

Géosciences de surface

# Découverte de structures périglaciaires (*sand-wedges* et *composite-wedges*) sur le site de stockage de déchets radioactifs de l'Aube (France)

Pierre Antoine <sup>a,\*</sup>, Albert Marchiol <sup>b</sup>, Marcel Brocandel <sup>c</sup>, Yves Gros <sup>d</sup>

<sup>a</sup> « Environnements quaternaires – Dynamiques naturelles et anthropisation », laboratoire de géographie physique, 1, place Aristide-Briand, 92 195 Meudon cedex, France

<sup>b</sup> Andra, DI/DCS/CA/SE, service « Sûreté Environnement », Centre de l'Aube BP7, 10200 Soulaines-Dhuys, France

<sup>c</sup> Andra, DS/MG, service « Milieux géologiques », 1–7, rue Jean-Monnet, parc de la Croix-Blanche, 92298 Châtenay-Malabry cedex, France

<sup>d</sup> Antea/DT, direction technique, BP 6119, 45 061 Orléans cedex 2, France

Reçu le 21 février 2005 ; accepté après révision le 29 août 2005

Disponible sur Internet le 19 octobre 2005

Présenté par Jean Dercourt

## Résumé

Depuis 1990, un réseau de discontinuités subverticales a été décrit dans les sables aptiens sur lesquels est implanté le site de stockage de déchets radioactifs exploité par l'Andra dans l'Aube. De nouvelles études menées en 1999 à Soulaines, puis en 2003 sur le site voisin TFA, ont permis de mettre en évidence des structures majoritairement de type *sand-wedges*, particulièrement bien développées, et de démontrer la nature périglaciaire de cette fracturation, en grande partie surimposée sur des diaclases préexistantes, qui s'amortit rapidement dans les argiles sous-jacentes. Par ailleurs, ces observations constituent actuellement un exemple unique de développement d'un réseau de *sand-wedges* de grande ampleur, attribuable au dernier glaciaire en France septentrionale. **Pour citer cet article :** P. Antoine et al., C. R. Geoscience 337 (2005).

© 2005 Académie des sciences. Publié par Elsevier SAS. Tous droits réservés.

## Abstract

**Discovery of periglacial features (sand and composite-wedges) in the nuclear waste storage site of the Aube department (France).** Since 1990, a dense network of subvertical cracks has been observed at the upper part of the Albian sands of the site of radioactive waste storage operated by ANDRA. New studies carried out in 1999 during enlargement of the site of Soulaines and in 2003 on the nearby TFA site highlighted an especially well-developed network of periglacial features that are mainly of the sand-wedge type (subvertical stratified infill). These observations demonstrate the periglacial origin of these cracks, which are mainly superimposed on a dense network of former tectonic extension joints, and that rapidly disappear at the top of the underlying clays. In addition, these observations currently represent the only example of a large sand-wedge network developed during the Last Glacial in northern France. **To cite this article:** P. Antoine et al., C. R. Geoscience 337 (2005).

© 2005 Académie des sciences. Publié par Elsevier SAS. Tous droits réservés.

\* Auteur correspondant.

Adresse e-mail : [pierre.antoine@cnrs-belleuve.fr](mailto:pierre.antoine@cnrs-belleuve.fr) (P. Antoine).

*Mots-clés* : Sand-wedges ; Environnements périglaciaires ; Sables aptiens ; Dernier glaciaire ; France septentrionale

*Keywords*: Sand-wedges; Periglacial environment; Aptians sands; Last Glacial; Northern France

## Abridged English version

### 1. Introduction

The site operated by the National Agency for radioactive waste management (ANDRA) at Soulaines is located about 200 km east-southeast of Paris (4°8'29"N, 4°44'03"E), near the Aube River valley, at the top of an Aptian sand hill (marine quartz sands) overlying the Aptian clay substratum (Figs. 1 and 2). Apart from the fluvial and colluvial infill, concentrated within the secondary valleys bordering the sand hill, Quaternary deposits are particularly weakly developed in this area (patches of undifferentiated loam, Holocene colluvium).

### 2. Results

#### 2.1. Former observations (1990–1998)

Since 1990, the observation of numerous discontinuities within the draining massif of Aptian sands has led to a succession of studies by ANDRA aimed at determining the origin of the cracks and their possible impact on the safety of nuclear waste storage [1–4]. These various studies provided evidence for a dense network of extension joints and 'clastic veins' (CV). These clastic veins differ from the pure extension joints in having a sandy to clayey sandy loose infill (thickness 1 to 4 cm). The measurement of more than 1000 discontinuities enabled to evidence two main directional trends: north–south (N-175: 80%) and east–west (N-80–90°: 20%); the main direction (north–south) being composed by the addition of north–south and NE–SW-trending (145–150°) features. The 'CVs' appear to be superimposed upon the network of extension joints network (Fig. 3), their lateral extension being about 6 to 7 m, locally up to 12 m, with a minimum vertical development of 2 m and an opening of 10 to 50 mm, clearly decreasing with depth. Their infill is composed of unconsolidated sands showing the same grains-size distribution as the Aptian sands (mode: 0.2–0.3 mm) [1], locally associated with clays, and generally coloured by iron oxides in the upper part of the joints. From a general point of view, these studies led the authors to assume a tectonic origin for the extension joints network and to evidence the superimposition of the 'CVs' onto these former features in connection with non-tectonic processes (periglacial hypothesis [1]).

#### 2.2. New observations

New observations were undertaken in 1999 in a large trench dug into the sands (3 m) and completed by a superficial earthwork (1.5–1.8 m), prior to the building of a new storage unit.

The features observed in the trench are made of sub-vertical cracks (width: 2 to 4 cm), developed throughout the whole sandy mass down to 4.5-m depth (clastic veins: CV), showing a poorly cohesive sandy infill strongly contrasting with the compacted sand separating the cracks (Fig. 6A). In the southwestern part of the trench, the upper part of the infill of one CV is characterised by brown to brown–red clayey to sandy clayey material, with sub-vertical stratification and a slightly V-shaped geometry. This observation shows that the upper parts of the clastic veins are connected to larger features generally truncated by former building works.

The cleaning of the profile in the zone being excavated ( $\pm 2$  m high/100 m long) enabled us to detect numerous large V-shaped features, 1.5 to 2 m in deep, cutting through the Aptian sands and forming a polygonal network (spaced: 4 to 5 m). These features are distinguished by a larger size than those observed in the trench and a compact sandy-clayey infill including grey clayey laminae (average opening: 25 cm, maximum: 50 cm). The sandy infill of these V-shaped cracks is characterised by a sub-vertical stratification locally picked out by thin grey laminae and orange to red strongly oxidised borders (Figs. 4 and 5). In addition, the upper 0.5 m of the profile shows a granular pattern and a brown colour, while the lower part (1.5 m) is more compact, exhibiting a strong lamellar fabric (thickness: 0.5 to 1.5 cm) [35,36], and a grey colour. Finally, one of the features is characterised by a sandy and clayey infill with horizontal stratification (Fig. 7).

Finally, the observations carried out in the new TFA site of Morvilliers, in the same geological context, a few kilometres from Soulaines, allowed us to show that the sand-wedges may cut through the entire Aptian sands formation (3–4 m), but that their development is halted very abruptly in the underlying clayey deposits (10–20 cm maximum, Fig. 6B) [5].

### 3. Interpretation

#### 3.1. Origin of the cracks and development processes

According to these observations, as well as to the former data obtained by ANDRA and to a synthesis of the

knowledge about periglacial processes [9,11–13,16,19,22,23,25,27–34,37,38], the V-shaped features described in the trench likely correspond to the superimposition of periglacial dynamics upon a pre-existing network of extension joints.

At Soulaines, the initial process is represented by cracking due to thermal contraction of the soil under very low temperatures [29], producing a network of thin open cracks [9] superimposed on the former extension joints that are especially well developed at this site. This process led to a strong compaction of the sandy bedrock, followed by a progressive infilling of the cracks mainly by aeolian sands. The local character of the aeolian infill is indicated by the close correspondence between the grain-size parameters of the Albian sands and the crack infill material [1].

Apart from one example, all the features observed at Soulaines exhibit the characteristics of sand-wedges developed in an ice-poor permafrost context: opening of 0.1 to 0.5 m, depth of 2 to 2.5 m, infill dominated by locally reworked aeolian sands with sub-vertical stratification and absence of collapse features (*downturning*) or thermokarst processes [9,11,12,16,19,27,28,32,38]. These characteristics indicate a very arid environment (precipitation < 100 mm, rare snow), a very poor vegetal cover, and very low temperatures (mean annual temperature of air about  $-6$  to  $-10$  °C [9,28,34]).

On the other hand, the CVs connected to the base of the sand-wedges develop up to 6 m below the surface, and show a very different infill represented by pure unconsolidated homogeneous sands, including some voids to the top, without any trace of contamination by surface deposits. According to these observations, the CVs are not the result of pure thermal contraction and aeolian infill as the overlying sand-wedges. In addition, the depth of these features, their width and the regularity of their opening (average: 2 cm) are not consistent with the characteristics generally published for pure thermal contraction cracks (2–2.5 m in depth, opening at the base: a few millimetres [19,28,29]). The CVs are thus interpreted as the result of the development of thin sub vertical ice-veins within the permafrost, following the pre-existing extension joints network.

In the upper part of the sand-wedges, the V-shaped features were enlarged progressively by aeolian infill after each phase of thermal cracking (300–500 cycles for the largest). When located at greater depth, the ice-veins located within the permafrost zone were unaffected by alternating freeze-thaw phases. Given the absence of Quaternary sediments post-dating the development of the wedges, and their location at the top of a landscape very close to the present-day relief, we can at-

tribute their formation to the Last Glacial Maximum. This interval of time is characterised by the general intensification of aeolian processes (loess/Cover Sands) in northern France [6,7], as well as over the whole of western and central Europe [10,15]. While the main infill of the wedges is composed of aeolian sand reworked from the slopes of the sand hill in a polar-desert-type environment, it is more difficult to interpret the occurrence of thin clayey laminae within the infill of some wedges. This particular feature seems to represent a unique example, and is mainly associated with the occurrence of clayey deposits, sensitive to surface reworking in a periglacial environment, at the top of the Soulaines sand hill (Fig. 2). Because of the homogeneity of the laminae (absence of clayey granules), aeolian activity alone is unlikely to lead to the reworking of clay broken up by freeze-thaw processes. The deposition of these laminae suggests the existence of phases of filling of the thermal contraction cracks due to infiltration from the surface during short episodes of surface thawing. This corresponds to the formation of an intermediate type of frost-crack which, although still dominated by aeolian processes (composite infill/aeolian/ice), is commonly developed in western European periglacial environments [20]. In that case, the palaeoclimatic conditions would have been less arid and cold owing to the presence of a snow cover and a short summer thaw with mean annual temperatures between  $-4.5$  and  $-8$  °C [34], than in the case of a purely aeolian infill (MAT:  $-12$  °C, total absence of thawing, [37]). In addition, one ice-wedge cast with horizontally stratified infill was observed in the trench profile (Fig. 7) [14,17], in which the void produced by the melting of the ice core was filled by sediments from the boundaries of the wedge and from the surface [11,16,19,27]. Other features of this type have been previously described [3] and the juxtaposition of sand and ice-wedges in the same stratigraphic context has already been pointed out, for example, in the Netherlands [19]. Thus, most of the wedges described at Soulaines appear to be composite infill wedges (ice/sand), although largely dominated by sand (relatively rare thawing episodes). Apart from the sand-wedges described by Lautridou [20] near the Mont Saint-Michel Bay, we should stress that, in France, this type of periglacial feature with sandy infill is extremely rare.

### 3.2. Degradation of the periglacial features

In general, this study allowed us to establish the continuity between the large V-shaped crack network of the surface (linked to thermal contraction) and the clastic veins of the trench (Fig. 6A and B). It con-

firms the importance of periglacial dynamics in the enlargement of the initial extension joints: development of ice-veins within the permafrost [16], leading to hyper-compaction of the Aptian sand. Then, during the initial stages of degradation of the permafrost (at about 17 000–16 000 yr BP) [8], and towards the end of aeolian deposition [6,7], the upper parts of the sand-wedges were rapidly closed, stopping the transport of sediments to greater depth. The ice-veins progressively disappeared and the sandy infilling of the deeper parts of the CVs began by gentle collapse of the sand walls linked to ice thawing. Locally, slight vertical movements related to degradation of the permafrost (ice thawing) are also demonstrated by the displacement of sub-horizontal oxidised bands on the boundaries of the CVs (1 to 2 cm), as described by Mol et al. [24]. According to these data, and to our knowledge of the modification of climatic and hydrological conditions at the end of the Last Glacial [8], the voids observed in the upper part of some CVs could result from variations in the speed of thawing of the ice during the degradation of the permafrost:

- slow melting, with progressive collapse of the ice-veins and infilling of the open veins by gentle collapse of the sand walls during initial thawing (end of the Last Pleniglacial);
- abrupt acceleration of the ice melting, leading to the formation of voids at the beginning of the major climatic warming of the Late Glacial (14 700 cal. BP), also marked by a main incision phase within the valleys and a global lowering of the aquifers [8].

#### 4. Conclusions

The features observed at Soulaïnes correspond mainly to large V-shaped frost-cracks showing vertically stratified sandy infill, mainly of the sand-wedge type. While the infilling processes were dominated by aeolian dynamics, several features show a composite infill (aeolian sand/clay laminae) indicating less arid conditions than those required for pure sand-wedges and the formation of ice-veins.

- The occurrence of dense crack networks, the strong compaction of the Aptian sands in between the cracks, and the absence of significant Quaternary deposits on the top of the hill, indicate that permafrost developed over the whole area at least during the Last Glacial Maximum (18 000 ± 2000 BP).
- The ice-veins developed at considerable depth within the Aptian sands, owing to a pre-existing network of extension joints, in good agreement

with the initial hypothesis of the ANDRA, but they stopped abruptly at the contact with the underlying clayey formation.

- Finally, for the first time in northern France, this study provides evidence of a well-developed sand and composite-wedge network. It thus provides new data on the occurrence of permafrost at the top of exposed relief and the development of especially arid conditions during the Last Glacial Maximum in an area where, up to now, there has been very little information about Quaternary formations and associated periglacial features.

## 1. Introduction

Le centre de stockage de déchets radioactifs de faible et moyenne activité (CSFMA) de Soulaïnes-Dhuys (48°22'29"N, 4°44'03"E, 155M NGF), exploité par l'Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs (Andra), est localisé dans le département de l'Aube, à environ 200 km à l'est-sud-est de Paris, à quelques kilomètres à l'est de la confluence entre la haute vallée de l'Aube et de la Voire (Fig. 1).

Ce site a été implanté au sommet d'une butte de sables de l'Aptien, en raison du caractère drainant du matériau (sables marins quartzueux ou glauconieux meubles ou faiblement indurés, très homogènes et d'épaisseur constante), et de la morphologie locale caractérisée par la présence d'une butte sableuse reposant sur un substrat argileux imperméable (Aptien inférieur) (Fig. 2). Mis à part les colmatages fluviaux et colluviaux peu épais concentrés dans les vallées et vallons

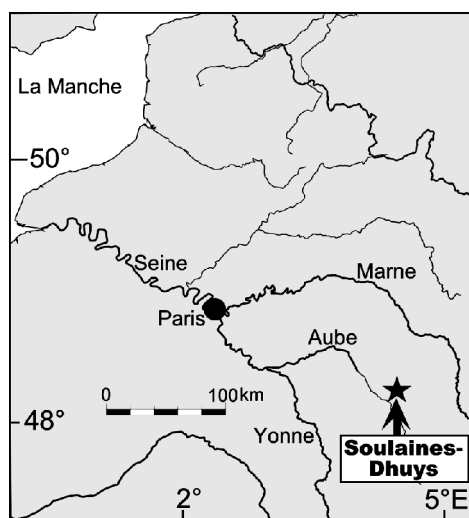


Fig. 1. Localisation du site de Soulaïnes.

Fig. 1. Location of the Soulaïnes site.

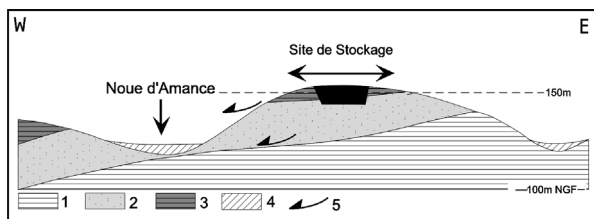


Fig. 2. Coupe géologique simplifiée montrant la localisation du site de stockage au sommet de la butte de sables aptiens (d'après un document Andra, TIM ASTE 03-090/A) : 1, Aptien inférieur (argiles) ; 2, Aptien supérieur (sables) ; 3, Albien inférieur (argiles) ; 4, colluvions et alluvions récentes de fond de vallon ; 5, direction des écoulements dans les sables de l'Aptien supérieur.

Fig. 2. Simplified geological section showing the location of the storage site at the top of the Aptian sand hill (after ANDRA, TIM ASTE 03-090/A) : 1, Lower Aptian (clays) ; 2, Upper Aptian (sands) ; 3, Lower Albian (clays) ; 4, small valley colluvial and alluvial deposits ; 5, direction of water flowing within the Upper Aptian sands.

secondaires bordant le site, les formations quaternaires sont particulièrement peu développées et mal connues dans le secteur concerné (colluvions récentes, rares plaques de limons d'âges indifférenciés...).

## 2. Résultats

### 2.1. Données antérieures (1990–1998)

Depuis 1990, date de début des premiers terrassements sur le site de Soulaines-Dhuys, l'observation régulière de discontinuités au sein de ce massif drainant ont motivé un certain nombre d'études menées par l'Andra et plusieurs bureaux d'étude, afin de déterminer l'origine de ces discontinuités subverticales et leur impact éventuel sur les caractéristiques géotechniques et hydrogéologiques des sables et la sûreté du stockage [1–4].

Ces différentes études ont permis de mettre en évidence un réseau de diaclases subverticales très dense (structures cassantes planaires jointives sans indices de déplacement) et de « filons clastiques », qui se distinguent des précédentes par une ouverture centimétrique à décimétrique et un remplissage sableux à sablo-argileux décompacté. Par ailleurs, quelques filons clastiques (FC) montrent des vides développés sur 20 à 50 cm de hauteur. La mesure en plan de plus de 1000 discontinuités a permis de mettre en évidence la présence de deux directions principales suborthogonales de discontinuités : une direction dominante NW–SE à NNW–SSE (80% des structures) et une direction secondaire ENE–WSW à est–ouest (20% des structures). Ces travaux ont, par ailleurs, montré une certaine homogénéité dans la répartition des deux types de discontinuités

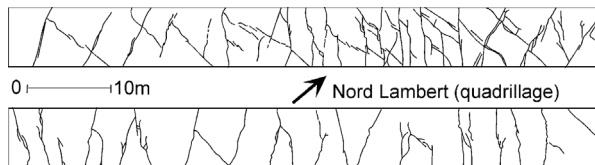


Fig. 3. Relevé détaillé du réseau de fissuration dans une des tranchées du site de Soulaines (d'après [3], modifié).

Fig. 3. Detailed drawing of the cracks network in one of the trenches of the Soulaines site (according to [3], modified).

(diaclasses/filons clastiques) par rapport à ces orientations, et permis de déterminer que les filons clastiques se surimposaient au réseau de diaclases (Fig. 3). Par ailleurs, les « FC » ont une extension latérale importante, de 6 à 7 m, localement 70 m, un développement vertical de 2 m minimum, et une ouverture de 10 à 50 mm en moyenne, nettement décroissante en profondeur.

Le remplissage des « FC » est constitué par un sable de granulométrie identique à celui de l'encaissant (mode 0,2–0,3 mm) [1], mais fortement décompacté et souvent lessivé ou coloré par des oxydes associés à des argiles, notamment la kaolinite.

D'une manière générale, ces études ont amené leurs auteurs à attribuer une origine tectonique à ce réseau de diaclases, qui présente les mêmes caractéristiques géométriques et génétiques que celles du réseau qui se développe dans l'ensemble du bassin de Paris. Ils ont également mis en évidence la réutilisation des diaclases par les « FC », en liaison avec des processus non tectoniques postérieurs (hypothèse périglaciaire, [1]).

### 2.2. Observations récentes sur le site du CSFMA en 1999

Des observations sur les tranchées du site de l'Aube ont été effectuées par les auteurs au printemps 1999, à l'occasion de la reprise des travaux de terrassement préalables à la construction d'une nouvelle ligne d'ouvrages de stockage. Ces nouvelles observations ont été menées dans une grande tranchée creusée dans les sables (3 m de profondeur pour 2,5 m de largeur en fond de fouille) et sur les coupes dégagées par le décapage superficiel préalable à la construction du radier du futur ouvrage de stockage (1,5–1,8 m).

#### 2.2.1. Tranchée

Dans la tranchée, les structures observées sont constituées par des discontinuités subverticales de 2 à 4 cm de largeur parcourant l'ensemble de la masse sableuse (filons clastiques « FC »). Un sondage, pratiqué par ANTEA sur environ 1,5 m de profondeur sous le plancher

de la tranchée, montre qu'elles se poursuivent en profondeur sans changement important ( $-4,5$  m environ par rapport au sommet de la tranchée, Fig. 6A).

En coupe, ces structures se distinguent aisément par un colmatage sableux à très faible cohésion, qui contraste fortement avec le sable induré qui les sépare. Localement, elles peuvent montrer des vides dans leur partie supérieure (nord-est de la tranchée) (Fig. 6A, n° 8).

À l'extrémité sud-ouest de la tranchée étudiée, la partie supérieure du remplissage d'une des discontinuités se distingue nettement par la présence d'un colmatage argileux à argilo-sableux brun-rouge, à structuration subverticale, et d'un léger évasement vers le haut (alternance de lamines d'argile grise et de sables argileux brun-rouge sur les 50 à 60 cm supérieurs). Cette observation montre que les discontinuités à remplissage de sable (« filons clastiques ») se raccordent dans leur partie supérieure à des structures de plus grande ampleur, généralement tronquées par les anciens travaux de préparation de la plate-forme (Fig. 4).

### 2.2.2. Terrassement superficiel

Un décapage fin de la coupe de la zone en cours de terrassement ( $\pm 1,8$  m sur 100 m de longueur) a rapidement permis de détecter de nombreuses structures en coin subverticales recoupant les sables aptiens. Ces structures, assez régulièrement espacées (4 à 5 m en moyenne, localement 2 à 3 m) observées sur toute la longueur du profil, se distinguent par une taille beaucoup plus importante que celles décrites dans la tranchée, la présence de formes en V et par leur remplissage compact sablo-argileux gris à linéoles et bordures oxydées (ouverture maximale : 20 à 50 cm). Les remplissages de ces structures en coin se caractérisent par une stratification subverticale très nette, soulignée par des lits d'argile millimétriques (lamines) et par une bordure fortement oxydée, de couleur rouge orangé (Figs. 4 et 5). Certaines d'entre elles, plus complexes, résultent de la coalescence de plusieurs fentes et correspondent à la jonction de plusieurs directions (réseau polygonal).

Par ailleurs, la partie sommitale du profil ( $\pm 0,5$  m) se distingue par une faible structuration granulaire et une coloration à dominante brune, alors que la partie inférieure ( $\pm 1$  m à 1,5 m) montre une structure lamellaire grossière (0,5–1,5 cm), une coloration grise à gris vert clair et une compacité beaucoup plus élevée (Fig. 4). Dans plusieurs cas, un rétrécissement marqué des fentes a été observé au passage entre les sables supérieurs gris clair et l'horizon brun de surface (Fig. 4). Enfin, une seule structure de type fente à terminaison bifide de petite taille (Fig. 7) montre un colmatage sablo-argileux à

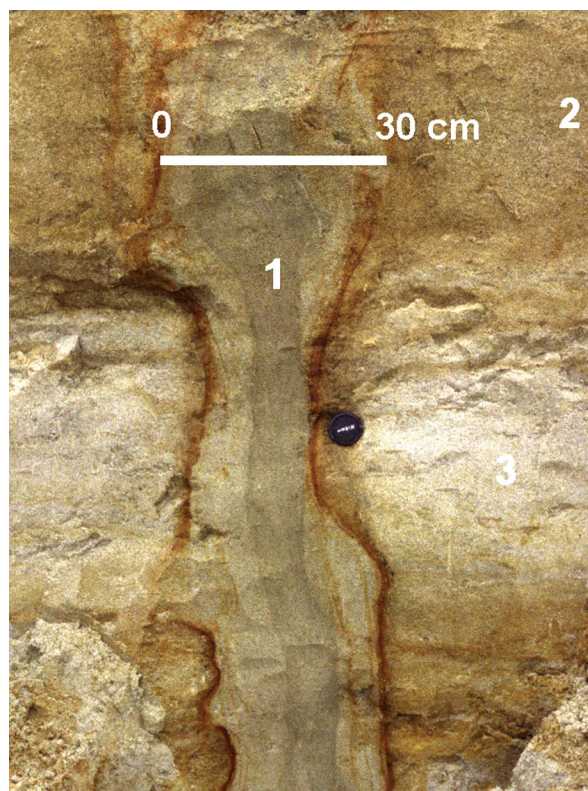


Fig. 4. Coupe d'une fente de type *sand-wedge* (165 × 30 cm), à remplissage sableux laminé à structure subverticale et bordures oxydées (légende : voir Fig. 6A).

Fig. 4. Section through a *sand-wedge* type frost crack (165 × 30 cm), showing a finely laminated subvertical infilling and oxidised boundaries (caption: see Fig. 6A).

stratification sub-horizontale, nettement différent de celui des fentes à remplissage sableux.

### 2.3. Observations récentes sur le site CSTFA (2003)

Plus récemment, en 2003, les observations effectuées sur les coupes des terrassements du nouveau centre de stockage des déchets faiblement radioactifs de Morvilliers (TFA : très faibles activités), situé dans la même formation géologique, à quelques kilomètres, ont permis de retrouver des structures semblables bien que moins denses que sur le site de Soulaines. En revanche, l'épaisseur de sables aptiens y étant moins importante, les terrassements ont permis de recouper l'ensemble du massif sableux et la partie supérieure de la formation argileuse sous-jacente (Aptien inférieur). Ces nouvelles observations ont clairement montré que les structures de type *sand-wedges* et les « FC » qui s'y relie recoupent l'ensemble des sables (3–4 m), avec une ouverture centimétrique en profondeur, mais qu'elles s'amortissent



Fig. 5. Détail de la structure d'une fente en coin de type *sand-wedge*, montrant la lamination subverticale du remplissage sableux et la présence de fines lamines argileuses interstratifiées (légende : voir Fig. 6A).

Fig. 5. Detailed structure of a V-shaped sand wedge showing the typical subvertical lamination of the sandy infilling and the occurrence of thin interbedded clay laminae (caption: see Fig. 6A).

sent rapidement sur 10 à 20 cm au sommet des argiles (Fig. 6B), en accord avec les conclusions de l'étude Andra–Aquila 2003 [5].

### 3. Interprétation

#### 3.1. Origine, processus de formation et âge des fentes

D'après ces observations, associées aux données préalablement acquises par l'Andra, et à la synthèse des connaissances sur les processus périglaciaires actuels [9,11–13,16,19,22,23,25,27–34,37,38], les structures observées dans la tranchée résultent vraisemblablement de la surimposition de phénomènes périglaciaires sur un réseau de diaclases préexistant.

Le processus de développement initial de ces structures est représenté par la contraction thermique du sol sous l'effet de températures extrêmement basses [29], qui génère un réseau de discontinuités pouvant atteindre 5 à 6 cm d'ouverture [9]. Dans le cas du site de Soulaines, ce phénomène de contraction thermique s'est concentré préférentiellement au niveau des diaclases particulièrement développées sur le site, qui ont vraisemblablement exacerbé et guidé le développement du réseau (zones de faiblesse). Ce processus a entraîné une forte compaction de l'encaissant sableux, suivi d'un colmatage progressif des fentes par des sables dans leur partie supérieure (1,5–2 m). La grande similitude entre les caractéristiques granulométriques des sables de l'encaissant aptien et ceux qui remplissent les fentes [1] permet de penser que ce colmatage s'est effectué par remobilisation éolienne de matériel local, comme c'est le cas dans ce type de fentes [9,13,19,29].

Mis à part un exemple de fente à colmatage stratifié horizontalement (Fig. 7), les structures observées à Soulaines possèdent toutes les caractéristiques des fentes à remplissage de sable (*sand-wedges*), développées dans un contexte de permafrost : ouverture maximum, 0,1 à 0,5 m ; profondeur, 2 à 2,5 m ; colmatage à dominante sableuse d'origine locale montrant une stratification subverticale très marquée ; absence de structures d'effondrement (*downturning*) ou d'érosion thermokarstique, liées à la fusion d'un coin de glace [9,11,12,16,19,27,28,32,38].

Par ailleurs, la très bonne conservation des fentes à remplissage sablo-argileux (absence de fluage des bordures et de structures micro-faillées en escalier à proximité des fentes) plaide pour un permafrost relativement pauvre en glace, compatible avec les caractéristiques lithologiques et géomorphologiques du site (matériau drainant, sommet d'une butte). Les caractéristiques de ces structures périglaciaires indiquent un environnement aride sans végétation (précipitations inférieures à 100 mm, neige rare) et très rigoureux (température annuelle de l'air : –6 à –10 °C environ ; [9,28,34]).

Cette interprétation est renforcée par la forte compaction du sable encaissant (surtout dans la tranchée) et par la présence d'une structure polyédrique à lamellaire grossière, développée sur environ 1 m à la base des coupes de la tranchée (Fig. 6A). Cette structuration, de plus en plus lâche vers le bas, est classiquement rapportée à la formation, puis à la dégradation de lentilles de glace dans la partie supérieure du permafrost [35,36].

Dans la partie supérieure, les structures en coin de type *sand-wedges* se sont élargies progressivement par colmatage éolien de la fissuration, après chaque phase de contraction thermique (300–500 cycles pour les plus

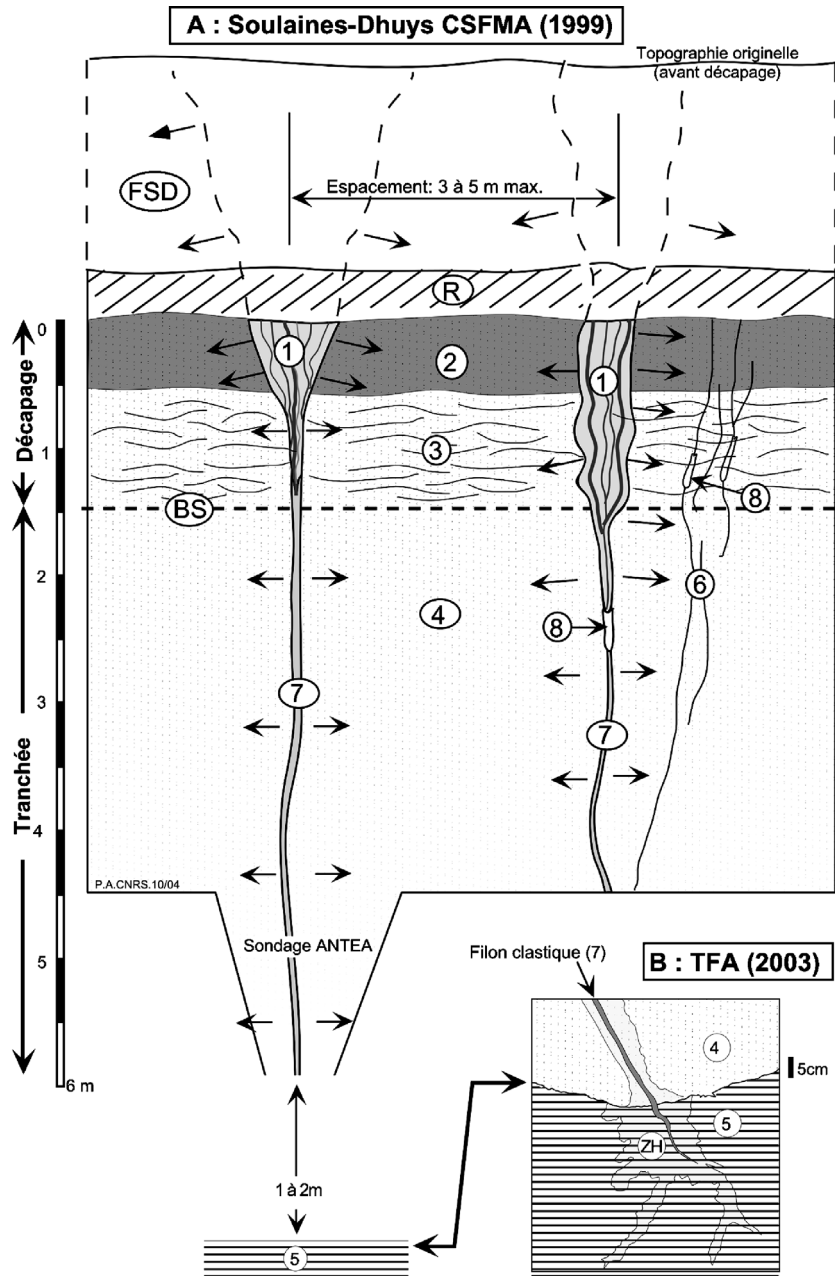


Fig. 6. Coupe synthétique et modèle de développement des fentes de type *sand-wedges* d'après les observations effectuées sur les sites de Soulaines-Dhuys 1999 (A) et TFA 2003 (B) : **R**, remblai; **1**, fentes en coin de type *sand-wedges* à remplissage sableux, à stratifications et lamines argileuses grises subverticales; **2**, sable brun oxydé faiblement structuré (granulaire) (ancienne couche active ?); **3**, sable gris très compact à structure polyédrique très marquée (1–2 cm) (ségrégation de glace); **4**, sables gris vert très compacts (sables aptiens fortement compactés par la croissance des lames « veines » de glace); **5**, argiles noires (Aptien inférieur); **6**, diaclases; **7**, filons clastiques « FC » à colmatage sableux décompacté; **8**, vides; **BS**, base des structures de stockage; **FSD**, formations quaternaires décapées; **ZH**, zone hydromorphe (grise) affectant les bordures des FC et le sommet des argiles aptiennes.

Fig. 6. Summarised profile and model of development of sand-wedges according to the observations from the sites of Soulaines–Dhuys 1999 (A) and TFA 2003 (B). **R**, Reworked embankment; **1**, frost cracks of the sand-wedge type with sandy infill, showing sub-vertical stratification and grey clayey laminations; **2**, brown oxidised sand weakly structured (granular pattern) (former active layer); **3**, compact grey sand with very pronounced polyhedral features (lamellar: 1–2 cm; ice segregation/former permafrost); **4**, very compact grey green sands (Aptian sands compacted during the growing of the ice-veins); **5**, black clays (Lower Aptian); **6**, extension joints; **7**, clastic veins ‘CV’; **8**, voids; **BS**, base of the storage building; **FSD**, removed Quaternary formations; **ZH**, hydromorphy (grey zone) developed around the FC and at the top of the Aptian clays.





Fig. 7. Base d'une fente à terminaison bifide, avec remplissage argilo-sableux, à stratification horizontale (fente à noyau initial de glace).

Fig. 7. Base of a wedge with a divided termination and horizontal sandy clayey infill (ice-wedge).

larges). En revanche, leur prolongation en profondeur, sous la forme de filons clastiques sur plus de 6 m à travers toute la formation sableuse (Fig. 6), montre un colmatage très différent, constitué par un sable identique à l'encaissant, fortement décompacté, non stratifié, comportant des vides et exempt de pollution par des matériaux argileux provenant de la surface. Contrairement aux *sand-wedges* observées près de la surface, les «FC» n'ont donc pas fonctionné de manière ouverte par contraction thermique et colmatage d'origine éolienne. La profondeur de développement de ces structures (plus de 6 m), ainsi que la largeur et la régularité de leur ouverture (2 cm en moyenne), sont par ailleurs sans commune mesure avec les caractéristiques habituellement décrites pour les fentes de contraction thermique (2–2,5 m de profondeur maximale, ouverture millimétrique en profondeur [19,28,29]). Il est donc plus logique d'en-

visager la formation des «FC» en liaison avec le développement de lames de glace subverticales au sein du permafrost, sur le réseau de diaclase préexistant. Cette interprétation est en accord avec la présence de structures de ségrégation de glace dans la partie supérieure de la formation sableuse et l'hypercompaction de l'ensemble du massif de sable affecté par ces structures.

La disparition du colmatage sablo-argileux brun-rouge dans la partie inférieure des structures en V, généralement à partir du sommet de la tranchée (Fig. 6A), est vraisemblablement en relation avec le gradient thermique, qui entraîne un mode de fonctionnement différent en fonction de la profondeur. En effet, contrairement à la partie supérieure du permafrost soumise aux alternances gel-dégel (couche active), la partie profonde toujours gelée et hypercompactée par la glace se déforme peu.

Compte tenu de l'absence de bilan sédimentaire quaternaire postérieur au fonctionnement des fentes et de leur localisation au sommet d'une morphologie proche de l'actuelle, il est logique de situer leur fonctionnement au cours du dernier glaciaire, dans l'intervalle 25–20 ka BP, par ailleurs caractérisé par une intensification généralisée des processus éoliens (loess et sables éoliens) en France septentrionale [6,7], et plus largement en Europe [10,15].

Néanmoins, si le remplissage principal de ces structures, qui s'est mis en place progressivement à la suite des multiples phases de contraction thermique, est constitué par du matériel sableux remobilisé par le vent à partir des versants de la butte sableuse, dans un contexte extrêmement aride de type désert polaire, la présence de lamines argileuses est plus difficile à interpréter. En effet, si de nombreux auteurs, travaillant notamment dans l'Arctique canadien, décrivent généralement un colmatage exclusivement sableux associé à des éléments graveleux éolisés pouvant atteindre plusieurs centimètres piégés dans les fentes [9], la présence de fines lamines argileuses dans le colmatage des *sand-wedges* de Soulaines semble constituer un exemple unique.

Cette originalité est vraisemblablement liée à la configuration stratigraphique et géomorphologique du site de Soulaines, où les sables aptiens sont coiffés à la partie sommitale de la butte par des argiles plastiques grises de l'Albien inférieur, susceptibles de subir un remaniement superficiel en contexte périglaciaire (Fig. 2).

Le remaniement purement éolien d'argiles désagrégées par la gélifraction étant peu probable, compte tenu de la structure des lamines (absence de granules argileux, homogénéité), leur mise en place indique plus

vraisemblablement des phases de colmatage des fentes de contraction thermique par infiltration à partir de la surface, lors des courts épisodes de dégel (légère fusion en surface, liquéfaction). Cette interprétation indiquerait un type de fente intermédiaire, bien que largement dominé par les processus éoliens (remplissage composite mixte glace/sédiment éolien), plus fréquent dans les environnements périglaciaires ouest-européens [20].

Dans ce cas, les conditions auraient été un peu moins rigoureuses et arides, en raison de la présence de courtes périodes de dégel estivales et éventuellement d'une couverture neigeuse, avec des températures annuelles comprises entre  $-4,5$  et  $-8$  °C [34], alors que des fentes à remplissage exclusivement éolien impliquent des températures moyennes annuelles de l'ordre de  $-12$  °C et l'absence totale de dégel [37].

Par ailleurs, parallèlement aux nombreuses fentes à remplissage sableux et stratification verticale, une structure se distinguant par un colmatage à stratification sub-horizontale a été observée dans la coupe du décapage (Fig. 7) (ouverture : 10 cm environ). Ce type de structure correspond à la trace (pseudomorphose) d'une fente à remplissage (coin) de glace, de type *ice-wedge* [14,17], dans laquelle le vide laissé lors de la fusion de la glace est rempli par les matériaux flués à partir des bords de la structure [11,16,19,27]. D'autres structures de ce type ont été décrites à l'occasion des terrassements antérieurs [3].

La présence, sur le même site et dans le même contexte stratigraphique, de fentes à remplissage de sable et de fentes à coins de glace, déjà signalée par d'autres auteurs par exemple aux Pays-Bas [19], indique clairement l'existence de périodes de dégel et d'une certaine quantité d'eau (neige) nécessaire à la formation de coins de glace en surface et de lames de glace en profondeur (Fig. 6).

La majorité des fentes du site de Soulaines serait donc représentée par des fentes à remplissage mixte (glace/sable), bien que nettement dominées par le sable (rareté relative des épisodes de fusion). Par ailleurs, mis à part les *sand-wedges* décrites par Lautridou [20] sur le pourtour de la baie du Mont-Saint-Michel, il faut souligner la rareté de ce type de structure à colmatage sableux en France.

Enfin, d'après les observations effectuées en 2003 sur le site TFA (Fig. 6B), il apparaît que les fractures associées aux structures observées ont affecté toute l'épaisseur de la formation sableuse de l'Aptien, en accord avec les estimations concernant la profondeur du permafrost dans le Nord de la France au cours du dernier maximum glaciaire [21].

### 3.2. Conséquences de la dégradation des structures périglaciaires

D'une manière générale, l'étude des deux secteurs de travaux permet d'établir la continuité entre le réseau de structures périglaciaires de surface, de grande ampleur, et les fentes à remplissage sableux de la tranchée «FC» (Fig. 6A et B). Elle confirme l'importance de la dynamique liée à la contraction thermique dans l'élargissement des diaclases initiales : croissance de veines de glace (*ice-vein*, [16]) et hypercompaction de l'encaissant, puis dans leur colmatage : fonte de la glace, entraînement du sable des parois.

Parallèlement, les coupes de la tranchée montrent aussi des réseaux de diaclases fermées présentant localement des vides de 1 à 4 cm de largeur. Il est à remarquer que les zones ouvertes se situent préférentiellement vers la base des coupes ou au sommet de la tranchée (Fig. 6A). Enfin, localement, les bandes oxydées sub-horizontales, qui affectent le sable dans les coupes de la tranchée, sont faiblement décalées de part et d'autre des diaclases qui les traversent (1 à 2 cm). Cette observation atteste des mouvements verticaux de faible ampleur de type « tassements différentiels », liés à la dégradation du permafrost (baisse du volume lors de la fusion de la glace), du même type que ceux décrits par Mol et al. [24] dans les sables fluvio-éoliens weichseliens des Pays-Bas.

En revanche, lors des premières phases de dégradation du permafrost (17 000–16 000 BP environ) [8] et de la fin de la sédimentation éolienne [6,7], la partie supérieure des fentes s'est rapidement refermée et colmatée, stoppant ainsi le transfert de matériaux sablo-argileux en profondeur.

Les veines de glace présentes en profondeur dans les discontinuités centimétriques se sont ensuite lentement dégradées. Le colmatage sableux de la partie profonde des discontinuités sans cohésion s'est vraisemblablement effectué par effritement des parois des fentes sous l'effet de la fusion de la glace. L'absence de stratification dans, ces remplissages montre qu'il n'y a pas eu de circulation latérale des eaux de fusion et plaide plutôt pour un drainage lent en profondeur, dans un contexte de permafrost pauvre en glace (drainage à la base du massif sableux au contact des argiles).

Dans ce contexte, la présence de vides dans certaines fentes (Fig. 6) reste délicate à interpréter. En effet, des vides sont décrits lors de la dégradation des coins de glace des grandes fentes de l'Arctique canadien [18,25], mais ceux-ci, souvent colmatés par des matériaux nettement stratifiés, apparaissent à proximité de la surface,

et sont d'une ampleur beaucoup plus grande (tunnels de 40 à 60 cm de diamètre [26]).

Finalement, compte tenu de ces observations et des connaissances sur la modification des régimes climatiques et hydrologiques à la fin du dernier glaciaire (entre 20 et 10 ka BP), les vides observés dans les structures du site de Soulaines (partie supérieure) pourraient simplement résulter de variations dans la vitesse de fonte de la glace lors de la dégradation du permafrost :

- fusion lente et colmatage progressif de la discontinuité par délitement des parois en cours de dégel, au cours des premières phases de dégradation du permafrost ; début de compactage du remplissage sableux (stabilisation relative) ;
- accélération brutale de la fusion en profondeur et création de vides au cours de la phase de réchauffement majeure du début du Tardiglaciaire (14 700 cal. BP), en liaison avec une période de reprise généralisée de l'incision dans les vallées et de l'abaissement du toit des aquifères [8].

#### 4. Conclusions

L'observation des structures affectant les sables aptiens du site de l'Aube à Soulaines et à Morvilliers débouche sur les conclusions suivantes :

- (1) les structures observées correspondent essentiellement à de grandes fentes à remplissage dominé par des sables éoliens à stratifications verticales, essentiellement de type *sand-wedges*, s'organisant en un réseau interconnecté à maille serrée (5 m maximum). Néanmoins, bien que le processus de colmatage des fentes soit nettement dominé par l'agent éolien, comme dans les *sand-wedges* typiques, plusieurs fentes se distinguent par la présence d'un colmatage mixte intégrant de fines lamines d'argile, qui indique la présence de glace sur le site (éolien-glace), et de conditions un peu moins arides que celles requises pour les *sand-wedges* ;
- (2) la présence de ces fentes, leur densité, la forte compaction de la formation sableuse aptienne et la structuration polyédrique de la partie supérieure montrent qu'un permafrost a affecté l'ensemble de la zone, au moins lors du dernier maximum glaciaire ;
- (3) ces structures se prolongent en profondeur dans les sables à la faveur d'un réseau de diaclases préexistant, d'origine tectonique, en accord avec l'hypothèse initialement retenue par l'Andra [3] ;
- (4) la densité des veines de glace qui se sont développées dans l'ensemble de la formation sableuse de l'Aptien (6 m minimum) et le caractère drainant de leur colmatage sableux en font un système de drainage préférentiel non négligeable. Néanmoins, les observations menées sur le site proche de TFA montrent que ces structures s'atténuent rapidement dans les argiles sous-jacentes et ne génèrent donc pas de discontinuités dans le niveau imperméable assurant la fiabilité du stockage ;
- (5) enfin, cette étude a permis de mettre en évidence, pour la première fois en France septentrionale, l'existence d'un réseau de fentes de type *sand-wedges* et composites particulièrement bien développé. Elle apporte donc des éléments inédits en ce qui concerne la présence d'un permafrost (localisé au sommet des reliefs exposés) et de conditions particulièrement arides lors du dernier maximum glaciaire, dans une région où les données sur les formations quaternaires et les structures périglaciaires associées étaient jusqu'à maintenant très lacunaires.

#### Références

- [1] Andra, Discontinuités des sables de l'Aptien supérieur au droit du centre de l'Aube, note technique Andra/SUR RP AESS 96–013, 1996, pp. 119–137.
- [2] Andra, Synthèse concernant la granulométrie des massifs filtrants, note technique, Andra/DCS/CA/SE, 1998, 13 p.
- [3] Andra, Discontinuités des sables de l'Aptien supérieur au droit du centre de l'Aube. Synthèse au 31/12/98, note technique Andra/DCS/CA/SE, 1999, 36 p.
- [4] Andra, Centre de l'Aube, Expertise des désordres du bassin d'orage. Discontinuités des sables de l'Aptien supérieur, ESI RP OARM 99–018, 1999, 23 p.
- [5] Andra–Aquila, Plate-forme TFA, Contrôle géologique de réception des alvéoles nord et sud, Rapport, TFA-Q-25-RBF 0510 B, 2003, 9 p.
- [6] P. Antoine, Les loëss en France et dans le Nord-Ouest européen, Rev. Fr. Géotech. 99 (2002) 3–21.
- [7] P. Antoine, J.-P. Coutard, P. Gibbard, B. Hallegouet, J.-P. Lantier, J.-C. Ozouf, The Pleistocene rivers of the Channel Region, J. Quat. Sci. 18 (2003) 309–318.
- [8] P. Antoine, A.V. Munaut, N. Limondin-Lozouet, P. Ponef, J. Dupéron, M. Dupéron, Response of the Selle River to climatic modifications during the Lateglacial and Early Holocene (Somme Basin–northern France), Quat. Sci. Rev. 22 (2003) 2061–2076.
- [9] T.G. Fisher, Sand wedges and ventifact palaeoenvironmental indicators in North-West Saskatchewan, Canada, 11 ka to 9.9 ka BP, Permafrost Periglacial Processes 7 (1996) 391–408.
- [10] M. Frechen, Upper Pleistocene loess stratigraphy in Southern Germany, Quat. Geochronol. 18 (1999) 243–269.
- [11] H.M. French, The Periglacial Environment, Longman, London, 1976.
- [12] H.M. French, J.S. Gozdzik, Pleistocene epigenetic and syngenetic frost fissures, Belchatow, Poland, Can. J. Earth Sci. 25 (1998) 2017–2027.

- [13] H.M. French, M. Guglielmin, Frozen ground phenomena in the vicinity of Terra Nova Bay, Northern Victoria Land, Antarctica: a preliminary report, *Geografiska Annaler A* 82 (2000) 513–526.
- [14] H.M. French, M. Demitroff, S.L. Forman, Evidence for Late-Pleistocene permafrost in the New Jersey Pine Barrens (Latitude 39°N), Eastern USA, *Permafrost Periglacial Processes* 14 (2003) 259–274.
- [15] P. Haesaerts, I. Borziak, V. Chirica, F. Damblon, L. Koulakovska, J. Van der Plicht, The East-Carpathian loess record: a reference for the Middle and Late Pleniglacial stratigraphy in Central Europe, *Quaternaire* (2003) 163–188.
- [16] S.A. Harris (dir.), La terminologie du pergélisol et notions connexes, Conseil national de recherche du Canada, note technique, 142, 1998, 154 p.
- [17] D.G. Harry, J.S. Gozdzik, Ice wedges: growth, thaw transformation, and palaeoenvironmental significance, *J. Quat. Sci.* 3 (1988) 39–55.
- [18] J.A. Hyatt, Cavity development in ice-rich permafrost, Pangnirtung, Baffin Island, Northwest Territories, *Permafrost Periglacial Processes* 3 (1992) 293–313.
- [19] C. Kasse, J. Vandenberghe, Topographic and drainage control on Weichselian Ice-Wedge and Sand-Wedge formation, Vennebrügge, German–Dutch border, *Permafrost Periglacial Processes* 9 (1998) 95–106.
- [20] J.-P. Lautridou, Le cycle périglaciaire pléistocène en Europe du Nord-Ouest et plus particulièrement en Normandie, thèse d'État, Caen, 2 vols., 1985, 908 p.
- [21] P. Lebrét, A. Dupas, M. Clet, J.-P. Coutard, J.-P. Lautridou, S. Courbouleix, M. Garcin, M. Levy, B. Van Vliet-Lanoë, Modelling of permafrost thickness during the Late glacial stage in France: preliminary results, *Can. J. Earth Sci.* 31 (1994) 959–968.
- [22] R. Mackay, Periglacial features developed on the exposed lake bottoms of seven lakes that drained after 1950, Tuktoyaktuk Peninsula area, Western Arctic coast, Canada, *Permafrost Periglacial Processes* 10 (1999) 39–63.
- [23] R. Mackay, Thermally induced movements in ice-wedges polygons, Western Arctic coast: a long-term study, *Géogr. Phys. Quat.* 54 (2000) 41–68.
- [24] J. Mol, J. Vandenberghe, C. Kasse, H. Stel, Periglacial microjointing and faulting in Weichselian fluvio-aeolian deposits, *J. Quat. Sci.* 8 (1993) 15–30.
- [25] J.B. Murton, Thermokarst-lake basin sediments, Tuktoyaktuk Coastlands, western Arctic Canada, *Sedimentology* 43 (1996) 737–760.
- [26] J.B. Murton, H.M. French, Thaw modification of frost-fissure wedges, Richard Island, Pleistocene Mackenzie Delta, western arctic Canada, *J. Quat. Sci.* 8 (3) (1993) 185–196.
- [27] J.B. Murton, H.M. French, Thermokarst involutions: Summer Island, Pleistocene Mackenzie Delta, Western Canadian Arctic, *Permafrost Periglacial Processes* 4 (1993) 217–229.
- [28] J.B. Murton, H.M. French, Sand-wedges and permafrost history, Crumbling point, Pleistocene Mackenzie Delta, Northwest Territories, Canada, in: *Proc. 6th Int. Conf. on Permafrost*, Beijing, China, 1993.
- [29] J.B. Murton, P. Worsley, J. Gozdzik, Sand veins and wedges in cold aeolian environments, *Quat. Sci. Rev.* 19 (2000) 899–922.
- [30] T.C. Nissen, Late-Pleistocene ice-wedge cast and sand-wedge relicts in the Wyoming Basins, USA, *Permafrost Periglacial Processes* 1 (1990) 201–219.
- [31] T.L. Péwé, Sand-wedge polygons (tessellation in the Mac Murdo Sound region, Antarctic, a progress report, *Am. J. Sci.* 257 (1959) 545–552.
- [32] A. Pissart, Géomorphologie périglaciaire, textes et leçons de la chaire Francqui belge, Laboratoire de géomorphologie et de géologie du Quaternaire, université de Liège, 1987, 135 p.
- [33] N.N. Romanovsky, Regularities in formation of frost fissures and frost fissures polygons, *Biuletyn Periglacialny* 23 (1973).
- [34] J. Vandenberghe, A. Pissart, Permafrost changes in Europe during the Last Glacial, *Permafrost Periglacial Processes* 4 (1993) 121–135.
- [35] B. Van Vliet-Lanoë, Frost effects in soils, in: J. Boardman (Ed.), *Soils and Quaternary Landscape*, John Wiley & Sons Ltd, 1985, pp. 117–158.
- [36] B. Van Vliet-Lanoë, Le rôle de la glace de ségrégation dans les formations superficielles de l'Europe du Nord-Ouest, thèse d'État, université Paris-1, 1987, 864 p.
- [37] N. Wang, Q. Zaho, J. Li, G. Hu, H. Cheng, The sand-wedges of the Last Ice Age in the Hexi Corridor, China, Paleoclimatic interpretation, *Geomorphology* 51 (2003) 313–320.
- [38] R.G. West, Devenesian thermal contraction networks and cracks at Somersham Cambridgeshire, UK, *Permafrost Periglacial Processes* 4 (1993) 277–300.