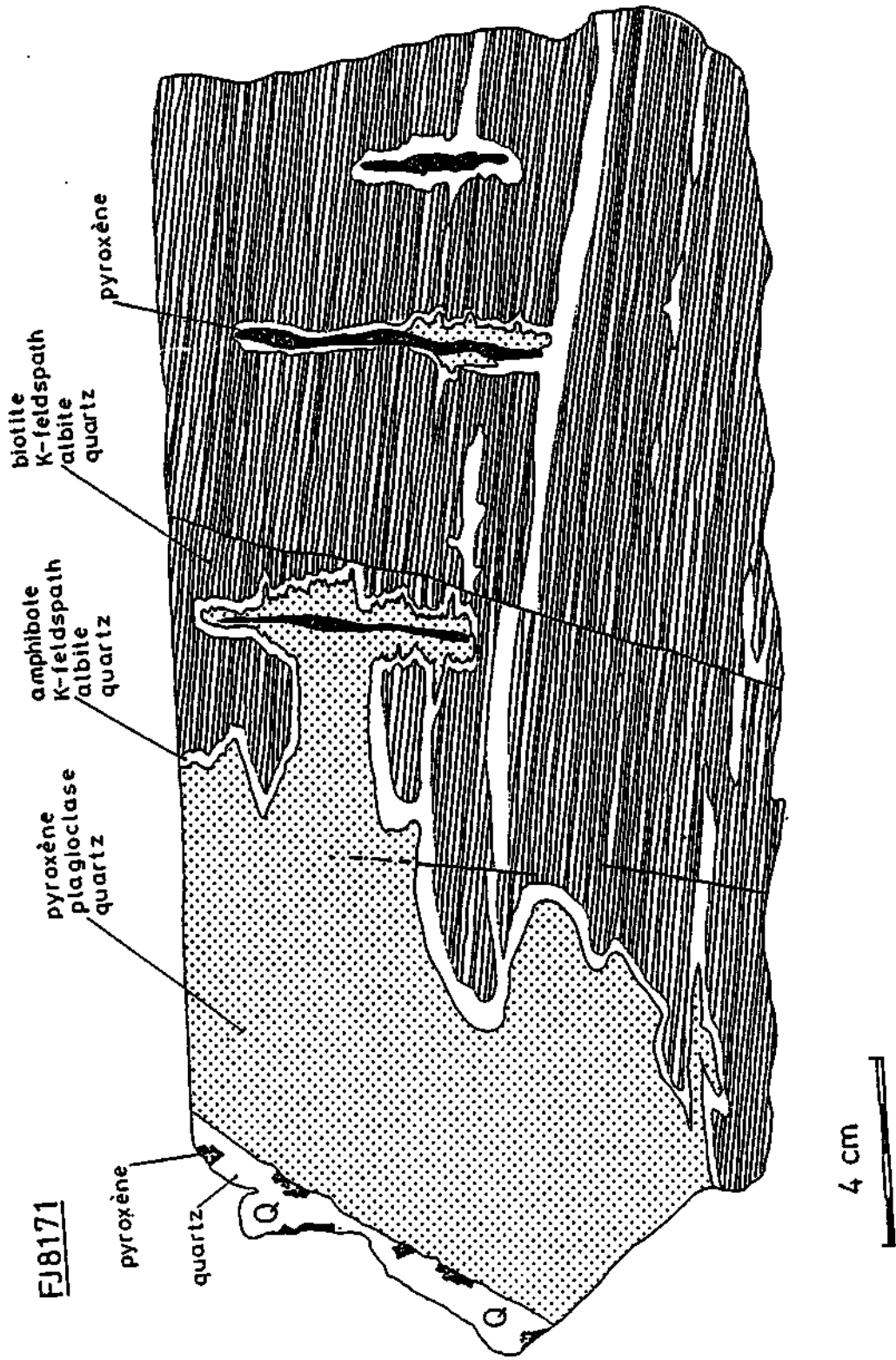


Figure 3.6 : Echantillon FJ8171, réseau de veines à pyroxène.

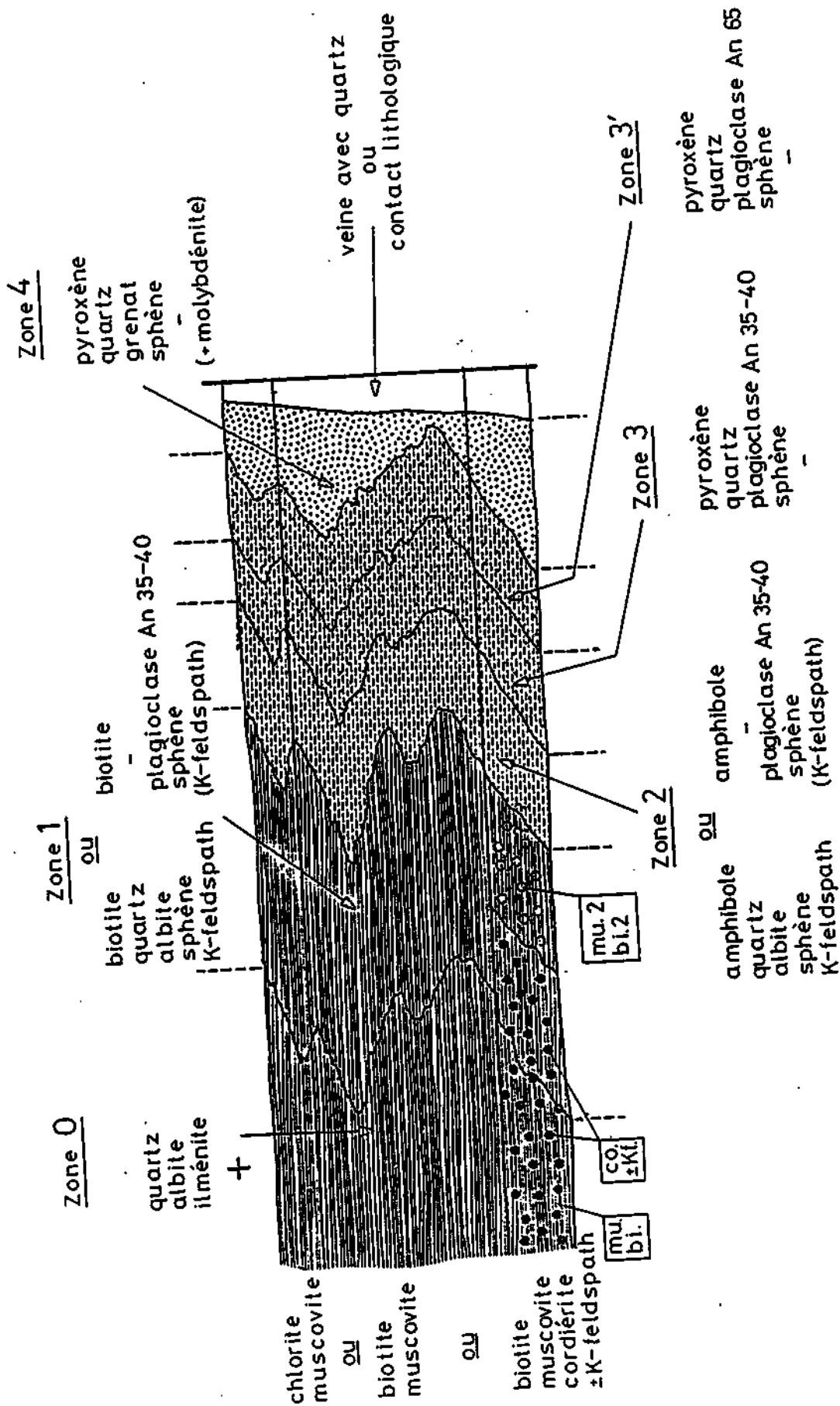


Figure 3.19 : Schéma de la zonation générale des skarnoïdes, pour différents substrats (résumé des observations).

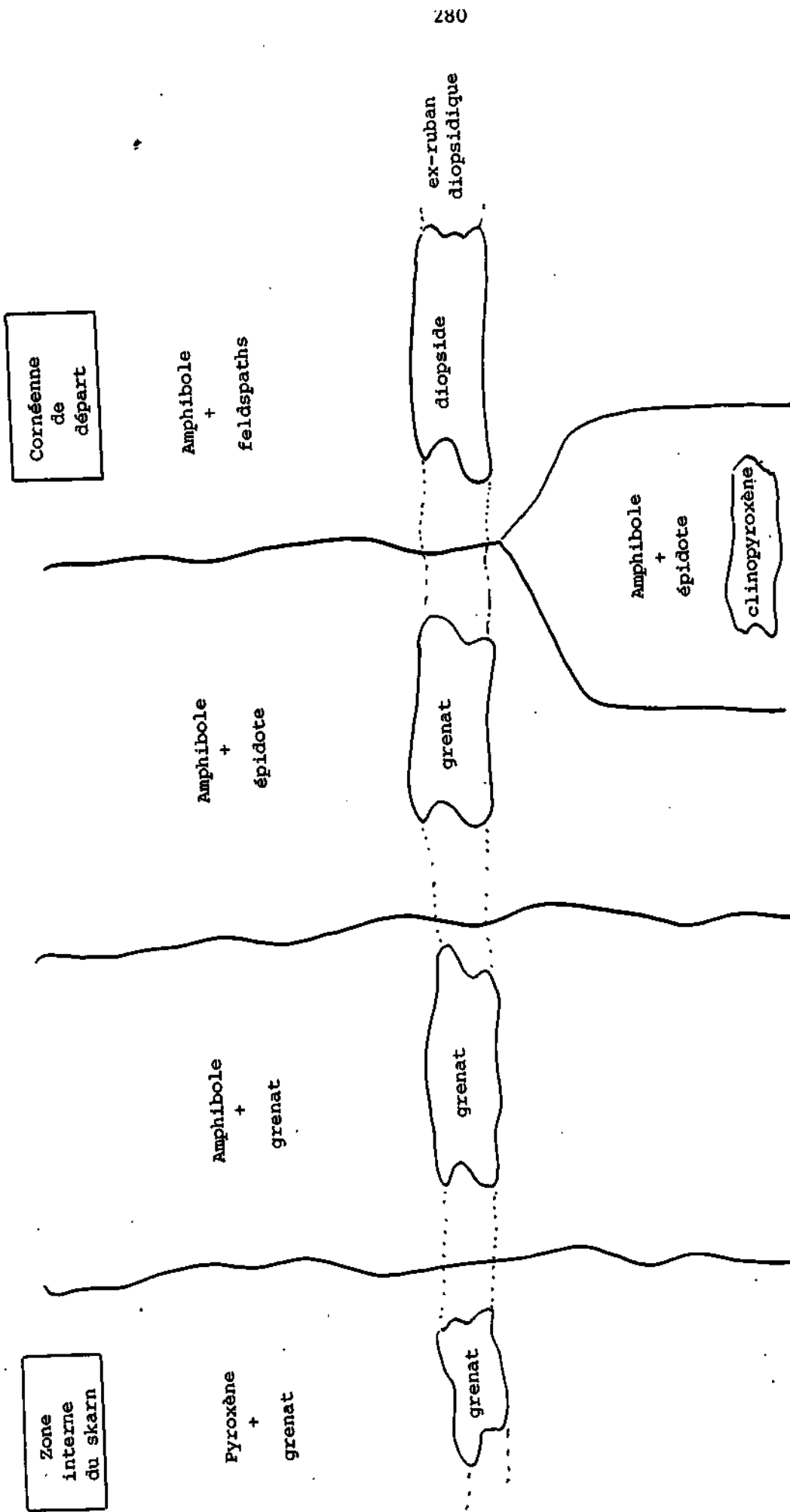


FIGURE 3

Schéma de succession des zones de skarns développés sur les cornéennes calciques amphiboliques à rubans ou amandes de diopside. Il semble que le passage entre la première et la seconde zone puisse se faire par une zone à amphibole + épidote + clinopyroxène (des rubans diopsidiques).

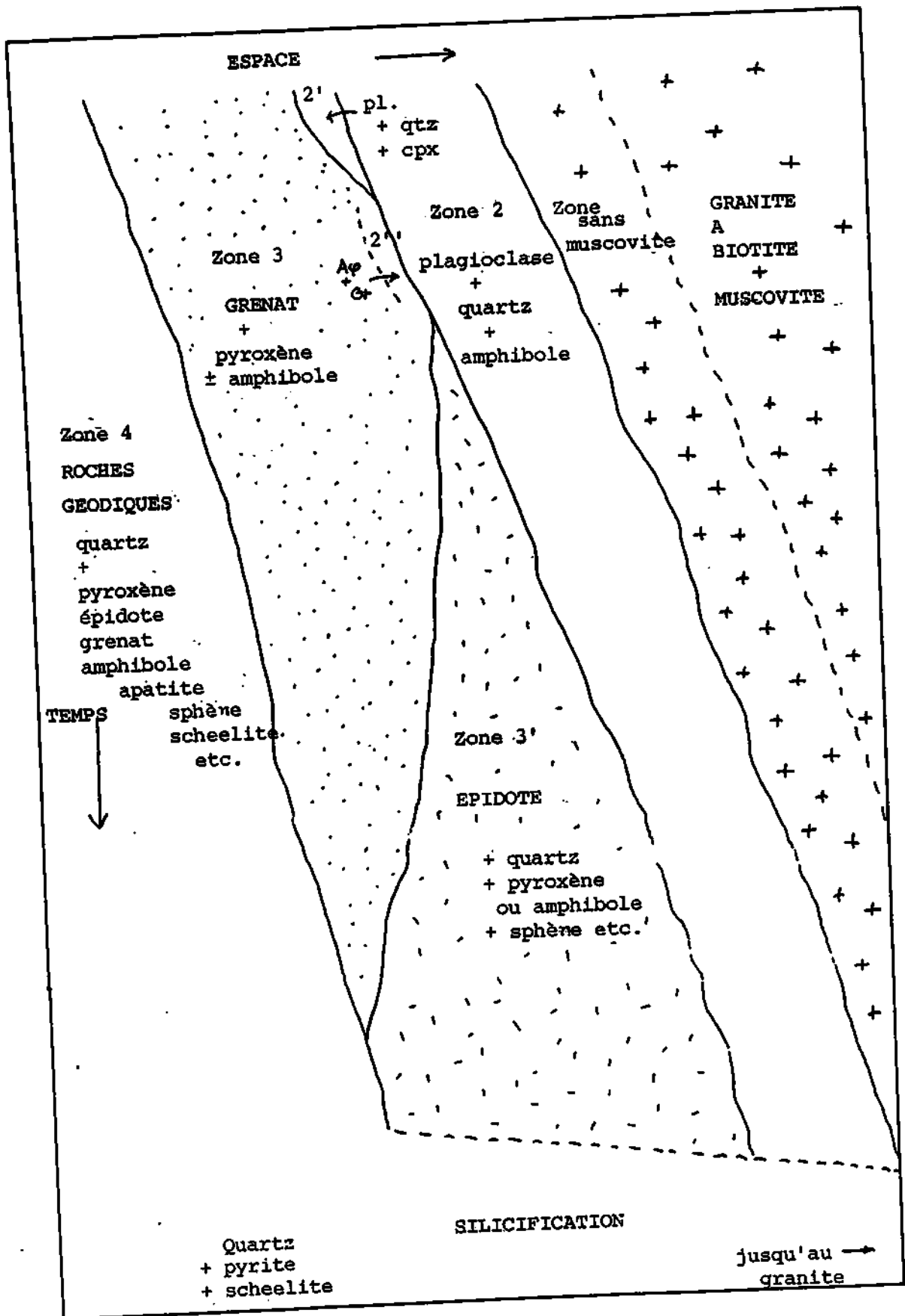


FIGURE 5: ZONATIONS DANS LA TRANSFORMATION DU GRANITE A BIOTITE:
SCHEMA SYNTHETIQUE DES RELATIONS DE TERRAIN.

Guy, 1988

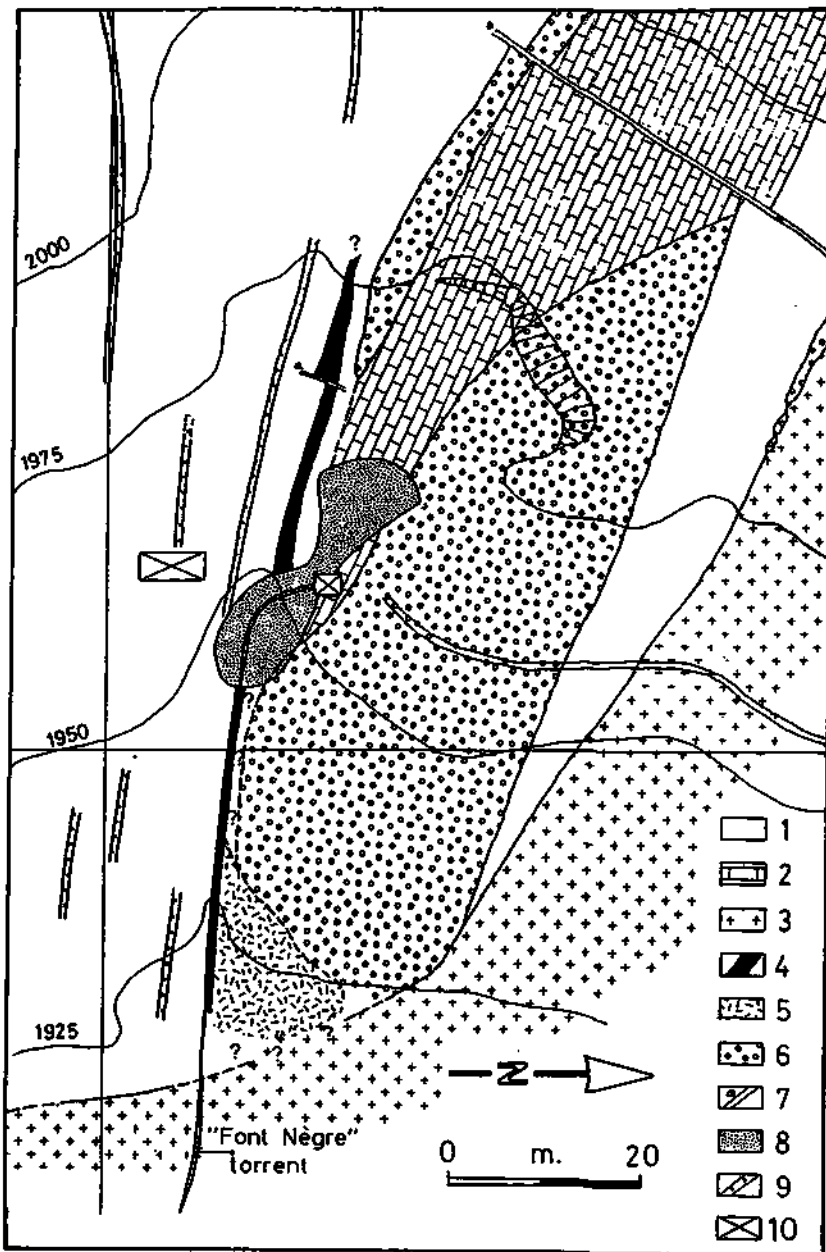


FIG. 2. — Geological map of the lower part of the Costabonne deposit. 1. pelitic hornfels ; 2. limestone ; 3. Costabonne granite ; 4. magnetite-apatite rock ; 5. ilmenite-apatite-biotite rock (partly metasomatized) ; 6. skarn ; 7. quartz veins ; 8. mass of fallen rocks ; 9. granite dikes ; 10. ruins.

Carte géologique de la partie inférieure du gisement de Costabonne.

3) LES SKARNS : MINÉRALOGIE

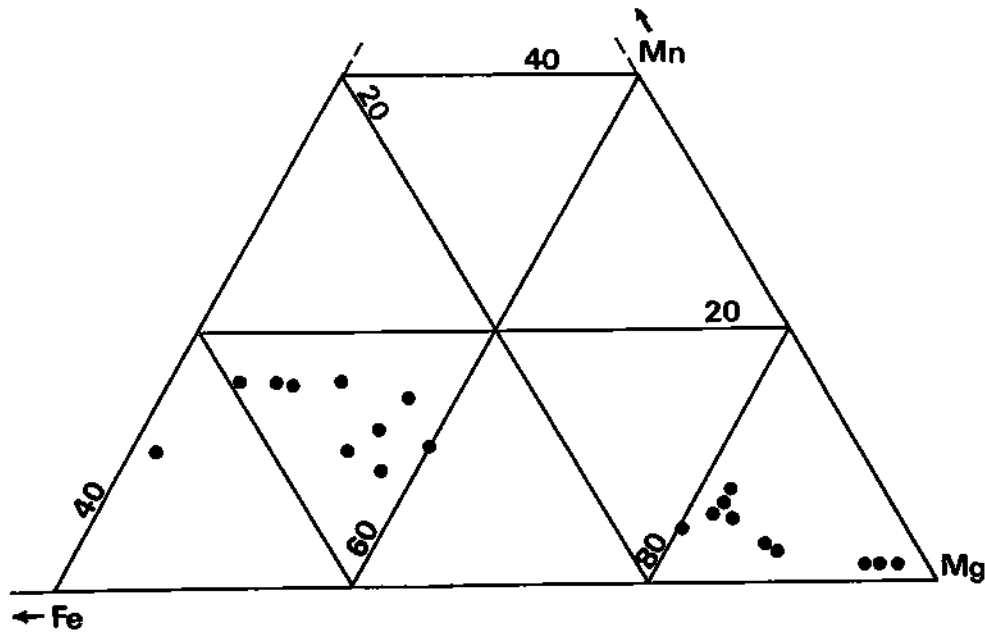


Fig. 24. — Composition des pyroxènes de Costabonne dans le triangle Fe - Mg - Mn.
guy, 1980

Table 2
 Selected compositions of skarn minerals

Sample no.	C43X7	C43-1-2	C43-1-2'	215	107	216	260
SiO ₂	35.46	36.95	36.69	53.35	52.47	57.48	51.69
TiO ₂	0.00	0.06	0.20	0.00	0.00	0.00	0.00
Al ₂ O ₃	1.26	19.12	12.69	0.23	0.25	0.30	1.06
FeO	26.66	5.89	12.01	3.70	11.55	1.18	18.55
MnO	0.16	15.54	3.98	1.61	5.15	0.26	4.26
MgO	0.13	0.01	0.05	14.85	8.81	23.14	10.18
CaO	32.93	20.74	30.27	23.70	23.49	13.10	11.67
Na ₂ O	0.00	0.00	0.03	0.00	0.08	0.10	0.14
K ₂ O	0.00	0.04	0.00	0.00	0.00	0.05	0.09
Cr ₂ O ₃	0.09	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Total	96.69	98.35	95.92	97.44	101.80	95.61	97.64

GARNETS: C43X7: yellow andraditic core inside a garnetite of gallery 2033 ("garnet 1"); C43-1-2: rim of garnets inside garnetite, gallery 2033 ("garnet 3"); C43-1-2': garnet from garnetite, gallery 2033, (garnet 2).

PYROXENES: 215: diopside in veinlets inside the dolostone, sample CB48; 107: salitic pyroxene inside the garnetopyroxenite, sample C42.

AMPHIBOLES: 216: tremolite at the border of a skarn veinlet in dolostone, sample CB48; 260: actinolitic amphibole in garnet pyroxenite.

guy, 1995

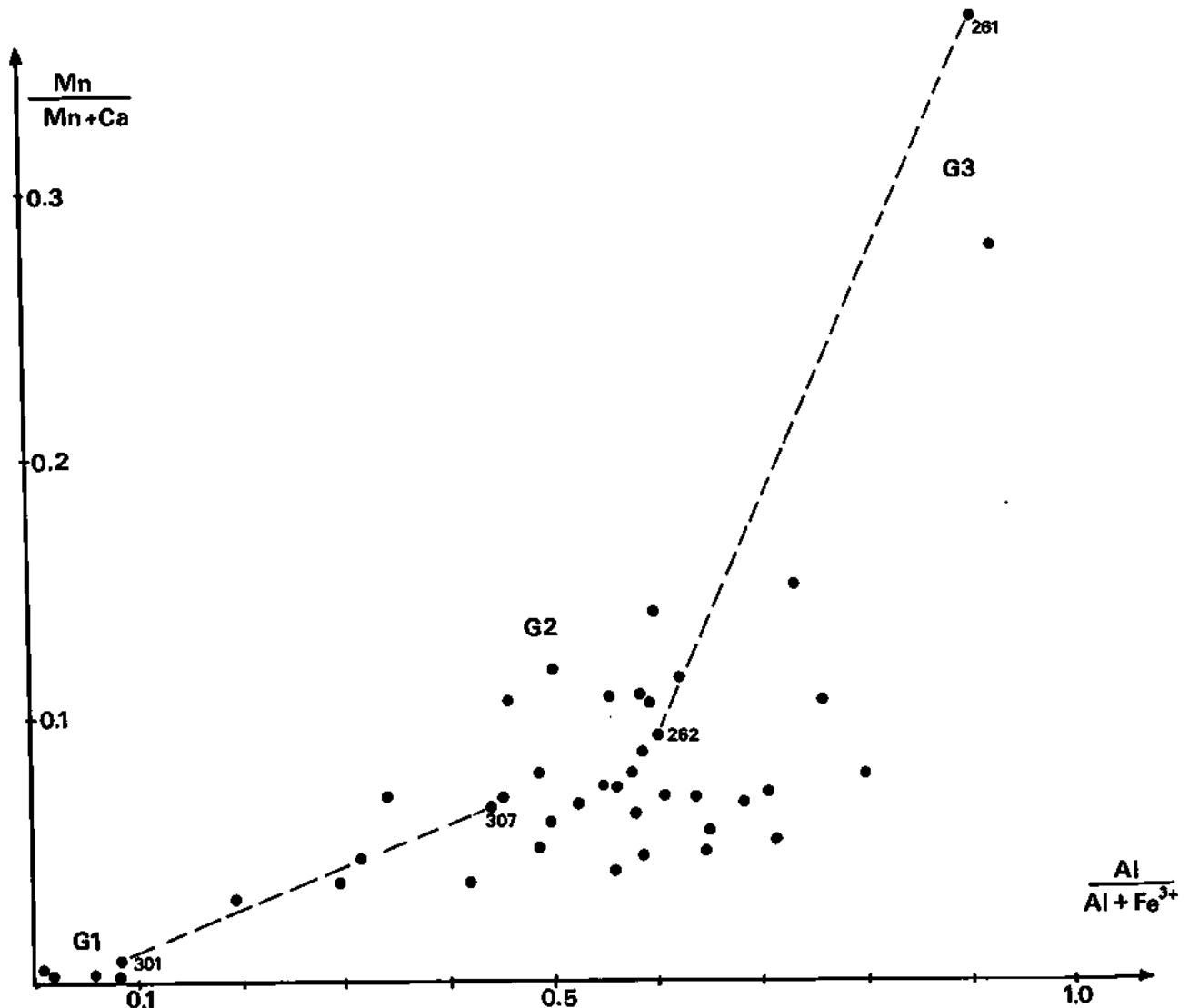


Fig. 27. — Composition des grenats de Costabonne.

Dans le plan $Al/(Al + Fe^{2+})$ et $Mn/(Mn + Ca)$ en proportions molaires. Le fer représente le fer total pour les grenats G1 et G2 pauvres en Fe^{2+} . Pour les grenats G3 on a fait la correction et Fe représente Fe^{3+} seul.

Les sauts de composition entre différents grenats sont illustrés par deux exemples où l'on a relié par un tireté des dosages correspondant au même échantillon. Ainsi le dosage n° 301 représente la composition d'un cœur andraditique englobé dans une grenatite dont la composition appartient au 2^e groupe (n° 307). Ainsi encore le n° 261 correspond à la bordure orangée d'un grenat brun de composition 262 formant la masse de la roche.

Désignation des grenats :

G1: Grenat jaune retrouvé la plupart du temps en squelette dans les grenatites massives : composition proche du pôle andradite.

G2: Grenat brun-rouge des grenatites massives et des veines dans les pyroxénites (grossulaire - andradite).

G3: Grenat orangé clair formant la bordure des grenats précédents dans les géodes ou les veines sécantes. Les variations en manganèse sont amplifiées par rapport à celles de Al/Fe par un effet d'échelle.

Juy, 1980

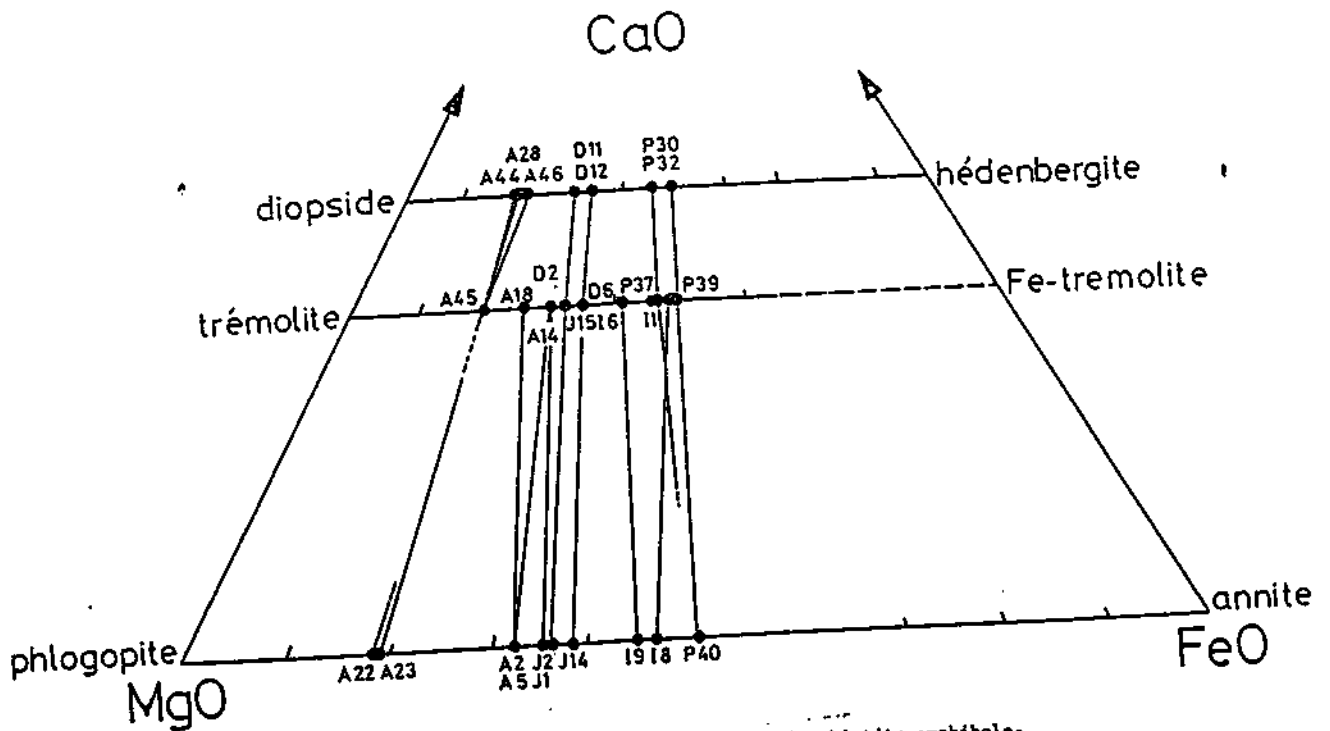


Figure 4.11 : Diagramme CaO - MgO - FeO; dans la succession biotite-amphibole-pyroxène, la composition du minéral remplacé guide celle du remplaçant. Ce rapport $FeO/FeO+MgO$ reste constant d'un minéral à l'autre. (Les traits relient les minéraux d'un même échantillon).

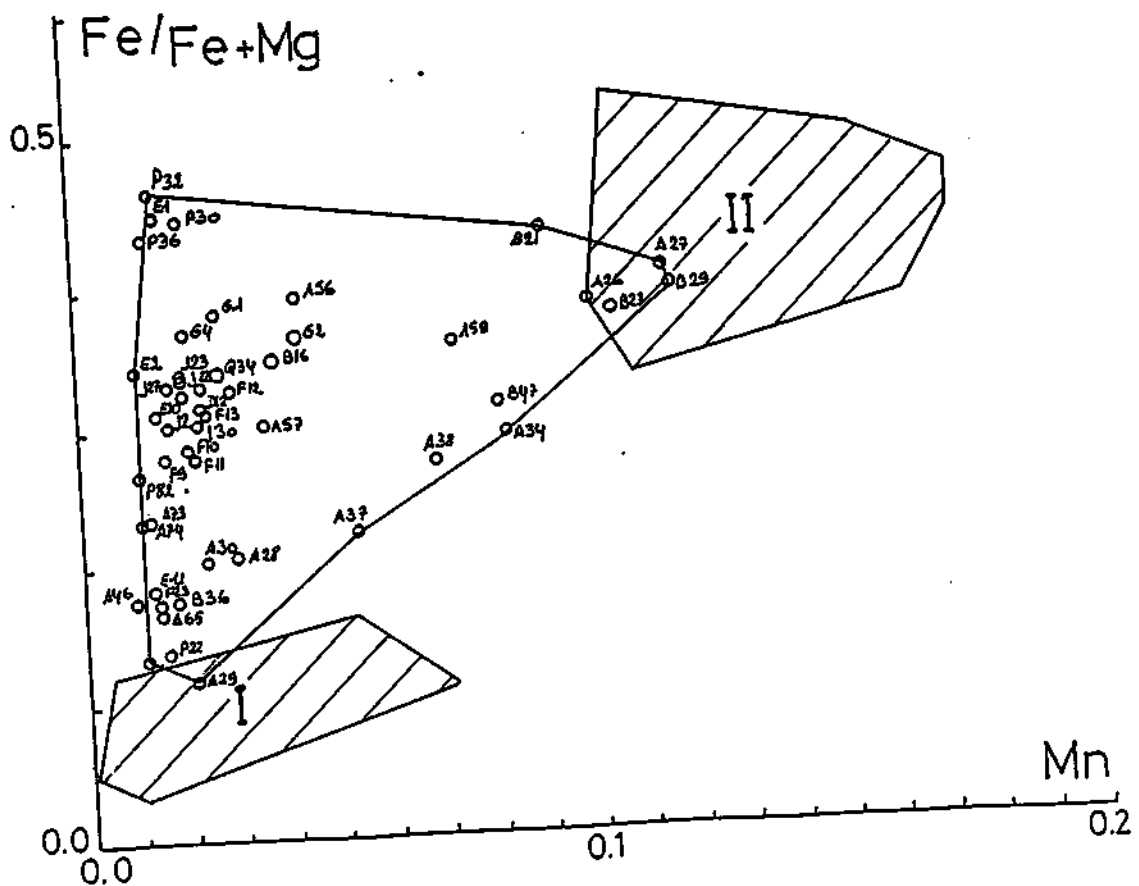


Figure 4.12 : Diagramme $Fe/(Fe+Mg)$ - Mn. Domaine de composition des pyroxènes des skarnoides. Zones hachurées : pyroxènes des skarns (B. Guy, 1979)
I zone à diopside; II saliteite.

Van Marcke, 1983

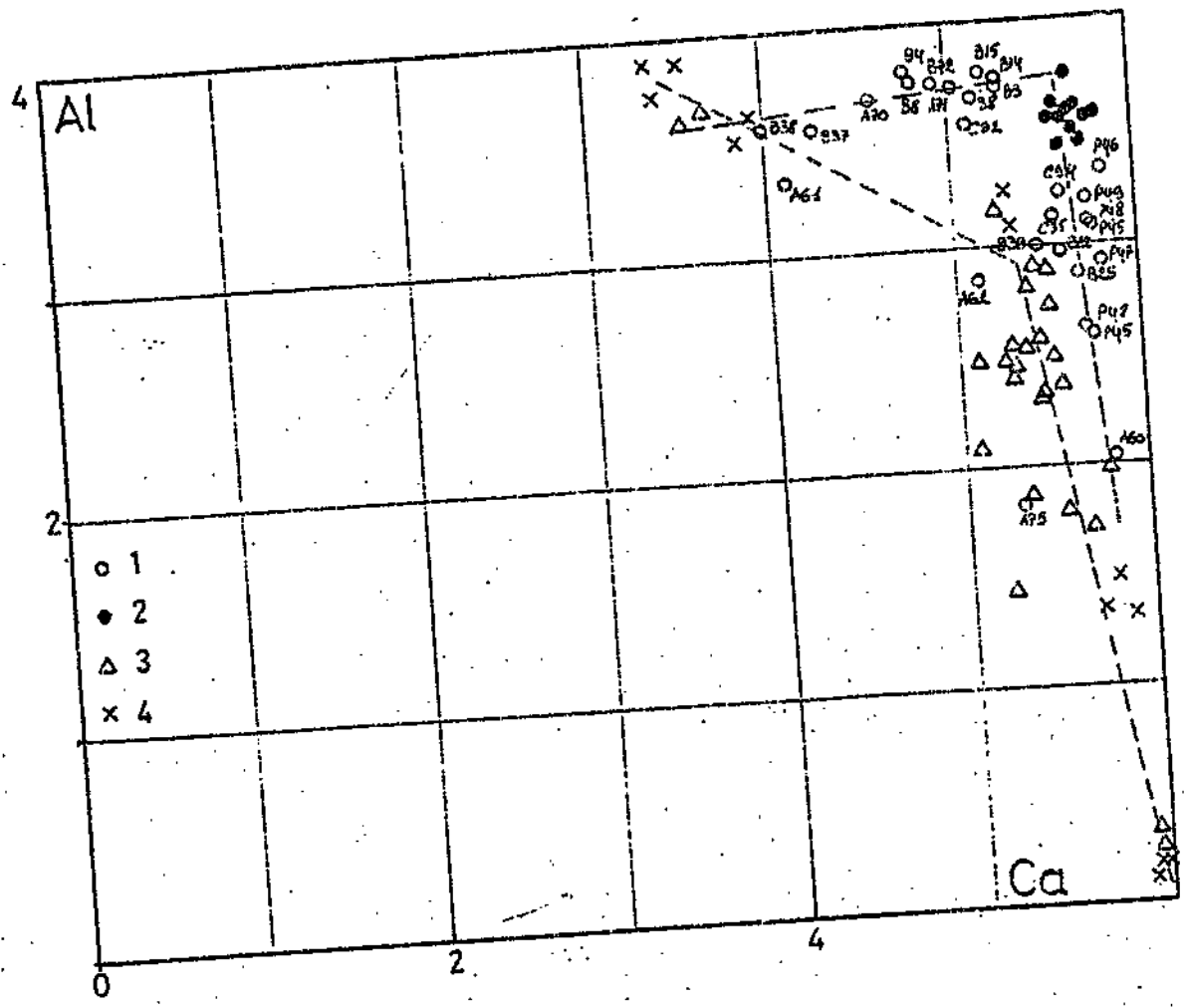


Figure 4.15 : Comparaison des compositions des grenats de skarns et de skarnoïdes.
 o skarnoïdes de Costabonne; Δ skarns de Costabonne (B.Guy, 1979);
 ● skarns de Soucarat (P.Toulho at, 1982); x skarns de Bôtadiol
 (P.Toulho at, 1982).
 (Calcul de la formule structurale des grenats sur 24 oxygènes.)

Van Marcke, 1983

4) GÉOCHIMIE DES ÉLÉMENTS MAJEURS ET TRACES

Table 1. Major and trace element analyses of selected rocks from Costa Bonner^a

	CF 5	R 20	CF 16	CF 21	R 17	SCF 233b	SCF 232	1200 C	1200 A	SCF 32	CF 26
	sch	banded	gt	gt px	px gt	salite	diop	cc	dolost	dolost	cc
		sk	sk	sk	sk	px sk	sk	fo	sk	100 m	marble
		gt						sk	contact		
SiO ₂	67.5	43.3	38.6	40.7	40.1	50.8	54.2	16.1	0.0	0.1	0.3
TiO ₂	0.81	0.51	—	—	—	—	—	—	0.01	0.01	—
Al ₂ O ₃	14.7	10.1	4.9	5.9	4.9	0.2	0.04	—	—	—	—
Fe ₂ O ₃	5.80	9.67	24.0	17.61	18.02	10.92	4.08	0.56	1.45	0.46	0.11
MnO	0.08	3.32	1.51	1.93	1.87	3.81	1.12	0.13	0.28	0.20	0.08
MgO	2.27	3.53	0.92	2.25	2.19	9.74	16.10	16.70	20.17	19.82	1.50
CaO	2.75	27.23	28.87	28.98	27.24	24.08	23.97	35.54	30.67	32.06	55.00
Na ₂ O	2.11	—	—	—	0.20	0.22	—	—	0.01	—	0.09
K ₂ O	1.93	—	—	0.04	0.05	—	—	—	—	—	0.01
P ₂ O ₅	0.15	0.14	—	0.02	—	0.01	0.05	—	0.03	—	0.01
P.F.	1.26	2.51	0.84	2.06	3.25	0.59	0.72	32.40	47.31	48.07	43.66
Total	100.52	100.27	99.86	99.58	98.00	100.40	100.41	101.47	99.90	100.67	100.74
U	2.5	3.2	17	5.9	5.9	4.9	0.45	0.40	0.07	0.04	0.07
Th	17	4.8	0.22	0.09	0.03	0.15	0.02	0.02	0.01	0.02	0.02
Zr	314	160	46	30	20	25	—	—	—	—	—
Hf	8.2	4.9	0.15	0.15	0.10	0.10	—	—	0.30	—	0.02
Ta	1.6	1.1	0.35	0.6	0.19	0.01	—	—	—	—	0.02
W	11	1.4	68	53	130	46	470	2	0.7	—	0.2
Sb	0.02	0.12	0.5	0.02	0.08	0.1	0.06	0.03	0.04	0.02	0.01
Rb	135	1.8	2	2	5.4	0.5	1	0.4	—	0.2	0.45
Cs	10.9	0.16	0.98	1.55	2.7	0.03	0.01	0.02	0.01	0.04	0.07
Sr	356	—	13	15	24	11	12	164	88	60	164
Ba	218	9	40	30	12	20	—	—	5	2	2
Sc	13	21	0.13	0.1	0.17	0.06	0.01	0.08	0.08	0.02	0.01
Cr	68	120	110	76	110	48	17	0.8	3.5	2	1.5
Co	15	9.6	17	6.5	6.5	27.5	5.5	0.55	0.5	0.2	0.08
Ni	27	27	3.5	8	8.9	18	1	3	2	0.65	0.2
Zn	111	690	78	412	325	1000	280	6	10	10	2
La	42	20	1	0.7	0.66	0.34	0.45	1.5	0.82	0.44	1.94
Ce	77	37	9.5	4.7	5.3	2.1	1	4.4	2.6	0.64	2.7
Sm	6.6	4.26	1.5	1.2	1	0.05	0.08	0.5	0.3	0.06	0.3
Eu	1.72	0.61	0.76	0.75	0.52	0.03	0.01	0.22	0.05	0.02	0.08
Tb	0.92	0.9	0.1	0.04	0.11	0.01	0.01	0.06	0.04	0.08	0.04
Yb	3.75	3.02	0.2	0.07	0.03	0.1	0.05	0.12	0.1	0.02	0.1
Lu	0.4	0.48	0.01	—	0.01	—	—	0.02	0.01	—	0.01

^a Major elements in wt % (XRF), trace elements in ppm (neutron activation) at Ecole des Mines, Saint-Etienne and Laboratoire P. Süe, Saclay; Sr by XRF at Univ. de Lyon, Nb by XRF at Ecole des Mines, St. Etienne. Abbreviations: sch = schist; sk = skarn; gt = garnet; px = pyroxene; diop = diopside; cc = calcite; fo = forsterite; dolost = dolostone. The horizontal bar (—) indicates that the element is below detection limit.

July 27, 1988

2, 20 % (Fe₂O₃, CaO, Al₂O₃, SiO₂, MgO)

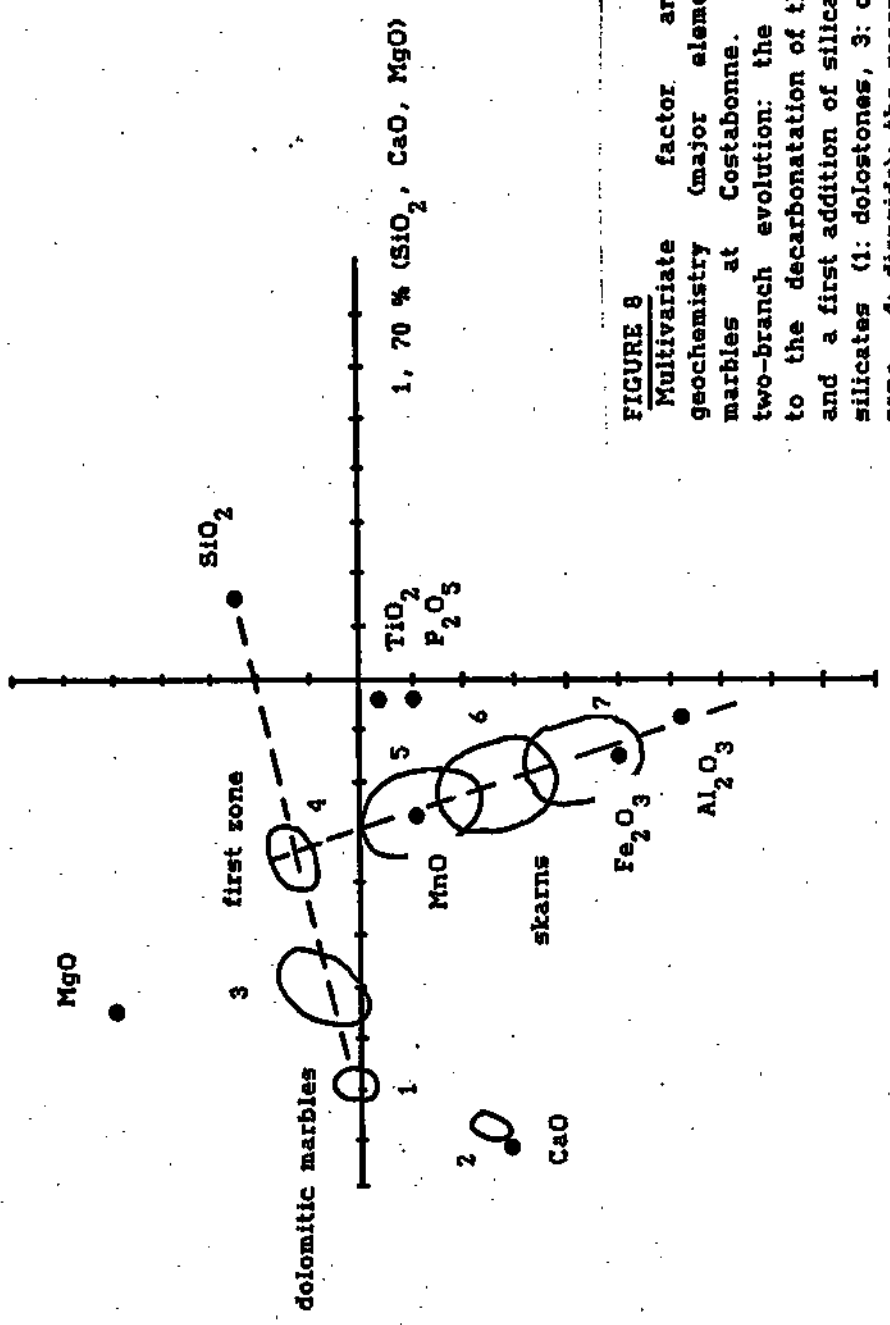
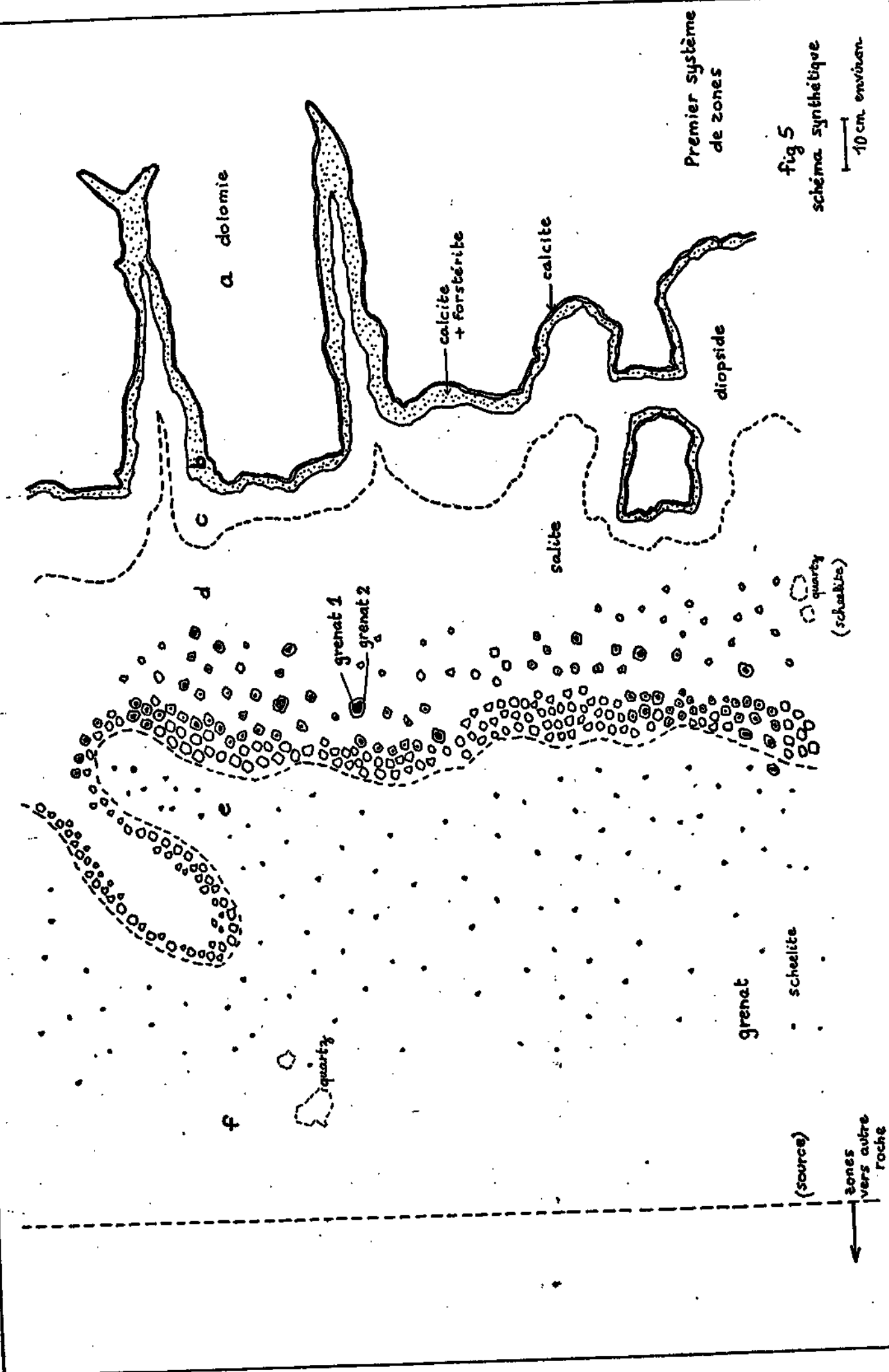


FIGURE 8

Multivariate factor analysis for the geochemistry (major elements) of skarns and marbles at Costabonne. One may observe a two-branch evolution: the first one corresponds to the decarbonation of the magnesian marbles and a first addition of silica, forming magnesian silicates (1: dolostones, 3: calcite + forsterite zone, 4: diopsids); the second one corresponds to next alterations; these mainly involve an addition of iron and aluminium (5: salite zone, 6: garnet-pyroxenite, 7: garnetite). The alteration of calcic marbles shows a direct evolution from 2 to 5.

This figure and the followings have been taken in the work of R. Le Guyader (cf. document 4).

Guy et al.



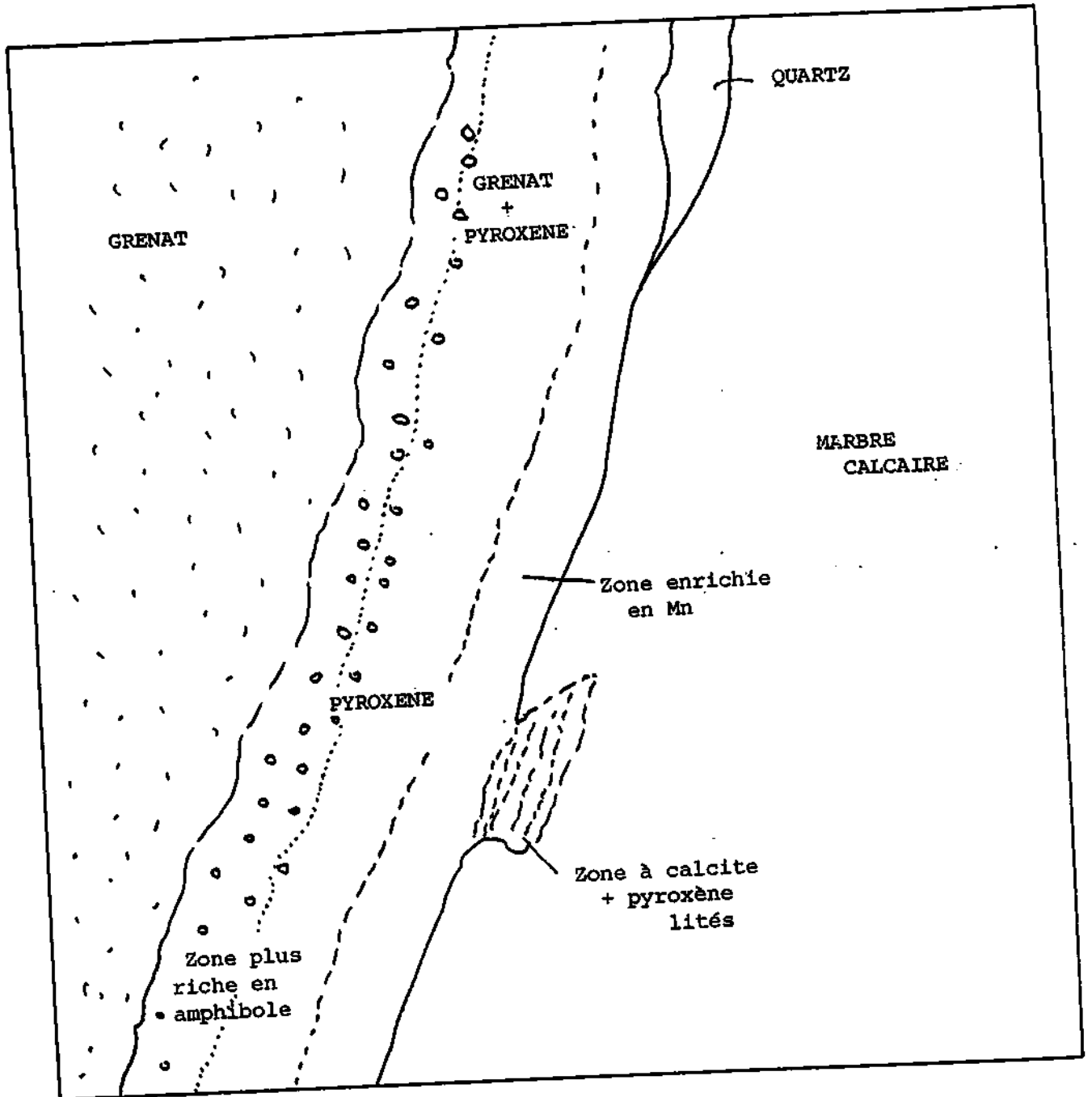


FIGURE 5: ZONATION DE SKARNS SUR MARBRES CALCITQUES

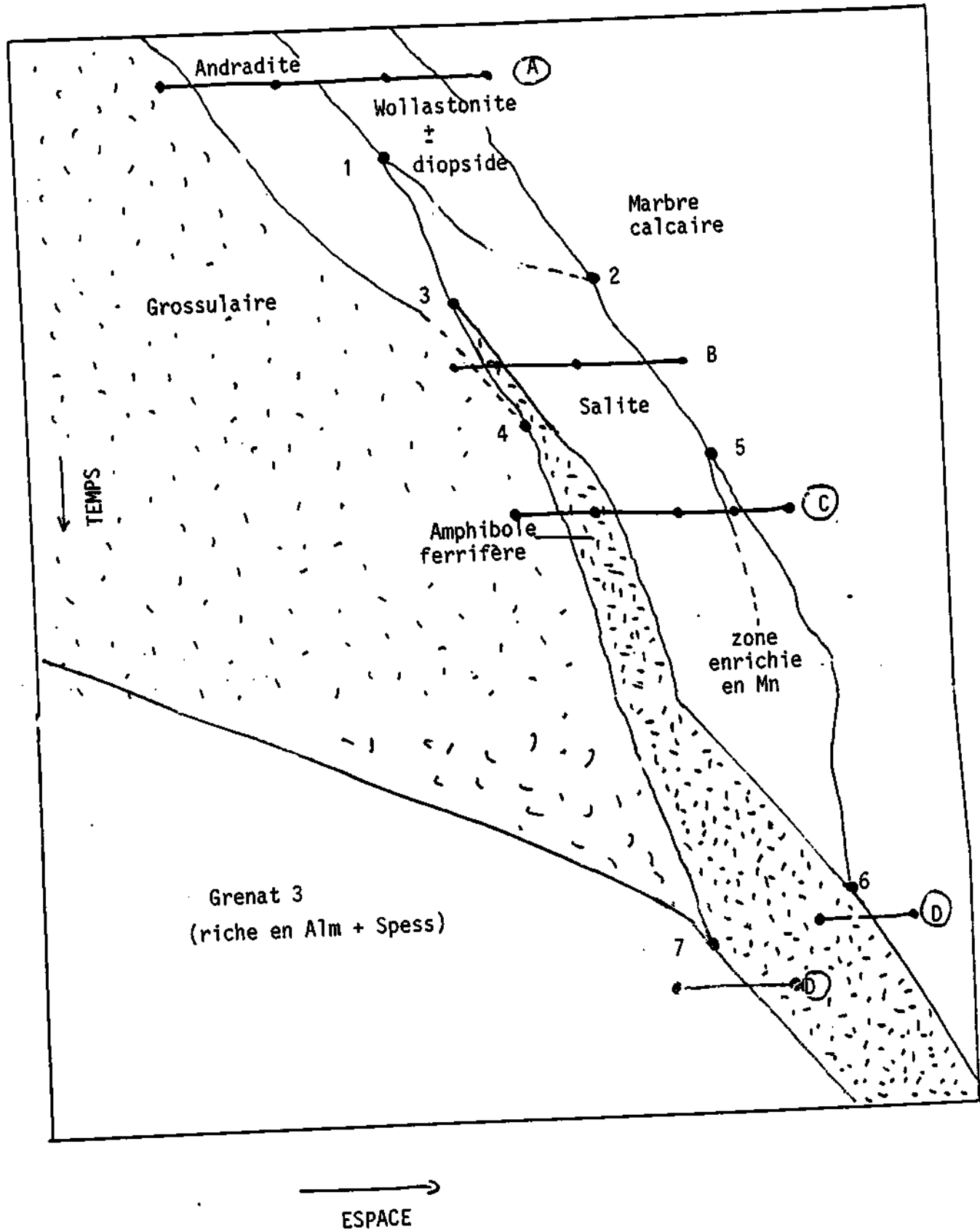
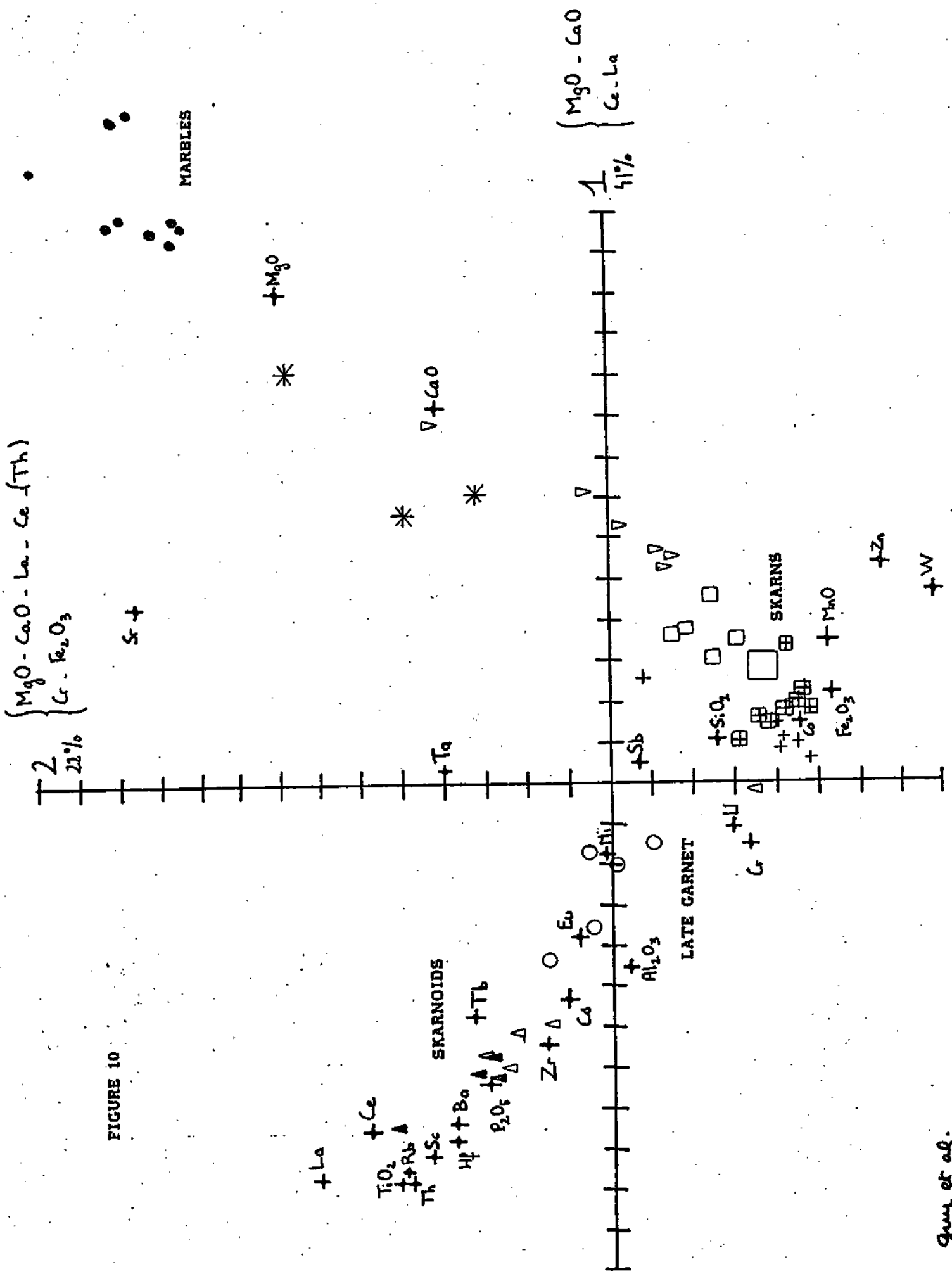


FIGURE 15: SCHEMA SYNTHETIQUE: LES DIVERSES ZONATIONS SUR SUBSTRATS CALCAIRES ET LEURS RELATIONS MUTUELLES
 (même discussion que pour le cas des marbres dolomitiques, figure 12)

FIGURE 10



Gray et al.

Log REE sample/ chondrite

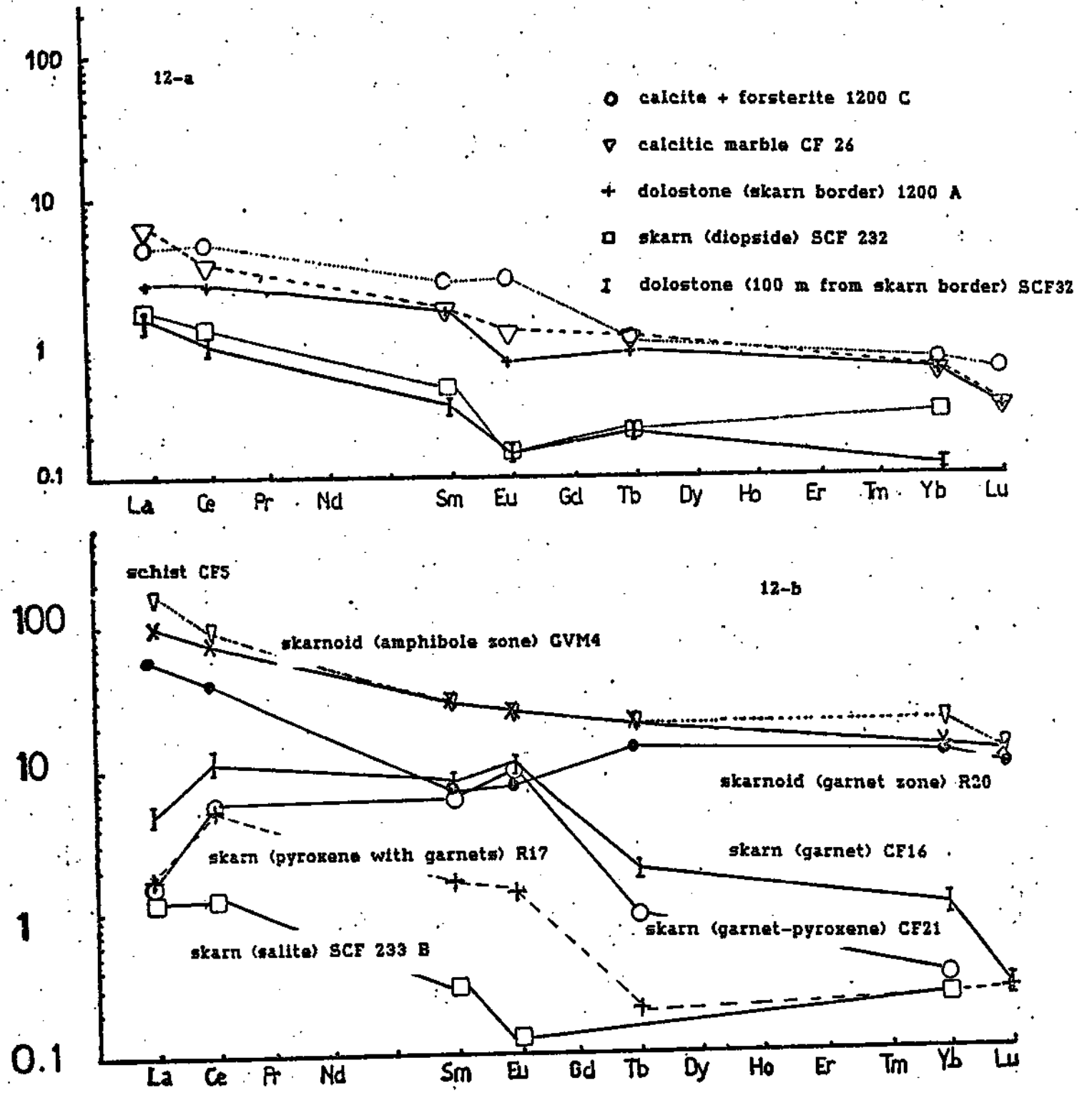


FIGURE 12 a, 12 b.
 Rare earths elements spectra (normalized to chondrites), in several rock samples from Costabonne (concentrations are given in table 2). One may notice the high levels in schists and skarnoids, probably due to inheritance. In contrast, calcic and dolomitic marbles are poorer, whereas garnetites lie in an intermediate situation. On figure 12-b, one may observe the raise of the curves for the suite: salite, garnet-pyroxenite, pyroxene-garnetite, garnetite. The calcite + forsterite rocks are rich in REE with respect to the pyroxene rocks. The shape of the curves also changes and shows a raise in intermediate rare earths, and particularly in Europium, when compared to the non transformed rocks.

5) GÉOCHIMIE DES ISOTOPES STABLES

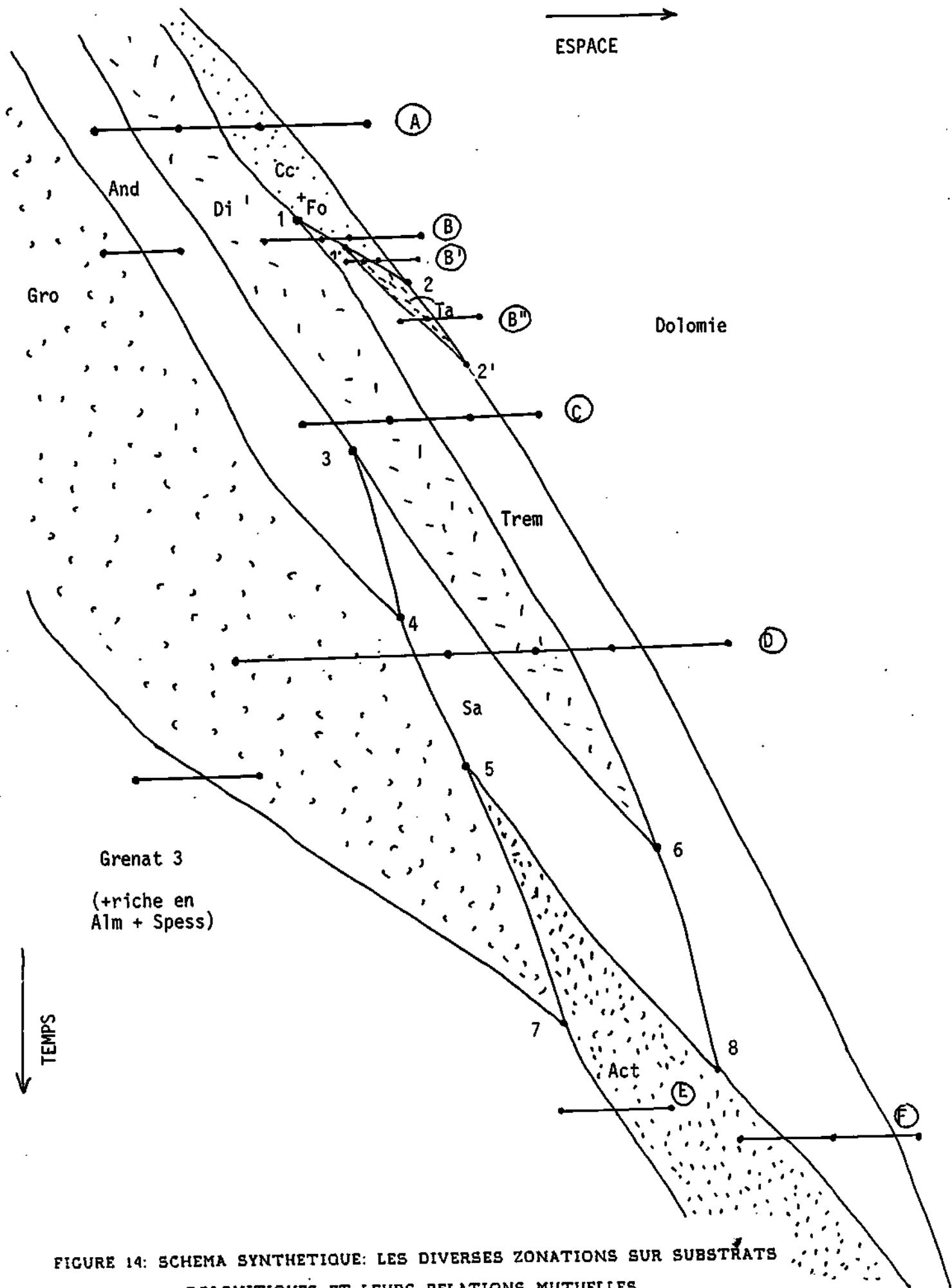
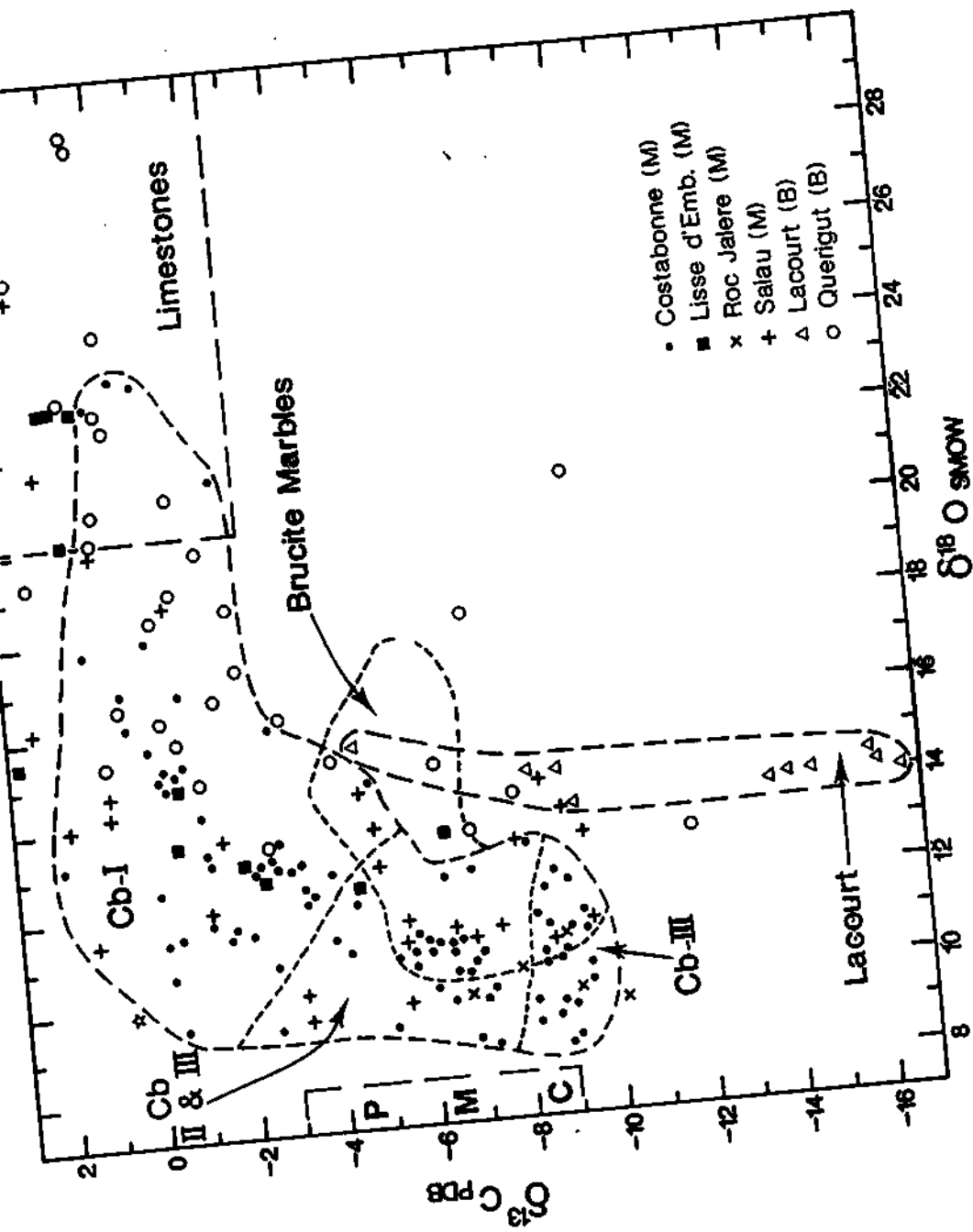
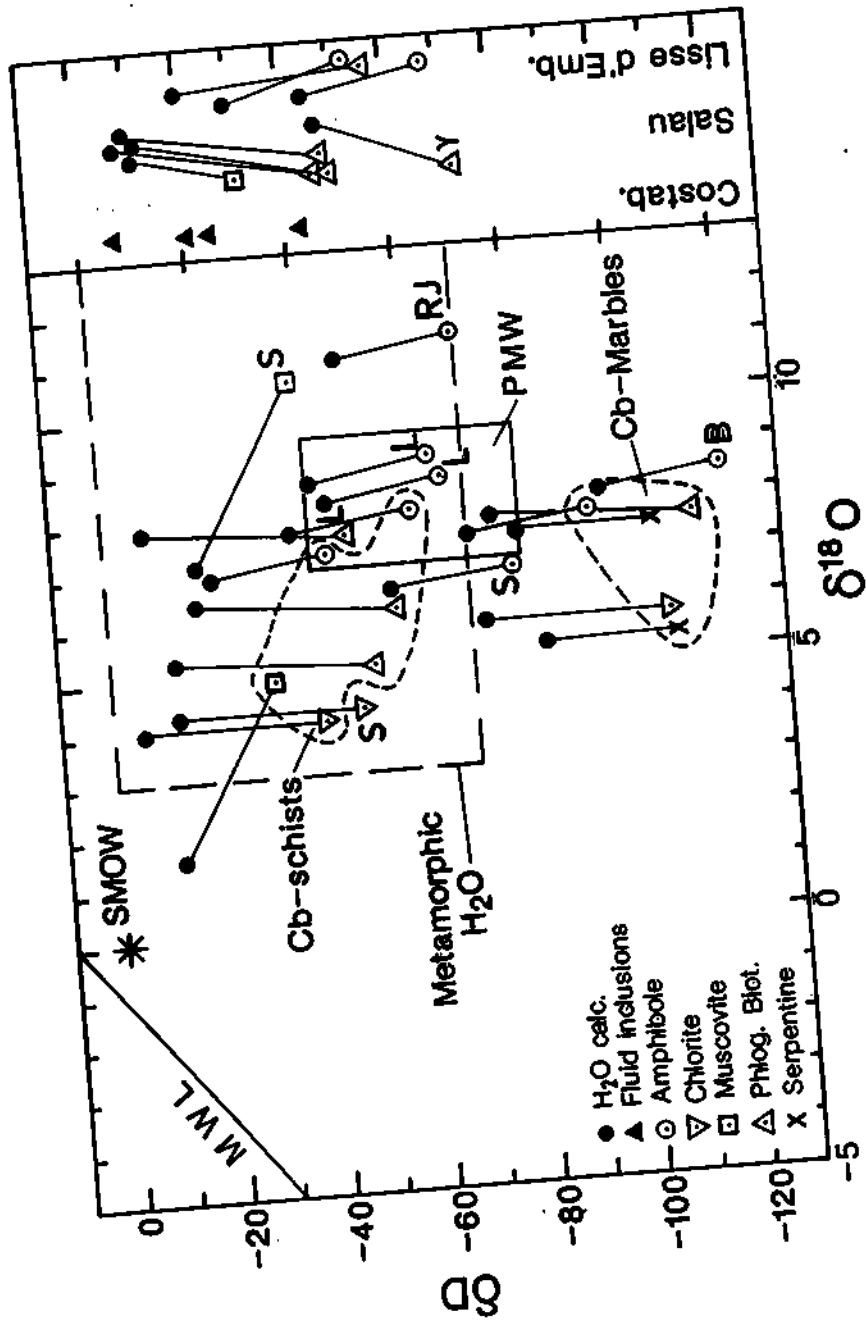
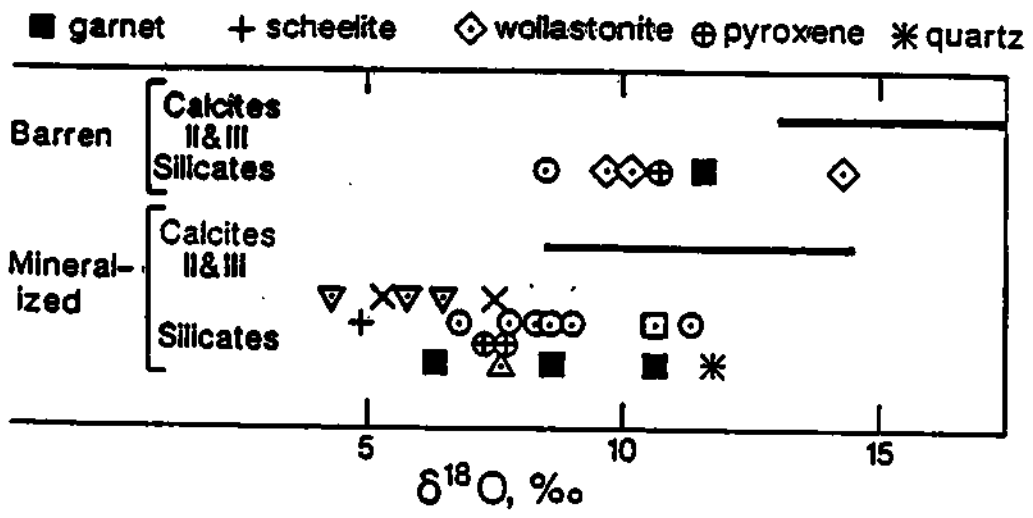
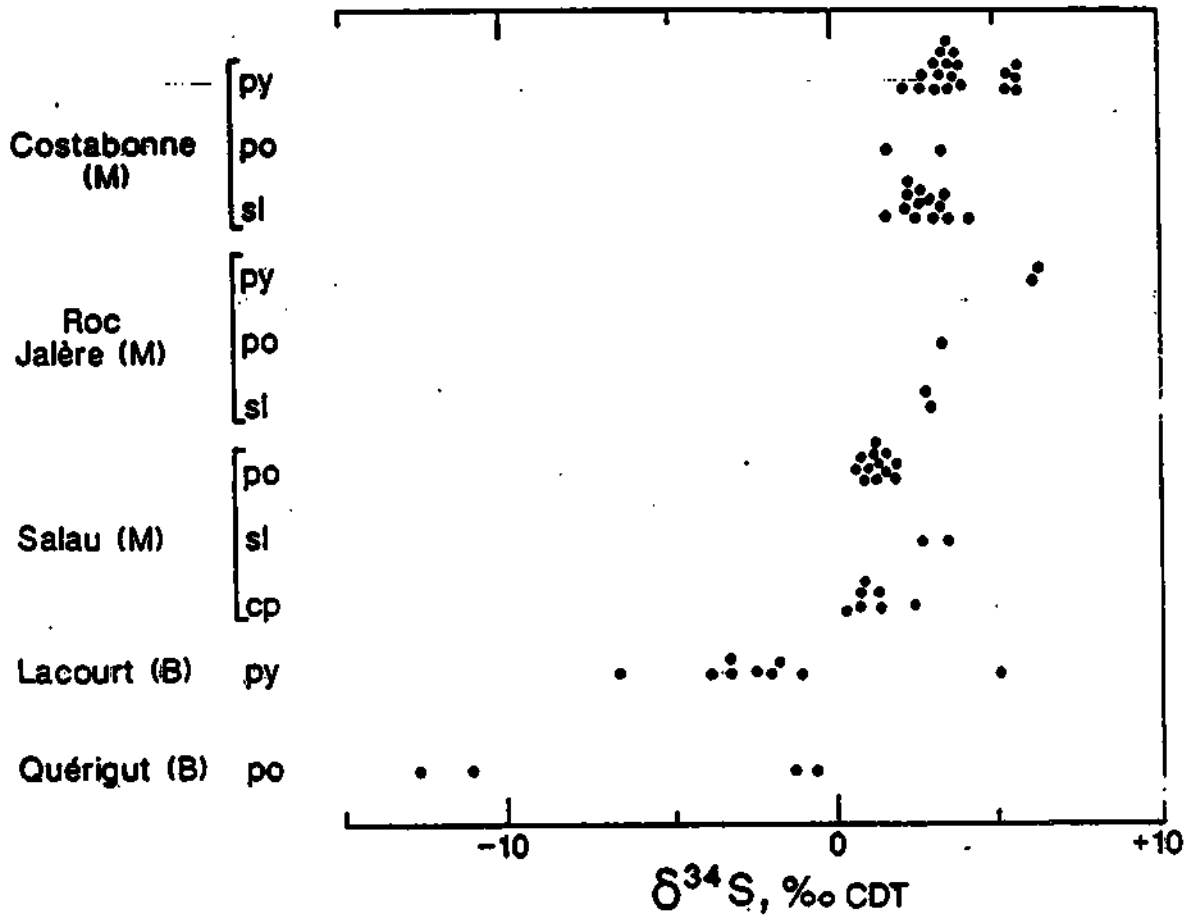


FIGURE 14: SCHEMA SYNTHETIQUE: LES DIVERSES ZONATIONS SUR SUBSTRATS DOLOMITIQUES ET LEURS RELATIONS MUTUELLES







Guy et al., 1988

GEOCHIMIE DES ISOTOPES STABLES

1. SKARNS PRECOCES

Eau de $\delta^{18}\text{O}$ dans l'intervalle + 6.5 + 9.5.
de δD dans l'intervalle - 40 - 80.

⇒ eau équilibrée avec les matériaux granitiques ou eau équilibrée avec les matériaux métamorphiques ?

$\delta^{13}\text{C}$ des calcites précoces dans l'intervalle - 4 - 9

⇒ origine endogène ou acquise par distillation à partir du carbone sédimentaire ?

2. SKARNS PLUS TARDIFS A TERMINAUX

Deux types d'eaux météoriques :

1. δD dans l'intervalle (0, - 20)
($\delta^{18}\text{O}$ dans l'intervalle + 2 + 9)

2. δD dans l'intervalle (- 80, - 100)
($\delta^{18}\text{O}$ dans l'intervalle + 5 + 9)

⇒ changement des conditions climatiques de recharge des eaux à la surface.
Surrection du massif.

Données de Guy, Sheppard, Fouillac, Le Guyader, Toulboat, Fonteilles, Dubru, Van Marcke.

Analyses faites au BRGH et au CRPG.

Guy

**6) INTERPRÉTATION
THERMODYNAMIQUE, INCLUSIONS
FLUIDES**

ETUDE THERMOMETRIQUE DES INCLUSIONS FLUIDES

1. Températures d'homogénéisation dans l'intervalle 150 - 500°C.
2. L'évolution des températures est en correspondance avec l'évolution chronologique des paragénèses.
3. Par des données indépendantes (thermométrie isotopique, analyse thermochimique) on peut estimer à 400°C environ la température de formation du stade à amphibole + sulfures de th = 200°C.
4. La salinité moyenne des fluides est de l'ordre de 15-20% eq. NaCl.
5. 3 + 4 \Rightarrow la pression de formation (pression fluide) était de 1.7 à 2 Kb pour ce stade.
6. Aux stades précoces la pression était au moins égale à cette valeur 6 + 1 \Rightarrow premières températures atteignent 680°C.
7. Les skarns montrent une large évolution en température depuis 680°C jusque vers 150 - 250°C.

guy

↑ FLUIDES
METAMORPHIQUES

Fin de fusion
granite:
690°C 1.7 kb

680°C,
1.7 kb
(incl. fl.)
10-15% eq.
MAGMATIQUES ? NaCl

FO-BR-PE
} T = 675°C (2 kb)
} T = 620°C (1 kb)

$\mu_{SiO_2} \uparrow$ $X_{CO_2} \downarrow$

↓ augmentation
salinité ?

↓ TEMPERATURE

← TRE
T = 500°C (2 kb)

↓ FLUIDES
METEORIQUES

↓ T < 350-400°C
(couples isotopiques)
⇒ P ≈ 1.7 kb
(incl. fl. T_H = 200°C)
25% eq. NaCl

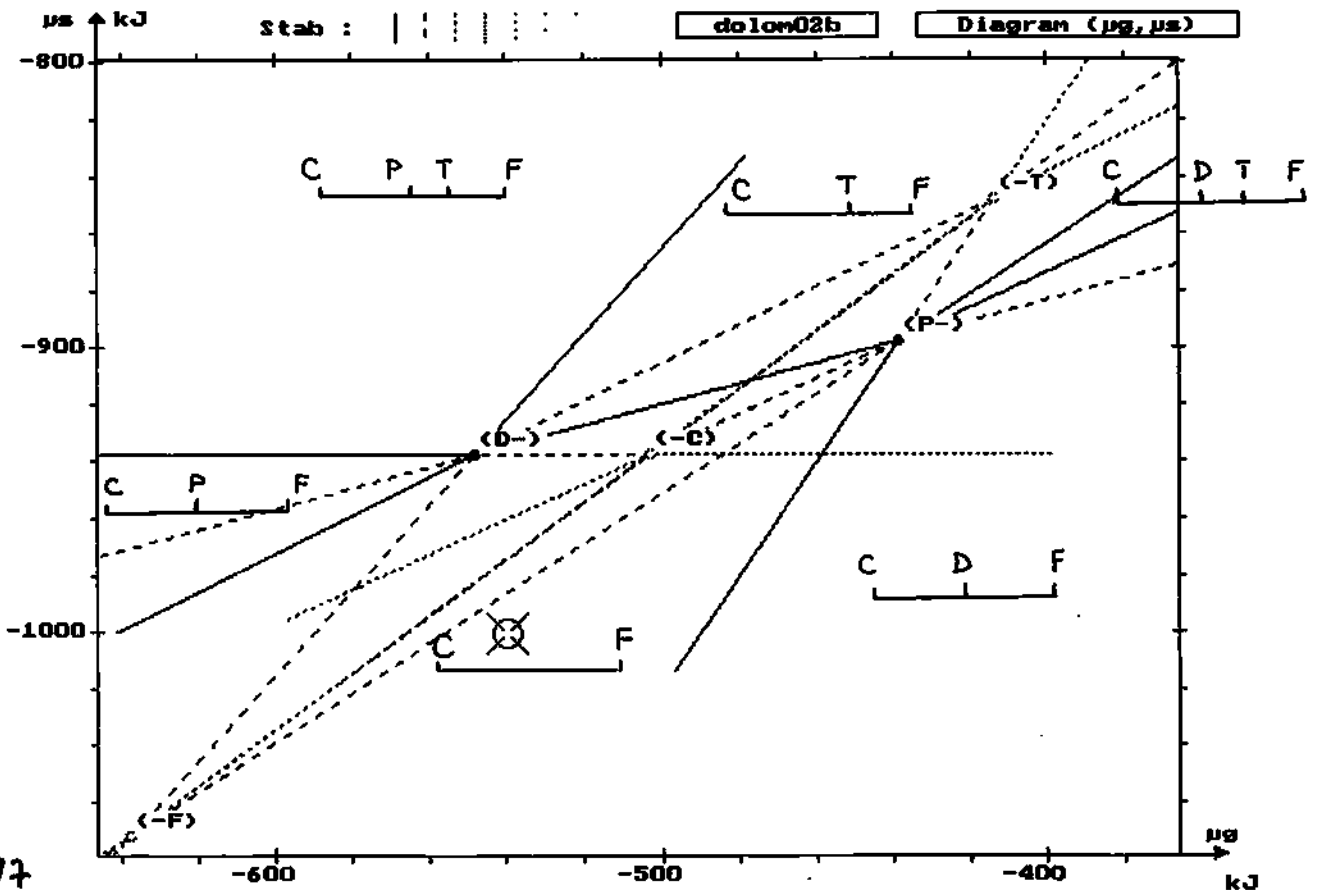
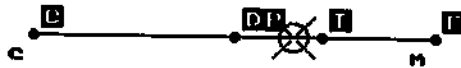
guy

dolom02b * Composition matrix *

	C	D	F	P	T
c	1.00	1.00	0.00	1.00	2.00
m	0.00	1.00	2.00	1.00	5.00
mg	1.00	2.00	0.00	0.00	0.00
ms	0.00	0.00	1.00	2.00	8.00
gr	-1076	-2052	-1971	-2918	-11134
-s	-141.0	-248.0	-165.0	-242.0	-941.0
v	4.0	6.4	4.4	6.6	28.0
g	-1100	-2095	-2000	-2960	-11294

T = 500°K p = 1b
 T = 700°K p = 1 kb

- Symbols**
- C Calcite
 - D Dolomite
 - F Forstérite
 - P Diopside
 - T Trémolite
 - c CaO
 - m MgO
 - g CO2
 - s SiO2



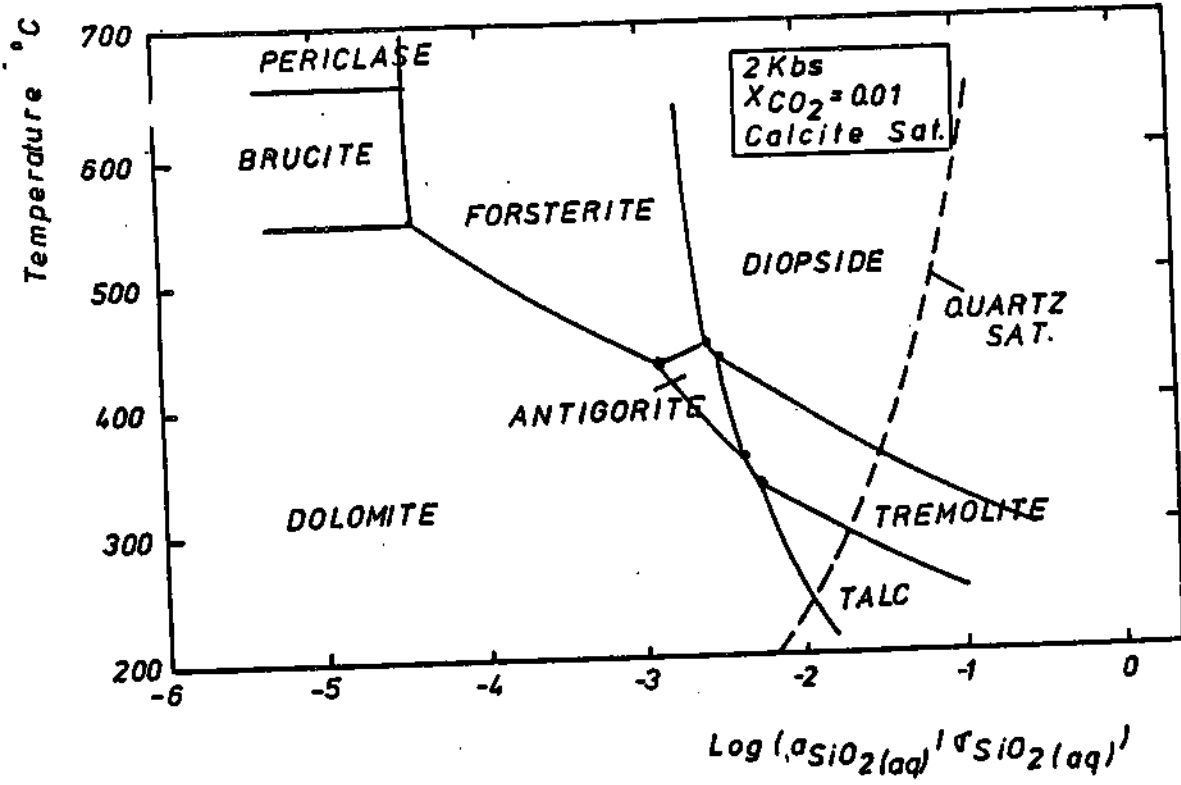


Fig. 6.7 Influence de la température sur les champs de stabilité des différents minéraux, calculs dans le plan de saturation de la calcite.

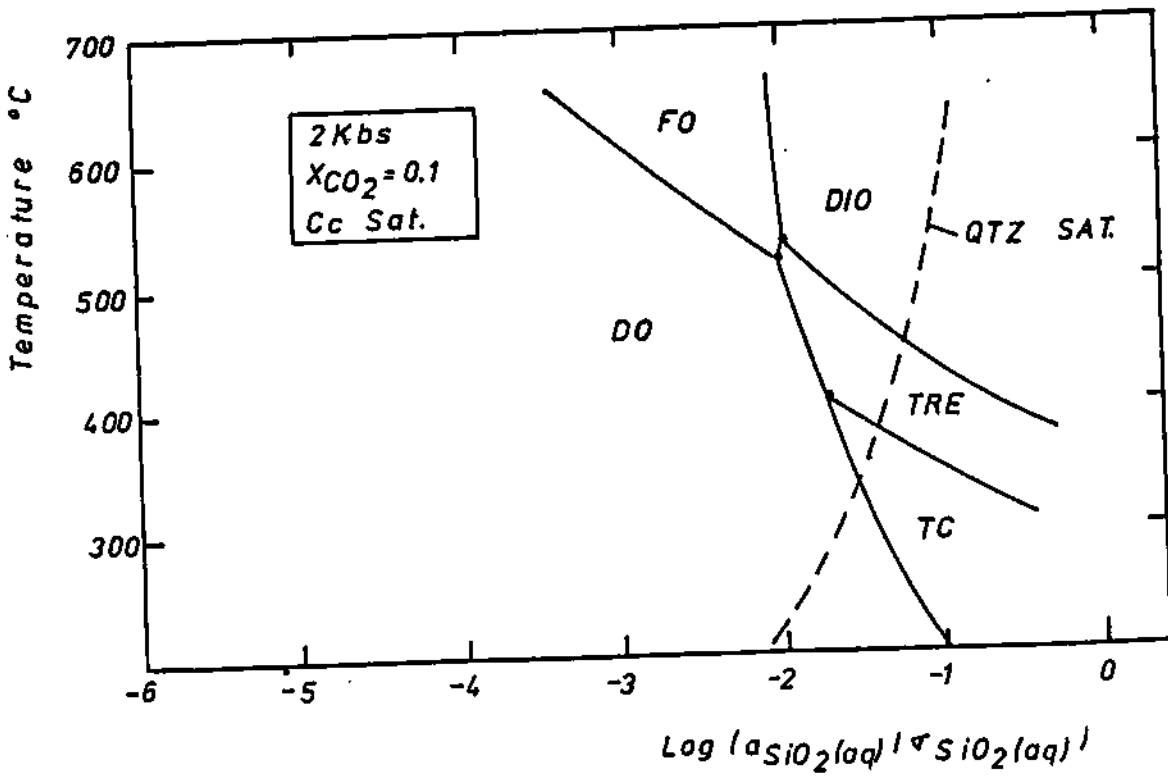


Fig. 6.8 Même figure que 6.7, calculée à $X_{\text{CO}_2} = 0.1$

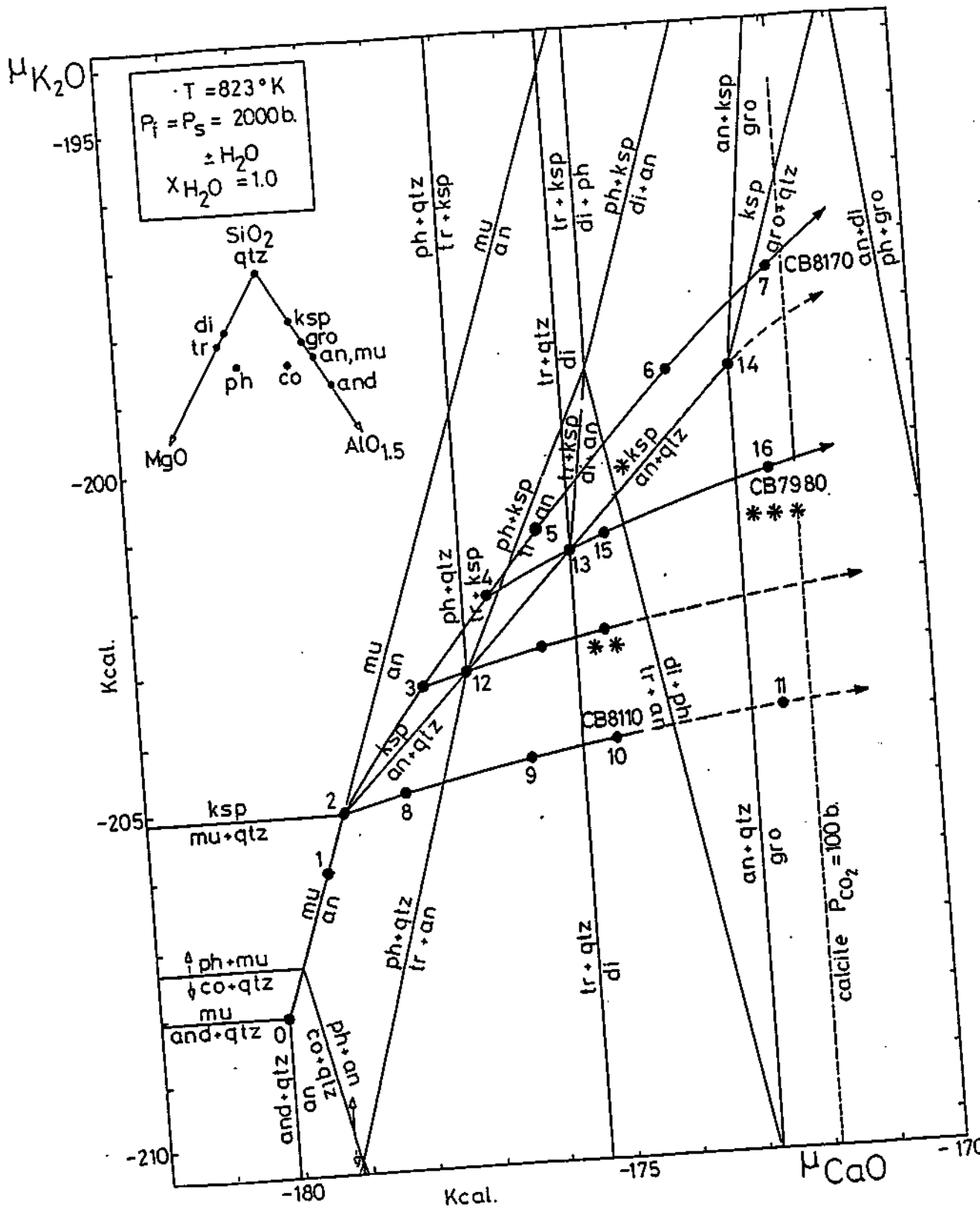


Figure 6.4 : Représentation idéalisée des diverses zonations observées. Les numéros renvoient aux échantillons où les observations ont été faites, voir tableau 3.1. Les skarnoides massifs sont caractérisés par la succession 0-1-(2)-3-4-15-16. * zonation expérimentale de Vidale et al. (1969, 1973); ** Zonation observée par Dick et Hodgson (1982); *** zonation de Tirny-Auz (URSS) d'après Mesterenko et al. (1958, 1959, 1960).

Van Marcke, 1983

RÉFÉRENCES

REFERENCES

- Autran A., Derré C., Fontelles M., Guy B., Solar P. et Toulhoat P. (1980), Genèse des skarns à tungstène dans les Pyrénées, in Mémoire BRGM n°99, Minéralisations liées aux granitoïdes, 2^e partie, 193-326.
- Baetens E. (1988) Etude de l'environnement géologique du gisement de Costabonne (Pyrénées Catalanes), thèse Doct. Ecole des Mines de Paris, 240 p.
- Balian R., Alhassid Y. et Reinhardt H. (1982) Dissipation in many-body systems: a geometric approach based on information theory, C.E.N. Saclay, 189 p. + annexes + figures.
- Benhadid S. (1984) Simulation numérique des échanges fluides - roches (cas de deux constituants), Université de Saint-Etienne, Département Mathématique, Rapport de DEA, 79 p.
- Bonnefille M. (1987) Propagation des oscillations dans les systèmes hyperboliques de lois de conservation, thèse Doct. Université de Saint-Etienne, 159 p.
- Bucher-Nurminen K. (1981) The formation of metasomatic reaction veins in dolomitic marble roof pendants in the Bergell intrusion (Province Sondrio, Northern Italy) Am. J. Sc., 281, 1197-1222.
- Burt D. (1972) Mineralogy and geochemistry of Ca-Fe-Si skarns, Unpubl. Ph D thesis, Harvard University, Cambridge, Mass., USA, 445 p.
- Collet J.F. (1987) Simulation numérique des interactions fluides-roches par le modèle de la chromatographie modifié: cas à porosité et vitesse de fluide variables. Rapport de stage, Ecole des Mines de Saint-Etienne, 100 p.
- Conrad F., Cournil M. et Guy B. (1983), Bilan et "condition" d'entropie dans la métasomatose de percolation, C.R.Acad. Sc., 294, II, 1655-1658.
- Coudrain-Ribstein A. (1988) Transport d'éléments et réactions géochimiques dans les aquifères, Thèse Doct. d'Etat, Univ. Louis Pasteur, Strasbourg, 382 p.
- Dubru M. (1986) Pétrologie et géochimie des marbres à brucite et des borates associés au gisement de tungstène de Costabonne (Pyrénées Orientales, France),

thèse Doctorat Université Catholique de Louvain, 443 p.

Einaudi M.T., Meinert L.D. and Newberry R.J. (1981) Skarn deposits, *Econ. Geol.*, 75 th anniversary volume, 317-391.

Einaudi M.T. and Burt D.M. (1982) A special issue devoted to skarn deposits: introduction - terminology, classification and composition of skarn deposits, *Econ. Geol.*, 77, 4, 745-754.

Engi M. and Warsin P. (1987) Derivation and application of a solution model for calcic garnet, *Schweiz. Mineral. Petrogr. Mitt.*, 67, 53-73.

Fletcher R.C. and Hofmann A.W. (1974) Simple models of diffusion and combined diffusion-infiltration metasomatism, in *Geochemical transports and kinetics*, A.W. Hofmann, B.T. Gilletti, H.S. Yoder and R.A. Yund editors, Carnegie Inst., Washington, pub. 634, pp. 243-259.

Fonteilles M. (1978) Les mécanismes de la métasomatose, *Bull. Minéral*, 101, 166-194.

Fonteilles and Guy B. eds. (1983), *A summary of geochemical and structural studies on tungsten bearing skarns in the Pyrenees (1980-1982)*, Ecole des Mines de Saint-Etienne, 63 p.

Giansdorff P. et Prigogine I. (1971), *Structure, stabilité et fluctuations*, Masson, Paris, 288 p.

Gruffat J.J. et Guy B. (1984). Un modèle pour les précipitations alternantes de minéraux dans les roches métasomatiques: l'effet autocatalytique des surfaces, *C.R. Acad. Sc. Paris, II*, 299, 961-964.

Guitard G. et Laffitte P. (1958) Les calcaires métamorphiques et les skarns du Pic de Costabonne (Pyrénées Orientales), *Sc. Terre Nancy*, VI, 1-2, 57-137.

Guy B. (1979) *Pétrologie et géochimie isotopique (S, C, O) des skarns à scheelite de Costabonne (Pyrénées Orientales, France)*, thèse Doct. Ing. Ecole des Mines de Paris, 270 p.

Guy B. (1980 a) Conditions d'apparition de la scheelite dans les skarns de Salau et de Costabonne, *Mém. BRGM n° 99*, ch. 11, 303-306.

Guy B. (1980 b) Les skarns et le tungstène, Mém. BRGM n° 99, ch. 12, 307-313.

Guy B. (1981) Certaines alternances récurrentes rencontrées dans les skarns et les structures dissipatives au sens de Prigogine: un rapprochement, C.R. Acad. Sc., Paris, 292, II, 413-416.

Guy B. (1984) Contribution to the theory of infiltration metasomatic zoning; the formation of sharp fronts: a geometrical model, Bull. Minér., 107, 93-105.

Guy B., Cournil M., Conrad F. and Kalaydjian F. (1984) Chemical instabilities and "shocks" in a nonlinear convection problem issued from geology, in Chemical Instabilities, C. Nicolis and F. Baras ed., D. Reidel, Dordrecht, 341-348.

Guy B. (1987 a) Non linear convection problems in Geology, in: Irreversible Phenomena and Dynamical Systems Analysis in Geosciences, C. Nicolis and G. Nicolis editors, D. Reidel, Dordrecht, 511-521.

Guy B. (1987 b) Trajets d'évolution dans les diagrammes de phases: un principe de moindre distance basé sur la métrique L_{ij} , 13^e Journées sur les Equilibres entre Phases, Lyon, Avril 1987, J.J. Counoux et M.T. Saugier-Cohen-Adad éditeurs, Université de Lyon I, p. 49-54.

Guy B. et Verkaeren J. éditeurs (1987) Gisements de tungstène en Europe Occidentale: recherche d'outils géochimique d'applicabilité générale en prospection minière, Rapport de fin de contrat, 160 p.

Guy B., Sheppard S., Fouillac A.M., Le Guyader R., Toulihoat P. and Fontailles M. (1988) Geochemical and isotopic (H, C, O, S) studies of barren and tungsten bearing skarns of the French Pyrenees, in: Mineral Deposits of Western Europe, J. Boissonas and P. Omenetto editors, Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 53-75.

Kalaydjian F. (1983) Etude d'une transformation de granite en endoskarn sur le site tungstifère de Costabonne (Pyrénées Orientales): pétrographie, géochimie (éléments majeurs, isotopes de l'hydrogène), modélisation, Travail Personnel d'Option, Ecole des Mines de Saint-Etienne, 125 p.

Kerrick D.M. (1977) The genesis of zoned skarns in The Sierra Nevada, California, J. Petrol., 18, 1, 144-181.

Kirkaldy J.S. and Brown L.C. (1963) Diffusion behaviour in ternary, multiphase systems, *Can. Met. Quat.*, 2, 1, 89-117.

Korzhinskii D.S. (1970), *Theory of Metasomatic Zoning*, Clarendon Press, Oxford, 162 p.

La Guyader R. (1982) *Éléments-traces dans les skarns à scheelite et les roches associées à Costabonne (Pyrénées Orientales, France)*, thèse Doct. 3^e cycle, Univ. P. et M. Curie Paris VI, 185 p., annexes, 150 p.

Nicolis G. and Prigogina I. (1977) *Self-organisation in non-equilibrium systems*, Wiley, 491 p.

Norton D. (1979) Transport phenomena in hydrothermal systems: the redistribution of chemical components around cooling magmas, *Bull. Minér.*, 102, 471-486.

Ortoleva F., Merino E., Moore C. and Chadam J., (1987) Geochemical self-organization I: Reaction-Transport feedbacks and modeling approach, *Am. J. Sc.*, 287, 979-1007.

Pacault A. et Vidal C. (1982) Mise au point: structures chimiques spatiales, ondes chimiques, *J. Chimie Physique*, 79, 10, 691-707.

Perrin M. et Guy B. (1985) Lithostratigraphie et structure de la partie inférieure de la série de Canaveilles dans le secteur de Costabonne (Sud du Canigou, Pyrénées Orientales franco-espagnoles): conséquences métallogéniques, *C. R. Acad. Sc. Paris*, 301, II, 2, 109-114.

Popper K. (1978) *La logique de la découverte scientifique*, Payot, Paris, 480 p.

Santarelli F., Alderton D. et Guy B. (1988) Etude des fluides des skarns à tungstène de Costabonne (Pyrénées): analyses chimiques, minéraux fils: quelques résultats, *C. R. Acad. Sc.*, 307, II, 1231-1236.

Touhoat P. (1982) *Pétrographie et géochimie des isotopes stables (H, O, C, S) des skarns du Quérigut (Pyrénées)*, thèse 3^e cycle Univ. Paris VI, 268 p.

Valour B. (1983), *Modélisation et étude numérique d'un problème géologique: la*

formation des skarns, thèse Doct. 3^e cycle, Université de Saint-Etienne, 250 p.

Van Marcke G. (1983) Pétrologie et géochimie des skarnoides du site tungstifère de Costabonne (Pyrénées Orientales), thèse Doct. Univ. Cath. Louvain, 293 p., annexes 150 p.

guy, 1988