

ETUDE GEOCHIMIQUE

DES EAUX DE SURFACE

DANS LE MASSIF ULTRABASIQUE

DU SUD DE LA

NOUVELLE-CALEDONIE.

J.J. TRESCASES.

**OFFICE DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE ET
TECHNIQUE OUTRE MER.**

CENTRE DE NOUMEA

Septembre 1969

TRESCASES, J.J.

ETUDE GEOCHIMIQUE DES EAUX DE SURFACE
DANS LE MASSIF ULTRABASIQUE DU SUD DE LA NOUVELLE-CALÉDONIE.

Les eaux drainant les péridotites de Nouvelle-Calédonie sont bicarbonatées, magnésiennes et siliceuses. La libération de magnésium est peu influencée par l'intensité du drainage, contrairement à celle de la silice. Le calcul de l'échelle de la mobilité relative des éléments donne :

$$\text{Na} > \text{Ca} > \text{Sr} > \text{K} > \text{Cu} > \text{Mg} \approx \text{Si} > \text{Al} > \text{V} > \text{Ni} > \text{Mn} \approx \text{Ti} \approx \text{Co} > \text{Cr} \approx \text{Fe}$$

Cette séquence correspond à une chromatographie des ions à travers le paysage. Les eaux traduisent la dynamique des types d'altération : la ferrallitisation intervient seulement aux périodes humides et sur les pentes faibles. Le climat subtropical de la Nouvelle-Calédonie provoque donc, sur les péridotites, l'alternance des phases de ferrallitisation et de simatisation, ce qui entraîne l'accumulation des silicates de nickel (garniérite).

ETUDE GEOCHIMIQUE DES EAUX DE SURFACE
DANS LE MASSIF ULTRABASIQUE DU SUD DE LA NOUVELLE-CALEDONIE

par **J.J. TRESCASES**
Chargé de Recherches
Centre ORSTOM de NOUMEA

Septembre 1969.

SOMMAIRE

	Pages
RESUME	1
ABSTRACT	2
AVANT-PROPOS	3
1. LE MILIEU. LES METHODES	4
1-1- Situation géographique et géologique	
1-2- Les méthodes	
2. LES FAITS.	10
2-1- Les anions	
2-2- Les cations, la silice, les paramètres physico-chimiques.	
2.2.1. Variations dans le temps	
2.2.2. Variations dans l'espace	
2-3- Les éléments en traces	
2-4- Mobilité relative des éléments	
3. SYNTHESE. CONSEQUENCES SUR LE TYPE D'ALTERATION	23
3-1- Principe de calcul	
3-2- Types d'altération des roches du massif du Sud de la Nouvelle-Calédonie.	
CONCLUSIONS	33
BIBLIOGRAPHIE	36

RESUME

L'étude des eaux drainant les roches ultrabasiques de Nouvelle-Calédonie permet, à l'aide de paramètres géochimiques convenables, d'évaluer le bilan de l'altération météorique de ces roches en climat sub-tropical.

Les mesures ont porté essentiellement sur le bassin péridotitique de la rivière Dumbéa (versant ouest de la Nouvelle-Calédonie), et se sont poursuivies pendant deux ans.

Les eaux sont du type bicarbonatées magnésiennes et renferment 15 mg/l de silice en moyenne. Elles contiennent en outre des sulfates, des chlorures et du sodium, des traces de calcium et de potassium.

Le calcul statistique des vitesses moléculaires relatives d'exportation de ces deux éléments à l'exutoire montre qu'en saison sèche, le magnésium est plus rapidement lessivé. L'exportation de silice est prépondérante en saison humide. L'étude des variations sur un profil en long de la rivière confirme cette observation.

Le dosage des éléments en traces permet le calcul de l'échelle de la mobilité relative des éléments dans l'altération :

éléments lessivés $Na > Ca > Sr > K > Cu$

éléments intermédiaires $Mg > Si$ (saison sèche)
 $Si \geq Mg$ (saison humide)

éléments résiduels $Al > V > Ni > Mn > Ti \geq Co > Cr \geq Fe$

Cette séquence correspond à une véritable chromatographie des ions à travers le paysage, les concentrations de chacun des éléments se disposant sur la toposéquence en fonction des mobilités.

Les roches et les minéraux d'altération du bassin versant étant constitués essentiellement de magnésium, l'étude de la mobilité relative de ces deux éléments en fonction des conditions climatiques, topographiques et pétrographiques, fait apparaître les types d'altération actuels induits par les diverses combinaisons de ces facteurs :

sur les versants en pentes fortes, l'altération n'est jamais ferrallitique, et conduit à la néogenèse de phyllites magnésiennes 1/1 et 2/1.

sur les pentes faibles, la ferrallitisation intervient aux périodes les plus humides.

Le rôle des facteurs de l'altération est ainsi mis en évidence : la ferrallitisation intervient d'autant plus aisément que la roche est plus basique, que la pente est plus faible, que la pluviométrie est plus importante. Dans le contexte géomorphologique favorable, le climat sub-tropical actuel de la Nouvelle-Calédonie provoque l'alternance de phases d'altération ferrallitique et de simatisation, pendant lesquelles des phyllites 1/1 et 2/1 prennent naissance. C'est ce climat, succédant à un paléoclimat plus franchement tropical, qui explique l'importance des accumulations secondaires de nickel silicaté (garniérite).

AVANT-PROPOS

L'étude du bilan géochimique du couple altération-sédimentation, entreprise par la section Géologie du Centre ORSTOM de NOUMEA sur les roches ultrabasiques de Nouvelle-Calédonie, comporte l'étude approfondie de l'altération de ces roches.

L'évolution météorique des roches est caractérisée par la transformation des minéraux de la roche saine, le plus souvent par l'intermédiaire d'une hydrolyse. Ce processus conduit à l'individualisation de deux phases : une phase résiduelle, constituée par les produits de néogenèse, amorphes ou cristallisés, ainsi que par les minéraux hérités de la roche-mère (zone d'altération ou horizon C des pédologues), et une phase migratrice, entraînée hors du profil d'altération dans les eaux de drainage, et comprenant les éléments libérés par hydrolyse, et maintenus en solution par des conditions physico-chimiques favorables.

L'étude de ces deux phases complémentaires permet d'appréhender la dynamique de l'altération. L'analyse des concentrations relatives ou absolues de la phase résiduelle fait appel à une reconnaissance géomorphologique et pédologique du paysage (TRESCASES, 1969), puis à l'étude minéralogique et géochimique des zones présélectionnées ; le raisonnement isovolumétrique appliqué à ces données conduit à une première estimation de l'intensité de l'altération.

La phase migratrice, ou lessivat, est dissoute dans les eaux de drainage : nappes, sources, rivières. En comparant à l'aide de paramètres géochimiques convenables, les résultats d'analyse des eaux à celles des roches drainées, on dispose d'une autre méthode d'étude du bilan de l'altération.

Ce problème des relations chimiques entre le sous-sol (roche, altération, sol) et l'eau a été abordé par de nombreux auteurs (CHATONIER, 1957 - SCHOELLER, 1963 - WHITE et col., 1963 - par exemple). Les analyses d'eaux peuvent être utilisées pour évaluer les mobilités relatives des

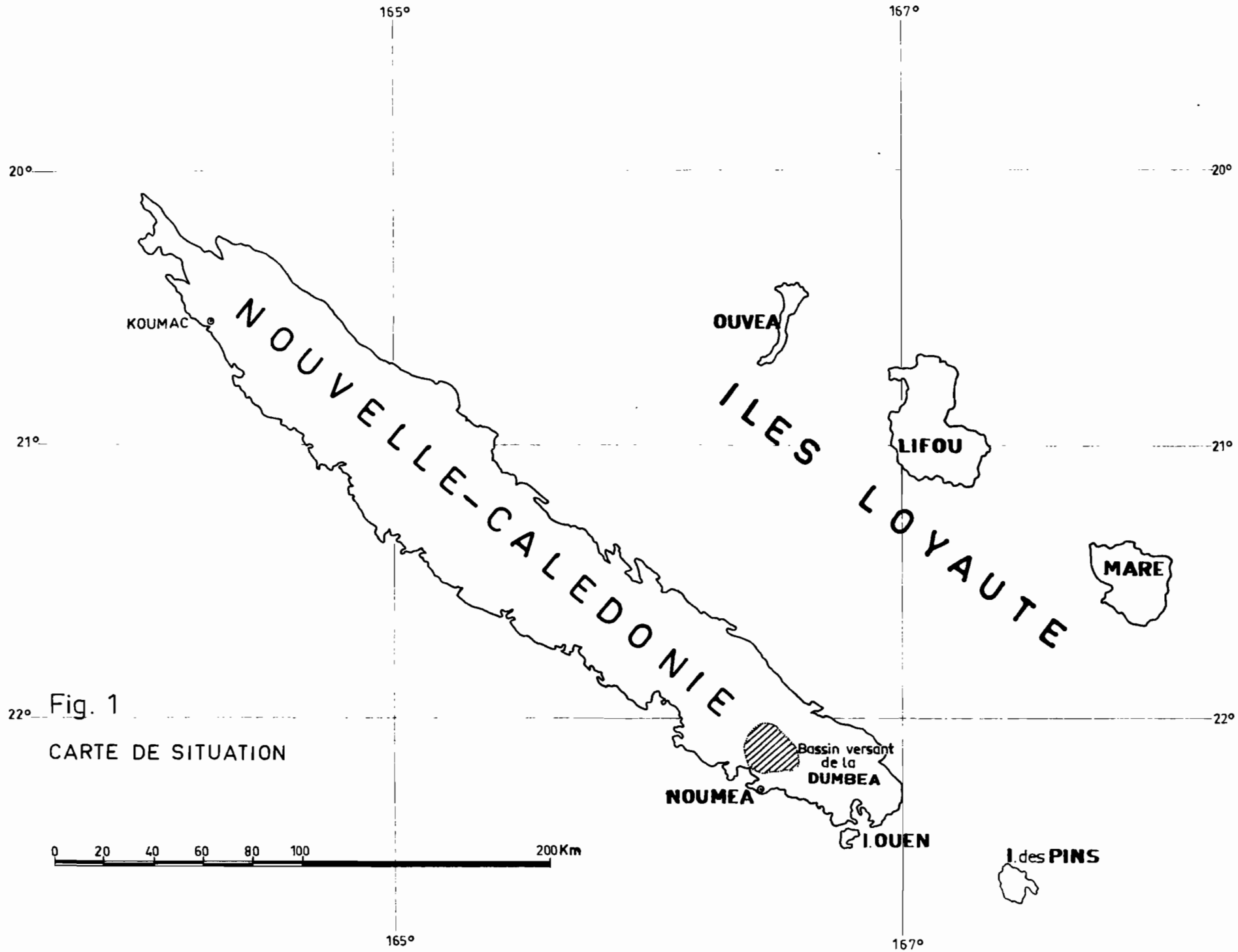


Fig. 1

CARTE DE SITUATION

éléments au cours de l'altération (TARDY, 1966). Ces données permettent de prévoir la nature des produits de néogenèse ou de dégradation, donc le type d'altération (PEDRO, 1966 - GAC, 1968).

1 - LE MILIEU - LES METHODES.

1-1-

Situation géographique et géologique.

Les prélèvements d'eaux de surface ont été effectués pour la plupart dans le bassin versant de la rivière Dumbéa. Celui-ci est situé sur le versant ouest de la Nouvelle-Calédonie, à une vingtaine de kilomètres au nord de NOUMEA, par 166°30' E et 22°5' S (figure 1).

Le climat de cette région est subtropical avec une température moyenne au niveau de la mer variant de 26° C en février à 20° C en août. La pluviométrie, qui n'est que de 1 000 mm en bordure de côte, dépasse 3 000 mm sur les massifs montagneux du bassin. On distingue quatre saisons : de décembre à mars, la période chaude et humide, qui est aussi la période des cyclones tropicaux ; d'avril à mai, l'alizé est établi, une saison plus fraîche et sèche s'installe ; de juin à août, l'hiver austral connaît des précipitations d'intensité modérée ; de septembre à novembre, enfin, l'alizé de sud-est entretient un temps sec qui n'est pas encore trop chaud. Ce schéma varie toutefois d'une année à l'autre, et surtout en altitude où il pleut un peu toute l'année, et où les températures hivernales peuvent approcher de zéro.

Le relief général du bassin de la Dumbéa est très montagneux, le point culminant atteignant 1 250 m. Les rivières sont profondément encaissées, les pentes très fortes encadrant leur cours étant toutefois tronquées vers le haut, en lourdes croupes à surface sommitale presque tabulaire. A l'aval, la Dumbéa déroule ses méandres sur une petite plaine alluviale.

Ce bassin, d'une superficie globale de 210 km² environ, est constitué à plus de 80 % par des roches cristallines. Seule la plaine alluviale et quelques crêtes basses de tufs et de grès crétacés qui la dominent, rompent à l'aval l'homogénéité géologique (figure 2). 97 % des roches cristallines appartiennent à la famille des roches ultrabasiques, les 3 % complémentaires étant représentés par les deux zones gabbroïques du Pic du Rocher et de la Montagne des Sources, toutes deux situées à la tête de la de la branche est de la Dumbéa. Les roches ultrabasiques comprennent des harzburgites (80 %), des dunites (20 %) et des petits affleurements de wehrlite et de pyroxénolite. La composition minéralogique de ces roches a été étudiée par GUILLON (1969 a.) Les gabbros sont mélanocrates, à grain moyen, et composés de plagioclases, de clinopyroxènes, et quelquefois d'orthopyroxènes et d'olivine. L'olivine, constituant essentiel des roches ultrabasiques, est très magnésienne ($\text{SiO}_2 - 1,9 \text{ MgO} , 0,1 \text{ FeO}$). La harzburgite contient en outre 10% à 20% de pyroxène orthorhombique (enstatite), et la wehrlite du pyroxène clinorhombique (diallage). L'olivine est presque toujours partiellement serpentinisée. La composition chimique de ces roches est donnée dans le tableau I. Les analyses chimiques des gabbros ont été réalisées au laboratoire de Géologie Appliquée de la Faculté des Sciences de Paris, les analyses de péridotites par le laboratoire de Géologie du Centre ORSTOM de Nouméa. Les éléments en traces figurent dans le tableau II. Leur dosage spectrographique a été effectué par les Services Scientifiques Centraux de l'ORSTOM, à Bondy, dans le laboratoire de M. PINTA.

La répartition des sols semble étroitement contrôlée par la morphologie : les plateaux et croupes sommitales, à topographie sub-horizontale, sont couverts de sols ferrallitiques profonds, parfois indurés en cuirasse ; les larges fonds de vallées, actuels ou suspendus, et tous les bas de pentes s'ennoient sous des dépôts de piedmonts, enrichis en silice et en argile ; les pentes moyennes sont le siège d'un colluvionnement intense, alimenté par la destruction des surfaces ferrallitiques perchées, alors que les versants en pentes fortes évoluent en sols bruns eutrophes. La minéralogie de ces formations est variée : les sols ferrallitiques sont presque exclusivement constitués de goethite et d'hydroxyde ferrique amorphe,

TABLEAU I

Analyses chimiques des roches du bassin versant.

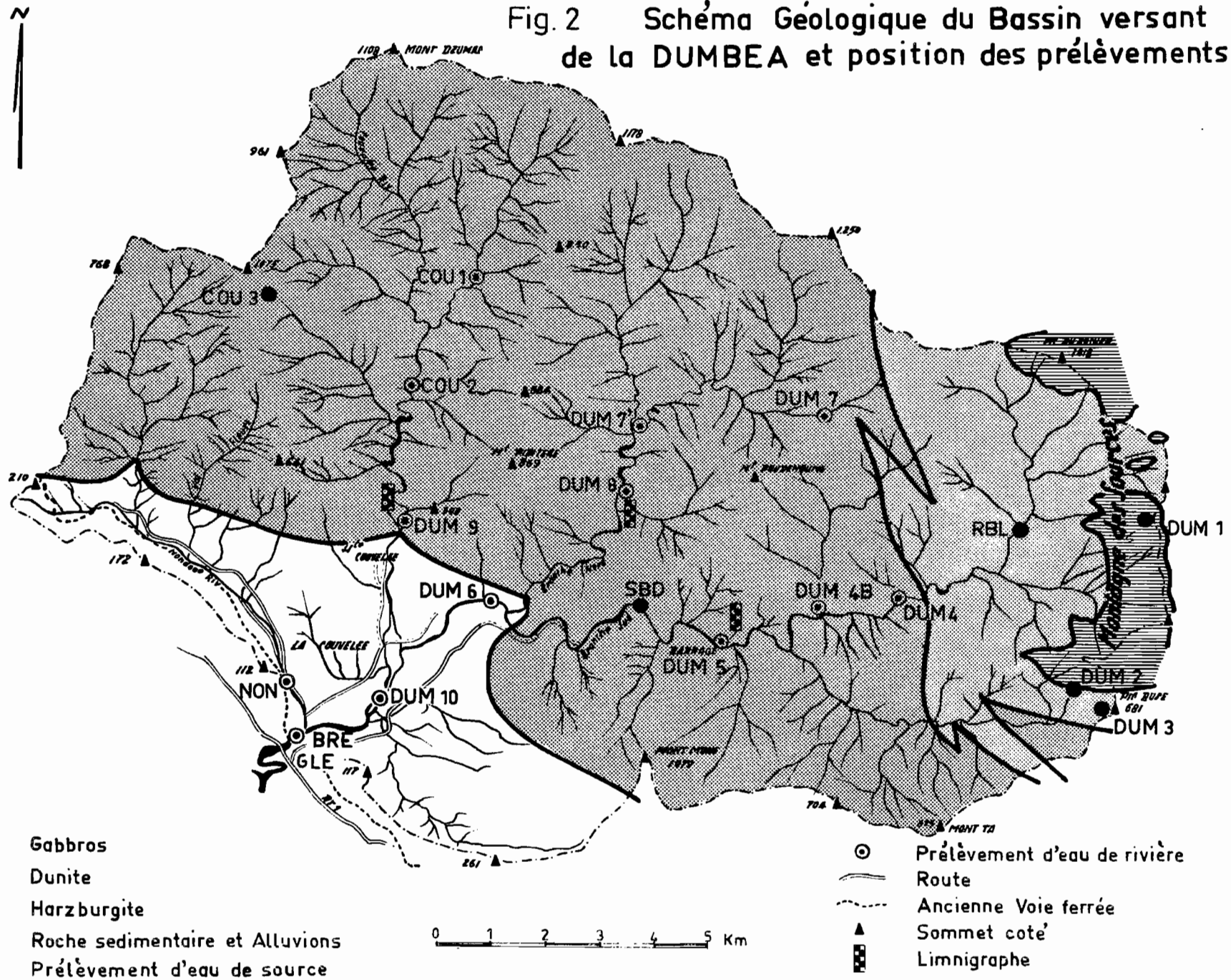
%	Gabbro	Gabbro à olivine	Wehrlite	Pyroxénolite	Harzburgite	Dunite	Harzburgite très serpentinisée
Perte à 1100°	1,06	7,54	5,94	0,42	6,81	12,69	14,06
SiO ₂	48,30	37,30	36,82	55,97	39,84	36,50	39,63
Fe ₂ O ₃ total	11,60	9,20	8,57	11,45	8,04	6,61	7,14
Al ₂ O ₃	17,50	1,00	2,03	3,05	0,38	0,40	0,51
CaO	9,24	1,96	0,07	0,35	0,12	0,07	0,17
MgO	8,70	41,30	43,25	28,98	44,23	43,05	36,08
Na ₂ O	2,70	0,12	0,12	-	0,10	0,09	-
K ₂ O	0,13	0,05	traces	-	traces	traces	-
Cr ₂ O ₃	0,02	0,47	2,17	0,25	0,32	0,38	0,58
MnO ₂	0,18	0,13	0,16	0,16	0,12	0,12	0,10
Ni O	0,02	0,28	0,48	0,05	0,20	0,35	0,40
Ti O ₂	0,88	0,15	0,10	0,12	0,12	0,29	0,15
Co O	0,01	0,03	-	-	0,03	-	-
	100,34	99,53	99,71	100,80	100,31	100,55	98,82

TABLEAU II

Éléments en traces dans les roches du bassin versant.

ppm	Gabbro	Gabbro à Olivine	Wehrlite	Harzburgite	Dunite
Co	50	200	500	300	480
V	10	10	10	10	10
Cu	30	30	5	5	5
Zr	30	30	20	50	30
Ga	30	10	30	30	20
Cs	10	10	10	10	10
B	5	3	5	5	8
Sr	300	30	3	3	3
Zn	inférieur à 100 ppm				
Ba	inférieur à 30 ppm				
Pb - Sn - Rb - Mo Ge - Be - Bi	inférieurs à 10 ppm				
Li - Ag	inférieurs à 3 ppm				

Fig. 2 Schéma Géologique du Bassin versant de la DUMBEA et position des prélèvements d'eau



à l'exception de la zone de contact avec la roche, antigoritique ; les formations de piedmont renferment de notables quantités de montmorillonite-nontronite, et les sols bruns eutrophes de l'antigorite, du talc et de la montmorillonite. Les zones ferrallitiques constituant des lambeaux de diverses surfaces d'érosion, aujourd'hui en cours de démantèlement, et l'altération sur les versants conduisant à des sols à phyllites 2/1, le problème du caractère actuel ou fossile de l'altération ferrallitique se posait. L'étude géochimique des eaux de surface permet d'apporter une réponse.

1-2-

Les Méthodes.

Les échantillons d'eau ont été prélevés mensuellement entre août 1966 et octobre 1968, en dix points du bassin de la Dumbéa, choisis en fonction de critères géologiques (contact pétrographique) ou hydrologiques (exutoire d'un bassin, présence d'un limnigraphe) : trois sources et sept prélèvements d'eaux de rivière (DUM 1 à 10 - figure 2). Quelques échantillons ont en outre été récoltés à l'occasion de tournées dans cette région d'accès difficile.

Les prélèvements sont effectués en bouteilles de polyéthylène de 2 litres. L'analyse est réalisée à Nouméa, par le laboratoire de Géologie du Centre ORSTOM, dans un délai de 48 heures. Le pH est mesuré in-situ, ou au laboratoire : la mesure sur le terrain est toujours supérieure de 0,1 à 0,2 unités pH à la valeur déterminée au laboratoire, ce qui s'explique par la dissolution du gaz carbonique atmosphérique diffusé à travers les parois du flacon.

Les méthodes de dosage (RODIER, 1960 - TRESCASES, 1965) sont les suivantes :

CO_3^{--} et HCO_3^- sont titrés par l'acide sulfurique.

Cl^- est titré par le nitrate d'argent en présence de chromate (méthode de Mohr).

SO_4^{--} est dosé par néphélométrie.

SiO_2 est dosée par colorimétrie du complexe silico-molybdique

- Mg⁺⁺ est titré par l'E.D.T.A. en présence de noir ériochrome.
Ca⁺⁺ est titré par l'E.D.T.A. en présence de calcéine, et
à la lumière ultra-violette.
Na⁺ et K⁺ sont dosés par spectrophotométrie de flamme.
Fe par colorimétrie du complexe formé avec l'orthophénantroline.
Al par colorimétrie du complexe formé avec l'ériochrome
cyanine.

D'autre part, un litre d'eau est mis à sec avec du sulfate de potassium spectrographiquement pur. Ce résidu est brûlé dans un arc électrique sous basse tension établi entre deux électrodes de graphite, le sulfate de potassium servant de tampon spectral. Le spectre d'émission est enregistré sur plaque photographique. Seule la mise à sec est effectuée à Nouméa, le dosage spectrographique des éléments en traces est réalisé par les Services Scientifiques Centraux de l'ORSTOM, à BONDY.

2 - LES FAITS .

L'étude géochimique d'une eau drainant une formation géologique déterminée a été abordée sur des roches et sous des climats très variés : FRECAUT et STRAUSS (1968) comparent les eaux de la Moselle dans les Vosges cristallines, les Vosges gréseuses, et en Lorraine marnocalcaire ; LAMOUROUX et col. (1968) étudient les eaux des régions calcaires du Liban ; MANGIN et col. (1966) les eaux d'un fleuve de Côte d'Ivoire en zone de savane sur granite et en zone de forêt sur schistes antécambriens ; ceci pour ne citer que quelques publications récentes. Les eaux drainant les massifs de péri-dotites semblent toutefois plus délaissées. BUGEL'SKIJ (1965) et d'autres auteurs russes sont parmi les rares à s'être intéressés à ces formations. En Nouvelle-Calédonie, outre l'étude de TAILLOTE (1884) sur les eaux thermales de la baie de PRONY (Massif ultrabasique du Sud) que nous citons pour mémoire, une équipe d'hydrobiologie de l'Institut de Zoologie de Vienne a relevé les particularités chimiques de quelques rivières du massif du Sud (STARMUHLNER - 1968 et WENINGER - 1968).

D'une manière générale, les eaux de surface du grand massif du Sud de la Nouvelle-Calédonie sont bicarbonatées magnésiennes, et se groupent très près de ces pôles sur les diagrammes triangulaires (figure 3).

On observe cependant deux types de variations dans la composition des eaux de rivière : variations dans le temps et variations dans l'espace. Les tableaux III donnent la composition moyenne des eaux sur un profil en long de la branche est de la Dumbéa, aux diverses saisons. (Les moyennes sont établies entre Août 1966 et Janvier 1968).

2-1-

Les anions = Sulfates - Chlorures - Bicarbonates.

A l'exception des sulfates qui résultent de l'oxydation des sulfures, inclus dans les pyroxènes (GUILLON 1969 b), et dont la teneur moyenne est d'une dizaine de mg/l, les anions ne proviennent pas de la roche. On les trouve en revanche dans l'eau de pluie :

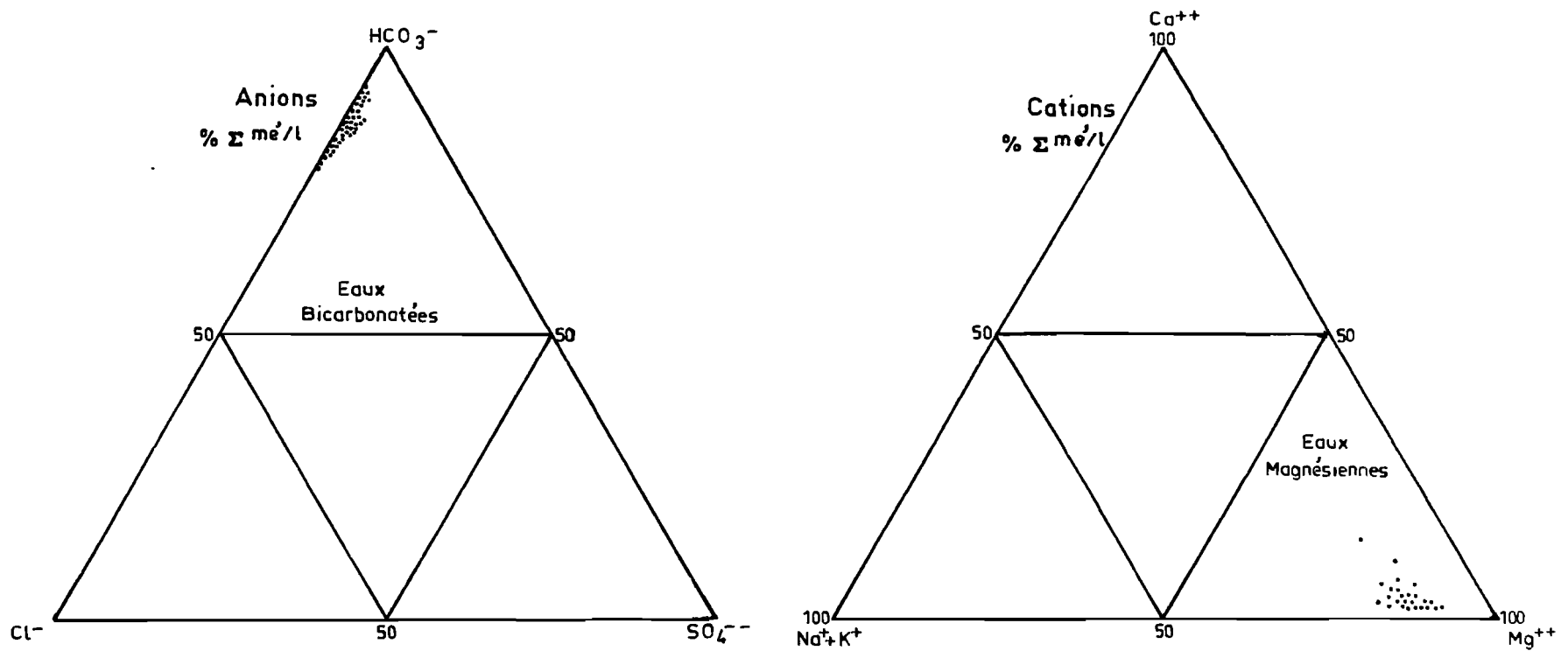


Fig. 3

Diagrammes Anioniques et Cationiques des eaux
de massifs de péridotites de Nlle CALEDONIE (en % Σ me/l)

TABLEAUX III

Composition moyenne des eaux sur un profil en long de la DUMBEA (branche Est).

Prélèvements (cf. fig. 2)	1	2	3	4	5	6	10
Hydrologie	Source	Source	Source	Rivière	Rivière (barrage)	Confluent Branche Nord	Point extrême atteint par la marée
Géologie	Gabbro	Wehrlite	Dunite	Contact Dunite Harzburgite	Harzburgite	Contact Péridotite- Sédimentaire	Sédimentaire
Altitude	850 m	650 m	560 m	180 m	120 m	10 m	2 m
pH	6,7	7,5	7,6	7,8	8,0	8,0	8,1
P_n cm	25 000	12 000	12 000	8 000	9 000	7 8000	7 800
HCO_3^- mg/l	15,0	50,0	50,0	62,2	60,0	77,0	90
Cl^-	6,0	6,0	6,0	6,2	7,0	9,0	9,8
SiO_2	5,3	12,3	11,6	11,8	15,3	15,6	18,5
MgO	3,4	12,4	14,0	16,7	18,1	20,3	23,4
CaO	1,8	1,5	0,9	1,4	1,4	1,0	0,7
Na_2O	4,0	4,0	4,0	4,3	4,7	4,7	4,8
K_2O	0,15	0,15	0,15	0,15	0,17	0,20	0,19

III A. Saison chaude : Décembre à Mars.

	1	2	3	4	5	6	10
pH	6,6	7,5	7,6	7,8	7,8	7,8	8,1
P	25 000	12 000	12 000	8 000	8 250	8 000	7 300
HCO_3^-	15,0	50,0	50,0	62,2	64,0	70,0	100
Cl^-	6,0	6,0	6,0	6,2	7,0	8,0	8,8
SiO_2	4,1	10,6	10,2	11,0	14,1	12,3	12,8
MgO	2,8	12,9	13,4	17,1	20,2	21,0	25,3
CaO	2,8	1,7	0,8	1,9	1,4	1,9	1,5
Na_2O	3,8	4,0	4,0	4,3	4,7	4,7	4,8
K_2O	0,15	0,15	0,15	0,15	0,17	0,20	0,19

III B. Petite saison sèche : Avril à Juin.

	1	2	3	4	5	6	10
pH	7,0	7,5	7,6	7,8	7,8	8,0	8,0
P	25 000	12 000	12 000	8 000	9 000	8 400	7 900
HCO ₃ ⁻	15,0	50,0	50,0	62,2	61,0	80,0	105
Cl ⁻	6,0	6,0	6,0	6,2	5,8	7,0	8,5
SiO ₂	4,05	11,3	11,4	12,1	12,9	14,3	15,6
MgO	2,4	12,8	13,7	15,65	18,7	19,5	23,3
CaO	2,4	1,5	1,5	1,8	1,4	1,2	1,4
Na ₂ O	4,0	4,0	4,0	4,3	4,7	4,7	4,8
K ₂ O	0,15	0,15	0,15	0,15	0,17	0,20	0,19

III C. Saison fraiche : Juin à Septembre.

	1	2	3	4	5	6	10
pH	6,4	7,5	7,6	7,8	8,0	7,7	8,0
ρ	25 000	12 000	12 000	8 000	9 000	7 200	7 300
HCO_3^-	15,0	50,0	50,0	62,2	73,4	95	115
Cl^-	6,0	6,0	6,0	6,2	7,0	6,5	8,0
SiO_2	3,2	7,7	7,6	7,6	8,8	10,4	10,5
MgO	2,8	13,6	14,0	17,7	19,8	21,8	25,1
CaO	2,1	2,1	1,6	1,2	1,4	1,5	2,2
Na_2O	3,8	4,0	4,0	4,3	4,7	4,7	4,8
K_2O	0,15	0,15	0,15	0,15	0,17	0,20	0,19

III D. Saison sèche : Septembre à Novembre.

Analyse d'une eau de pluie

HCO_3^-	12,2	mg/l
Cl^-	4,3	mg/l
Mg^{++}	0	mg/l
Ca^{++}	0,5	mg/l
Na^+	1,8	mg/l
K^+	0,27	mg/l
SiO_2	0,6	mg/l

Les tableaux III font apparaître en outre le comportement caractéristique des chlorures et du gaz carbonique (dissous sous forme bicarbonate dans cette gamme de pH) : les teneurs en chlorures varient peu le long du profil de la Dumbéa, mais diminuent en saison fraîche, quand les alizés soufflent le moins. Le gaz carbonique est sensiblement constant toute l'année, mais sa teneur est beaucoup plus importante en aval qu'à la source. Le gaz carbonique étant d'origine atmosphérique, un plus long parcours aérien de la rivière favorise une plus grande dissolution. Le comportement distinct du chlore s'explique par une origine maritime de cet élément, apporté par les alizés.

2-2-

Les Cations, la silice et les paramètres physicochimiques -

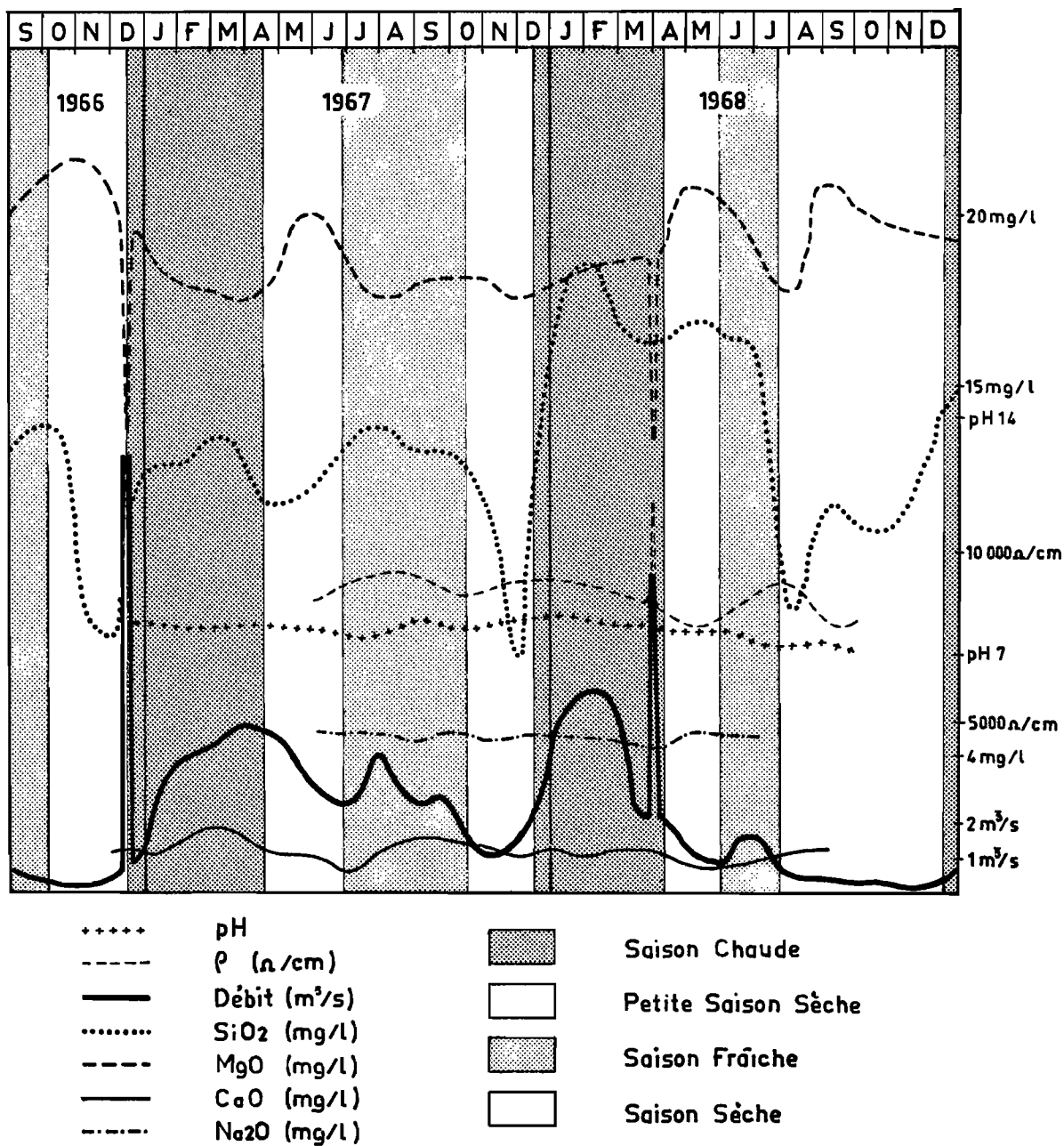
2.2.1. Variations dans le temps.

L'évolution des eaux en fonction du temps, c'est-à-dire des données climatiques, en un point donné, est schématisée par les figures 4. Ces courbes ont été établies aux exutoires de chacune des branches de la Dumbéa, entre Août 1966 et Octobre 1968. Les teneurs en potassium, trop faibles pour que des variations significatives apparaissent, n'ont pas été prises en considération. Les courbes des débits mensuels moyens de chacun des affluents, qui traduisent les caractéristiques climatiques, sont portées sur les graphiques pour corrélation. Les quatre saisons se distinguent sur ces courbes, mais il faut noter l'extrême dissemblance entre 1967, année

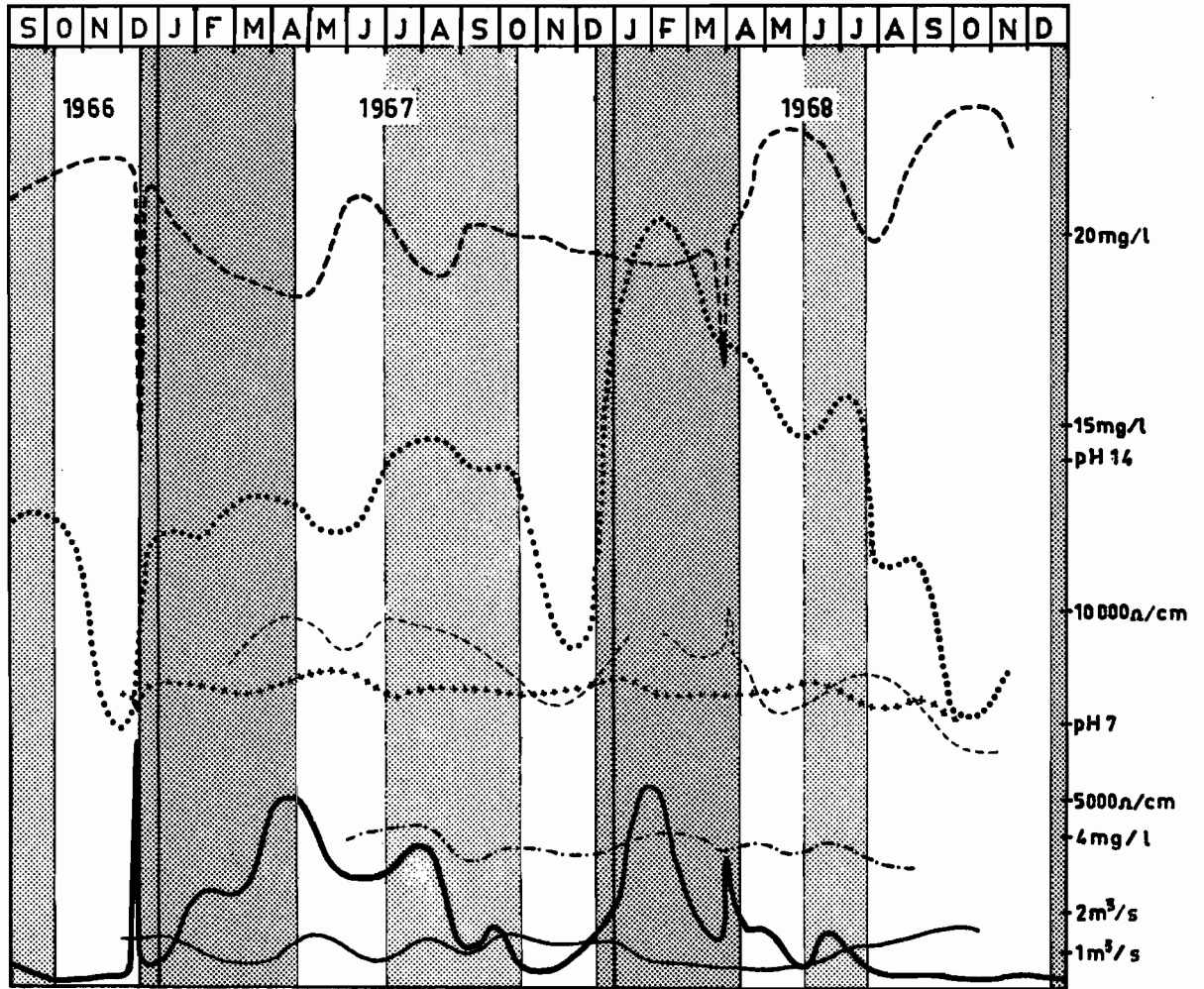
Figures 4.

Evolution Géochimique des eaux en Fonction du temps

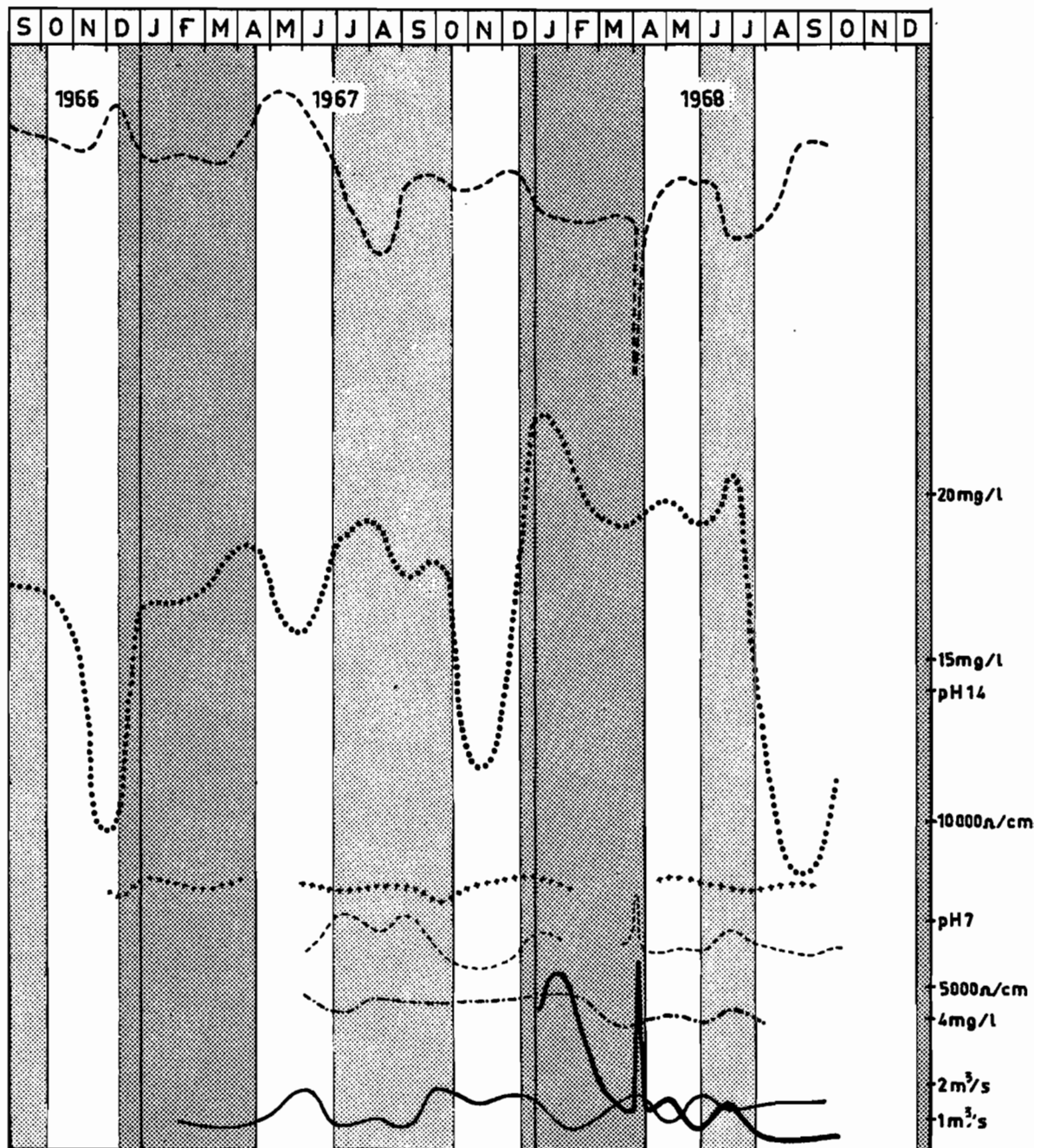
A. Dumbéa Est (Prélèvements DUM. 5)



B. Dumbéa Nord (Prélèvements DUM. 8)



C. Couvelée (Prélèvements DUM.9)



particulièrement humide, et 1968, année très sèche. Deux crues exceptionnelles figurent sur ces schémas à titre indicatif.

Deux paramètres sont sensiblement constants, le pH, toujours voisin de 8, et la teneur en sodium, qui diminue toutefois un peu en saison fraîche. Le comportement de ce dernier élément est donc voisin de celui du chlore, et le sodium, rare dans les roches du bassin, est d'origine maritime.

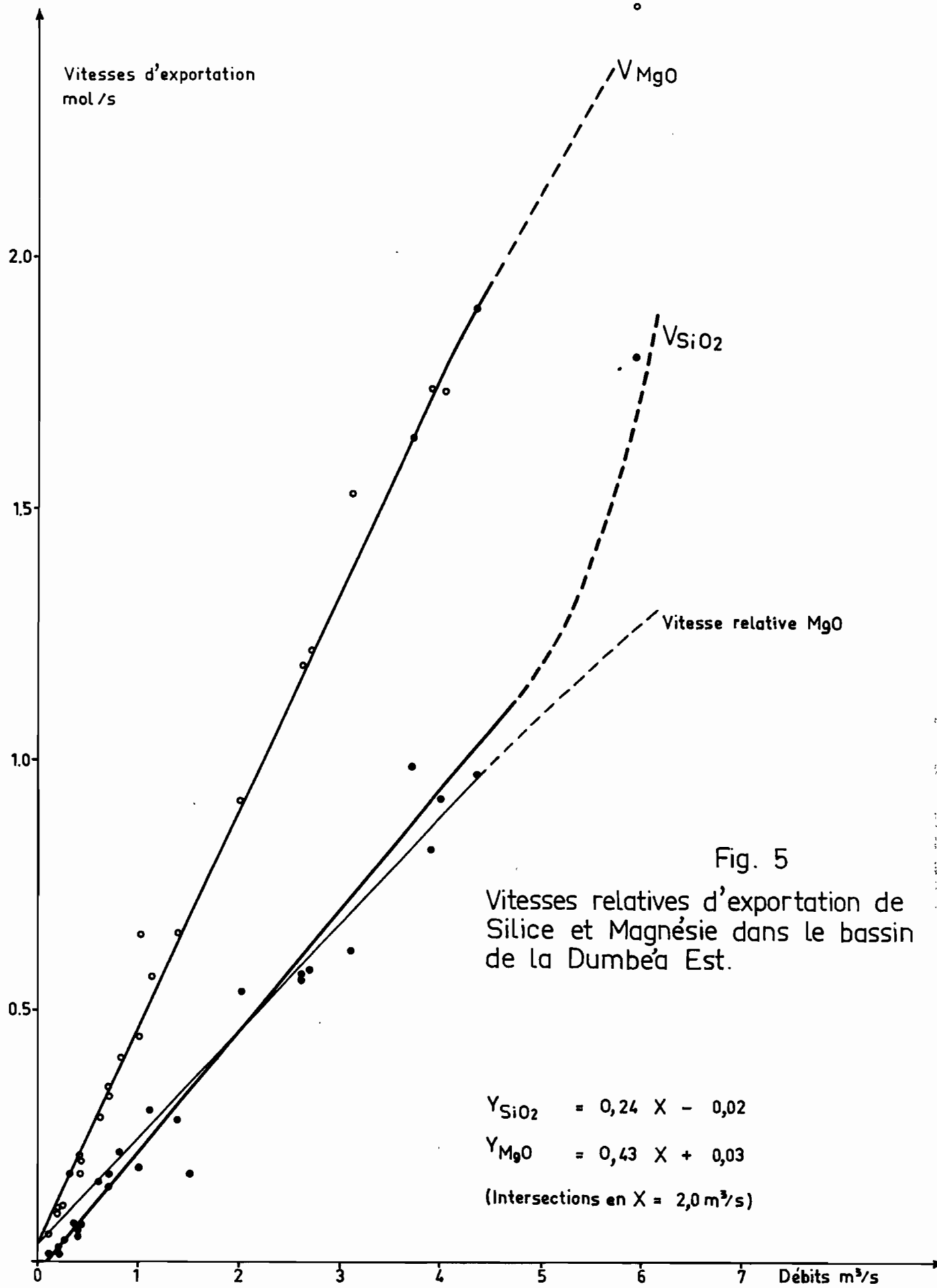
Les variations du calcium sont trop faibles, par rapport à la sensibilité du dosage, pour qu'une interprétation se dégage du graphique.

La résistivité montre une corrélation négative très nette avec le magnésium, ce qui est une conséquence de la forme moléculaire et non ionique, de la silice en solution (SIFFERT, 1962) : les seuls ions présents en quantités importantes dans ces eaux, sont les ions Mg^{++} .

En définitive, les deux éléments dont la géochimie est la plus intéressante dans les eaux de la Dumbéa, sont la silice et le magnésium, par ailleurs constituants essentiels des roches du bassin versant. Pour comparer plus commodément ces deux éléments entre eux, et les roches avec les eaux, le magnésium a été exprimé en oxyde.

Les teneurs en magnésie sont toujours élevées (20 à 30 mg/l, soit vingt fois plus de MgO que de CaO), mais présentent deux maxima correspondant aux deux périodes plus sèches. L'amplitude des variations est en outre peu élevée ($\pm 10\%$ de la valeur moyenne, sauf pour les crues exceptionnelles.) La libération du magnésium semble donc peu influencée par le drainage, l'eau de pluie ruisselée diluant simplement les eaux souterraines aux périodes plus humides.

Le comportement de la silice est très différent ; les teneurs sont élevées (15 mg/l en moyenne), ce qui se compare aux chiffres donnés pour la zone chaude : 18 mg/l dans l'Amazonie (CORBEL - 1957), 16 mg/l en Côte d'Ivoire (ROUGERIE - 1958), 15 mg/l à Madagascar (HERVIEU - 1968) et dépasse



Vitesses d'exportation
mol/s

V_{MgO}

V_{SiO_2}

Vitesse relative MgO

Fig. 5

Vitesses relatives d'exportation de
Silice et Magnésie dans le bassin
de la Dumbéa Est.

$$Y_{SiO_2} = 0,24 X - 0,02$$

$$Y_{MgO} = 0,43 X + 0,03$$

(Intersections en $X = 2,0 \text{ m}^3/\text{s}$)

2.0

1.5

1.0

0.5

0

1

2

3

4

5

6

7

Débits m^3/s

nettement les teneurs trouvées en zone tempérée : 3 mg/l dans les Vosges par exemple (ROUGERIE - 1965). L'amplitude des variations est très grande puisqu'elle atteint $\pm 50\%$ de la valeur moyenne. A l'inverse du magnésium la teneur est plus élevée en période pluvieuse, et minimum en saison sèche. La libération de silice serait alors directement proportionnelle au drainage.

Ces comportements relatifs de la silice et du magnésium avaient été qualitativement définis par BITTAR (1966) d'après les résultats d'essais d'altération de serpentinite en extracteur Soxhlet. Les courbes de la figure 4 permettent de vérifier quantitativement cette hypothèse. On peut en effet calculer la vitesse d'exportation V_e d'un élément exprimée en molécule/seconde en fonction du débit, $D \text{ m}^3/\text{s}$:

$$V_e = \frac{t \cdot D}{M}$$

où t est la teneur de cet élément dans l'eau en mg/l
et M la masse moléculaire de l'élément (ou de l'oxyde).

On a reporté sur la figure 5 les vitesses d'exportation de la silice et de la magnésie, observées sur la Dumbéa Est (point DUM 5), en fonction des débits mensuels moyens. Tant que le débit reste inférieur à $4,5 \text{ m}^3/\text{s}$ les relations $V_e = f(D)$ peuvent être considérées comme linéaires. Le calcul des droites de régression de V_e en D donne

$$V_{\text{SiO}_2} = 0,24 D - 0,02$$

$$V_{\text{MgO}} = 0,43 D + 0,03$$

Le rapport moléculaire $\text{SiO}_2/\text{MgO} \approx 2$ dans l'olivine, ce qui permet de déterminer la vitesse moléculaire relative d'exportation V'_{MgO} :

$$V'_{\text{MgO}} = 0,215 D + 0,03.$$

et

$D > 2 \text{ m}^3/\text{s}$	$V'_{\text{MgO}} < V_{\text{SiO}_2}$
$D < 2 \text{ m}^3/\text{s}$	$V'_{\text{MgO}} > V_{\text{SiO}_2}$

Fig.6A. Evolution Géochimique des eaux sur un profil en long
 A. Saison Chaude

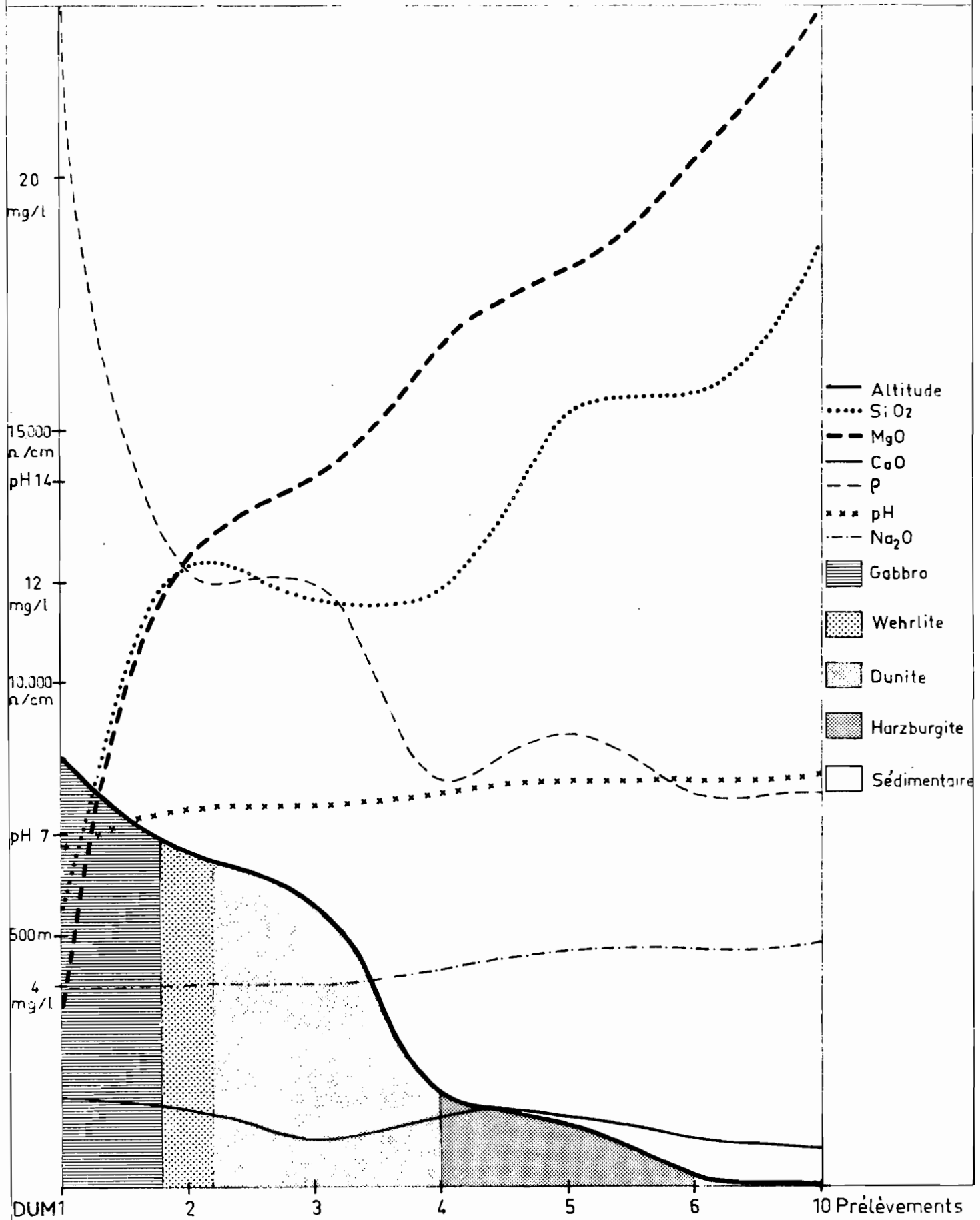


Fig.6B.

B. Petite Saison Sèche

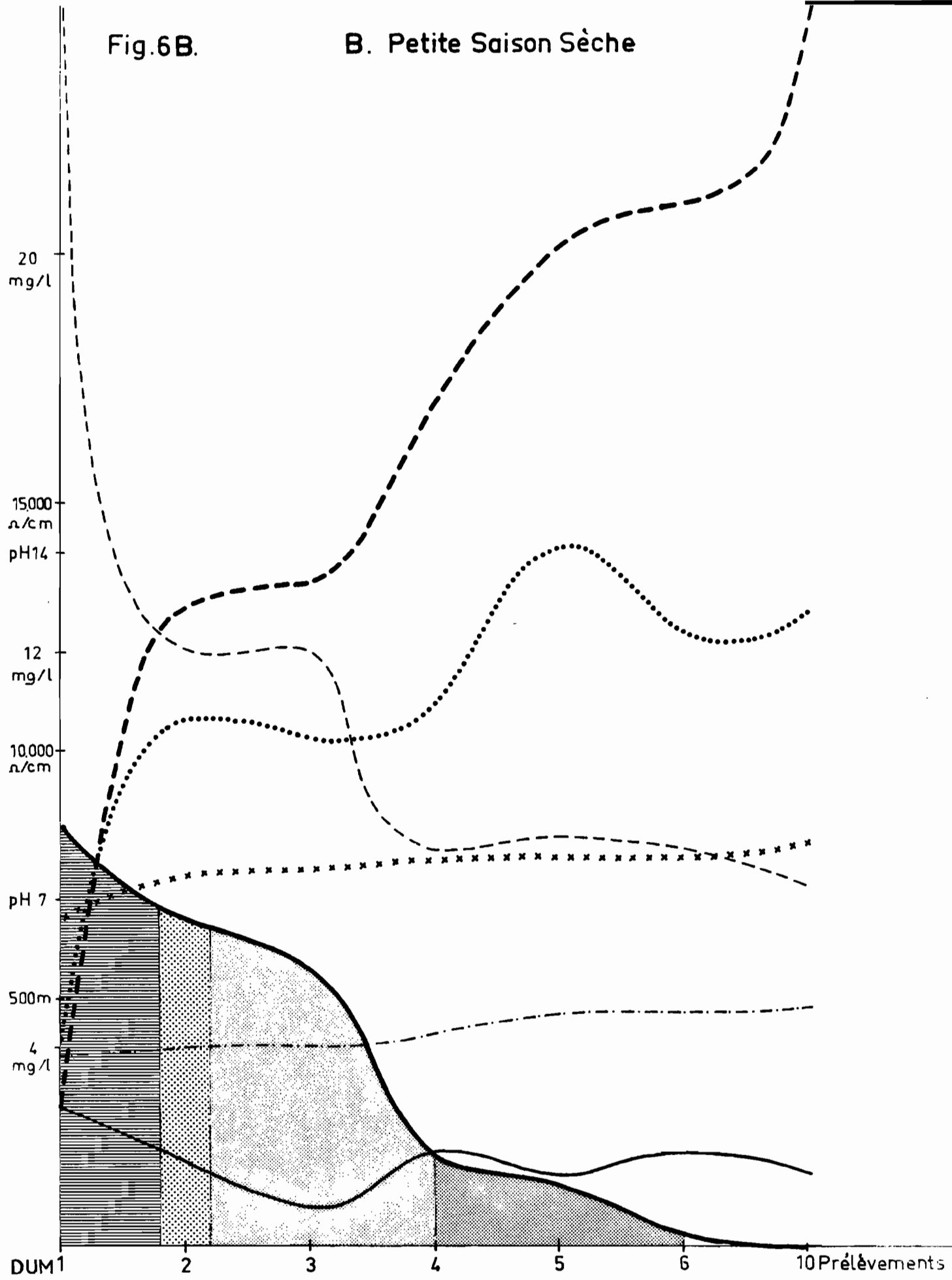


Fig. 6 C

C. Saison Fraiche

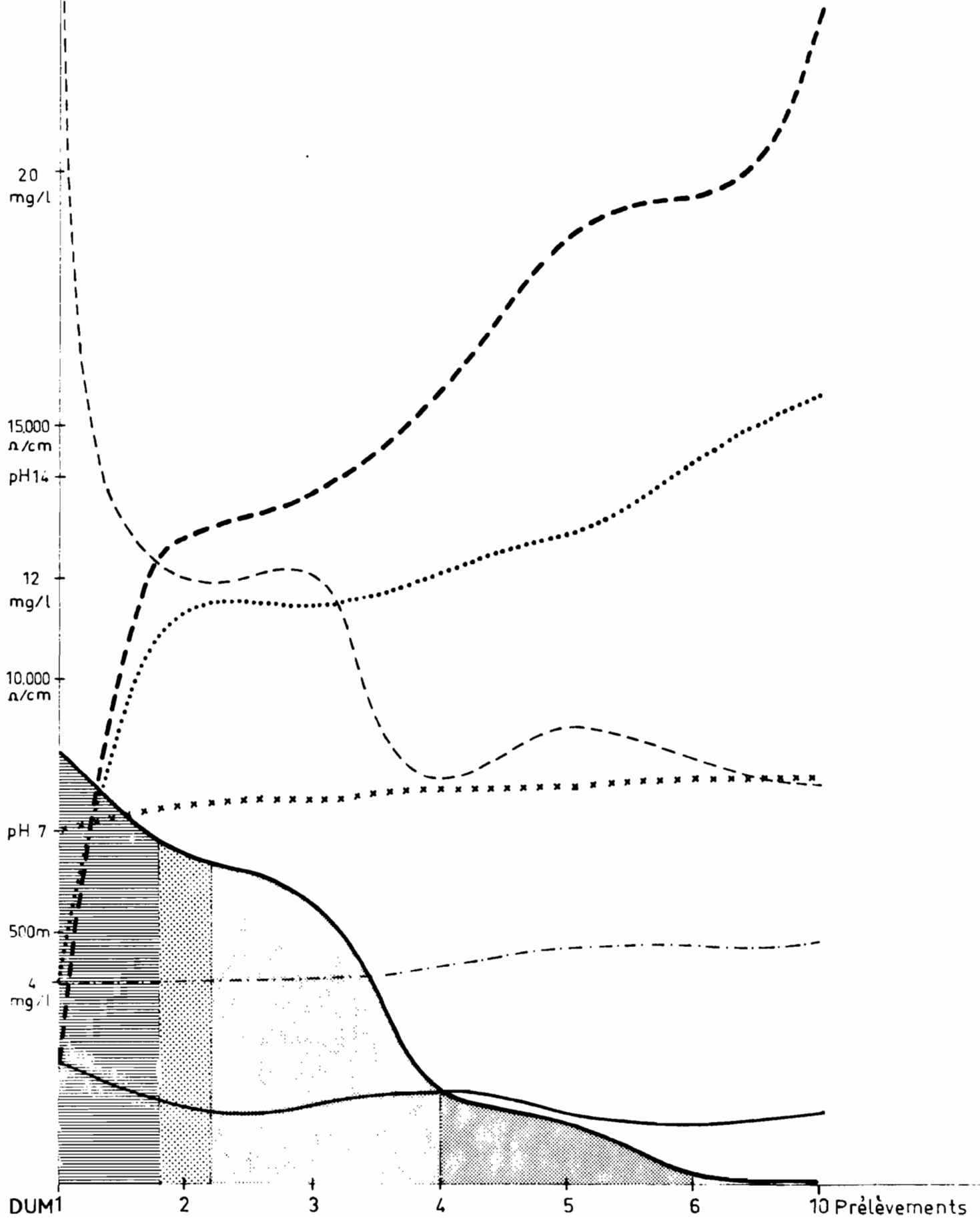
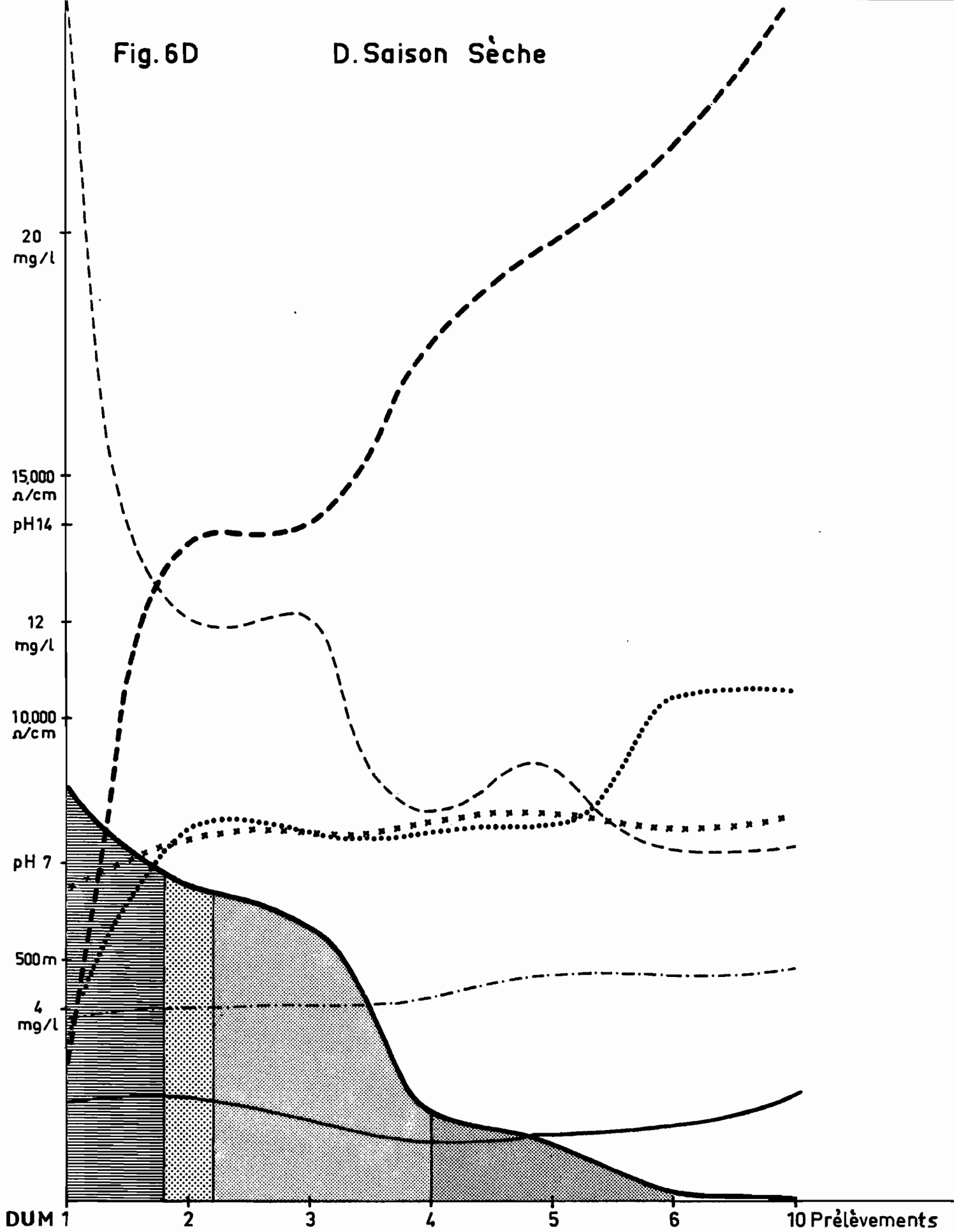


Fig. 6D

D. Saison Sèche



En conclusion : en période de basses eaux (saisons sèches), le magnésium est plus rapidement exporté que la silice ; en période de hautes eaux le phénomène s'inverse, et l'exportation de silice est prépondérante.

2.2.2. Variations dans l'espace.

L'évolution des eaux selon la géologie de la formation drainée, à une période climatique déterminée, est résumée dans les tableaux III qui ont servi à l'établissement des courbes des figures 6. Le profil topographique a été joint sur les courbes, pour mettre en évidence le rôle de la géomorphologie.

Comme sur les figures 4, les variations du pH sont faibles, puisqu'il passe de 7 à 8 entre la source et le point extrême atteint par la marée. Le sodium est le seul élément dont la teneur reste à peu près constante : tous les cations voient leur teneur augmenter avec la distance parcourue, à l'exception du calcium qui diminue dans les eaux, mais n'est présent que dans les gabbros, à la source. L'origine maritime du sodium, apporté par le vent et l'eau de pluie, est donc confirmée. La résistivité montre ici encore une corrélation négative avec le magnésium. Quant au comportement relatif du magnésium et de la silice, on retrouve les conclusions du paragraphe précédent sur le rôle du drainage : les teneurs en magnésium augmentent très régulièrement de la source à l'exutoire, ce qui montre que la libération de cet élément se produit de manière analogue dans tout le bassin, quelle que soit la morphologie, donc l'intensité du drainage.

Les teneurs en silice augmentent aussi vers l'aval, mais cet accroissement est nettement plus faible que celui du magnésium et semble dépendre de la morphologie. Ce point du comportement relatif de la silice et du magnésium est précisé plus loin.

2-3-

Les éléments en traces -

Les analyses spectrographiques disponibles sont encore très peu nombreuses, ce qui rend l'interprétation délicate. Le tableau IV rassemble

TABLEAU IV

Éléments en traces dans les eaux de la DUMBEA (branche Est) - (en µg/l).

Prélèvements	1		2		3		4		5		6	
Hydrologie	Source		Source		Source		Rivière		Rivière		Confluent avec Branche Nord	
Géologie	Gabbro		Wehrlite		Dunite		Contact Dunite Harzburgite		Harzburgite		Contact Péridotite Sédimentaire	
Saison	SS	SC	SS	SC	SS	SC	SS	SC	SS	SC	SS	SC
Fe	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Al	50	50	50	50	25	25	25	25	25	25	25	25
Ni	6	10	7	6	7	5	9	8	7	7	4	5
Co	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Ti	3	4,5	1,5	2	2	2,5	1,5	2	2,5	2,5	3	3
Cr	7	5	5	8	7,5	5	7	4,5	7	4	3,5	3
Mn	2	3,5	2,5	3	2	2	2,5	3	3,5	4	2	3
V	1	1,5	Inférieur à 0,5 ppb									
Cu	12	10	15	2	16	1,5	5	1,5	3	2	3	3
Sr	8	8	6	8	2,5	4	1,5	3	3	4	1,5	2
Ba	4	3	4	3	Inférieur à 3 ppb						4	< 3
Li	0,5	1	1	Inférieur à 0,5			1	< 0,5		1	< 0,5	
Rb	Inférieur à 0,5 ppb											
Mo	< 1,5	1,5	Inférieur à 1,5 ppb									
Pb	Inférieur à 5 ppb											
Sn	Inférieur à 1,5 ppb											

Non dosés : Zr, Ga, Cs, B, Zn.

SS : Saison sèche.
SC : Saison chaude.

cependant les teneurs moyennes des eaux (en Mg/l) sur le profil en long de la Dumbéa Est, en saison sèche (fin 1966) et en saison chaude (début 1967). Dans les roches du bassin versant, le chrome, le nickel et le manganèse sont des éléments majeurs, le cobalt l'élément en traces dominant, le vanadium, le cuivre et le strontium constituant le reste du cortège (en se limitant aux éléments dosés dans les eaux). Tous ces éléments sont présents dans les eaux, mais le vanadium n'a été décelé qu'en un point. Du lithium et du baryum ont été en outre dosés en quelques points.

Le cuivre, qui est concentré dans les roches basiques, et en particulier au contact gabbro-dunite (GUILLON - 1969 b) est également concentré dans les eaux issues du plateau gabbroïque de la Montagne des Sources.

On note peu de variations entre la saison sèche et la saison humide et chaude : les teneurs en nickel, titane, manganèse et strontium semblent augmenter en saison chaude, à l'inverse du cuivre. Mais les écarts sont faibles en regard des valeurs trouvées, et du petit nombre d'analyses.

Si on compare ces valeurs à celles que donnent TARDY (1966) pour les eaux drainant des granites et migmatites du Massif central, DEFOSSEZ et col. (1967) pour les granites et schistes de Côte d'Ivoire, on constate que les eaux des massifs ultrabasiques de Nouvelle-Calédonie sont : moins riches en alcalins et alcalino-terreux (Li, Rb, Ba, Sr), moins riches qu'en Côte d'Ivoire pour l'étain, le plomb et le titane, mais plus chargées en chrome, nickel et cobalt. Ces résultats sont tout à fait conformes à la géochimie très particulière des roches ultrabasiques.

2-4-

Mobilité relative des éléments -

En appliquant le calcul de TARDY (1966) aux tableaux I, II, III, et IV, (prélèvements 1, 3 et 5), et en considérant l'aluminium comme élément de référence, on calcule les échelles de mobilités relatives des éléments dans l'altération des gabbros, des dunites et des harzburgites. Cette échelle

est reportée sur la figure 7. On constate que la séquence est sensiblement identique pour les trois roches.

Trois groupes d'éléments s'individualisent :

1) Eléments lessivés :

On y rencontre les alcalins et alcalino-terreux et le cuivre, dans l'ordre suivant $Na > Ca > Sr > K > Cu$
Avec une seule exception : $Sr > Ca$, en saison chaude, pour la harzburgite.

La présence du cuivre dans ce groupe, étonnante si on se réfère aux résultats publiés par TARDY ou d'autres auteurs, pourrait être due :

- soit à une altérabilité particulièrement importante des minéraux vecteurs de ce métal, des sulfures, qui s'oxydent en sulfates solubles.

- soit à une anomalie géochimique locale : les sources considérées seraient situées au voisinage de gisements de cuivre, et les teneurs moyennes données pour les roches seraient trop faibles. On connaît effectivement des indices de cuivre au contact gabbro-dunite, mais pas à l'intérieur des roches ultrabasiqes.

Ces éléments se retrouvent dans les zones très mal drainées, les marais à gypse, les mangroves, et dans l'océan.

2) Position intermédiaire.

Il s'agit essentiellement de la silice et du magnésium. Le comportement relatif de ces deux éléments apparaît encore ici, quelle que soit la roche :

en saison sèche $Mg > Si$

en saison humide $Si \geq Mg$

Ces éléments sont concentrés dans les argiles des sols et en bas de pente.

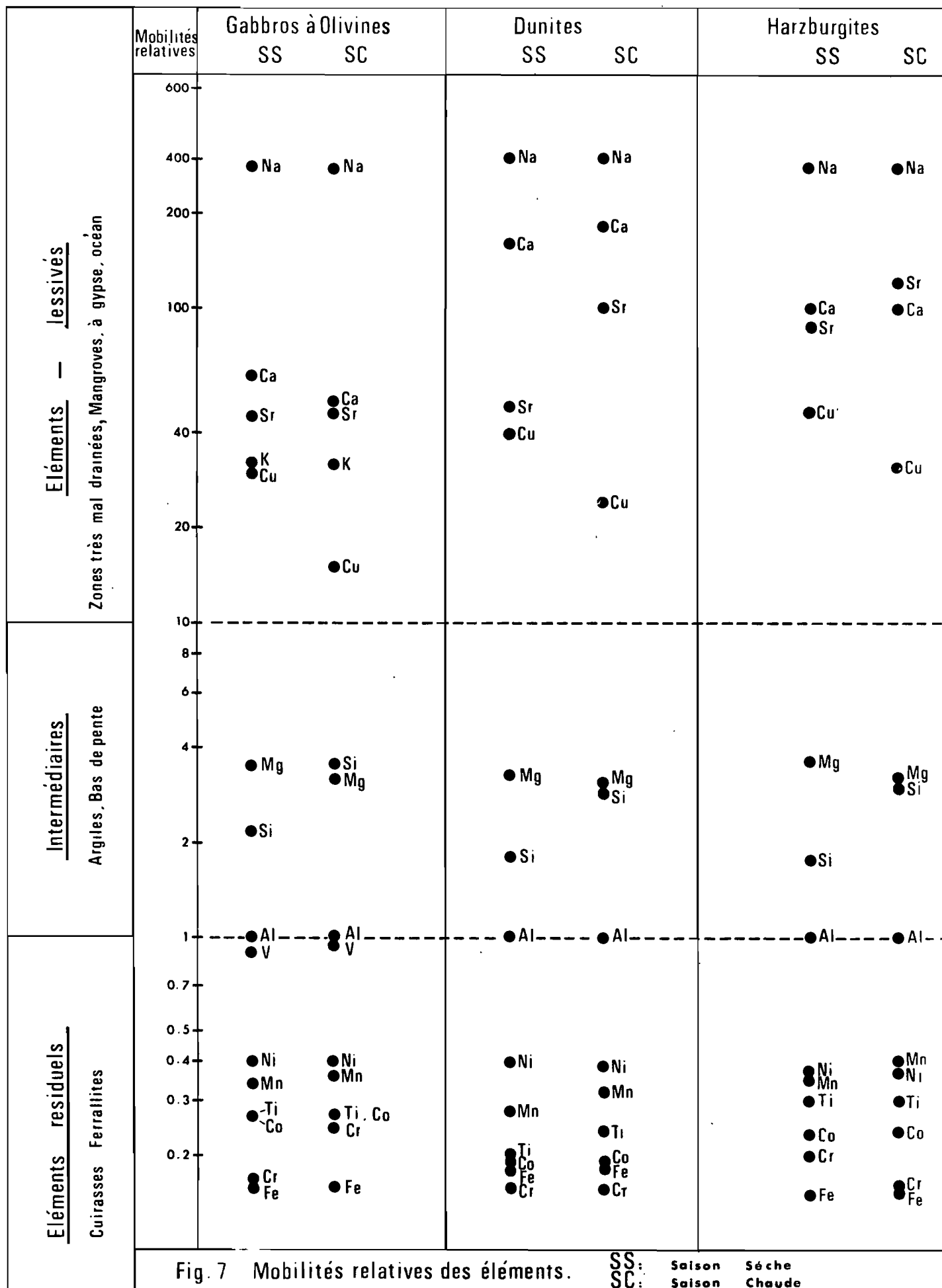


Fig. 7 Mobilités relatives des éléments.

3) Éléments résiduels.

La séquence, dans ce dernier groupe, est sensiblement différente de celle trouvée sur des roches acides ou moyennement basiques : c'est en particulier le cas de l'aluminium et du fer, dont le comportement est inversé. Les mobilités relatives se classent dans l'ordre suivant :



Dans le paysage, cette séquence se vérifie. (ROUTHIER - 1963, TRESCASES - 1969.) Les plus résiduels, fer et chrome, sont les constituants des cuirasses, même des plus anciennes. Cobalt et manganèse sont concentrés dans la partie moyenne des sols ferrallitiques des croupes sommitales. Le nickel, qui les suit partiellement (ANMOU-CHOKROUM, 1969), est plus mobile et se retrouve à la base des profils d'altération, et dans les zones de piedmont. L'aluminium enfin, est concentré dans les horizons ferrallitiques et les cuirasses, mais aussi dans les argiles des formations de piedmont.

Il apparaît ainsi une véritable chromatographie des ions dans le paysage (TARDY, 1969), les éléments qui s'étaient rassemblés dans les conditions de profondeur divergent selon les lois de la géochimie de la surface (MILLOT, 1964). Il semble cependant que cette répartition varie selon la roche mère, le comportement relatif d'un élément étant en partie fonction de sa teneur dans la roche (TARDY - 1966). La figure 8 synthétise cette chromatographie des éléments des péridotites de Nouvelle-Calédonie selon les topographies théoriques sur le versant Ouest (TRESCASES - 1969). La concordance avec l'échelle des mobilités relatives est très bonne.

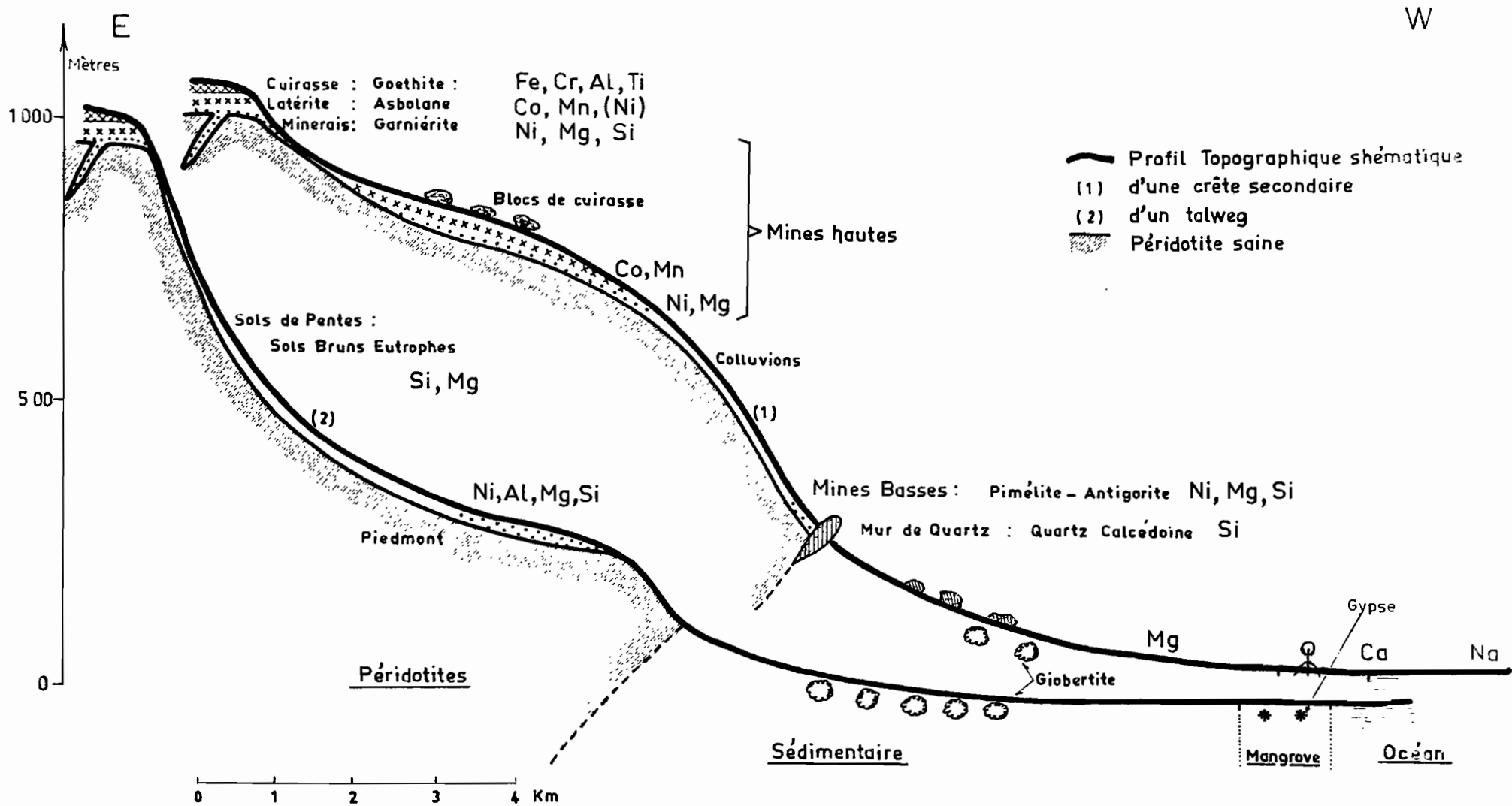


Fig.8 Evolution Géochimique de surface des Péridotites de Nouvelle-Caledonie

3 - SYNTHESE - CONSEQUENCES SUR LE TYPE D'ALTERATION.

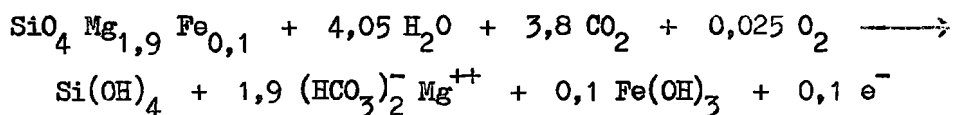
Les roches ultrabasiques sont constituées essentiellement de silice et de magnésie. Les minéraux de néogenèse des sols (phase résiduelle de l'altération, compte non tenu des produits peu altérés hérités), sont aussi formés du silicium et du magnésium non évacués. L'étude précise de la mobilité relative de ces deux éléments, en fonction des conditions climatiques, topographiques, et pétrographiques, fera apparaître les types d'altération induits par les diverses combinaisons de ces facteurs.

3-1-

Principe de calcul.

Le processus principal de l'altération est l'hydrolyse, suivie d'une dissolution et d'une oxydation. Pour l'olivine qui constitue 90 % des harzburgites et près de 100 % des dunites, on peut schématiser ainsi les réactions de l'altération :

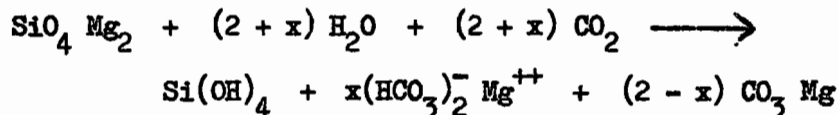
a) 1er cas : MgO et SiO₂ sont libérés et exportés avec des vitesses relatives identiques : $V_{SiO_2} = V_{MgO}$



SiO ₄ Mg _{1,9} Fe _{0,1}	olivine moyenne des péridotites de Nouvelle-Calédonie
Si(OH) ₄	soluble sous forme moléculaire
(HCO ₃) ₂ Mg	soluble sous forme ionique
Fe(OH) ₃	gel ferrique, reste sur place, et évolue plus tard en goethite.

$$SiO_2 / MgO_{eau} = SiO_2 / MgO_{roche} = 1 / 1,9 \text{ (rapport moléculaire)}$$

b) 2ème cas : $V_{SiO_2} > V'_{MgO}$: drainage fort -
 Le comportement du fer restant identique on ne considérera plus que SiO_2
 et MgO (cas d'une forstérite $SiO_4 Mg_2$) pour simplifier.



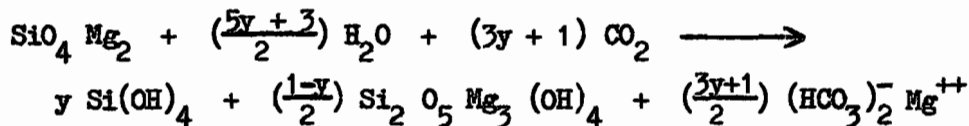
$$x < 2$$

$CO_3 Mg$ concrétions

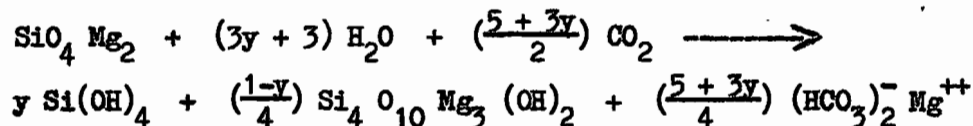
$$SiO_2 / MgO \text{ eau} = 1 / x > SiO_2 / MgO \text{ roche} = 1/2$$

c) 3ème cas : $V_{SiO_2} < V'_{MgO}$: drainage faible -
 Une partie seulement de la silice libérée par hydrolyse est en solution,
 l'autre reste insoluble à l'état de gel, et se recombine avec des ions magné-
 sium pour des néoformations argileuses :

serpentinisation :



ou stéatitisation



$$y < 1$$

$Si_2 O_5 Mg_3 (OH)_4$ serpentine (antigorite)

$Si_4 O_{10} Mg_3 (OH)_2$ talc

Dans les deux cas :

$$SiO_2 / MgO \text{ eau} < SiO_2 / MgO \text{ roche}$$

d) formule générale de l'altération des péridotites.

En considérant en première approximation que cette altération ne provoque la solubilisation que de silice et magnésie, on peut généraliser les formules précédentes pour toutes les péridotites et comparer les rapports SiO_2/MgO dans l'eau avec les produits résiduels de l'altération.

Un tel calcul a été exposé par PEDRO (1966 et 1968) pour les roches aluminosilicatées où l'aluminium, constituant essentiel des argiles de néoformation est sensiblement constant, (en l'absence de chéluviation), ce qui permet de n'utiliser que le rapport $\text{SiO}_2/\text{Bases}$. Pour les roches ultrabasiqes, le magnésium est à la fois le cation basique, exporté, et le constituant des argiles résiduelles. Par analogie avec les processus d'allitisation, monosiallitisaiton et bisiallitisaiton définis sur les roches acides et basiques, PEDRO et BITAR (1966) ont proposé les termes de ferruginisation, serpentinisation et stéatitisation, définissant qualitativement les phénomènes. On peut cependant calculer une formule globale en faisant intervenir un paramètre supplémentaire K que nous avons appelé rapport des vitesse de dissolution de MgO et SiO_2 :

Soit R le rapport moléculaire SiO_2/MgO dans la roche
L ce rapport dans l'eau

Pour une unité de masse de péridotite altérée, on a :

x molécules de silice dissoutes

y molécules de silice amorphe résiduelle ($y > 0$ dans le cas où

$V_{\text{SiO}_2} < V'_{\text{MgO}}$, vitesse relatives d'exportation)

et $\frac{1}{R} (x + y)$ molécules de MgO mises en solution (avant recombinaison d'une partie des ions Mg^{++} avec la silice résiduelle.)

La vitesse relative de dissolution du magnésium sera $V''_{\text{MgO}} = x + y$
et il vient :

$$K = \frac{V''_{\text{MgO}}}{V''_{\text{SiO}_2}} = \frac{x + y}{x} \quad (1)$$

La néoformation d'argiles magnésiennes à partir des molécules de silice résiduelle utilise :

$$\frac{3y}{2} \text{ MgO pour la serpentinitisation}$$

et $\frac{3y}{4} \text{ MgO pour la stéatitisation}$

ce qui donne:

$$L \text{ serpentinitisation} = \frac{x}{1/R (x + y) - \frac{3}{2} y}$$

$$L \text{ stéatitisation} = \frac{x}{1/R (x + y) - \frac{3}{4} y}$$

soit en utilisant la relation (1)

$$L \text{ serpentinitisation} = \frac{2R}{K (2 - 3R) + 3R} \quad (2)$$

$$L \text{ stéatitisation} = \frac{4R}{K (4 - 3R) + 3R} \quad (3)$$

Ces relations ayant un sens pour $K > 1$, c'est-à-dire $V''_{\text{MgO}} > V''_{\text{SiO}_2}$

Dans le cas contraire ($V''_{\text{MgO}} \leq V''_{\text{SiO}_2}$), toute la silice libérée est dissoute, il n'y a pas possibilité de néoformations argileuses :

La figure 9 synthétise ces résultats en exprimant les variations du rapport L, mesuré dans l'eau, en fonction du paramètre K, qui est caractéristique des conditions morphologiques et climatiques du milieu, et du paramètre R, défini par la nature de la roche mère. (On a choisi $R = 0,55$, cas des dunites, pour le graphique; les variations de R se traduisent par une simple translation des courbes, parallèlement à l'axe des ordonnées).

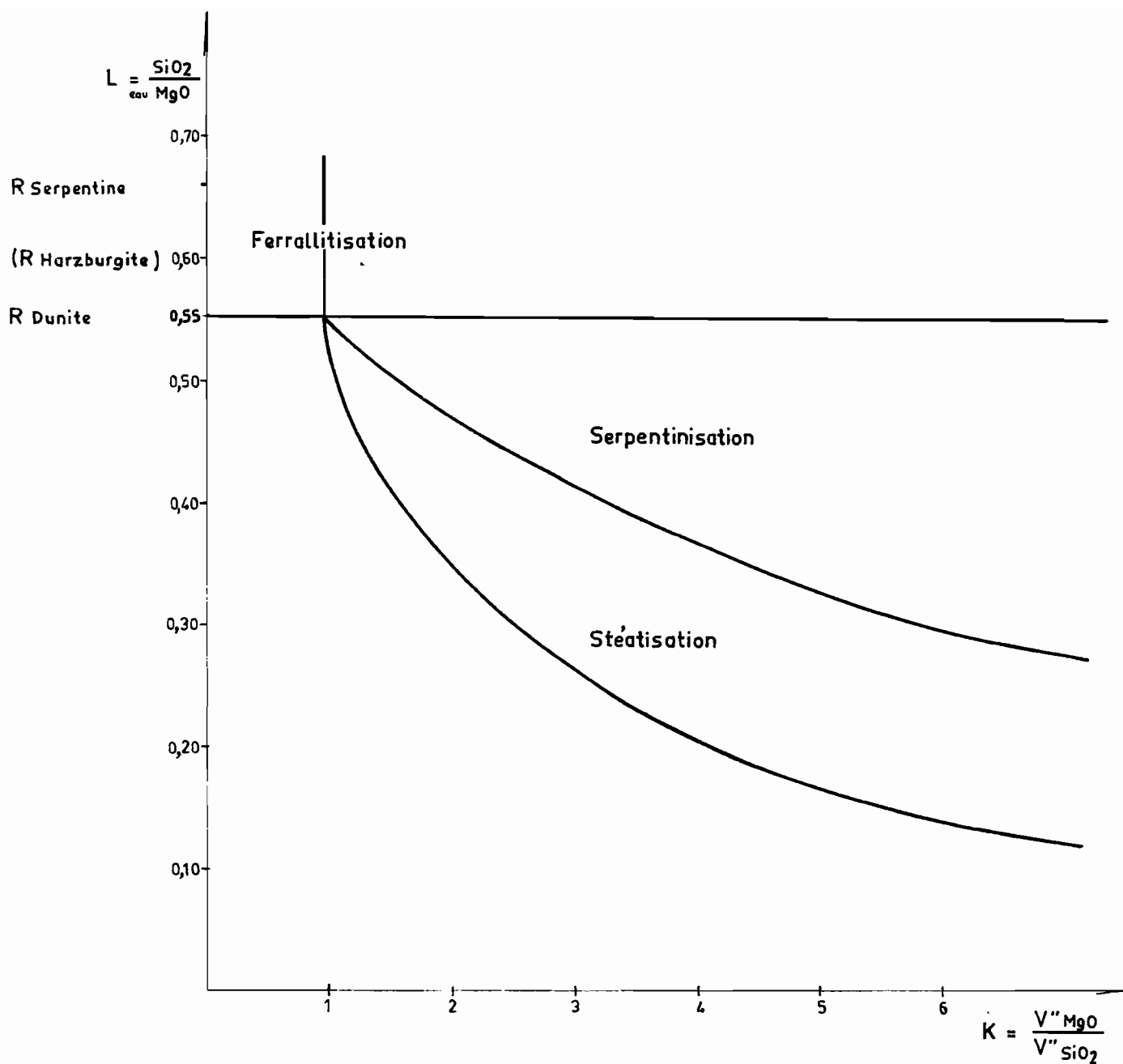


Fig. 9. Type d'altération d'une dunite ($R=0,55$) selon les paramètres $L = \text{SiO}_2/\text{MgO}$ dans l'eau et K rapport des vitesses relatives de dissolution de SiO_2 et MgO

- $L \geq R$: K est alors obligatoirement ≤ 1 .

L'exportation de silice est prépondérante, le drainage est fort : l'altération laisse un résidu de gel ferrique insoluble, et, éventuellement, des carbonates de magnésium. (Des concrétions de carbonates de magnésium ont effectivement été observées en plusieurs sources).

Le gel ferrique évolue ensuite en goethite ; c'est le domaine de la ferrallitisation, puisque les petites quantités d'aluminium présentes dans la roche, ont le même comportement global que le fer.

- $L < R$: $K > 1$, le magnésium est plus vite dissous et exporté. Selon les conditions de drainage, le gel de silice résiduel absorbera des ions magnésium en plus ou moins grande quantité, et les phyllites néoformées seront de type 1/1 (antigorite) ou 2/1 (talc). Lorsque le drainage est mauvais, la silice amorphe peut aussi se combiner avec le gel ferrique pour former des minéraux argileux ferrifères de type 2/1, de la série beidellite-nontronite. L'argile ferrifère 1/1 n'existant pas, on ne peut pas calculer le rapport SiO_2 /bases limite pour la néoformation de nontronite. Toutefois, par analogie avec les roches basiques voisines, les gabbros à olivine, où les rapports limites de ferrallitisation et kaolinisation sont respectivement 0,65 et 0,40 , la limite supérieure de néogenèse de nontronite a été estimée à 0,35 , pour les roches ultrabasiques.

3-2-

Types d'altération des roches du massif du Sud de la Nouvelle-Calédonie.

On a reporté sur la figure 10 les variations du rapport moléculaire SiO_2 /bases (SiO_2 /MgO pour les roches ultrabasiques), calculé d'après les valeurs moyennes données dans le tableau III, aux différentes saisons, pour les prélèvements effectués sur le bassin versant de la Dumbéa Est (tableau V). La géomorphologie a été mise en évidence par le tracé schématique du profil topographique. Les valeurs en 1, 2, et 3, qui sont des prélèvements d'eaux de sources, (figure 2) ainsi que celles du point 4, représentatif de toute la fraction de bassin situé à l'amont, ont été utilisées directement.

TABLEAU V

Rapport moléculaire SiO₂/Bases dans les eaux de la DUMBEA - (Valeurs moyennes).

Prélèvements	1	2	3	4	5 *	6	10
Décembre à Mars	0,483	0,666	0,556	0,474	0,653	0,516	0,531
Avril à Juin	0,375	0,552	0,527	0,432	0,495	0,393	0,340
Juin à Septembre	0,400	0,593	0,559	0,519	0,439	0,462	0,449
Septembre à Novembre	0,314	0,380	0,364	0,288	0,308	0,320	0,281

* Les valeurs du prélèvement n° 5 ont été corrigées de façon à ne tenir compte que de la portion de bassin versant comprise entre les points 4 et 5. (cf. figure 2)

Par contre, les valeurs en DUM 5 ont été corrigées de manière à ne tenir compte que de l'influence de la fraction de bassin située à l'aval de 4 et à l'amont de 5 (approximativement la zone de harzburgite). Le principe de calcul utilisé a été le suivant :

Pendant un intervalle de temps ΔT , la teneur en un point A s'exprime par la relation :

$$t_A = \frac{\text{Quantité de l'élément (QA)}}{\text{Quantité d'eau (HA)}}$$

HA quantité d'eau ruisselée en ΔT sur le bassin dont A est l'exutoire.

La teneur au point 5 s'exprime de la même manière en fonction des quantités, d'éléments et d'eau, spécifiques de chaque fraction de bassins en amont de 4 (A) et entre 4 et 5 (B) :

$$t_{A+B} = \frac{QA + QB}{HA + HB} = \frac{t_A \cdot HA + t_B \cdot HB}{HA + HB}$$

ce qui donne :

$$t_B = t_{A+B} \left(1 + \frac{HA}{HB}\right) - t_A \frac{HA}{HB}$$

t_B est la teneur que l'on mesurerait en 5 en ne tenant compte que de la fraction B du bassin

t_A et t_{A+B} les teneurs effectivement mesurées en 4 et 5.

$\frac{HA}{HB}$ représente le rapport du débit en A (4) au débit qui existerait en B (5) si l'on ne tenait pas compte de l'apport du bassin A. HB n'étant pas mesurable, on a considéré qu'en première approximation

$$\frac{HA}{HB} = \frac{PA}{PB}$$

PA et PB étant les quantités d'eau de pluie, totalisées sur les sous-bassins A et B.

$$PA = h_A \times SA$$

h_A pluviométrie moyenne sur A

SA surface du bassin considéré.

Les pluviométries moyennes saisonnières ont été calculées aux périodes des prélèvements.

$\frac{SiO_2}{Bases}$

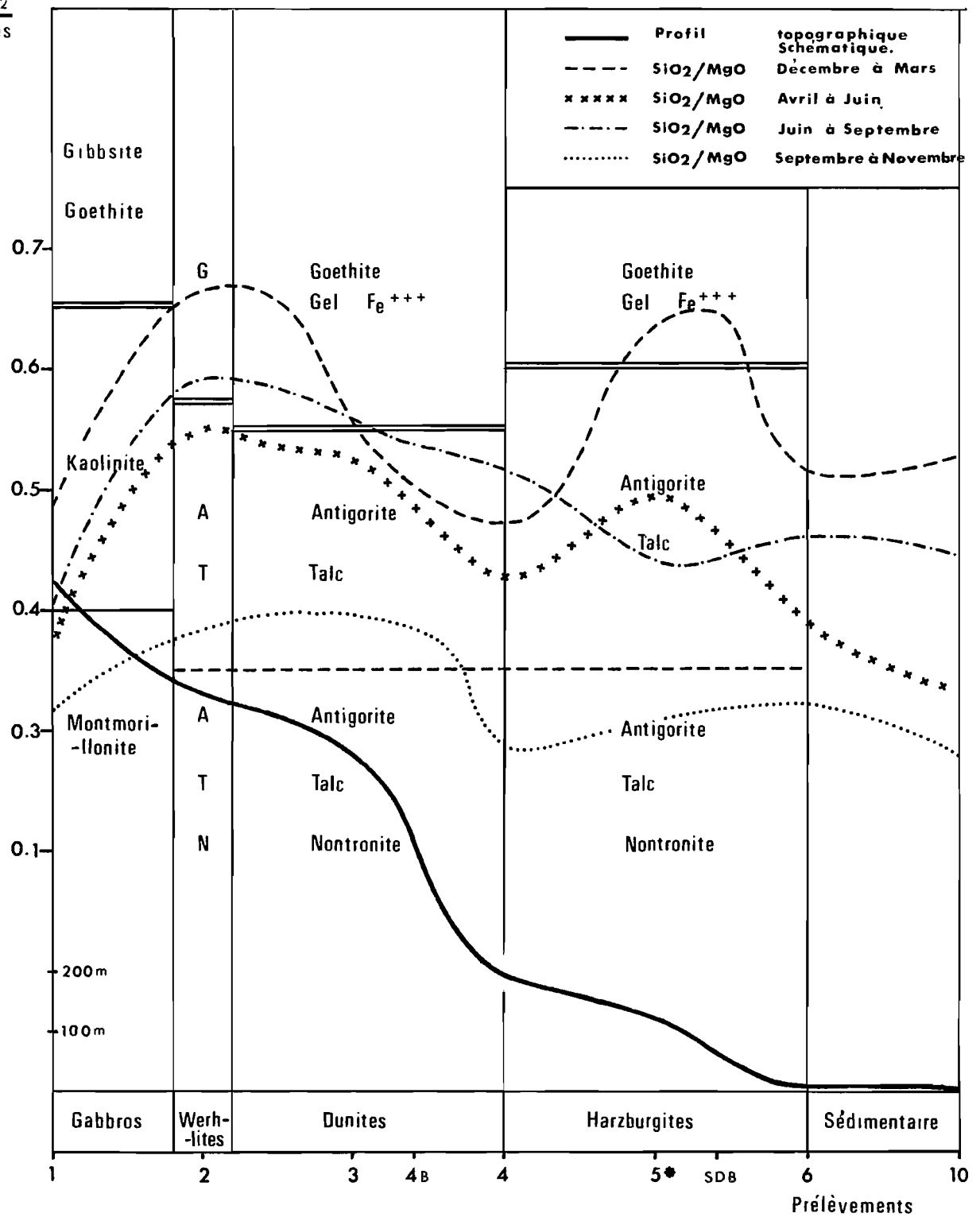
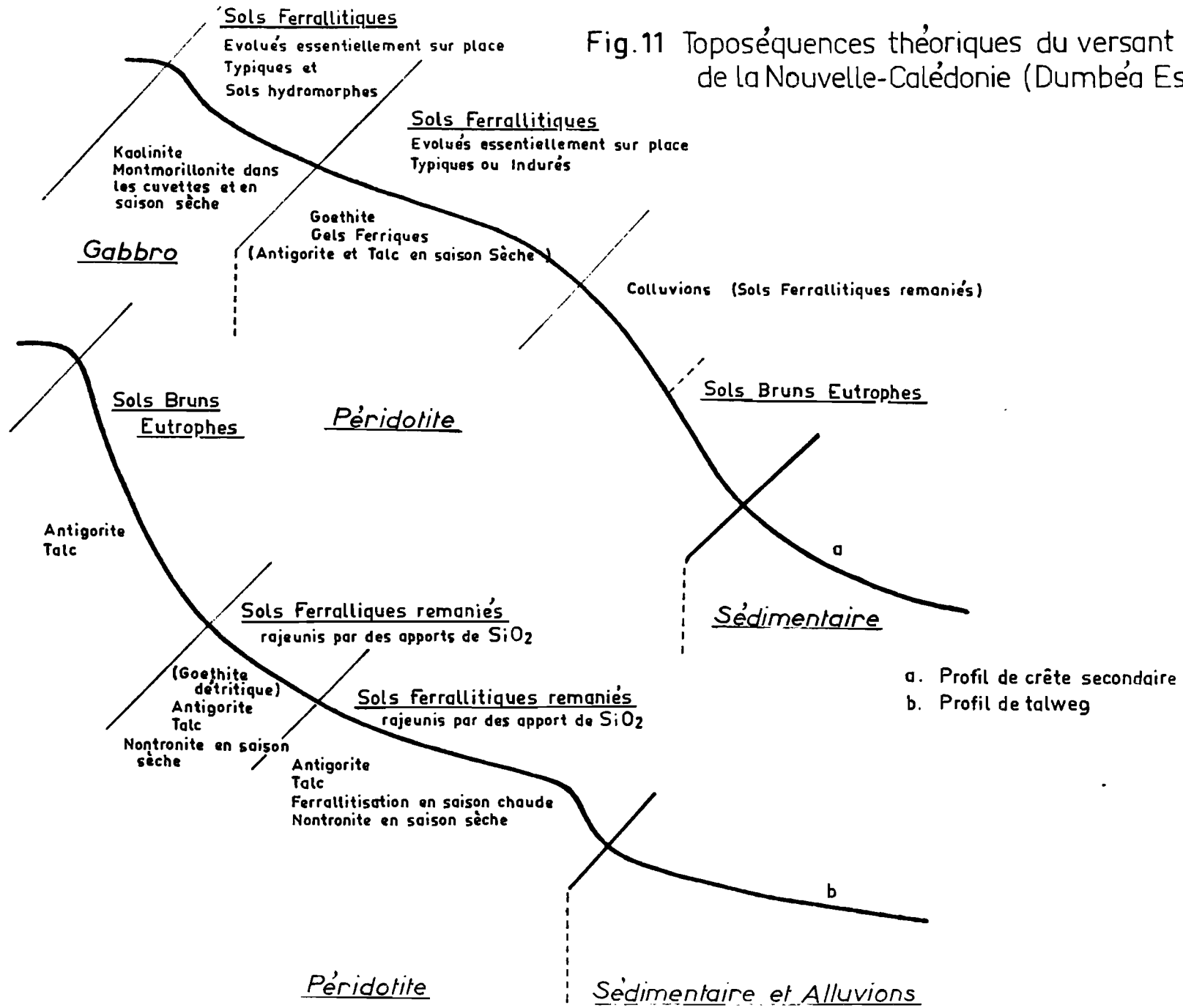


Fig. 10. Evolution du paramètre géochimique Silice/Bases dans les eaux et conséquences sur le type d'Altération.

Fig.11 Toposéquences théoriques du versant Ouest de la Nouvelle-Calédonie (Dumbéa Est)



Pour les points 6 et 10 qui dépassent le cadre de la Dumbéa Est, ce calcul n'a pas été fait. Les valeurs correspondantes ne figurent qu'à titre indicatif.

On a porté en outre sur le graphique les valeurs du rapport $\text{SiO}_2/\text{Bases}$ en deux points supplémentaires du bassin, où des prélèvements moins systématiques ont été effectués, DUM 4B, et SDB.

La figure 10 met parfaitement en évidence les rôles des facteurs morphologiques et climatologiques sur l'altération d'un type de roche donné :

a) Les gabbros, qui induisent une morphologie de plateau, donc à drainage moyen, avec des zones à mauvais drainage, s'altèrent le plus souvent en kaolinite, mais, du moins à l'heure actuelle, le lessivage de la silice n'est pas assez intense pour que la gibbsite apparaisse. ($\text{SiO}_2/\text{Bases}$ dans l'eau reste inférieur à 0,65). En saison sèche, il n'y a plus monosiallisation, mais bisiallisation, avec synthèse de montmorillonite. ($\text{SiO}_2/\text{Bases}$ dans l'eau $< 0,40$). La figure 11 synthétise les observations pédologiques et minéralogiques effectuées par ailleurs sur cette même toposéquence théorique du versant ouest de la Nouvelle-Calédonie (TRESCASES, 1969) : les zones de départ sur gabbro sont effectivement kaoliniques, et on trouve de la montmorillonite dans les cuvettes.

Notons que la gibbsite que l'on rencontre dans les horizons supérieurs des sols sur gabbro, en particulier dans la cuirasse ne semble pas actuelle, et correspondrait à un paléoclimat allitissant.

b) Les roches ultrabasiques.

On rencontre essentiellement trois types de morphologie : plateau, versant en pente forte, piedmont (légèrement perché).

- Plateau : (prélèvements DUM 2 et 3). Le paramètre L des eaux montre que l'altération est ferrallitique, et conduit à l'individualisation de goéthite

et de gel ferrique, sauf en saison sèche (septembre à novembre) où du talc et de l'antigorite apparaissent dans les zones de départ.

Les sols de cette zone (figure 11) sont ferrallitiques évolués essentiellement sur place, typiques ou indurés (partiellement). L'horizon C de roche altérée à structure conservée est très profond (parfois plus de 20 m : c'est la "latérite jaune" des mineurs), et constitué de goethite et de gel ferrique. Mais à sa base, on trouve un horizon à texture plus grossière, renfermant des minéraux de type antigorite et parfois talc ("minerais terreux"). C'est dans ces minéraux que se rencontrent les plus fortes concentrations de nickel, dénommées communément garniérites. (CAILLERE - 1965).

- Versant : (prélèvements DUM 4B et 4). L'altération n'est jamais ferrallitique dans cette zone, le rapport, $SiO_2/Bases$, de l'eau restant toujours inférieur au rapport R de la roche (ici la dunite). En 4, c'est-à-dire en bas de pente, on note la possibilité de formation de nontronite, durant la saison sèche.

L'étude pédologique confirme ces prévisions : les versants en pentes fortes évoluent en sols bruns eutrophes, géochimiquement et minéralogiquement proches des zones de départ des profils latéritiques, et constitués de talc et d'antigorite. Les versants convexes, toutefois, correspondant à certains interfluves (crêtes secondaires du bassin) sont le siège d'un intense colluvionnement, alimenté par l'érosion des niveaux supérieurs des profils latéritiques, topographiquement dominants. Ce processus, purement mécanique, ne peut donc être mis en évidence par l'étude des eaux.

- Piedmont : (prélèvements DUM 5* et SDB). L'amplitude des variations du paramètre géochimique Silice/Bases dans les eaux de drainage est ici maximum :

- . En saison chaude et humide, l'altération est ferrallitique.
- . D'avril à septembre, c'est-à-dire pendant la petite saison sèche précédent l'hiver austral, et pendant ce dernier, des phyllites magnésiennes se forment, talc et antigorite.
- . Pendant la véritable saison sèche, les mêmes minéraux silico-magnésiens peuvent apparaître, mais accompagnés de nontronite.

Les observations pédologiques sont encore une fois en concordance rigoureuse avec ces déductions, les sols de piedmont, évolués avec prédominance des phénomènes de remaniements colluviaux et alluviaux de matériaux ferrugineux, se trouvant rajeunis par des apports (lessivage oblique) de silice dissoute. C'est le piégeage de silice dans les phyllites magnésiennes et ferrifères qui est décelé par la géochimie des eaux.

Remarque :

La figure 10 fait aussi apparaître le rôle du troisième facteur de l'altération : la nature de la roche-mère. L'altération ferrallitique d'une roche ultrabasique est atteinte dans des conditions climatiques et morphologiques qui permettent seulement la monosiallisation des roches basiques ou acides . C'est dans ce sens qu'on peut parler d'une plus grande facilité de la ferrallitisation des roches lorsqu'elles sont plus basiques.

Une nuance dans l'altérabilité peut encore se déceler à l'intérieur même du groupe ultra-basique : les valeurs du rapport R précise la séquence d'altération :

Dunite > Harzburgite > Serpentinite > Pyroxénite

ce qui découle de la séquence minéralogique d'altération :

Péridot > Serpentine > Pyroxène

CONCLUSIONS.

L'étude géochimique des eaux drainant les péridotites de Nouvelle Calédonie nous a donc permis d'approcher le problème de la dynamique actuelle de l'altération.

L'échelle des mobilités relatives des éléments dans les conditions de surface a pu ainsi être établie. Cette échelle s'est révélée en excellente concordance avec la disposition relative, dans le paysage, des différentes concentrations supergènes des éléments constitutifs des péridotites. Cette partition géochimique, qui constitue une chromatographie, en phase liquide, à travers les toposéquences de sols et de sédiments, et qui est la manifestation la plus éclatante du processus d'altération, est donc actuelle, et correspond aux conditions climatologiques et morphologiques présentes. Deux petits écarts ont toutefois été décelés entre l'échelle calculée d'après les lessivats, et la répartition observée des reliquats : l'aluminium et le nickel. L'aluminium accompagne le fer et le chrome dans les cuirasses, alors que sa mobilité semble un peu plus grande, dans les conditions actuelles ; la concentration d'hydroxyde d'aluminium, sous forme de gibbsite, serait peut-être imputable à un paléoclimat plus allitissant. Le nickel, d'après le calcul, est plus mobile que le manganèse et le cobalt ; or les niveaux de roche altérée à structure conservée présentent des concrétions d'asbolane, où le nickel est associé à ces derniers éléments, sous forme oxydée. Cette association se déstabilise toutefois, et les cortex des granules d'asbolane montrent un départ du nickel (AMMOU-CHOKROUM, 1969) : si le nickel a eu, sous un climat différent un comportement voisin de celui du manganèse et du cobalt, il est maintenant légèrement lessivé vers le bas des profils d'altération, où l'on rencontre les plus fortes concentrations de cet élément.

La position des sols ferrallitiques, sur les lambeaux perchés de diverses surfaces d'érosion aujourd'hui en cours de démantèlement, pouvait faire penser à une altération ferrallitique fossile : les sols de pente renferment des phyllites 2/1, et le climat actuel n'est pas franchement tropical, surtout en altitude, où la température moyenne annuelle ne doit pas

dépasser 15 ou 16° C. L'étude du paramètre silice/bases dans les eaux a apporté une réponse, d'ailleurs nuancée :

- sur les versants en pentes fortes, l'altération n'est jamais ferrallitique, et conduit à la synthèse de phyllites magnésiennes 1/1 et 2/1.
- sur les zones à topographie sub-horizontale ou de pentes faibles, l'altération actuelle est ferrallitique, mais seulement en saisons humides : de décembre à mars en général ; sur les plateaux, en altitude, l'altération ferrallitique intervient aussi en saison fraîche, de juin-juillet à août. Cette saison étant plus nettement marquée en montagne du point de vue température, mais également beaucoup plus humide qu'en plaine, il apparaît donc que le paramètre pluviométrie est prépondérant pour le type d'altération, la température moyenne du lieu n'étant qu'accessoire (la température moyenne du mois d'août vers 1 000 mètres d'altitude est estimée aux environs de 13° C). En saison sèche et sur roches basiques, le processus d'altération est celui de la bisiallittisation.

Le rôle des facteurs climatiques, morphologiques et pétrographiques est ainsi mis en évidence : la ferrallittisation intervient d'autant plus aisément que la roche est plus basique, que la pente est plus faible, que la pluviométrie est importante. Dans un contexte géomorphologique favorable, on observe une périodicité des phases d'altération : ferrallitique en saison humide, elle conduit à la synthèse de phyllites 1/1 et 2/1 en saison sèche. La périodicité des phénomènes avait été signalée par BERTHOIS (1964) qui compare les eaux de Guyane et de Guinée à celles de la Loire, et par TARDY et MILLOT (1966), qui notent en Côte d'Ivoire, l'alternance monosiallittisation en saison humide, bisiallittisation en saison sèche.

En Nouvelle-Calédonie, un paléoclimat franchement tropical et allittisant est responsable des cuirasses gibbsitiques, sur roches basiques, et des concentrations relatives d'hydroxydes de nickel, cobalt et manganèse, dans les niveaux latéritiques. Le climat subtropical actuel, plus nuancé, continue l'altération ferrallitique, par conséquent la libération d'importantes quantités de nickel ; mais il provoque aussi la synthèse de phyllites magnésiennes dans les zones de départ, ainsi que la déstabilisation des

concrétions de nickel oxydé ; le nickel préconcentré est alors lessivé et piégé dans les minéraux silicatés (talc et antigorite essentiellement) de la base du profil d'altération, pour former la garniérite.

L'altération des roches ultrabasiqnes en climat tropical ou équatorial provoque partout la formation de puissantes couches latéritiques souvent décrites : à Cuba (DE VLEETTER, 1955), au Venezuela (JURKOVIC, 1963), en Guinée (BONIFAS, 1959), aux Philippines (SANTOS YNIGO et ESGUERRA, 1961) par exemple. Le nickel est concentré dans ces latérites, mais surtout à l'état oxydé, la garniérite restant une curiosité sous ces climats, et les gisements restent à faible teneur (1 à 1,5 % Ni). En Nouvelle-Calédonie par contre, et aussi en Californie et dans le Sud de l'Orégon (HOTZ, 1964 ; CHACE et col. 1969), les gisements sont plus riches, une partie du nickel étant concentrée en valeur absolue dans les silicates secondaires. C'est donc aux particularités de son climat subtropical que la Nouvelle-Calédonie doit son exceptionnelle richesse minière.

BIBLIOGRAPHIE

AMMOU-CHOKROUM, M. 1969

Contribution à l'étude de la distribution du nickel dans les ferrallites de Nouvelle-Calédonie.

C.R. Ac. Sci. Paris. 268 - pp. 1563-1566

BERTHOIS, L. 1964

Etude comparative du lessivage des cations dans les zones tropicales et tempérées.

Rev. Gen. Sci. Pures appl. 71 - n° 5-6 - pp. 143-9

BERTHOIS, L. 1964

Etude comparative du lessivage des sols dans les zones tropicales et tempérées.

Norois - 44 - pp. 439-444

BITTAR, K. 1966

Etude expérimentale de l'altération chimique des roches magnésiennes (serpentinites).

Thèse 3ème cycle. Fac. Sci. Paris.

Géodynamique externe. multigraph.

BONIFAS, M. 1959

Contribution à l'étude géochimique de l'altération latéritique (thèse).

Mem. Carte géologique d'Alsace - Lorraine n° 17.

BUGEL'SKIJ, J.J. 1965

Formation de la composition chimique des eaux naturelles dans les limites des massifs serpentiniques.

Kora Vyvetriv SSSR - 9 pp. 37-41

BUGEL'SKIJ, J.J. 1965

Sur la composition chimique des solutions remplissant les pores des produits d'altération des roches ultrabasiques.

Kora Vyvetriv SSSR - 9 - pp. 42-47

CAILLERE, S. 1965

Composition minéralogique des différents types de minerais de nickel de la Nouvelle-Calédonie.

Mem. Mus. Nat. d'Hist. Nat. - C - XII - f 3 - pp. 105-124

- CHACE, F.M. - CUMBERLIDGE, J.T. - CAMERON, W.L. - VAN NORT, S.D. 1969
Applied geology at the Nickel Mountain mine, Riddle, Oregon .
Economic Geology - Vol 64 - n° 1 - pp. 1-16
- CHATONIER, D. 1957
Contribution à l'étude de la minéralisation des eaux en rapport
avec la composition chimique du sous-sol.
Thèse Fac. Pharmacie et Médecine - de Bussac ed. Clermont-Ferrand
- CORBEL, J. 1957
L'érosion chimique des granites et silicates sous climats chauds.
Rev. Géomorph. Dynam. VIII - n° 1-2 - pp. 4-8
- DEFOSSEZ, M. - MANGIN, J.P. - PINTA, M. - VAN DEN DRIESSCHE, R. 1967
Répartition de quelques éléments traces dans les eaux de surface
en zone intertropicale - (Côte d'Ivoire)
Bull. Serv. Carte Géol. Als. Lorr. - 20 - f 4 - pp. 257-276
- DE VLETER, D.R. - 1955
How Cuban nickel ore was formed ; a lesson in laterite genesis.
Eng. and Min. Journ. New-York.
Vol 156 - n° 10 - pp. 84-87.
- FRECAUT, R. et STRAUSS, R. 1968
Composition chimique des eaux continentales et nature litholo-
gique des bassins (Moselle Supérieure et Moyenne).
Revue de géogr. phys. et géol. dyn. (2) X. f 3 - pp. 247 - 254
- GAC, J.Y. 1968
Les altérations de quelques roches cristallines des Vosges -
Etude minéralogique et géochimique.
Thèse 3ème cycle. Strasbourg. Multigraph.
- GUILLOU, J.H. 1969 (a)
Données nouvelles sur la composition et la structure du grand
massif péridotitique du sud de la Nouvelle Calédonie.
Cahiers ORSTOM - ser. géologie - Vol I n° 1
- GUILLOU, J.H. 1969 (b)
Sur la présence des sulfures métalliques dans les massifs
péridotitiques de la Nouvelle-Calédonie.
C.R. Ac. Sc. - t 268 - ser. D - pp. 3013-3014.

HERVIEU, J. 1968

Contribution à l'étude de l'alluvionnement en milieu tropical
(thèse).

Mémoire ORSTOM. n° 24.

HOTZ, P.E. 1964

Nickeliferous laterites in south western Oregon and north western
California.

Econ. Geology - Vol 59 n° 3 - pp. 355-396

JURKOVIC, I. 1963

Some geochemical aspects about the genesis of the nickel deposit
Loma de Hierro (Venezuela)

Geoloski vjesnik 17 - pp. 103-112.

LAMOUREUX, M. - THIEBAUD, M. - SAHYOUNI, M. 1968

Roches carbonatées et eaux du Liban.

MAGON. Inst. Rech. Agron. Liban . Publ. n° 22.

MANGIN, J.P. - LECOLLE, J. - MATHIEU, P. - MONNET, C. - PINTA, M.-SIRCOULON, J.
1966

Géochimie des eaux naturelles ; le transport en solution par un
fleuve de Côte d'Ivoire.

C.R. Ac. Sc. 262 D - pp. 2204-2206.

MILLOT, G. 1964

Géologie des argiles. Altérations. Sédimentologie. Géochimie.

Masson. Paris.

PEDRO, G. 1966

Essai sur la caractérisation géochimique des différents pro-
cessus zonaux résultant de l'altération des roches superficielles
(cycle aluminosilicique).

C.R. Ac. Sc. 262 - D - pp. 1828-1831.

PEDRO, G. 1968

Distribution des principaux types d'altération chimique à la
surface du globe. Présentation d'une esquisse géographique.

Revue de Géogr. phys. et géol. dyn. (2). X. f 5 - pp.457-470.

PEDRO, G. - BITTAR, K.E. 1966

Contribution à l'étude de la genèse des sols hypermagnésiens :
recherches expérimentales sur l'altération chimique des roches
ultrabasiques (serpentinites).

Ann. Agron. - 17 - n° 6 - pp. 611-657.

- PEDRO, G. - BITTAR, K.E. 1966
Sur l'influence du type chimique de la roche-mère dans le développement des phénomènes d'altération superficielle : recherches expérimentales sur l'évolution des roches ultrabasiques (serpentes).
C.R. Ac. Sc. 263. D. pp. 313-316.
- RODIER, J. 1960
L'analyse chimique et physico-chimique de l'eau.
Dunod - Paris.
- ROUGERIE, G. 1958
Acidité des eaux en milieu tropical.
C.R. Ac. Sc. 248 - D - pp. 447-449
- ROUGERIE, G. 1965
Mobilisation des débris et pertes de substance dans la région du Ballon d'Alsace.
Rev. géogr. de l'Est n° 4 - pp. 483-497
- ROUTHIER, P. 1963
Les gisements métallifères.
Masson - Paris.
- SANTOS YNIGO, L. et ESGUERRA, F.B. 1961
Geology and geochemistry of the nickeliferous laterites of Nono and adjacent islands. Surigao Province Philippines.
Manila 1961 - Philippines Dept. of Agriculture and natural resources.
Bureau of mines. Special project ser. Publ. 18. Iron. nickel.
- SCHOELLER, M. 1963
Recherches sur l'acquisition de la composition chimique des eaux souterraines. (thèse)
Drouillard. Bordeaux.
- SIFFERT, B. 1962
Quelques réactions de la silice en solution : la formation des argiles.
Mem. serv. carte géol. Als. Lorr. n° 21.
- "
STARMUHLNER, F. 1968
Etudes hydrobiologiques en Nouvelle-Calédonie (Mission 1965 du Premier Institut de Zoologie de l'Université de Vienne).
I. généralités et descriptions des stations.
Cah. ORSTOM - ser. Hydrobiol. Vol II - n° 1 - pp. 3-34.
- TAILLOTE, A. 1884
Etude des eaux thermales de la baie de Prony (Nlle Calédonie)
Archives de médecine navale - T. 46.

TARDY, Y. - MILLOT, G. 1966

Premiers résultats de l'étude chimique de la nappe du bassin versant de Korhogo (Côte d'Ivoire).

C.R. Ac. Sc. 263 - D - pp. 753-755.

TARDY, Y. 1966

Mobilité relative des éléments au cours des phénomènes d'altération de quelques roches cristallines.

Bull. serv. carte géol. Als. Lorr. 19. f 3-4 pp. 255-270.

TARDY, Y. 1967

Etude géochimique des eaux d'une nappe d'arène en pays cristallin (Korhogo, Côte d'Ivoire).

Bull. serv. carte géol. Als. Lorr. 20. f 4. pp. 235-256.

TARDY, Y. 1969

Géochimie des altérations. Etude des arènes et des eaux de quelques massifs cristallins d'Europe et d'Afrique. (thèse).

Fac. Sciences Strasbourg. Multigraph.

TRESCASES, J.J. 1965

Méthodes d'analyse des eaux drainant les massifs de péridotites en Nlle Calédonie.

ORSTOM - Centre de Nouméa. Multigraph.

TRESCASES, J.J. 1969

Premières observations sur l'altération des péridotites de Nouvelle-Calédonie. Pédologie. Géochimie. Géomorphologie.

Cah. ORSTOM. Ser. Géologie. Vol I . N° 1

WENINGER, G.

Etudes hydrobiologiques en Nouvelle-Calédonie (Mission 1965 du Premier Institut de Zoologie de l'Université de Vienne).

II. Beiträge zum Chemismus der Gewässer von Neukaledonien (S.W. Pazifik).

Cah. ORSTOM. ser. Hydrobiol. Vol II. n° 1. pp. 35-55.

WHITE, D.E.- HEM, J.D. - WARING, G.A. 1963

Chemical composition of subsurface waters.

Data of Geochemistry - chap. F.

6 ed. U.S. Geol. Surv. Prof. Paper.