

LES MINÉRAUX LOURDS DES ALLUVIONS QUATÉNAIRES DU BASSIN DE LA MOSELLE : NOUVELLES DONNÉES



Monique BEINER¹, Dominique HARMAND¹, Stéphane CORDIER²
& Serge OCCHIETTI¹

RÉSUMÉ

De nouvelles études de minéraux lourds permettent de mieux connaître l'origine des alluvions quaternaires du bassin de la Moselle (NE France) et les modalités de leur dépôt. Les prélèvements ont été effectués dans cinq secteurs distincts : le versant lorrain des Vosges cristallines (vallée de la Cleurie), le piedmont occidental des Vosges gréseuses (bassins de la Meurthe et de la Sarre), les vallées de la Sarre supérieure et inférieure, ainsi que la vallée de la basse Moselle. Dans le bassin supérieur de la Moselle, les sables prélevés dans les dépôts glaciaires de la moraine composite du Pré J'Espère (vallée de la Cleurie) sont composés majoritairement de tourmaline et de zircon, provenant d'altérites du socle des Vosges moyennes remaniées par la glace lors d'une phase d'englaciation. Deux échantillons de till de fond et de till d'ablation possèdent un spectre minéralogique plus diversifié. Les cônes de piedmont des Vosges du Nord et de la vallée de la Sarre supérieure ne comportent que des éléments issus de l'altération des grès vosgiens *sensu lato* : minéraux stables (zircon, rutile, anatase) et résistants (tourmaline), avec une forte proportion de minéraux opaques cassés et altérés. Les alluvions des terrasses de la Sarre inférieure et de la Moselle allemande ont des cortèges beaucoup plus diversifiés, les alluvions ayant été alimentées par les grès et conglomérats du Buntsandstein, le socle dévonien du Massif schisteux, le Permien sédimentaire et volcanique du Bassin de Sarre-Nahe, et également par le socle vosgien pour la vallée de la Moselle. On peut distinguer trois types de spectres minéralogiques : (1) les cortèges des alluvions des plus hautes terrasses sont surtout composés de tourmaline, de zircon et d'oxydes de titane, avec un pourcentage notable de minéraux altérables (amphibole verte, grenat et staurolite à Diefflen, amphibole et épidote à Oberheide) ; (2) ceux des moyennes et basses terrasses de la Sarre inférieure et ceux des moyennes terrasses de la Moselle antérieures à la capture sont plus diversifiés, renfermant notamment du pyroxène et parfois de l'amphibole, ainsi que quelques minéraux du socle vosgien pour les terrasses de la Moselle ; (3) ceux des plus basses terrasses de la Moselle, postérieures à la capture, sont encore enrichies par des apports significatifs provenant du socle vosgien (amphibole [ou hornblende] « vosgienne » et grenat), des formations paléozoïques des bassins de la Sarre et de la basse Moselle et peut-être des éruptions de l'Eifel (pyroxènes et amphiboles basaltiques).

Mots-clés : minéraux lourds, alluvionnement quaternaire, cônes de piedmont, Moselle, Meurthe, Sarre, Vosges.

ABSTRACT

THE HEAVY MINERALS OF QUATERNARY FLUVIAL DEPOSITS IN THE MOSELLE BASIN: NEW DATA

New studies of heavy minerals of quaternary alluvial deposits in the Moselle basin (NE France) provide a better understanding of their origin and deposition. The sampling took place in five distinct areas: the Lorraine slope of the crystalline Vosges (Cleurie valley), the western piedmont of the sandstone Vosges, the valleys of the Upper and Lower Sarre, as well as the Lower Moselle valley. Upstream of the Moselle basin, the sands sampled in drifts of the composite moraine of Pré J'Espère (Cleurie valley) are mainly composed of tourmaline and zircon. These minerals come from alterites of the crystalline bedrock of the Middle Vosges and were reworked by ice at the time of a phase of englaciation. Two samples respectively of subglacial till and ablation till give a more diversified mineralogical spectrum. The samples from the piedmont cones of Northern Vosges and Upper Sarre valley comprise only minerals resulting from the weathering of the Trias sandstones *sensu lato*: stable (zircon, rutile, anatase) and resistant (tourmaline) minerals, with a strong proportion of broken and deteriorated opaque minerals.

The alluvial deposits of the terraces of the Lower Sarre and German Moselle contain much more diversified mineral species: the deposits were fed by Buntsandstein sandstone and conglomerate, Devonian rocks of the Rhenish Massif, sedimentary and volcanic Permian beds of the Sarre-Nahe Basin, and in the Moselle valley by the Vosgian bedrock. In these terraces, three types of mineralogical spectra are observed: (1) the deposits of the highest terraces contain essentially tourmaline, zircon and titanium oxides, with a significant percentage of alterable minerals (green amphibole, garnet and staurolite at Diefflen, amphibole and epidote at Oberheide); (2) the deposits of the middle and lower terraces of the Lower Sarre and those of the middle terraces of the Moselle prior to the capture, are more diversified and contain particularly pyroxene and sometimes amphibole, as well as some minerals of the Vosgian bedrock; (3) the deposits of the lowest terraces of the Moselle subsequent to the capture, have a composition even more enriched with additional species like "Vosgian" amphibole (or hornblende) and garnet coming from the Vosgian bedrock and like pyroxene and basaltic amphibole coming from the Paleozoic formations of the Sarre and the Moselle basins et perhaps from the eruptions of the Eifel.

Keys-words: heavy minerals, quaternary fluvial deposits, piedmont cones, Moselle, Meurthe, Sarre, Vosges

1 - INTRODUCTION

Durant ces dix dernières années, l'étude qualitative et quantitative des minéraux lourds des sables prélevés dans les vallées de la Meurthe et de la Moselle (France,

Luxembourg, Allemagne) a permis de souligner les associations minéralogiques propres aux sources ayant alimenté les alluvions quaternaires des rivières. Dans la vallée de la Moselle, les associations minéralogiques ont été utilisées comme marqueur chronologique, et ont pu

¹ CERPA, Campus lettres Sciences Humaines, Université de Nancy 2, BP 133-97, 54015 NANCY Cedex.

Courriel : monique.beiner@neuf.fr, Dominique.Harmand@univ-nancy2.fr, Serge.Ochietti@univ-nancy2.fr

² Université de Paris XII Val-de-Marne, 61, avenue du Général de Gaulle, 94010 Créteil Cedex. Courriel : stephane.cordier@univ-paris12.fr

mettre en évidence, en aval de la confluence Moselle-Meurthe (dans la moyenne et basse vallée de la Moselle), des formations fluviales antérieures et postérieures à la capture de la Haute Moselle.

Les résultats sont détaillés dans les thèses de Losson (2003) et de Cordier (2004) ainsi que dans de récentes publications (Cordier *et al.*, 2002a, b, 2003, 2004, 2005, 2006). Il existe en effet deux grands types de spectres fondamentaux :

- l'association grenat - amphibole caractérise les alluvions de la Haute Moselle dont le bassin supérieur est inscrit dans le socle granitique et métamorphique des Vosges moyennes et méridionales ;

- l'association tourmaline - zircon caractérise les formations fluviales du bassin supérieur de la Meurthe localisé en majorité sur les grès et conglomérats permotriasiques des Vosges gréseuses.

Le présent article s'inscrit dans la continuité de ces premiers résultats relatifs aux formations quaternaires du bassin versant actuel de la Moselle entre les Vosges et le Massif schisteux. Les prélèvements ont ainsi été effectués (fig. 1) dans les formations glaciaires du versant lorrain des Vosges cristallines (vallée de la Cleurie à l'Ouest de Gérardmer), dans les formations fluvio-glaciaires du piedmont nord-occidental des Vosges gréseuses du Nord, ainsi que dans les formations fluviales de la Sarre et de la basse Moselle, en particulier sur une basse terrasse de la vallée de la Sarre supérieure, située au Sud de Sarreguemines, sur une moyenne

terrasse de la basse Sarre, située à la confluence de la Prims, sur une moyenne terrasse et une terrasse principale de la Moselle située en aval de Trèves, respectivement à Urzig et à Oberheide.

Les résultats des comptages ont été comparés à ceux réalisés par les auteurs allemands dans les vallées de la Moselle (Müller, 1976 ; Negendank, 1978) et de la Sarre (Fischer, 1957 ; Zöller, 1985).

2 - MÉTHODE D'ÉTUDE DES MINÉRAUX LOURDS

2.1 - INTRODUCTION

Les sédiments sableux détritiques sont composés habituellement de quartz qui en constitue à lui seul la majeure partie, puis de feldspaths, carbonates, micas, en proportions variables, et enfin de minéraux rares (minéraux lourds, « denses », c'est-à-dire de densité $>2,9$), dont les pourcentages par rapport à l'ensemble peuvent varier entre 0,05 et 3 % (Duplaix, 1958). Ces proportions sont habituelles sauf pour certains concentrés naturels tels que les sables de plages où les minéraux lourds peuvent atteindre jusqu'à 90 % du total.

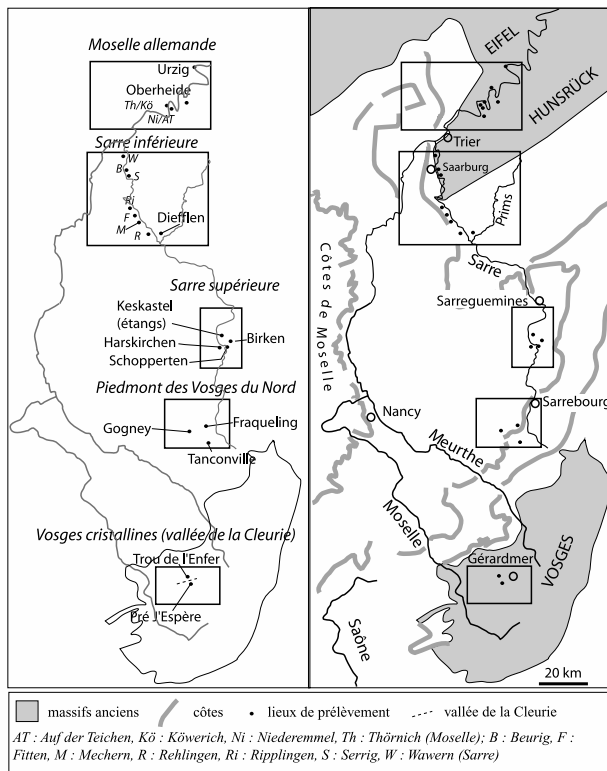
La rareté des minéraux lourds et leur diversité donnent la possibilité de caractériser un sédiment, soit par l'association minéralogique (formée de 2 à 4 espèces minérales les plus abondantes), soit par un minéral indicateur (minéral peu fréquent et souvent peu abondant).

2.2 - RAPPEL DE LA MÉTHODOLOGIE UTILISÉE

- Extraction : l'étude au microscope polarisant nécessitant des grains propres et transparents, il est indispensable d'éliminer les enduits carbonatés et les oxydes. Les carbonates sont facilement éliminés grâce à l'acide chlorhydrique dilué à 50 % et chauffé. Les oxydes doivent être attaqués dans une solution d'acide oxalique 2 N avec des plaquettes d'aluminium. Les grains rincés sont ensuite placés dans une cuve à ultrasons et agités pendant 5 à 20 minutes. L'expérience montre qu'une agitation prolongée entraîne la désagrégation de grains dont la structure est déjà fragilisée au moment de la prise d'échantillon.

- Tamisage : les premiers pétrographes qui ont étudié les minéraux lourds les extraient de la totalité du sédiment, mais ils se sont vite rendu compte que les minéraux lourds se situent habituellement dans la fraction fine du sable et que les espèces minéralogiques ont des tailles privilégiées (tourmaline dans la fraction grossière 0,315-0,160 mm, zircon, rutile et anatase dans la fraction fine 0,160-0,050 mm). Nous avons donc choisi de tamiser les sables compris dans ces deux tailles, dites B et C, afin d'étudier et de comparer les mêmes fractions granulométriques.

- Séparation et montage : sous une hotte adaptée (à aspiration par le bas), les deux fractions sableuses sont plongées séparément dans un entonnoir à décantation rempli à moitié de bromoforme (densité 2,9). La sépara-



tion des minéraux lourds et légers s'effectue après avoir imprimé au liquide un mouvement tournant. Les minéraux sont rincés à l'alcool et séchés à l'air dans leur filtre. Bien mélangée, une partie homogène du résidu lourd est montée entre lame et lamelle dans du Baume de Canada cuit jusqu'à ce qu'il soit cassant.

Idéalement 100 à 200 grains transparents par lame sont prêts à être observés et comptés au microscope polarisant.

– Observation au microscope polarisant et comptages : en *lumière polarisée parallèle* dite « naturelle », on note pour chaque grain la forme, la couleur, l'état de surface, les clivages, les inclusions et globalement l'état de fraîcheur ou d'altération. Entre *nicols croisés*, le pléochroïsme et la biréfringence sont deux caractéristiques quantifiables qu'il est important de connaître. En *lumière convergente*, si l'on obtient une image, le grain est classé soit dans les minéraux uniaxes positifs ou négatifs, soit dans les biaxes positifs ou négatifs.

Il n'est pas toujours possible d'avoir l'ensemble des critères d'un minéral, mais en retenant les caractères communs, on parvient normalement à déterminer chaque grain transparent. Tous les grains montés sur la lame sont comptés. Chaque fraction est exprimée en nombre de grains déterminés, puis en pourcentage. La moyenne des pourcentages des deux fractions donne le spectre minéralogique de l'échantillon.

En outre, si beaucoup de minéraux légers sont restés sur la lame malgré la séparation et si les minéraux opaques sont nombreux (égaux ou supérieurs aux transparents), ils sont signalés et interprétés dans la mesure du possible.

3 - ANALYSE DES MINÉRAUX DENSES RENCONTRÉS

3.1 - INTRODUCTION

Les différentes caractéristiques minéralogiques des minéraux lourds rencontrés ont permis d'affiner leur description et leur spécificité. Nous avons repris dans les lignes suivantes les observations qui nous ont paru les plus pertinentes pour chaque espèce.

3.2 - LES QUATRE MINÉRAUX MARQUEURS

Tourmaline

On la rencontre dans tous les échantillons, avec des variétés de couleurs allant du brun très clair au brun foncé, du jaune clair au brun verdâtre ou du bleu au noir bleuté (indicolite). Elle se présente sous forme de prismes trapus à arêtes arrondies (dans le Trias notamment comme précisé par Antun, 1953), ou en éclats plus ou moins roulés.

Zircon

Le zircon se présente sous forme de grains incolores et plus rarement rosés, de fragments de prismes plus ou moins allongés, aux arêtes franches ou légèrement émoussées. Les grès arkosiques, dérivant de granites, ont

fourni des prismes anguleux idiomorphes que l'on trouve dans notre étude près des sources. À l'inverse, certains grains très usés, ayant parcouru plusieurs cycles sédimentaires, sont ovoïdes. Remarquons enfin qu'ils peuvent être striés, « zonés ».

Grenat

Le grenat forme de beaux grains idiomorphes lorsqu'il est déposé, par exemple, près des sources granitiques. Ainsi l'avons-nous observé abondamment dans les sédiments de la Haute Moselle. Sinon il se présente sous forme d'éclats anguleux dont les surfaces sont couvertes de facettes engendrées par suite d'une corrosion diagénétique. Incolore ou rosé en lumière naturelle, il s'éteint en lumière polarisée (isotrope). Le type almandin, alumineux, est celui que nous avons le plus souvent rencontré. Il est alors associé à l'amphibole. Quelques grains grossulaires (calciques) ont été observés. Ils se rattachent à des séries de calcaires métamorphiques et s'associent à l'épidote peu représentée dans notre étude.

Amphibole

Les amphiboles sont des inosilicates ferromagnésiens. Les clivages font entre eux un angle fin de 124° bien visible sur les sections losangiques. Elles se présentent souvent en prismes plus ou moins allongés aux extrémités plus ou moins dentées. Certaines sont fibreuses.

Trois variétés d'amphiboles monocliniques ou *horn-blendes* ont pu être distinguées :

– *l'amphibole verte ou brune* dite hornblende commune (Parfenoff *et al.*, 1975) est de couleur vert foncé/vert pâle à vert brun/jaune pâle ; elle a une *extinction oblique de 12 à 34 degrés*. Elle vient des roches magmatiques (granites, syénites, gabbros, périclites) et métamorphiques (gneiss, amphibolites). Elle s'associe avec le grenat (pyrope et almandin), la staurolite, le disthène, l'épidote et la biotite.

– *l'amphibole dite « vosgienne »* est citée par les auteurs mais peu décrite (Bustamante Santa Cruz, 1975). Sa couleur est ténue, de brun vert à jaune vert ; elle est par conséquent peu pléochroïque (de Ridder, 1957). Elle est associée dans notre étude aux roches d'origine cristalline et au grenat type almandin. Souvent fibreuse, elle a un *angle d'extinction faible : 5 à 12 degrés*.

– *l'amphibole basaltique*, brun foncé à brun pâle, a un *angle d'extinction très faible proche de zéro degré*. Elle est, comme son nom l'indique, d'origine volcanique et provient de roches riches en fer tels les basaltes ou les andésites. Dans les sédiments elle est assez rare sauf au voisinage de ses sources.

3.3 - LES OXYDES DE TITANE

Rutile

Le rutile est jaune à rouge foncé. Le minéral est souvent allongé suivant le prisme vertical mais développe rarement des faces cristallines. Selon Antun (1953), le rutile du Trias a fréquemment un aspect mat, fibreux, dû parfois à une *transformation en anatase*.

Anatase

L'anatase du Trias inférieur et moyen est surtout authigène. Elle forme des tablettes idiomorphes minces à massives qui sont concentrées dans certains de nos échantillons. Les cristaux, purs ou criblés d'inclusions opaques, sont légèrement teintés en jaune brun et gris pâle. Ils sont le plus souvent mélangés à des grains de titano-magnétite et ilménite; leur formation aux dépens de ces composants est «évidente» pour Antun (1953). Quant à l'anatase du Rhétien et du Jurassique, elle forme des grains roulés, rugueux, gris, fréquemment criblés de poussières opaques.

Brookite

La brookite se rencontre sporadiquement. Elle est fréquente dans le Muschelkalk inférieur et le Keuper inférieur et moyen. Ce sont des grains jaune ambre à dispersion forte et biréfringence bleu violacé caractéristiques.

Essentiellement composée de TiO_2 , elle constitue avec le rutil et l'anatase le groupement des *oxydes de titane*.

3.4 - LES MINÉRAUX DU MÉTAMORPHISME

Épidote

L'épidote, de couleur vert pistache (pistacite) ou incolore (zoïsité avec une forte dispersion en lumière polarisée), cristallise dans les conditions du métamorphisme régional et peut provenir également de l'altération de grenats, pyroxènes, amphiboles et autres silicates calciques et ferrifères (Parfenoff *et al.*, 1970).

Staurolite

D'une couleur jaune intense à pléochroïsme prononcé dans le jaune clair, la staurolite forme des grains anguleux et prismatiques à bords dentés, corrodés. Elle provient des schistes cristallins et des gneiss (degré moyen de métamorphisme). Pour Antun (1953), il s'agit souvent de grains remaniés, fournis entre autres par le Dévonien et le Trias du Massif schisteux rhénan.

Associée à l'andalousite et au disthène, la staurolite appartient au groupement métamorphique mentionné sur nos figures (voir ci-dessous).

Andalousite

Dans les sédiments, les grains sont incolores ou roses, vitreux, de forme irrégulière, contenant souvent des inclusions noires. Son origine est liée au métamorphisme de contact (schistes et micaschistes) ainsi qu'aux granites dits acides.

3.5 - LES AUTRES MINÉRAUX

Pyroxène

De couleur généralement verte, ses formes sont variées. Nous l'avons observé en cristaux d'*augite* prismatiques plus ou moins massifs. Les fragments de prismes aux arêtes en dents de scie (aciculaires) sont fréquents à côté de quelques spécimens d'*augite* titanifère aux teintes changeantes du brun mauve au vert jaune. Dans les sédiments, ces minéraux sont à mettre en relation avec des roches éruptives basiques, en particulier

des gabbros et des basaltes. Leur proportion est fortement majoritaire aux abords des terrains saupoudrés par des émissions volcaniques, celle de l'Eifel par exemple. Leur altération peut les transformer en hornblende verte (ourallitisation).

Sphène

Il se rencontre habituellement en grains dont la surface présente souvent une arête due à une cassure (forme en toit). De couleur jaune miel, il offre un reflet bleuté en lumière polarisée dû à la dispersion caractéristique de ce minéral. Il est commun dans les roches éruptives et métamorphiques. Aussi le trouve-t-on dans les gneiss, schistes cristallins et certains calcaires. Il peut également se développer dans les roches basiques métamorphisées, dans les amphibolites, les schistes à épidote.

3.6 - L'ECHELLE EXPÉRIMENTALE D'ALTÉRATION

À partir d'attaques chimiques en laboratoire, Bustamante Santa Cruz (1976) a établi une nouvelle échelle d'altération des minéraux lourds (Ces derniers provenaient de sables alluviaux du bassin de la Meuse ardennaise). L'auteur a ainsi défini quatre groupes distincts, au sein desquels la densité, la forme et la résistance à l'altération sont comparables. Les résultats de l'expérience concordent assez bien avec les observations du terrain (fig. 2).

4 - RÉSULTATS DES ANALYSES DE MINÉRAUX LOURDS DANS LE BASSIN VERSANT DE LA MOSELLE

4.1 - DÉPÔTS GLACIAIRES VOSGIENS

L'analyse minéralogique a été réalisée à partir de cinq échantillons prélevés dans la vallée de la Cleurie (fig. 3a) où existe une vaste carrière qui exploite, sur 30 m de hauteur, le complexe morainique et glacio-lacustre du Pré J'Espère (fig. 3b). Ce complexe, rapporté à la dernière glaciation (Flageollet, 1988), se situe sur le territoire de la commune du Tholy (à une dizaine de kilomètres à l'Ouest de Gérardmer), sur la bordure sud de la vallée de la Cleurie, à l'extrémité méridionale de la vallée glaciaire du Cellet, vallée suspendue, modelée par une langue glaciaire diffluente du glacier de la Moselotte (Flageollet, 1988). Il est constitué d'une moraine frontale et de formations de marge glacio-lacustre (déposées dans le «paléo-lac du Beillard», Hayotte, 2004), l'ensemble reposant sur le socle granito-gneissique des Vosges moyennes.

Les prélèvements (fig. 3b) ont été effectués essentiellement dans les unités à grandes stratifications obliques au pendage incliné vers l'est, qui affluent sur plus de la moitié des fronts de taille exploités («front sets beds», lits frontaux de la formation II, unités A, B et C, Hayotte, 2004; Occhietti, 2007). Le quatrième échantillon provient des sables stratifiés glaciolacustres de la formation III (unité E) et le cinquième échantillon a été prélevé dans la formation V à blocs (till de marge glaciaire qui coiffe le complexe du Pré J'Espère, Hayotte, 2004).

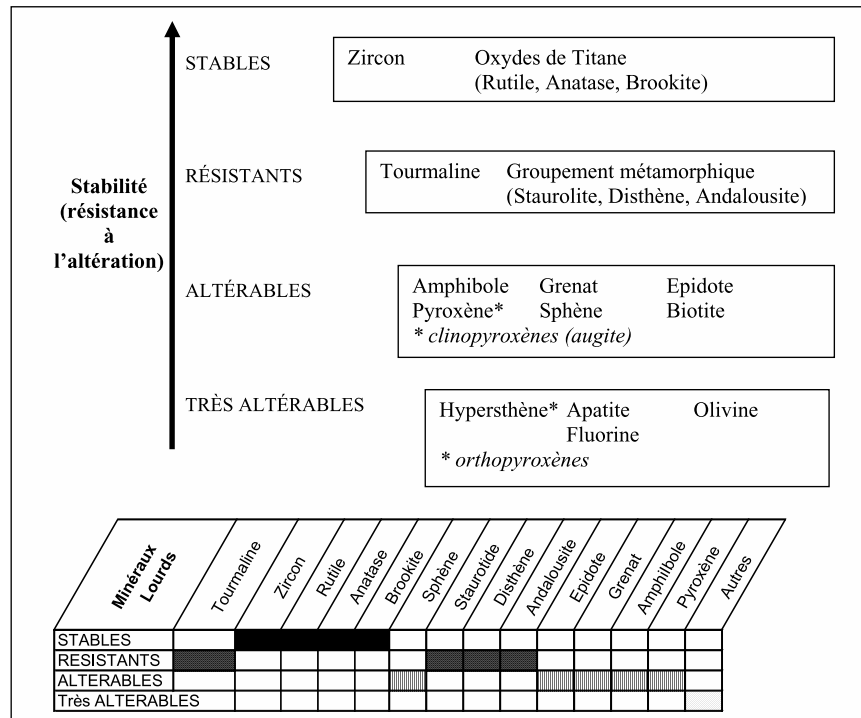


Fig. 2 : Échelle expérimentale d'altération des minéraux lourds (d'après Bustamante Santa Cruz, 1976).
 Fig. 2: Experimental scale of alteration of heavy minerals (according to Bustamante Santa Cruz, 1976).

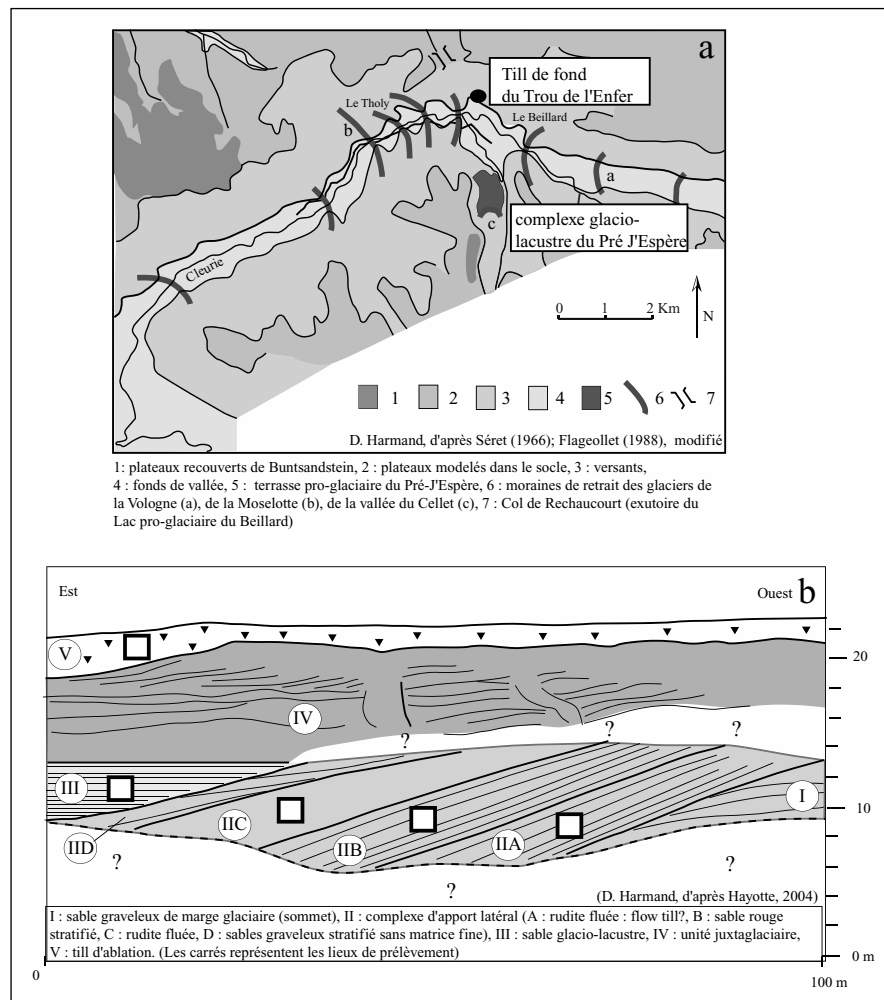


Fig. 3 : Carte de localisation des dépôts glaciaires de la vallée supérieure de la Cleurie (Vosges moyennes) (a) et coupe du Pré J'Espère (b).
 Fig. 3: Location map of the glacial deposits of the upper Cleurie valley (Middle Vosges) (a) and "Pré J'Espère" section (b).

Malgré une méthode opératoire faisant appel à une double séparation, les cortèges minéralogiques sont accompagnés de biotite et de poussières, débris de roches fractionnés par l'érosion glaciaire ou fluviale.

Les unités du **Pré J'espère**, qu'elles soient grossières (unités A, B, et C de la formation II) ou sableuses (unité E de la formation III), ont des cortèges minéralogiques identiques (tab. 1, fig. 4) avec plus de 90 % d'ubiquistes (tourmaline, zircon, oxydes de titane) et d'amphibole

(3 à 7 %). Amphiboles vertes communes et amphiboles « vosgiennes » sont en proportions égales. Seule l'unité C est enrichie de quelques grains d'andalousite et de grenat.

Dans la formation V, située au sommet de la carrière, peu de minéraux lourds transparents ont pu être extraits du sédiment. Le spectre est cependant différent, puisqu'en dehors des ubiquistes, l'amphibole atteint 13 % et le grenat 7 % (et respectivement 26 % et 14 % dans la fraction fine C).

		Minéraux Lourds	Tourmaline	Zircon	Grenat	Rutile	Anatase	Brookite	Sphène	Staurolite	Disthène	Andalousite	Epidote	Amphibole	Pyroxène	TOTAL	Gpt métamorph.	Oxydes de titane
Pré J'espère Formation V	B	4	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	0	0	
	% B	80	20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100	0	0	
	C	23	3	7	2	0	0	0	0	0	2	0	13	0	50	2	2	
	% C	46	6	14	4	0	0	0	0	0	4	0	26	0	100	4	4	
	Moy %	63	13	7	2	0	0	0	0	0	2	0	13	0	100	2	2	
Pré J'espère Formation II - Unité E	B	43	3	0	3	0	0	0	0	0	0	0	1	0	50	0	3	
	% B	86	6	0	6	0	0	0	0	0	0	0	2	0	100	0	6	
	C	78	32	0	15	1	0	0	0	0	0	0	6	0	132	0	16	
	% C	59	24	0	11	1	0	0	0	0	0	0	5	0	100	0	12	
	Moy %	73	15	0	9	0	0	0	0	0	0	0	3	0	100	0	9	
Pré J'espère Formation II - Unité C	B	42	0	0	4	0	0	0	0	0	0	0	2	0	48	0	4	
	% B	88	0	0	8	0	0	0	0	0	0	0	4	0	100	0	8	
	C	62	47	3	14	0	0	0	0	0	3	0	7	0	136	3	14	
	% C	46	35	2	10	0	0	0	0	0	2	0	5	0	100	2	10	
	Moy %	67	17	1	9	0	0	0	0	0	1	0	5	0	100	1	9	
Pré J'espère Formation II - Unité B	B	67	3	0	1	0	0	0	0	0	0	1	2	0	74	0	1	
	% B	91	4	0	1	0	0	0	0	0	0	1	3	0	100	0	1	
	C	59	41	0	8	4	0	0	0	0	0	0	6	0	118	0	12	
	% C	50	35	0	7	3	0	0	0	0	0	0	5	0	100	0	10	
	Moy %	70	19	0	4	2	0	0	0	0	0	1	4	0	100	0	6	
Pré J'espère Formation II - Unité A	B	40	3	0	1	0	0	0	0	0	0	0	3	0	47	0	1	
	% B	85	6	0	2	0	0	0	0	0	0	0	6	0	100	0	2	
	C	60	26	0	5	0	0	0	0	0	0	0	7	0	98	0	5	
	% C	61	27	0	5	0	0	0	0	0	0	0	7	0	100	0	5	
	Moy %	73	16	0	4	0	0	0	0	0	0	0	7	0	100	0	4	
Trou de l'Enfer Till de fond	B	33	2	8	5	0	0	0	0	0	7	1	62	0	118	7	5	
	% B	28	2	7	4	0	0	0	0	0	6	1	53	0	100	6	4	
	C	58	91	3	18	2	0	0	0	0	3	4	24	0	203	3	20	
	% C	29	45	1	9	1	0	0	0	0	1	2	12	0	100	1	10	
	Moy %	28	23	4	7	0	0	0	0	0	4	1	32	0	100	4	7	

Tab. 1 : Composition minéralogique des dépôts glaciaires de la vallée supérieure de la Cleurie (Vosges moyennes). Note pour l'ensemble des tableaux : B désigne la fraction grossière (0.315-0.160 mm) et C désigne la fraction fine (0.160-0.050 mm).

Tab. 1: Mineral spectra of the Glacial deposits of the upper Cleurie valley (Middle Vosges). Note regarding all the tables: B refers to the coarser fraction (0.315-0.160 mm) and C refers to the finer fraction (0.160-0.050 mm).

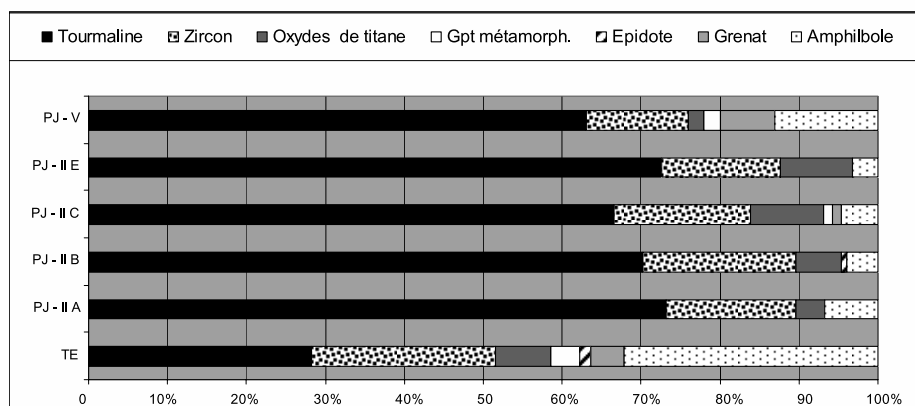


Fig. 4 : Composition minéralogique des dépôts glaciaires vosgiens de la vallée supérieure de la Cleurie.

Fig. 4: Mineral spectra of the Vosgian glacial deposits of the upper Cleurie valley.

Sur le versant septentrional de la vallée de la Cleurie, en face du Pré J'Espère (fig. 3a), l'échantillon du till de fond du **Trou de l'Enfer** livre un cortège équilibré (tab. 1, fig. 4) avec 32 % de grains d'amphibole, dont 21 % sont «vosgiennes», 28 % de tourmaline et 23 % de zircon. Le rutile (7 %), le grenat de type almandin (4 %), l'andalousite (4 %) et l'épidote (1 %) viennent compléter l'ensemble dont l'état de fraîcheur est remarquable. Les beaux prismes d'amphibole y sont par exemple fréquents, alors qu'au Pré J'Espère ils se réduisent à des grains aplatis, souvent déchiquetés.

Les analyses permettent de mettre en évidence trois types de spectres minéralogiques (tab. 1) :

- un spectre minéralogique diversifié avec plus de 35 % d'amphibole et de grenat, relativement pauvre en ubiquistes (environ 50 % de tourmaline et de zircon) représenté par le till de fond du Trou de l'Enfer ;
- un spectre intermédiaire, caractérisé par une part notable d'amphibole et de grenat (20 %) et de nombreux ubiquistes (environ 75 % de tourmaline et de zircon) représenté dans le till d'ablation sommital du Pré J'Espère ;
- un spectre minéralogique peu diversifié, pauvre en amphibole et en grenat (3 à 7 %) et très riche en ubiquistes (de 88 à 90 % de tourmaline et de zircon). Ce dernier est représenté dans les lits frontaux du Pré J'Espère (notamment la formation II).

Ce dernier type de spectre est analogue à celui qui a été identifié dans les alluvions de la Meurthe (Cordier *et al.*, 2002a, b) et de la Sarre (voir ci-dessous ; tab. 2) dont les bassins supérieurs sont essentiellement inscrits dans les formations du Permo-Trias. Au Pré J'Espère, un apport d'éléments du Buntsandstein est envisageable au moins pour deux raisons :

- la présence, dans les lits frontaux, de blocs et de galets de Buntsandstein (environ 15 % selon Hayotte, 2004), ainsi que de nombreux grains ronds-mats dans la fraction 315 µm ;
- l'existence de grains de zircons tantôt allongés et tantôt arrondis, caractéristiques du grès du Trias selon Perriaux (1961).

Toutefois, les éléments de Buntsandstein ne sont pas majoritaires dans le dépôt du Pré J'espère, puisque les galets de socle constituent plus de 75 % de la formation II. Ainsi, les minéraux ubiquistes qui constituent la grande majorité des éléments de la formation II sont pour l'essentiel issus non du Buntsandstein mais du socle métamorphique et gneissique, et en particulier des altérites dans lesquelles seuls les éléments résistants ont subsisté. Cette conclusion s'accorde d'une part, avec la couleur rouge de nombreuses unités de la formation II constituées surtout d'élément du socle, et d'autre part, avec le caractère dégradé des minéraux altérables,

		Minéraux Lourds																	TOTAL		
		Tourmaline	Zircon	Grenat	Rutile	Anatase	Brookite	Sphène	Staurolite	Disthène	Andalousite	Epidote	Amphibole	Pyroxène		Gpt métamorph.	Oxydes de titane				
Schopperten Fond de vallée	B	143	6	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	152	0	3				
	% B	94	4	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100	0	2				
	C	51	54	0	7	10	0	0	0	0	0	0	0	0	122	0	17				
	% C	42	44	0	6	8	0	0	0	0	0	0	0	0	100	0	14				
	Moy %	68	24	0	4	4	0	0	0	0	0	0	0	0	100	0	8				
Harskirchen BT	B	115	6	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	123	0	2				
	% B	93	5	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	100	0	2				
	C	41	66	0	10	6	0	0	0	0	0	0	0	0	123	0	16				
	% C	33	54	0	8	5	0	0	0	0	0	0	0	0	100	0	13				
	Moy %	63	29	0	4	3	0	0	0	0	0	0	0	0	100	0	7				
Harskirchen BT	B	140	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	142	0	2				
	% B	99	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	100	0	1				
	C	23	13	0	4	6	2	0	0	0	0	0	0	0	48	0	12				
	% C	48	27	0	8	13	4	0	0	0	0	0	0	0	100	0	25				
	Moy %	73	14	0	5	7	2	0	0	0	0	0	0	0	100	0	13				
Birken BT	B	129	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	129	0	0				
	% B	92	4	0	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100	0	4				
	C	36	56	0	9	5	0	0	0	0	0	0	0	0	106	0	14				
	% C	34	53	0	8	5	0	0	0	0	0	0	0	0	100	0	13				
	Moy %	63	28	0	6	2	0	0	0	0	0	0	0	0	100	0	9				
Keskastel BT	B	55	9	0	4	2	0	0	0	0	0	0	0	0	70	0	6				
	% B	79	13	0	6	3	0	0	0	0	0	0	0	0	100	0	9				
	C	35	20	0	9	7	0	0	0	0	0	0	0	0	71	0	16				
	% C	49	28	0	13	10	0	0	0	0	0	0	0	0	100	0	23				
	Moy %	64	21	0	9	6	0	0	0	0	0	0	0	0	100	0	16				
Keskastel BT	B	129	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	129	0	0				
	% B	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100	0	0				
	C	110	35	0	5	14	2	0	0	0	0	0	2	0	168	0	21				
	% C	65	21	0	3	8	1	0	0	0	0	0	1	0	100	0	13				
	Mov %	83	10	0	1	4	1	0	0	0	0	0	1	0	100	0	6				

Tab. 2 : Composition minéralogique des alluvions des basses terrasses et du fond de vallée de la Sarre française à Keskastel.
Tab. 2: Mineral spectra of the lower and present alluvial terraces of the Sarre River Valley in France at Keskastel.

comme l'amphibole dont les grains sont souvent déchi-
quetés. De plus, dans la région, les affleurements de tills
anciens et d'altérites sont fréquemment de couleur
orangée à rouge, en dehors de la présence de grès du
Buntsandstein.

Cette interprétation est en accord avec les travaux de
Hameurt (1967) qui mettent en évidence la variété pétro-
graphique des formations du socle vosgien, confirmée
notamment par la présence de grains de zircon issus de la
plupart des granites ou/et des roches métamorphiques du
socle des Vosges moyennes, de tourmaline issue des
granito-gneiss à andalousite, d'amphibole issue des
roches métamorphiques et des microgranites, de
pyroxène provenant des microgranites et des éclogites,
de sphène issus des granites et des granito-gneiss.

En conséquence, les lits frontaux contiennent des
minéraux lourds provenant d'altérites anciennes rema-
niées par la glace et les eaux de fonte, probablement dans
un contexte d'englaciation (Kulinicz & Ochietti, 2007).

À l'opposé, les dépôts glaciaires sont constitués,
surtout dans le cas du till de fond du Trou de l'Enfer, de
matériaux frais livrés par l'érosion glaciaire, notamment
dans la partie basse de la vallée. Le till d'ablation du Pré
J'Espère, déposé lors d'une période d'englacement du
Massif vosgien (Flageollet, 1988) à une altitude élevée,
serait, quant à lui, composé d'une part notable d'altérites
mêlées à des éléments frais issus du socle. Les grains
de zircons très anguleux qui y ont été observés sont en
effet issus de roches cristallines (Salomé, 1968).

Par conséquent, les analyses réalisées sur les forma-
tions glaciaires *sensu lato* des Vosges lorraines, déposées
lors de périodes froides post-eemiennes (Flageollet,
1988; Seret *et al.*, 1990) nuancent et précisent les
conclusions des précédents travaux sur l'origine des
minéraux lourds des alluvions des basses et moyennes
terrasses de la vallée de la Moselle (Cordier *et al.*, 2004,
2005, 2006). Ces travaux insistent sur l'abondance du
couple grenat - amphibole (qui constitue en général plus
de 50 % du spectre minéralogique) issu du socle paléo-
zoïque. Toutefois, des formations superficielles du
Quaternaire récent comme ceux de la marge glacio-
lacustre du Pré J'Espère ont une composition minéralo-
gique pauvre, comparable à celle issue des formations du
Buntsandstein (alluvions du bassin de la Meurthe), bien
qu'étant constituées essentiellement d'éléments issus du
socle. La similitude des spectres minéralogiques n'est
pas due ici à des formations du substratum identiques,
mais à une altération de sables issus du socle au spectre
minéralogique originel plus diversifié.

4.2 - LES ÉPANDAGES DU PIÉDMONT VOSGIEN

Les cônes de piedmont du versant lorrain au Nord des
Vosges gréseuses se trouvent sur l'interfluve Meurthe -
Sarre (fig. 1), plus précisément dans les bassins versants
de la Vezouze, affluent de la Meurthe, et de la Sarre
blanche (fig. 5a, Ménillet, 1978; Bonnefont, 1986;
Mantilaro, 2005; Kulinicz, 2007b). Ils correspondent à
des épandages situés en inversion de relief, à 60-80 m
d'altitude relative, qui sont constitués de formations

épaisses (>10 m de puissance) sableuses et plus rarement
grossières, issues du Buntsandstein. Ces formations
constituent les restes de cônes coalescents de piedmont,
voire d'épandages fluvioglaciaires distaux construits au
contact des Vosges gréseuses et de la dépression argilo-
marneuse du Muschelkalk (Kulinicz, 2007a, b; Kulinicz
& Occhietti, 2007).

Sept échantillons ont été prélevés dans trois sites
(fig. 5a) : Gogney (4 échantillons, fig. 5b), Tanconville
(3 échantillons, fig. 5c) et Fraquelfing (1 échantillon). Les
analyses avaient pour but de mettre en évidence, d'une
part l'existence de formations distinctes ayant des spec-
tres minéralogiques spécifiques, d'autre part une éven-
tuelle origine cristalline pour une partie des sédiments.

Cependant, les analyses ont montré que dans tous les
cas seuls les minéraux ubiquistes étaient présents (tab. 3,
fig. 6) : il s'agit soit d'éléments stables (zircon, rutile,
anatase), soit d'éléments résistants (tourmaline). Parmi
les oxydes de titane, l'anatase surpasse globalement le
rutile. Elle se présente soit en agrégats difficiles à identi-
fier, soit en tablettes authigènes bien décrites par Antun
(1953). Ces tablettes se seraient formées dans les bancs
de grès du Trias inférieur et moyen.

Les cortèges minéralogiques sont également accompa-
gnés de débris de minéraux opaques, aussi nombreux que
les minéraux transparents.

L'étude morphologique des grains apporte d'autres
renseignements : les minéraux sont, dans la majorité des
cas, usés et altérés à des degrés plus ou moins élevés.
Ainsi, la tourmaline se présente plutôt sous forme de
grains franchement ovoïdes, sinon en prismes usés,
tandis que le zircon apparaît sous forme de grains ronds
et sales qui coexistent avec des prismes peu ou pas usés,
transparents, plus ou moins zonés (jusqu'à 10 %).

Ce matériel a très certainement subi plusieurs cycles
de transport et des processus d'altération, de sorte qu'il
ne subsiste actuellement que des minéraux « résistants »
(zircon) et peu altérables (tourmaline, oxydes de titane).
Remarquons que le pourcentage de zircon, dans les frac-
tions fines (C), égalise dans un seul échantillon celui de
la tourmaline à Gogney 3 et le surpasse à Tanconville.

Les spectres minéralogiques des sables des cônes de
piedmont constitué à >90% de tourmaline et de zircon,
indiquent ainsi que les dépôts de piedmont sont issus en
quasi-totalité des formations du Buntsandstein des
Vosges du Nord, sans qu'il soit possible de distinguer
précisément les sources et les différentes phases d'ap-
ports. Compte tenu du fort degré d'altération des miné-
raux, l'absence initiale d'un faible pourcentage de
minéraux fragiles issus du socle vosgien n'est toutefois
pas démontrée.

4.3 - LES BASSES TERRASSES ET LE FOND DE VALLÉE DE LA SARRE FRANÇAISE

Sur les affleurements de la Lettenkohle et du Keuper,
les formations alluviales les plus basses de la Sarre y
sont particulièrement bien préservées. Elles présentent
un système étagé comprenant le fond de vallée et les
basses terrasses (fig. 7a, b, Harmand, 2007a, b).

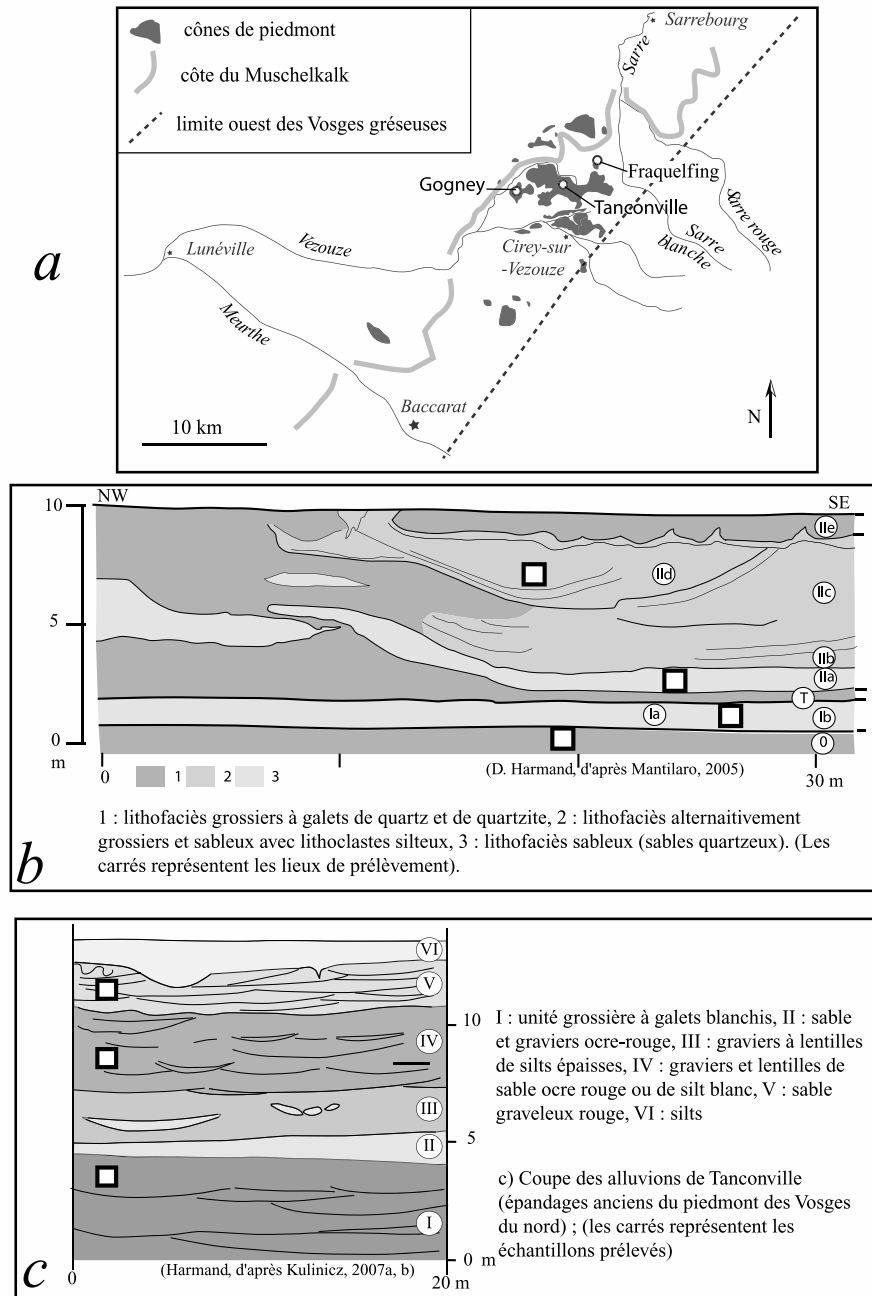


Fig. 5 : Carte de localisation des cônes du piedmont des Vosges du nord (a) et coupes de Gogney (b) et de Tanconville (c).
Fig. 5: Location map of the cones of the Northern Vosgian piedmont (a). Gogney (b) and Tanconville (c) sections.

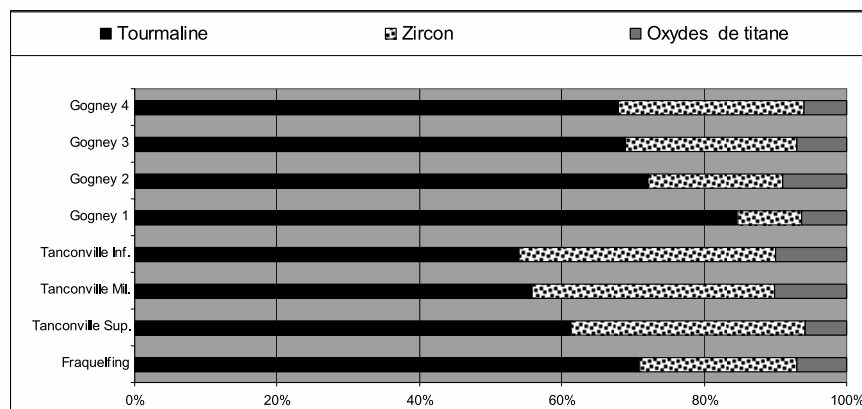


Fig. 6 : Composition minéralogique des cônes du piedmont des Vosges du nord.
Fig. 6: Mineral spectra of the cones of the Northern Vosgian piedmont.

	Minéraux Lourds	Tourmaline	Zircon	Grenat	Rutile	Anatase	Brookite	Sphène	Staurolite	Disthène	Andalousite	Epidote	Amphibole	Pyroxène	TOTAL	Gp mélaémorph.	Oxydes de titane
Gogney 1	B	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100	0	0
	% B	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100	0	0
	C	44	12	0	4	4	0	0	0	0	0	0	0	0	64	0	8
	% C	69	19	0	6	6	0	0	0	0	0	0	0	0	100	0	13
	Moy %	84	9	0	3	3	0	0	0	0	0	0	0	0	100	0	6
Gogney 2	B	80	2	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	84	0	2
	% B	95	2	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100	0	2
	C	44	33	0	1	13	0	0	0	0	0	0	0	0	91	0	14
	% C	48	36	0	1	14	0	0	0	0	0	0	0	0	100	0	15
	Moy %	72	19	0	2	7	0	0	0	0	0	0	0	0	100	0	9
Gogney 3	B	120	2	0	4	2	0	0	0	0	0	0	0	0	128	0	6
	% B	94	2	0	3	2	0	0	0	0	0	0	0	0	100	0	5
	C	27	28	0	2	4	0	0	0	0	0	0	0	0	61	0	6
	% C	44	46	0	3	7	0	0	0	0	0	0	0	0	100	0	10
	Moy %	69	24	0	3	4	0	0	0	0	0	0	0	0	100	0	7
Gogney 4	B	100	4	0	2	3	0	0	0	0	0	0	0	0	109	0	5
	% B	94	3	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	100	0	3
	C	40	46	0	4	4	0	0	0	0	0	0	0	0	94	0	8
	% C	43	49	0	4	4	0	0	0	0	0	0	0	0	100	0	9
	Moy %	68	26	0	2	4	0	0	0	0	0	0	0	0	100	0	6
Tanconville Inf.	B	100	7	0	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	111	0	4
	% B	90	6	0	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	100	0	4
	C	11	41	0	6	4	0	0	0	0	0	0	0	0	62	0	10
	% C	18	66	0	10	6	0	0	0	0	0	0	0	0	100	0	16
	Moy %	54	36	0	6	4	0	0	0	0	0	0	0	0	100	0	10
Tanconville Mil.	B	100	4	0	2	3	0	0	0	0	0	0	0	0	109	0	5
	% B	92	4	0	2	3	0	0	0	0	0	0	0	0	100	0	5
	C	23	73	0	4	14	0	0	0	0	0	0	0	0	114	0	18
	% C	20	64	0	4	12	0	0	0	0	0	0	0	0	100	0	16
	Moy %	56	34	0	3	8	0	0	0	0	0	0	0	0	100	0	10
Tanconville Sup.	B	140	6	0	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	149	0	3
	% B	94	4	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	100	0	2
	C	18	39	0	2	4	0	0	0	0	0	0	0	0	63	0	6
	% C	29	62	0	3	6	0	0	0	0	0	0	0	0	100	0	10
	Moy %	61	33	0	2	4	0	0	0	0	0	0	0	0	100	0	6
Fraquelfing	B	200	4	0	4	4	0	0	0	0	0	0	0	0	212	0	8
	% B	94	2	0	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	100	0	4
	C	41	36	0	4	6	0	0	0	0	0	0	0	0	87	0	10
	% C	47	41	0	5	7	0	0	0	0	0	0	0	0	100	0	16
	Moy %	71	22	0	3	4	0	0	0	0	0	0	0	0	100	0	8

Tab. 3 : Composition minéralogique des cônes du piedmont des Vosges du nord.

Tab. 3: Mineral spectra of the cones of the Northern Vosgian piedmont.

L'étude minéralogique des alluvions prélevées au Sud de Sarralbe, sur les sites de Keskastel (2 échantillons), Birken (1 échantillon), Harskirchen (2 échantillons) et Schopperten (1 échantillon) avait pour but d'une part de définir le spectre minéralogique des alluvions de la Sarre (comme cela a été fait récemment pour la Moselle et la Meurthe), et d'autre part de déceler d'éventuelles variations du spectre minéralogique susceptibles d'établir l'existence de plusieurs nappes au sein d'une même terrasse alluviale (notamment pour la basse terrasse de +10 m).

Cependant, les cortèges de minéraux lourds apparaissent très homogènes (tab. 2, fig. 8) :

- la tourmaline est majoritaire surtout dans la fraction grossière (0,315 - 0,160 mm) ;
- le zircon, le rutile et l'anatase sont essentiellement présents dans la fraction fine (0,160 - 0,040 mm). Les

anatases authigènes sont fréquentes. Des anatases authigènes ont été observées aussi bien dans ces alluvions que dans les cônes de piedmont. Elles se seraient formées dans les bancs de grès du Trias inférieur et moyen (Antun, 1953).

Les analyses minéralogiques confirment ainsi que les sables sont issus directement des grès du Buntsandstein. Les résultats sont à rapprocher de ceux qui concernent les cônes de piedmont dont l'identité de faciès est tout à fait comparable.

En conclusion, dans les formations alluviales de la Sarre, les spectres minéralogiques, monotones, sont homogènes. Il apparaît donc impossible d'établir une distinction entre plusieurs formations alluviales. Le contenu en minéraux lourds du matériel alluvial est par ailleurs comparable à celui des cônes de piedmont constitué surtout d'ubiquistes en provenance de la

couverture gréseuse du Massif vosgien, similitude liée au fait que les formations du substratum d'origine semblent les mêmes.

4.4 - LES TERRASSES DE LA BASSE VALLÉE DE LA SARRE

Quatre échantillons ont été prélevés dans la formation alluviale de la terrasse située à environ 60 m d'altitude relative, à la confluence de la Sarre et de la Prims, près de la localité de Diefflen (fig. 9). Cette vaste terrasse de

3 km de largeur a été rapportée à «l'Horizon D» des auteurs allemands et notée comme telle sur les cartes géologiques du Land de Sarre (Fischer, 1957; Harmand, 2007b). Elle est constituée par des unités fluviales d'une dizaine de mètres de puissance alternativement sableuses et grossières recouvertes de 3 m de lœss (Zöller, 1985; Serrat & Harmand, 2007b).

Les minéraux transparents sont noyés dans des proportions d'opaques de l'ordre de 80 %, malgré les nombreux traitements opérés avant le montage des lames.

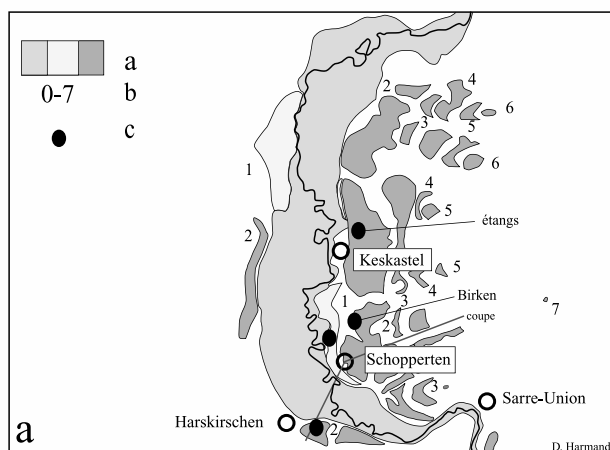
Les cortèges de minéraux lourds (tab. 4a, fig. 10) en provenance des grès du Buntsandstein qui affleurent dans le bassin-versant de la Prims et du socle schisteux et quartzitique de l'Hunsrück, se composent à 80 % d'ubiquistes. La part des oxydes de titane est comprise entre 6 et 13 %. Le groupement métamorphique est bien illustré par les grains de staurolite (maximum 7 %), de grenat (2 % à 3 %) et d'épidote (1 % à 2 %). Les grains d'amphibole sont de couleur vert foncé à vert pâle, avec une extinction de 12° à 34°. Ces amphiboles vertes représentent quant à elles entre 1 % et 4 % du total.

Les minéraux lourds sont originaires du Massif schisteux rhénan et du bassin de Sarre-Nahe que drainent les deux rivières (Sarre et Prims).

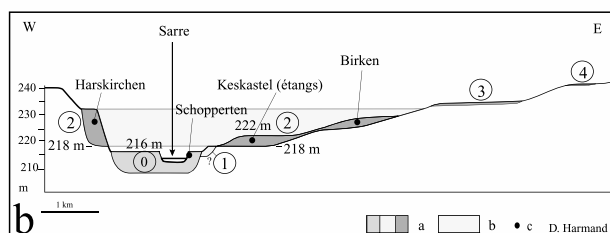
Ces résultats peuvent être comparés avec ceux obtenus par les auteurs allemands le long de la vallée de la Sarre pour les alluvions de «l'Horizon D» (en particulier à Diefflen), ainsi que pour les formations alluviales plus récentes.

Le tableau 4b montre que les résultats obtenus sur la terrasse principale à Mechern et à Serrig (Fischer, 1957) sont très proches de ceux de Diefflen (tab. 4a), même s'ils diffèrent par la présence de pyroxènes. Il est difficile de dire si les échantillons étudiés à Diefflen en étaient dépourvus à l'origine.

Quoiqu'il en soit, la véritable rupture minéralogique des auteurs allemands se situe postérieurement au dépôt des alluvions de «l'Horizon D», puisque les alluvions des terrasses moyennes et récentes (C, B, A, fig. 9) ont un spectre minéralogique beaucoup plus diversifié (tab. 4b). Ce dernier se caractérise notamment par l'abondance du pyroxène (à Fitten sur la moyenne terrasse, et à



a : formations alluviales, 1-7 : numéros des terrasses (0 : fond de vallée, 1 : très basse terrasse, 2 : basse terrasse, 3 à 7 : moyennes terrasses), c : prélèvements



a : formations alluviales (0 : fond de vallée, 1 : très basse terrasse, 2 : basse terrasse, 3 : moyenne terrasse inférieure, 4 : moyenne terrasse supérieure), b : enveloppe des alluvions de la basse terrasse, c : prélèvements

Fig. 7 : Carte de localisation (a) et dispositif alluvial schématisé de la vallée de la Sarre supérieure (Keskastel) (b).

Fig. 7: Location map and schematic cross-section of alluvial terraces of the upper Sarre valley (Keskastel).

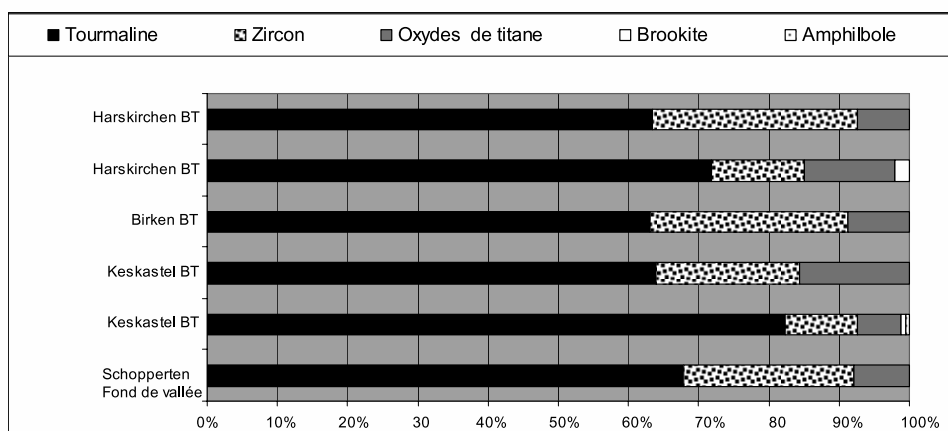


Fig. 8 : Composition minéralogique des basses terrasses et du fond de vallée de la Sarre française (Keskastel).

Fig. 8: Mineral spectra of the lower terraces and the alluvial plain of the Sarre River Valley in France (Keskastel).

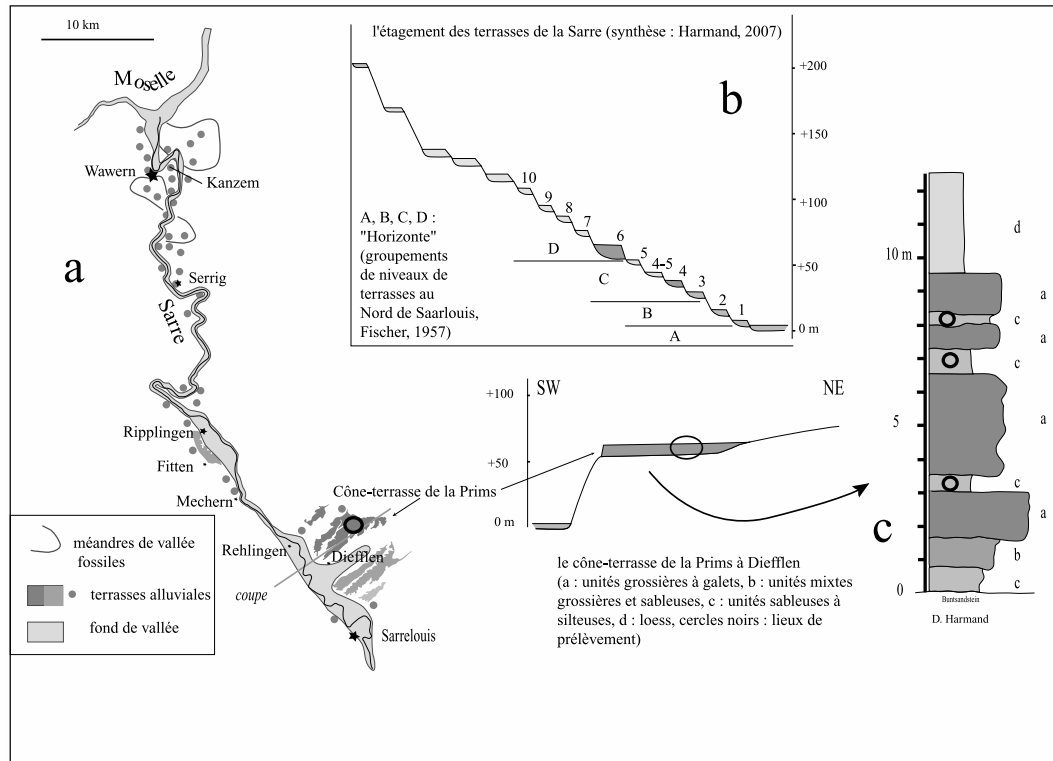


Fig. 9 : Carte de localisation (a), dispositif alluvial de la vallée de la Sarre inférieure (b) et coupe du cône terrasse de la Prims à Diefflen (c).
 Fig. 9: Location map (a), schematic cross-section of the alluvial terraces of the lower Sarre valley (b) and cross-section of the cone-terrace of the Prims at Diefflen (c).

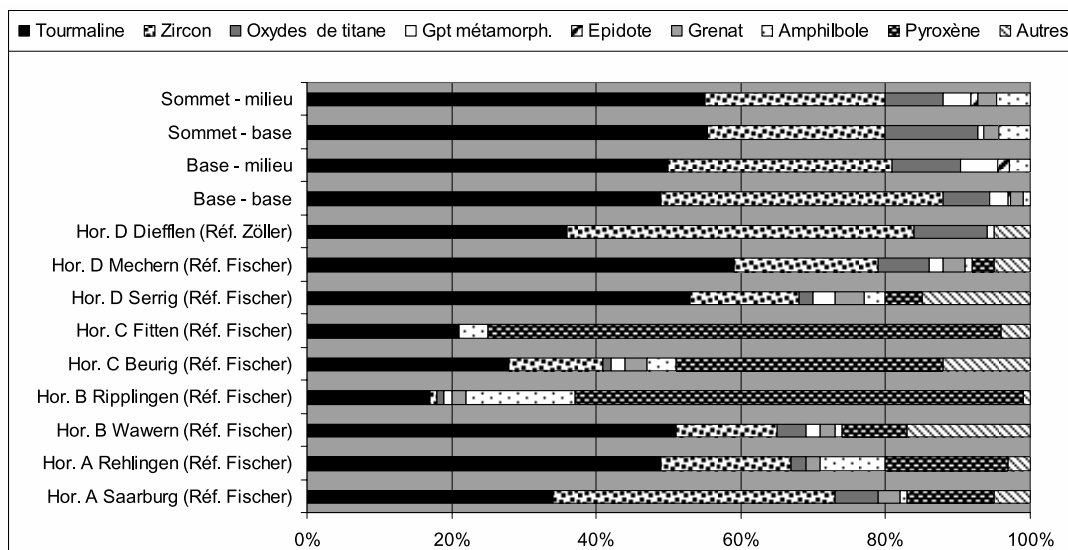


Fig. 10 : Composition minéralogique du cône-terrace de la Prims à Diefflen (Saarland).
 Fig. 10: Mineral spectra of the cone-terrace of the Prims at Diefflen (Saarland).

Ripplingen, sur la basse terrasse) et dans une moindre mesure de l'amphibole (à Ripplingen) (Fischer, 1957).

Les minéraux volcaniques présents surtout dans les formations alluviales les plus basses de la Sarre inférieure (fond de vallée, basses et moyennes terrasses), proviennent des vulcanites permienues (« Saar-Nahe Augit », Zöller, 1985) et éventuellement des éruptions quaternaires de l'Eifel marquées habituellement par l'association augite, hornblende, titane (Zöller, 1985). Leur absence ou leur rareté dans les formations des terrasses

les plus élevées est à mettre au compte d'une altération plus ou moins prononcée.

4.5 - LA MOSELLE ALLEMANDE

Les travaux de Cordier *et al.* (2004, 2005, 2006) ont montré que dans le Massif schisteux rhénan, en aval de Trèves, le dispositif alluvial avait enregistré la capture de la Haute Moselle réalisée à plus de 100 km en amont dans la région de Toul. C'est en particulier le cas dans le

		Minéraux Lourds																
		Tourmaline	Zircon	Grenat	Rutile	Anatase	Brookite	Sphène	Staurolite	Disthène	Andalousite	Epidote	Amphibole	Pyroxène	TOTAL	Gpt métamorph.	Oxydes de titane	
Coupe Sommet éch. milieu	B	35	3	2	2	0	0	0	5	0	0	0	2	0	49	5	2	
	% B	71	6	4	4	0	0	0	10	0	0	0	4	0	100	4	1	
	C	35	44	1	11	2	3	0	4	0	0	2	5	0	107	4	16	
	% C	33	41	1	10	2	3	0	4	0	0	2	5	0	100	3	14	
	Moy %	52	24	3	7	1	1	0	7	0	0	1	4	0	100	4	8	
Coupe Sommet éch. base	B	60	3	2	5	0	0	0	1	0	0	0	4	0	75	1	5	
	% B	80	4	3	7	0	0	0	1	0	0	0	5	0	100	1	4	
	C	46	66	2	21	2	3	0	1	0	0	0	5	0	146	1	26	
	% C	32	45	1	14	1	2	0	1	0	0	0	3	0	100	1	22	
	Moy %	56	25	2	11	1	1	0	1	0	0	0	4	0	100	1	13	
Coupe Base éch. milieu	B	110	8	0	5	1	0	0	9	0	0	0	3	0	136	9	6	
	% B	81	6	0	4	1	0	0	7	0	0	0	2	0	100	7	4	
	C	22	65	0	13	3	1	0	4	0	0	4	4	0	116	4	17	
	% C	19	56	0	11	3	1	0	3	0	0	3	3	0	100	3	15	
	Moy %	50	31	0	7	2	0	0	5	0	0	2	3	0	100	5	10	
Coupe Base éch. base	B	41	9	2	4	0	0	0	4	0	0	0	0	0	60	4	4	
	% B	68	15	3	7	0	0	0	7	0	0	0	0	0	100	3	3	
	C	29	68	0	9	1	1	0	2	0	0	1	2	0	113	2	11	
	% C	26	60	0	8	1	1	0	2	0	0	1	2	0	100	2	9	
	Moy %	47	38	2	7	0	0	0	4	0	0	0	1	0	100	2	6	

Tab. 4a : composition minéralogique du cône-terrasse de la Prims à Diefflen

	Minéraux Lourds	Tourmaline	Zircon	Oxydes de titane	Gpt métamorph.	Epidote	Grenat	Amphibole	Pyroxène	Autres	TOTAL
D'après Beiner M. (2007)											
Sommet - milie	52	24	8	4	1	3	4	0	0	100	
Sommet - base	56	25	13	1	0	2	4	0	0	100	
Base - milieu	50	31	10	5	2	0	3	0	0	100	
Base - base	47	38	6	2	0	2	1	0	0	100	
D'après Zöller L. (1985)											
Horizont D Diefflen	36	48	10	1	0	0	0	0	5	100	
D'après Fischer F. (1957)											
Horizont D Mechern	59	20	7	2	0	3	1	3	5	100	
Horizont D Serrig	53	15	2	3	0	4	3	5	15	100	
Horizont C Fitten	21	0	0	0	0	0	4	71	4	100	
Horizont C Beurig	28	13	1	2	0	3	4	37	12	100	
Horizont B Ripplingen	17	1	1	1	0	2	15	62	1	100	
Horizont B Wawern	51	14	4	2	0	2	1	9	17	100	
Horizont A Rehlingen	49	18	2	0	0	2	9	17	3	100	
Horizont A Saarburg	34	39	6	0	0	3	1	12	5	100	

Tab. 4b : composition minéralogique des terrasses de la Sarre inférieure
(comparaison avec les auteurs allemands)

Tab. 4 : Composition minéralogique des terrasses de la Sarre inférieure (Allemagne) ; a : composition minéralogique du cône-terrasse de la Prims à Diefflen (Land de Sarre) ; b : composition minéralogique des terrasses de la Sarre inférieure (comparaison avec les auteurs allemands).
Table 4 : Mineral spectra of the alluvial terraces of the lower Sarre valley in Germany; a : mineral spectra of the cone-terrace of the Prims at Diefflen (Saarland); b : mineral spectra of the alluvial terraces of the lower Sarre valley (comparison with the German authors).

«bassin alluvial de Detzem-Piesport» où sont conservées les formations de huit basses et moyennes terrasses notées de M1 à M8 (fig. 11a). Les alluvions les plus basses postérieures à la terrasse M4 sont plus riches en minéraux issus du socle vosgien (grenat et amphibole) que les alluvions plus anciennes.

Les analyses effectuées ici avaient en fait deux objectifs. Tout d'abord, il était nécessaire de préciser la composition minéralogique des alluvions situées au-dessus des moyennes terrasses, notamment sur les terrasses principales, vastes terrasses situées entre 100 et 150 m d'altitude relative (fig. 11a) et recouvertes de formations épaisses (parfois plus de 10 m, Negendank, 1983). Le choix a porté sur le site d'Oberheide (à 150 m d'altitude relative) où les alluvions sont actuellement exploitées en carrière (fig. 11b).

Il était également nécessaire de préciser la part des minéraux véritablement issus du Massif vosgien parmi

les grains d'amphibole et de grenat, minéraux les plus représentatifs. (La proportion de grenat et d'amphibole est comprise entre 24 et 38 % dans les alluvions de la terrasse M3 postérieure à la capture de la Haute Moselle, contre 3 à 17 % dans les formations des terrasses M4 et M5 anté-capture, Cordier *et al.*, 2005, 2006). Il s'agissait donc d'évaluer la part des apports du Massif schisteux dans les alluvions des terrasses de la Moselle inférieure à partir des alluvions de la moyenne terrasse située à Urzig, localité se trouvant en aval des confluences entre la Moselle et ses principaux affluents issus de l'Eifel (Sûre, Our, Kyll, Salm, Lieser) et de l'Hunsrück.

L'échantillon (1) prélevé dans les sables situés à la base de la coupe de Oberheide (tab. 5, fig. 12) a pour originalité, même s'il comporte plus de 70 % d'ubiquistes, de présenter un pourcentage notable de minéraux de métamorphisme avec l'andalousite (2 %), la staurolite (1 %),

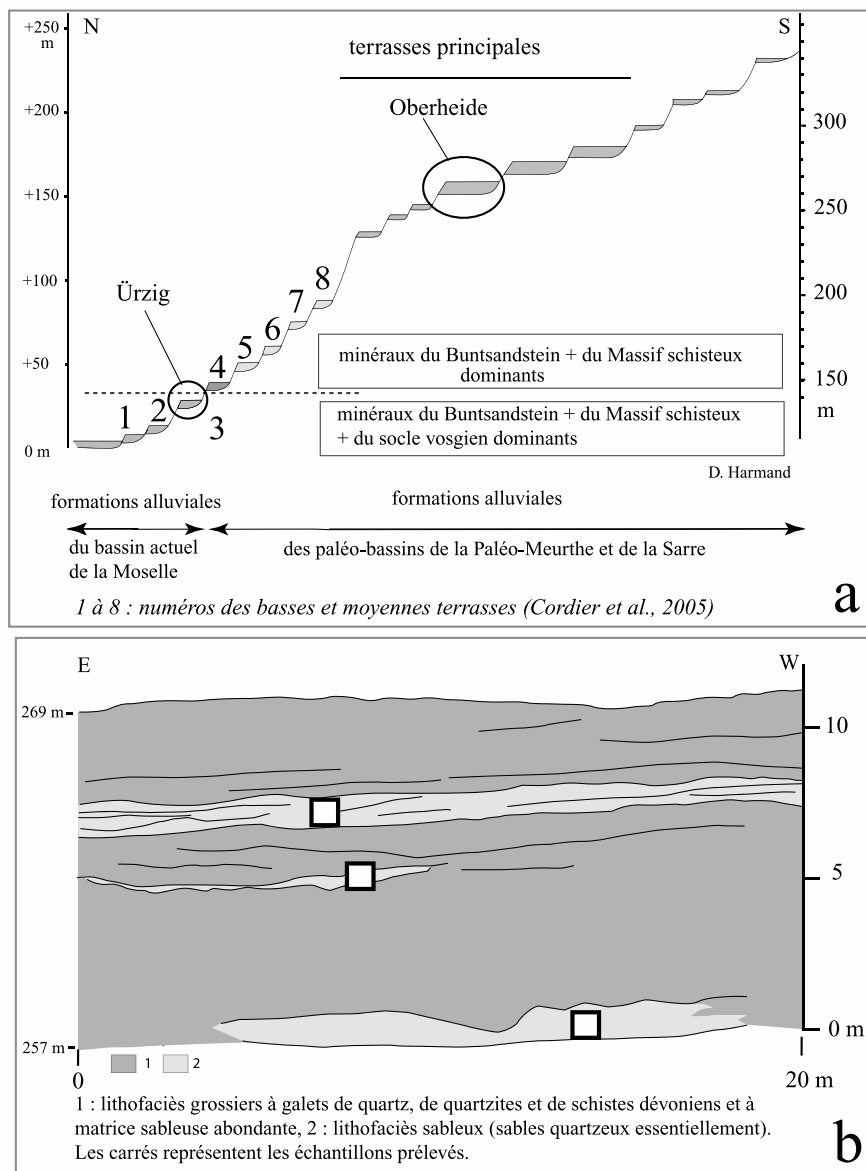


Fig. 11 : Le dispositif alluvial de la vallée de la Moselle en aval de Trèves (a) et coupe schématique de la coupe de la terrasse principale de Oberheide (b).

Fig. 11: Schematic cross-section of the alluvial terraces of the Mosel valley downstream Trier (a) and section of the Oberheide "Main terrace" (b).

		Minéraux Lourds	Tourmaline	Zircon	Grenat	Rutile	Anatase	Brookite	Sphène	Staurolite	Disthène	Andalousite	Epidote	Amphibole	Pyroxène	TOTAL	Gpt métamorph.	Oxydes de titane
Oberheide SE 1 (ante)	B		18	3	2	6	2	0	0	0	0	0	3	9	0	43	0	8
	% B		42	7	5	14	5	0	0	0	0	0	7	21	0	100	0	19
	C		8	45	3	10	0	1	0	2	0	4	12	18	0	103	6	11
	% C		8	44	3	10	0	1	0	2	0	4	12	17	0	100	6	11
	Moy %		25	25	4	12	2	0	0	1	0	2	9	19	0	100	3	15
Oberheide SE 2 (ante)	B		120	3	0	6	0	0	0	3	0	3	0	3	0	138	6	6
	% B		87	2	0	4	0	0	0	2	0	2	0	2	0	100	4	4
	C		38	50	3	9	3	1	0	7	0	0	9	8	0	128	7	13
	% C		30	39	2	7	2	1	0	5	0	0	7	6	0	100	5	10
	Moy %		58	21	1	6	1	0	0	4	0	1	4	4	0	100	5	7
Oberheide SE 3 (ante)	B		58	1	0	4	0	3	0	2	0	0	0	4	0	72	2	7
	% B		81	1	0	6	0	4	0	3	0	0	0	6	0	100	3	10
	C		45	43	0	3	0	1	0	1	0	0	8	12	0	113	1	4
	% C		40	38	0	3	0	1	0	1	0	0	7	11	0	100	1	4
	Moy %		60	20	0	4	0	3	0	2	0	0	4	8	0	100	2	7
Urzig (post)	B		45	4	9	3	2	2	2	5	0	1	0	63	27	163	6	7
	% B		28	2	6	2	1	1	1	3	0	1	0	39	17	100	4	4
	C		15	101	8	8	1	0	1	3	0	0	0	18	11	166	3	9
	% C		9	61	5	5	1	0	1	2	0	0	0	11	7	100	2	5
	Moy %		18	32	5	3	1	1	1	2	0	0	0	25	12	100	3	5

Tab. 5a : composition minéralogique des alluvions de la terrasse principale de Oberheide et de la moyenne terrasse post-capture de Urzig

	Minéraux Lourds	Tourmaline	Zircon	Grenat	Rutile	Anatase	Brookite	Sphène	Staurolite	Disthène	Andalousite	Epidote	Amphibole	Pyroxène	TOTAL	Gpt métamorph.	Oxydes de titane
Urzig (M3)		18,5	32	4,6	4	0,9	0	1,2	1,8	0	0,3	0	24,9	11,7	100	3,5	7,7
Thornich (M3)		23,3	16,8	22	2,62	0	0,2	0,4	1,7	0	0,9	0	7,32	24,6	99,95	2,6	2,8
Detzen (M3)		25,5	19,5	29	4,03	0,3	0	0	2,1	0	0	0,23	7,26	12,2	99,94	1,6	3,2
Köwerich (M4)		46,5	21,5	3,5	5	1	0,5	0	2	0	0	0	3,5	16,5	100	2	6,5
Niederemmel (M5)		15	11	13	2	0	0	0	1	0	0	0	3	54	100	1	2
Auf der Teichen (M6)		39,4	35,7	4,3	8,5	1	0,5	1	2	0	0	1	4,3	2,5	100	2	2
Oberheide (terrasse pale)		47,66	22	1,7	7,33	0,7	1	0	2,3	0	1	5,66	10,3	0	99,63	3,3	9,7

nb
échantillons

Tab. 5b : composition minéralogique du bassin de Detzem-Piesport

Tab. 5 : Composition minéralogique des formations alluviales de la vallée de la Moselle en aval de Trèves ; a : composition minéralogique des alluvions de la terrasse principale ante-capture de Oberheide et de la moyenne terrasse inférieure post-capture de Urzig ; b : composition minéralogique des alluvions du bassin de Detzem-Piesport (synthèse).

Tab. 5: Mineral spectra of the alluvial terraces of the Mosel valley downstream Trier; a: mineral spectra of Oberheide "Main ante-capture terrace" and Urzig "Post-capture terrace"; b: mineral spectra of the alluvial terraces of the Detzem-Piesport basin (synthesis).

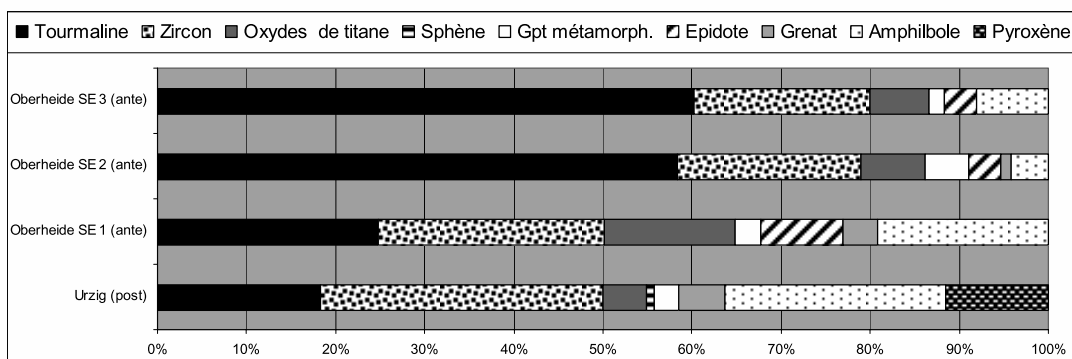


Fig. 12 : Composition minéralogique des formations alluviales de la vallée de la Moselle en aval de Trèves : la terrasse principale de Oberheide et la moyenne terrasse inférieure de Urzig.

Fig.12: Mineral spectra of the alluvial terraces of the Mosel valley downstream Trier: the Main terrace at Oberheide and the lower middle terrace at Urzig.

le grenat (4 %), l'épidote (9 %) et surtout l'amphibole (19 %). Les cristaux d'amphibole sont en général verts, minces, « abîmés », portant les marques de leur âge ancien ; une partie d'entre eux (~15 %) est de couleur brun foncé, à pléochroïsme prononcé et de type volcanique. Aucune amphibole « vosgienne » n'a été observée.

Les échantillons prélevés dans les bancs situés vers le milieu (2) et le sommet de la coupe (3) ont un peu plus d'ubiquistes et un peu moins d'amphiboles (4% à 8 %) que celui de l'échantillon n°1 (tab. 5, fig. 12).

Les sables de la moyenne terrasse (M3) d'Urzig comportent de nombreuses espèces et de très beaux minéraux denses frais (tab. 5, fig. 12). Par rapport aux échantillons précédents, le spectre minéralogique d'Urzig contient un pourcentage faible d'ubiquistes avec 18 % de tourmaline, 32 % de zircon et 2 % d'oxydes de titane. En revanche, les grains d'amphiboles sont abondants (25 %) et les pyroxènes (12 %) sont représentés par des augites vertes et brunes. Les 81 grains d'amphibole observés dans les fractions de cet échantillon se répartissent ainsi : 34 amphiboles vertes, communes, 35 amphiboles brun vert « vosgiennes » et 12 amphiboles brun foncé basaltiques. La présence dans cet échantillon d'un bon tiers d'amphiboles d'origine vosgienne et de 5 % de grenat, démontre que le dépôt est postérieur à la capture de la Haute-Moselle réalisée à Toul. Par conséquent, les minéraux marqueurs de cette capture se retrouvent à une grande distance en aval de Toul, dans une région marquée pourtant par les nombreuses confluences entre la Moselle et ses affluents issus de l'Eifel et de l'Hunsrück.

En conséquence, que ce soit à Oberheide ou à Urzig, les minéraux lourds observés sont majoritairement issus d'apports proximaux de l'Hunsrück, de l'Eifel ou du Bassin de Sarre-Nahe. Le Massif schisteux rhénan et sa couverture permienne ont donc fourni l'essentiel des cortèges : ubiquistes, minéraux de métamorphisme, grenats, épidotes, amphiboles vertes communes. Il est possible qu'à Urzig, une partie des pyroxènes et des amphiboles soit issue du volcanisme de l'Eifel.

Les spectres minéralogiques de Oberheide et de Urzig complètent donc les analyses minéralogiques effectuées dans le bassin de Detzem-Piesport (Cordier *et al.*, 2004, 2005, 2006) (tab. 5, fig. 12).

Tout d'abord, les spectres de la terrasse principale (Oberheide) sont comparables à ceux des moyennes terrasses (M4 à M6) mises en place avant la capture de la Haute Moselle. Pour tous ces dépôts, la part de l'association tourmaline-zircon est élevée (environ 70 % pour la terrasse principale et respectivement 68 et 75 % pour les terrasses M4 et M6), la part de l'association grenat - amphibole est faible (respectivement 12% à Oberheide et de 7 à 16 % pour les terrasses M4 à M6). Les spectres minéralogiques de Urzig sont, quant à eux, comparables aux terrasses post-capture, notamment aux autres dépôts de la terrasse M3. L'association tourmaline-zircon représente au maximum 50 % du total dans tous les dépôts de la moyenne terrasse M3, tandis que le pourcentage de l'association grenat - amphibole y est plus

élevé et s'élève de 29 % à 36 %. (Il est à noter que la part d'amphiboles d'origine vosgienne n'atteint que 43 % du total des amphiboles à Urzig). Dans les alluvions post-capture, la part du pyroxène est notable, s'élevant de 12 % à 24 %. Mais ce dernier minéral est toutefois moins discriminant puisque sa part peut atteindre des valeurs élevées dans des dépôts antérieurs à la capture de la Haute Moselle, comme à Köwerich sur la terrasse M4 (16,5 %) ou plus encore à Niederremmel sur la terrasse M5 (54 %).

Quant au rutile et à l'épidote, ils peuvent être présents dans les alluvions des quatre groupes de terrasses. C'est d'ailleurs à la base des alluvions de la terrasse principale d'Oberheide (1) que la part des deux minéraux y est la plus élevée représentant 12 % pour le rutile et 9 % pour l'épidote.

5 - CONCLUSION

Cette nouvelle étude des minéraux lourds de la fraction sableuse de dépôts et alluvions quaternaires des bassins versants de la Moselle, de la Meurthe et de la Sarre contribue à mieux caractériser et différencier ces dépôts et alluvions.

À l'amont des bassins versants, dans les Vosges, les minéraux lourds d'un till de fond (Trou de l'Enfer) et, moins nettement, d'un till d'ablation (Pré J'Espère) sont diversifiés et en bon état, même lorsqu'il s'agit d'amphiboles et de biotites pourtant considérées comme altérables. Ceci indique une érosion mécanique du socle vosgien par le glacier et un transport fluvioglaciaire limité à des distances courtes comprises de quelques mètres à quelques kilomètres. Cette origine mécanique à partir d'un substrat sain est confirmée par l'abondance de grains cassés et de fragments de roches opaques.

En revanche, les minéraux lourds des dépôts de marge glaciaire (hors till) de la moraine composite du Pré J'Espère sont peu diversifiés, avec une majorité de tourmaline et de zircon résistants aux actions chimiques et mécaniques conjuguées. Bien qu'une altération chimique diagénétique additionnelle ne puisse être exclue, cette pauvreté des cortèges minéralogiques est attribuée à deux facteurs. D'une part, les minéraux lourds sont issus d'altérites du socle vosgien dont la diversité est appauvrie par altération chimique et, en faible proportion, des grès du Buntsandstein dont le contenu est peu diversifié. D'autre part, les matériaux ont subi plusieurs phases de transport par le glacier et par les eaux de fonte glaciaire dont l'action mécanique a détruit les minéraux fragiles et altérés.

Les minéraux lourds des épandages de piedmont du versant lorrain en provenance de la Sarre Blanche et de la Vezouze sont tout à fait homogènes et peu diversifiés. Seuls les minéraux stables (zircon, anatase, rutile) et résistants (tourmaline) sont identifiables. Les grains sont souvent arrondis et pas toujours transparents. Ce spectre s'explique par le fait que le matériel est issu presque exclusivement des grès et conglomérats du Buntsandstein. De plus, l'origine probablement fluvioglaciaire et l'âge des épandages qui datent au moins de la fin du

Glaciaire Elstérien-Mindel (stade isotopique 12 ?) impliquent une forte action mécanique pendant la sédimentation, telle qu'observée dans les dépôts du Pré J'Espère, et une altération chimique post-sédimentaire des rares matériaux issus du socle, suggérée par la forte altération des galets de quartzite des épandages.

Les minéraux lourds des alluvions des moyennes et basses terrasses des vallées de la Haute-Moselle et de la Meurthe, en Lorraine, sont nettement plus diversifiés que ceux des épandages de piedmont et des dépôts de marge glaciaire du Pré J'Espère. Ils proviendraient de matériaux issus en majorité d'une action mécanique (débris glaciaires et dépôts de versant). On remarque qu'à l'intérieur d'un même bassin versant, les spectres minéralogiques des moyennes et des basses terrasses montrent peu de différences entre des terrasses d'âges différents, ce qui indique une faible altération diagénétique depuis la mise en place des alluvions.

Dans les vallées du Massif schisteux rhénan, les minéraux lourds des alluvions sont plus diversifiés. Les spectres minéralogiques des terrasses les plus élevées de la Sarre et de la Prims («Horizont D», Fischer, 1957) sont dominés par la tourmaline, le zircon et les oxydes de titane. La présence notable d'amphibole verte, de grenat et de staurolite prouve que ces espèces, plus altérables que les ubiquistes, ont résisté à l'altération. Ainsi, à Oberheide, dans la vallée de la Moselle inférieure, les alluvions de la Terrasse principale peuvent contenir jusqu'à 19 % d'amphibole et ont conservé de l'épidote. Cette diversité peut signifier un moindre transit des sédiments que dans les hautes vallées de Lorraine.

Dans les alluvions d'Urzig, associées à une terrasse postérieure à la capture de la Haute Moselle, les espèces sont encore plus diversifiées, avec la présence de pyroxène d'origine volcanique, et en proportions équilibrées. Les minéraux lourds sont bien conservés.

Ces résultats montrent que les alluvions de la Sarre inférieure et de la Moselle allemande proviennent de plusieurs sources : du socle dévonien du Massif schisteux rhénan et des formations sédimentaires et volcaniques permienes du bassin de Sarre-Nahe, des formations gréseuses et conglomératiques du Buntsandstein et, dans le cas de la vallée de la Moselle, du socle vosgien. Les alluvions des moyennes et basses terrasses de la Sarre et de la Moselle ont des cortèges plus diversifiés que ceux des plus hautes terrasses où les minéraux les plus fragiles ont été en général altérés. Cette plus grande diversité s'applique notamment aux formations postérieures à la capture de la Haute Moselle.

Ces nouvelles données renforcent les connaissances sur les formations fluviales et fluvio-glaciaires de l'Est du bassin de Paris et de ses bordures. Elles permettent, en particulier, de retrouver la rupture minéralogique correspondant à la capture de la Haute Moselle, de mettre en évidence des apports locaux associés au volcanisme, et de souligner les différences minéralogiques liées à l'âge des alluvions, différences que l'on ne pouvait pas mettre en évidence en France faute de données sur les hautes terrasses.

Enfin, elles montrent que l'étude des minéraux lourds apporte des informations exclusives et originales sur les matériaux d'origine, sur l'ampleur du transport et des processus d'altération antérieurs et postérieurs à la sédimentation.

Les auteurs remercient J.-F. Pastre et R. Etienne pour la relecture de cet article et leurs critiques constructives et minutieuses.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ANTUN P., 1953** - Les associations de minéraux denses du Mésozoïque luxembourgeois. *Annales de la Société Géologique de Belgique*, **76**, 249-271.
- BONNEFONT J.-C., 1986** - Les cailloutis anciens du piedmont occidental des Vosges et leur signification géomorphologique. *Revue Géographique de l'Est*, **26** (1-2), 71-80.
- BUSTAMANTE SANTA CRUZ L., 1976** - L'évolution plio-pléistocène du bassin mosan d'après ses minéraux lourds. *Revue de Géographie Physique et de Géologie dynamique*, **18** (4), 291-300.
- CORDIER S., 2004** - *Les niveaux alluviaux quaternaires de la Meurthe et de la Moselle entre Baccarat et Coblence : étude morphosédimentaire et chronostratigraphique, incidences climatiques et tectoniques*. Thèse de Géographie physique, Université de Paris XII, 287 p.
- CORDIER S., HARMAND D., & BEINER M., 2002a** - Les alluvions anciennes de la Meurthe en Lorraine sédimentaire (Est du bassin de Paris) : étude morphosédimentologique et essai de reconstitution paléoclimatique. *Revue Géographique de l'Est*, **42** (4), 197-218.
- CORDIER S., HARMAND D., LOSSON B., & BEINER M., 2002b** - Pleistocene accretion in the eastern Paris basin: lithofacies and incision rhythms in the Meurthe and Moselle valleys. *Livret des résumés*, Fluvial Archives Group (F.L.A.G.), Q3 biennial meeting, Clermont-Ferrand, 9-11 septembre 2002, 12.
- CORDIER S., HARMAND D., & BEINER M., 2003** - The terrace system of the Moselle river between France, Germany and Luxembourg: first results for a global correlation. *Poster, colloque «Paleoweathering and paleosurfaces in the Ardenne Eifel region»*, Bettborn/Preizerdaul (Luxembourg), 14-17 mai 2003.
- CORDIER S., HARMAND D., LOSSON B., & BEINER M., 2004** - Alluviation in the Meurthe and Moselle valleys (Eastern Paris basin, France): lithological contribution to the study of the Moselle capture and Pleistocene climatic variations. *Quaternaire*, **15** (1-2), 65-76.
- CORDIER S., FRECHEN M., HARMAND D., & BEINER M., 2005** - Middle and Upper Pleistocene fluvial evolution of the Meurthe and Moselle valleys in the Paris basin and the Rhenish massif. *Quaternaire*, **16** (3), 201-215.
- CORDIER S., HARMAND D., FRECHEN M., & BEINER M., 2006** - New evidences on the Moselle terrace stratigraphy between the Meurthe confluence (Paris Basin) and Koblenz (Rhenish Massif). *Zeitschrift für Geomorphologie N. F.*, **50** (3), 281-304.
- DUPLAIX S., 1958** - *Détermination microscopique des sables*. Librairie Polytechnique C. Béranger, Paris, 96 p.
- DE RIDDER N.A., 1957** - *Beiträge zur Morphologie des Terrassenlandschaft des Luxemburgischen Moselgebietes*. Thèse de Doctorat, Université d'Utrecht, 138 p.
- FISCHER F., 1957** - *Beiträge zur Morphologie des Flusssystems der Saar*. Université de Saarlandes - Saarbrücken 15, **11**, 92 p.
- FLAGEOLLET J.-C., 1988** - Quarte Vereisungen in den Lothringischen: Anzahl, Ausdehnung und Alter. *Einseitalter u. Gegenwart*, **38**, 17-36.
- HAMEURT J., 1967** - *Les terrains cristallins et cristallophylliens du versant occidental des Vosges moyennes*. Mémoires du service de la carte géologique d'Alsace et de Lorraine, **26**, 402 p.
- HARMAND D., 2007a** - Données nouvelles sur les formations fluviales de la vallée de la Sarre (France, Allemagne). In *Résumés des communications et posters du Colloque «Hommage à André Weisrock»*, Nancy 6 juin 2007, 34.
- HARMAND D., 2007b** - La basse vallée de la Sarre. In S. Cordier, D. Harmand & S. Occhietti S (dir.), *Lorraine, Luxembourg, Rhénanie-Palatinat, Sarre*, Livret-Guide de l'excursion de l'Association Française pour l'Étude du Quaternaire des 7, 8 et 9 juin 2007, Université Nancy 2, 168-174.
- HAYOTTE M., 2004** - *Contribution à l'étude du glaciaire sur le versant occidental des Vosges, «Le Pré J'Espère»*. Mémoire de Maîtrise de Géographie Physique, Université Nancy 2.

- KULINICZ E., 2007a** - Quatrième arrêt: Carrière de Tanconville 1, route de Hattigny. In S. Cordier, D. Harmand & S. Occhietti S. (dir.), *Lorraine, Luxembourg, Rhénanie-Palatinat, Sarre*. Livret-Guide de l'excursion de l'Association française pour l'Étude du Quaternaire des 7, 8 et 9 juin 2007, Université Nancy 2, 206-211.
- KULINICZ E., 2007b** - Les formations anté-saaliennes à la périphérie nord-ouest des Vosges. In S. Cordier, D. Harmand & S. Occhietti S. (dir.), *Lorraine, Luxembourg, Rhénanie-Palatinat, Sarre*. Livret-Guide de l'excursion de l'Association française pour l'Étude du Quaternaire des 7, 8 et 9 juin 2007, Université Nancy 2, 212-218.
- KULINICZ E., OCCHIETTI S., 2007** - Saint-Georges: panorama du piémont des Vosges du Nord (versant lorrain) et du massif du Donon. In S. Cordier, D. Harmand & S. Occhietti S. (dir.), *Lorraine, Luxembourg, Rhénanie-Palatinat, Sarre*. Livret-Guide de l'excursion de l'Association française pour l'Étude du Quaternaire des 7, 8 et 9 juin 2007, Université Nancy 2, 193-203.
- LOSSON B., 2003** - *Karstification et capture de la Moselle (Lorraine, France) : vers une identification des interactions*. Thèse de Doctorat, Université de Metz, 825 p.
- MANTILARO A., 2005** - *Les alluvions anciennes dans la région de Sarrebourg et leur signification géomorphologique*. Mémoire de Maîtrise de Géographie Physique, Université Nancy 2, 115 p.
- MÉNILLET F., 1978** - *Notice explicative, Carte géol. France (1/50 000), feuille CIREY-SUR-VEZOUZE (270)*. Orléans: Bureau de Recherches Géologiques et Minières.
- MÜLLER M.J., 1976** - *Untersuchungen zur pleistozänen Entwicklungsgeschichte des Trierer Moseltals und der "Wittlicher Senke"*. Forschungen zur Deutschen Landeskunde, **207**, 185 p.
- NEGENDANK J.F.W., 1978** - *Zur känozoischen Geschichte von Eifel und Hunsrück. Sedimentpetrographische Untersuchungen im Moselbereich*. Forschungen zur deutschen Landeskunde, **211**, 90 p.
- NEGENDANK J., 1983** - *Trier und Umgebung*. Sammlung Geologischer Führer, **60**, Stuttgart, 195 p.
- OCCHIETTI S., 2007** - La forme composite du Pré J'Espère, témoin de plusieurs processus de sédimentation en contexte glaciaire. In S. Cordier, D. Harmand & S. Occhietti S. (dir.), *Lorraine, Luxembourg, Rhénanie-Palatinat, Sarre*. Livret-Guide de l'excursion de l'Association française pour l'Étude du Quaternaire des 7, 8 et 9 juin 2007, Université Nancy 2, 284-285.
- PARFENOFF A., POMEROL C., & TOURENQ J., 1970** - *Les minéraux en grains. Méthode d'étude et de détermination*. Masson, 578 p.
- PERRIAUX J., 1961** - *Contribution à la géologie des Vosges gréseuses*. Mémoires du service de la carte géologique d'Alsace et de Lorraine, **18**, 236 p.
- SALOME A., 1968** - *A geomorphological study of the drainage area of the Moselotte and upper Vologne in the Vosges (France)*. Thèse de Doctorat, Université d'Utrecht, 98 p.
- SERET G., DRICOT E., & WANSARD G., 1990** - Evidence for an early glacial maximum in the French Vosges during the last glacial cycle. *Nature*, **346** (6283), 453-456.
- SERRAT P., HARMAND D., 2007** - La terrasse alluviale principale de la Prims à Diefflen. In S. Cordier, D. Harmand & S. Occhietti S. (dir.), *Lorraine, Luxembourg, Rhénanie-Palatinat, Sarre*. Livret-Guide de l'excursion de l'Association française pour l'Étude du Quaternaire des 7, 8 et 9 juin 2007, Université Nancy 2, 175-183.
- ZÖLLER L., 1985** - *Geomorphologische und quartärgeologische Untersuchungen im Hunsrück - Saar - Nahe - Raum*. Forschungen zur deutschen Landeskunde, Trier, **225**, 240 p.