

RÉPARTITION DE LA
THERMOLUMINESCENCE ARTIFICIELLE (TLA)
AU SEIN D'UN MÊME GRAIN DE QUARTZ
DANS QUELQUES SÉDIMENTS MEUBLES RÉCENT OU ANCIEN (*)

par J. M. CHARLET (**)

(5 figures dans le texte)

RÉSUMÉ

L'attaque à l'HF a été utilisée en vue d'étudier l'évolution de la thermoluminescence artificielle (TLA) au sein des quartz détritiques. Les expériences réalisées montrent que la courbe de TL peut varier dans un même grain de sable; l'émission TL en surface étant différente de l'émission TL à l'intérieur du grain.

On discute ensuite des mécanismes responsables du changement de TL. Deux hypothèses peuvent être avancées : évolution du grain en milieu sédimentaire ou propriétés de TL variables au sein d'un même quartz au moment de la cristallisation.

ABSTRACT

HF etching has been used to study the evolution of artificial thermoluminescence (TLA) of detrital quartz grains. Experiments show that the TL glow curve may vary within a given grain of sand, the TL emission of the surface being different from that of the interior of the grain.

The mechanisms responsible for TL changes are discussed. Two hypotheses are advanced : evolution of the grain in the sedimentary environment, or variation of the TL properties in the grain at the time of crystallisation.

Dès 1965-1966, nous proposons d'utiliser la courbe de thermoluminescence du quartz dans l'élaboration des reconstitutions paléogéographiques (3). La méthode, basée sur le fait que la courbe TL du quartz est extrêmement variable avec la nature du continent nourricier, fut testée en utilisant quelques domaines relativement bien connus sur le plan géologique (3). Elle fut ensuite appliquée avec succès à l'étude des séries détritiques des Pyrénées Centrales (5), du Pays Basque (7) ou des Alpes Méridionales (8).

Jusqu'à présent nous ne nous étions cependant intéressés qu'à des sédiments anciens consolidés. Pour de tels sédiments, l'essai de thermoluminescence est nécessairement précédé du broyage ou du sciage de l'échantillon si bien que l'étude du grain avec sa forme propre est pratiquement impossible. Au cours de ces dernières années, nous avons abordé le domaine des sédiments récents en vue d'étendre notre

(*) Communication présentée et manuscrit déposé le 5 février 1974.

(**) Laboratoire de Minéralogie, Faculté polytechnique de Mons, 9, rue de Houdain, 7000 — Mons (Belgique).

méthode aux sciences océanographiques; une telle extension étant rendue possible par la mise au point de la micro TL [4] technique permettant de travailler sur un grain isolé au binoculaire. Dans cette optique, les propriétés TL d'un grain non broyé se devaient d'être examinées à la lumière des travaux récents sur l'état de surface des quartz détritiques. Tel est le but de cette note.

INTRODUCTION

L'évolution des quartz en milieu sédimentaire fut longtemps attribuée aux actions mécaniques à la surface des grains.

Avec l'avènement du microscope électronique à balayage et grâce notamment aux études de L. Le Ribault (1971, 1972) une distinction plus fine parmi les divers milieux évolutifs des grains de quartz put être effectuée. Au cours de ses travaux, L. Le Ribault montra l'importance prise par les actions chimiques sur l'aspect des quartz en milieu sédimentaire; l'apparition d'une pellicule de silice amorphe au cours du processus d'altération de la roche mère et son évolution en fonction des milieux considérés apportant des informations nouvelles au sédimentologiste [11].

L'évolution des quartz détritiques étant envisagée sous l'angle des réactions chimiques nous avons pensé que la mise en œuvre de techniques expérimentales utilisées dans l'étude des états de surface pourrait s'avérer très intéressante. La thermoluminescence est l'une de ces techniques; elle pourrait constituer un moyen de contrôle de l'état des grains de quartz et donner des indications sur leur évolution en fonction du milieu. Bien plus, à la lumière des travaux récents il apparaît que [9, 14] de nombreuses réactions de surface sont conditionnées par le contenu en défauts du cristal, défauts que l'on peut par ailleurs mettre globalement en évidence grâce à la thermoluminescence. En est-il ainsi pour le quartz? Son évolution en milieu sédimentaire pourrait-elle être influencée par sa structure électronique et contrôlée par TL? Pour tenter de répondre à ces questions nous avons étudié en TL des grains de quartz issus de quelques sédiments meubles récent ou ancien.

LE MATÉRIEL ÉTUDIÉ ET LES TECHNIQUES EXPÉRIMENTALES

Les travaux que nous effectuons depuis une dizaine d'années sur la TL du quartz détritique ont été menés à partir de roches gréseuses préalablement broyées ou sciées. En vue de mettre en évidence les effets de surface, nous avons par contre utilisé un matériel sableux simplement tamisé ou trié sous le binoculaire. Tout un lot d'échantillons provenant d'une étude menée en collaboration avec le Centre de Sédimentologie Marine de Perpignan nous a servi de matériel de base (*). Dans cette note, nous n'utiliserons que les résultats obtenus sur les dépôts fluviaux récents des bassins des Pyrénées Orientales et de la Montagne Noire et ce uniquement à titre exemplatif.

Les sédiments récoltés étant feldspathiques un tri préalable a été effectué au binoculaire de manière à isoler les grains de quartz. L'étude a donc été effectuée

(*) L'ensemble du travail effectué sur les sédiments récents du golfe du Lion et qui avait pour but l'étude des zones d'alimentation sera présenté en collaboration avec J. P. Aloïsi dans un prochain numéro de la Revue de Géographie Physique et Géologie Dynamique.

chaque grain d'un même échantillon. Un tri des grains de quartz au binoculaire montre qu'elle caractérise des grains à surface chagrinée et finement picotée (que nous appellerons par la suite quartz évolué); les grains transparents montrant une courbe plus typique avec de nombreux pics bien résolus et situés entre 60 et 300° C (type 2, fig. 1b).

La courbe de l'échantillon global sera bien sûr influencée par les deux types de quartz suivant leur teneur respective.

Dans le bassin de l'Agly, l'influence des grains évolués sur la courbe globale de TL est nette. L'émission de TL est toujours caractérisée par une courbe de type 1, le type 2 n'apparaissant que sur grains transparents préalablement isolés (fig. 1a-b, fig. 2 III d-e).

Par contre, dans le bassin du Tech, l'émission globale de TL est en fait une courbe mixte résultant de l'influence simultanée des quartz transparents et des quartz évolués. Les histogrammes de la fig. 2 (Ia-b) sont largement étalés et présentent deux maxima distincts.

On peut donc définir deux types de courbe :

- un type lié aux grains transparents (fig. 3b, fig. 2 II d) triés au binoculaire (type 2) et caractérisé par la présence d'un groupe de 3 pics à basse température ($T_1 = 70^\circ \text{C}$, $T_2 = 107^\circ \text{C}$, $T_3 = 162^\circ \text{C}$) avec en général $H_1 < H_2 < H_3$ (ou si l'on veut $R_{1-2} < 50$ et $R_{2-3} < 50$).
- un type lié à l'échantillon global (fig. 3a, fig. 2-Ie) caractérisé par l'absence du pic 1, la présence d'un groupe de 2 pics à basse température ($T_2 = 101^\circ \text{C}$, $T_3 = 162^\circ \text{C}$) avec en général $H_2 > H_3$ ($R_{2-3} > 50$) et qui résulte en fait d'une évolution du type 2 par exagération du pic à 100° C (influence du type 1).

Dans tous ces types, les émissions de haute température restent cependant faibles ($R_{3-4} > 70-80$). C'est là un trait commun à tous les quartz provenant du bassin des Pyrénées orientales (fig. 2 Ic — IIc — IVc). L'existence d'une dualité dans la morphologie des grains de quartz jointe à une dualité dans les émissions de TL suggère l'influence d'un effet de surface, effet que nous avons tenté de mettre en évidence par attaque des mêmes échantillons aux vapeurs HF.

L'effet du traitement HF est manifeste. Il se marque par (fig. 1-2-3) :

- la disparition des courbes de type 1.
- l'apparition sur échantillon global d'un type nouveau (type 3, fig. 1c — 3c — 2 IIe — 2 IVe) à 3 pics de basse température mais avec $H_1 > H_2 < H_3$ ($R_{1-2} > 50$ — $R_{2-3} < 50$).
- le maintien sur grains transparents triés du type 2 à 3 pics de basse température (fig. 3 d-e, fig. 2 I-II-III-IV d) avec $H_1 < H_2 < H_3$ ($R_{1-2} < 50$ — $R_{2-3} < 50$).

La disparition du type 1 (fig. 2) entraîne une dérive de l'histogramme R_{1-2} vers des valeurs élevées de R (comparaison Ia — IIa) et de l'histogramme R_{2-3} vers des valeurs faibles de R (comparaison Ib — IIb). L'existence simultanée des types 2 et 3 se traduit par un étalement de l'histogramme R_{1-2} qui dans les cas favorables (bassin de l'Agly, fig. 2 IVa) se caractérise par 2 maxima distincts. Les émissions de haute température restent toujours faibles ($R_{3-4} > 70$). De plus dans le bassin de l'Agly l'attaque HF révèle l'existence d'un type accessoire dont les 3 pics de basse température répondent à la relation $H_1 > H_2 > H_3$ ($R_{1-2} > 50$, $R_{2-3} > 50$), l'émission de haute température étant en outre relativement intense ($R_{3-4} < 70$).

(*) Ce type n'est pas figuré dans cette note.

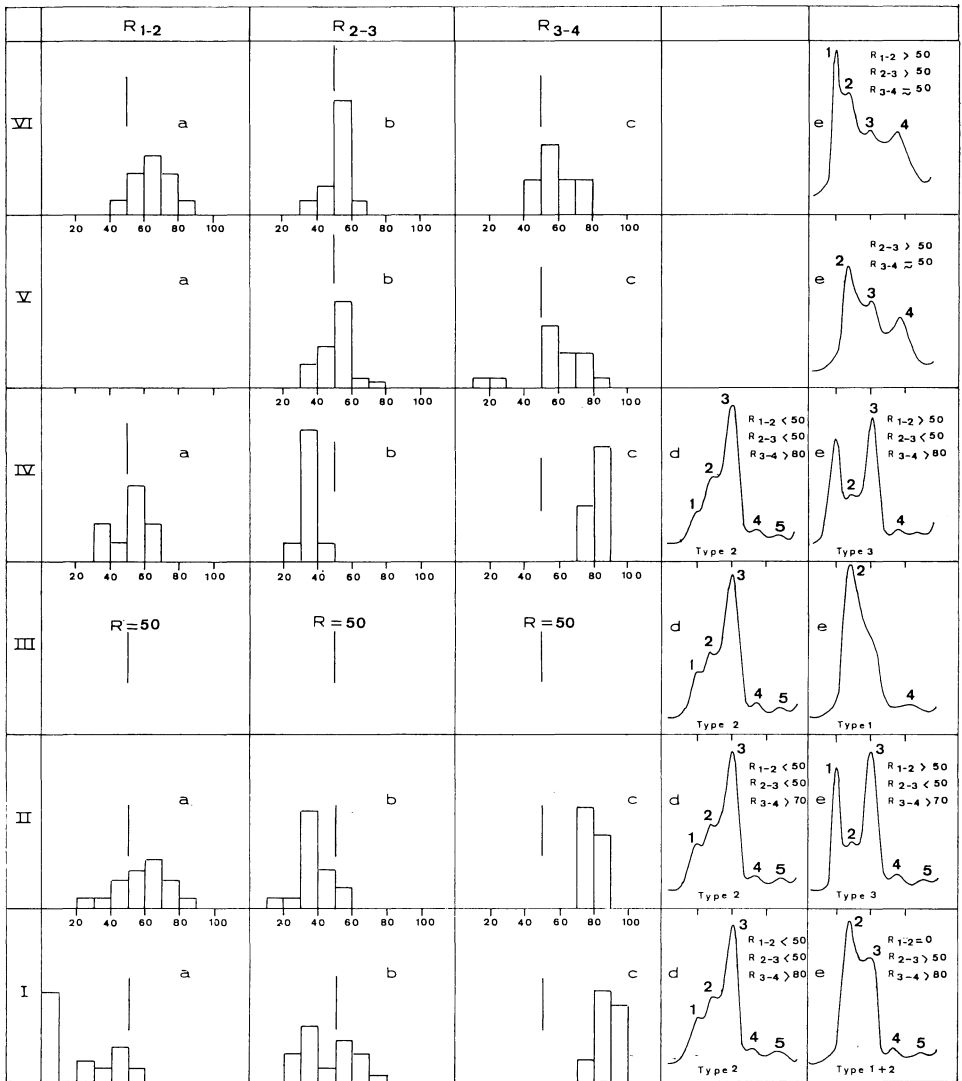


Fig. 2. — Thermoluminescence artificielle des grains de quartz des bassins du Tech, de l'Agly et de l'Orb (Pyrénées orientales et Montagne Noire).

- I bassin du Tech
- II bassin du Tech après attaque HF
- III bassin de l'Agly
- IV bassin de l'Agly après attaque HF
- V bassin de l'Orb
- VI bassin de l'Orb après attaque HF

En a, b, c on a représenté les histogrammes du rapport R de hauteur des pics de thermoluminescence. Exemple :

$$R_{1-2} = \frac{H_1}{H_1 + H_2} \times 100$$

$$R_{1-2} < 50 \text{ si } H_1 < H_2$$

$$R_{1-2} > 50 \text{ si } H_1 > H_2$$

En d et e on a schématisé l'allure des principaux types de courbe (température croissante vers la droite) ;

Remarque : en III les histogrammes n'ont pu être représentés car la plupart des courbes obtenues sont de type 1 (un seul pic dominant à 100° C).

En résumé, l'effet du traitement HF se traduit par :

- la disparition du type 1 et son remplacement par le type 3;
- le maintien du type 2 et ce même après attaque poussée ayant réduit les grains à quelques débris (fig. 3d par exemple).

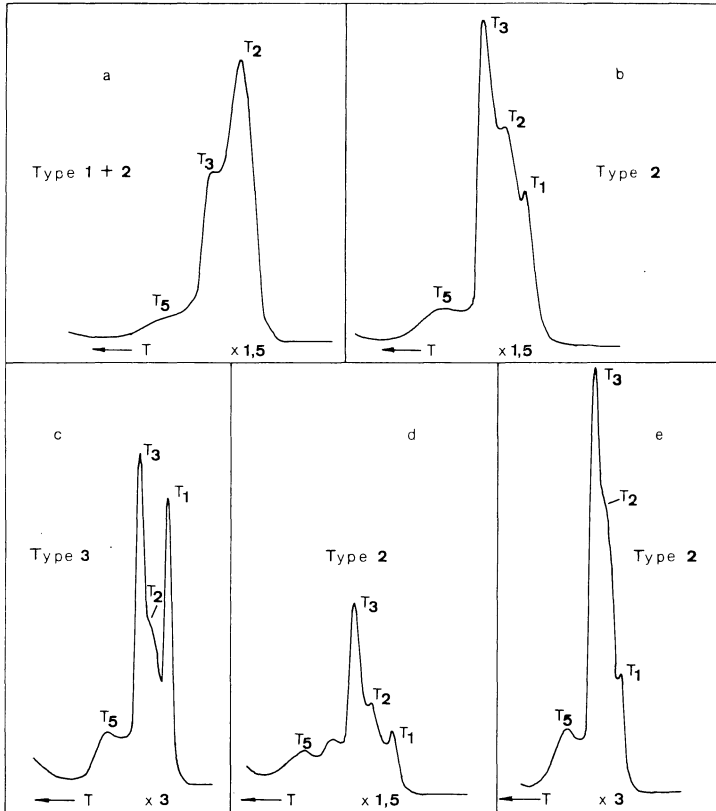


Fig. 3. — Courbes TLA des grains de quartz du bassin du Tech.

a — éch. TLA 10 : échantillon global; b — éch. TLA 10 : grains transparents; c — éch. TLA 1 : échantillon global après 3 h d'attaque HF; d — éch. TLA 1 : débris de grains transparents après 7 h d'attaque HF; e — éch. TLA 3 : grains transparents après 3 h d'attaque HF.

Rem. : — températures croissantes dans le sens de la flèche;
— réduction $\times 1,5$ ou $\times 3$.

La répartition de la TL au sein des grains de quartz du bassin des Pyrénées orientales est illustrée à la figure 4A.

Les dépôts fluviaux appartenant au bassin de la Montagne Noire

L'exemple de l'Orb est particulièrement intéressant car les courbes TL de type 1 y sont fréquentes et ne se limitent pas aux seuls grains évolués; des grains transparents sélectionnés sous le binoculaire présentent également un courbe de ce type.

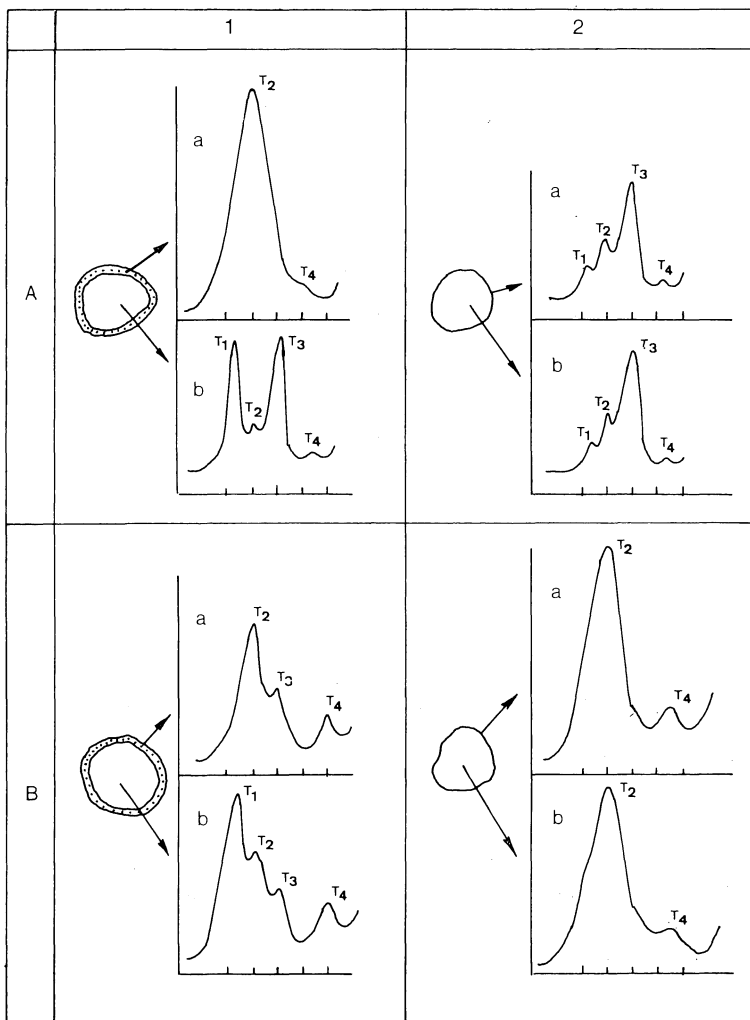


Fig. 4. — Répartition de la TLA au sein des grains de quartz des bassins des Pyrénées orientales et de la Montagne Noire.

A — Pyrénées orientales (Tech — Agly) B — Montagne Noire
 1 — grains évolués 2 — grains transparents
 a — avant attaque HF b — après attaque HF

C'est ainsi que le pic T1 est rare (fig. 5) sur échantillon global comme sur grains isolés. La courbe TL la plus probable peut être définie grâce aux histogrammes de la fig. 2V. Elle est caractérisée par :

- la présence d'un groupe de 2 pics à basse température avec en général $H_2 > H_3$ ($R_{2-3} > 50$).
- l'intensité des pics de haute température (R_{3-4} voisin de 50).

Le traitement HF entraîne l'apparition d'un pic à 65° C (fig. 2, VI, a). Dans

certains cas cependant, la courbe de type 1 subsiste même après attaque prolongée à l'acide fluorhydrique (fig. 5).

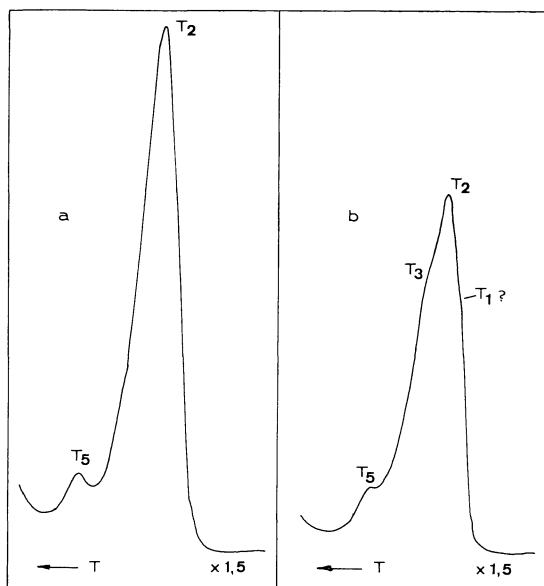


Fig. 5. — Courbes TLA de quelques quartz du bassin de l'Orb, éch. TLA 85.

a — grains transparents;

b — débris de grains transparents après 6 h d'attaque HF.

Rem. : dans certains cas la courbe de type 1 se maintient après attaque à l'acide fluorhydrique.

En résumé, le traitement HF modifie peu la thermoluminescence des quartz du bassin de l'Orb, il se traduit soit par le développement du pic à 65° C soit par le maintien d'une courbe de type 1. La répartition de la TL au sein des grains de quartz du bassin de l'Orb est illustrée à la fig. 4B.

QUELQUES SABLES DU CRÉTACÉ ET DU TERTIAIRE

Une dizaine d'échantillons de sables dont l'âge et la provenance sont précisés en légende des tableaux 1-2 ont été étudiés en macroTL. Dans la mesure du possible, nous avons choisi des sables blancs de façon à éviter que l'attaque aux vapeurs d'acide fluorhydrique ne modifie l'indice de coloration de la poudre.

Les tableaux 1-2 montrent s'il en était encore besoin que les courbes TL du quartz peuvent varier d'un échantillon à l'autre et constituer une fiche d'identité caractéristique d'un apport déterminé (*). Toutefois si les courbes TLA sont variables l'examen des tableaux 1-2 permet de dégager quelques grands traits communs propres à la plupart des sables étudiés. On peut noter :

(*) Notez pour la région liégeoise par exemple l'identité remarquable des courbes des sables de Boncelles et d'Oret Delbar, leur différence avec la courbe du sable d'Aix la Chapelle.

- la présence d'un groupe de 3 pics de basse température avec $H_1 > H_2 > H_3$ ($R_{1-2} > 50$, $R_{2-3} > 50$);
- l'intensité de l'émission à haute température (R_{3-4} compris entre 40-70, $R_{4-5} > 50$).

Il montre en outre que le traitement HF ne modifie pas sensiblement la courbe TLA des sables étudiés. Même l'émission du sable Panisélien caractérisée par une courbe de type 1 avec un pic intense à 100° C subsiste identique à elle-même. A ce point de vue, il est à noter que les courbes TLA des sables Crétacé et Tertiaire présentent, dans leur forme générale, de fortes analogies avec celles de quartz alluvionnaires (bassin des Pyrénées orientales ou de la Montagne Noire, par exemple) débarassés par attaque HF de leur partie corticale fortement thermoluminescente. Faut-il voir dans ce fait l'indice, pour les sédiments anciens, d'une action liée à l'altération superficielle des grains de quartz? Les mesures ont été effectuées sur un nombre d'échantillons trop restreint pour que l'on puisse répondre à ces questions.

DISCUSSION DES RÉSULTATS

Les quelques exemples traités dans cette note montrent à suffisance que la thermoluminescence au sein d'un grain de quartz donné peut répondre à une répartition zonaire.

Eu égard à ces résultats expérimentaux, les remarques suivantes peuvent être formulées :

- l'émission de haute température et son intensité relative semble ne jamais être affectée par le traitement HF; seule l'émission de basse température est susceptible d'être modifiée.
- l'effet du traitement HF est net pour les quartz dont l'émission de basse température est caractérisée par l'absence du pic à 65° C jointe à une forte intensité du pic à 100° C (comparer fig. 2d et 2e). Dans ce dernier cas, la TL de basse température évolue après attaque HF vers une courbe où le pic à 65° C devient prépondérant (fig. 2e II-IV-VI).

Toutefois, une courbe TL caractérisée par un pic dominant à 100° C peut résister à une attaque de longue durée à l'HF.

Ces faits sont schématisés à la figure 4.

L'étude en microTL des quartz des bassins fluviaux des Pyrénées orientales montre en outre que bien souvent l'évolution de la courbe TL sous l'effet du traitement HF est liée à l'aspect en surface des grains de quartz. A la lumière de ces résultats, il est tentant de voir dans la répartition zonaire de la TL au sein d'un grain de quartz la conséquence de l'évolution du grain en milieu sédimentaire.

L'interaction du quartz détritique avec son milieu sédimentaire a déjà été observée par L. le Ribault (10, 11, 12). Une telle interaction résulte, en fait, d'un équilibre physiochimique entre la surface d'un solide cristallin et son milieu ambiant. Or la chimie moderne nous enseigne (9, 14) que les réactions de surface sont bien souvent conditionnées par le caractère « donneur » ou « accepteur » d'électrons et profondément modifiées par la présence de défauts au sein du solide. C'est ainsi que divers chercheurs ont récemment mis en évidence (2, 13), grâce au phénomène de luminescence, l'influence de la structure électronique du quartz sur sa réactivité

TABLEAU 1-2

		T ₂	T ₃	T ₄	T ₅	H ₂	H ₃	H ₄	H ₅	R ₁₋₂	R ₂₋₃	R ₃₋₄	R ₄₋₅
F	a	96	157,5	230	315	13,6	10	7,4	11	77,5	57,6	57,4	40,2
	b	96	169	242	325	13,4	9,4	7,6	13	80,9	58,7	55,2	36,8
B ₀	a	—	160	227	310	—	1,4	1,5	4,3	—	—	48,3	25,9
	b	—	163	229	315	—	1,4	1,5	3,8	—	—	48,3	28,3
O	a	—	161	227	315	—	2,1	2,3	7,2	—	—	47,7	24,2
	b	—	161	227	310	—	1,7	2	5,6	—	—	45,9	26,3
P	a	100	—	—	300	83,5	—	—	8	—	—	—	—
	b	100	—	—	300	82,5	—	—	7,5	—	—	—	—
B _r	a	96	158	225	302,5	21	12,8	6	5,3	67,2	62,1	68	53,1
	b	94	148	215	301	21,1	13	6,9	5,4	71,9	61,9	65,3	56,1
Y ₁	a	100	155	222,5	307,5	22	12	6	10,4	66,9	64,7	66,6	36,6
	b	100	157,5	230	315	15	9	5,2	10,8	76,7	62,5	63,4	32,5
Y ₂	a	100	161	230	312,5	10,4	5,8	3,8	6,6	74,2	64,2	60,4	36,5
	b	95	155	230	310	8,8	5,4	4	7	76,1	62	57,4	36,4

L	a	100	161	235	305	6,2	5,3	5,7	8	90,9	53,9	48,1	41,6
	b	96	157,5	235	300	7,4	6,1	6	9,3	91,2	54,8	50,8	39,2
Aix	a	91	157,5	218	307	21,3	10,6	4,6	5,1	57,5	66,7	69,7	47,4
	b	88	161	220	310	20,6	9,2	4,2	5,2	56,2	69,1	68,6	44,7
W	a	96	157,5	222,5	296	9,2	11	12,6	19,8	92,7	45,5	46,6	38,8
	b	100	161	230	307,5	8,8	10,6	12,4	20,8	91,9	45,3	46	37,3

	F	B ₀	O	P	B _r	Y ₁	Y ₂	L	Aix	W	
a	47	9,3	12,6	—	43	44,5	30	62	28,8	117	pic
b	57	8,2	12,5	—	54	49,5	28	77,4	26,4	101	H ₁
a/b	0,82	1,13	1,01	—	0,79	0,90	1,07	0,80	1,09	1,16	

a) traitement thermique à 400° C (½ h), irradiation à la source Co60 (2 h);

b) attaque HF (3 h), traitement thermique à 400° C (½ h), irradiation à la source Co60 (2 h).

Les mesures de TL ont toutes été ramenées aux conditions suivantes :

HT au photomultiplicateur (1000 V, sensibilité à l'enregistreur : 50 mV, gain au préampli : 10⁶, poids d'échantillon : 0,4 gr.

F : sable de Fontainebleau (Stampien)

Bo : sable de Boncelles (Chattien ?), éch. n° 808 (région de Liège)

O : sable d'Oret Delbar (âge ?), éch. n° 697 (région de Liège)

P : sable Panisélien (Mont Panisel, Mons)

Br : sable Bruxellien (niveau de sable blanc, carrière du Marouset, Braine-le-Comte)

Y1 : sable Yprésien (Peissant 1, sable blanc, carrière Beautrix)

Y2 : sable Yprésien (Peissant 2, sable blanc à 2 m au-dessus du niveau 1, carrière Beautrix)

L : sable Landénien continental (Epinois)

Aix : sable d'Aix-la-Chapelle (Crétacé), éch. n° 577 (sablière la Calamine)

W : sable Wealdien (Château St-Pierre, Thieu, bassin de Mons).

au cours de certaines affections pulmonaires (silicose, pneumoconiose). Ne pourrait-il pas en être de même dans l'interaction du quartz avec son milieu sédimentaire? On peut en effet remarquer que les grains évolués lorsqu'ils sont débarrassés de leur partie corticale possèdent une TL essentiellement distincte de la TL des grains transparents (fig. 4). L'évolution des grains serait-elle donc influencée par l'existence d'une structure électronique particulière mise en évidence par thermoluminescence? Seule l'étude des variations de TL d'un lot bien déterminé de quartz en fonction des caractéristiques physicochimiques de divers milieux sédimentaires permettrait de conclure.

Il faut toutefois souligner que les courbes de type 1 fréquentes dans la partie corticale des grains évolués sont également connues dans certains quartz de granite [6] ou au cœur de certains quartz détritiques. Dans le cadre de l'hypothèse précédente des phénomènes de convergence existeraient donc entre les propriétés TL de la partie superficielle de certains grains, liées à leur évolution épigénétique et les propriétés TL de certains quartz en relation directe avec leurs conditions de cristallisation.

Si par conséquent les résultats de l'attaque HF peuvent s'interpréter à la lumière de l'évolution des quartz en milieu sédimentaire, il n'est pas non plus impossible qu'une hétérogénéité syngénétique soit également responsable de la distribution zonaire de la TL au sein de certains grains (*); cette hétérogénéité pouvant subsister au cours du transport (**).

En conséquence, il serait dangereux de vouloir dès maintenant tirer des conclusions trop hâtives. Seule l'étude conjointe des quartz d'un massif granitique déterminé et des arènes, des dépôts fluviatiles, torrentiels ou lagunaires associés à ce massif aidera à faire la part des phénomènes syngénétique et épigénétique.

Ch. Dupuis dans le cadre de sa thèse de doctorat et moi-même dans le cadre des travaux effectués en collaboration avec le Centre de Sédimentologie Marine de Perpignan avons l'intention d'aborder ce travail en utilisant les données récemment acquises dans l'étude du massif de la Maladeta.

En conclusion, le traitement à l'acide fluorhydrique est susceptible d'ouvrir des voies nouvelles dans l'étude de la thermoluminescence des quartz, tout en permettant une étude de plus en plus fine d'un matériel détritique. Dès 1966, nous avons montré l'intérêt de la thermoluminescence dans les reconstitutions paléogéographiques.

A cette époque, toutes les études étaient menées sur roche totale à l'aide d'un appareil de macroTL. En vue de mettre en évidence la répartition des propriétés de TL des différents grains de quartz constituant un apport déterminé nous avons par la suite mis au point un appareil de microTL [4] permettant de travailler à l'échelle du grain. En utilisant l'attaque progressive par les vapeurs d'acide fluorhydrique nous venons de montrer qu'il était possible d'étudier la répartition de la TL au sein d'un grain déterminé. Certes l'origine de l'hétérogénéité des propriétés de TL de certains grains doit encore être précisée. Dans l'hypothèse où la TL de la partie corticale du grain serait bien liée à des phénomènes épigénétiques l'attaque HF deviendrait indispensable à toute étude sur l'origine d'un matériel détritique meuble.

(*) Ch. Dupuis (communication personnelle) a récemment mis en évidence l'existence d'une hétérogénéité dans la distribution de la TL au sein d'un quartz de microgranite.

(**) Des expériences récentes sur l'abrasion fluvatile ont montré qu'elle était inférieure à 0,1 % par 1000 km pour un grain anguleux et qu'elle était pratiquement nulle pour un grain arrondi.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] BALEINE, O., CHARLET, J. M., DUPUIS, C., 1973. — Les techniques utilisées pour l'étude de la thermoluminescence au laboratoire de minéralogie de la F.P.Ms.; 10 années d'expérience. *Ann. Scientifiques, Fac. Polyt. Mons* (à paraître).
- [2] BECK, E. G., HOLUSA, R., JIRAKOVA, D., KYSELA, B., ROBOCK, K., SKODA, V., 1973. — Über die unterschiedliche Wirkung von zwei Quarzen im Tier — und Zellversuch und ihre physikalischen Halbleitereigenschaften. Sonderdruck aus *Staub. Reinhaltung der Luft* 1/1973.
- [3] CHARLET, J. M., 1966. — La thermoluminescence des roches quartzo-feldspathiques (application à l'étude des séries sédimentaires détritiques, intérêt dans la datation des granites). Thèse, Faculté polytechnique de Mons, *Bulletins du B.R.G.M.*, 1969, n°2, p. 51-97 et n° 3, p. 11-60.
- [4] CHARLET, J. M., 1969. — Le photomètre de microthermoluminescence, son intérêt dans les applications de la TL à la géologie. *Ann. Soc. géol. Nord*, t. XC, p. 23-31.
- [5] CHARLET, J. M., WATERLOT, M., 1969. — La thermoluminescence utilisée dans l'étude de quelques sédiments quartzo-feldspathiques du Paléozoïque des Pyrénées Centrales. *Bull. Soc. géol. Fr.*, t. XI, p. 298-306.
- [6] DUPUIS, C., 1973. — Contribution de la thermoluminescence du quartz et des feldspaths à l'étude des massifs granitiques. Résultats préliminaires sur le complexe granitique de Ploumanac'h — Ile Grande (Côtes du Nord, France). *Bull. Soc. géol. Fr.* (à paraître).
- [7] HEDDEBAUT, C., 1973. — Études géologiques dans les Massifs Paléozoïques Basques. *Doct. Sciences Naturelles*, Lille, n° 272, p. 106-115.
- [8] IVALDI, J. P., 1973. — Contribution de la TL à l'étude des séries « Grès d'Annot ». Origines du matériel détritique. Conséquences paléogéographiques. Doct. 3^e Cycle, Nice (France).
- [9] KROGER, 1964. — The chemistry of imperfect crystals. Amsterdam, North Holland Publishing Company.
- [10] LE RIBAUT, L., 1971. — Présence d'une pellicule de silice amorphe à la surface de cristaux de quartz des formations sableuses. *C.R. Acad. Sc. Paris*, t. 272, p. 1933-1936.
- [11] LE RIBAUT, L., 1971. — Comportement de la pellicule de silice amorphe sur les cristaux de quartz en fonction des différents milieux évolutifs. *C.R. Acad. Sc. Paris*, t. 272, p. 2649-2652.
- [12] LE RIBAUT, L., 1972. — La mémoire des grains de sable. *La Recherche*, n° 28, p. 985-987.
- [13] ROBOCK, K., 1968. — Neuere Vorstellungen zur Silikoseentstehung Lumineszenzmessungen und biochemische Zellversuche mit SiO₂-Stäuben. Sonderdruck aus *Staub. Reinhaltung der Luft*, 28, n° 4, p. 148-156.
- [14] WOLKENSTEIN, T., 1961. — Théorie électronique de la catalyse sur les semiconducteurs. Masson.

