

U n i v e r s i t é d e L i è g e

Service de phytosociologie, flore et végétation des Hautes-Fagnes

Station scientifique des Hautes-Fagnes
Rue de Botrange 137
4950 Robertville

Tel: 080 / 44 61 82
E-mail: rschumacker@ulg.ac.be

Conventions C60/1 du 1er mars 1998
 C60/2 du 1er février 2001
 C60/3 du 1er octobre 2002

Topographie de surface et de subsurface des zones tourbeuses des réserves naturelles domaniales des Hautes-Fagnes

Rapport de synthèse

Responsable de la recherche: Prof. dr. R. Schumacker

Chercheur: C. Wastiaux, dr. sci.

Collaborateurs: S.A. G-Tec, Ing. dr. L. Halleux
 Rue Frumhy, 34
 Blégny-Barchon

Cellule Topographie, D.P.A., D.G.R.N.E., Ministère de la Région Wallonne,
M. J.-M. Jacqmotte

Sommaire

SOMMAIRE	2
1. INTRODUCTION: OBJECTIFS DE L'ÉTUDE	3
2. CARACTÉRISTIQUES DE LA ZONE D'ÉTUDE	4
2.1. DÉLIMITATION	4
2.2. ORO-HYDROGRAPHIE.....	4
2.3. GÉOLOGIE ET GÉOMORPHOLOGIE.....	4
2.4. HYDROGÉOLOGIE.....	5
2.5. PÉDOLOGIE.....	5
2.6. CLIMAT	6
2.7. VÉGÉTATION	6
2.8. HISTOIRE RÉCENTE DE LA VÉGÉTATION.....	7
2.9. INFLUENCES ANTHROPIQUES	7
3. TECHNIQUES ET MÉTHODES	9
3.1. MÉTHODOLOGIE GÉNÉRALE	9
3.2. RADAR DE SUBSURFACE	9
3.3. G.P.S.	13
3.4. TRAITEMENT INFORMATIQUE DES DONNÉES.....	14
3.5. PRÉLÈVEMENTS DE TOURBE	15
3.6. PRÉLÈVEMENTS ET ANALYSES D'EAU.....	17
4. CARTOGRAPHIE DES MASSIFS TOURBEUX: UN INVENTAIRE DÉTAILLÉ	18
4.1. CARTE GÉNÉRALE: UNE AMÉLIORATION PAR RAPPORT À LA CARTE PÉDOLOGIQUE.....	18
4.2. CARTE DES ÉPAISSEURS DE TOURBE POUR CHACUNE DES FAGNES.....	18
4.3. SUPERFICIES ET VOLUMES DE TOURBE.....	20
4.4. CONSÉQUENCES EN MATIÈRE DE GESTION	23
5. TOPOGRAPHIE DE SUBSURFACE	24
5.1. INFORMATIONS GÉOLOGIQUES ET GÉOMORPHOLOGIQUES	24
5.2. CONDITIONS INITIALES DE LA FORMATION DE LA TOURBE.....	26
6. STRATIGRAPHIE DES DÉPÔTS TOURBEUX: HISTOIRE DU DÉVELOPPEMENT DES TOURBIÈRES	30
6.1. DÉMARRAGE DES DÉPÔTS TOURBEUX	30
6.2. RÉFLECTEURS INDICATEURS STRATIGRAPHIQUES	33
7. PHÉNOMÈNES OBSERVÉS EN SURFACE: LIENS AVEC LA SUBSURFACE	38
7.1. VÉGÉTATION SUB-INTACTE ET MORPHOLOGIE DES DÉPÔTS	38
7.2. ZONES À VÉGÉTATION MÉSOTROPHE	38
8. CONCLUSIONS	41
BIBLIOGRAPHIE	43
REMERCIEMENTS	48
TABLE DES MATIÈRES	49
LISTE DES FIGURES	51
ANNEXES	52

1. Introduction: objectifs de l'étude

Les tourbières des Hautes-Fagnes ont déjà fait l'objet de nombreuses recherches dans plusieurs disciplines. En particulier, le problème très aigu de la dégradation de ces écosystèmes exceptionnels a été et est encore actuellement étudié, tant sous l'angle de recherches fondamentales en botanique, paléoécologie et hydrologie, que par une approche expérimentale de la régénération. Le Conseil de l'Europe, lors des deux derniers renouvellements du diplôme européen de la conservation de la nature en 1996 et en 2001, a recommandé la poursuite des investigations dans ces deux directions complémentaires.

Les données acquises concernent presque exclusivement les phénomènes de surface. Très peu d'informations sont disponibles sur les phénomènes anciens ou profonds; en outre, il s'agit de données ponctuelles (sondages).

Cette convention apporte des éléments substantiels dans le comblement de cette lacune. Elle a pour buts de délimiter et de caractériser les ensembles tourbeux des Réserves naturelles domaniales des Hautes-Fagnes. Ces caractéristiques comprennent, en particulier:

- la morphologie de subsurface;
- les conditions topographiques de mise en place des dépôts tourbeux;
- les phases de développement des tourbières;
- leur topographie de surface;
- les processus profonds susceptibles d'influencer la végétation actuelle.

Le travail se base sur deux outils très performants:

- le radar de subsurface (ground-penetrating radar, GPR)
- le système de positionnement par satellites (global positioning system, GPS).

L'utilisation du radar en tourbière est en plein développement depuis la fin des années 80. Il permet de restituer une coupe dans la tourbière selon un profil en continu. Son utilisation systématique, couplée au GPS, dans la prospection des tourbières des Hautes-Fagnes représente donc aussi une contribution originale à ce domaine de recherches.

2. Caractéristiques de la zone d'étude

2.1. Délimitation

La région des Hautes-Fagnes occupe la partie septentrionale, la plus élevée, du massif cambro-ordovicien de Stavelot. Cette zone est globalement comprise entre 50°10' et 50°25' lat. N et 5°45' et 6°25' long. E. La carte en [fig. 1](#) en donne un aperçu.

2.2. Oro-hydrographie

Les points culminants de la Belgique se situent à Botrange (694 m), à la Baraque-Michel (672 m) et au Mont-Rigi (673 m). Le plateau des Hautes-Fagnes présente une topographie généralement peu accidentée, dans laquelle de nombreux ruisseaux prennent leur source, mais sans dessiner de vallons encaissés. Par contre, en dessous de 500 m d'altitude, ces ruisseaux incisent profondément le relief. Les Hautes-Fagnes font partie du bassin hydrographique de la Meuse, via la Vesdre, l'Amblève et la Rur. Plusieurs rivières ont leur source au sein même des zones tourbeuses, notamment la Rur, la Helle, la Soor, la Hoëgne. Le réseau hydrographique des têtes de bassins a été fortement modifié par le drainage artificiel.

2.3. Géologie et géomorphologie

Le socle cambro-ordovicien du plateau des Hautes-Fagnes, revinien et salmien dans la nomenclature locale, constitué essentiellement de quartzites, phyllades et quartzophyllades, a été plissé par les orogénèses calédonienne et hercynienne. Des intrusions dans le Revinien existent localement (tonalite de la Helle) (Bless et al., 1990).

Ce socle a été érodé en une pénéplaine pré-maestrichtienne. Les parties sommitales des interfluves des Hautes-Fagnes en sont des lambeaux actuels (Demoulin, 1980 et 1986a).

Deux transgressions ont ensuite eu lieu:

- au Crétacé supérieur (Maestrichtien), laissant des dépôts sableux et des argiles à silex (Renier, 1933; Demoulin, 1987a; Bless & Fernandez Narvaiza, 1997);
- à l'Oligocène (Tongrien inférieur), où les sédiments sableux témoignent d'un environnement littoral (Demoulin, 1987b).

Ces dépôts de couverture ont par la suite été presque totalement éliminés et ne subsistent que localement.

Depuis l'Oligocène, le massif de Stavelot subit des compressions liées à l'ouverture du graben du Rhin, ce qui provoque un soulèvement général du plateau. L'apparition de flexures a, en outre, déterminé un important soulèvement local du massif de la Baraque-Michel et de la partie orientale de la crête des Hautes-Fagnes (Demoulin, 1988).

Les processus périglaciaires qui se sont produits au Quaternaire ont laissé de nombreuses traces, parmi lesquelles des cicatrices de lithalses¹ et des accumulations pierreuses dues à des coulées de boue (Pissart, 1995 et 1999).

Des placages de limon éolien ont subsisté sur les crêtes, où ils constituent les "sètchamps" (zones à drainage favorable, exemptes de tourbe).

2.4. Hydrogéologie

Le sous-sol se compose d'un bed-rock quartzitique et phylladeux, dont la partie supérieure a été altérée sur une épaisseur et selon une intensité variables (Demoulin, 1986b).

Les dépôts post-paléozoïques forment une couverture discontinue de formations meubles, remaniées au cours du Quaternaire, constituées de sédiments divers (Bourguignon, 1953): argile d'altération du socle revinien, argile à silex (résidu insoluble du Crétacé), sables marins ou continentaux, limons et tourbes.

Dans ce système, Monjoie & Cajot (1985) distinguent 4 types de nappes aquifères interdépendantes.

- Les nappes aquifères du bed-rock se logent dans les fissures des horizons gréseux et quartzitiques. Elles sont caractérisées par des porosités efficaces de 0,1 à 7%; des tarissements assez faibles ($0,05$ à $0,1 \text{ j}^{-1}$) et des réserves de quelques mm à 20 mm d'eau.
- Les nappes du manteau d'altération, dont les coefficients de tarissement sont plus élevés ($0,4$ à $0,6 \text{ j}^{-1}$).
- De petites nappes locales dans les sables tertiaires, de faible extension.
- Les nappes des formations tourbeuses.

Les ruisseaux prenant naissance à l'émergence des nappes aquifères du Cambro-Ordovicien sont caractérisés par une faible minéralisation (moyenne de $0,7$ à $0,8 \text{ méq.l}^{-1}$); ce sont des eaux dystrophes (abondance des sulfates) et acides (pH de $3,9$ à $6,1$) (Leclercq, 1984).

2.5. Pédologie

Les sols sont essentiellement des sols bruns acides, souvent mal drainés, à gley ou pseudo-gley (Pahaut, 1969).

Les roches schisteuses, par altération physique et chimique, ont donné naissance à des matériaux riches en argiles, fortement imperméables (Bourguignon, 1953), sur lesquels se sont développées d'importantes superficies de sols tourbeux ou paratourbeux.

La carte des sols de Belgique définit les sols tourbeux comme contenant plus de 30 % de matière organique et les distingue uniquement selon leur épaisseur: les sols W (tourbe de plus de 1,5 m d'épaisseur) occupent un peu plus de 1000 ha; les sols V (V1: tourbe de 80 à 150 cm d'épaisseur; V2: de 40 à 80 cm), plus de 3500 ha.

¹ Lithalses: formes périglaciaires (buttes cryogènes) datant du Dryas récent, anciennement appelées paises minérales.

2.6. Climat

L'orographie, constituée de la ligne de crête de la haute Ardenne, provoque une ascension des masses d'air venant du sud-ouest (direction des vents dominants des perturbations, humides et d'origine océanique), ce qui, par détente adiabatique, occasionne un refroidissement et une condensation de vapeur d'eau donnant lieu à de fréquents brouillards et à des précipitations plus fortes qu'à basse altitude. En moyenne, il tombe au Mont-Rigi 1425 mm de précipitations par an, dont 275 mm sous forme de neige (Poncelet & Martin, 1947). Les précipitations se répartissent assez régulièrement sur l'année, avec cependant un maximum d'hiver (décembre et janvier) et un maximum d'été (juillet), lié aux averses orageuses. La température moyenne annuelle est de 6,1 °C.

2.7. Végétation

Potentiellement, les sols des Hautes-Fagnes sont occupés par des groupements forestiers et des tourbières (s.l.). En fonction du degré d'hydromorphie, on distingue principalement (Froment, 1968; Schwickerath, 1944; Vanden Berghen, 1951, 1952; Streef, 1959; Schumacker et al., 1974; Schumacker, 1980; Schumacker & De Zuttere, 1980; Tombal & Schumacker, 1983; Fabri & Schumacker, 1986; Frankard, 2000)¹:

- les hêtraies acidophiles à luzule blanche (*Luzulo albidae-Fagetum*) sur les sols loessiques à drainage favorable;
- les chênaies à bouleaux et molinie (*Betulo-Quercetum roboris*) sur les sols loessiques lessivés, à drainage défavorable (pseudogleys);
- les aulnaies (*Carici laevigatae-Alnetum glutinosae*) dans les fonds de vallée, les zones de nappes affleurantes, les émergences de nappes;
- les tourbières hautes ombrogènes dans des amphithéâtres de sources (tourbières de pente) ou à cheval sur des cols aplanis (tourbière en selle), les bois tourbeux (*Sphagno palustris-Betuletum pubescentis*) sur tourbe peu épaisse, et les bas-marais dans les zones de suintements ou à la périphérie des tourbières hautes.

Les associations végétales les plus caractéristiques du plateau des Hautes-Fagnes sont celles des tourbières hautes actives (formant encore de la tourbe). Il s'agit principalement des groupements à *Sphagnum papillosum*, à *S. magellanicum* et à *S. fallax* distingués par Schumacker & De Zuttere (1980) et classés dans les *Oxycocco-Sphagnetum* Br.-Bl. & R. Tx. 1943.

Ces associations végétales sont essentiellement caractérisées par une strate muscinale épaisse, dans laquelle dominent les sphaignes (*Sphagnum papillosum* et *S. magellanicum* surtout, mais aussi *S. fallax* et *S. rubellum*, ...) souvent accompagnées de *Polytrichum strictum* et de diverses hépatiques, dont *Odontoschisma sphagni*. Dans les strates sous-arbustive et herbacée, ce sont essentiellement les éricacées, surtout la bruyère quaternée (*Erica tetralix*) et la callune (*Calluna vulgaris*), les cypéracées (*Eriophorum vaginatum*) et localement *Empetrum nigrum* qui dominent.

La végétation des tourbières est constituée par un nombre assez limité d'espèces, plus ou moins strictement acidophiles, frugales en ce qui concerne les besoins en cations bivalents et

¹ Nomenclature selon Lambinon et al. (1992) pour les plantes vasculaires, Corley et al., 1981, Corley & Crundwell (1991) pour les mousses, Grolle & Long (2000) pour les hépatiques.

en composés azotés, résistantes à la sécheresse physiologique et adaptées à la limitation de l'évapotranspiration (Tombal & Schumacker, 1983)

Ces tourbières acides se développent de façon optimale au dessus de 550 à 600 m d'altitude sur le plateau de la Baraque-Michel et de la Baraque-Fraiture, selon la crête principale sud-ouest-nord-est du massif ardennais. Elles couvraient auparavant environ 2000 ha, mais aujourd'hui, la partie (sub) intacte de ces tourbières couvre moins de 200 ha (Frankard et al., 1998).

2.8. Histoire récente de la végétation

(d'après Damblon, 1996)

Le plus ancien dépôt de tourbe connu dans les Hautes-Fagnes a été découvert dans le rempart d'un lithalse de la Konnerzvenn (Pissart & Juvigné, 1980). Son analyse paléoécologique (Bastin, 1985; Coope, 1985; Damblon & Bastin, 1986) révèle les successions végétales de la fin du Tardiglaciaire, du Bölling (ca. 13700 - 12400 BC CAL) au début du Dryas III (ca. 10100 BC CAL). Les macrofossiles indiquent un paysage de toundra, avec de nombreux bas-marais à *Carex* et des pelouses à caractère steppique sur les sols secs, et quelques buissons épars de *Salix* sp. et de *Betula nana*. Au cours de l'Allerød (ca. 11350 - 10100 BC CAL), le paysage évolue vers une taïga avec l'invasion de *Pinus*. Ce dernier régresse fortement au Dryas III, période froide brève mais intense (ca. 10100 - 9400 BC CAL) pendant laquelle les lithalses se sont formées (Pissart, 1999).

Les dépôts tourbeux holocènes ont commencé à se développer dès le Préboréal (ca. 9400 - 8100 BC CAL) dans les dépressions laissées par la fonte de la glace ayant formé les lithalses. Elles sont d'abord colonisées par des groupements aquatiques, relativement mésotrophes, puis par des groupements à sphaignes et à cypéracées, de plus en plus acidiphiles. Cette phase de réchauffement se caractérise par une forêt claire à *Pinus* et *Betula*, accompagnés de *Salix*.

La transition vers la période boréale (ca. 8100 - 6400 BC CAL) se marque par la régression de *Pinus*, l'extension de *Corylus* et l'apparition de *Quercus* et *Ulmus*.

Le Boréal et l'Atlantique (ca. 6400 - 3800 BC CAL) constituent l'optimum climatique de l'Holocène. La chênaie mixte (*Quercus*, *Ulmus*, *Tilia*) colonise les sols loessiques, tandis qu'*Alnus* et *Fraxinus* s'étendent sur les sols moins bien drainés. C'est à partir du Boréal, et surtout à l'Atlantique, que l'activité turfigène se développe en-dehors des cuvettes de lithalses, débutant par une phase oligo-mésotrophe (bas-marais à *Carex*, bois tourbeux) à laquelle succèdent des groupements oligotrophes constitués essentiellement d'*Eriophorum vaginatum* et *Sphagnum* div. sp.

A partir du Subboréal (ca. 3800 - 840 BC CAL), le hêtre (*Fagus sylvatica*) apparaît; au Subatlantique (840 BC CAL- Actuel), il domine le paysage forestier sur les sols bien drainés, tandis que le chêne pédonculé (*Quercus robur*) domine sur les sols à pseudogley.

2.9. Influences anthropiques

Aucune agglomération humaine ne s'est implantée sur le haut plateau; néanmoins, ses ressources ont été exploitées par les habitants des villages périphériques depuis le haut Moyen Âge.

Ceux-ci y exerçaient leurs droits de pâturage, d'affouage, de fauchage, de coupe des taillis et de bois d'oeuvre, de charbonnage, d'essartage et d'écobuage (Froment, 1968). Ces pratiques ont conduit à la déforestation et à l'apparition de vastes étendues de landes.

Dans les zones tourbeuses, on pratiquait principalement le stiernage (constitution d'une litière pour le bétail, en fauchant molinie et bruyère tendre, en sciant les buissons de genêts, myrtilliers, bruyères âgées, le tout mélangé à des sphaignes ratissées) (Bouillenne et al., 1956), et l'exploitation de la tourbe comme combustible.

A partir du milieu du 18^e siècle, mais surtout à partir du milieu du 19^e, les autorités, conscientes de la dégradation de l'Hertogenwald, soutiennent un programme de mise en valeur des incultes. Le reboisement s'accompagne de mesures d'assèchement.

Plusieurs grands fossés sont creusés au sein même des tourbières, afin de capter et de détourner leurs réserves en eau (Bouillenne et al., 1956). A la fin du 19^e s, certaines tourbières (par ex.: la fagne des Deux-Séries) sont mises en chantier de plantation après une campagne de drainage particulièrement intensif. Ces plantations ont été détruites par les incendies de 1911, 1919 et 1920 (Froment, 1966 et 1975; Schumacker, 1971).

Néanmoins, l'impact du drainage et des fronts d'exploitation a perduré, conduisant à une dégradation dramatique des tourbières.

L'enrésinement et le drainage intensif datant du début du 19^e s., sont à l'origine de la dégradation, voire la disparition, de vastes étendues de forêts de feuillus, de landes et de tourbières. Le paysage forestier est maintenant dominé par l'épicéa commun; les landes et tourbières, par des peuplements monospécifiques de *Molinia caerulea*.

3. Techniques et méthodes

3.1. Méthodologie générale

Les mesures GPR/GPS ont été faites suivant des profils parallèles entre eux, espacés de 50 m. Le choix de cet espacement des profils résulte d'un compromis entre un temps de travail raisonnable et une information suffisante. Localement, des profils plus serrés ou des profils perpendiculaires ou obliques par rapport aux profils généraux ont été réalisés.

La direction des profils a été choisie, pour chacune des fagnes, en fonction de la topographie et de considérations pratiques. Dans la mesure du possible, les profils ont été réalisés perpendiculairement à la pente générale, de manière à recouper d'éventuels éléments linéaires tels que des chenaux d'écoulement.

Lors de la première phase de la convention (fagne des Deux-Séries), ces profils ont été matérialisés sur le terrain à l'aide de fanions, servant à la fois pour le balisage préalable et pour le repérage de points particuliers a posteriori. Lors des deux phases ultérieures, l'utilisation d'un GPS disposant d'une fonction de navigation en temps réel (cf. infra 3.3.) a permis de s'affranchir du balisage.

Le GPS et le radar ont été découplés pour cause d'interférences. Les levés au GPS ont cependant été effectués, dans la plupart des cas, en même temps que les profils radar, ce qui assure la coïncidence des deux profils.

Les cartes pédologiques (Pahaut, 1961; Pahaut, 1965; Pahaut, 1969; Pahaut & Oldenhove de Guertechin, 1962) ([fig. 2](#)) ont servi de base pour la délimitation des zones à prospector. Les zones de sols W (tourbe épaisse de plus de 150 cm) et leur ceinture de sols V1 (tourbe épaisse de 80 à 150 cm) ont été sélectionnées. Les sêchamps (sols limoneux, boisés) et les zones tourbeuses enrésinées (essentiellement périphériques) n'ont pas été retenus pour l'étude, en raison des difficultés matérielles d'y effectuer les mesures (difficulté de passage du traîneau radar, perte des signaux des satellites pour le GPS).

La carte en [fig. 3](#) situe tous les profils radar réalisés: ils totalisent 280 km, la superficie prospectée étant de 16,3 km².

3.2. Radar de subsurface

3.2.1. Principe général (Halleux, 1995)

Une impulsion électromagnétique émise par une antenne se propage dans le sol avec une vitesse $V = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}}$ où ϵ_r est la permittivité relative du sol et c , la vitesse de la lumière dans le vide. L'amplitude de l'impulsion émise (A_0) décroît exponentiellement avec la profondeur selon la relation $A = A_0 e^{-\alpha z}$, où α est l'atténuation et z la distance parcourue.

L'atténuation est directement proportionnelle à la conductivité électrique effective, et inversement proportionnelle à la racine carrée de la permittivité relative réelle. Ces deux propriétés du sol, conductivité et permittivité, gouverneront donc sa réponse au radar. Un milieu très conducteur (argile p. ex.) aura une profondeur de pénétration quasi nulle. La

permittivité d'un sol dépend essentiellement de sa teneur en eau. En effet, la molécule d'eau étant dipolaire, sa capacité de polarisation dans un champ électrique est élevée: $\epsilon_r \approx 81$ pour l'eau, la plupart des roches ayant une permittivité relative de l'ordre de 4 à 9.

Lorsque le sol présente un contraste de permittivité, une partie de l'énergie de l'onde est réfléchi; les réflexions sont enregistrées par une antenne réceptrice.

La conversion du temps de propagation de l'onde en échelle de profondeur est déduite de la vitesse de propagation. Cette vitesse peut être estimée par différentes méthodes, dont la calibration directe (comparaison avec un sondage).

Chaque impulsion émise génère une trace. En déplaçant les antennes à la surface du sol, la juxtaposition des traces donne un profil continu de la subsurface.

La fréquence de l'antenne émettrice conditionne principalement la résolution et la profondeur de pénétration maximale. La résolution sera d'autant meilleure que la fréquence est élevée; par contre, la pénétration maximale diminue lorsque la fréquence augmente.

3.2.2. Application aux dépôts tourbeux

3.2.2.1. *Historique*

Les tourbières hautes oligotrophes, par leur teneur en eau élevée et leur faible conductivité électrique, sont des milieux très favorables à l'utilisation du radar.

Les possibilités théoriques d'exploitation des résultats concernent l'épaisseur de la tourbe, des différences dans la lithologie du substratum, des différences de minéralisation de l'eau d'imbibition de la tourbe, des contrastes de permittivité liés, notamment, à des différences de teneur en eau, eux-mêmes indiquant des variations de structure au sein de la tourbe.

La prospection de tourbières par GPR s'est développée dans plusieurs pays producteurs de tourbe: Canada, Finlande, Russie, Suède, ... depuis le début des années 80. Il s'agit généralement de localiser et de mesurer les volumes de tourbe exploitable (Bjelm, 1980; Hänninen, 1992; Tiuri et al., 1983; Ulriksen, 1980; Ziekur, 1998).

Quelques études se sont penchées sur des applications stratigraphiques (Kettles & Robinson, 1997; Nobes & Warner, 1992; Warner et al., 1990), parfois spécifiquement sur une analyse des propriétés géoélectriques de la tourbe (Theimer et al., 1994). La méthodologie reste assez empirique et consiste essentiellement à comparer des profils radar avec des carottes de sondage, dont on mesure les différents paramètres susceptibles d'influencer la réponse au radar. Ces paramètres étudiés sont la teneur en eau, en matière organique et en cendres, la densité, le degré d'humification, la conductivité électrique et l'analyse chimique de l'eau. Les conclusions sont très locales, car chaque type de tourbe a ses caractéristiques propres.

3.2.2.2. *Interprétation des réflecteurs*

Pour qu'un contraste dans le sol provoque une réflexion détectable par le radar, le coefficient de réflexion (rapport de l'amplitude réfléchi à l'amplitude émise) doit être supérieur à 0,01 (Theimer et al., 1994). Dans la tourbe, cela correspond à une variation de teneur en eau de 3% minimum, à condition que cette variation soit suffisamment brutale. Cette valeur seuil a été confirmée par Charlier (2002) dans des tourbes de la fagne des Deux-Séries.

Les petites variations locales dans la composition du sol peuvent produire des réflexions chaotiques. Celles-ci ne livrent aucune information utilisable. Lorsque les structures rencontrées sont significatives, elles peuvent produire des réflexions interprétables. On distingue les réflecteurs plans, qui ont une certaine extension latérale, et les réflecteurs ponctuels, provoqués par des éléments de dimension réduite (par exemple, un bloc rocheux, une souche d'arbre) (fig. 4a). Ces derniers se traduisent par une hyperbole de diffraction dont les caractéristiques dépendent en premier lieu de la vitesse de propagation du milieu. Ils ne permettent donc pas d'inférer la nature de l'objet ni sa dimension.

Dans le cas des Hautes-Fagnes, les limons enrichis en argile à la base des tourbières constituent un réflecteur puissant, pratiquement imperméable aux ondes (Halleux, 1990). Le contact entre la tourbe et le substratum minéral se marque donc nettement sur tous les profils (fig. 4a), mais il serait vain de vouloir interpréter les signaux qui apparaîtraient en dessous de ce contact: il s'agit dans tous les cas de bruit, qui peut parfois prendre la forme de réflexions multiples ou d'hyperboles de diffraction.

Des contrastes de permittivité sont également susceptibles de se produire à l'interface entre la zone saturée et la zone désaturée, ainsi qu'à la limite entre l'acrotelme et le catotelme¹ dans les tourbières actives. Le niveau hydrostatique, indiquant approximativement la limite de la zone saturée, est généralement à moins de 30 cm, et toujours à moins de 50 cm sous la surface dans les tourbières étudiées (Hindryckx, 1999; Wastiaux, 2000). La limite inférieure de l'acrotelme, qui correspond grossièrement à la zone de fluctuation maximale de la nappe, est d'environ 40 cm (Wastiaux, 2000). Ces niveaux, en théorie détectables, sont en réalité trop proches de la surface et seront masqués par les réflexions de surface. Pour étudier en détail la partie supérieure des tourbières, il faudrait utiliser des antennes à plus haute fréquence (500 MHz), mais on perdrait alors les informations plus profondes qui constituent l'objet principal de ce travail. Toute autre discontinuité dans la tourbe pourra donner lieu à un réflecteur.

Des artefacts peuvent être enregistrés sur les images radar.

Des hyperboles de diffraction sont produites par des réflecteurs aériens à proximité des antennes (essentiellement des arbres dans le cas des tourbières étudiées) (fig. 4b).

Des réflexions multiples sont dues à plusieurs trajets aller-retour entre l'antenne et l'objet (fig. 4a).

Des pull-up² peuvent se produire lorsqu'une quantité d'air se trouve sous les antennes, ce qui est le cas lors du passage de petits drains. Comme la vitesse de propagation augmente alors nettement sur une partie du trajet de l'onde, la réflexion a lieu plus tôt, ce qui donne l'impression d'une remontée locale du réflecteur (fig. 4b).

3.2.2.3. Précision des mesures

Plusieurs facteurs affectent la précision de la mesure de l'épaisseur de tourbe ou de la profondeur d'un réflecteur.

- Facteur de conversion du temps de propagation de l'onde en échelle de profondeurs. La vitesse moyenne utilisée ici, de 0,036 m/ns, découle de comparaisons de réflexions radar avec

¹ Acrotelme: horizon supérieur d'une tourbière active, lieu des échanges hydriques et énergétiques, surmontant le catotelme qui constitue le gros de la masse tourbeuse (Ingram, 1978).

² Pull-up: artefact faisant apparaître un réflecteur moins profond qu'en réalité, dû à une couche en surface où la vitesse de propagation des ondes est plus élevée que la vitesse moyenne dans le milieu environnant.

des sondages. Les valeurs extrêmes calculées étaient de 0,035 et 0,038 m/ns. On peut donc estimer l'imprécision maximale commise en appliquant la valeur moyenne, à 5%.

Ces valeurs sont en accord avec, d'une part, les données de la littérature dans le même type de tourbe (e.g. Ziekur, 1998), et, d'autre part, les équations théoriques. En particulier, ces équations relient la vitesse de propagation à la porosité moyenne du profil. Les porosités calculées correspondant à des vitesses de 0,035, 0,036 et 0,038 m/ns sont, respectivement, 90, 85 et 76%. 85% est bien l'ordre de grandeur de la porosité moyenne de la tourbe (Wastiaux, 1990). Le calcul de la vitesse réelle, aux points de calibration, peut ainsi mettre en évidence des différences notables de propriétés hydro-physiques des tourbes.

En particulier, il faut s'attendre à une déviation par rapport à la vitesse moyenne si des niveaux minéraux (e.a. limons) s'intercalent dans la tourbe, par exemple à la base du dépôt. Dans un tel cas, la vitesse et la profondeur seraient sous-estimées.

- Le plan de référence des antennes se situe au sommet des touradons de molinie, dont la hauteur moyenne est de 30 cm. C'est également à ce niveau que sont prises les coordonnées topographiques. Comme cette couche végétale est constituée essentiellement d'air, la vitesse de propagation des ondes y est environ 10 fois supérieure à celle dans la tourbe (constituée essentiellement d'eau). Par conséquent, la correction à apporter sur la profondeur est minime et peut être négligée en pratique.

- La résolution est la distance minimale entre 2 réflecteurs pour que ceux-ci soient distinguables sur les enregistrements. C'est essentiellement la résolution verticale qui nous intéresse. Elle dépend de la fréquence des antennes, et est égale à une demi longueur d'onde. Nous avons travaillé avec des antennes de fréquence nominale de 200 MHz, mais dont la fréquence centrale réelle est d'environ 160 MHz. La longueur d'onde (=vitesse/fréquence) est de 22 cm; on peut donc estimer la résolution verticale théorique à 11 cm.

3.2.3. Equipement radar

Le matériel utilisé est le RAMAC GPR (Suède). Il s'agit d'un matériel récent, léger, où la liaison entre l'unité de contrôle et les antennes est assurée par fibres optiques, l'acquisition se faisant sur PC ([fig. 5a](#)).

Un traîneau spécialement adapté à la fagne a été mis au point par G-TEC (Spa). Son poids a été réduit au minimum en utilisant une simple feuille de PVC portant les antennes, l'unité de contrôle du radar et l'ordinateur étant portés sur le dos. Ce traîneau allie souplesse et stabilité, assurée par une longueur suffisante (environ 3 m) ([fig. 5b](#)). Les impulsions sont déclenchées tous les 20 cm par un topofil.

La fréquence choisie est 200 MHz, qui est le meilleur compromis pénétration/résolution. Tous les profils ont été effectués avec les antennes 200 MHz, mais la partie centrale du Misten a dû être prospectée une seconde fois avec des antennes de 100 MHz, car le réflecteur à la base de la tourbière était trop profond et n'apparaissait plus sur les images.

3.3. G.P.S.

3.3.1. Principe général

Le Global Positioning System (G.P.S.) permet de déterminer les coordonnées de points à la surface de la terre, à partir de signaux radio émis par des satellites artificiels en orbite autour du globe. Chaque satellite génère deux ondes porteuses, deux codes de modulation et un message de navigation. La constellation est telle qu'au moins 4 satellites soient visibles en tout point et à tout moment. Dès lors, un récepteur captant ces informations peut calculer sa distance aux satellites et, connaissant les paramètres des orbites, calculer les 4 inconnues (temps, x , y , z) dont il déduit sa position dans le système de référence WGS84.

Une limitation importante à l'utilisation du GPS est la présence d'obstacles qui réduisent le nombre de satellites captés. Dans les fagnes, ce problème se pose peu, mais a cependant empêché les mesures le long de toutes les zones boisées.

3.3.2. Précision des mesures

La précision des mesures dépend du type de récepteur et de leur utilisation, seul ou à deux.

Lors de la première phase (fagne des Deux-Séries), nous avons travaillé avec des récepteurs bi-fréquence mesurant les codes et les phases. Le concept de mesure de lignes de base a été appliqué: une station fixe de référence est installée en milieu dégagé à moins de 10 km du site de mesure (station météorologique du Mont-Rigi) et un deuxième récepteur mobile est utilisé dans la fagne prospectée. Lors du traitement ultérieur, cette méthode permet d'éliminer des erreurs qui sont corrélées pour des stations proches. Au total, la précision des mesures ainsi effectuées est d'ordre décimétrique, ce qui dépasse nettement nos exigences du point de vue planimétrique et convient parfaitement pour l'altimétrie.

Il est en effet illusoire d'accorder une signification à la valeur centimétrique, pour deux raisons: d'abord, les touradons de molinie rendent imprécise la définition du niveau du sol; ensuite, les mouvements saisonniers verticaux des tourbières ("Mooratmung") ont une amplitude d'une dizaine de centimètres.

Le récepteur itinérant a été utilisé principalement en mode stop-and-go (points de mesure espacés de 10 à 20 m et choisis par l'utilisateur en fonction de la topographie locale); lors de périodes d'enneigement, la stabilité de l'antenne lors du déplacement à ski se prêtait bien au mode cinématique (mesures effectuées à intervalle de temps régulier). Cette méthode a l'avantage d'être plus rapide (pas de stationnement sur les points), donc permet de densifier les mesures et réduit la nécessité d'interpolations.

Afin de transformer les coordonnées obtenues en WGS84 en coordonnées Lambert belge 72, des points de calage IGN encadrant la zone d'étude ont été stationnés et intégrés au réseau.

Lors des deux autres phases de la convention, nous avons travaillé avec un GPS différentiel (Omnistar), fonctionnant en temps réel. Le mode cinématique a été appliqué, une mesure étant prise toutes les 5 secondes.

En planimétrie (x , y), la précision est inférieure au mètre, ce qui nous satisfait largement.

La précision du matériel a été vérifiée de manière pratique, par le stationnement sur deux bornes IGN et par un parcours en fagne Wallonne effectué d'une part avec le GPS Omnistar et d'autre part avec un GPS de précision. En planimétrie, la coïncidence est quasiment parfaite. En altimétrie (z), la précision est moins bonne, de l'ordre de ± 2 m. Dans la plupart des cas, l'allure générale de la topographie peut être rendue de façon satisfaisante moyennant l'élimination de données aberrantes et un léger lissage des données.

Toutefois, pour améliorer les données altimétriques, nous avons également utilisé les modèles numériques de terrain de l'I.G.N. au 1:10 000. Ceux-ci consistent en des points x, y, z disposés selon un maillage de 20 m, levés par une méthode semi-automatique sur la base de photographies aériennes. La marge d'erreur annoncée par l'I.G.N. sur chacune des valeurs x, y et z est de 1 m.

3.4. Traitement informatique des données

3.4.1. GPS

Les mesures acquises au GPS de précision ont été traitées par le logiciel spécifique au matériel utilisé, puis exportées en format ASCII.

Les mesures acquises au GPS Omnistar ont été extraites grâce un programme mis au point par G-Tec S.A. Les coordonnées obtenues en WGS84 ont été transformées en coordonnées Lambert belge 72, par le calcul d'une transformation de coordonnées basée sur des points encadrant la zone d'étude.

3.4.2. Radar

Les images radar ont été traitées à l'aide du logiciel GRADIX (Interpex Ltd.). Les différents traitements doivent être adaptés à chaque image et consistent à ajuster l'échelle de temps, soustraire les résonances, filtrer les basses et hautes fréquences, et renforcer le signal par rapport au bruit ([fig. 6](#)).

En introduisant les altitudes mesurées par le GPS, on obtient une image corrigée du profil, faisant apparaître la topographie réelle des réflecteurs.

Une fonction de digitalisation à l'écran a été utilisée pour créer des fichiers d'épaisseurs de tourbe.

3.4.3. Cartographie

Les coordonnées topographiques et les données d'épaisseurs de tourbe ont été mises en forme dans le logiciel SURFER (Golden Software, Inc.). A partir de données x, y, z réparties de manière quelconque sur la zone à cartographier, le logiciel construit un réseau régulier de points dont il calcule les coordonnées par une méthode d'interpolation. Des isohypses ou des isopaques¹ peuvent alors être tracées à partir de cette grille.

¹ isopaque ou isopache: ligne d'égale épaisseur d'un dépôt

Plusieurs paramètres sont définis par l'utilisateur. Les grilles d'interpolation, dont la maille a été fixée à 20 m, ont été calculées par krigeage avec un rayon de recherche autour de chaque point généralement de 50 ou 60 m, selon les cas, et sans indication d'anisotropie.

Ce logiciel permet divers traitements et calculs. Des coupes topographiques peuvent être réalisées entre deux points quelconques définis par l'utilisateur. Les variations de l'altitude de la surface et de la subsurface, le long de cet axe de coupe, peuvent alors être représentées dans le logiciel GRAPHER (Golden Software, Inc.). Il faut bien réaliser que ces coupes résultent d'une interpolation et ne sont pas une mesure directe de la topographie. D'autre part, les volumes de tourbe peuvent être calculés dans un espace déterminé. Ce calcul est basé sur un modèle et ne donne qu'une estimation de la réalité.

3.5. Prélèvements de tourbe

Les prélèvements de carottes de tourbe ont été réalisés au moyen de la sonde d'origine russe décrite par Jowsey (1966) qui permet d'extraire des carottes hémicylindriques de 50 cm de long et de 5 cm de diamètre. Cette sonde présente l'avantage de ne pas perturber l'échantillon.

3.5.1. Teneur en eau, perte au feu

Les poids frais, poids sec et poids de cendres ont été mesurés sur des échantillons d'environ 1 cm³, respectivement après prélèvement, après passage à l'étuve à 105 °C pendant 12 h, et après passage au four à 500 °C pendant 12 h. Les teneurs en eau sont exprimées en % du poids frais; les teneurs en cendres sont exprimées en % du poids sec.

Le paramètre physique qu'il conviendrait de mesurer est la teneur en eau volumique, mais en pratique, il est plus facile de mesurer la teneur en eau massique, c'est pourquoi on utilise généralement ce paramètre, que l'on peut considérer comme presque égal dans les tourbes.

3.5.2. Degré d'humification

Le processus de décomposition incomplète de la matière organique dans un dépôt tourbeux, ou humification, peut être plus ou moins avancé. Plus la tourbe est humifiée, plus les restes végétaux sont décomposés, plus la taille des pores est réduite, d'où une diminution de la porosité efficace, et plus la concentration d'acides humiques est élevée. Les méthodes de mesure du degré d'humification sont diverses.

La méthode visuelle de von Post, très simple, n'a pas été employée ici car elle nécessite pour chaque mesure une poignée de tourbe et donc un sondage supplémentaire. En outre, la méthode risquait de ne pas être assez discriminante dans le cas de profils relativement homogènes.

Les méthodes standard basées sur les fibres sont assez complexes à mettre en oeuvre. Toutefois, nous avons estimé grossièrement la teneur en fibres en filtrant des échantillons de tourbe sous l'eau sur tamis à maille de 200 µm, en pesant les fibres séchées à l'air, et en exprimant leur poids par rapport au poids frais de l'échantillon de départ.

Le dosage des acides humiques a également été tenté, selon une méthode chimique-optique. Elle consiste à mesurer l'absorbance d'un extrait alcalin de tourbe et à la comparer à celle d'un acide humique standard (Blackford & Chambers, 1993).

Description de la méthode:

A 0,2g de tourbe séchée à l'étuve à 105 °C et broyée en poudre, on ajoute 100 ml d'une solution NaOH à 8%. Après ébullition, on laisse mijoter pendant une heure puis, après refroidissement, on ajoute de l'eau distillée jusqu'à 200 ml. Cet échantillon est alors filtré sur du papier Whatman Qualitative 1; 50 ml de cette solution sont dilués avec 50 ml d'eau distillée. La transmission lumineuse de la solution obtenue est mesurée au spectrophotomètre à la longueur d'onde de 540 nm. La courbe d'étalonnage est construite à partir de différentes dilutions d'acide humique standard ayant subi les mêmes traitements que les autres échantillons. Les résultats sont exprimés en %, l'acide humique standard représentant 100%.

3.5.3. Macrorestes végétaux

Les échantillons de tourbe sont désagrégés sous eau courante sur un tamis de 200 μm . Les macrorestes sont ensuite observés à la loupe binoculaire et séparés en quelques groupes principaux (sphaignes, fibres, bois, éricacées, charbons), sans aller jusqu'à la détermination des espèces. Pour chaque niveau analysé, le pourcentage de présence de chacune de ces classes est estimé.

3.5.4. Préparation des pollens

L'extraction et la concentration des pollens et spores ont été réalisées par attaque au KOH.

Description de la méthode:

Les échantillons, d'environ 1 cm^3 , sont couverts de KOH 10% auquel on ajoute une pincée de perborate de sodium, et portés à ébullition 5 min. Après filtration sur un tamis à 120 μm , le filtrat est lavé par centrifugations successives, le culot est récupéré, coloré à la safranine, et est prêt pour le montage de lames de comptage.

Un minimum de 200 grains sont comptés par niveau. Seuls les taxons arboréens les plus représentatifs ont été distingués au niveau générique ou spécifique; les comptages des herbacées ont distingué trois principales familles de phanérogames (*Poaceae*, *Cyperaceae* et *Ericaceae*), les autres étant regroupées, et un ordre de fougères, les Filicales. Les spores de *Sphagnum* ont également été comptées. Dans plusieurs préparations, certains genres ou familles de plantes herbacées ont pu être identifiés en plus.

Un diagramme palynologique est alors dressé dans le but d'établir l'évolution de la composition floristique régionale. Il est construit en calculant le pourcentage de chaque taxon par rapport au total de tous les spores et pollens comptés (à l'exclusion des spores de sphaignes).

Ce diagramme peut alors être comparé aux données de la littérature. Cette méthode permet d'établir une chronologie relative en se basant sur des événements caractéristiques, mais elle ne peut fournir de datation absolue précise. Les informations revêtent principalement un caractère régional, les conditions écologiques locales nécessitant une analyse plus fine des taxons présents.

3.5.5. Analyse des limons

Dans certains cas, une certaine épaisseur du limon sous-jacent à la tourbe a pu être extrait grâce à la sonde "russe".

L'extraction des pollens nécessite alors la destruction préalable des particules minérales, par attaque à l'acide fluorhydrique (HF).

Une analyse des minéraux denses a également été envisagée sur quelques échantillons.

3.6. Prélèvements et analyses d'eau

3.6.1. Mode de prélèvement

Afin de prélever l'eau de la nappe, des tubes percés ont été implantés en quelques points. Ce sont des tubes en PVC, de 3 cm de diamètre, pincés à la base et fendus uniquement sur les 20 cm inférieurs, ce qui permet de capter l'eau de la profondeur voulue. Etant donné la très faible perméabilité de la tourbe, ces tubes se remplissent lentement; les mesures doivent donc être espacées dans le temps.

L'eau est aspirée à l'aide d'une pipette. Le pH et la conductivité électrique sont mesurés in situ; en outre, le volume restant est prélevé pour analyses ultérieures.

3.6.2. Principe des analyses de tritium

Le tritium (^3H) est utilisé comme traceur isotopique naturel, qui présente le grand avantage d'être lié à la molécule d'eau. Les traceurs isotopiques sont utilisés pour déterminer des relations hydrologiques et hydrogéologiques, et le temps de résidence de nappes aquifères.

L'activité naturelle des eaux de surface est de l'ordre de 10 TU (1 TU = tritium unit = 1 atome de ^3H pour 10^{18} atomes de H). Lors des essais nucléaires des années 50-60, de grandes quantités de tritium ont été injectées artificiellement dans l'atmosphère, puis reprises dans le cycle de l'eau; les activités ont pu atteindre 5000 TU. Avec une demi-vie de 12,43 ans, ces activités ont maintenant diminué. En fonction de l'origine des masses d'air, les précipitations ont des activités tritium variables.

L'interprétation des activités tritium dans les aquifères se base sur deux suppositions (Rank, 1992):

- les eaux inertes (très faibles activités) ne contiennent que des précipitations antérieures au pic du tritium;
- les eaux à fortes activités (jusqu'à 100 TU encore actuellement) datent principalement des années 60.

4. Cartographie des massifs tourbeux: un inventaire détaillé

4.1. Carte générale: une amélioration par rapport à la carte pédologique

La carte pédologique ([fig. 2](#)) a été dressée sur la base de sondages ponctuels (distants de ± 100 m). Tout en reconnaissant le travail de terrain considérable qui a été effectué pour obtenir cette carte, elle présente néanmoins deux limitations importantes concernant la morphologie des dépôts tourbeux. Premièrement, elle résulte de l'interpolation de données ponctuelles, ce qui peut engendrer des erreurs en cas de variations rapides de l'épaisseur du dépôt. Deuxièmement, l'échelle des profondeurs ne détaille pas la profondeur au-delà de 1,5 m. En outre, la légende n'est pas homogène pour toutes les cartes de la région.

La carte des épaisseurs de tourbe ([fig. 7](#)) résulte de l'interpolation des données radar. Elle met en évidence la superficie et l'épaisseur de tous les massifs tourbeux prospectés. Pour se rendre compte de l'amélioration apportée à la carte pédologique, ces deux cartes ont été superposées ([fig. 8](#)). Les limites des sols W (isopaque de 150 cm) des grands massifs coïncident assez bien avec la carte radar (cas de Cléfaye, fagne Wallonne, Deux-Séries, Misten, Potaies), avec cependant moins de détail et souvent l'omission d'inclusions de moindre épaisseur. Pour les massifs de faible superficie, l'imprécision de la carte pédologique apparaît plus nettement. Par exemple, plusieurs petites zones W dans la partie ouest de la fagne Wallonne n'ont pas été confirmées par le radar. A l'inverse, une zone de plus de 150 cm de tourbe sur le versant vers la Helle de la fagne des Deux-Séries est renseignée comme zone de sols V (de 80 à 150 cm seulement). L'erreur la plus flagrante concerne les Trous-Brôli (ouest de la Baraque-Michel) où seuls deux petits massifs dépassent les 150 cm, alors que la carte pédologique renseigne une grande superficie de sols W.

4.2. Carte des épaisseurs de tourbe pour chacune des fagnes

4.2.1. Fagne des Deux-Séries

La fagne des Deux-Séries est constituée de plusieurs ensembles distincts ([fig. 9a](#), [fig. 9b](#)), séparés par des sêchamps ou par des espaces à faible couverture tourbeuse. Sont considérés comme ensembles tourbeux, des zones dont une superficie significative (plusieurs hectares) est constituée de plus de 1,5 m de tourbe. Ces massifs tourbeux se répartissent et se caractérisent comme suit.

- Un ensemble d'extension et d'épaisseur considérables, sur le versant de la Helle, adossé à la crête Brochepierre - Noir-Flohay (A). Il est remarquable d'y trouver en son centre une poche de plus de 4 m de tourbe sur plus de 5 ha, dont on ne soupçonnait pas du tout l'existence.
- Un ensemble au nord de cette même crête Brochepierre - Noir-Flohay (B). Il comporte également de la tourbe profonde (plus de 3, localement plus de 4 m).
- Une zone allongée, à l'est de la Soor, d'épaisseur moyenne comprise entre 2 et 3 m (C). Elle présente un intérêt particulier car c'est en surface de cet ensemble que subsiste le dernier lambeau (quelques ha) de tourbière sub-intacte de la fagne des Deux-Séries.
- Trois plus petits ensembles, axés sur l'Allée des Deux-Séries (D-E-F).
- Un secteur en bordure de la Helle, à l'ouest de l'Allée des Deux-Séries (G).

Il est possible qu'à la Fraîche-Haie, se trouve encore une poche tourbeuse importante, dont nous n'aurions prospecté que la périphérie N (partie au S du Geitzbusch, H). Ce secteur, planté d'épicéas, était malheureusement difficilement pénétrable avec le matériel radar et totalement impraticable avec le GPS.

4.2.2. Fagne Wallonne

On distingue trois massifs principaux ([fig. 10](#)).

- Le plus important par sa superficie (55 ha de plus de 1,5 m) et aussi par l'épaisseur de tourbe atteinte (6,8 m) est situé sur le col et porte la tourbière encore active. (A)
La morphologie initiale de ce dépôt a été complètement perturbée, sur ses flancs sud et ouest, par les fronts d'exploitation. Au nord, l'écoulement naturel, affluent de la Helle, creuse un chenal assez profond qui divise le massif en deux parties séparées par une partie beaucoup moins épaisse. Il est probable, d'après la topographie actuelle, que la Rur ait pareillement entaillé le massif tourbeux au sud-est.
- Le deuxième massif (B) était moins attendu; situé sur le versant en rive droite de la Helle, en contrebas du Drèlô, encadré par deux affluents de la Helle, la tourbe y est épaisse de plus de 1,5 m sur une trentaine d'hectares, atteignant localement 5 m.
- Le troisième massif (C), moins étendu (10 ha de plus de 1,5 m) et moins épais, se trouve également en bordure de la Helle, sur la rive gauche du ru des Waidages, et sous l'ancienne plantation d'épicéas dite "bois Calozet". Cette plantation, récemment coupée, explique la difficulté de prospection de cette zone. La tourbe y atteint au maximum 3 m.

Ailleurs, l'épaisseur de tourbe ne dépasse pas 2 m, sauf très localement.

En particulier, dans les parties qui ont été exploitées (au sud et au sud-est du Drèlô), la tourbe résiduelle ne dépasse pas 1,5 m. La prospection de ces zones s'avère totalement inintéressante puisque la morphologie initiale a été détruite.

4.2.3. Fagne de Cléfaye

- Le massif principal (A) ([fig. 11](#)), qui porte la tourbière encore intacte, se trouve sur le col et comprend environ 70 ha de tourbe de plus de 1,5 m d'épaisseur. Toute la partie ouest était enrésinée jusqu'à la coupe récente de ces épicéas plantés sur plus de 3 m de tourbe. Ces plantations, ainsi que le drainage qui les accompagnait, ont malheureusement endommagé cette zone qui, on le voit bien, faisait partie intégrante du massif principal.
Contrairement à la fagne Wallonne, les fronts d'exploitation sont restés périphériques et semblent avoir peu affecté le centre de la tourbière.
- Un petit massif de quelques hectares (B), où la tourbe dépasse 1,5 m, est présent au sud-ouest du massif principal. C'est surtout cette zone qui a été exploitée.

Suite à l'expérience en fagne Wallonne, il a été décidé de ne pas prospecter les soles d'exploitation, qui sont généralement difficiles à parcourir, pour un résultat très maigre.

4.2.4. Misten

La partie à l'est du fossé d'Eupen a été détournée de manière semi-industrielle; la morphologie originale de la tourbière a donc disparu. D'autres fronts d'exploitation (utilisation familiale de la tourbe) ont entaillé les dépôts de tous côtés, mais de manière plus périphérique.

On peut néanmoins distinguer ([fig. 12](#)) un massif principal (A), de forme sub-circulaire, dont le centre atteint 7,80 m d'épaisseur.

Un appendice de ce dépôt (B), dont la partie orientale a été complètement détruite, s'étend vers le nord. L'épaisseur de la tourbe y atteint au maximum 5 m.

Un autre dépôt (C), apparemment distinct du massif principal, se trouve au sud-ouest de celui-ci. Il en reste peu de chose, car il a été largement détourné.

4.2.5. Grande-Fange (partim. E: Potaies)

Le massif (A) ([fig. 13](#)) présente une forme plus ou moins elliptique, allongée dans le sens WSW-ENE, constituée de zones concentriques d'épaisseurs croissant vers le centre, où elles atteignent 6,25 m. Cette forme elliptique n'est cependant pas la morphologie d'origine qui a été modifiée par l'exploitation, tant au N qu'au S: le massif est en fait délimité par des fronts de tous côtés.

4.2.6. Grande-Fange (partim. W: Trous-Brôlis et Herbofaye)

Les Trous-Brôlis ([fig. 14](#)) sont essentiellement constitués d'une faible couverture tourbeuse. Seul un petit massif (A) de plus de 1,5 m a été repéré; son épaisseur ne dépasse toutefois pas 2,5 m. Toute cette fagne a été fortement exploitée. Dans la fagne de Herbofaye (au S de la Vecquée), un massif (B) existe et atteint 3 m d'épaisseur. Comme il est bordé par des fronts, on peut supposer qu'il était plus étendu à l'origine.

4.2.7. Fagne des Wéz

Cette zone ([fig. 13](#)) comporte une mosaïque de fosses d'extraction entre lesquelles subsistent quelques lambeaux de tourbe un peu plus épaisse. Le seul ensemble tourbeux d'importance est situé au nord-ouest de la fagne (B), proche de la Helle en rive droite, et atteint au maximum 4 m d'épaisseur. Ce massif apparaît en relief sur le terrain.

4.2.8. Fagne de la Poleûr

La fagne de la Poleûr ([fig. 14](#)) est également très affectée par l'exploitation de tourbe qui n'a laissé intact qu'un petit noyau central (C), dont l'épaisseur ne dépasse pas 2,5 m.

4.3. Superficies et volumes de tourbe

Les tableaux suivants (tab. 1 et 2) détaillent les superficies et volumes de tourbe de tous les ensembles tourbeux. Insistons sur le caractère approximatif de ces valeurs, obtenues par interpolation grâce au logiciel Surfer.

fagne	massif (cf fig 9 à 14)	volume de tourbe recensé ¹ (m3)	superficie prospectée (ha)	dont: superficie (ha) des zones où l'épaisseur de tourbe est comprise entre							
				80 - 150 cm	150 - 250 cm	250 - 350 cm	350 - 450 cm	450 - 550 cm	550 - 650 cm	650 - 750 cm	750 - 850 cm
Deux-Séries	total	10,950.10⁶	708,4	236,7	217,4	68,6	19,6	2,2	0,01	-	
	dont: A	1,954.10 ⁶	104,8	26,0	29,2	15,2	10,9	1,4	-		
	B	2,427.10 ⁶	131,6	36,0	49,7	21,1	6,8	0,5	0,01		
	C	1,365.10 ⁶	83,9	31,0	32,5	10,7	0,5	-	-		
	D-E-F	2,536.10 ⁶	176,5	61,3	67,5	13,2	0,5	-	-		
	G	0,649.10 ⁶	40,6	12,2	11,9	6,0	0,8	-	-		
	H	0,664.10 ⁶	49,7	22,5	13,4	1,6	0,3	0,002	0,002		
f. Wallonne	total	6,275.10⁶	385,9	152,6	63,4	30,4	19,3	13,4	4,8	0,6	
	dont: A	3,169.10 ⁶	155,9	52,8	29,1	14,6	13,0	12,6	4,8	0,6	
	B	1,101.10 ⁶	47,50	12,8	15,3	12,0	6,1	0,8	-	-	
	C	0,371.10 ⁶	22,10	10,8	6,9	3,3	-	-	-	-	
Cléfaye	total	2,836.10⁶	146,7	42,5	42,9	25,4	10,3	3,3	-	-	
	dont: A	2,601.10 ⁶	130,2	35,8	36,3	25,0	10,3	3,3			
	B	0,235.10 ⁶	16,5	6,7	6,5	0,4	-	-			
Misten	total	2,956.10⁶	97,9	21,5	16,2	11,8	10,9	8,5	6,8	5,0	0,1
	dont: A-B	2,590.10 ⁶	87,9	17,6	13,8	10,7	10,6	8,5	6,8	5,0	0,1
	C	0,366.10 ⁶	10,0	4,0	2,4	1,1	0,3	-	-	-	
Gde-Fange E	total	1,997.10⁶	90,7	30,8	19,5	11,6	12,7	6,4	0,2	-	
Gde-Fange W	total	1,204.10⁶	110,4	55,4	14,4	1,2	-	-	-	-	
	dont: A	0,255.10 ⁶	18,7	12,0	6,5	0,2					
	B	0,311.10 ⁶	23,9	11,0	7,4	1,0					
Wéz	total	0,590.10⁶	51,6	29,4	6,5	1,1	0,1	-	-	-	
Poleûr	total	0,375.10⁶	36,9	22,2	2,7	-	-	-	-	-	
TOTAL		27,183.10⁶	1628,5	591,1	383,1	150,0	72,9	33,9	11,8	5,6	0,1

¹ Rappelons qu'il ne s'agit ici que d'une estimation effectuée à l'aide du logiciel SURFER.

fagne	massif (cf fig 9 à 14)	volume de tourbe recensé	superficie prospectée	dont: superficie (ha) des zones où l'épaisseur de tourbe est supérieure à							
				(m3)	(ha)	80 cm	150 cm	250 cm	350 cm	450 cm	550 cm
Deux-Séries	total	10,950.10⁶	708,4	544,5	307,8	90,4	21,8	2,2	0,01	-	
dont:	A	1,954.10 ⁶	104,8	82,7	56,7	27,5	12,3	1,4	-		
	B	2,427.10 ⁶	131,6	114,1	78,1	28,4	7,3	0,5	0,01		
	C	1,365.10 ⁶	83,9	74,7	43,7	11,2	0,5	-	-		
	D-E-F	2,536.10 ⁶	176,5	142,5	81,2	13,7	0,5	-	-		
	G	0,649.10 ⁶	40,6	30,9	18,7	6,8	0,8	-	-		
	H	0,664.10 ⁶	49,7	37,8	15,3	1,9	0,3	0,004	0,002		
f. Wallonne	total	6,275.10⁶	385,9	284,5	131,9	68,5	38,1	18,8	5,4	0,6	
dont:	A	3,169.10 ⁶	155,9	127,5	74,7	45,6	31,0	18,0	5,4	0,6	
	B	1,101.10 ⁶	47,50	47,0	34,2	18,9	6,9	0,8	-	-	
	C	0,371.10 ⁶	22,10	21,0	10,2	3,3	-	-	-	-	
Cléfaye	total	2,836.10⁶	146,7	124,4	81,9	39,0	13,6	3,3	-	-	
dont:	A	2,601.10 ⁶	130,2	110,7	74,9	38,6	13,6	3,3			
	B	0,235.10 ⁶	16,5	13,6	6,9	0,4	-	-			
Misten	total	2,956.10⁶	97,9	80,8	59,3	43,1	31,3	20,4	11,9	5,1	0,1
dont:	A-B	2,590.10 ⁶	87,9	73,1	55,5	41,7	31,0	20,4	11,9	5,1	0,1
	C	0,366.10 ⁶	10,0	7,8	3,8	1,4	0,3	-	-	-	
Gde-Fange E	total	1,997.10⁶	90,7	81,2	50,4	30,9	19,3	6,6	0,2	-	
Gde-Fange W	total	1,204.10⁶	110,4	71,0	15,6	1,2	-	-	-	-	
dont:	A	0,255.10 ⁶	18,7	18,7	6,7	0,2					
	B	0,311.10 ⁶	23,9	19,4	8,4	1,0					
Wéz	total	0,590.10⁶	51,6	37,1	7,7	1,2	0,1	-	-	-	
Poleür	total	0,375.10⁶	36,9	24,9	2,7	-	-	-	-	-	
TOTAL		27,183.10⁶	1628,5	1248,5	657,4	274,3	124,3	51,4	17,5	5,7	0,1

4.4. Conséquences en matière de gestion

Les cartes présentées ci-dessus pourront servir d'inventaire de base pour les opérations de gestion menées en vue de la restauration des tourbières.

D'abord, la connaissance de la morphologie des ensembles tourbeux sera précieuse pour positionner judicieusement les mesures ou analyses à effectuer préalablement à des travaux de gestion (piézomètres, tensiomètres, analyses paléoécologiques, etc.).

Ensuite, les zones à gérer elles-mêmes pourront être choisies en fonction de différents paramètres, dont la subsurface. Il est en effet important de raisonner en matière de massif tourbeux dans son ensemble.

Par ailleurs, les données d'un secteur précis peuvent être représentées à plus grande échelle et avec plus de détails, comme ce fut le cas au Misten où les gestionnaires envisagent la réalisation d'un barrage dans d'anciennes fosses d'exploitation ([fig. 15](#)). L'épaisseur de tourbe fait partie des contraintes techniques qui vont décider de l'implantation de l'ouvrage. Dans ce cas, la prospection radar a mis en évidence une zone de moindre épaisseur de tourbe, favorable à l'installation du barrage, mais aussi des cuvettes de lithales qu'il faudra éviter.

5. Topographie de subsurface

5.1. Informations géologiques et géomorphologiques

5.1.1. Relief périglaciaire

5.1.1.1. Description des cuvettes de lithalses

Les lithalses sont des buttes cryogènes formées par accumulation de glace de ségrégation dans le sol en climat périglaciaire. Elles ont la même origine que les paises, à la seule différence que ces dernières se développent dans des sols tourbeux en surface, tandis que les lithalses se forment dans des sols exclusivement minéraux. Lors de la dernière période froide, au Dryas III (10100 - 9400 BC), les conditions climatiques nécessaires à l'apparition de lithalses ont été rencontrées sur le plateau des Hautes-Fagnes et sur le plateau des Tailles (Pissart, 2000). Lors du réchauffement climatique du début de l'Holocène (9400 BC), la glace des lithalses a fondu en laissant la place à des cuvettes entourées d'un rempart, résultat de l'érosion ayant entraîné vers le bas des pentes des buttes une partie des matériaux qui les recouvraient. Ces cuvettes peuvent présenter une forme circulaire (diamètre moyen: environ 50 m) ou allongée. De telles cicatrices de lithalses sont visibles en grand nombre, notamment dans les fagnes du nord-est. Elles se sont remplies de tourbe au cours de l'Holocène, tourbe qui a souvent été exploitée, donnant alors lieu à une recolonisation secondaire récente.

En coupe, ces traces de lithalses présentent une forme caractéristique de dépression entourée d'un rempart, comme le montre un profil radar effectué dans une trace de lithalse circulaire de la fagne des Deux-Séries ([fig.16](#)).

L'identification de la trace de lithalse ne fait aucun doute lorsque le profil passe par le centre, mais plus on s'écarte d'un diamètre, plus la forme de cuvette s'estompe et pourrait être interprétée comme un simple accident de terrain.

5.1.1.2. Repérage de formes périglaciaires dans les zones tourbeuses

Plusieurs dizaines de traces de lithalses ont été détectées par le radar sous une couche de tourbe plus ou moins épaisse ([fig. 17](#)). La plupart d'entre elles n'étaient pas visibles sur les photos aériennes. Quelques-unes des cuvettes détectées ont fait l'objet de profils croisés perpendiculaires pour s'assurer qu'il s'agissait bien de dépressions fermées.

Ces cuvettes peuvent présenter des formes intérieures variables: asymétrie des remparts, convexité du fond, pente plus ou moins forte des remparts,... Il n'entre pas dans le cadre de ce travail d'analyser la morphologie des lithalses. Pour cela, plusieurs profils serrés seraient nécessaires dans chaque trace de lithalse. Signalons néanmoins que l'aspect intérieur des cuvettes n'avait jamais été vu, puisqu'elles sont toujours remplies de sédiments. C'est donc encore un aspect novateur apporté par cette étude.

Nous n'avons repéré que des traces de lithalses circulaires. Toutefois, une structure analogue aux remparts allongés des fagnes du Nord-Est a été mise en évidence dans la fagne des Deux-Séries, mais il s'agit d'un élément isolé. Une image plus détaillée de cette structure a été obtenue par des profils espacés de 10 m ([fig. 18](#)).

Certaines zones semblent dépourvues de traces de lithalses, mais présentent néanmoins un relief de subsurface très accidenté. Il s'agit probablement également d'un modelé périglaciaire, la fusion de plateaux lithalsiques pouvant donner lieu à de tels reliefs anarchiques (Pissart, 2000).

5.1.1.3. Carte de répartition des traces de lithalses

Les cuvettes identifiées avec certitude comme des traces de lithalses - d'après la forme caractéristique décrite au 5.1.1.1., notamment la présence d'un rempart - ont été reportées sur la carte en [fig. 19](#). Nous y avons ajouté les dépressions équivoques qui sont probablement des traces de lithalses, avec mention du doute. Il est certain que toutes les traces de lithalses n'ont pas été détectées, en raison de l'espacement de 50 m des profils radar.

C'est dans la fagne des Deux-Séries que l'on trouve le plus grand nombre de cuvettes de lithalses (155 identifiées avec certitude, sur un total de 212 pour l'ensemble des zones prospectées). Elles ne sont pas uniformément réparties mais forment des groupes denses, notamment dans les secteurs C et G, à l'amont du secteur B, à l'amont du secteur H (référence à la [fig. 9a](#), [fig. 9b](#)), alors qu'elles sont absentes dans d'autres zones.

Les massifs tourbeux du Misten, de la fagne Wallonne et de Cléfaye sont dépourvues de traces de lithalses en leur partie la plus épaisse. Quelques cuvettes plutôt isolées ont été détectées en périphérie de ces massifs. Au Misten, cette absence de lithalses contraste avec la Brackvenn voisine, où les dépressions visibles en surface se comptent par dizaines.

On retrouve encore des traces de lithalses dans la Grande-Fange, y compris sous tourbe épaisse, dans les Wéz et sur le versant vers la Helle de la fagne Wallonne (massif B en référence à la [fig. 10](#)).

5.1.2. Hypothèses sur la lithologie sous-jacente

Le relief de subsurface présente, à certains endroits, un aspect chaotique (avec ou sans traces de lithalses bien individualisées) et à d'autres, un aspect beaucoup plus régulier. La [fig. 20](#) illustre le contraste entre ces deux types de relief.

Ces observations mènent à la question de la répartition des traces de lithalses à l'échelle locale. En effet, si les facteurs climatiques nécessaires à la formation des lithalses sont maintenant connus (Pissart, 2000) et peuvent expliquer leur répartition à l'échelle régionale et même continentale, les facteurs topographiques, lithologiques ou microclimatiques qui permettent ou non l'apparition de ces formes restent à préciser.

Les contrastes illustrés par la [fig. 20](#) sont suffisamment nets pour délimiter les secteurs chaotiques et les secteurs réguliers. Parmi les facteurs à prendre en considération, outre les pentes, des différences lithologiques pourraient bien expliquer ces contrastes. On pense notamment à des différences dans les possibilités d'alimentation en eau sous les lithalses en formation: différence dans la nature des roches, dans leur degré de fissuration, etc. Seule une prospection géophysique complémentaire, ou des sondages profonds, permettraient de résoudre cette question.

5.1.3. Néotectonique

Le versant W de la crête Botrange - Baraque-Michel présente une accentuation de la pente, et est le siège de mouvements tectoniques. Compte tenu de la vitesse de ces mouvements, il devrait être possible de détecter sous la tourbe des signes de failles actives pendant l'Holocène (A. Demoulin, comm. pers.). Le versant W de la fagne Wallonne, ainsi que la partie SW des Deux-Séries (notamment entre les Potaies et les Deux-Séries) ont été prospectées en portant une attention spéciale à cet aspect (Brouwier, 1999). Toutefois, aucun résultat probant n'a été obtenu.

5.2. Conditions initiales de la formation de la tourbe

La genèse et la croissance de dépôts tourbeux est conditionnée par une alimentation en eau suffisante, dans des conditions topographiques qui permettent une rétention de ces apports.

Une carte générale de la topographie de surface antérieure à la formation des ensembles tourbeux a été dressée à partir des données de la topographie actuelle (données I.G.N.) et de l'épaisseur de tourbe ([fig. 21a](#) et [fig. 21b](#)). Là où les données d'épaisseur n'ont pas été mesurées - c'est-à-dire généralement dans les zones où les dépôts tourbeux sont inexistantes ou de faible épaisseur - la topographie a été supposée être la même qu'aujourd'hui. Dans les zones prospectées au radar, la topographie initiale a été déduite par différence entre l'altitude actuelle et l'épaisseur de tourbe.

Cette carte est complétée par des coupes dans les principaux massifs tourbeux ([fig. 23a](#) à [23k](#)), localisées sur la [fig. 22](#), calculées par le logiciel Surfer à partir des grilles d'interpolation.

Pour la carte comme pour les coupes, les imprécisions des deux grilles s'additionnent. Rappelons que ces imprécisions sont, d'une part, celles des données de base et, d'autre part, celles commises lors de l'interpolation. Par conséquent, c'est surtout l'allure générale qu'il faut regarder et non des détails dans la topographie, qui pourraient n'être que des artefacts.

5.2.1. Tourbières de pentes et de sources

Les lignes de crête sont occupées par des sètchamps en bordure desquels suintent de nombreuses sources (Bouillenne, 1934). La tourbe peut s'accumuler sur les versants adossés à ces lignes de crête, alimentée en eau par le ruissellement superficiel et par les sources. Ce sont des tourbières soligènes. Eventuellement, elles peuvent évoluer vers des tourbières ombrogènes, dont les seuls apports hydriques proviendront des précipitations y tombant.

Dans la Grande-Fange, à l'E de la Baraque-Michel, la tourbière des Potaies s'est développée sur pente faible (moins de 1,5% dans la partie centrale). Cette tourbière a évolué vers un stade ombrogène, comme le montrent les coupes n°25 à 27 ([fig. 23g](#)).

A l'W de la Baraque-Michel, à Herbofaye, un dépôt de moindre importance s'est développé symétriquement à celui des Potaies (coupe n°25). Mais cette tourbière a été fortement exploitée et on ne sait donc pas quel était son développement maximal.

Le massif B ([fig. 9a](#)) de la fagne des Deux-Séries se présente également comme une tourbière de pente adossée au sètchamp Brochepierre - Noir-Flohay. Mais la pente atteint ici 3%

(coupes n°34 à 36, [fig. 23i](#)). Les petits massifs D, E, F de la fagne des Deux-Séries sont à classer dans cette même catégorie de tourbières de pente, avec des pentes de l'ordre de 3%.

Le massif C ([fig. 9b](#)) de la fagne des Deux-Séries, indépendamment de la présence de cuvettes de lithales (cf 5.2.4), est également une tourbière de pente (coupes n°40 à 42, [fig. 23j](#)), avec une pente moyenne de 2%, mais dont la partie la plus épaisse repose sur une zone de pente plus faible (<1,5 %).

La fagne des Wéz, les Troux-Brôlis, les dépôts à l'W du massif principal de la fagne Wallonne étaient probablement du même type, mais l'exploitation les a pratiquement détruits.

Les massifs B ([fig. 10](#)) de la fagne Wallonne et G ([fig. 9a](#)) de la fagne des Deux-Séries, respectivement en rive droite et gauche de la Helle, occupent quant à eux des bas de versants (coupes n°21 à 24, [fig. 23f](#)). Les pentes y atteignent 3%.

Le massif A ([fig. 9a](#)) de la fagne des Deux-Séries et, dans une moindre mesure, la fagne de la Poleûr, sont installés dans des amphithéâtres de tête de vallons, un cas particulier de tourbière soligène (coupes n°29 à 33, [fig. 23h](#)).

5.2.2. Tourbières de cols

L'apparition de tourbières sur des cols aplanis constitue un cas particulier de tourbière soligène: elles sont alimentées en eau par les pentes et à partir des sêchamps qui les dominent de part et d'autre, tandis que la topographie peu pentue au niveau du col proprement dit est très favorable au développement de la tourbe.

La ligne de crête qui s'étire de Botrange vers Hoscheit comprend 5 cols à plus de 550 m d'altitude ([fig. 1](#)). Sur les deux cols les plus proches de Botrange, se sont développées des tourbières en selle caractéristiques (Sattelhochmoore): celles de la fagne Wallonne et de la fagne de Cléfaye. Les autres cols, par contre, n'ont pas vu d'accumulation de tourbe importante. Des dépôts tourbeux de moins de 150 cm sont signalés par la carte pédologique sur le 3e col, situé au SE de la fagne du Misten. Cette zone aurait peut-être mérité une rapide prospection, mais elle est totalement plantée en épicéas.

Les pentes sont inférieures à 1% sur les cols de la fagne Wallonne et de Cléfaye.

En fagne Wallonne, la tourbe la plus épaisse se situe exactement au centre du col. Mais le dépôt est asymétrique dans le sens SW-NE: du côté E, la limite du massif (considérée à l'isopaque de 1,5 m) suit précisément l'isohypse de 622 m (altitude du fond), tandis que vers l'W, le dépôt remontait au moins jusqu'à 636 m. Les coupes n°17 et 18 ([fig. 23e](#)) rendent bien compte de cette asymétrie.

A Cléfaye, la partie la plus épaisse est décalée vers le nord par rapport au centre du col. Ici également, le dépôt sur le versant W est plus important que sur le versant E (coupe n°12, [fig. 23d](#) et, pour une vue d'ensemble des deux tourbières de col, coupe n° 43, [fig. 23k](#)). La tourbière principale de Cléfaye présente, en outre, une extension vers le N. Les profils dans l'axe des exutoires sont donnés sur les coupes n° 9 et 10 ([fig. 23c](#)). Ces profils n'ont pas pu être tracés en fagne Wallonne, car les données altimétriques y sont de moins bonne qualité.

Dans chacune des deux fagnes, l'exutoire naturel s'écoulant vers le N se marque comme une incision dans le massif tourbeux. Ils font l'objet des coupes n°15 ([fig. 23d](#)) et 20 ([fig. 23e](#)).

Les tourbières de col ont évolué vers des tourbières hautes ombrogènes. La coupe n°12 ([fig. 23d](#)) à Cléfaye montre le bombement central de la tourbière, dont la surface s'élève au-dessus du niveau des bas de versants qui l'entourent, ce qui témoigne de son indépendance par rapport aux eaux de ruissellement. La situation est comparable en fagne Wallonne, mais ici encore, les données altimétriques entachées d'erreurs n'ont pas permis de tracer des coupes fiables.

5.2.3. Tourbières sur replats

La tourbière du Misten occupe une situation topographique très particulière, sur un replat irrégulier. Ce replat surmonte tout ce qui l'entoure, sauf du côté SE où il se termine au bas d'un versant.

La pente de ce replat est très faible (<1%), ce qui explique l'aspect méandreux des isohypses de la subsurface sur la [fig. 21a](#), dû en réalité à l'imprécision sur les altitudes qui se marque particulièrement lorsque les différences d'altitudes sont faibles.

La tourbe la plus épaisse s'est accumulée plus ou moins au centre du replat (coupes n° 1 et 2, [fig. 23a](#)). Le dépôt s'est en outre étendu vers le N: cette partie de la tourbière est limitée, à l'W, par une brusque remontée de la subsurface, un accident topographique orienté NS qui a été retrouvé sur plusieurs profils radar successifs ([fig. 24](#)).

Le caractère ombrogène de toute la partie centrale apparaît très nettement sur les coupes n°1 à 5 ([fig. 23a](#) et [fig. 23b](#)): la surface de la tourbière est, quasiment depuis le début de sa formation, plus haute que les points d'arrivée des eaux de ruissellement qui l'entourent.

5.2.4. Tourbières développées à partir de cuvettes de lithalses

Les dépressions de lithalses constituent des accidents topographiques favorisant la retenue d'eau et donc la formation de tourbe. Dans certains cas, la tourbification s'est arrêtée au niveau des remparts, comme dans une grande partie des fagnes du Nord-Est. Un exemple est montré en [fig. 16](#) dans la fagne des Deux-Séries.

Lorsque les traces de lithalses sont enfouies sous la tourbe, on peut envisager deux hypothèses pour la genèse de la tourbière: les lithalses remplies de tourbe auraient agi comme points de départ à une extension de la tourbière par débordement; ou la tourbification aurait commencé à l'extérieur des cuvettes indépendamment de celles-ci, pour finalement les recouvrir de tourbe.

La [fig. 25](#) montre un exemple intermédiaire, où la tourbe semble avoir débordé de la cuvette mais où la tourbification à l'extérieur a été d'extension très limitée. Cet exemple permet cependant de conforter l'hypothèse que des traces de lithalses peuvent être des points de départ.

Dans les tourbières où les traces de lithalses sont périphériques (Misten, Cléfaye, fagne Wallonne), ou centrales mais peu nombreuses (Grande-Fange), il est probable que ces cuvettes n'ont pas joué un rôle déterminant dans le développement du massif tourbeux.

Par contre, dans la fagne des Deux-Séries, les massifs C ([fig. 9b](#)) et G ([fig. 9a](#)) sont situés sur des champs de lithalses. Il est donc probable que ces cuvettes aient favorisé la tourbification à ces endroits. La [fig. 26](#) montre plusieurs profils radar donnant une vue en coupe du massif C.

Dans le cas des massifs A et B ([fig. 9a](#)), la relation de cause à effet est moins évidente, les traces de lithales étant limitées à l'amont de ces secteurs tourbeux.

5.2.5. Conclusions

Les conditions topographiques qui ont régi l'apparition des tourbières du plateau des Hautes-Fagnes sont multiples.

Le cas le plus fréquent est celui des tourbières de pente et de sources, installées en haut de versant, parfois en bas de pente, ou dans des amphithéâtres. Les pentes peuvent atteindre 3%.

Deux tourbières de col se présentent en ensellement typique (fagne Wallonne et de Cléfaye).

Un cas particulier de tourbière sur un replat est également représenté (Misten).

Quel que soit leur stade initial, les principaux massifs ont évolué vers des tourbières ombrogènes.

On observe une corrélation inverse entre la pente et l'épaisseur de la tourbe. En effet, les pentes les plus faibles, inférieures à 1%, caractérisent le replat du Misten et les cols de la fagne Wallonne et de Cléfaye. C'est précisément là que se sont développés les dépôts tourbeux les plus épais. Sur les versants, les pentes les plus faibles (<1,5%) se rencontrent sous la fagne des Potaes, où une tourbe épaisse s'est également accumulée.

6. Stratigraphie des dépôts tourbeux: histoire du développement des tourbières

6.1. Démarrage des dépôts tourbeux

Les analyses palynologiques effectuées jusqu'à présent (Damblon, 1996) montrent que la tourbe a commencé à se former au Préboréal (9400-8100 BC¹) dans les cuvettes de lithalses. Hors de ces dépressions, l'accumulation de tourbe débute à la fin du Boréal (8100-6400 BC) ou à l'Atlantique (6400-3800 BC), à l'exception d'un dépôt en rive droite de la Helle au Grand-Bongard, dont la base date du Préboréal (Gotjé et al., 1990).

Nous avons voulu compléter les données existant à ce sujet, dans des ensembles tourbeux non encore étudiés de ce point de vue, principalement dans la fagne des Deux-Séries et en fagne Wallonne. Les diagrammes palynologiques de la base des dépôts ont été reconstitués aux points de sondage situés sur la carte en [fig. 27](#). Il s'agit, d'une part, de cuvettes de lithalses et, d'autre part, de dépôts hors lithalses.

6.1.1. Dans les cuvettes de lithalses

Le fond des cuvettes sondées (sondages n°1, 2 et 3, dont les images radar sont données en [fig. 28](#), [fig. 32](#) et [fig. 35](#)) est occupé par un limon comprenant des débris de phyllades et de la matière organique. Il s'agit d'un matériau remanié dont 35 cm ont pu être prélevés au point 2. L'analyse des minéraux denses a montré que la mise en place de ce dépôt était postérieure à l'éruption Allerød du Laacher See (Juvigné, 1991), puisqu'on n'y retrouve pas la téphra² en place, mais bien les associations de minéraux denses caractéristiques de cette téphra en traces dans les trois quarts supérieurs du dépôt, en résultat des phénomènes de transports latéraux vers l'intérieur de la cuvette.

Les analyses palynologiques ([fig. 29](#), [fig. 33](#) et [fig. 37](#)) n'ont été effectuées que dans la tourbe proprement dite surmontant ce dépôt limoneux. Elles montrent une tourbe d'âge préboréal dans le fond des cuvettes. Cette période est caractérisée par un boisement clair dominé par *Pinus* et *Betula*, d'où l'abondance relative des pollens de ces arbres dans les diagrammes. Les pollens d'herbacées sont encore relativement importants, comprenant des espèces boréales héritées de la toundra de la dernière période froide, comme *Artemisia* sp. ou *Thalictrum* sp. Des espèces aquatiques, comme *Myriophyllum* sp., ont également été trouvées, témoignant de l'environnement lacustre propre aux cuvettes de lithalses au début de leur comblement.

La période préboréale se termine avec la régression de *Pinus* et de *Betula*, alors que la courbe de *Corylus* est croissante. La tourbe accumulée au cours du Préboréal est épaisse d'environ 35 à 40 cm au point 2 ([fig. 33](#)). Au point 3, le fond n'a pas pu être atteint, mais on peut, d'après l'image radar, estimer cette épaisseur à 80 cm ([fig. 35](#) et [fig. 37](#)). Au point 1 ([fig. 29](#)), elle n'est que d'une dizaine de cm.

¹ Les datations citées dans la suite du texte sont exprimées en âge ¹⁴C calendrier, c.-à-d. corrigé des variations de concentrations en ¹⁴C (courbe du ¹⁴C étalonnée par dendrochronologie).

² Téphra: fragments de roches volcaniques projetées dans l'atmosphère lors d'une éruption volcanique, dont les particules les plus fines peuvent être transportées sur de longues distances.

La période boréale est caractérisée par l'abondance relative du noisetier (*Corylus*). Elle correspond à une épaisseur de tourbe d'environ 60 cm dans le sondage n°3 (fig. 37). Dans le sondage n°2 (fig. 33), le pic de *Corylus* est absent et il pourrait donc y avoir une lacune correspondant à la période boréale. Dans le sondage n°1 (fig. 29), la tourbe de cette période fait environ 25 cm d'épaisseur.

La transition vers la période atlantique se marque par une diminution de l'abondance relative de *Corylus*, l'augmentation de celle d'*Alnus* qui atteint des pourcentages élevés, et l'installation de la chênaie mixte. Dans les trois sondages, cette période débute avant que la tourbe ait rempli complètement la cuvette: respectivement à 1,5 m, 2 m et 0,80 m sous le niveau des remparts aux points 1, 2 et 3.

Un quatrième sondage, effectué au point n°4 et analysé par Vargas (1999) permet une comparaison. La fin du Dryas III est observée à la base de la tourbe, surmonté de 1 m de tourbe d'âge préboréal. La limite Boréal-Atlantique est difficile à placer, mais on peut cependant affirmer que cette limite est sous le niveau des remparts et que le remplissage de la cuvette est donc atteint pendant l'Atlantique.

6.1.2. Hors des cuvettes de lithaleses

6.1.2.1. Comparaisons intérieur/extérieur des cuvettes

Deux sondages ont été effectués dans des secteurs à lithaleses, à l'extérieur de celles-ci: n° 5 et 9.

Le point n°9 est à corrélérer avec le n°3, distant de 75 m (fig. 35) (fagne Wallonne, massif B). Bien que l'analyse soit limitée aux 20 cm de la base (fig. 38), le très faible pourcentage d'*Alnus* indique que cette tourbe à commencer à se former avant l'Atlantique, probablement à la fin du Boréal. Les pourcentages de pollens correspondent à ceux observés juste avant l'augmentation d'*Alnus* sur le diagramme du point n°3 (fig. 37). Dans ce cas, il est donc très probable que la tourbification ait débuté à l'extérieur de la trace de lithalse alors qu'à l'intérieur, le niveau des remparts n'avait pas encore été atteint.

Le point n°5 se trouve dans la zone à forte densité de lithaleses à l'est de la fagne des Deux-Séries (massif C de la fig. 9b) et peut être comparé aux points 1 et 4 du même ensemble tourbeux. Les pourcentages élevés d'*Alnus* (fig. 39) et la présence de la chênaie mixte placent la base de ce dépôt dans la période atlantique. Toutefois, les diagrammes s'avèrent insuffisamment détaillés pour subdiviser la chronostratigraphie en phases et corrélérer les différents dépôts. Il n'est donc pas possible, sur la base de ces seules données, d'établir avec certitude dans quel ordre les dépôts sont apparus dans les traces de lithaleses et à l'extérieur de celles-ci.

6.1.2.2. Massif A de la fagne des Deux-Séries

Le sondage n°6 avait pour but de dater la tourbe à la base du massif A (fig. 9a), dans sa partie la plus épaisse. Les tendances de ce diagramme (fig. 40) ne sont pas très nettes. Le pourcentage d'*Alnus*, faible à la base, montre une croissance, mais sans atteindre les valeurs habituelles pour l'Atlantique. Parallèlement, la courbe de *Corylus* est très légèrement

décroissante. La chênaie mixte est présente, sans fluctuations notables. La base du dépôt daterait donc de la fin du Boréal ou du début de l'Atlantique.

Parmi les pollens et spores d'origine locale, il faut signaler *Scheuchzeria palustris*, reconnu aux niveaux 300 et 310 cm. Cette espèce, aujourd'hui disparue des Hautes-Fagnes, a pu être localement importante, comme en témoigne une couche riche en macrorestes de *Scheuchzeria* en fagne Wallonne, datée de l'Atlantique (Schumacker, 1961). Il serait donc intéressant de rechercher de tels restes dans le massif A des Deux-Séries. D'autre part, les spores de *Sphagnum* très abondantes indiquent qu'il s'agit bien d'une tourbière à sphaignes.

Par ailleurs, ce sondage a été effectué dans une zone où l'atténuation des ondes radar était particulièrement importante: la base de la tourbe n'est presque plus visible alors qu'elle n'est qu'à environ 4,3 m (fig. 41). Deux hypothèses peuvent expliquer cela: soit une transition progressive entre la tourbe et le limon, soit une conductivité électrique localement plus importante. Nous avons observé un contact net entre la tourbe et le limon; la deuxième hypothèse (eau plus minéralisée) sera donc retenue.

6.1.2.3. Sources de la Soor (fagne des Deux-Séries)

Le sondage n°7, effectué immédiatement à l'amont des suintements aux sources naturelles de la Soor, sera analysé par rapport à la stratigraphie (cf. 6.2.2.). On peut toutefois situer la base de ce dépôt (fig. 43) à l'Atlantique (pourcentages élevés d'*Alnus*, présence de la chênaie mixte), mais probablement vers la fin de cette période, car les courbes de ces taxons décroissent rapidement à partir de la base.

6.1.2.4. Butte à Phragmites australis (fagne des Deux-Séries)

Le point n°8 est situé dans une butte à phragmites, zone où le niveau de la tourbe est localement plus élevé que celui de la tourbière environnante (fig. 44), et où se développe une végétation plus mésotrophe (cf. infra 7.2). Le radar a montré que ces buttes se situent parfois sur des traces de lithales (Rappe, 1995); c'est le cas également du point de sondage n°2 (fig.32). En revanche, la butte sondée ici ne repose sur aucune structure particulière. La question se posait de savoir si ces dépôts de tourbe plus épais étaient également plus anciens. Il n'en est rien, comme le montre la base du profil (fig. 45), présentant les caractéristiques de l'Atlantique. L'accumulation de tourbe n'a donc pas commencé plus tôt, mais elle a été plus importante dans ces buttes.

6.1.2.5. Fagne Wallonne en périphérie du massif tourbeux principal

La tourbière en rive gauche de l'affluent de la Helle (exutoire nord de la fagne Wallonne) a fait l'objet d'un sondage (point n° 10) (fig. 46) pour des raisons stratigraphiques (cf. infra 6.2.2). Le diagramme palynologique (fig. 47) a été établi depuis la base et montre que le démarrage du dépôt se situe franchement dans l'Atlantique.

6.2. Réflecteurs indicateurs stratigraphiques

6.2.1. Réflecteurs systématiques dans les traces de lithales

Le remplissage des cuvettes de lithales comporte, dans la grande majorité des cas, un, deux, voire trois réflecteurs plans à différents niveaux.

1. Le réflecteur le plus proche du fond épouse généralement la forme de la cuvette et marque le contact entre la tourbe proprement dite et le matériau organo-limoneux du fond. Ce matériau a été reconnu dans le sondage n°2 ([fig. 32](#) et [fig. 34](#)), dans le sondage n°4 (Vargas Ramirez, 1999), au point n°13 (Charlier, 2002) et visuellement dans une carotte prélevée au n°18, à côté de la structure allongée décrite au 5.1.1.2 ([fig. 50](#)). Ce matériau provient du remaniement des sédiments du rempart, ayant soliflué vers le fond de la dépression, et s'étant mélangés avec les dépôts organiques en formation.

2. Dans certaines cuvettes, un réflecteur occupe une position intermédiaire entre le fond et le niveau des remparts. Dans les sondages n°1 et 3, ce réflecteur a été identifié comme une couche de limon, visible à l'oeil nu lors du prélèvement. Les mesures de teneurs en cendres confirment la présence d'un niveau minéral ([fig. 30](#) et [fig. 36](#)). La diminution concomitante de la teneur en eau du dépôt provoque la réflexion radar. Au point 13, se trouve à ce niveau une couche dont la teneur en cendres dépasse 30% (Charlier, 2002).

Plusieurs hypothèses peuvent être avancées pour expliquer ce dépôt. Il pourrait être lié à un événement brutal (p. ex. pluies) qui aurait provoqué l'érosion et le transport du limon des remparts vers la cuvette. Il pourrait aussi être dû à un arrêt momentané de la tourbification, pendant lequel seuls des sédiments minéraux se sont déposés.

Dans les sondages n°1 et 3, les diagrammes palynologiques ([fig. 29](#) et [fig. 37](#)) permettent de situer ce niveau dans la période atlantique, sans pouvoir donner davantage de précision.

3. Dans la plupart des traces de lithales, un réflecteur apparaît au niveau des remparts, ou juste en dessous ([fig. 51](#)). Vu la répétitivité de cette observation, il nous a paru intéressant de chercher à expliquer son origine et de savoir s'il correspondait à un événement strictement local propre à la dynamique de chaque cuvette, où s'il reflétait un événement régional ou d'occurrence plus large, causé directement ou indirectement par une modification climatique.

De nombreuses mesures ont été entreprises pour tenter d'expliquer l'origine hydro-physique de ce réflecteur. Les hypothèses de départ étaient un niveau minéral, un niveau de cendres ou un contraste dans le degré d'humification. Ces hypothèses ont été testées (en tout ou en partie) dans la tourbe des points n°1 ([fig. 28](#), [fig. 30](#) et [fig. 31](#)), n°4 (Vargas Ramirez, 1999), n°13, 14, 15, 16, 17 (Charlier, 2002), et a posteriori sur les résultats de Barbiot (1995) au point n°12.

Les teneurs en cendres et en eau ont été mesurées dans chacune des ces 8 cuvettes. Dans aucun cas, un niveau minéral comparable à ceux correspondant aux réflecteurs intermédiaires (cf. supra) n'a été trouvé. Tout au plus observe-t-on, dans les carottes des points 4, 13, 14, 15, 16, 12, une couche ayant une teneur en cendres supérieure de quelques pourcents aux valeurs du reste du profil. Ces niveaux sont corrélés avec une diminution de la teneur en eau assez faible, mais néanmoins significative et donc susceptible de générer une réflexion radar.

Le degré d'humification a été mesuré en laboratoire aux points 13 (Charlier, 2002) et 1. Dans le profil 13, le réflecteur coïncide avec un brusque changement du degré d'humification (différence de 30% sur 1 cm d'épaisseur), au passage d'une tourbe noire compacte à une

tourbe plus claire, fibreuse. Par contre, les mesures effectuées sur la tourbe du profil 1, également tous les cm, n'ont mis en évidence aucun contraste de cette nature (fig. 31). L'analyse rapide des macrorestes (fig. 31) montre, par contre, que la tourbe n'est pas tout-à-fait homogène à l'endroit du réflecteur. Deux changements sont observés dans cette zone. Au niveau -215 cm, on passe d'une tourbe assez riche en bois à une tourbe uniquement fibreuse. On observe également une diminution importante de la teneur en macrorestes, centrée sur le niveau -185 cm. Mais ces observations sont trop fragmentaires et devraient être systématisées avant de pouvoir tirer des conclusions.

Par conséquent, on ne peut attribuer une origine précise à ce réflecteur. On peut cependant rejeter l'hypothèse d'un niveau minéral. L'absence de corrélation avec tous les paramètres envisagés dans la tourbe du sondage 1 pose évidemment problème. Si l'on faisait abstraction de ce cas, l'explication la plus plausible résiderait dans un contraste du degré d'humification, tel que démontré dans le sondage 13, causé par une reprise de la tourbification après un ralentissement de celle-ci. Le léger enrichissement en cendres mesuré dans plusieurs cas à ce niveau, pourrait résulter d'un apport latéral devenu plus important relativement, suite au ralentissement de l'édification de la tourbe, et/ou à une décomposition sensiblement plus importante de la tourbe. De même, la tourbe plus humifiée aurait une teneur en eau plus faible.

Le point de sondage n°13 a été choisi à cause de la très forte réflexion observée sur l'image radar. Cette qualité peut s'expliquer en partie par la proximité du réflecteur par rapport au niveau du sol (environ 1 m), donc une moindre atténuation que dans les cas où ce réflecteur est plus profond. Mais cette réflexion pourrait être plus intense parce que la discontinuité qui la produit est particulièrement marquée. Dans les autres cas, où le contraste serait moins marqué, les mesures effectuées ne sont peut-être pas assez sensibles pour le mettre en évidence.

Des diagrammes palynologiques permettant de situer chronologiquement ce réflecteur ont été réalisés dans les sondages n°12 (Barbiot, 1995) et n°4 (Vargas Ramirez, 1999). Dans le n°12, cet événement se situerait à la fin de l'Atlantique ou au Subboréal (la limite entre ces deux périodes étant incertaine); au n°4, il est dans l'Atlantique.

6.2.2. Réflecteurs indiquant des phases de développement

Des réflecteurs continus ont été notés dans une partie de la fagne Wallonne et de Cléfaye.

En fagne Wallonne, dans la partie nord du massif tourbeux principal, deux réflecteurs-plans relativement parallèles entre eux se marquent sur plusieurs profils successifs. Ces réflecteurs sont particulièrement bien marqués en rive gauche du petit ru qui s'écoule à l'exutoire de la tourbière vers la Helle.

A priori, on pourrait interpréter ces réflecteurs comme des dépôts de sédiments de ce ru (comme en bordure de la Helle aux Trois-Bornes, cf. infra 6.3.3.2). Un sondage a donc été effectué au point 10 (fig. 27). L'image du profil est donnée en fig.46. En ce point, où la tourbe est épaisse de 4 m, les réflecteurs se situent à environ 1,3 et 2,6 m sous la surface.

Les mesures de teneurs en cendres (fig. 48) permettent d'éliminer l'hypothèse d'un niveau contenant plus de matières minérales. Les cendres ne dépassent pas 5 % du poids sec, ce qui

est une valeur tout à fait normale pour une tourbe ombrogène. La teneur en eau ne montre pas non plus de différences significatives au long du profil.

Une autre hypothèse pour expliquer les deux réflecteurs serait des différences de degré d'humification. En effet, la structure hydro-physique de la tourbe se modifie en fonction de l'humification; si des contrastes dans le degré d'humification, liés à l'histoire du développement de la tourbière ou à des processus de dégradation à partir de la surface, sont présents dans le profil, ils pourront être à l'origine de différences dans la teneur en eau détectables par le radar.

Nous avons tenté d'estimer ce paramètre par 3 approches complémentaires: les poids de fibres, la méthode colorimétrique, et l'analyse succincte des macrorestes, afin de détecter d'éventuels changements dans le type de tourbe.

Les résultats sont présentés en [fig. 49](#). Le pourcentage du total des restes végétaux par niveau et la répartition des types de macrorestes donnent quelques indications intéressantes. Les niveaux -255 à -265 cm ont significativement moins de restes que les niveaux qui les encadrent. Ils ont également une part plus importante de restes de sphaignes. Cette situation pourrait être corrélée avec le réflecteur le plus profond. Les niveaux -135 à -140 cm ont également moins de restes, et sont encadrés par des niveaux qui présentent une forte proportion de restes de sphaignes. Ils pourraient correspondre au réflecteur supérieur.

Toutefois, deux autres diminutions notoires de la teneur en macrorestes se produisent dans ce profil, sans qu'il y ait de correspondance sur les profils radar. Celle qui se marque au niveau -50 cm pourrait être masquée par les réflexions de surface. Celle des niveaux -210 à -215 cm ne trouve pas de parallélisme avec le profil radar. L'interprétation des graphiques obtenus reste donc délicate.

Les taux d'humification mesurés par colorimétrie n'apportent pas de réponse. La seule différence qui apparaît est une diminution de l'humification au niveau -170 cm. Cela ne correspond pas aux données du radar, mais on notera néanmoins que cela correspond à des niveaux où les macrorestes de sphaignes sont particulièrement abondants.

Le diagramme palynologique de ce profil ([fig. 47](#)) n'a pu être établi que de la base jusqu'au niveau -145 cm; plus haut, les pollens sont extrêmement abîmés et rares; il n'était pas possible d'en faire les comptages dans des délais raisonnables.

La limite entre l'Atlantique et le Subboréal n'est pas aisée à placer. Si l'on considère la chute d'*Ulmus* et la présence continue de *Fagus*, elle pourrait se situer vers le niveau -255 cm, mais seule une datation au ¹⁴C pourrait le confirmer. Si c'était le cas, cette limite coïnciderait avec le premier réflecteur. Le passage du Subboréal au Subatlantique se trouve probablement entre les niveaux -210 et -220 cm, avec l'augmentation brutale de *Fagus*. Le deuxième réflecteur se situe plus haut et correspond donc à un événement du Subatlantique.

Notons que près de la moitié du dépôt tourbeux à cet endroit, soit près de 2 m, s'est accumulé au Subatlantique et est donc très récent.

En conclusion, l'interprétation de ces deux réflecteurs n'est pas encore très claire, malgré diverses approches. On peut cependant les attribuer à des contrastes dans la nature de la tourbe, eux-mêmes peut-être liés à des changements climatiques. Si des événements paléoclimatiques pouvaient être associés à ces réflecteurs de façon certaine, les images radar permettraient de les cartographier dans toute la zone où ils apparaissent.

6.2.3. Réflecteurs locaux particuliers

6.2.3.1. Niveau de cendres aux sources de la Soor

L'ancienne source présumée de la Soor, avant son détournement par un fossé, se marque par des suintements minéralisés supportant une végétation mésotrophe (point de sondage n°7, [fig. 27](#)). Dans cette zone, nous avons enregistré un réflecteur tout à fait particulier, sur deux profils successifs ([fig. 42](#)). Lors du sondage à cet endroit, nous avons noté plusieurs niveaux de cendres. Lors des comptages des pollens, nous avons constaté la destruction presque totale des pollens sur 50 cm d'épaisseur, associée à la présence de charbons de bois. Le réflecteur pourrait donc être dû à un ou des niveaux de cendres.

Si cette identification est exacte, ce réflecteur souligne probablement la topographie de la surface qui existait au moment de l'incendie, c'est-à-dire une dépression peu profonde dont le fond repose sur 1 m de tourbe.

L'interprétation du diagramme palynologique ([fig. 43](#)) est malaisée, en raison de l'absence de pollens sur une grande épaisseur. La base comprendrait la fin de l'Atlantique, puis, au niveau -150 cm, on assiste à de brusques changements sans réelle transition: nette diminution d'*Alnus*, disparition de *Tilia*, de *Fraxinus* et d'*Ulmus*, apparition brutale de *Fagus* en courbe continue dépassant 5%, nette extension des *Poaceae*, apparition d'une courbe continue d'*Ericaceae*. Ce niveau, enrichi en matières minérales limoneuses et en cendres, pourrait faire penser à un incendie qui aurait consumé une certaine épaisseur de tourbe, ce qui expliquerait l'absence du Subboréal dans le profil. Le Subatlantique, dont il manque peut-être la base, reposerait donc directement sur la fin de l'Atlantique. C'est dans la partie inférieure du Subatlantique que se situe le réflecteur, avant l'apparition de la courbe continue de *Carpinus*, située au niveau -85 cm, et qui est datée dans la région de 2000 à 1750 BP (Gotjé et al, 1990; Damblon, 1996).

Tous les niveaux d'incendie repérés dans le profil dateraient donc du Subatlantique.

6.2.3.2. Dépôt de crue de la Helle aux Trois-Bornes

Un réflecteur continu et très net a été repéré à faible profondeur sur plusieurs profils en bordure de la Helle au lieu-dit "Trois-Bornes". La [fig. 52](#) montre un exemple d'image radar où ce réflecteur est présent; la carte en [fig. 53](#) montre l'extension de ce réflecteur. Plusieurs sondages rapides ont montré que des sédiments minéraux, argilo-limoneux, sableux ou graveleux, occupaient une partie des profils. Ce réflecteur semble donc être un dépôt de crue de la rivière. La localisation d'un tel dépôt est due au fait que le lit mineur de la rivière disparaît pratiquement dans ce tronçon.

Un prélèvement avec une analyse plus détaillée a été effectué au point 11 ([fig. 27](#)) pour tenter de répondre aux questions que pose ce dépôt: s'agit-il d'un événement unique ou existe-t-il plusieurs dépôts distincts? De quand date(nt)-il(s)? Est-ce lié à une augmentation de la capacité d'érosion et de transport de la rivière (précipitations exceptionnelles) ou à une augmentation de la charge en suspension suite à une action anthropique (Via)?

Les profils de calcinations et de teneurs en eau ([fig. 54](#)) montrent que plusieurs épisodes se sont probablement succédé. On y trouve deux séquences gravier-sable-limons. Les teneurs en cendres (plus de 70%) indiquent qu'il s'agit d'un véritable niveau minéral, et non d'un apport régulier de matières minérales pendant l'accumulation de tourbe. Ce sont les niveaux de

graviers, épais de 1 à 2 cm seulement, qui provoquent une diminution importante de la teneur en eau qui se traduit par un réflecteur radar. En l'occurrence, à l'endroit du sondage, ce niveau de gravier se situe à 68 cm de profondeur, ce qui coïncide parfaitement avec l'image radar. Malheureusement, il n'est pas facile d'appliquer la palynologie pour dater cet événement, car les pollens sont forcément remaniés.

6.2.3.3. Réflecteur indéterminé au Misten

Au sud-ouest du massif tourbeux principal du Misten, deux profils radar ont montré la présence d'un réflecteur très net ([fig. 55](#)). Faute de temps, aucun sondage n'a été effectué à cet endroit.

6.2.3.4. Via mansuerisca dans la fagne des Wéz

Dans la fagne des Wéz, les profils radar ont recoupé plusieurs fois le tracé de la Via mansuerisca. Celle-ci se marque par un réflecteur peu profond.

7. Phénomènes observés en surface: liens avec la subsurface

7.1. Végétation sub-intacte et morphologie des dépôts

Les zones où la végétation turfigène subsiste encore ont été reportées sur la carte des épaisseurs de tourbe ([fig. 56](#)). La végétation sub-intacte a le mieux résisté à la dégradation aux endroits où deux conditions sont réunies: une importante masse de tourbe où la profondeur atteint plusieurs mètres, et des pentes faibles, comme sur les cols et les replats. Cela indique, si besoin en était, le rôle extrêmement important de l'hydrologie profonde pour le maintien des tourbières soumises à des perturbations périphériques intenses.

Au Misten, la limite de la tourbière intacte suit pratiquement l'isopaque de 3m. La situation est assez semblable en fagne Wallonne et à Cléfaye.

Des lambeaux de faible superficie de tourbières sub-intactes étaient encore signalés en fagne des Deux-Séries (massif C) et aux Potalas sur la carte de végétation dressée par Streeel en 1957 (Jortay, 1988b; Jortay, 1988c). Dans les deux cas, les conditions de pente faible et d'épaisseur de tourbe étaient rencontrées et peuvent expliquer pourquoi ces zones ont résisté plus longtemps à la dégradation, même si elles ont régressé depuis quarante ans.

7.2. Zones à végétation mésotrophe

7.2.1. Relief de subsurface

Dans plusieurs fagnes, on trouve des îlots de végétation plus mésotrophe entourés de végétation oligotrophe typique. Ces îlots, de quelques centaines de m² au plus, peuvent se présenter sous la forme d'un bombement marqué (butte), de suintements minéralisés, ou simplement se distinguer par leur tapis végétal. Parmi les espèces souvent associées à ces milieux, on trouve *Phragmites australis*. (Hambuckers et al., 1995).

Rappe (1995) avait montré la présence d'une trace de lithalse précisément sous une butte à phragmites de la fagne des Deux-Séries. La présente étude devait donc montrer si une telle relation existait dans tous les cas.

Les zones à tendance mésotrophe pour lesquelles le radar a apporté une information sont reportées sur la carte en [fig. 57](#). On en trouve aux Deux-Séries, en fagne Wallonne, à Cléfaye, dans la Poleûr, dans les Wéz et à Herbofaye. Elles sont généralement situées dans des secteurs à faible épaisseur de tourbe.

Il n'y a pas de présence systématique d'une structure particulière sous ces zones. Néanmoins, 6 buttes de la fagne des Deux-Séries (avec ou sans *Phragmites*) sont associées à une trace de lithalse en profondeur et 6 ne le sont pas. Sous chacune des deux buttes à phragmites de la fagne de la Poleûr, la subsurface présente une forme de cuvette ([fig. 58](#)), mais qui ne peut être interprétée comme une cicatrice de lithalse. Les autres types de végétation mésotrophe ne sont jamais associées à des traces de lithalses, sauf une zone à *Phragmites* (non sur butte) du massif G de la fagne des Deux-Séries.

Une information supplémentaire est apportée par le réflecteur supérieur dans la tourbe de la butte sur trace de lithalse n°12 ([fig. 27](#)). Cette butte a été cartographiée en trois dimensions

par Michel (2003) après y avoir effectué des profils radar distants de 5 m. L'analyse de ces images, après correction topographique, montre que le réflecteur supérieur n'est pas horizontal, mais nettement incliné et quasiment parallèle à la surface actuelle (fig. 59). Bien que l'origine de ce réflecteur ne soit pas exactement connue (cf. supra 6.2.1), on peut raisonnablement penser qu'il corresponde à la surface du sol à un moment donné du passé, probablement durant l'Atlantique. Sa position semble donc indiquer que, déjà à cette époque, l'accumulation de tourbe était plus importante dans la partie amont de la cuvette.

7.2.2. Analyses d'eau

L'accumulation différentielle de tourbe dans les buttes est attribuée à l'émergence d'eau profonde sous pression, donc issue d'une nappe captive dans le manteau d'altération ou le bedrock. La présence d'eau sous pression a été vérifiée par des piézomètres sur quelques buttes (Rappe, 1995). La même origine de l'eau peut également expliquer les suintements minéralisés, mais sans que le niveau piézométrique y dépasse le niveau du sol. Les caractéristiques chimiques de ces eaux ont été analysées en différents points par Hambuckers et al. (1995) et Rappe (1995).

Quelques piézomètres ont été implantés (fig. 60) pour prélèvements d'eau. Le point 20, avec des piézomètres à différentes profondeurs, sert de témoin. La fig. 60 donne les résultats d'une campagne de mesures représentative.

7.2.2.1. Conductivité électrique et pH

Les valeurs sont extrêmement variables selon les endroits et la profondeur. Le témoin montre sur, toute la hauteur, des pH et surtout des conductivités très faibles, de l'ordre de grandeur des valeurs attendues pour ce type de tourbe (pH inférieurs à 4,5; conductivités inférieures à 100 $\mu\text{S}/\text{cm}$). Dans les cariçaies et les suintements, où la végétation de surface traduit des conditions plus mésotrophes, le pH et la conductivité sont plus élevés. Dans la butte au point n°2 (fig. 60), seule la base montre une forte conductivité électrique, de 251 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (ce piézomètre étant placé dans le limon). La tourbe surmontant le rempart d'un lithalse situé sous une autre butte à roseaux (n°21) a des valeurs proches de celles du témoin. Les valeurs les plus surprenantes viennent de la petite zone de tourbière subintacte (n°5), avec une conductivité électrique de 195 $\mu\text{S}/\text{cm}$ à la base et 223 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en milieu de profil, sans qu'aucune structure ni végétation de surface particulières n'ait été détectées à cet endroit.

Au point n°6, où l'image radar montrait une forte atténuation, les valeurs de conductivité sont un peu plus élevées que dans le témoin, mais sans atteindre des valeurs susceptibles d'expliquer cette atténuation.

Ces résultats montrent qu'il n'est pas simple d'utiliser le pH et la conductivité comme traceurs d'eau profonde. L'eau de la nappe de la tourbière peut également présenter des valeurs de conductivité relativement élevées, qui peuvent être liées au type de tourbe ou à la circulation d'eau au sein même de la tourbe. Nous avons donc tenté une approche par le tritium.

7.2.2.2. *Teneur en tritium*

L'eau de différents niveaux d'un profil témoin (n°20) a été comparée à celle d'un profil dans un suintement minéralisé (n°19).

Dans tout le profil témoin, les activités tritium sont comprises entre 10 et 20 TU, qui sont également les valeurs moyennes des précipitations actuelles. Une lente diffusion moléculaire expliquerait l'homogénéisation du profil, car les mouvements d'eau horizontaux et verticaux sont extrêmement limités.

Par contre, dans le profil des suintements, les valeurs sont significativement plus faibles, ce qui pourrait s'expliquer par un apport d'eau ancienne, provenant d'une nappe alimentée avant le pic du tritium. Cette différence significative a été confirmée par une deuxième campagne de prélèvements. Bien que le petit nombre de mesures ne permette pas de dépasser le stade de l'hypothèse, on pourrait considérer la faible activité tritium comme traceur d'une eau profonde en mouvement, par opposition à l'eau à faible mobilité dans le reste de la tourbière.

Le fond du lithalèse du point n°2 et un suintement de la zone n°7 ont également des activités significativement inférieures à celles du témoin, ce qui conforterait l'hypothèse de mouvements d'eau profonde à ces endroits.

8. Conclusions

A. RÉSULTATS

La présente convention a consisté en un important travail d'inventaire, sur la base duquel ont été ébauchées plusieurs pistes d'analyses et de recherches. Les résultats engrangés posent différentes questions, d'ordre géomorphologique, paléoclimatique et paléoécologique, qui ouvrent des perspectives intéressantes pour des investigations futures.

- ♦ La base du travail d'inventaire, présenté au chapitre 4, est constituée de plus de 280 km de profils radar et GPS dans les principaux dépôts tourbeux de la réserve naturelle. Ces images ont permis une **cartographie détaillée** de ces massifs tourbeux. Ces cartes seront très utiles lors des futurs travaux de gestion ou d'investigation scientifique: choix de zones expérimentales en fonction de l'épaisseur de la tourbe, de la position par rapport au massif tourbeux; choix de points de sondage ou d'analyses en fonction de la morphologie générale.

- ♦ L'analyse conjointe des données topographiques et radar a permis de reconstituer la **topographie initiale** sur laquelle les tourbières ont commencé à se développer (chapitre 5). Parmi les tourbières des Hautes-Fagnes ayant évolué vers un stade ombrogène, on trouve des tourbières de pente (Deux-Séries, Grande-Fange, Poleûr), des tourbières de col (fagne Wallonne, Cléfaye) et des tourbières sur replat (Misten). Les dépôts les plus épais sont localisés sur les pentes les plus faibles.

Certaines tourbières de pente de la fagne des Deux-Séries ont bénéficié de la présence de nombreuses traces de lithalses. Ces cuvettes ont été cartographiées et l'hétérogénéité de leur répartition soulève la question de la nature du substratum.

- ♦ L'interprétation paléoécologique de ces données est l'objet du chapitre 6.
 - Les datations du **démarrage des dépôts tourbeux** confirment les données antérieures. Dans les cuvettes de lithalses, la tourbe commence à s'accumuler au Préboréal (9400-8100 BC CAL). A l'extérieur de ces cuvettes, la tourbification commence à la fin du Boréal (8100-6400 BC CAL) ou au début de l'Atlantique (6400-3800 BC CAL). Les analyses palynologiques et paléoécologiques révèlent cependant des différences entre les points de sondage: vitesse d'accumulation, successions végétales et événements locaux particuliers diffèrent d'un endroit à l'autre et mériteraient une étude plus approfondie.

 - Plusieurs **réflecteurs** ont été repérés sur les enregistrements radar. Une première interprétation a pu être donnée pour certains d'entre eux. Dans tous les cas, ils indiquent des phases de développement ou des événements brutaux qui ont marqué l'histoire des tourbières.
 - La tourbe de remplissage des cuvettes de lithalses comporte généralement un ou plusieurs réflecteurs que l'on peut rattacher à 3 types: contact entre limon soliflué et tourbe proprement dite (fond de la dépression), niveau de limon dans la tourbe, et contraste

d'humification au niveau des remparts, ce dernier réflecteur n'ayant pas pu être corrélé avec des paramètres physiques mesurables.

- Dans certaines zones, la superposition de types de tourbe différents se marque par un réflecteur continu et relativement diffus. Des changements dans les assemblages de macrorestes sont assez bien corrélés avec ce type de réflecteur.
- Le long de la Helle, au lieu dit Trois-Bornes, un réflecteur puissant a révélé un niveau de limon peu profond au sein de la tourbe, témoin d'un ou plusieurs épisodes de crue de la rivière datés du Subatlantique récent.

Parmi les méthodes utilisées pour interpréter les réflecteurs radar, les mesures de teneurs en cendres par la perte au feu sont les plus appropriées pour mettre en évidence un niveau enrichi en matières minérales. Lorsqu'il faut chercher une autre origine, les analyses de macrorestes permettent de distinguer différents types de tourbe. Ce type d'analyses devrait être affiné. Par contre, les mesures du degré d'humification par colorimétrie se sont avérées peu satisfaisantes.

- ◆ **Les relations complexes entre la surface et la subsurface**, évoquées au chapitre 7, sont un peu mieux documentées grâce aux données acquises.
 - Le maintien de la végétation turfigène est tributaire de conditions hydrologiques favorables qui ne sont plus rencontrées que dans les massifs tourbeux épais, sur pentes faibles.
 - Les petites zones de végétation mésotrophe présentes dans plusieurs fagnes ne sont pas systématiquement liées à la présence d'une trace de lithalse sous la tourbe. Les analyses d'eau indiquent qu'elles résultent d'une circulation d'eau profonde, clairement distincte de l'eau de la nappe de la tourbière environnante, qui émerge localement à la surface de la tourbe. L'origine de cette eau et les mécanismes de sa circulation restent à éclaircir.

B. PERSPECTIVES

L'ensemble des données acquises montre l'intérêt d'investigations complémentaires avec d'autres moyens. La documentation apportée par la prospection au radar pourra servir de base dans plusieurs axes de recherche dont nous citerons les principaux.

- ◆ Fonctionnement hydrologique d'un massif tourbeux: circulation de l'eau dans un massif tourbeux et entre celui-ci et l'extérieur (étude de la piézométrie profonde et des conductivités hydrauliques). Comparaison de différents types de tourbières.
- ◆ Caractérisation lithologique et hydrogéologique des dépôts meubles, du manteau d'altération, voire de la roche non altérée (étude géophysique). Ces investigations visent à comprendre la circulation de l'eau en profondeur et son influence sur la répartition de phénomènes passés (lithalses) et actuels (émergences d'eaux minéralisées).
- ◆ Etude stratigraphique de massifs tourbeux (profils plus détaillés de macrorestes et de palynologie quantitative). Comparaison des types de tourbe dans différents massifs (et conséquences pour la gestion) et recherche d'événements paléoclimatiques.

Bibliographie

- Barbiot C. 1995. Etude paléoécologique d'une butte à *Phragmites australis* (Cav.) Steud. dans la fagne des Deux-Séries (Hautes-Fagnes, Belgique). Liège, Mém. Lic. Sci. bot., U. Lg.: 60 p.
- Bastin B. 1985. Etude palynologique d'une couche de tourbe mise au jour dans le "rempart" d'une "palse" de la Konnerzvenn. *Hautes Fagnes* 179: 72-73.
- Bjelm L. 1980. Geological interpretation with subsurface interface radar in peat lands. *Proc. 6th Internat. Peat Congr.*, Duluth: 7-8.
- Blackford J.J. & Chambers F.M. 1993. Determining the degree of peat decomposition for peat-based paleoclimatic studies. *International Peat Journal* 5: 7-24.
- Bless M.J.M., Bouckaert J., Camelbeek T., Dejonghe L., Demoulin A., Dupuis C., Felder P.J., Geukens F., Gullentops F., Hance L., Jagt J.W.M., Juvigné E., Kramm U., Ozer A., Pissart A., Robaszynski F., Schumacker R., Smolderen A., Spaeth G., Steemans P., Streel M., Vandenven G., Vanguestaine M., Walter R. & Wolf M. 1990. The Stavelot massif from Cambrian to recent. A survey of the present state of knowledge. *Ann. Soc. géol. Belg.* 113: 53-73.
- Bless M.J.M. & Fernandez Narvaiza C. 1997. L'inondation par la mer, étape par étape, de la Vêquée, entre Hockai et la Baraque-Michel, au cours du Crétacé récent. *Hautes Fagnes* 225: 17-26.
- Bouillenne R. 1934. Les eaux des tourbières du plateau de la Baraque-Michel. *Ann. Soc. Géol. Belg.* 57 / 5.
- Bouillenne R., Deuse P. & Streel M. 1956. Introduction historique à l'étude des tourbières de la fagne des Deux-Séries. *Bull. Soc. roy. Sci. Liège* 5: 260-279.
- Bourguignon P. 1953. Associations minéralogiques des limons et argiles des Hautes-Fagnes. *Ann. Soc. Géol. de Belg.* LXXVII: B 39-59.
- Brouwier M. 1999. A la recherche d'une faille sur le plateau des Hautes-Fagnes. Liège, Mém. Lic. géogr., U.Lg.
- Charlier J. 2002. Réflexion radar au sein de la tourbe de remplissage de traces périglaciaires de la fagne des Deux-Séries (Hautes-Fagnes, Belgique). Liège, Mém. Lic. géogr., U.Lg.: 195 p.
- Coope G.R. 1985. Etude des coléoptères inclus dans la tourbe découverte dans le rempart d'un vivier de la Konnerzvenn. *Hautes Fagnes* 179: 74.
- Corley M.F.V. & Crundwell A.C. 1991. Additions and amendments to the mosses of Europe and the Azores. *J. Bryol.* 16: 337-356.
- Corley M.F.V., Crundwell A.C., Düll R., Hill M.O. & Smith A.J.E. 1981. Mosses of Europe and the Azores; an annotated list of species, with synonyms from the recent literature. *J. Bryol.* 11: 609-689.
- Damblon F. 1996. Les dépôts tourbeux et l'histoire de la végétation sur le plateau des Hautes-Fagnes (Belgique). *Annales de la Société géologique de Belgique* 117: 259-276.
- Damblon F. & Bastin B. 1986. Etude paléoécologique d'une lentille tourbeuse ensevelie dans le rempart d'une palse de la Konnerzvenn (Hautes-Fagnes, Belgique). *Bulletin de la Société royale de Botanique de Belgique* 120: 20-29.
- Demoulin A. 1980. L'évolution géomorphologique du plateau des Hautes-Fagnes et de son versant septentrional. *Bulletin de la Société belge d'Etudes géographiques* 49: 21-45.
- Demoulin A. 1986a. Les surfaces d'érosion crétacique et paléogènes du nord de l'Ardenne-Eifel. *Zeitschrift für Geomorphologie* 30: 53-69.

- Demoulin A. 1986b. L'altération du socle paléozoïque dans le nord de l'Ardenne. *Bulletin de la Société belge d'Etudes géographiques* 1986-2: 279-300.
- Demoulin A. 1987a. The distribution of Cretaceous deposits on the Hautes Fagnes plateau (Belgium). *Geologie en Mijnbouw* 66: 147-150.
- Demoulin A. 1987b. Les sables oligocènes du plateau des Hautes-Fagnes: une synthèse. *Bulletin de la Société belge de Géologie* 96: 81-90.
- Demoulin A. 1988. Cenozoic tectonics on the Hautes-Fagnes plateau (Belgium). *Tectonophysics* 145: 31-41.
- Fabri R. & Schumacker R. 1986. Les bouleaux des tourbières du massif Ardennais. *Dumortiera* 34/35: 67-72.
- Frankard P. 2000. Les bas-marais et les tourbières de l'Ardenne. *Région Wallonne, Conservation de la Nature, Travaux* 21: 153-172.
- Frankard P., Ghiette P., Hindryckx, M.-N., Schumacker R. & Wastiaux C. 1998. Peatlands of Wallony (S-Belgium). *Suo* 49 (2): 33-47.
- Froment A. 1966. Les étapes de la recolonisation végétale après incendie de tourbe: comparaison entre le plateau des Hautes-Fagnes et quelques autres tourbières européennes. *Lejeunia* N.S. 40: 1-15.
- Froment A. 1968. L'ancienne économie rurale de l'Ardenne et son incidence sur la végétation des Hautes-Fagnes. *Bulletin de la Société géographique de Liège* 4: 23-39.
- Froment A. 1975. Les premiers stades de la succession végétale après incendie de tourbe dans la réserve naturelle des Hautes-Fagnes. *Vegetatio* 29: 204-214.
- Ghiette P., Jortay A. & Metzmacher M. 1988a. Réserve naturelle domaniale des Hautes-Fagnes. Plan de gestion écologique. Fiche technique du secteur n°2: Cléfaye. Université de Liège, Station scientifique des Hautes-Fagnes: 13 p. + ann.
- Ghiette P., Jortay A. & Metzmacher M. (coll. Frankard P., Lejeune I. & Renard F.). 1988b. Réserve naturelle domaniale des Hautes-Fagnes. Plan de gestion écologique. Fiche technique du secteur n°3: fagne Wallonne et Wez. Université de Liège, Station scientifique des Hautes-Fagnes: 15 p. + ann.
- Gotjé W., Van Wayjen M.C.A. & Van Geel B. 1990. A palynological study of a Holocene deposit from Grand-Bongard (Hautes-Fagnes, Belgium). *Geologie en Mijnbouw* 69: 227-241.
- Grolle R. & Long D. 2000. Annotated checklist of the Hepaticae and Anthocerotae of Europe and Macaronesia. *J. Bryol.* 22: 103-140.
- Halleux L. 1990. Ground penetrating radar applied to the study of peat bogs and moors. *Ann. Soc. géol. Belg.* 113: 115-123.
- Halleux L. 1995. Prospection géophysique en eau douce: voies hydrauliques, lacs, zones marécageuses. *Publ. Fac. Sc. appl. U.Lg.* 137: 241 p.
- Hambuckers A., Schumacker R., Remacle J. & Frankard Ph. 1995. La présence de groupements végétaux à caractère mésotrophe au milieu des tourbières des Hautes-Fagnes (Belgique) est-elle liée à des intrusion de tonalite dans les couches reviniennes? *Belg. J. Bot.* 128: 48-56.
- Hänninen P. 1992. Application of ground penetrating radar techniques to peatland investigations. Proc. 4th Int. Conf. on Ground Penetrating Radar. *Geological Survey of Finland, Special Paper* 16: 217.
- Hindryckx M.-N. 1999. Evolution régressive récente de la végétation des tourbières hautes à sphaignes en haute Ardenne (Hautes-Fagnes, Belgique). Liège, Thèse Doct. Sci., U.Lg.: 269 p. + ann.
- Ingram H.A.P. 1978. 1978. Soil layers in mires: function and terminology. *J. Soil Sci.* 29: 224-227.

- Jortay A., 1988a. Réserve naturelle domaniale des Hautes-Fagnes. Plan de gestion écologique. Fiche technique du secteur n°1, fagnes du Nord-Est. Univ. Liège, Stat. scientif. H.-F., rapport non publié: 21 p. + ann.
- Jortay A. 1988b. Réserve naturelle domaniale des Hautes-Fagnes. Plan de gestion écologique. Fiche technique du secteur n°5, fagne des Deux-Séries. Univ. Liège, Stat. scientif. H.-F., rapport non publié: 16 p. + ann.
- Jortay A., 1988c. Réserve naturelle domaniale des Hautes-Fagnes. Plan de gestion écologique. Fiche technique du secteur n°6, Grande-Fange. Univ. Liège, Stat. scientif. H.-F., rapport non publié: 12 p. + ann.
- Jowsey, P.C. 1966. An improved peat sampler. *New Phytol.* 65: 245-248.
- Juvigné E. 1991. Distribution de vastes retombées volcaniques originaires de l'Eifel et du Massif Central aux temps postglaciaires dans le NE de la France et des régions voisines. *C.R. Acad. Sci. Paris, Sér. 2*, 313: 415-420.
- Kettles I.M. & Robinson S.D. 1997. A ground-penetrating radar study of peat landforms in the discontinuous permafrost zone near Fort Simpson, Northwest Territories, Canada. In: Trettin, C.C., Jurgensen, M.F., Grigal, D.F., Gale, M.R., Jeglum, J.K (eds.). Northern Forested Wetlands, Ecology and Management, Lewis, Boca Raton: 147-160.
- Lambinon J., De Langhe J.E., Delvosalle L., Duvigneaud J. & coll. 1992. Nouvelle flore de la Belgique, du Grand-Duché de Luxembourg, du Nord de la France et des régions voisines (Ptéridophytes et Spermatophytes). Jardin botanique national de Belgique, Meise, 4e édition, CXX+1092 pp.+ 1c.
- Leclercq L. 1984. Composition chimique des eaux des rivières oligotrophes de Haute-Ardenne (Belgique) et ses variations saisonnières. *Physio-Géo* 9: 139-152.
- Michel L. 2003. Modélisation en trois dimensions d'une trace de lithalse des Hautes-Fagnes de Belgique. Liège, Mém. D.E.S. en géophysique, U.Lg.
- Monjoie A. & Cajot O. 1985. Les aquifères présents dans le massif des Hautes-Fagnes. *Hautes Fagnes* 179: 80-81.
- Nobes D.C. & Warner B.G. 1992. Application of ground penetrating radar to a study of peat stratigraphy: preliminary results. In: J.A. Pilon (ed.). Ground Penetrating Radar. *Geological Survey of Canada, Paper 90-4*: 133-137.
- Pahaut P. 1961. Carte des sols de la Belgique: texte explicatif de la planchette de Reinartzhof 136'A et de Hoscheit 136' B. Gent, Centre de Cartographie des sols: 104 p.
- Pahaut P. 1965. Carte des sols de Belgique: Elsenborn 149A. Non publié.
- Pahaut P. 1969. Carte des sols de la Belgique: texte explicatif de la planchette Hoffrai 149E. Gent, Centre de Cartographie des sols: 163 p.
- Pahaut P. & Oldenhove de Guertechin F.B. 1962. Carte des sols de la Belgique: texte explicatif de la planchette d'Eupen 136E. Gent, Centre de Cartographie des sols: 139 p.
- Pissart A. 1995. L'Ardenne sous le joug du froid. Le modelé périglaciaire du massif ardennais. In: Demoulin A., éd. L'Ardenne. Essai de géographie physique. Liège: 136-154.
- Pissart A. 1999. Les buttes périglaciaires des Hautes-Fagnes et le climat du dernier Dryas. *Acad. Belg., Bull. Cl. Sci.* Lecture publique prononcée le 19-12-98.
- Pissart A. 2000. Les 'viviers' des Hautes-Fagnes. Les connaissances en l'an 2000. Haute Ardenne a.s.b.l., Documents de la Station scientifique des Hautes-Fagnes h.s.: 56 p.
- Pissart A. & Juvigné E. 1980. Genèse et âge d'une trace de butte périglaciaire (pingo ou palse) de la Konnerzvenn (Hautes-Fagnes, Belgique). *Annales de la Société géologique de Belgique* 103: 73-86.

- Poncelet L. & Martin H. 1947. Esquisse climatographique de la Belgique. *Institut Royal Météorologique, Mémoires* 27: 265 p.
- Rank D. 1992. Environmental tritium in hydrology: present state (1992). *Radiocarbon* 1993 : 327-334.
- Rappe J. 1995. Etudes phytosociologique, physico-chimique et morphologique des buttes à *Phragmites australis* (Cav.) Steud. dans la fagne des Deux-Séries (Hautes-Fagnes, Belgique). Liège, Mém. Lic. Sci. bot., U. Lg.: 35 p. + ann.
- Renier A. 1933. Contribution à l'étude des dépôts postpaléozoïques du versant septentrional des Hautes-Fagnes. *Bull. Soc. belg. Géol., Paléontol. et Hydrol.* 42: 237-243.
- Schumacker R. 1961. Etude d'une tourbe à *Scheuchzeria palustris* dans les couches inférieures des dépôts de la fagne Wallonne. *Bull. Soc. roy. Sci. Liège* 30: 490-511.
- Schumacker R. 1971. L'incendie du 27 octobre 1971 dans la Réserve naturelle domaniale des Hautes-Fagnes. Historique, bilan et leçons. *Hautes Fagnes* 1971: 203-213 + 1 c.h.-t., 5 ph. h.-t.
- Schumacker R. 1980. Groupements du *Caricetum limosae* (Paul 1910) Osv. 1923, du *Rhynchosporium albae* Koch 1926, du *Caricetum lasiocarpae* Koch 1926 et à *Carex rostrata* - *Sphagnum apiculatum* en Haute-Ardenne nord-orientale. *Coll. Phytosociol.* 7: 461-475.
- Schumacker R., Dirkse G. & De Zuttere Ph. 1974. *Carex dioica* L. et *Carex pulicaris* L. dans la Réserve domaniale des Hautes-Fagnes (province de Liège, Belgique). *Lejeunia* N. S. 74: 1-21.
- Schumacker R. & De Zuttere P. 1980. Aperçu de la végétation de la tourbière du Misten (Eupen, province de Liège, Belgique). Réflexions sur les associations des *Oxycocco-Sphagnetia* en Belgique. *Colloques Phytosociologiques* 7: 437-459.
- Schwickerath M. 1944. *Das Hohe Venn und seine Randgebiete. Vegetation, Boden und Landschaft.* G. Fischer, Jena: 278 p.
- Streel M. 1959. Etude phytosociologique de la fagne Wallonne et de la fagne de Cléfay. (Structure et évolution des associations végétales à Sphaignes dans les Hautes-Fagnes de Belgique). *Mémoires de l'Académie royale de Belgique, Classe des Sciences* 31 (1): 109 p.
- Theimer B.D., Nobes D.C. & Warner B.G. 1994. A study of geoelectric properties of peatlands on ground penetrating radar surveying. *Geophys. Prospecting* 42: 179.
- Tiuri M., Toikka M., Tolonen K. & Martilla I. 1983. The use of radiowave probe and subsurface interface radar in peat resource inventory. In: Proceedings, Symposium on remote sensing in peat and terrain resource surveys, Internat. Peat Soc. 131-143.
- Tombal P. & Schumacker R. 1983. *Pour une politique de protection des tourbières. 2. Essai d'approche scientifique des tourbières.* In: Institut européen d'Ecologie (éd.). *Inventaire des tourbières de France. Région lorraine.* Metz: 1-14.
- Ulriksen P. 1980. Investigation of peat thickness with radar. *Proc. 6th Internat. Peat Congr.*, Duluth: 126-129.
- Vandenberghen C. 1951. Landes tourbeuses et tourbières bombées à sphaignes de Belgique (Ericeto-Sphagnetalia Schwickerath 1940). *Bull. Soc. roy. Bot. Belg.* 84: 157-221.
- Vandenberghen C. 1952. Contribution à l'étude des bas-marais de Belgique. *Bull. Jard. bot. Etat, Bruxelles* 22: 1-64.
- Vargas Ramirez L. 1999. Etude palynologique, paléoécologique, granulométrique et minéralogique des sédiments (tourbe et limon) dans une trace de lithalèse de la fagne des Deux-Séries (Hautes-Fagnes, Belgique). Liège, Mém. D.E.S. en sciences naturelles de la terre et de la vie, U.Lg.: 57 p.
- Warner B.G., Nobes D.C. & Theimer B.D. 1990. An application of ground penetrating radar to peat stratigraphy of Ellice Swamp, southwestern Ontario. *Can. J. Earth Sci.* 27: 932.

Wastiaux C. 1990. Végétation et régime hydrologique d'une tourbière haute drainée: dégradation et régénération. (Deux-Séries, Hautes-Fagnes, Belgique). Liège, Mém. Lic. Sci. géogr., U. Lg.: 83 p. + ann.

Wastiaux C. 2000. Facteurs hydrologiques de la dégradation des tourbières hautes à sphaignes des Hautes-Fagnes. Liège, Thèse Doct. Sci., U.Lg.: 223 p. + ann.

Ziekur R. 1998. Die Bestimmung von Torfmächtigkeiten durch Bodenradarmessungen. *Telma* 28: 95 - 105.

Remerciements

Nous adressons nos plus vifs remerciements:

au Ministère de la Région Wallonne, Direction générale des Ressources naturelles et de l'Environnement, qui a financé cette étude;

à la société G-Tec SA, en particulier à son gérant M. L. Halleux, qui a assuré toute la partie technique de l'étude radar;

à M. J.M.Jacqmotte de la cellule topographie de la D.P.A., qui a participé à de nombreuses journées de terrain pour les levés au GPS;

aux membres du comité d'accompagnement, spécialement MM. J. Stein et A. Cordonnier qui ont veillé au bon déroulement du travail;

à la Commission consultative de Gestion des Réserves naturelles domaniales des Hautes-Fagnes et aux gestionnaires de la Division Nature et Forêts de la Direction de Malmedy et des cantonnements d'Eupen, de Malmedy et d'Elsenborn, qui nous ont facilité l'accès aux sites de mesures et ont manifesté leur intérêt pour cette recherche;

à MM. R. Arnould, A. Demoulin, P. Frankard, P. Ghiette, E. Juvigné, A. Pissart, M. Streel, pour les discussions et les conseils tout au long de ce travail; à MM. E. Juvigné, F. Petit et M. Vanguestaine pour l'accès à leur laboratoire, ainsi qu'à Mme M. Giraldo pour son aide technique;

aux étudiants ayant collaboré à cette recherche dans le cadre de leur mémoire: Mme L. Vargas et MM. M. Brouwier, J. Charlier et L. Michel.

Nous exprimons une gratitude toute particulière aux personnes ayant participé aux travaux de terrain, souvent dans des conditions difficiles: C. Bosard, M. Brouwier, J. Charlier, L. Corin, A. Dekimpe, M. De Saulnier, B. Efoloko, C. Grégoire, L., N. & P. Halleux, J. Hansenne, J.-M. Jacqmotte, H. Makengo, M. Matthijs, L. Michel, G. Perpinien, E. Picqueray, L. Poussart, F. Wollwert, M. Zeimet.

Table des matières

SOMMAIRE	2
1. INTRODUCTION: OBJECTIFS DE L'ÉTUDE.....	3
2. CARACTÉRISTIQUES DE LA ZONE D'ÉTUDE.....	4
2.1. DÉLIMITATION	4
2.2. ORO-HYDROGRAPHIE.....	4
2.3. GÉOLOGIE ET GÉOMORPHOLOGIE.....	4
2.4. HYDROGÉOLOGIE.....	5
2.5. PÉDOLOGIE.....	5
2.6. CLIMAT	6
2.7. VÉGÉTATION	6
2.8. HISTOIRE RÉCENTE DE LA VÉGÉTATION.....	7
2.9. INFLUENCES ANTHROPIQUES	7
3. TECHNIQUES ET MÉTHODES.....	9
3.1. MÉTHODOLOGIE GÉNÉRALE	9
3.2. RADAR DE SUBSURFACE	9
3.2.1. <i>Principe général (Halleux, 1995).....</i>	<i>9</i>
3.2.2. <i>Application aux dépôts tourbeux</i>	<i>10</i>
3.2.2.1. <i>Historique</i>	<i>10</i>
3.2.2.2. <i>Interprétation des réflecteurs</i>	<i>10</i>
3.2.2.3. <i>Précision des mesures</i>	<i>11</i>
3.2.3. <i>Équipement radar.....</i>	<i>12</i>
3.3. G.P.S.....	13
3.3.1. <i>Principe général.....</i>	<i>13</i>
3.3.2. <i>Précision des mesures.....</i>	<i>13</i>
3.4. TRAITEMENT INFORMATIQUE DES DONNÉES.....	14
3.4.1. <i>GPS.....</i>	<i>14</i>
3.4.2. <i>Radar</i>	<i>14</i>
3.4.3. <i>Cartographie</i>	<i>14</i>
3.5. PRÉLÈVEMENTS DE TOURBE	15
3.5.1. <i>Teneur en eau, perte au feu</i>	<i>15</i>
3.5.2. <i>Degré d'humification.....</i>	<i>15</i>
3.5.3. <i>Macrorestes végétaux</i>	<i>16</i>
3.5.4. <i>Préparation des pollens</i>	<i>16</i>
3.5.5. <i>Analyse des limons</i>	<i>17</i>
3.6. PRÉLÈVEMENTS ET ANALYSES D'EAU.....	17
3.6.1. <i>Mode de prélèvement</i>	<i>17</i>
3.6.2. <i>Principe des analyses de tritium.....</i>	<i>17</i>
4. CARTOGRAPHIE DES MASSIFS TOURBEUX: UN INVENTAIRE DÉTAILLÉ.....	18
4.1. CARTE GÉNÉRALE: UNE AMÉLIORATION PAR RAPPORT À LA CARTE PÉDOLOGIQUE.....	18
4.2. CARTE DES ÉPAISSEURS DE TOURBE POUR CHACUNE DES FAGNES.....	18
4.2.1. <i>Fagne des Deux-Séries.....</i>	<i>18</i>
4.2.2. <i>Fagne Wallonne</i>	<i>19</i>
4.2.3. <i>Fagne de Cléfaye.....</i>	<i>19</i>
4.2.4. <i>Misten</i>	<i>19</i>
4.2.5. <i>Grande-Fange (partim. E: Potales).....</i>	<i>20</i>
4.2.6. <i>Grande-Fange (partim. W: Trous-Brôlis et Herbofaye)</i>	<i>20</i>
4.2.7. <i>Fagne des Wéz.....</i>	<i>20</i>
4.2.8. <i>Fagne de la Poleûr.....</i>	<i>20</i>
4.3. SUPERFICIES ET VOLUMES DE TOURBE.....	20
4.4. CONSÉQUENCES EN MATIÈRE DE GESTION	23
5. TOPOGRAPHIE DE SUBSURFACE.....	24

5.1.	INFORMATIONS GÉOLOGIQUES ET GÉOMORPHOLOGIQUES	24
5.1.1.	<i>Relief périglaciaire</i>	24
5.1.1.1.	Description des cuvettes de lithalses	24
5.1.1.2.	Repérage de formes périglaciaires dans les zones tourbeuses	24
5.1.1.3.	Carte de répartition des traces de lithalses	25
5.1.2.	<i>Hypothèses sur la lithologie sous-jacente</i>	25
5.1.3.	<i>Néotectonique</i>	26
5.2.	CONDITIONS INITIALES DE LA FORMATION DE LA TOURBE.....	26
5.2.1.	<i>Tourbières de pentes et de sources</i>	26
5.2.2.	<i>Tourbières de cols</i>	27
5.2.3.	<i>Tourbières sur replats</i>	28
5.2.4.	<i>Tourbières développées à partir de cuvettes de lithalses</i>	28
5.2.5.	<i>Conclusions</i>	29
6.	STRATIGRAPHIE DES DÉPÔTS TOURBEUX: HISTOIRE DU DÉVELOPPEMENT DES TOURBIÈRES.....	30
6.1.	DÉMARRAGE DES DÉPÔTS TOURBEUX	30
6.1.1.	<i>Dans les cuvettes de lithalses</i>	30
6.1.2.	<i>Hors des cuvettes de lithalses</i>	31
6.1.2.1.	Comparaisons intérieur/extérieur des cuvettes	31
6.1.2.2.	Massif A de la fagne des Deux-Séries.....	31
6.1.2.3.	Sources de la Soor (fagne des Deux-Séries)	32
6.1.2.4.	Butte à Phragmites australis (fagne des Deux-Séries).....	32
6.1.2.5.	Fagne Wallonne en périphérie du massif tourbeux principal.....	32
6.2.	RÉFLECTEURS INDICATEURS STRATIGRAPHIQUES	33
6.2.1.	<i>Réflecteurs systématiques dans les traces de lithalses</i>	33
6.2.2.	<i>Réflecteurs indiquant des phases de développement</i>	34
6.2.3.	<i>Réflecteurs locaux particuliers</i>	36
6.2.3.1.	Niveau de cendres aux sources de la Soor	36
6.2.3.2.	Dépôt de crue de la Helle aux Trois-Bornes	36
6.2.3.3.	Réflecteur indéterminé au Misten.....	37
6.2.3.4.	Via mansuerisca dans la fagne des Wéz.....	37
7.	PHÉNOMÈNES OBSERVÉS EN SURFACE: LIENS AVEC LA SUBSURFACE.....	38
7.1.	VÉGÉTATION SUB-INTACTE ET MORPHOLOGIE DES DÉPÔTS	38
7.2.	ZONES À VÉGÉTATION MÉSOTROPHE	38
7.2.1.	<i>Relief de subsurface</i>	38
7.2.2.	<i>Analyses d'eau</i>	39
7.2.2.1.	Conductivité électrique et pH	39
7.2.2.2.	Teneur en tritium.....	40
8.	CONCLUSIONS	41
	BIBLIOGRAPHIE.....	43
	REMERCIEMENTS	48
	TABLE DES MATIÈRES.....	49
	LISTE DES FIGURES	51
	ANNEXES.....	52

Liste des figures

(volume annexe)

- Fig. 1. Carte de situation générale des tourbières des Hautes-Fagnes
- Fig. 2. Carte des sols tourbeux et paratourbeux
- Fig. 3. Profils radar réalisés
- Fig. 4a. Interprétation des réflecteurs sur les images radar
- Fig. 4b. Interprétation des réflecteurs sur les images radar
- Fig. 5. Matériel radar
- Fig. 6. Etapes du traitement des images radar
- Fig. 7. Carte des épaisseurs de tourbe dans toutes les tourbières prospectées
- Fig. 8. Comparaison des données du radar avec celles de la carte pédologique concernant l'épaisseur de tourbe

- Fig. 9a. Carte des épaisseurs de tourbe en fagne des Deux-Séries (partie W)
- Fig. 9b. Carte des épaisseurs de tourbe en fagne des Deux-Séries (partie E)
- Fig. 10. Carte des épaisseurs de tourbe en fagne Wallonne
- Fig. 11. Carte des épaisseurs de tourbe à Cléfaye
- Fig. 12. Carte des épaisseurs de tourbe du Misten
- Fig. 13. Carte des épaisseurs de tourbe dans les fagnes des Potaies et des Wéz
- Fig. 14. Carte des épaisseurs de tourbe dans les fagnes des Troux-Brôlis, Herbofaye, Poleûr
- Fig. 15. Exemple d'application du radar à la gestion
- Fig. 16. Profil radar coupant une trace de lithalse
- Fig. 17. Exemples de profils radar dans des traces de lithalses
- Fig. 18. Structure allongée repérée sous la tourbe
- Fig. 19. Carte de répartition des traces de lithalses enfouies sous la tourbe
- Fig. 20. Contraste entre des zones à subsurface accidentée et à subsurface plane
- Fig. 21a. Topographie de la subsurface (partie E: Misten)
- Fig. 21b. Carte topographique de la subsurface (partie ouest)
- Fig. 22. Localisation des coupes des fig. 23
- Fig. 23a. Coupes topographiques de la surface et de la subsurface au Misten
- Fig. 23b. Coupes topographiques de la surface et de la subsurface au Misten
- Fig. 23c. Coupes topographiques de la surface et de la subsurface à Cléfaye
- Fig. 23d. Coupes topographiques de la surface et de la subsurface à Cléfaye
- Fig. 23e. Coupes topographiques de la surface et de la subsurface en fagne Wallonne
- Fig. 23f. Coupes topographiques de la surface et de la subsurface dans la vallée de la Helle (fagne Wallonne et Deux-Séries)
- Fig. 23g. Coupes topographiques de la surface et de la subsurface dans la Grande-Fange
- Fig. 23h. Coupes topographiques de la surface et de la subsurface en fagne des Deux-Séries (massif A, fig. 9a)
- Fig. 23i. Coupes topographiques de la surface et de la subsurface en fagne des Deux-Séries (massif B, fig. 9a)
- Fig. 23j. Coupes topographiques de la surface et de la subsurface en fagne des Deux-Séries (massif C, fig. 9b)
- Fig. 23k. Coupes topographiques de la surface et de la subsurface à travers la fagne Wallonne et la fagne de Cléfaye à travers la fagne des Potaies et la fagne des Deux-Séries (massif A)

- Fig. 24. Profil radar dans la partie nord (B) du Misten
- Fig. 25. Dépôt tourbeux d'extension limitée autour de cuvettes de lithalses
- Fig. 26. Tourbière bombée développée sur cuvettes de lithalses
- Fig. 27. Localisation des points de sondage
- Fig. 28. Sondage n°1: image de la subsurface
- Fig. 29. Diagramme palynologique de la base du sondage n°1
- Fig. 30. Teneurs en eau et en cendres dans la tourbe du sondage n°1
- Fig. 31. Degré d'humification de la tourbe du sondage n°1
- Fig. 32. Sondage n°2: image de la subsurface
- Fig. 33. Diagramme palynologique de la base du sondage n°2
- Fig. 34. Teneurs en eau et en cendres dans le matériau limoneux à la base du sondage n°2
- Fig. 35. Sondages n°3 et n°9: image de la subsurface
- Fig. 36. Teneurs en eau et en cendres dans la tourbe du sondage n°3
- Fig. 37. Diagramme palynologique de la base du sondage n°3
- Fig. 38. Diagramme palynologique de la base du sondage n°9

- Fig. 39. Diagramme palynologique de la base du sondage n°5
- Fig. 40. Diagramme palynologique de la base du sondage n°6
- Fig. 41. Sondage n°6: image de la subsurface
- Fig. 42. Sondage n°7: image de la subsurface
- Fig. 43. Diagramme palynologique du sondage n°7
- Fig. 44. Sondage n°8: image de la subsurface
- Fig. 45. Diagramme palynologique de la base du sondage n°8
- Fig. 46. Sondage n°10: image de la subsurface
- Fig. 47. Diagramme palynologique du sondage n°10
- Fig. 48. Teneurs en eau et en cendres dans la tourbe du sondage n°10
- Fig. 49. Degré d'humification de la tourbe du sondage n°10
- Fig. 50. Sondage n°18: image de la subsurface
- Fig. 51. Sondage n°13: image de la subsurface
- Fig. 52. Sondage n°11: image de la subsurface
- Fig. 53. Extension du dépôt de crue de la Helle
- Fig. 54. Teneurs en eau et en cendres dans le dépôt du sondage n°11
- Fig. 55. Réflecteur au Misten
- Fig. 56. Relation entre la végétation de surface et la morphologie des dépôts tourbeux
- Fig. 57. Carte des zones à végétation mésotrophe prospectées - relation avec le relief de subsurface
- Fig. 58. Buttes à *Phragmites* de la Poleûr: image de la subsurface
- Fig. 59. Inclinaison du réflecteur dans une butte à *Phragmites* des Deux-Séries
- Fig. 60. Points de prélèvement d'eau et résultat d'une campagne de mesures
- Fig. 61a. Localisation des profils radar en fagne des Deux-Séries (partie W)
- Fig. 61b. Localisation des profils radar en fagne des Deux-Séries (partie E)
- Fig. 62. Localisation des profils radar en fagne Wallonne
- Fig. 63. Localisation des profils radar en fagne de Cléfaye
- Fig. 64. Localisation des profils radar en fagne du Misten
- Fig. 65. Localisation des profils radar dans les fagnes des Potaies et des Wéz
- Fig. 66. Localisation des profils radar dans les fagnes des Trous-Brôlis, Herbofaye, Poleûr

Annexes

Remarque: les annexes suivantes, qui font partie intégrante de ce rapport, ont été produites en deux exemplaires, l'un déposé à la D.G.R.N.E. et l'autre, à la Station scientifique des Hautes-Fagnes.

- images radar (impressions grand format de tous les profils systématiques): 10 feuilles
- CD-Rom:
 - données radar et GPS: 3 CD-Rom
 - rapport final: texte et figures: 1 CD-Rom

Fig. 1. Carte de situation générale des tourbières des Hautes-Fagnes

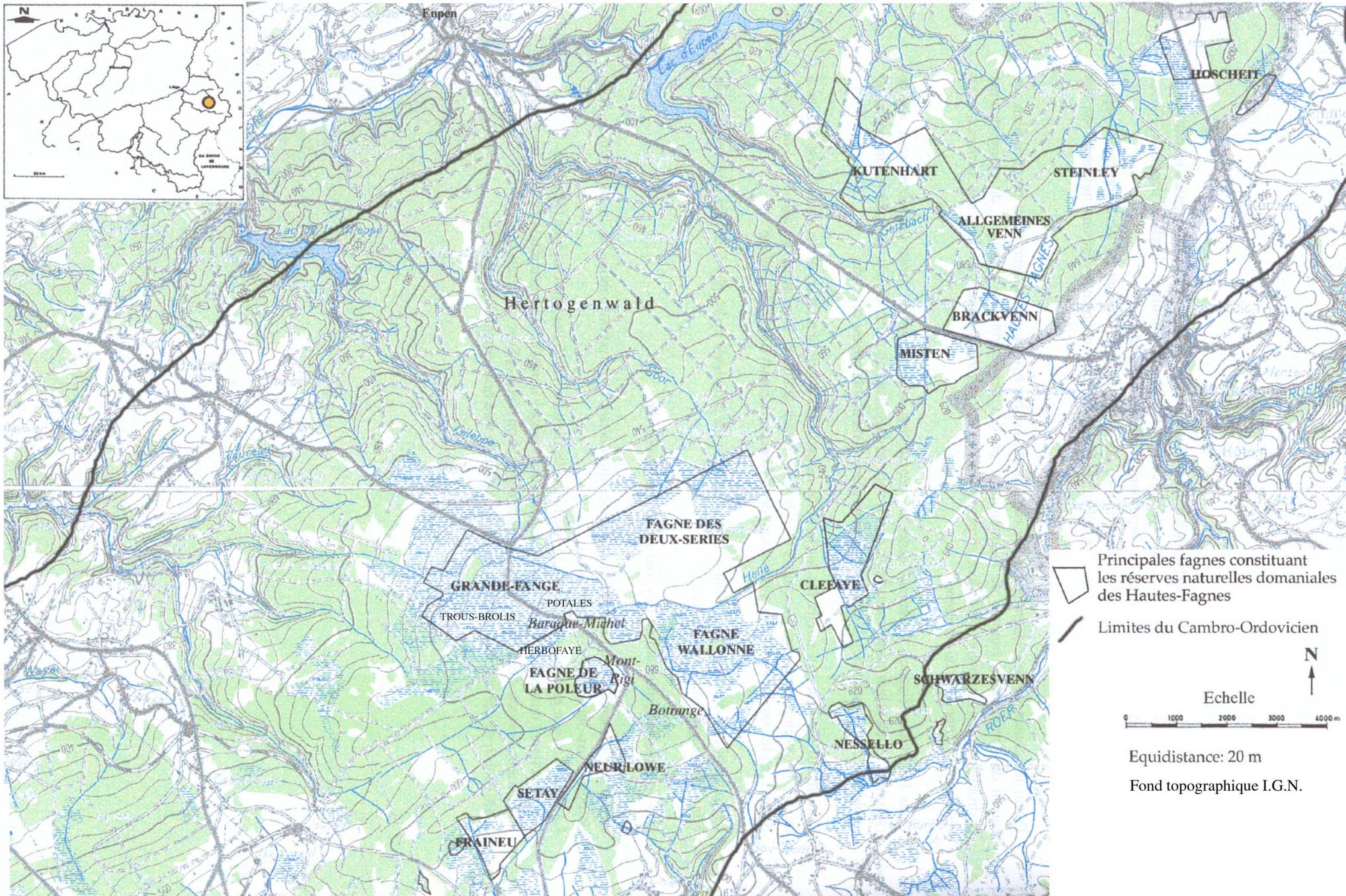
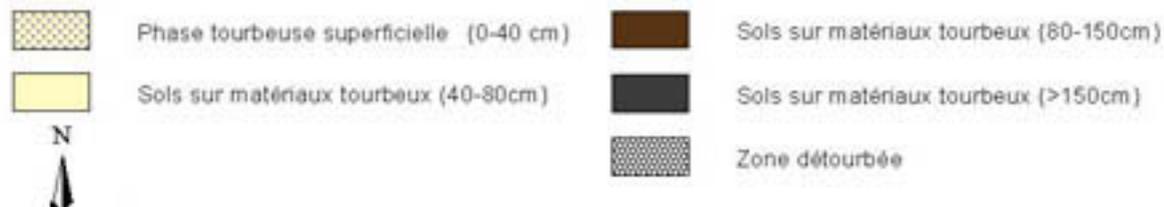


Fig. 2. Carte des sols tourbeux et paratourbeux



Carte digitalisée par O. Schott
d'après la carte des sols de Belgique

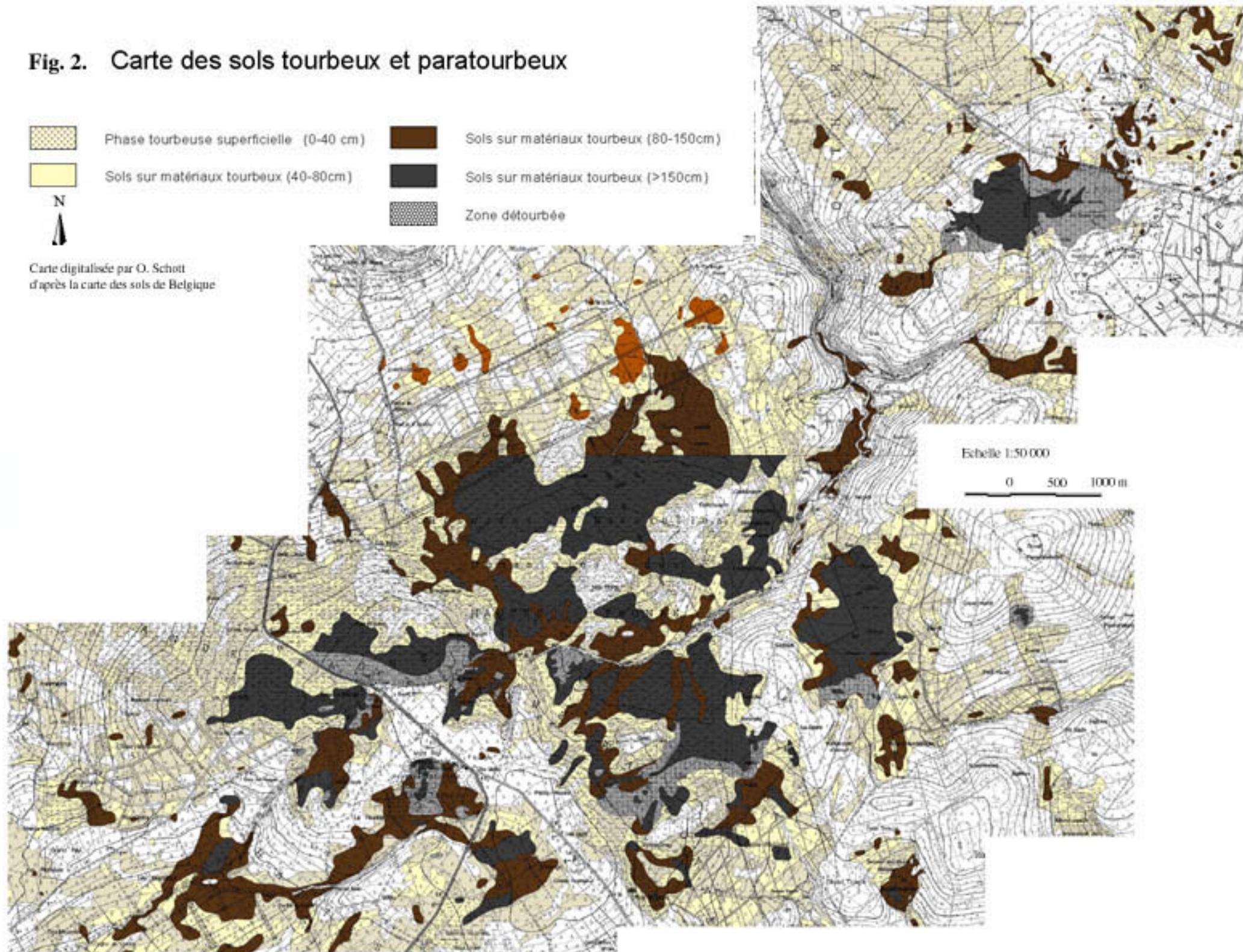


Fig. 3. Profils radar réalisés (—)

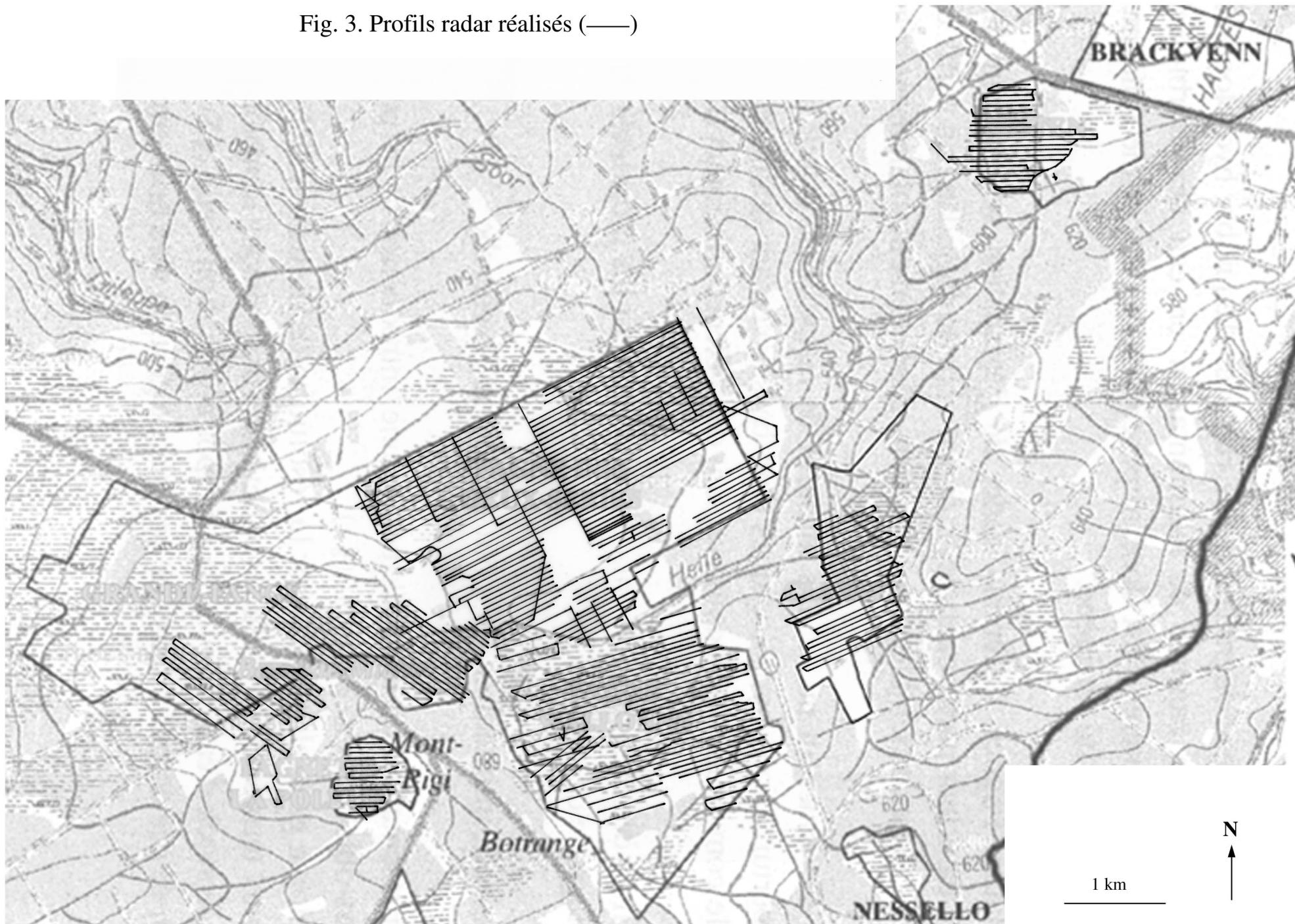


Fig. 3.

Fig. 4a. Interprétation des réflecteurs sur les images radar

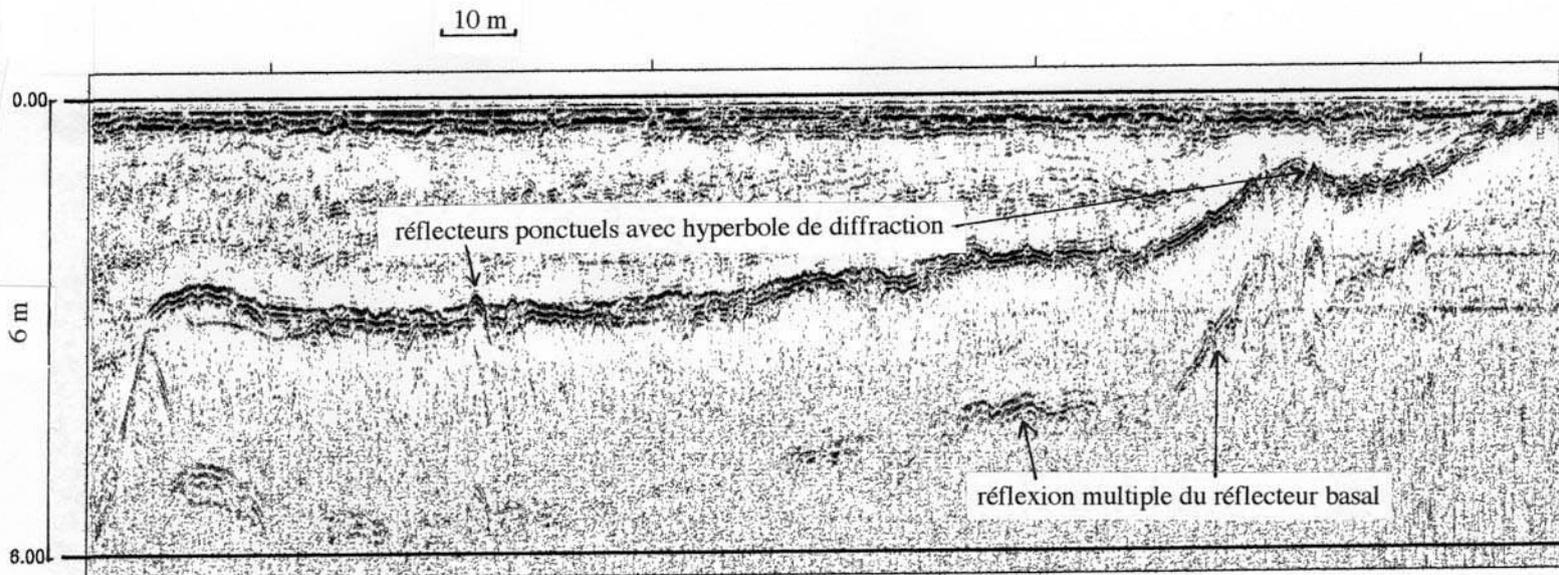
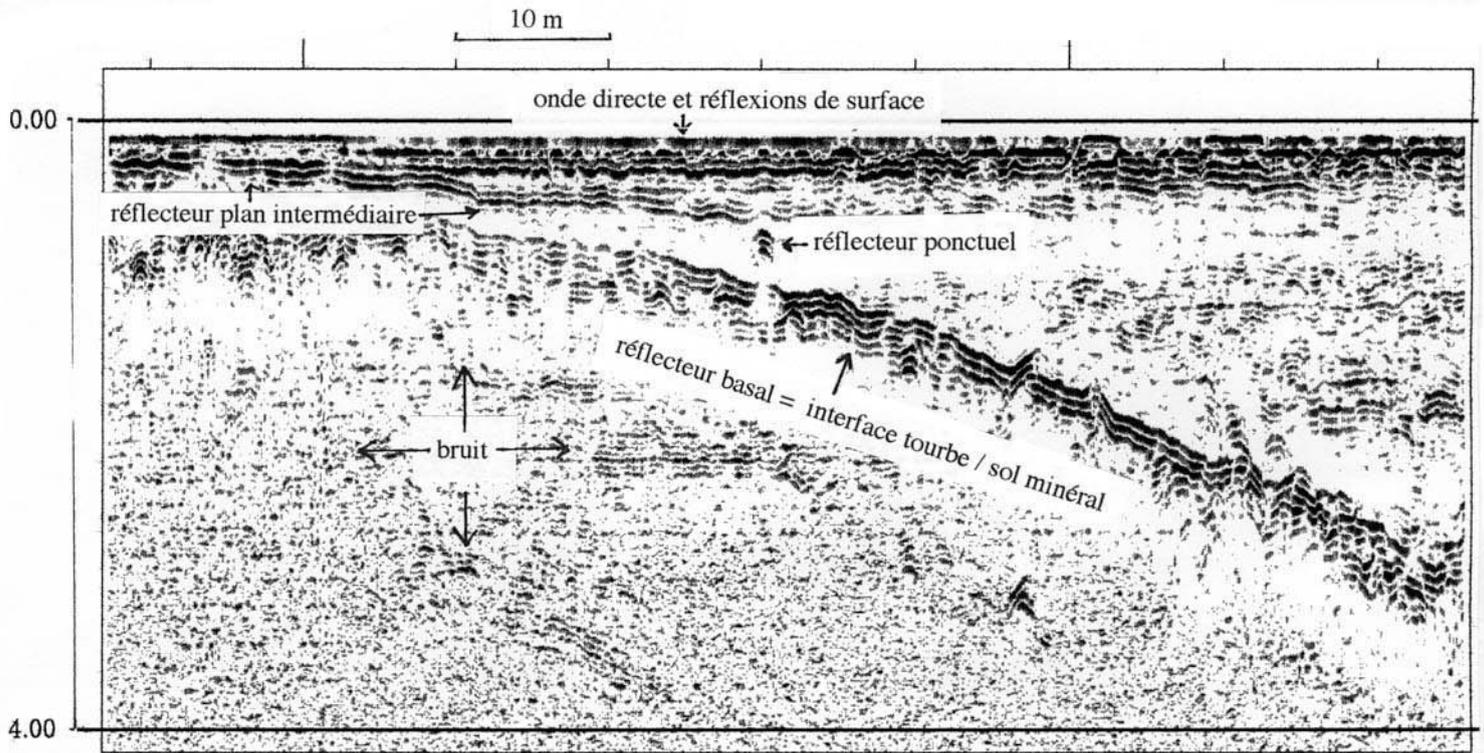


Fig. 4b. Interprétation des réflecteurs sur les images radar

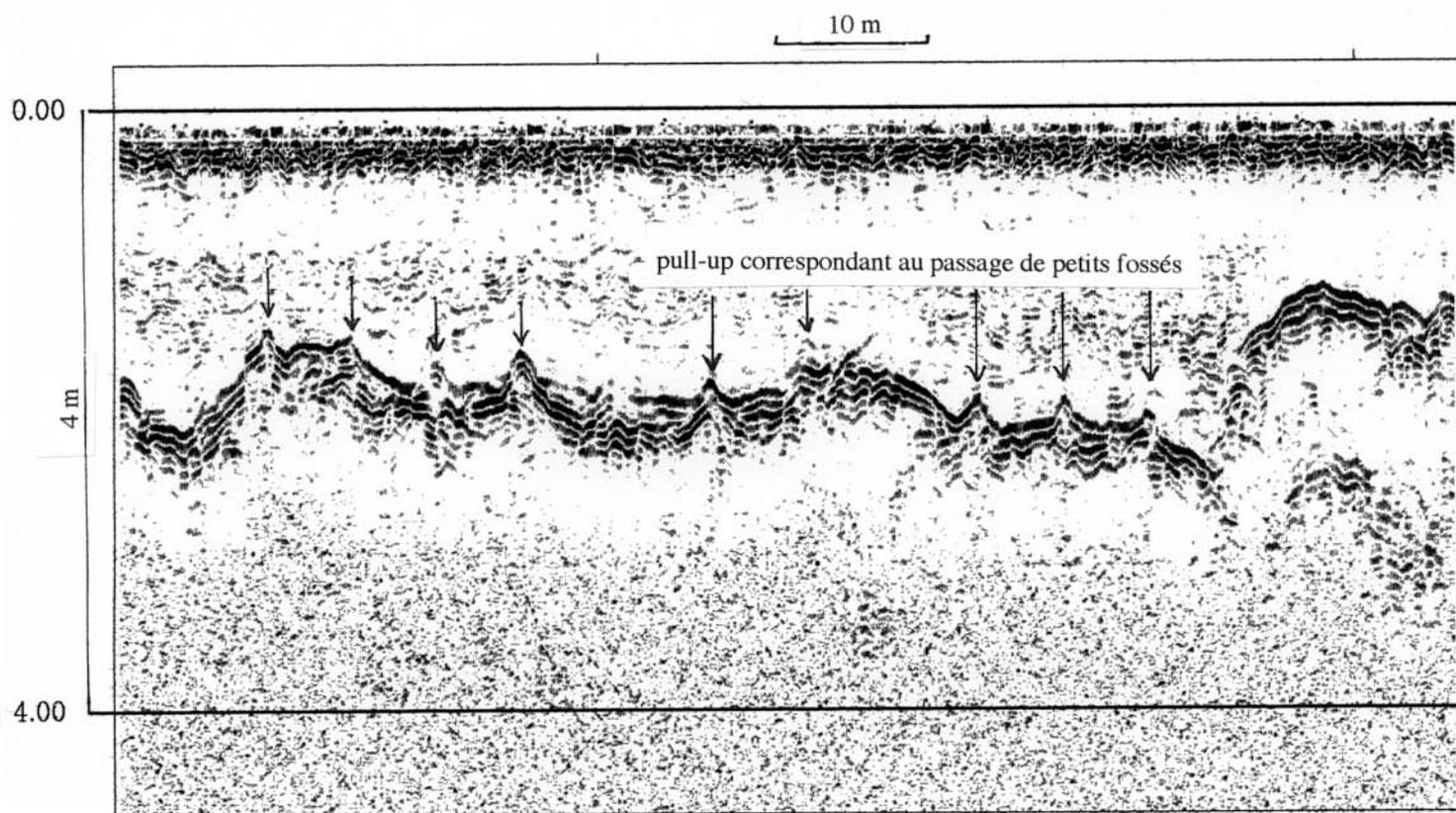
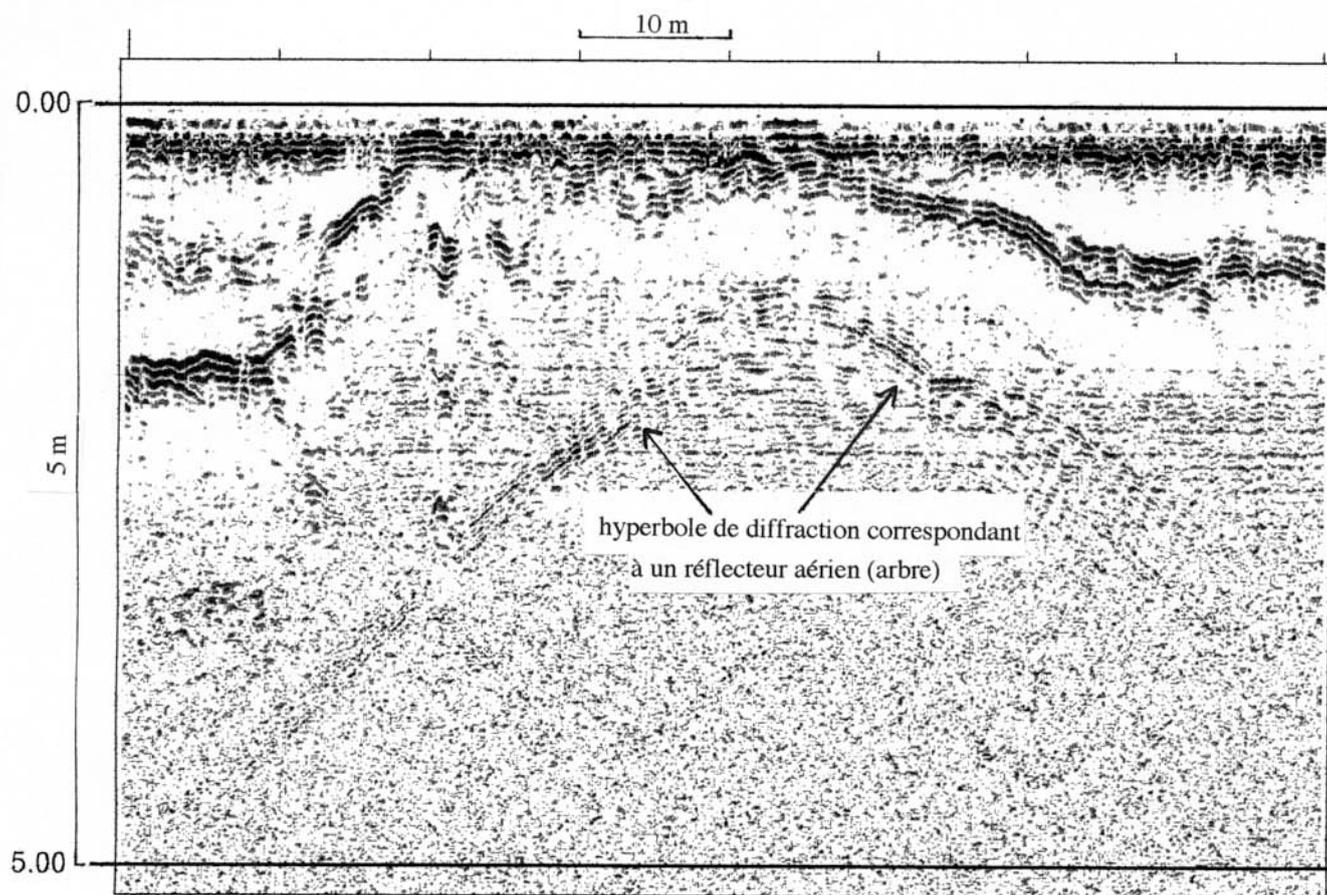


Fig. 5. Matériel radar

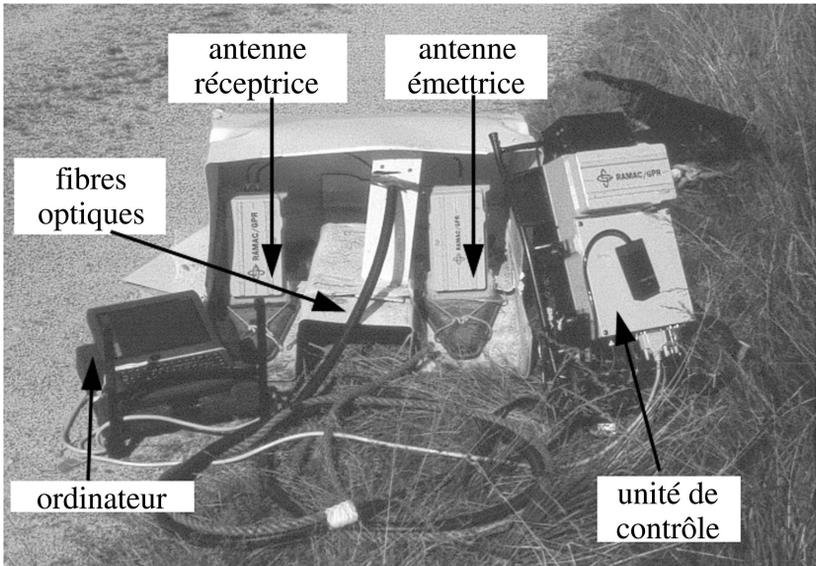
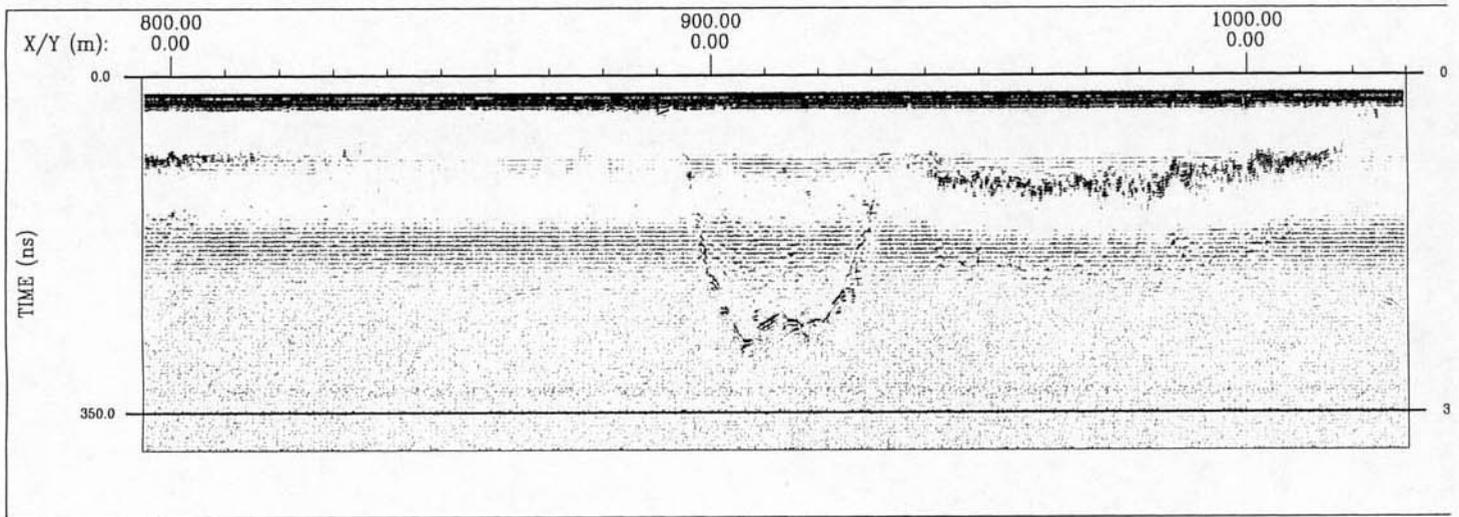


Fig. 5a. Différentes parties de l'équipement

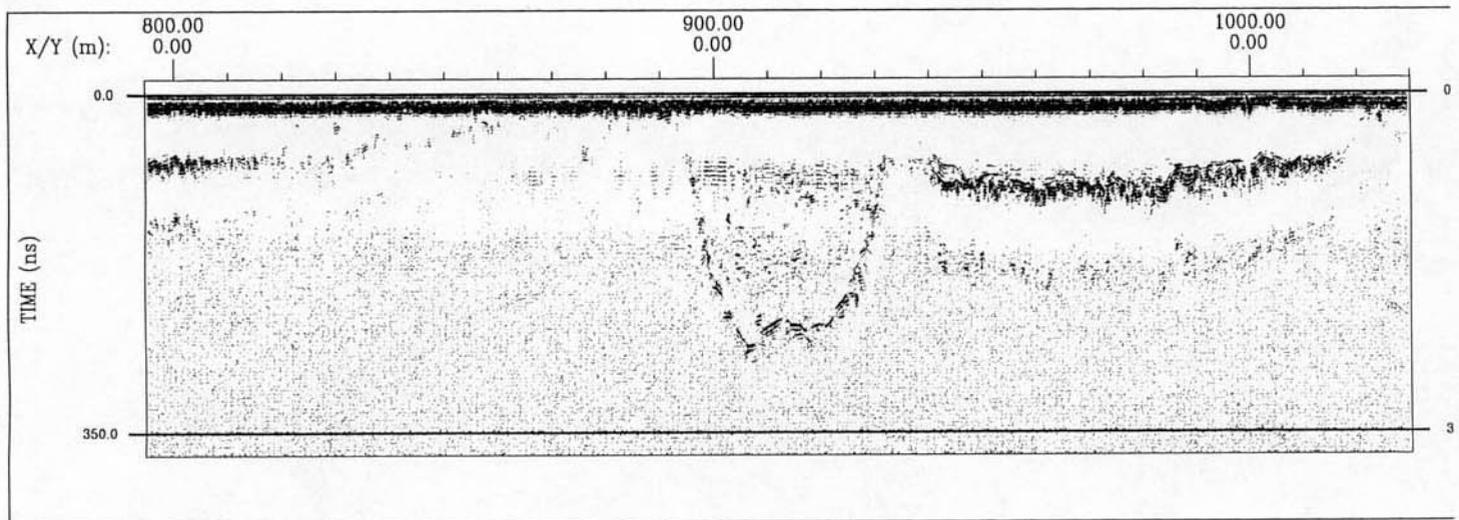


Fig. 5b. Mise en oeuvre sur le terrain

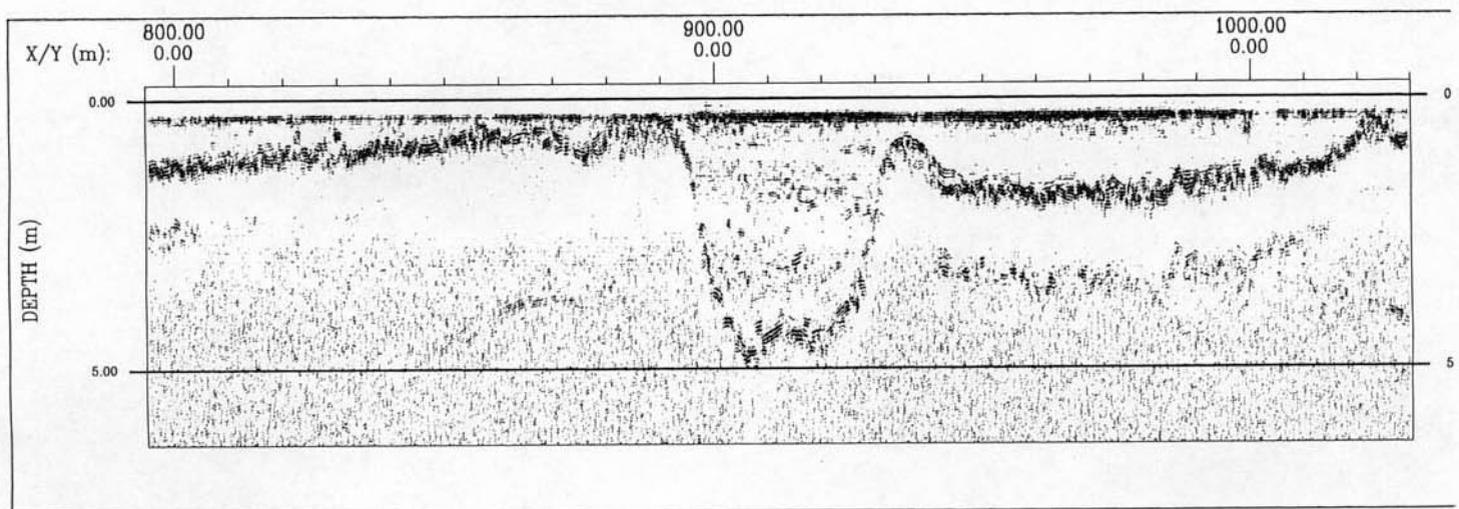
Fig. 6. Etapes du traitement des images radar



a. Image brute



b. Image après - ajustement du zéro de l'échelle de temps
- soustraction des résonances (bandes horizontales)



c. Image finale, après - filtrage
- atténuation de l'onde directe (bandes noires supérieures)
- renforcement du contraste
- conversion de l'échelle de temps en profondeurs

Fig. 7. Carte des épaisseurs de tourbe dans toutes les tourbières prospectées

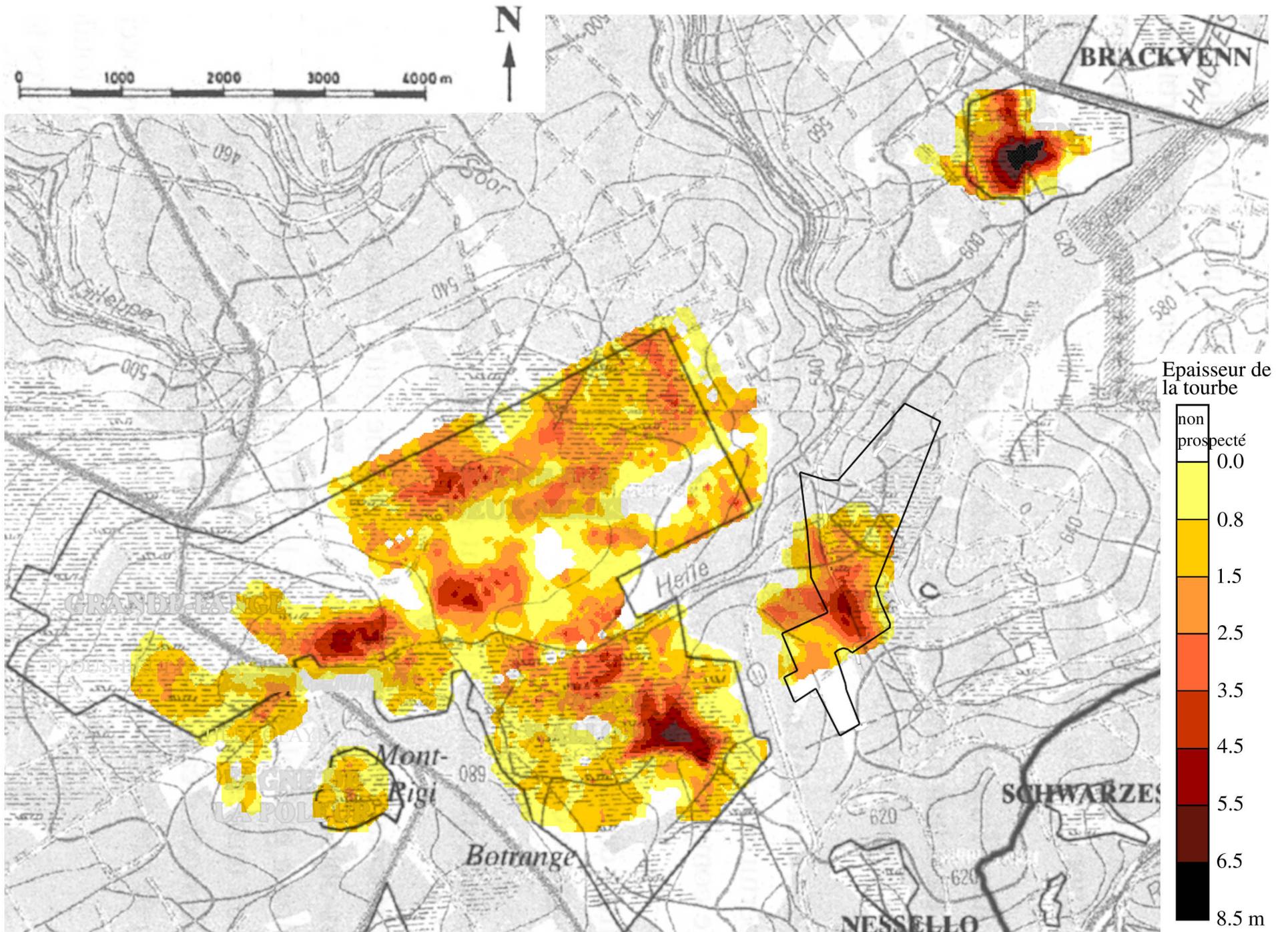


Fig. 8. Comparaison des données du radar avec celles de la carte pédologique concernant l'épaisseur de tourbe

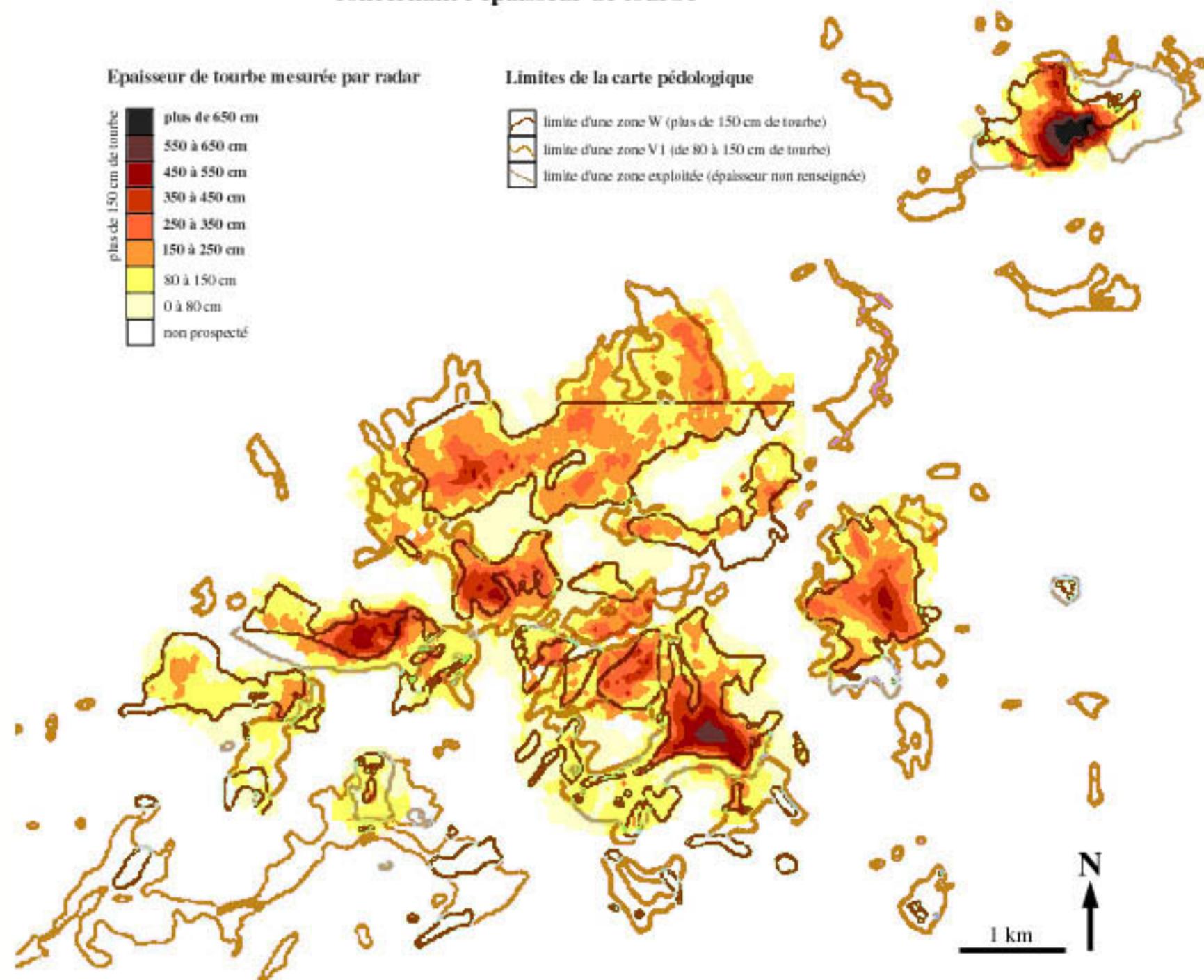


Fig. 9a. Carte des épaisseurs de tourbe en fagne des Deux-Séries (partie W)

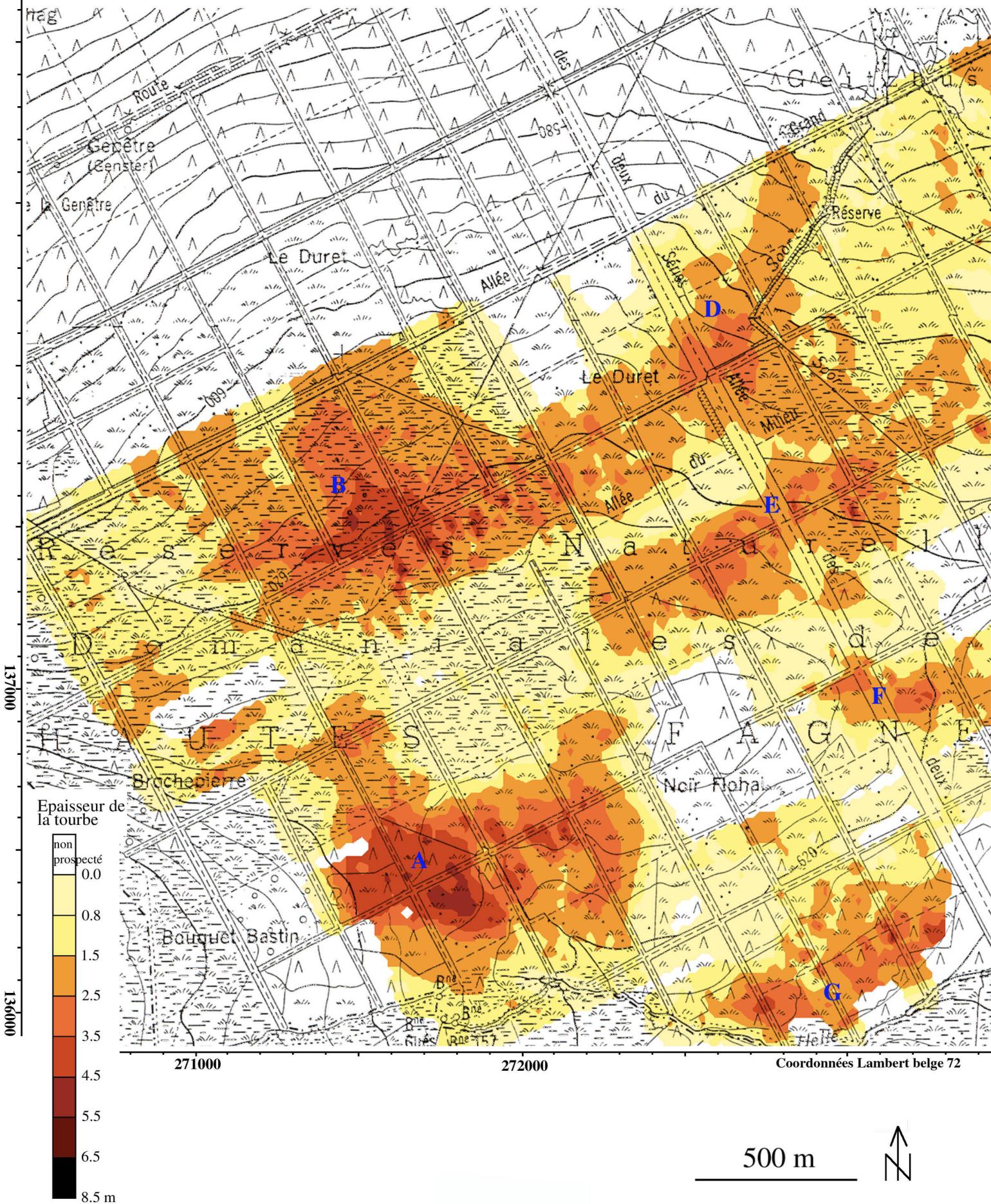


Fig. 9b. Carte des épaisseurs de tourbe en fagne des Deux-Séries (partie E)

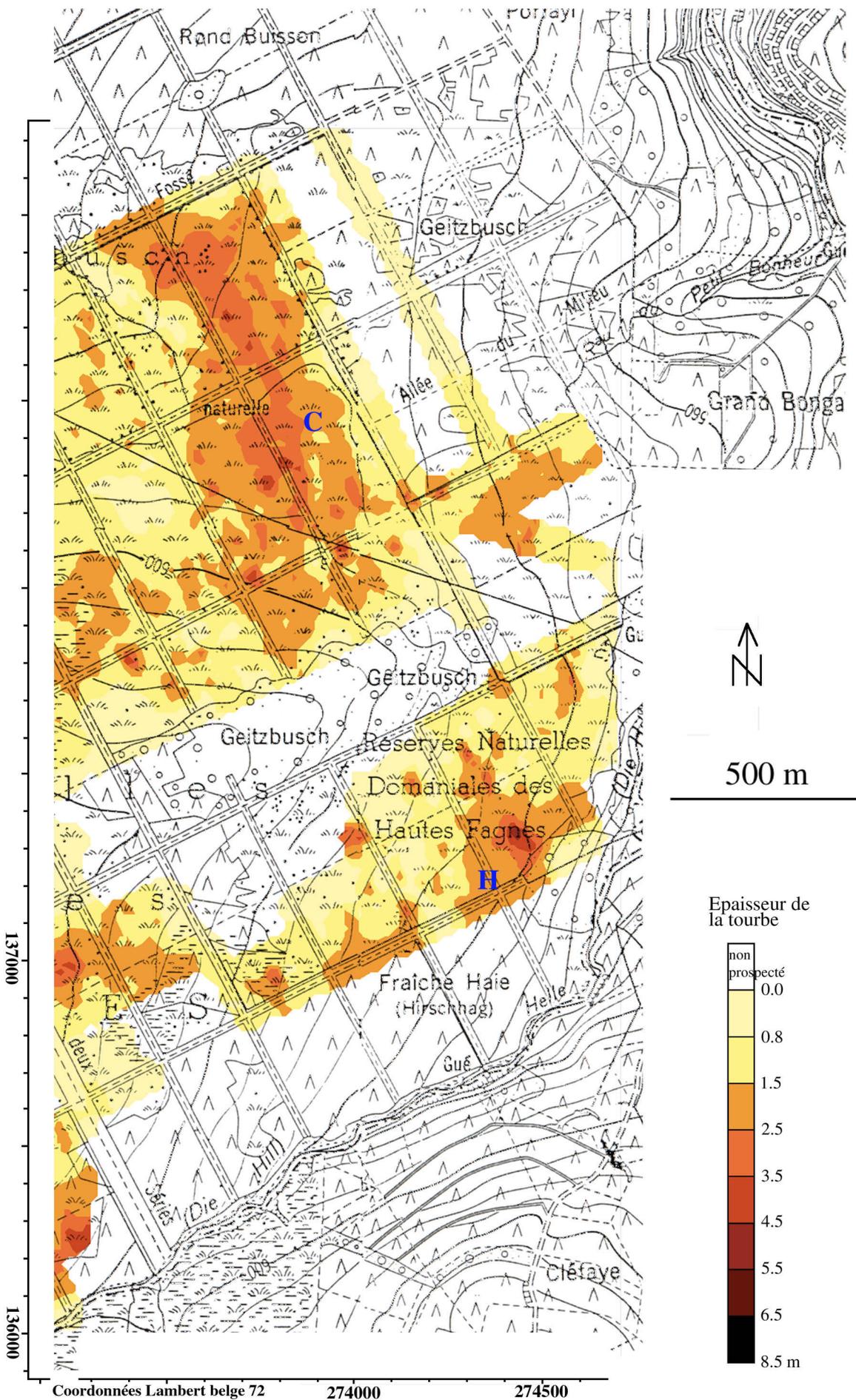


Fig. 10. Carte des épaisseurs de tourbe en fagne Wallonne

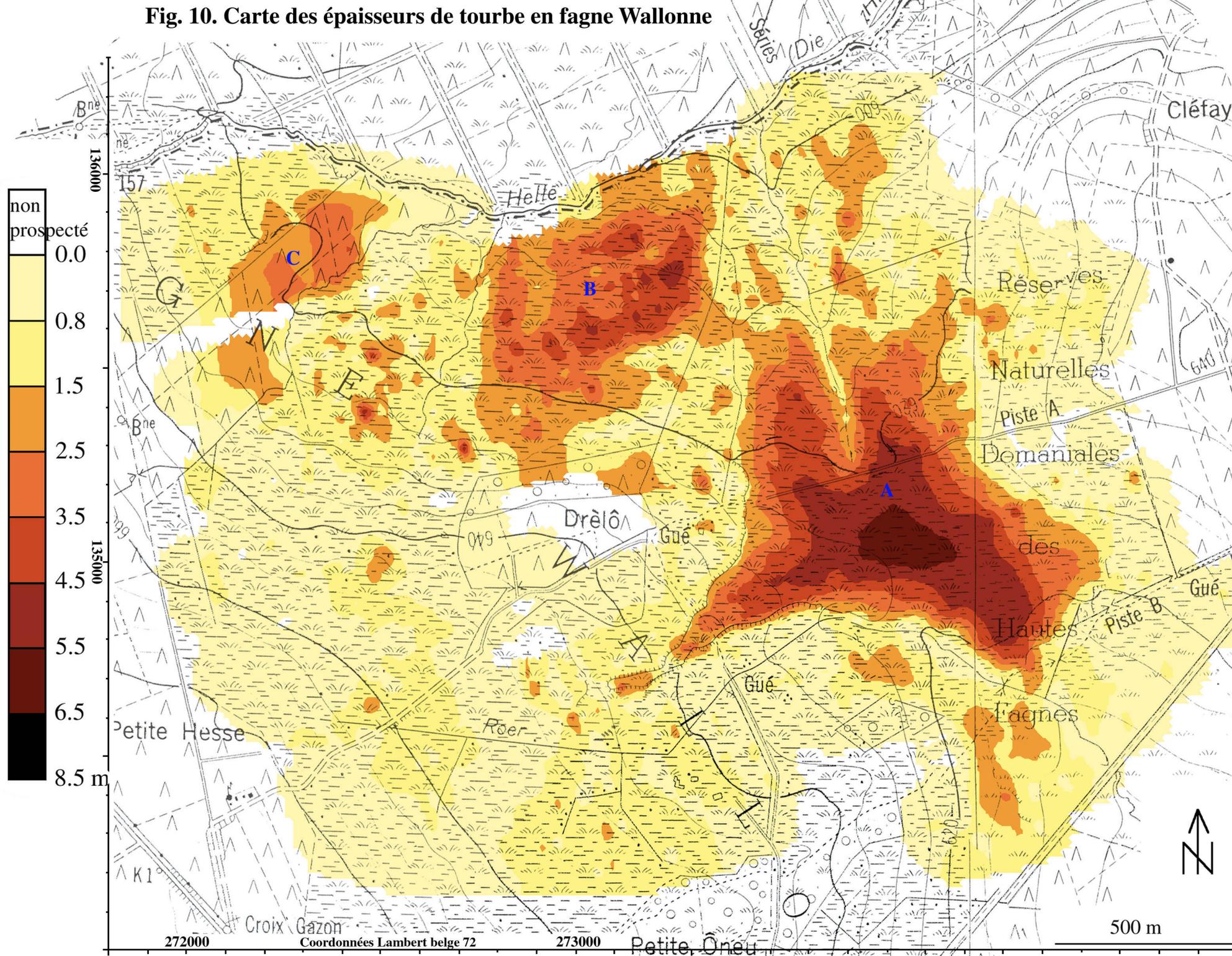


Fig. 11. Carte des épaisseurs de tourbe à Cléfaye

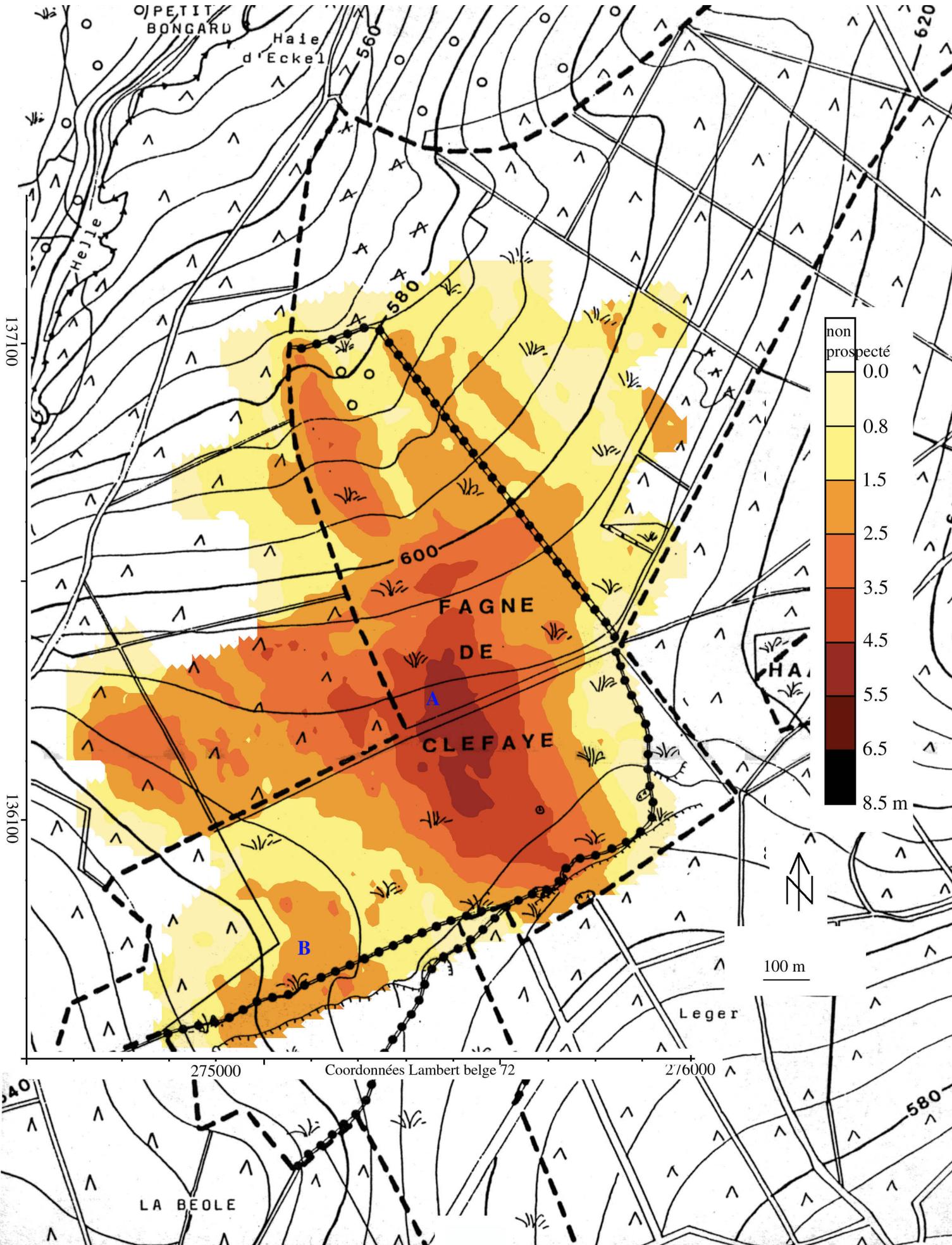


Fig. 12. Carte des épaisseurs de tourbe du Misten

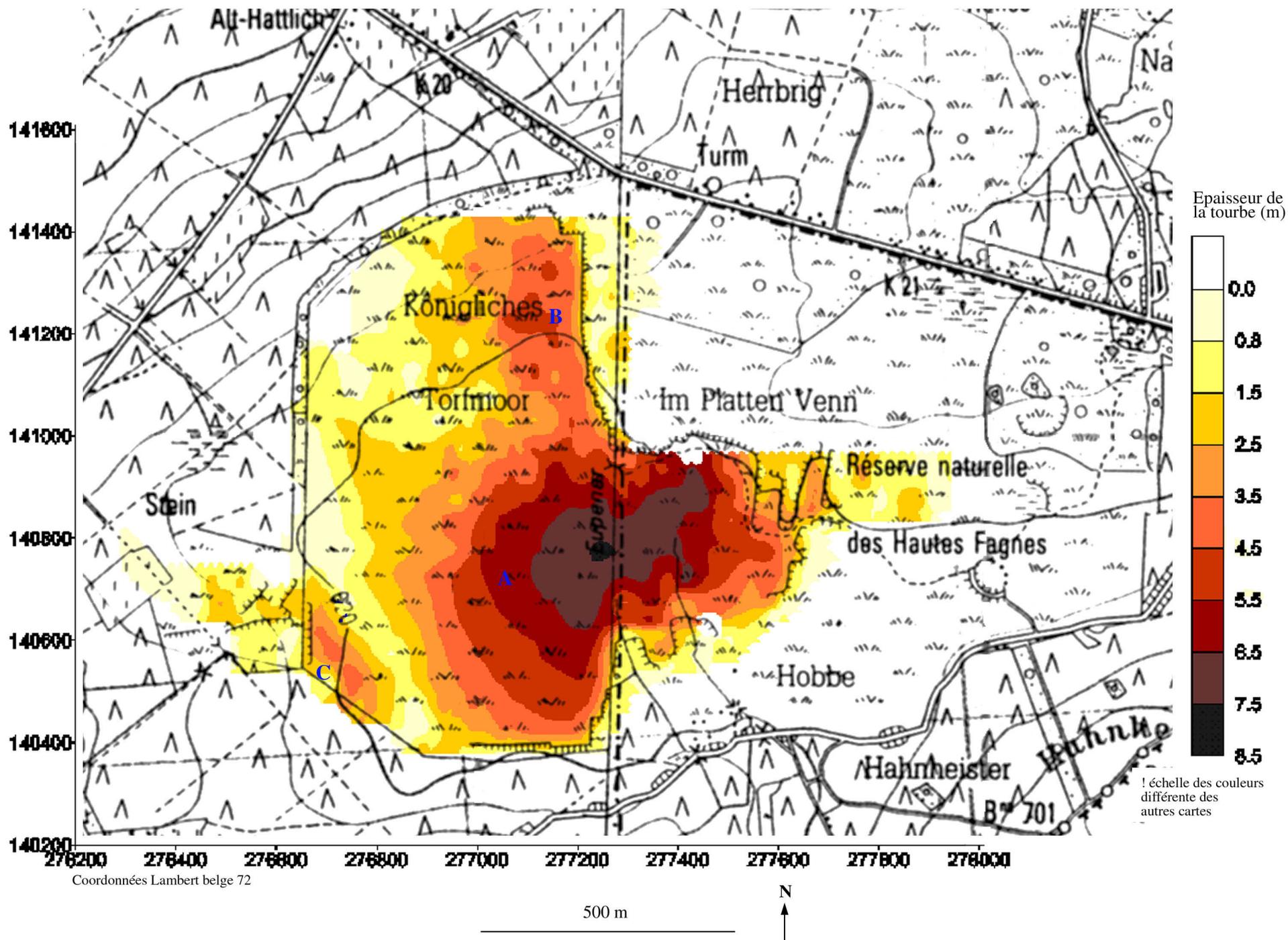


Fig. 13. Carte des épaisseurs de tourbe dans les fagnes des Potales et des Wéz

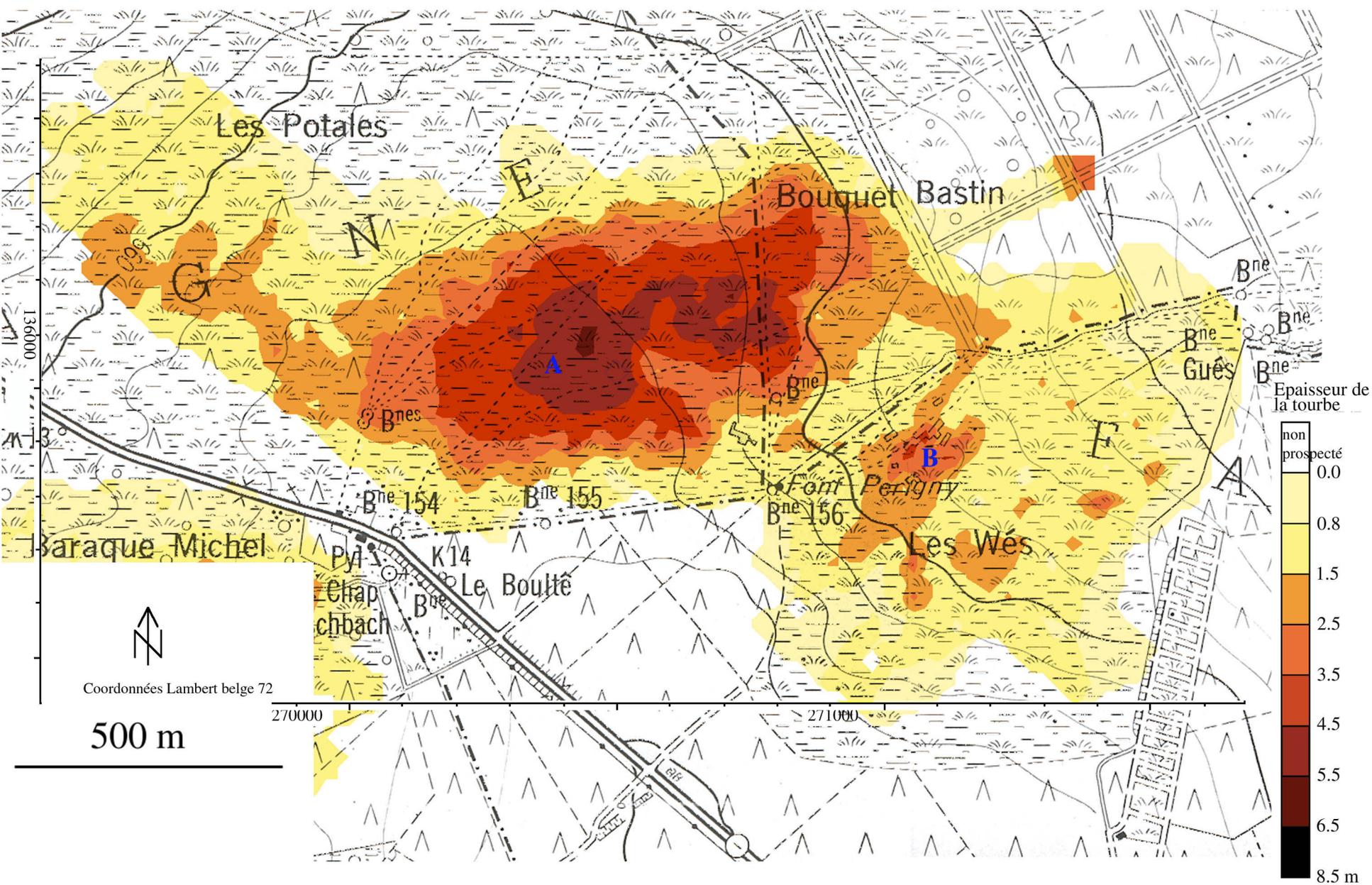


Fig. 14. Carte des épaisseurs de tourbe dans les fagnes des Trous-Brôlis, Herbofaye, Poleûr

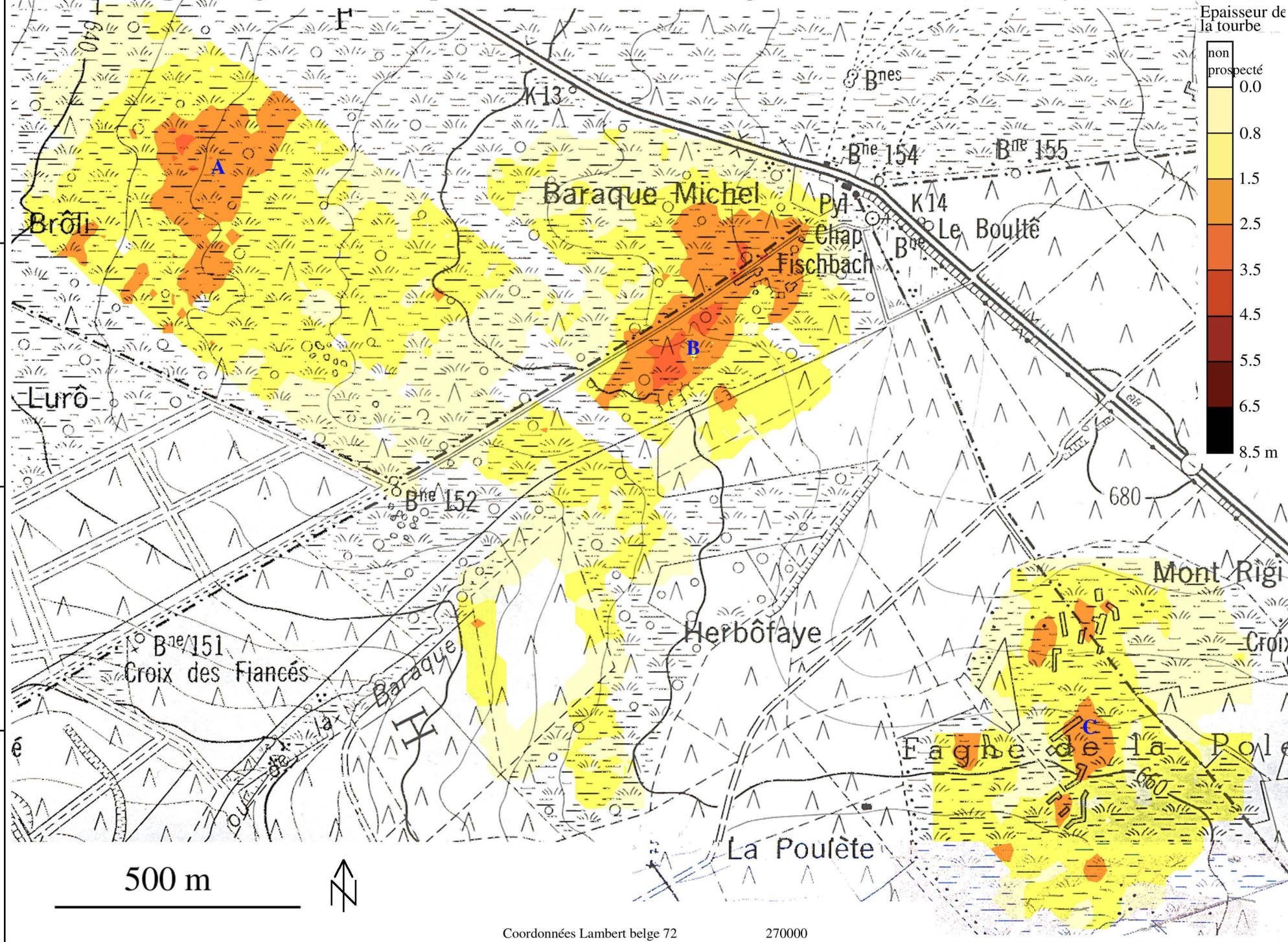


Fig. 15. Exemple d'application du radar à la gestion

Fagne du Misten: épaisseur de la tourbe dans d'anciennes fosses d'exploitation

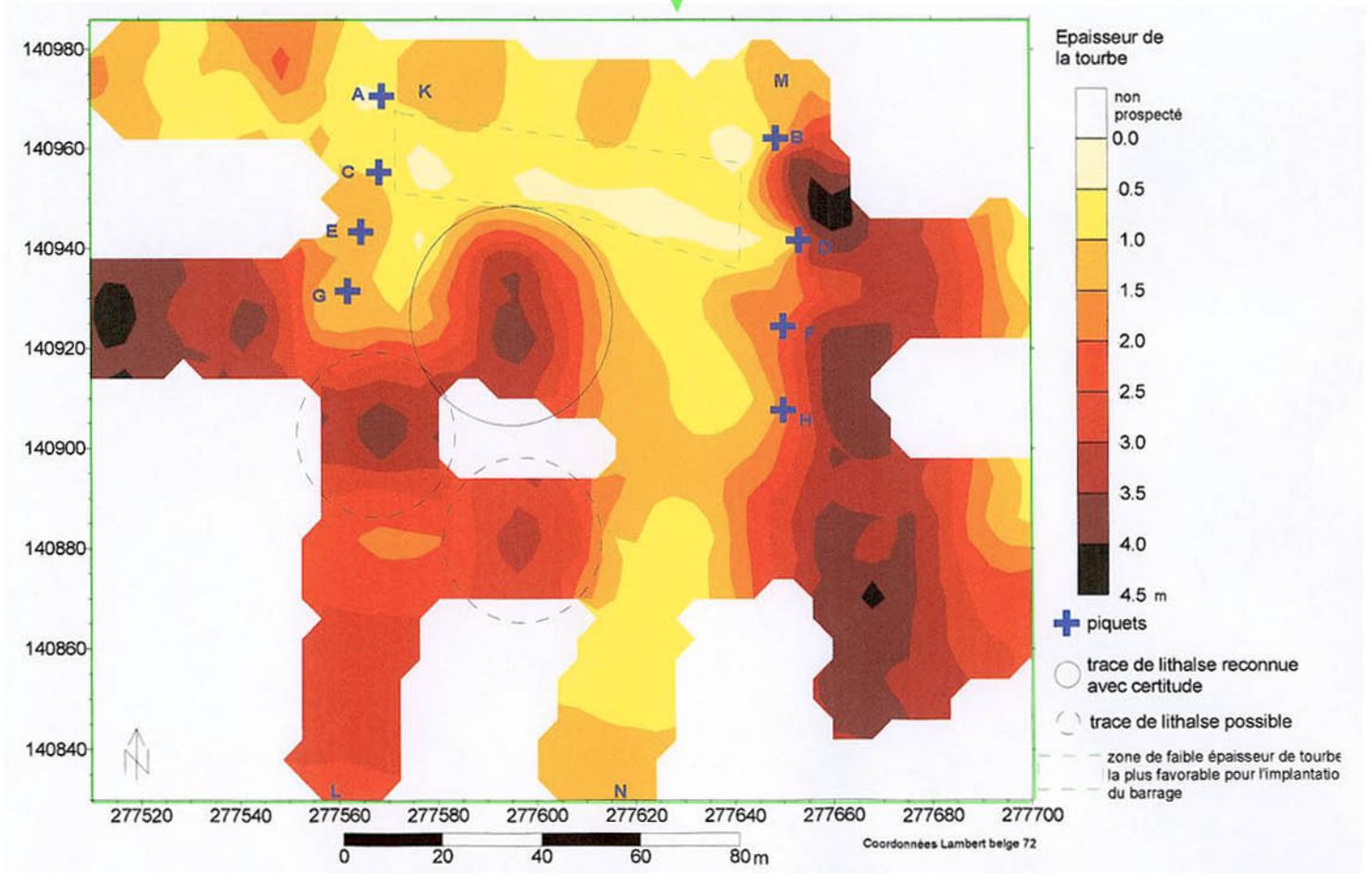
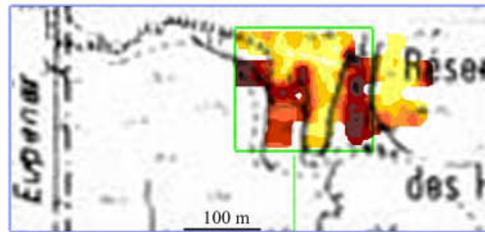
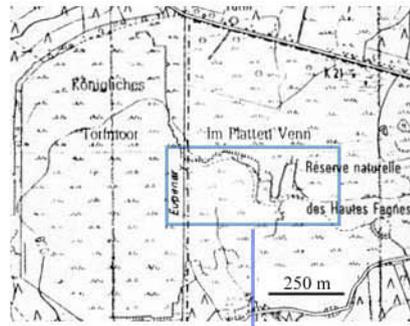


Fig. 16. Profil radar coupant une trace de lithalse

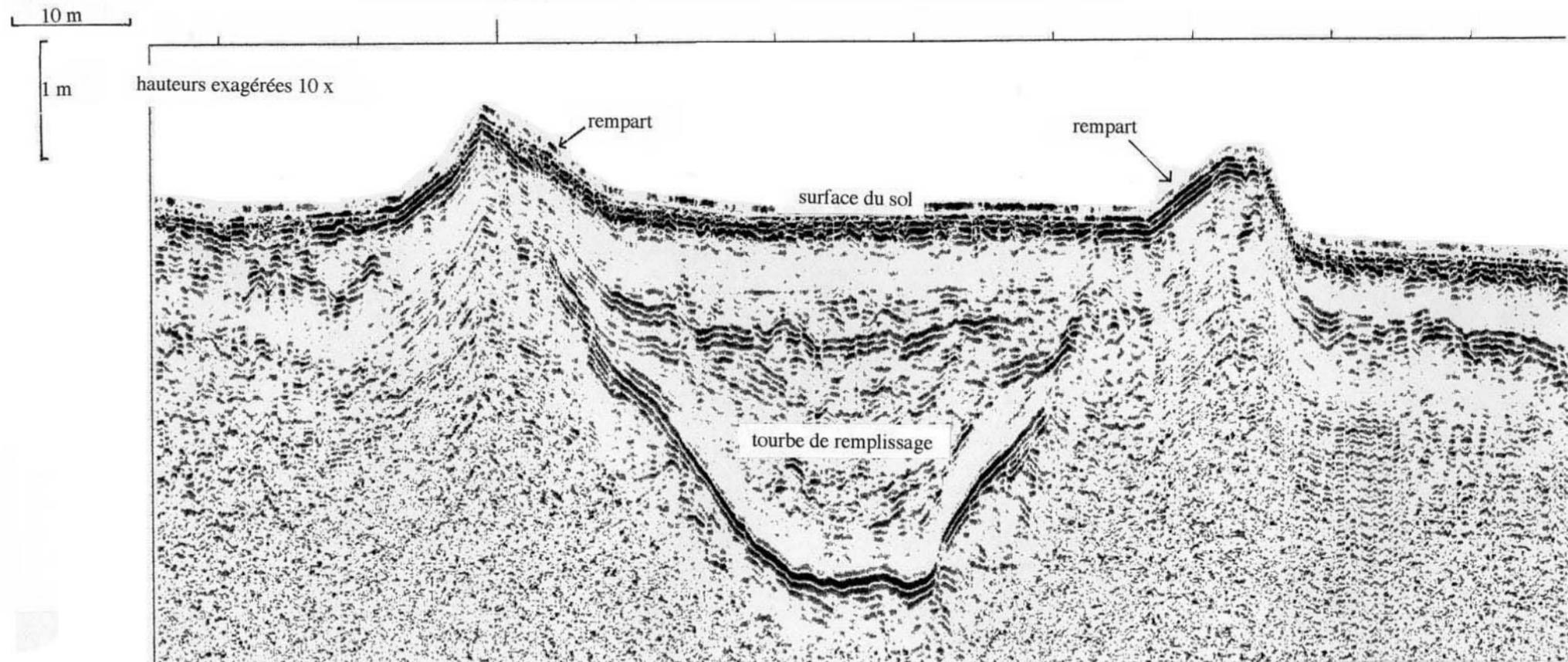


Fig. 17. Exemples de profils radar dans des traces de lithales

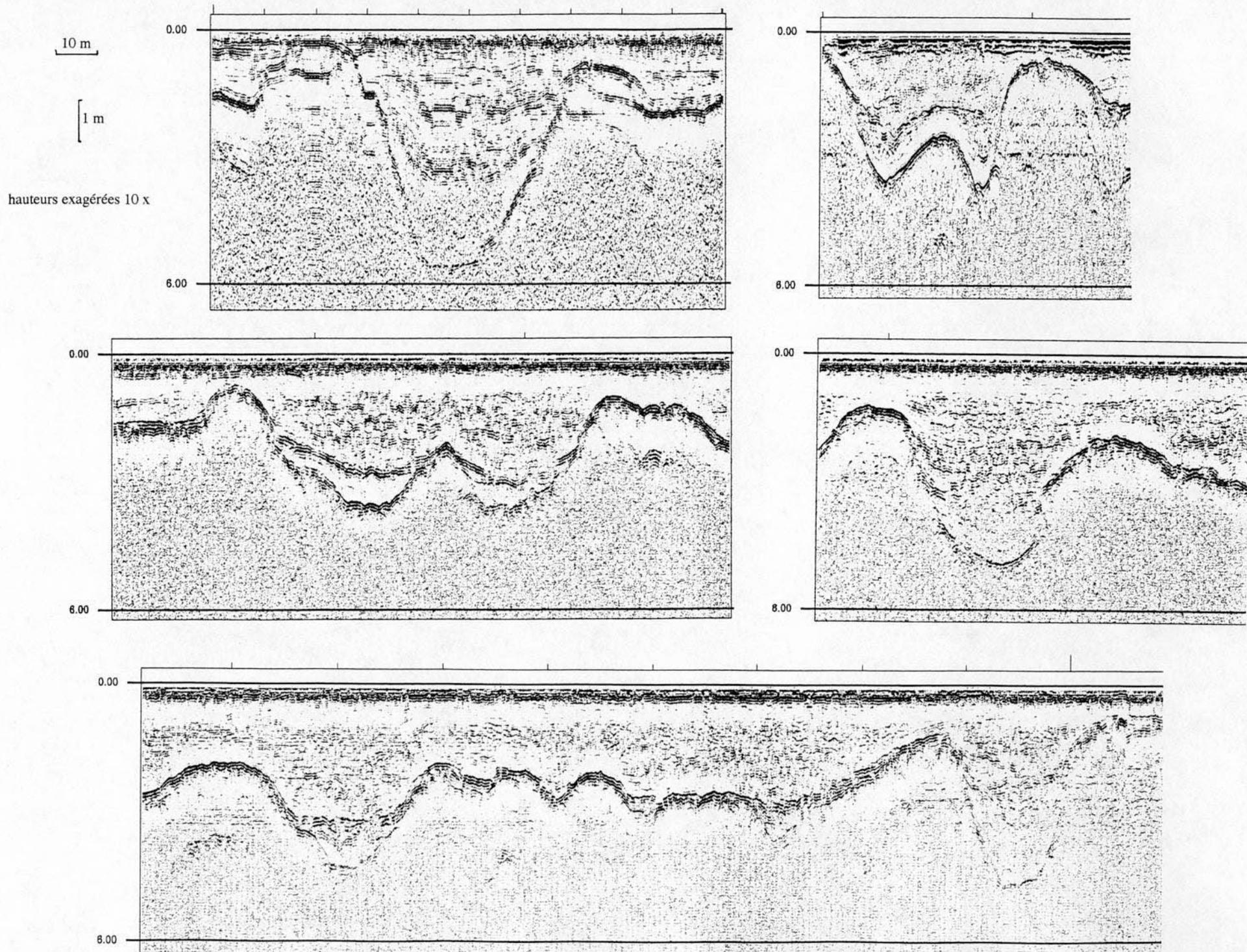


Fig. 18. Structure allongée repérée sous la tourbe

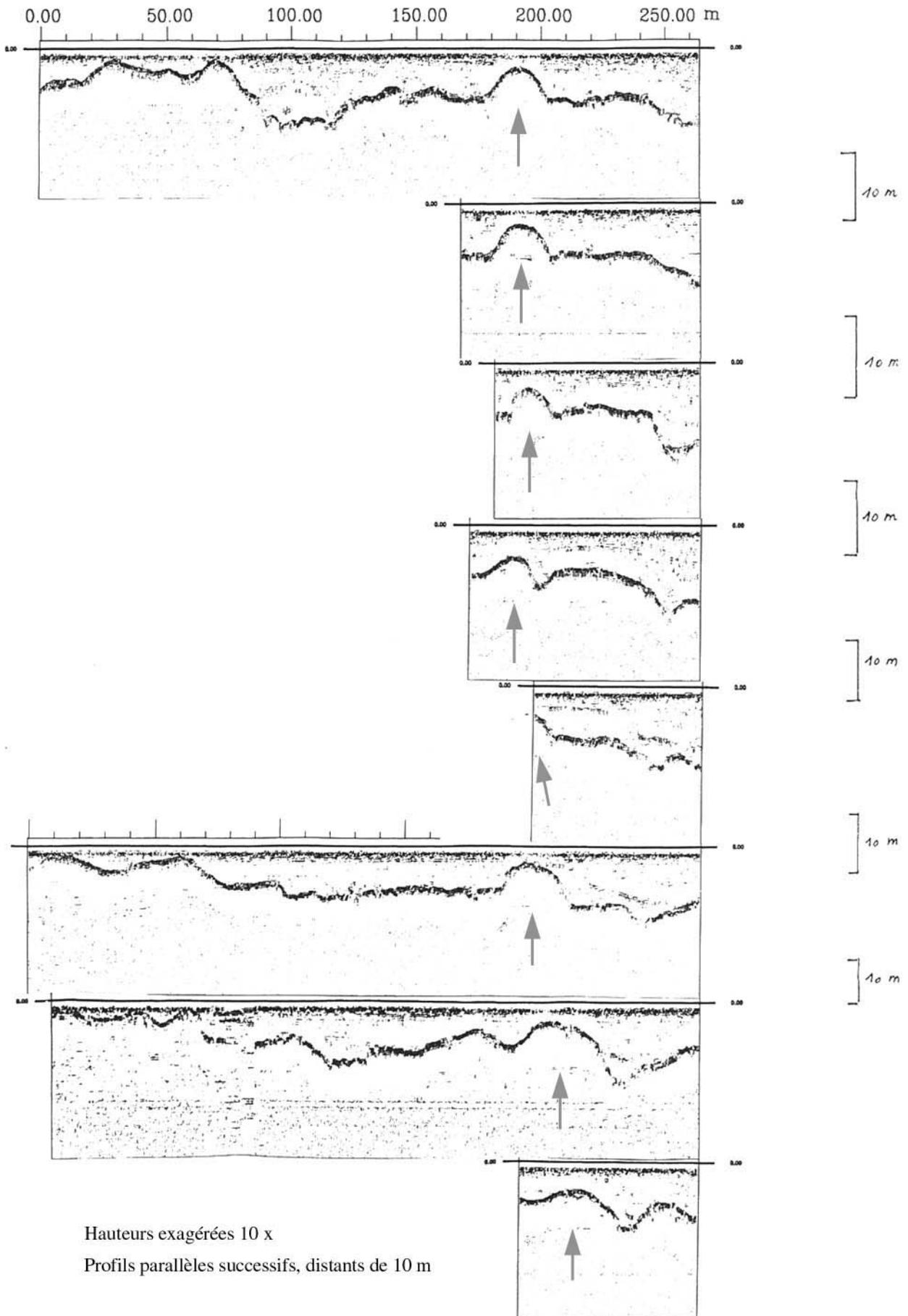


Fig. 19. Carte de répartition des traces de lithales enfouies sous la tourbe

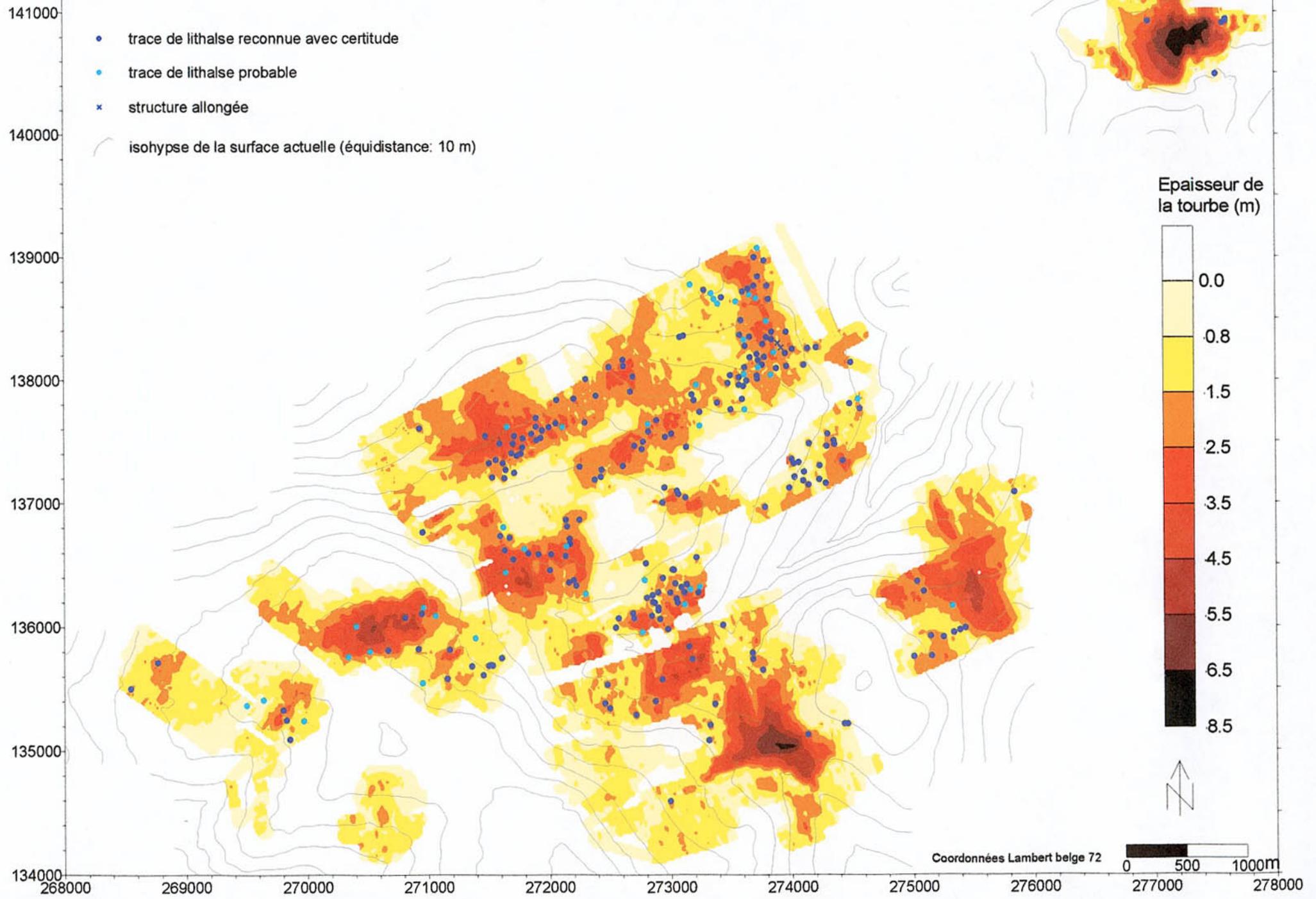


Fig. 20. Contraste entre des zones à subsurface accidentée et à subsurface plane

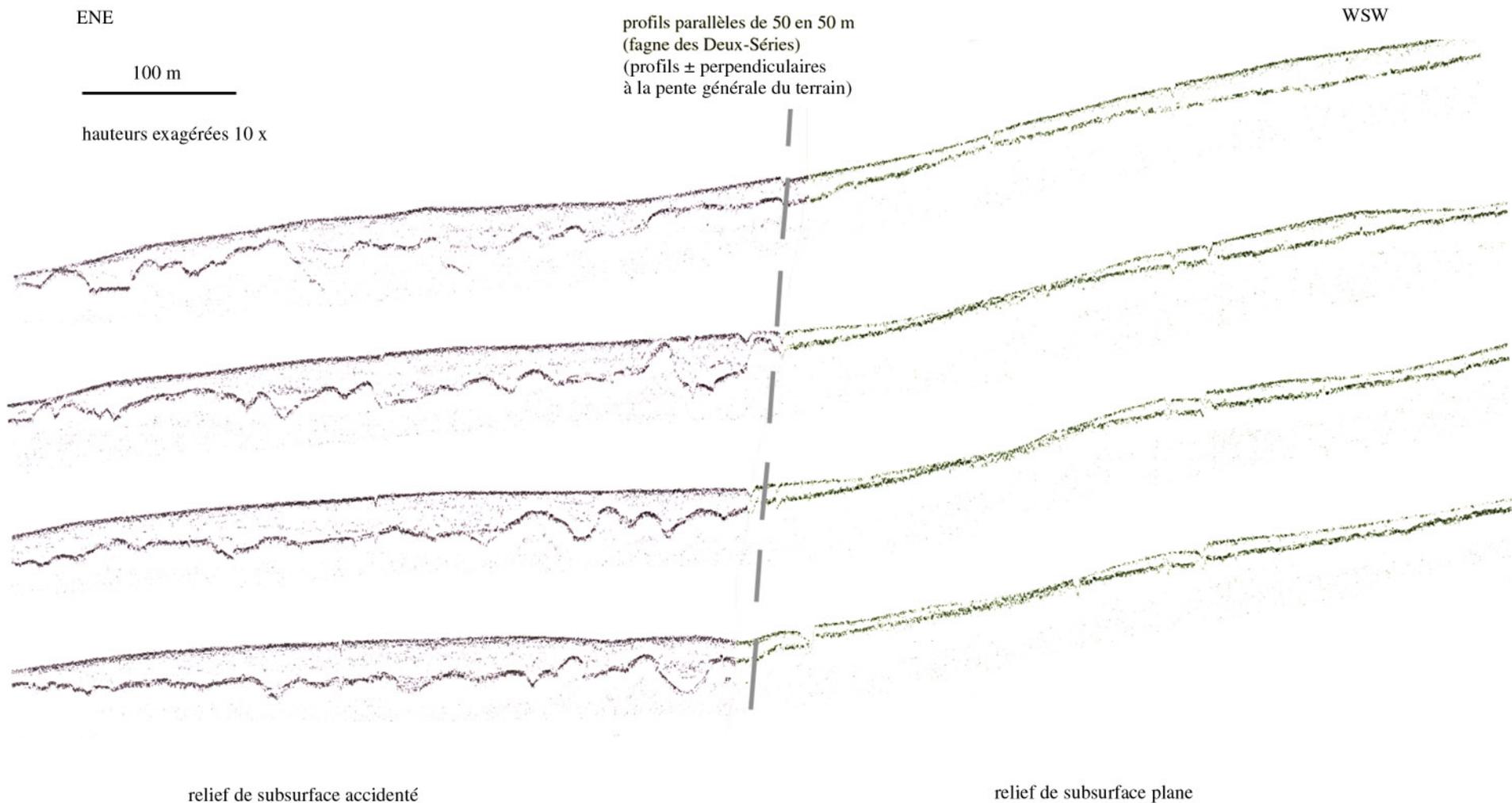


Fig. 20

Fig. 21a. Topographie de la subsurface (partie E: Misten)

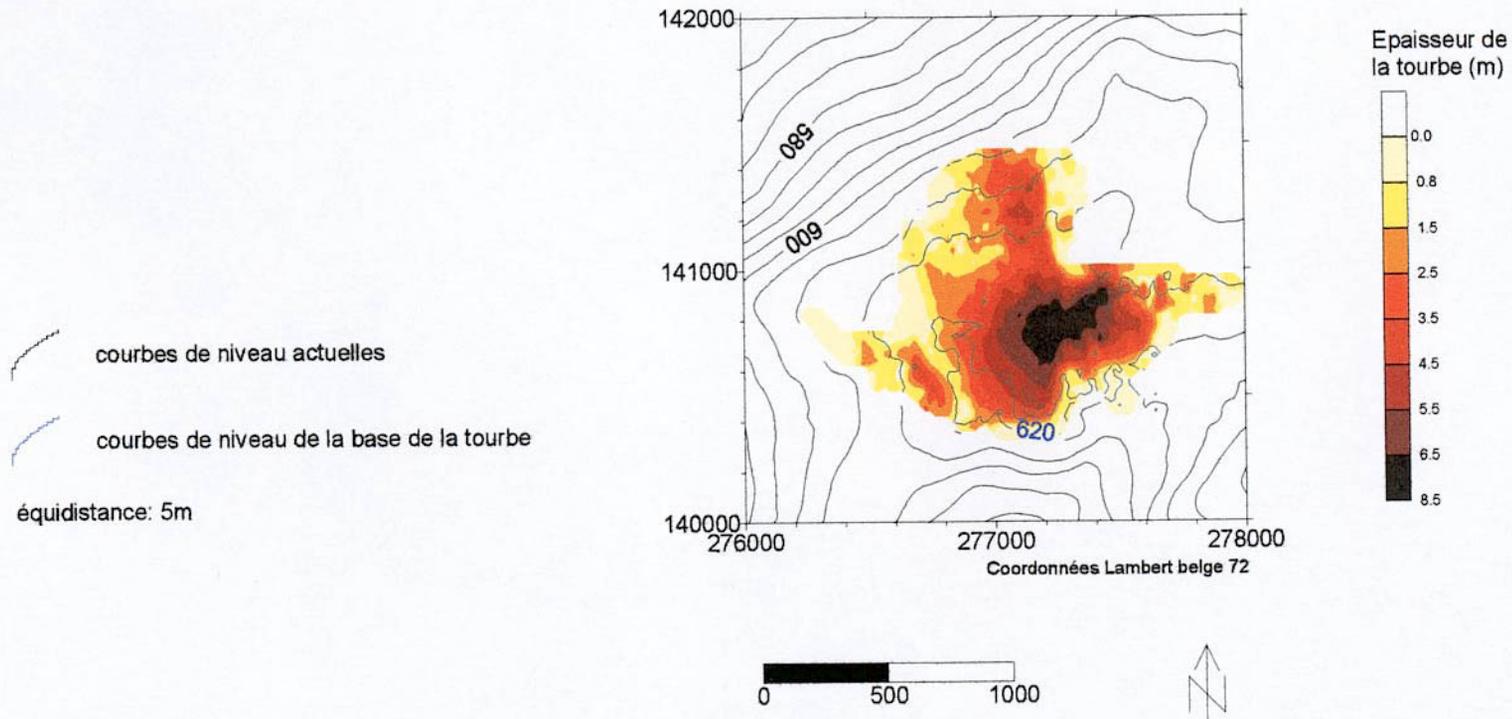


Fig. 21b. Carte topographique de la subsurface (partie ouest)

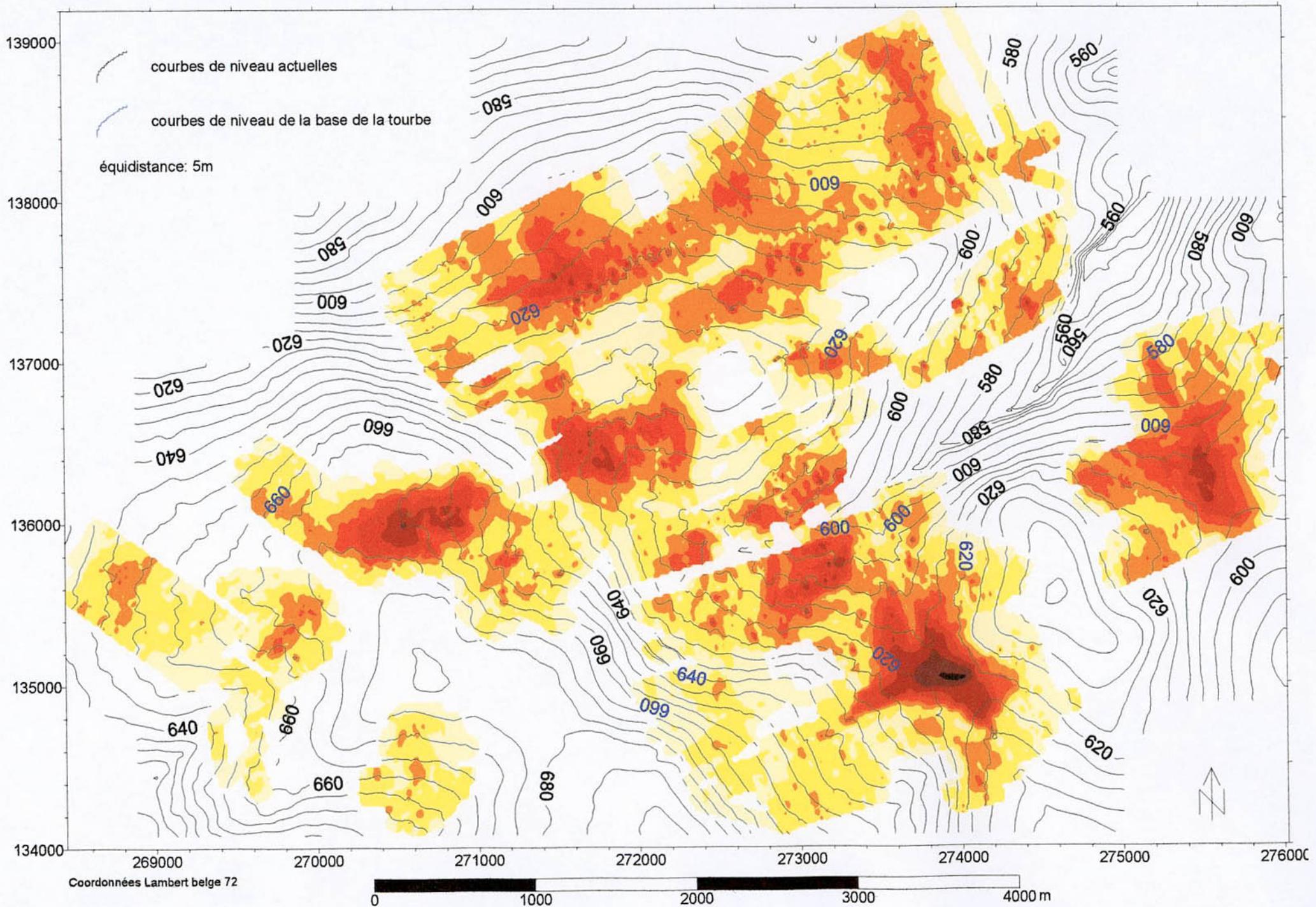


Fig. 22. Localisation des coupes des fig. 23

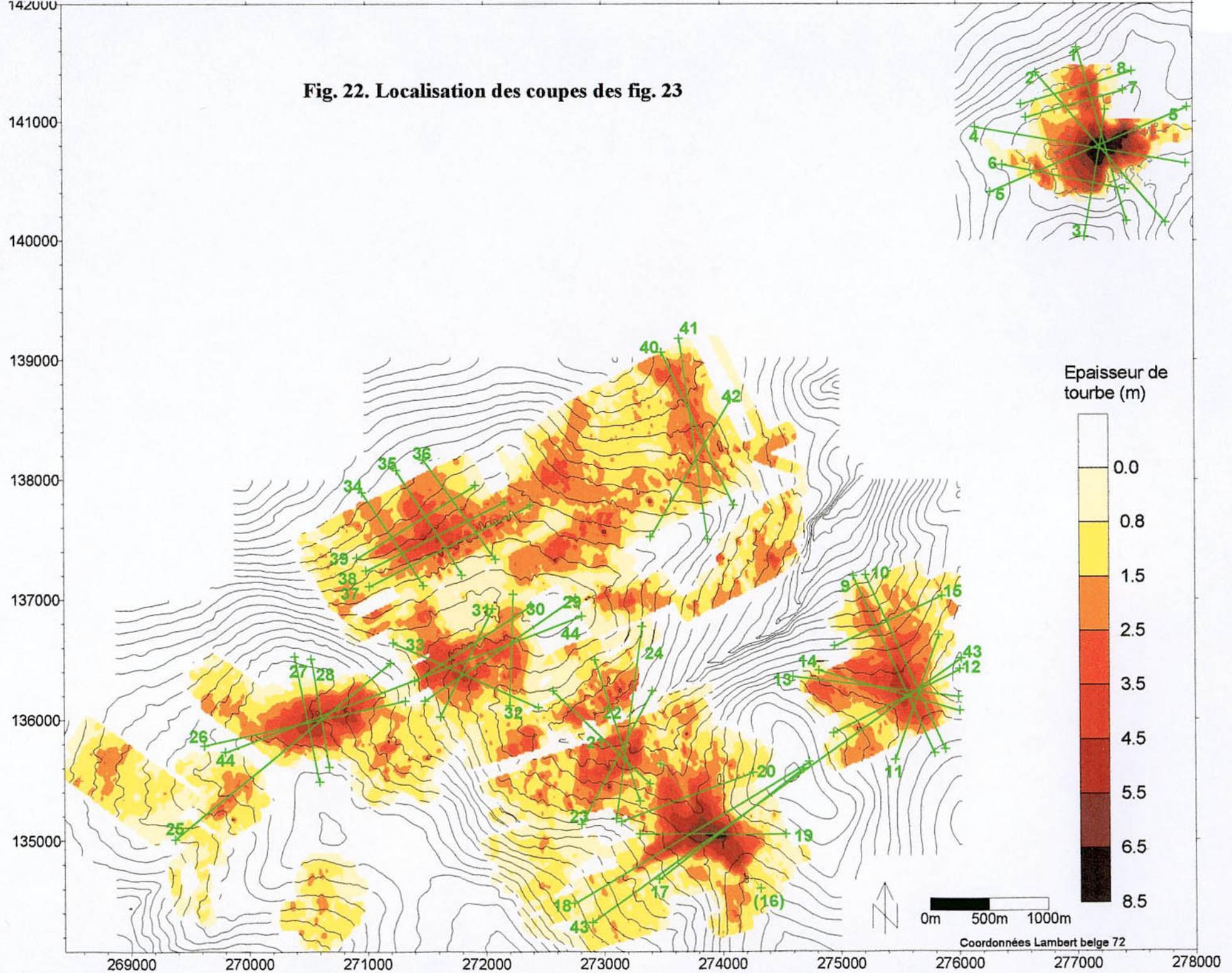


Fig. 23a. Coupes topographiques de la surface et de la subsurface au Misten

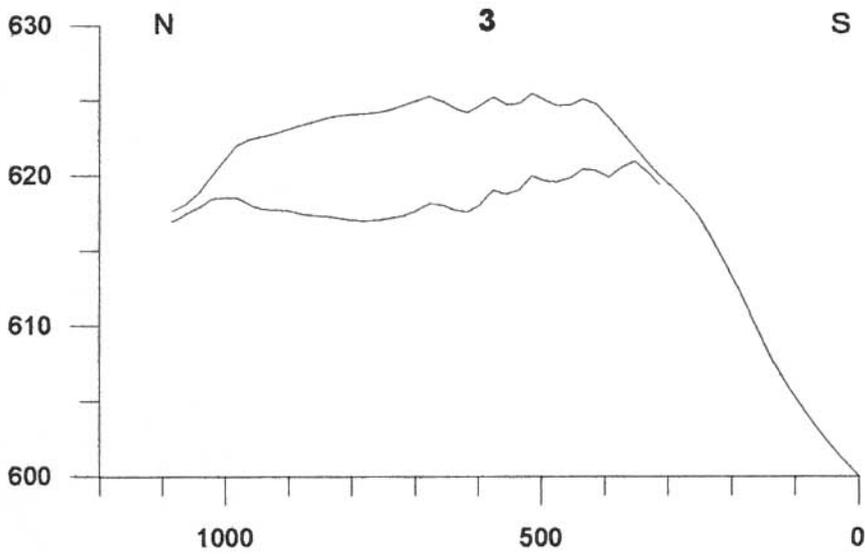
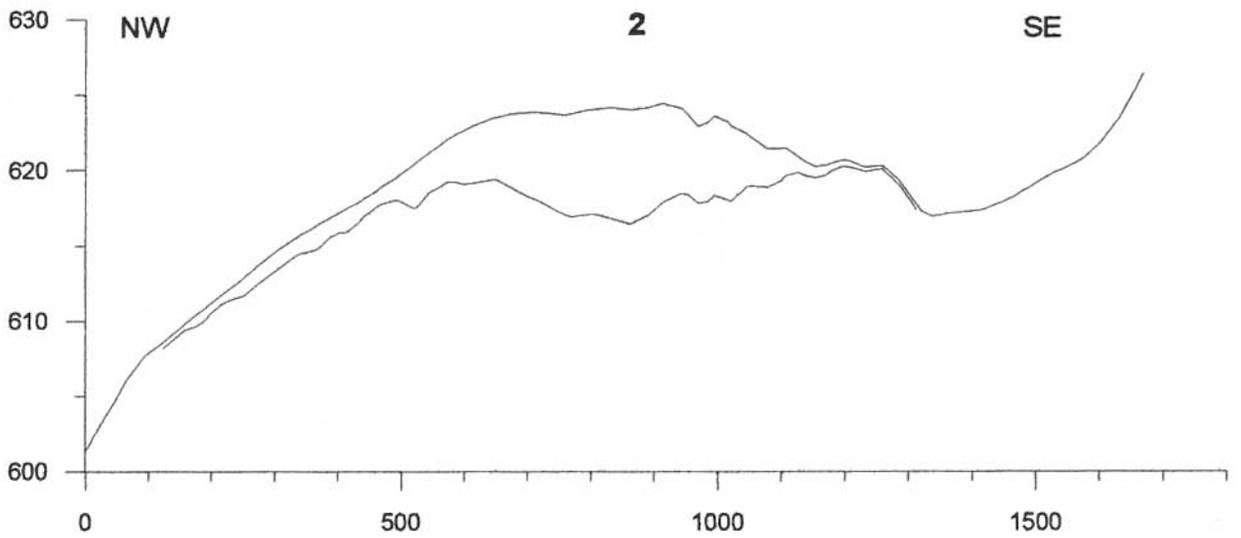
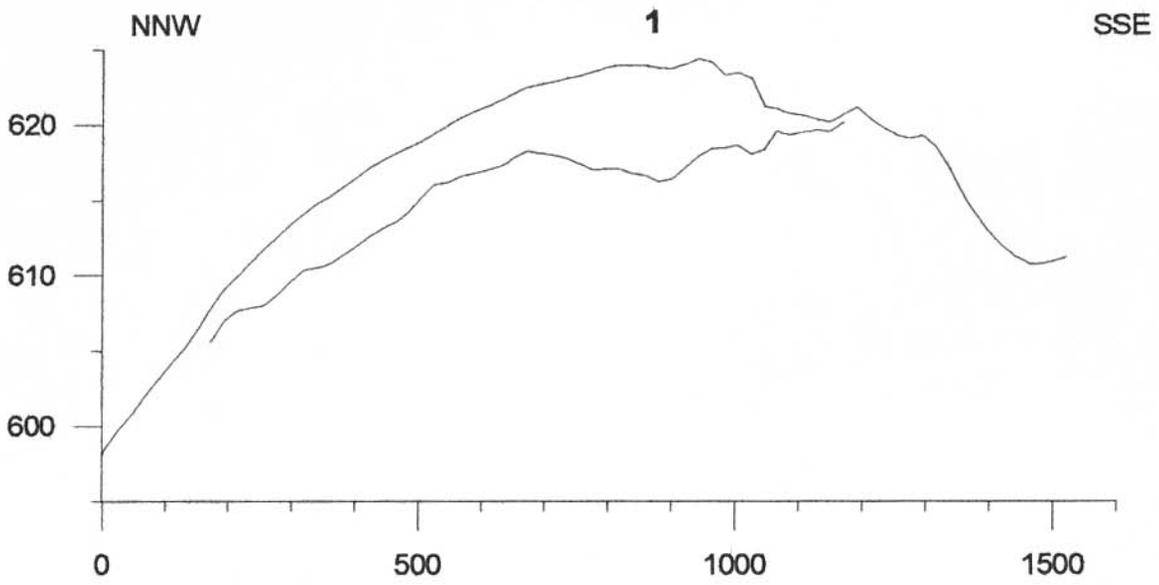


Fig. 23b. Coupes topographiques de la surface et de la subsurface au Misten

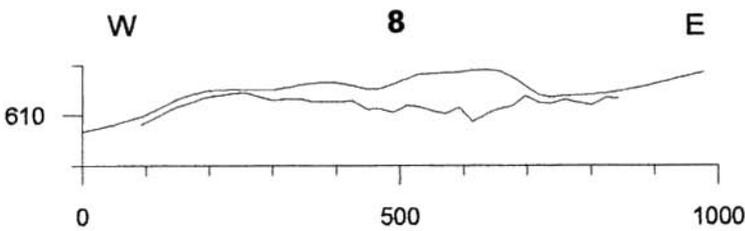
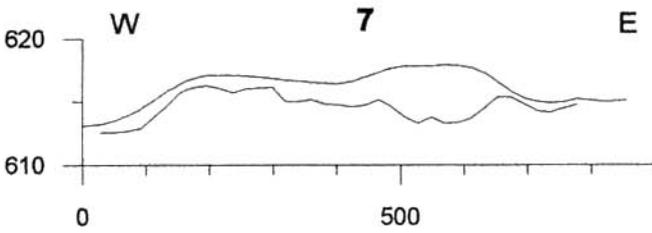
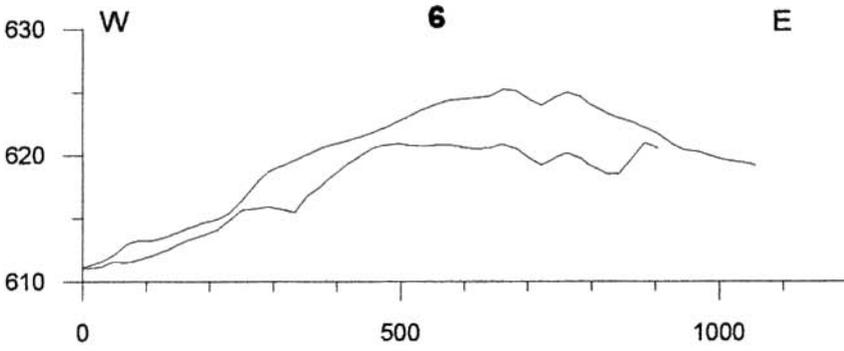
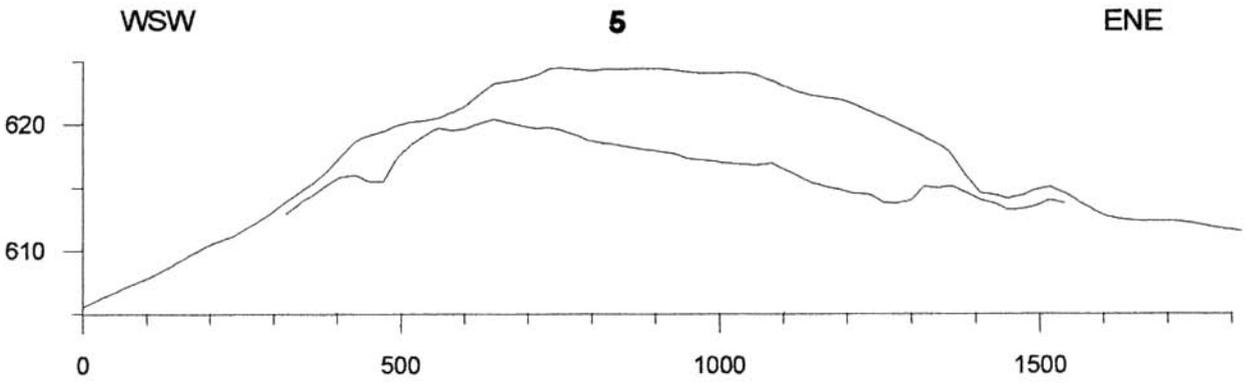
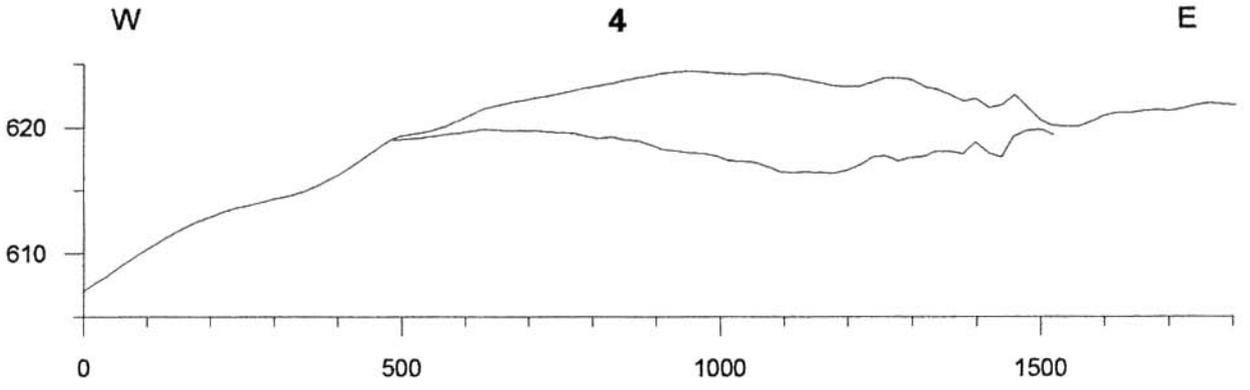


Fig. 23c. Coupes topographiques de la surface et de la subsurface à Cléfaye

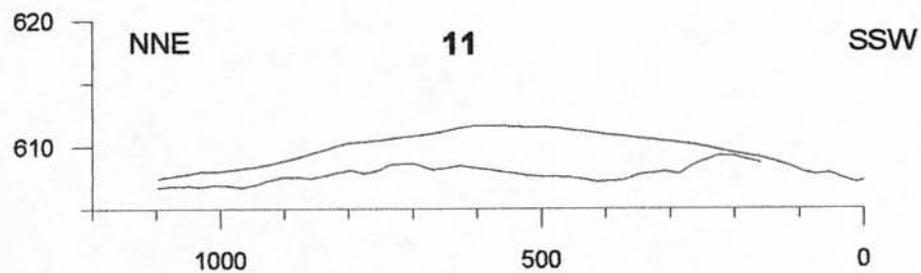
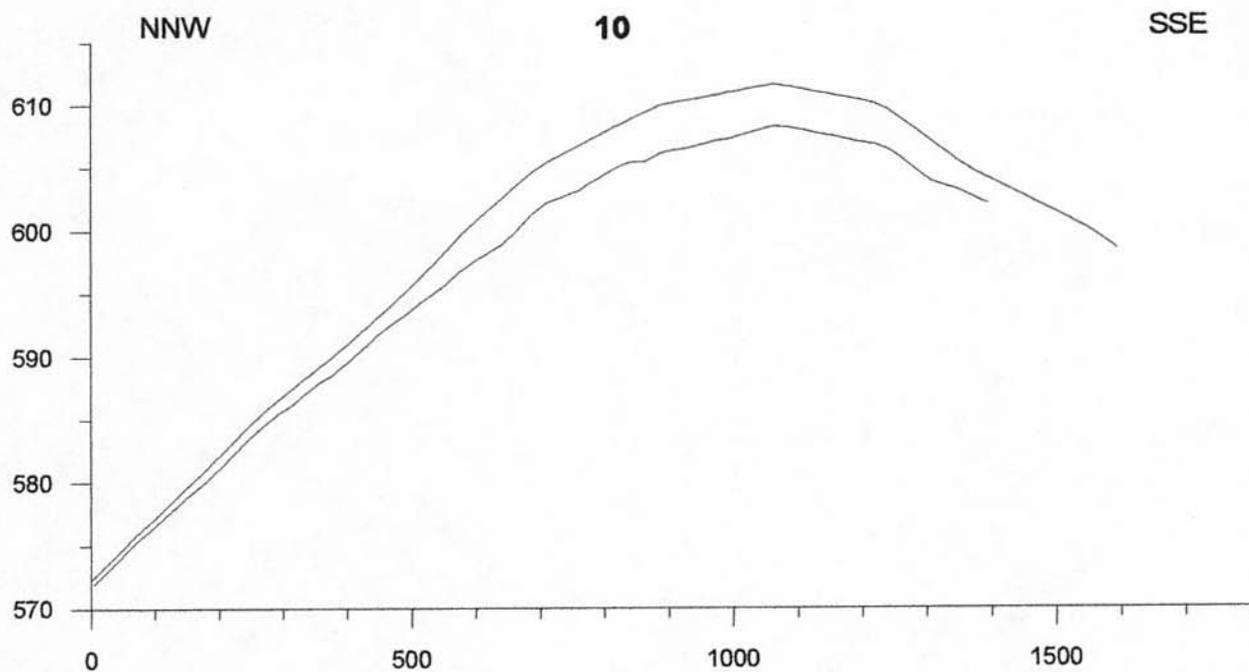
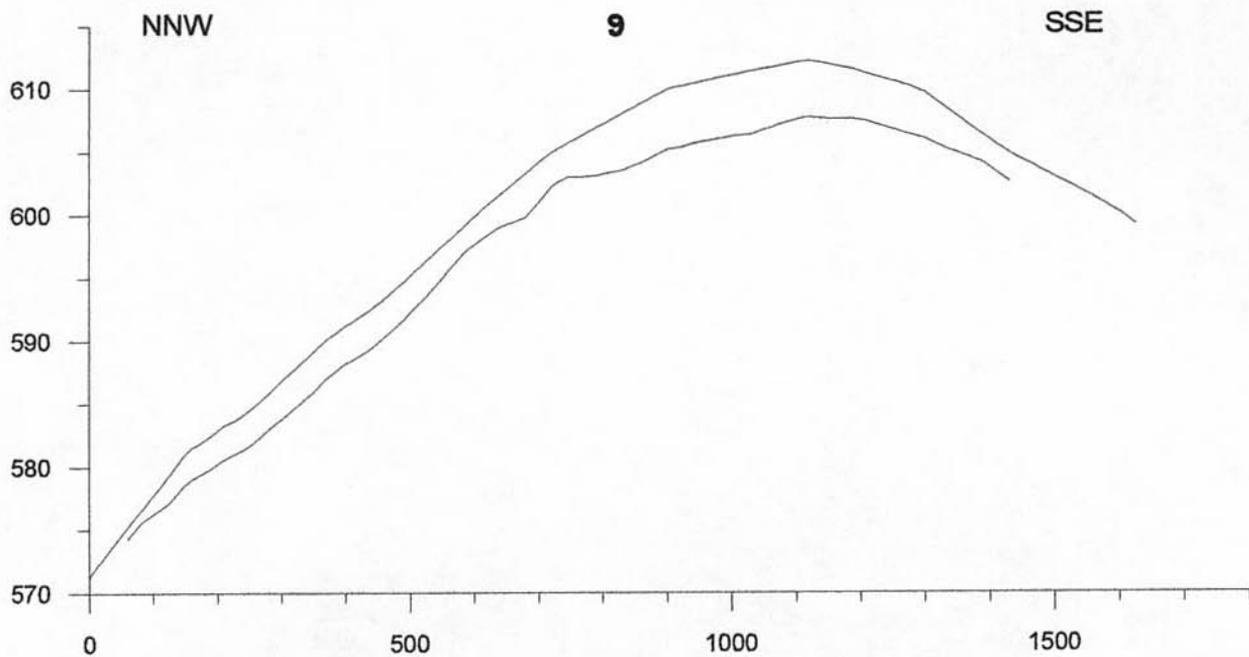


Fig. 23d. Coupes topographiques de la surface et de la subsurface à Cléfaye

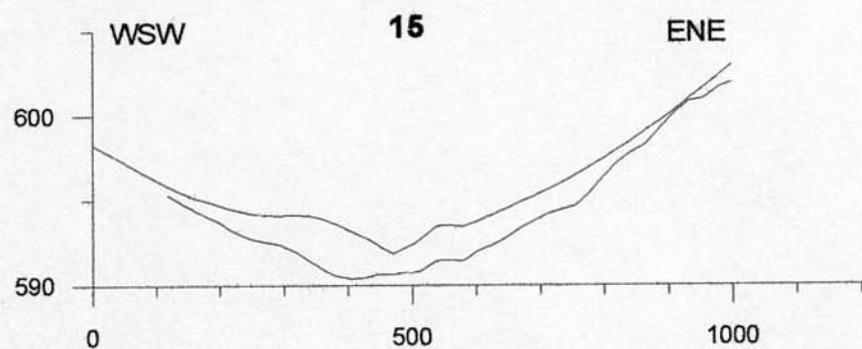
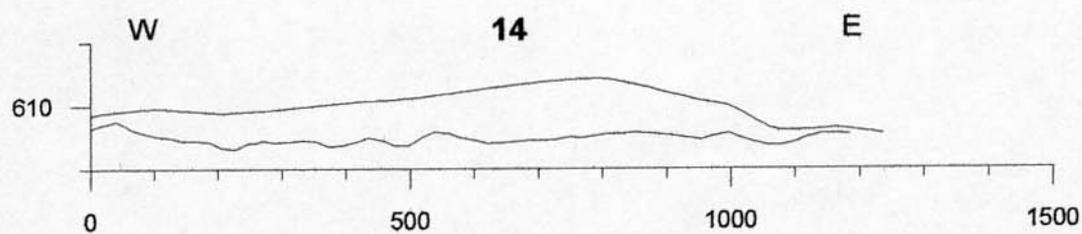
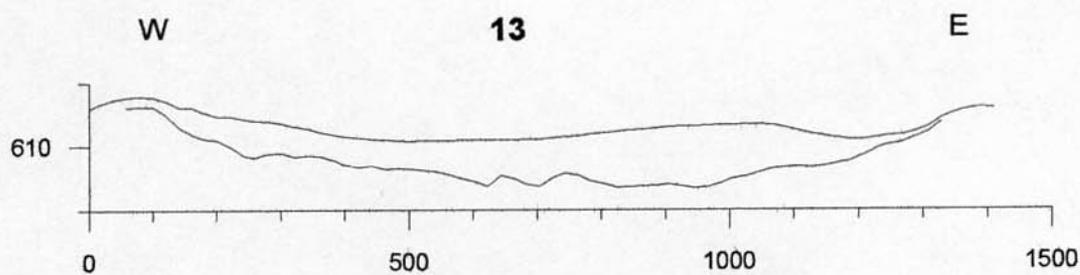
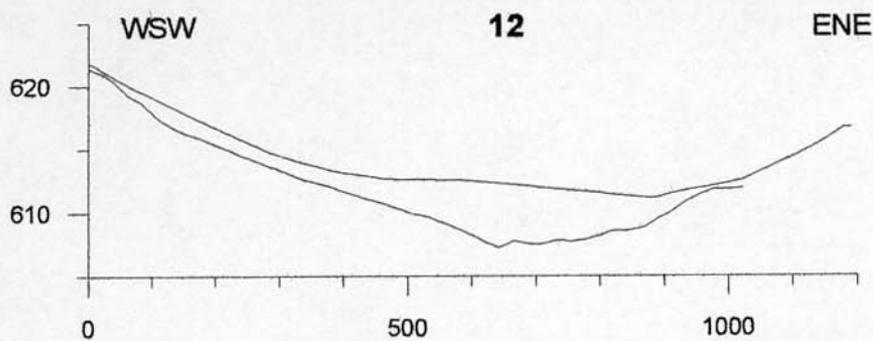
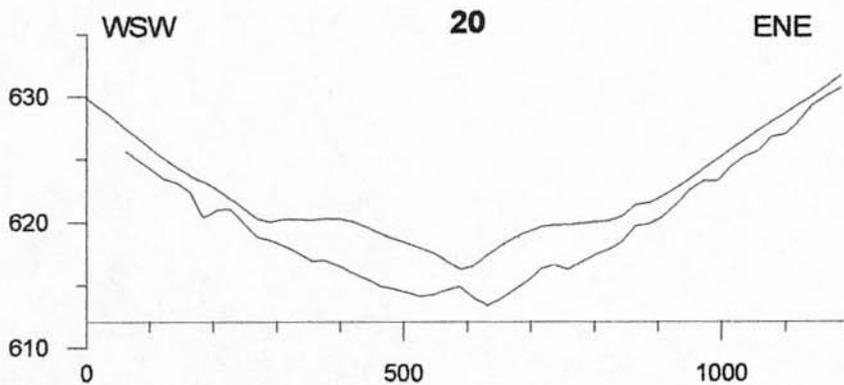
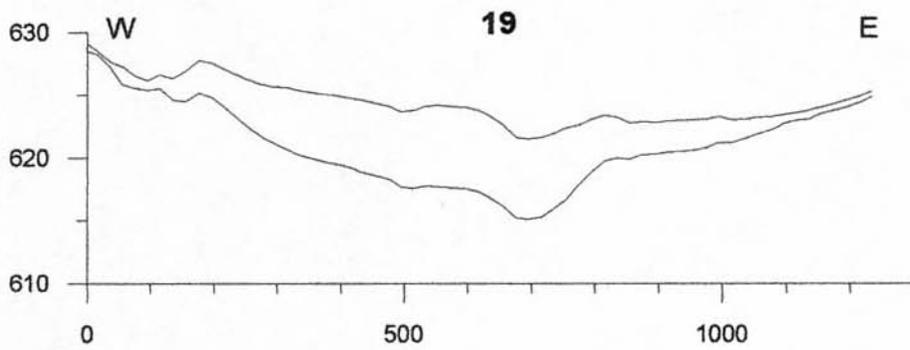
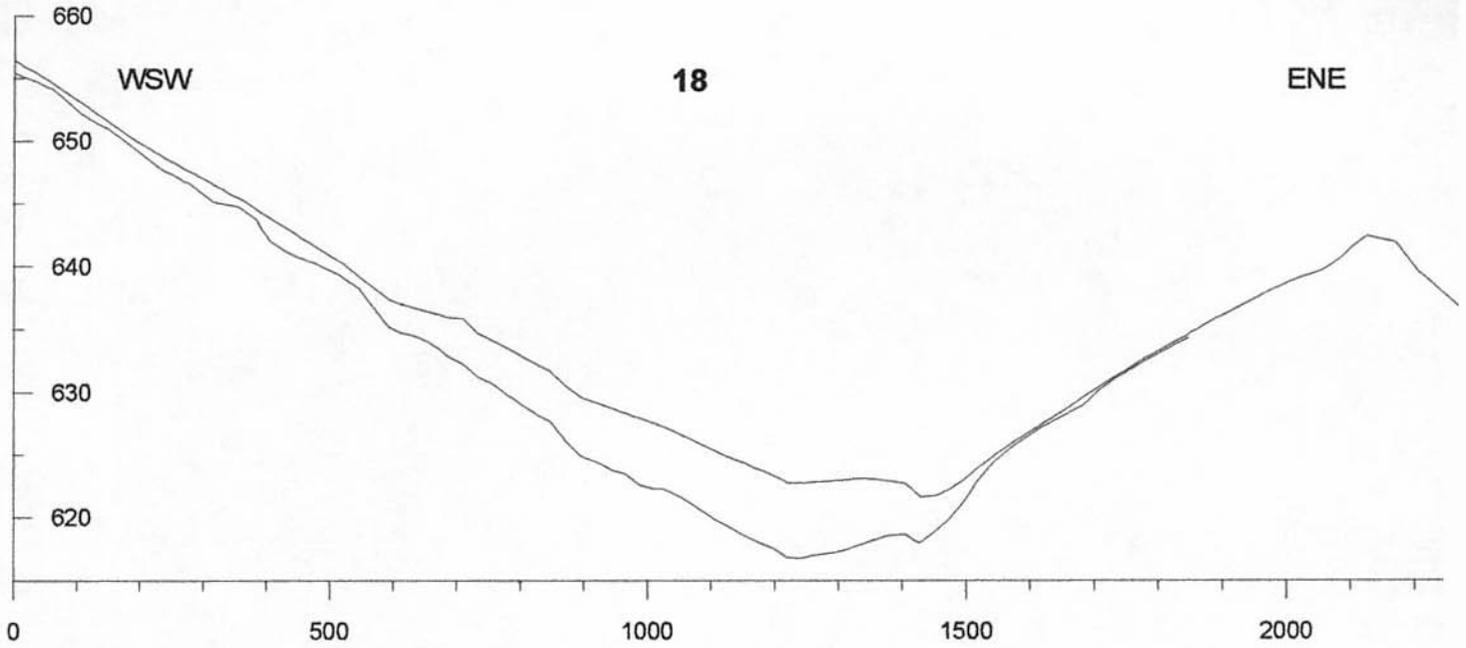
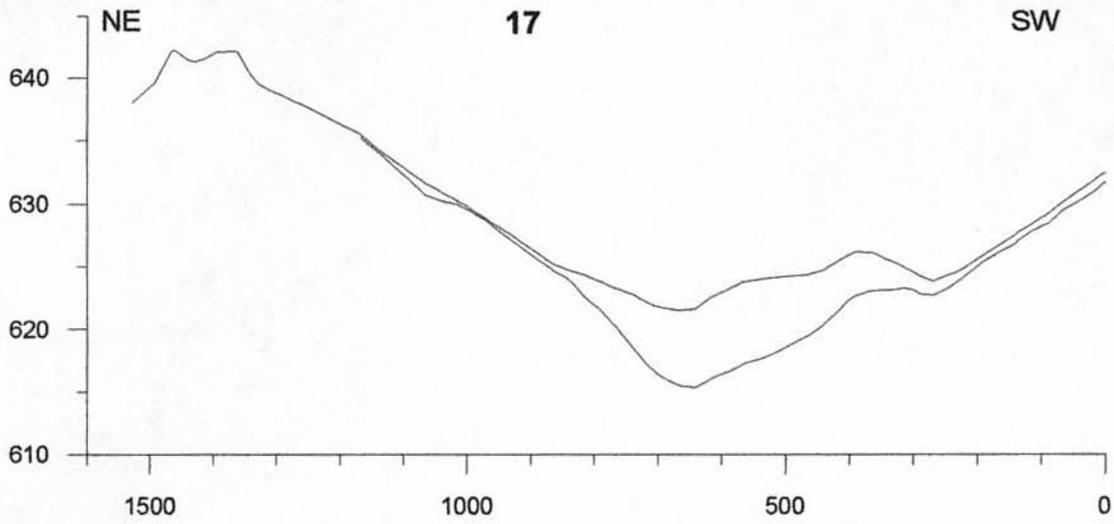


Fig. 23e. Coupes topographiques de la surface et de la subsurface en fagne Wallonne



NB. La coupe n°16 n'a pas été représentée car trop déformée à cause de l'imprécision des données altimétriques

Fig. 23f. Coupes topographiques de la surface et de la subsurface dans la vallée de la Helle (fagne Wallonne et Deux-Séries)

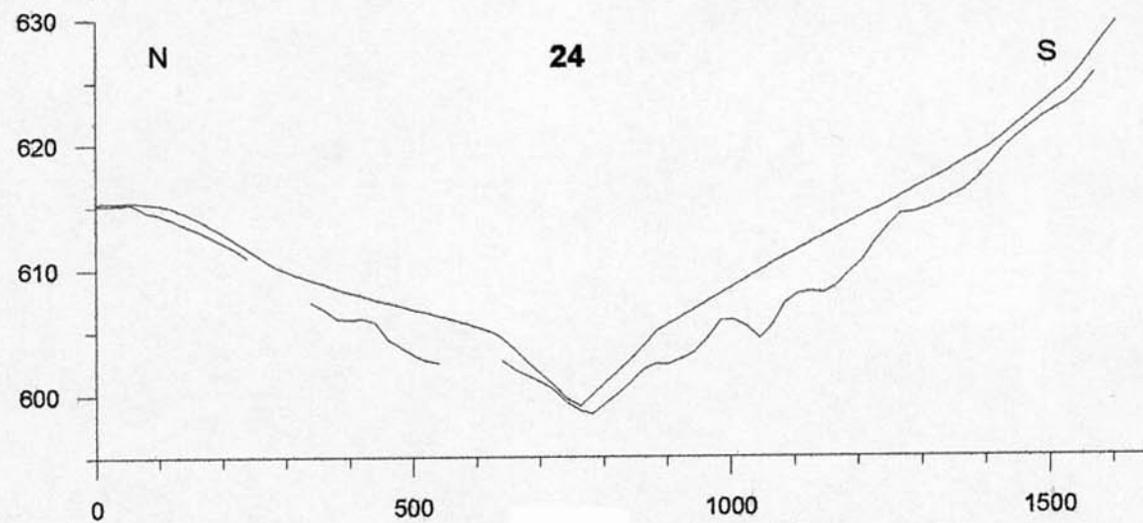
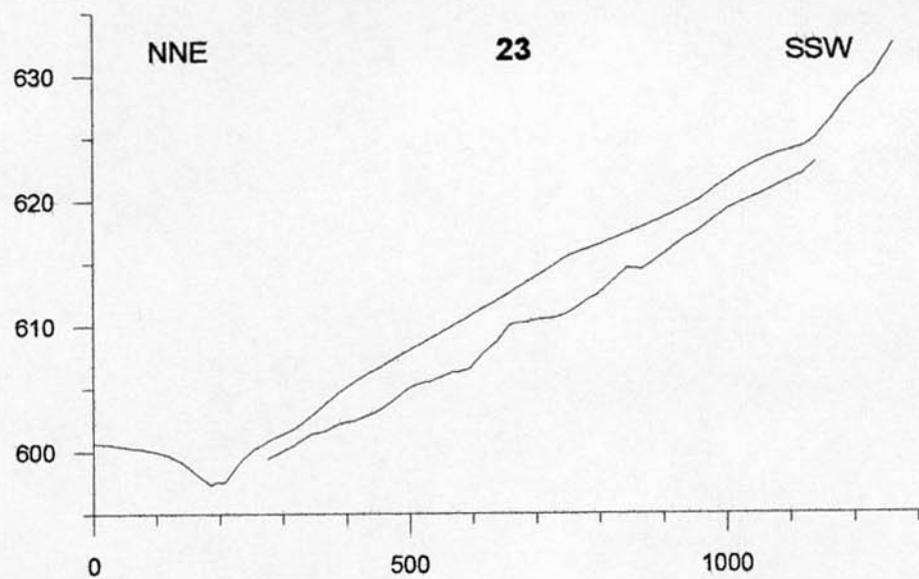
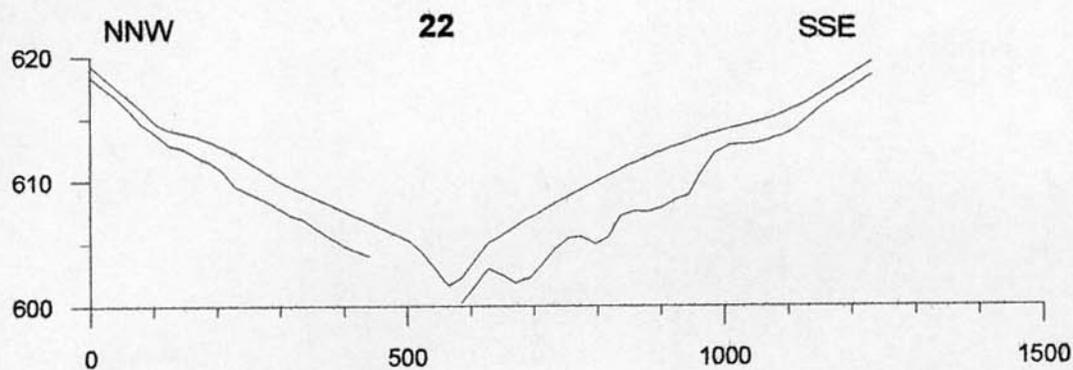
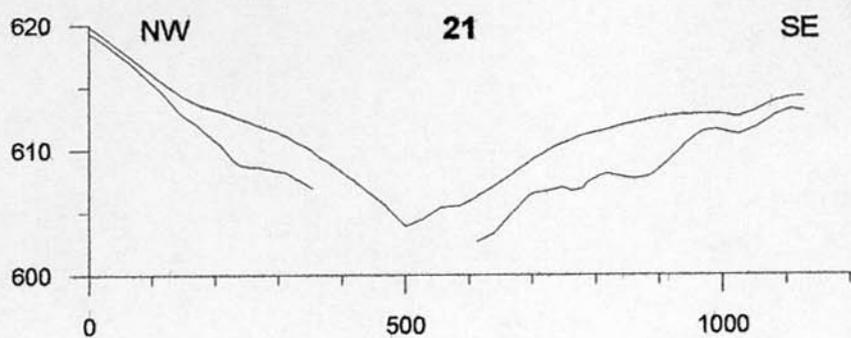


Fig. 23g. Coupes topographiques de la surface et de la subsurface dans la Grande-Fange

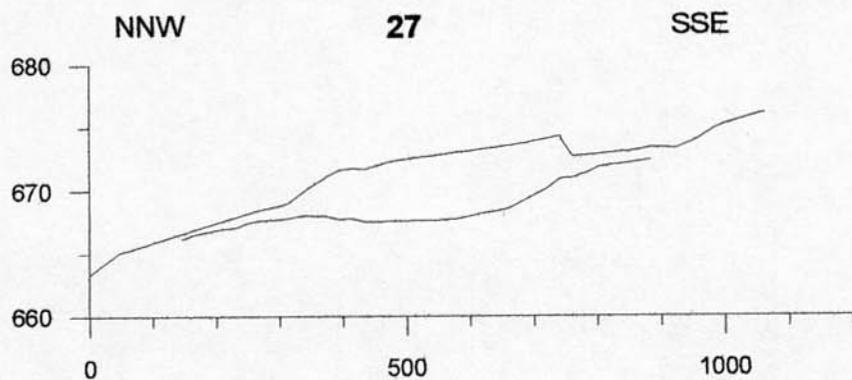
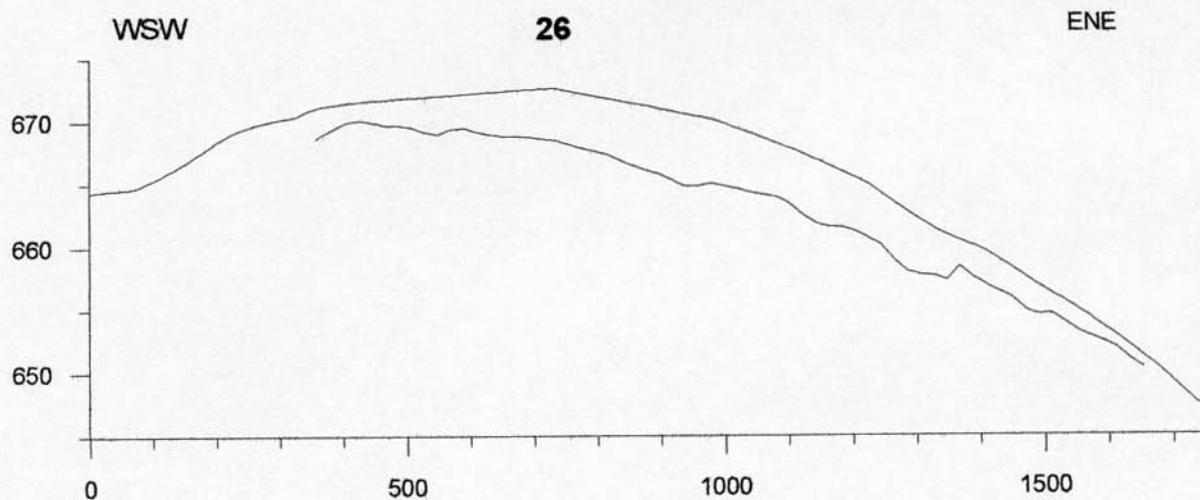
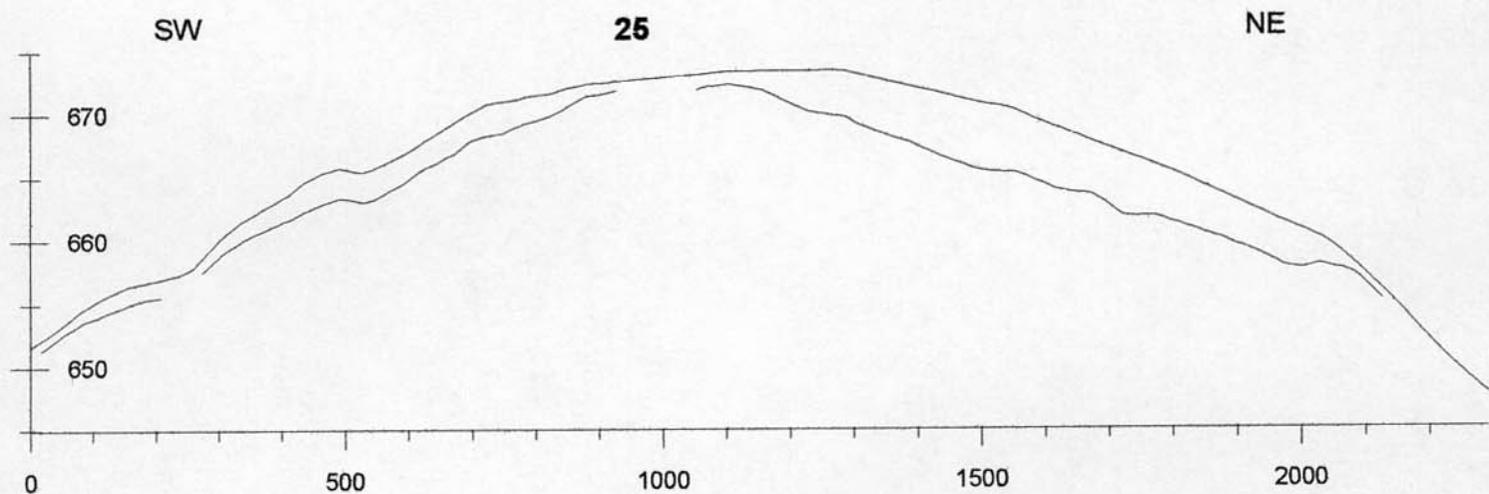


Fig. 23h. Coupes topographiques de la surface et de la subsurface en fagne des Deux-Séries (massif A, fig. 9a)

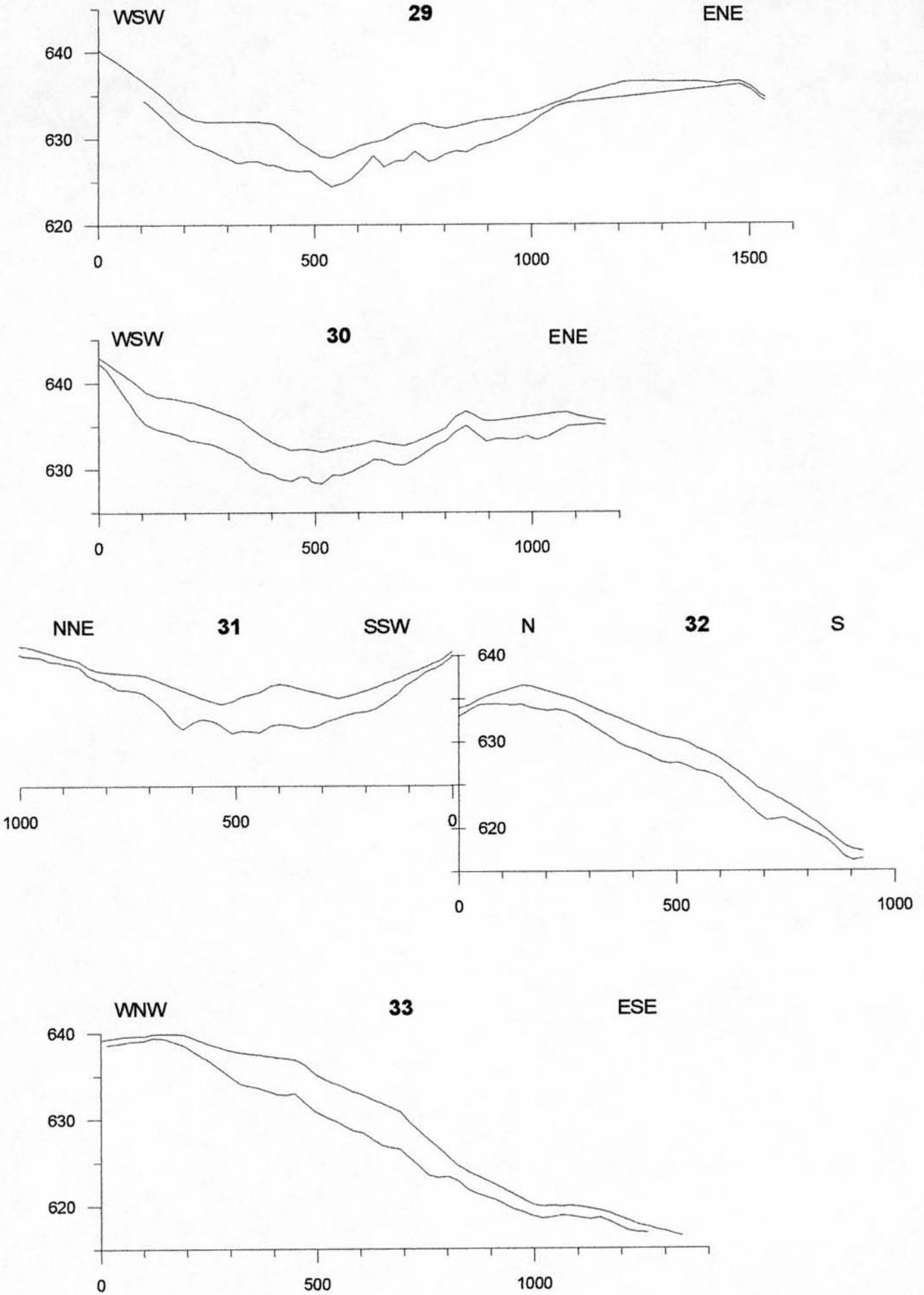


Fig. 23i. Coupes topographiques de la surface et de la subsurface en fagne des Deux-Séries (massif B, fig. 9a)

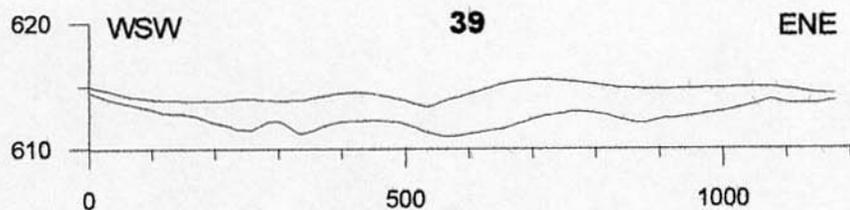
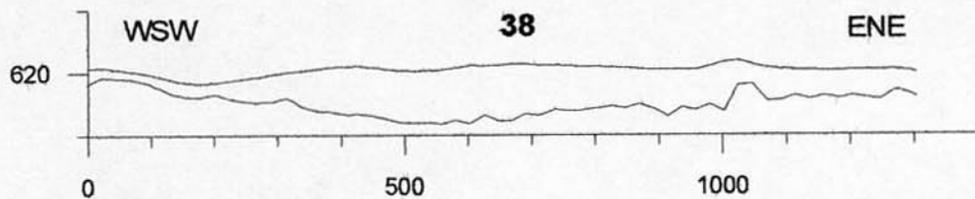
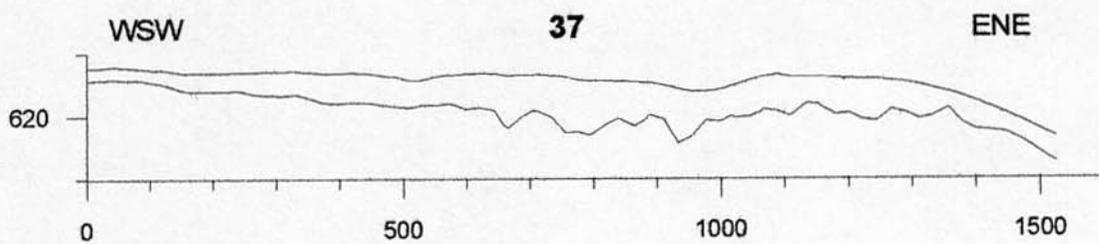
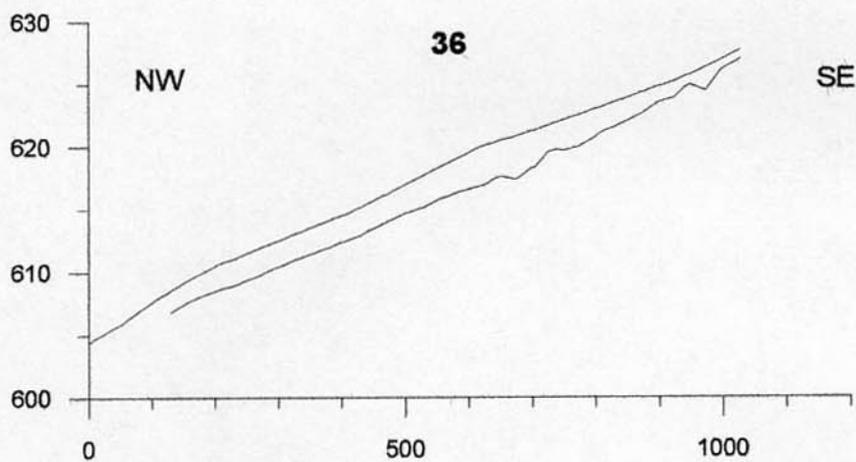
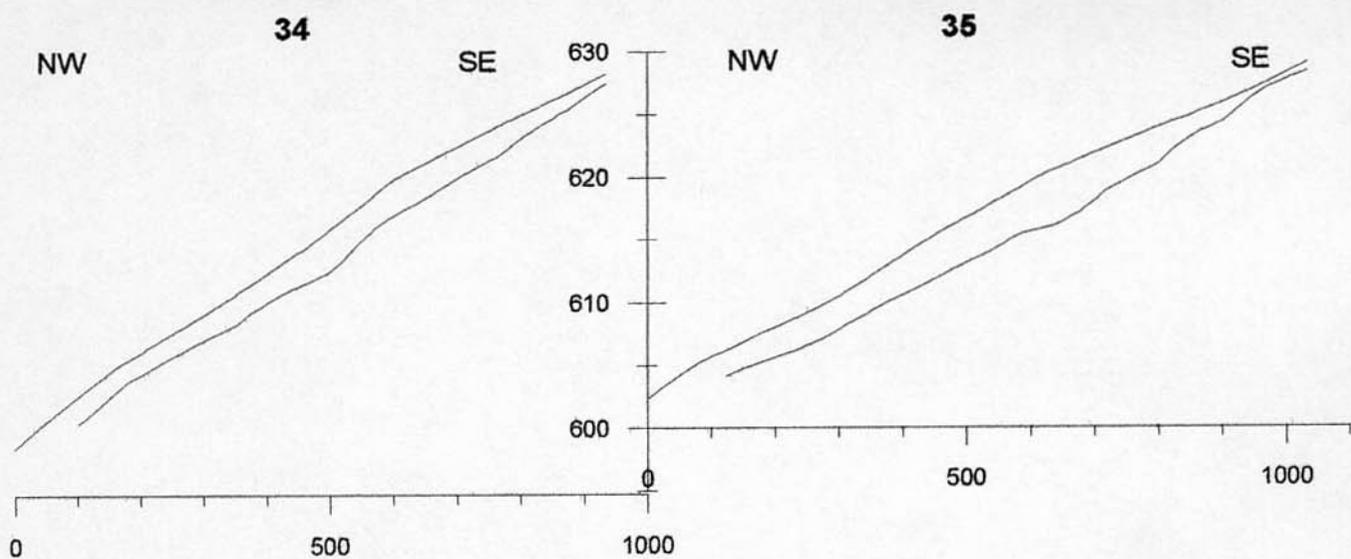
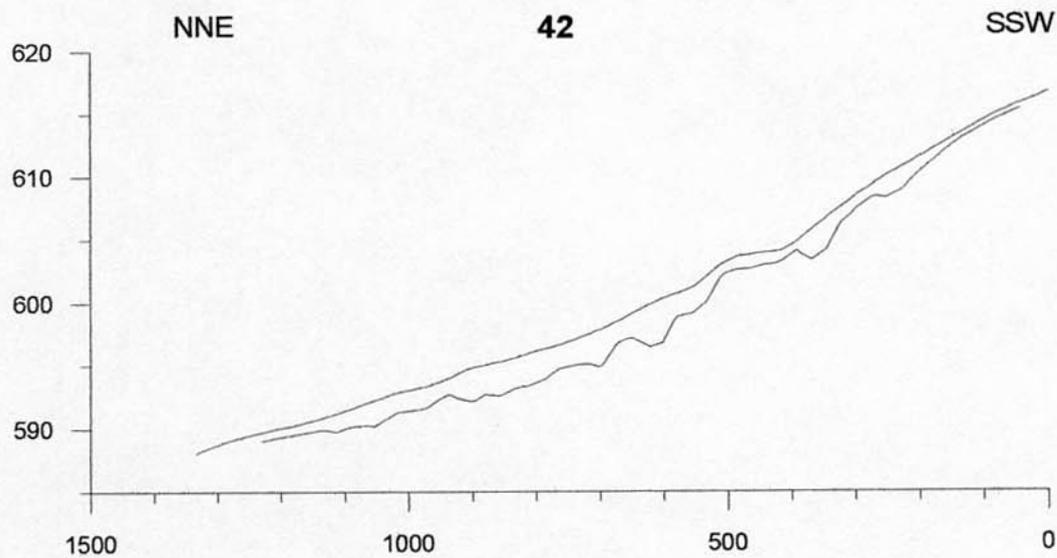
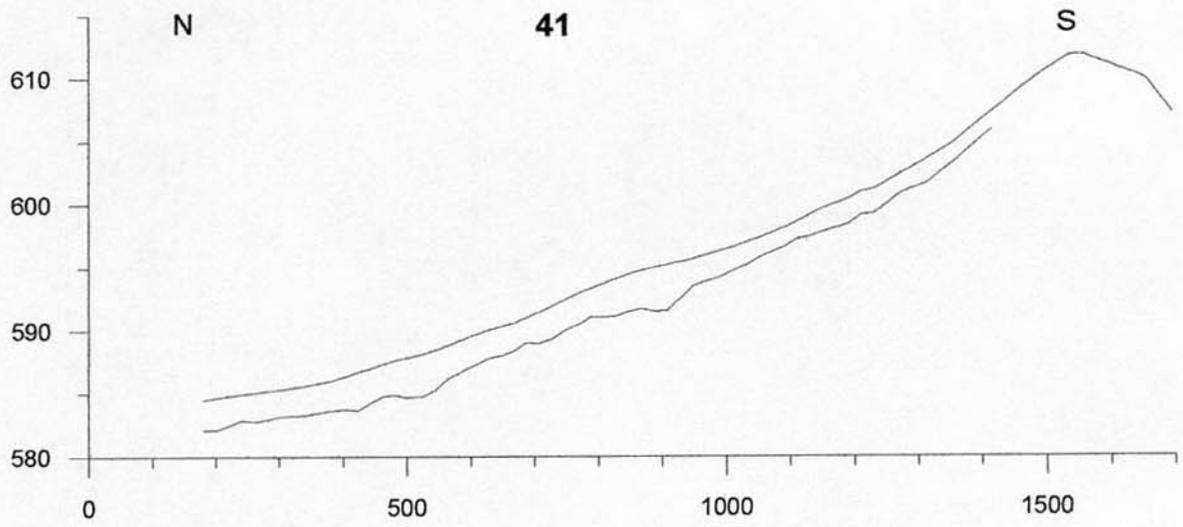
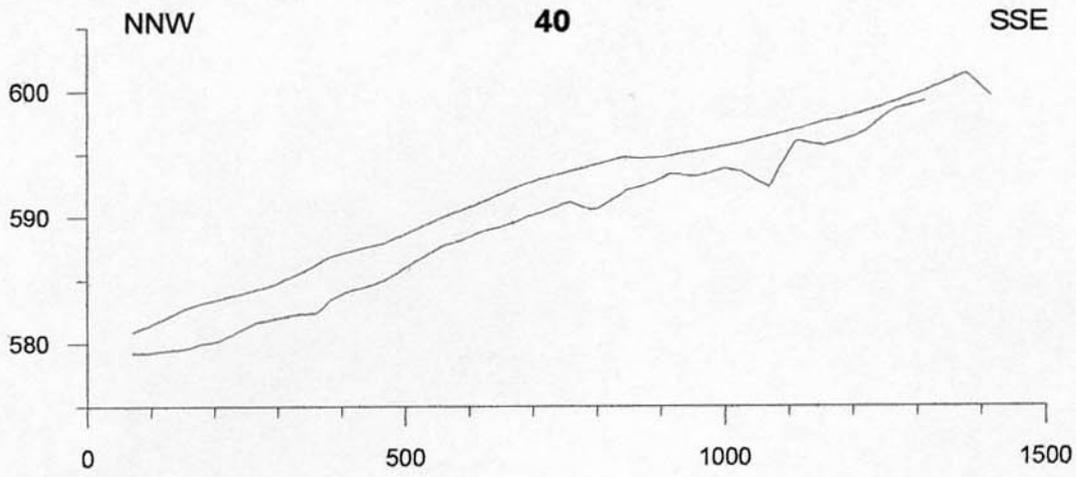


Fig. 23j. Coupes topographiques de la surface et de la subsurface en fagne des Deux-Séries (massif C, fig. 9b)



**Fig. 23k. Coupes topographiques de la surface et de la subsurface
à travers la fagne Wallonne et la fagne de Cléfaye
à travers la fagne des Potaies et la fagne des Deux-Séries (massif A)**

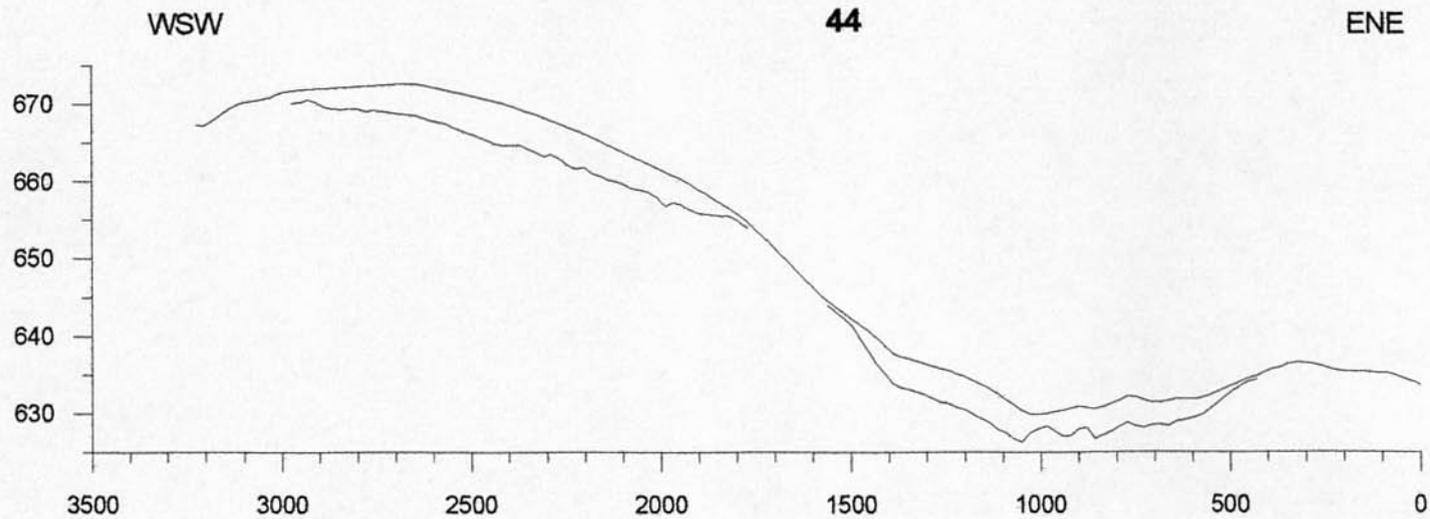
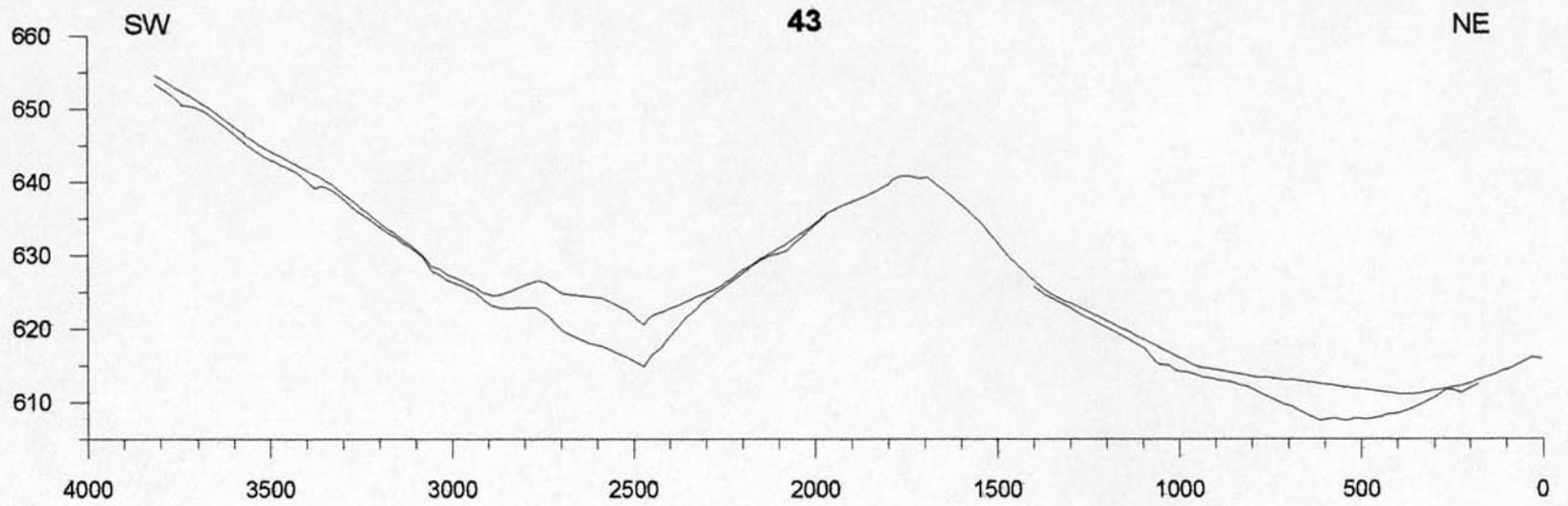


Fig. 24. Profil radar dans la partie nord (B) du Misten

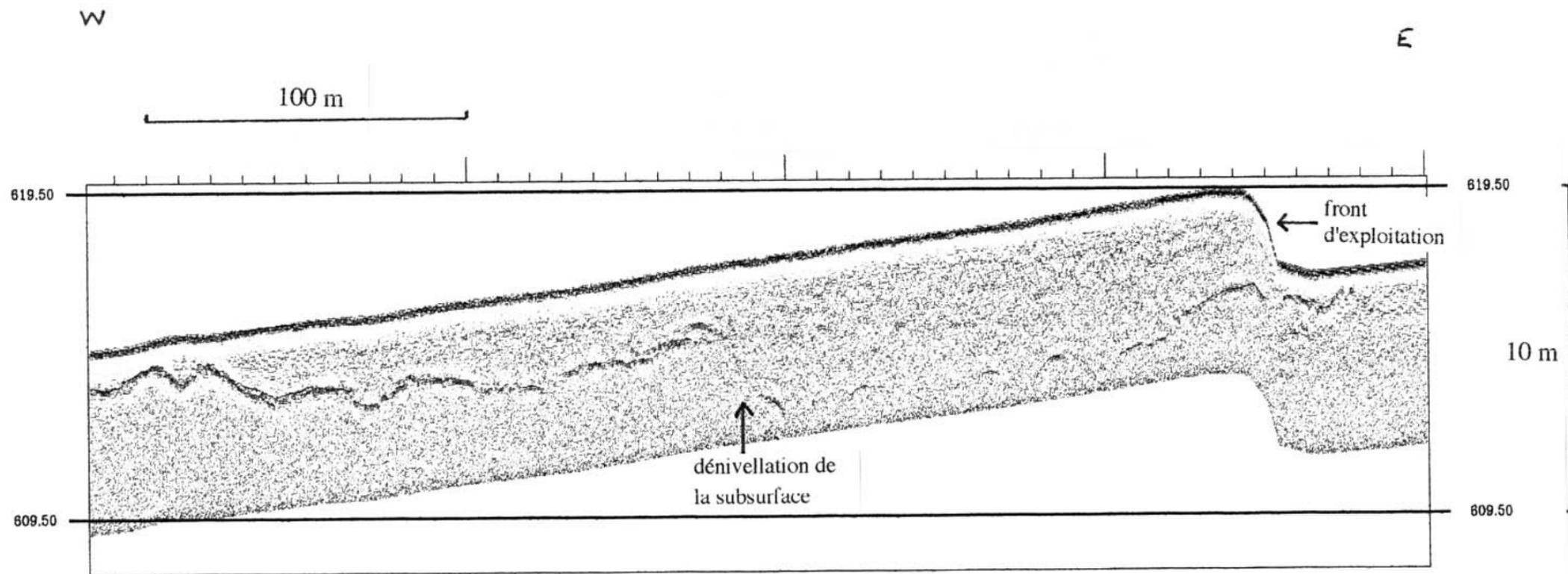


Fig. 25. Dépôt tourbeux d'extension limitée autour de cuvettes de lithaleses

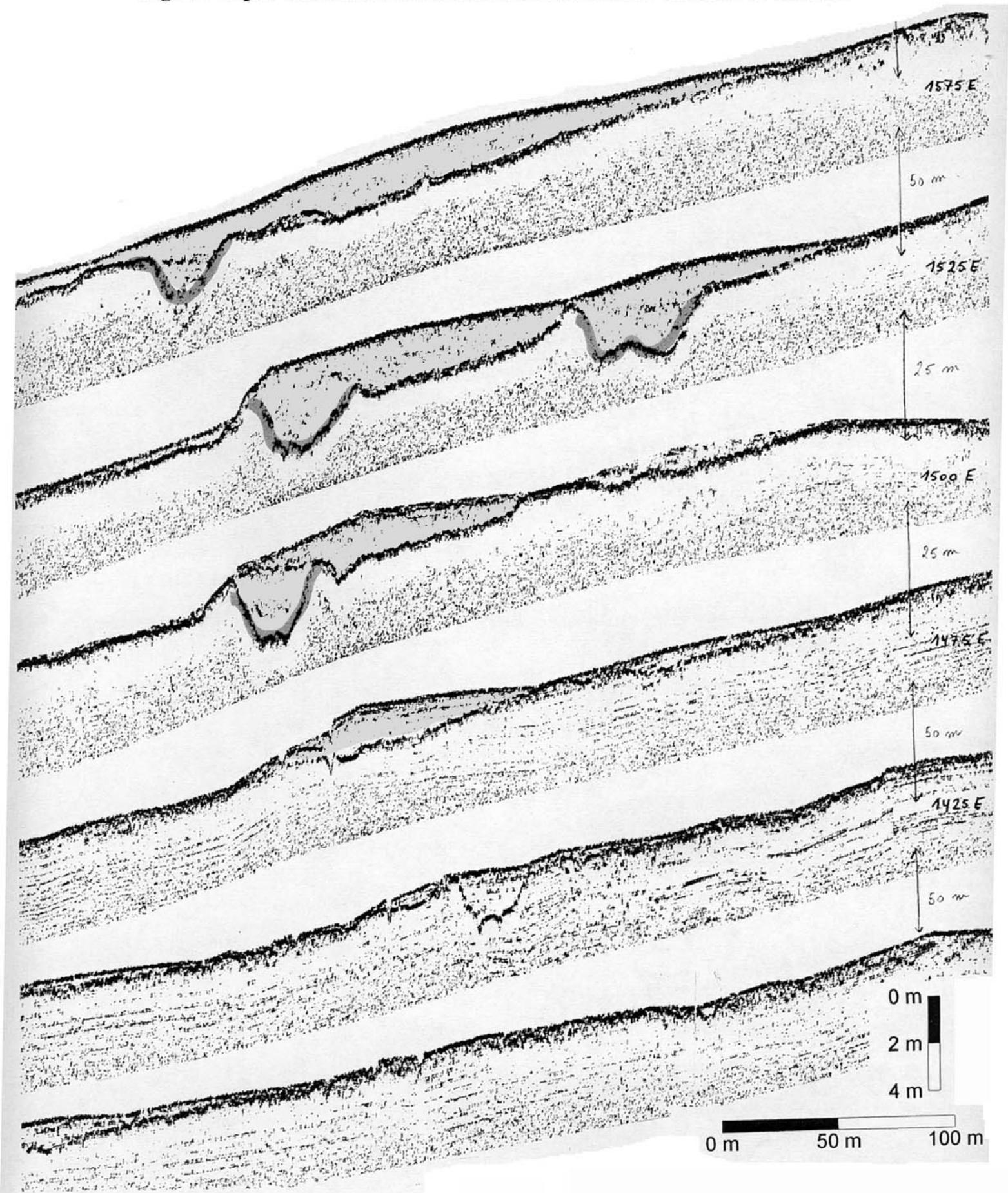


Fig. 26. Tourbière bombée développée sur cuvettes de lithaleses

Profils parallèles successifs distants de 50 m (fagne des Deux-Séries)

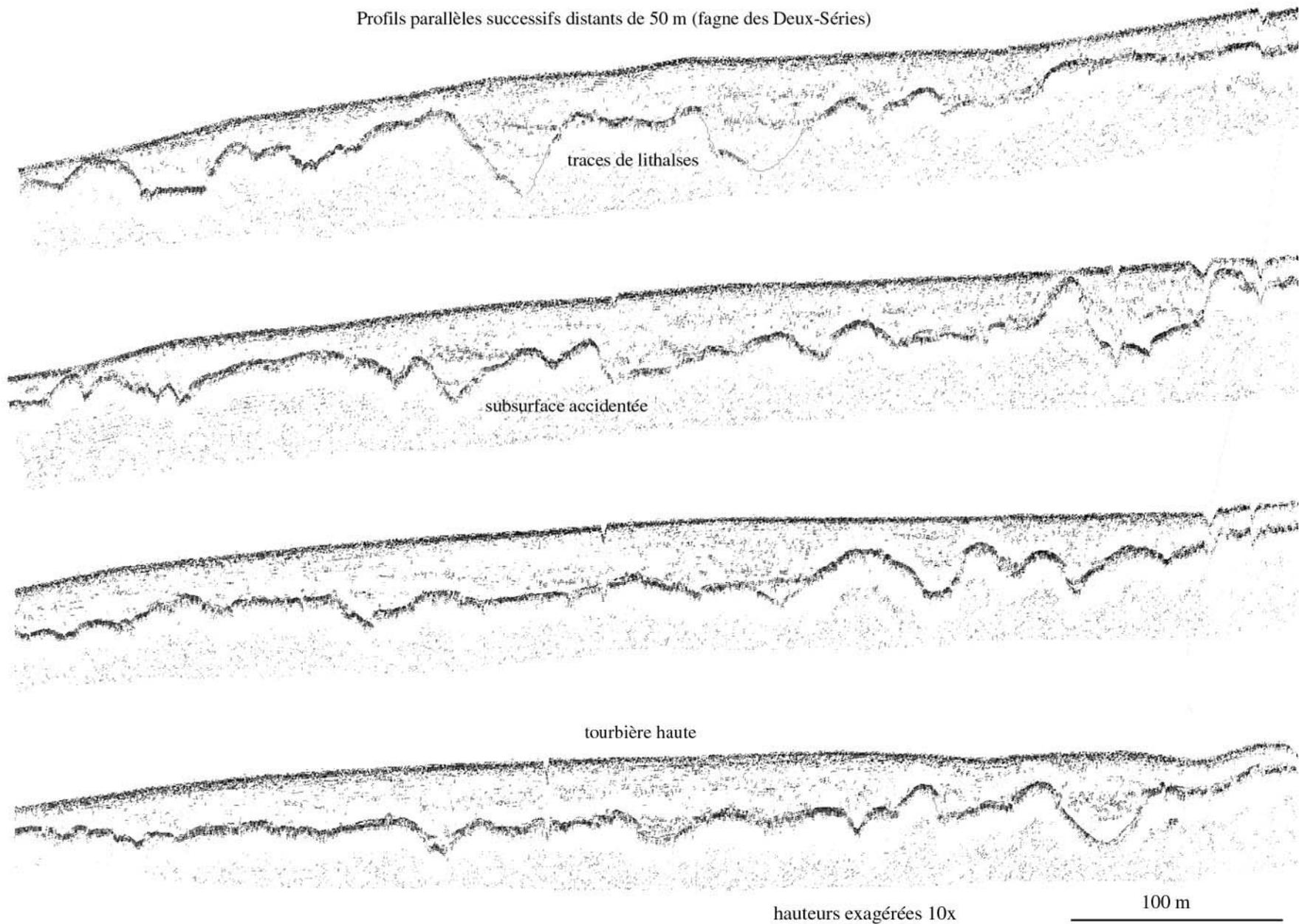


Fig. 27. Localisation des points de sondage

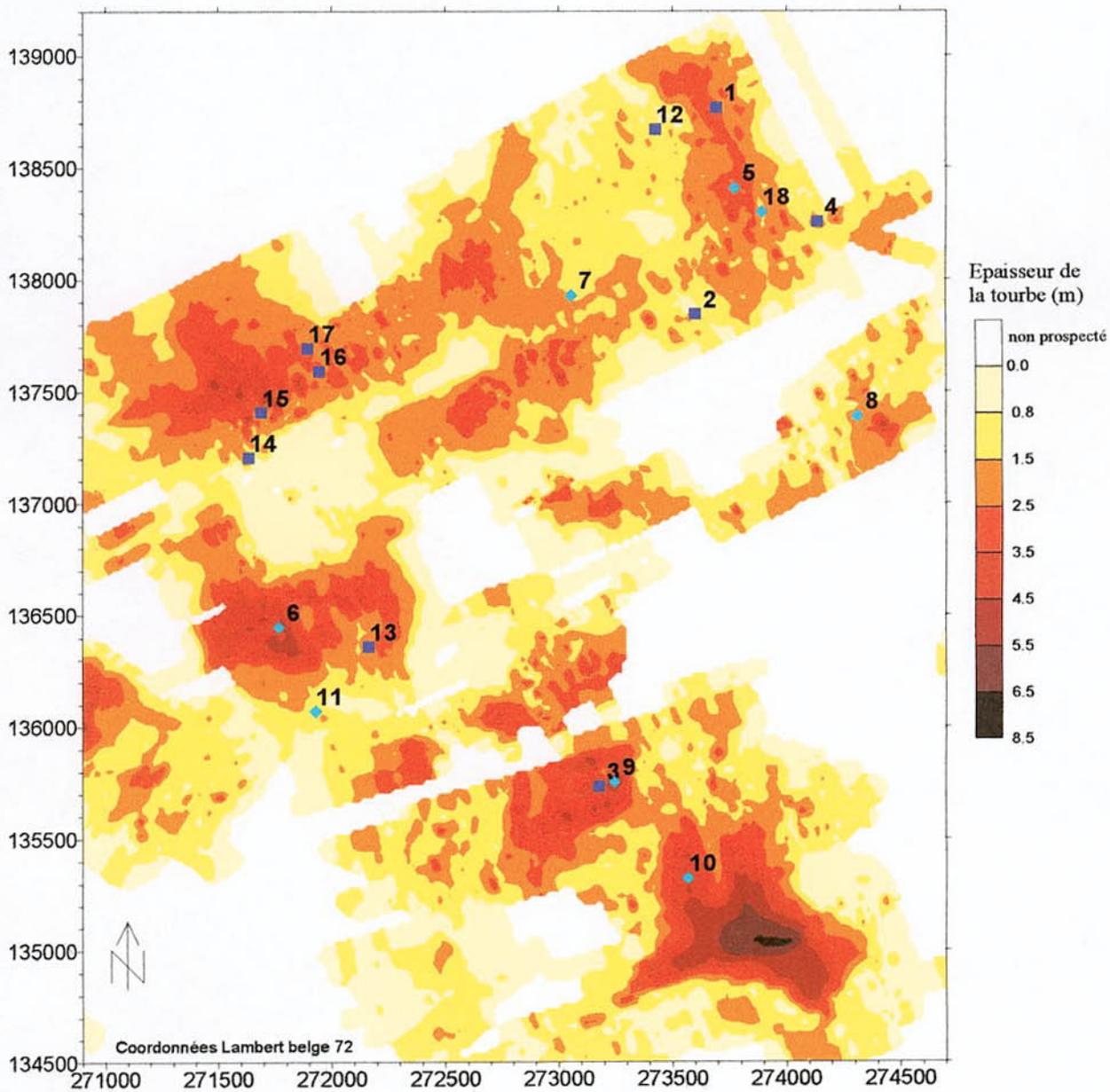


Fig. 28. Sondage n°1: image de la subsurface

trace de lithalse, Deux-Séries

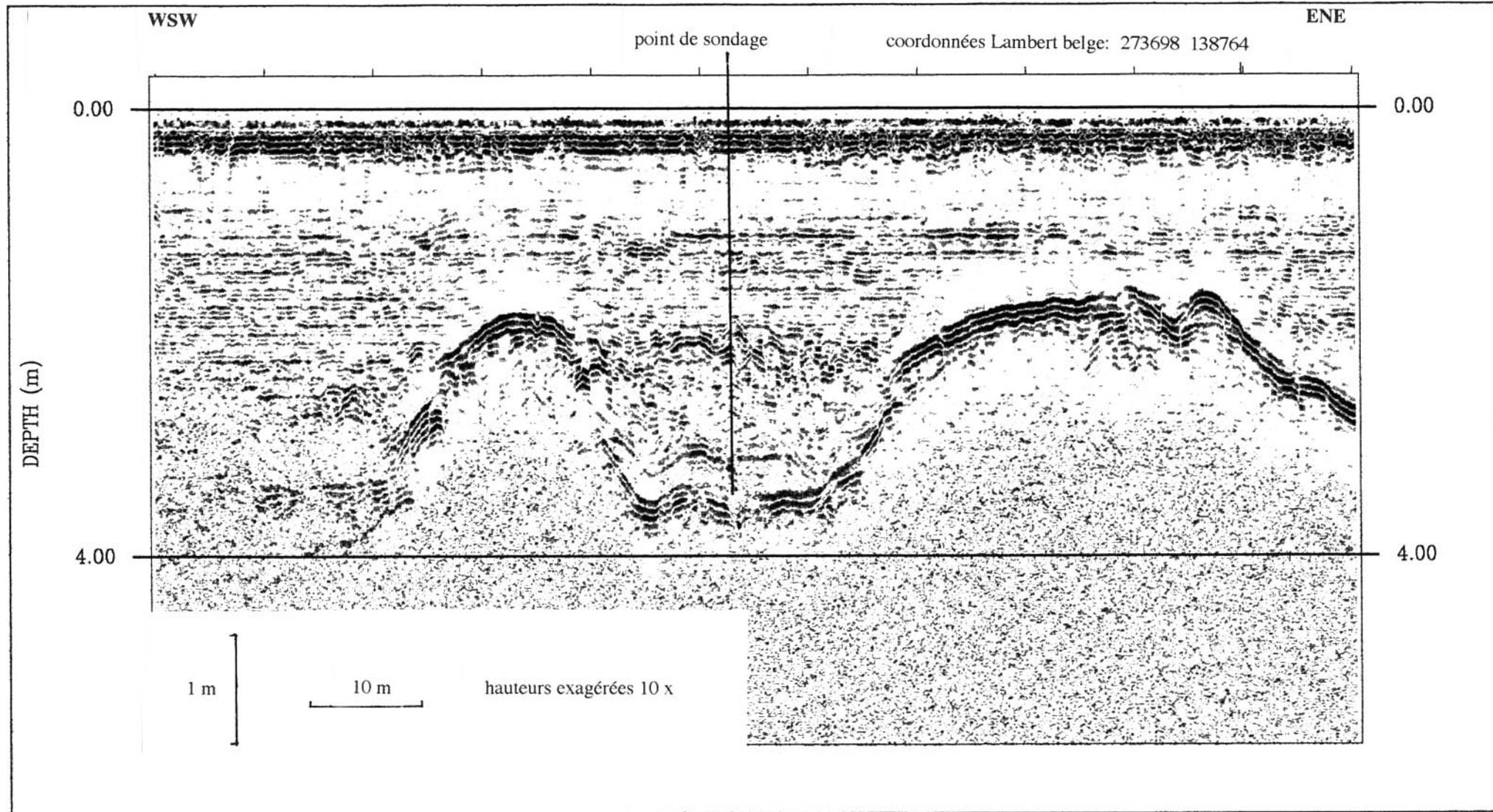


Fig. 29. Diagramme palynologique de la base du sondage n°1

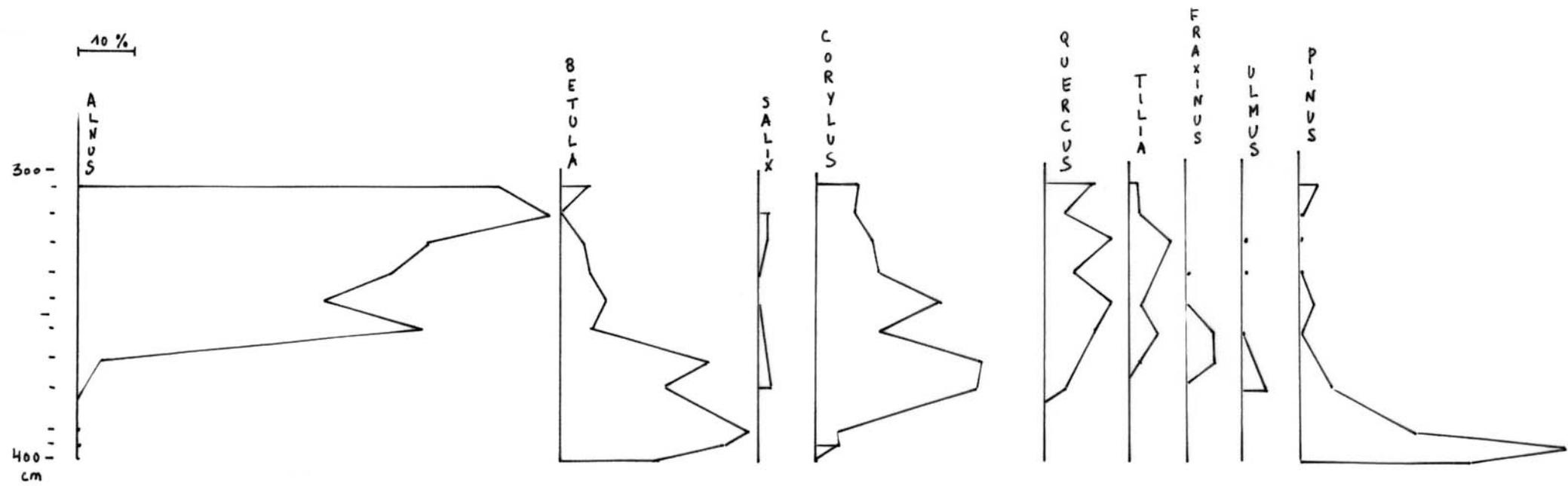


Fig. 30. Teneurs en eau et en cendres dans la tourbe du sondage n°1 (cuvette de lithalse, Deux-Séries)

Fig. 30

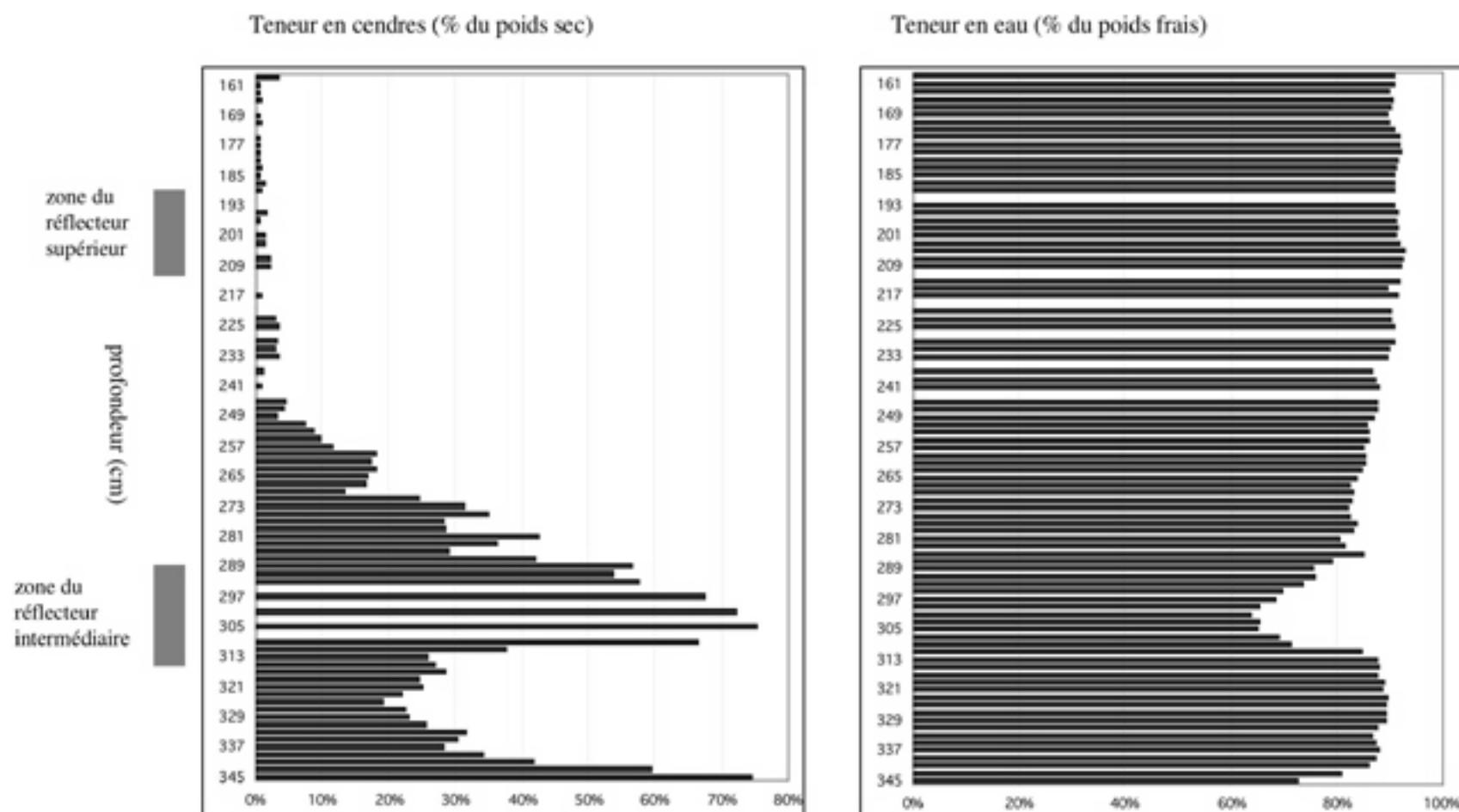


Fig. 31. Degré d'humification de la tourbe du sondage n°1 (cuvette de lithalse, Deux-Séries)

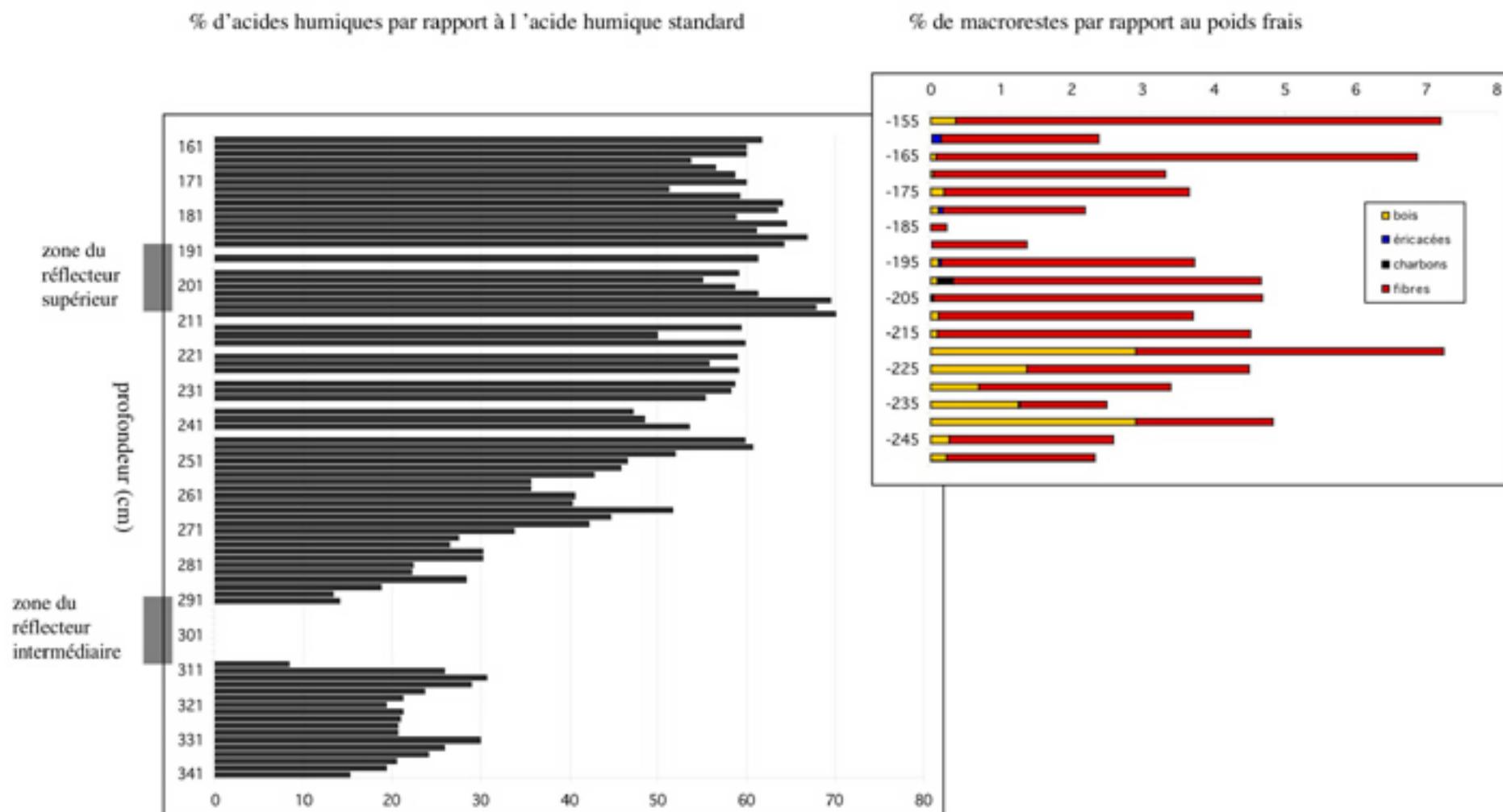


Fig. 31

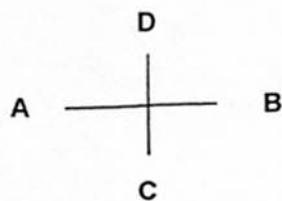
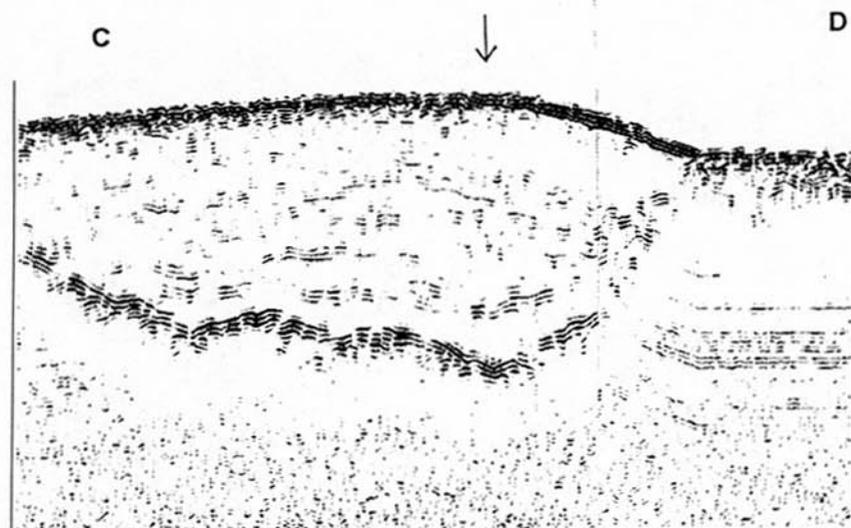
Fig. 32. Sondage n°2: image de la subsurface

trace de lithalse, sous butte à *Phragmites*, Deux-Séries



coordonnées Lambert belge: 273602 137841

point de sondage



10 m 1 m

hauteurs exagérées 5 x

Fig. 33. Diagramme palynologique de la base du sondage n°2

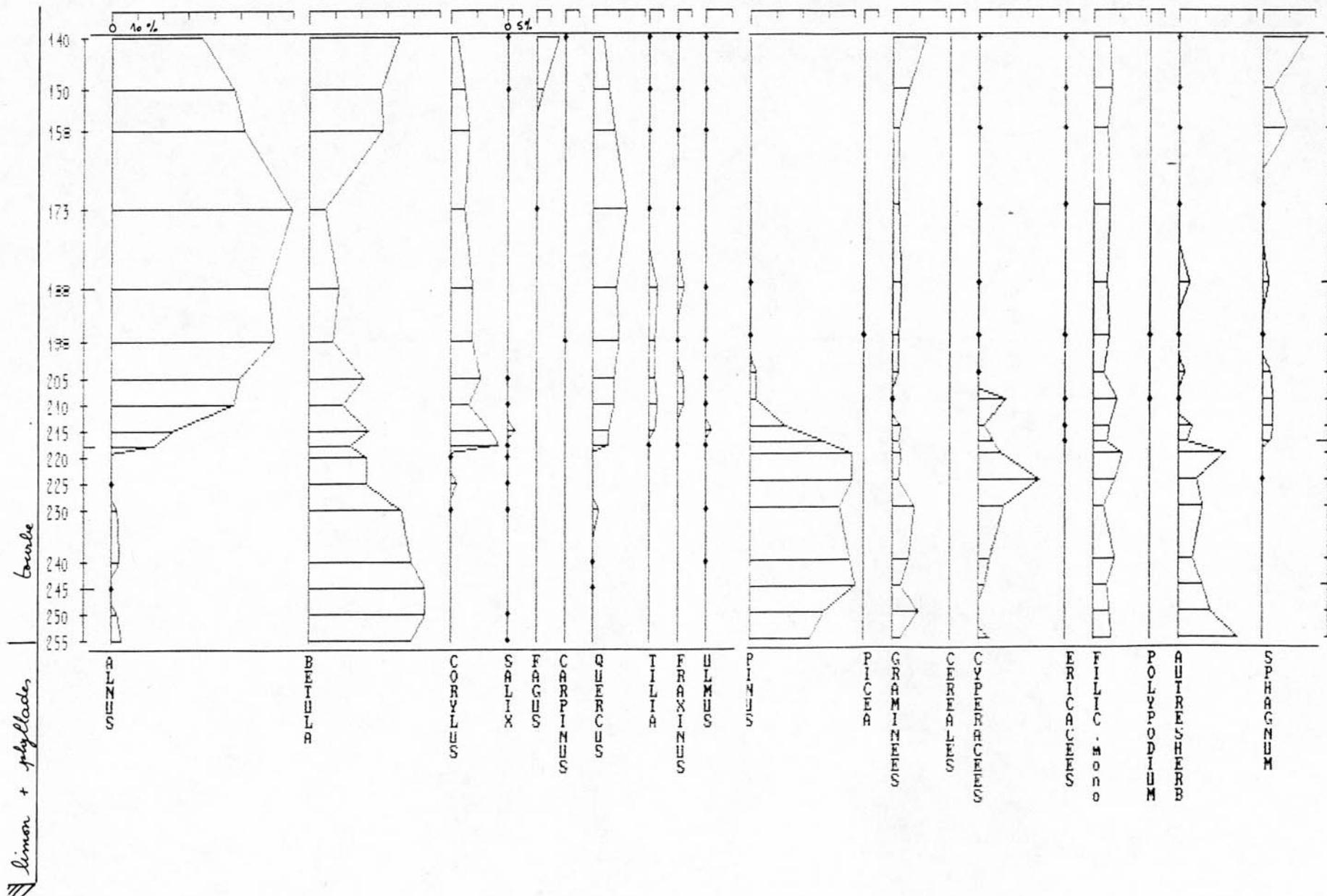


Fig. 34. Teneurs en eau et en cendres dans le matériau limoneux à la base du sondage n°2
(cuvette de lithalse sous une butte à *Phragmites*, Deux-Séries)

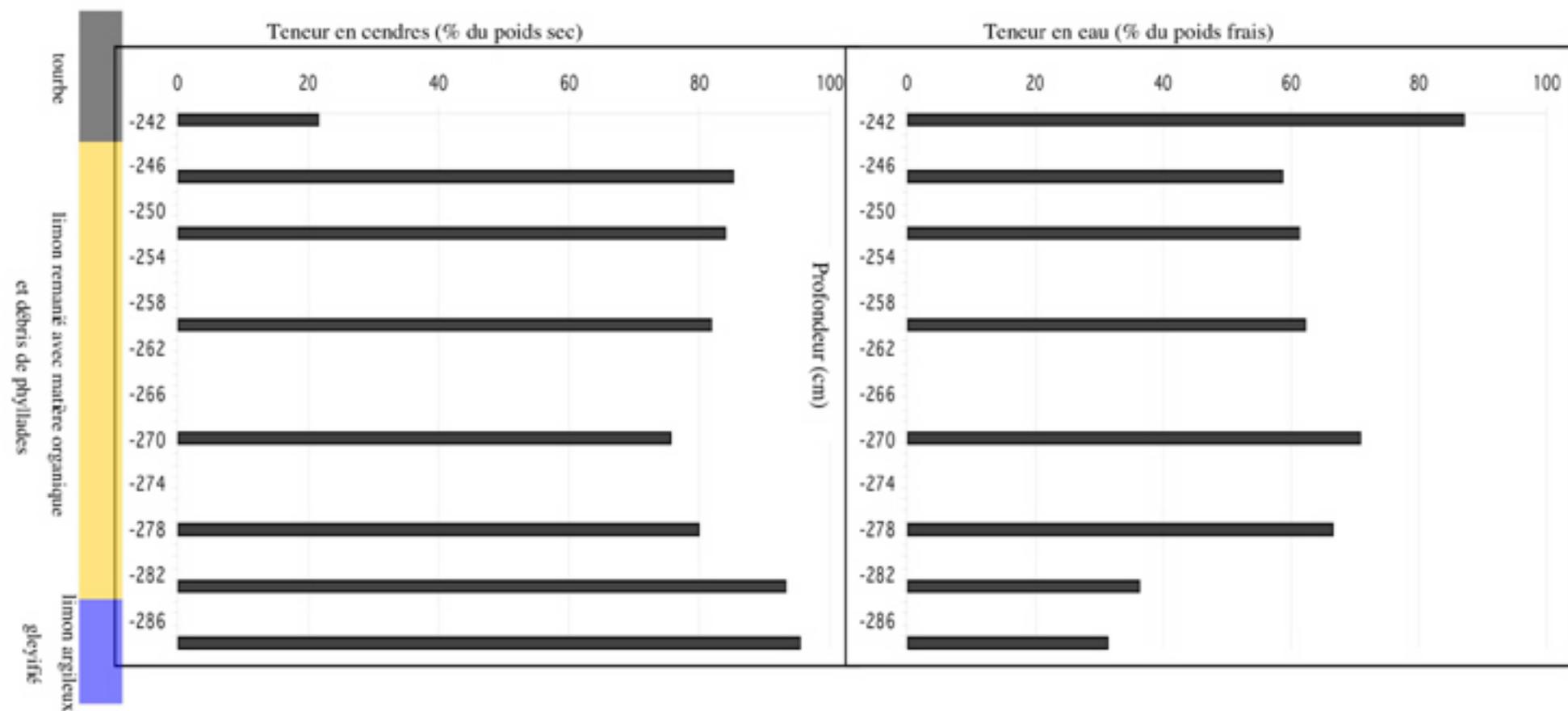


Fig. 35. Sondages n°3 et n°9: image de la subsurface

fagne Wallonne

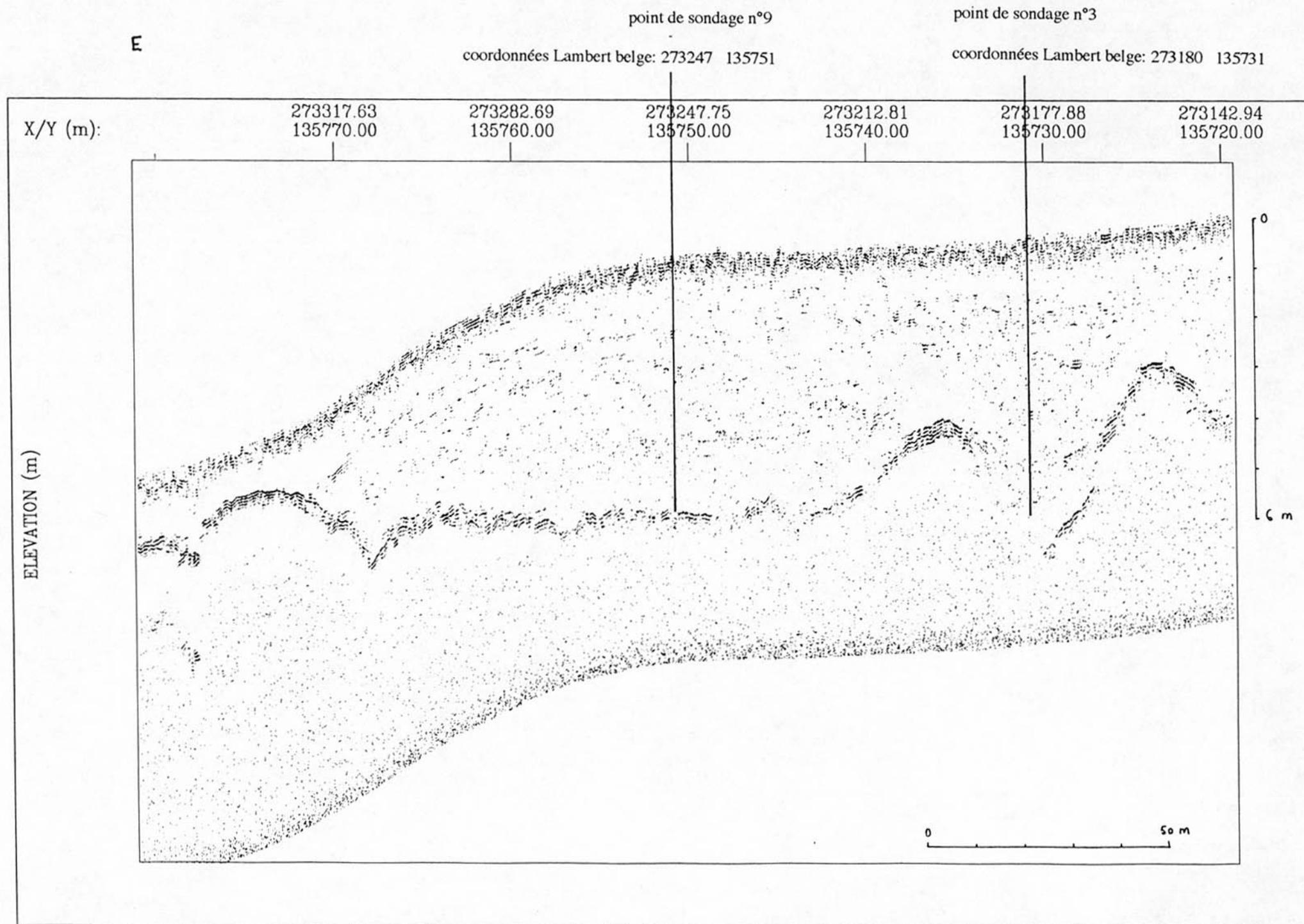


Fig. 36. Teneurs en eau et en cendres dans la tourbe du sondage n°3

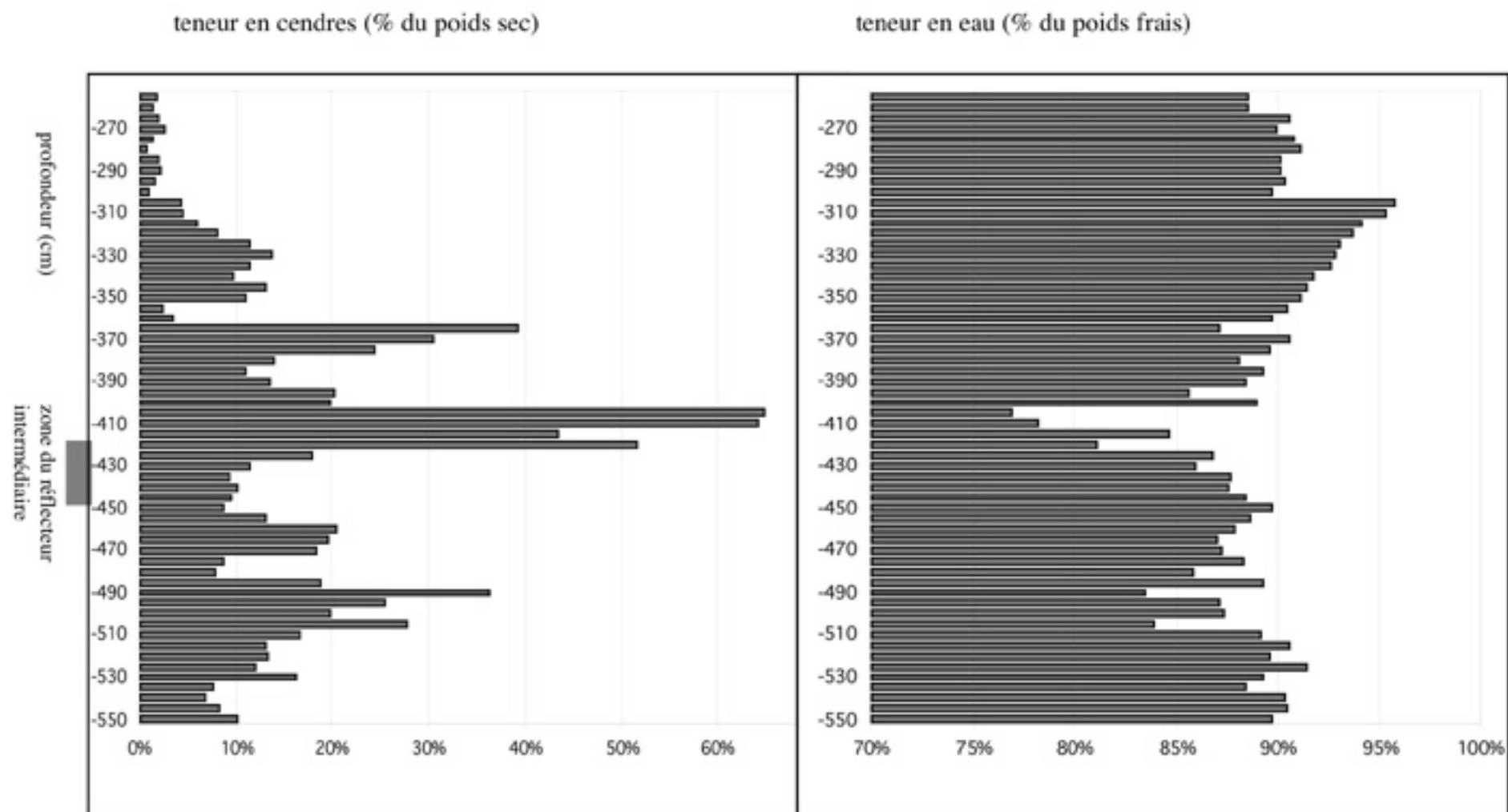


Fig. 38. Diagramme palynologique de la base du sondage n°9

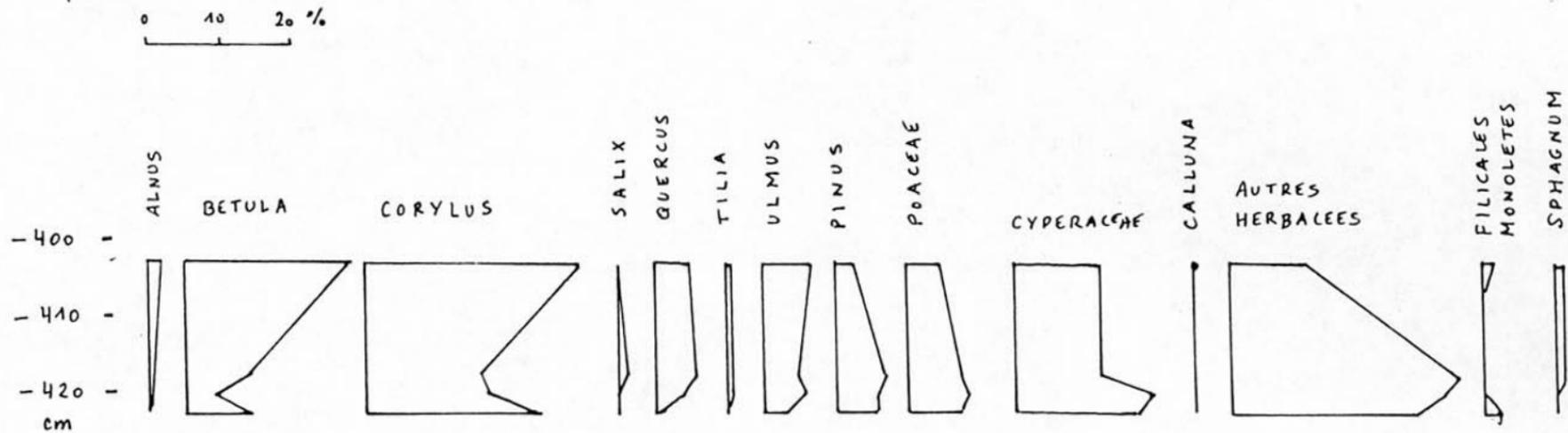


Fig. 39. Diagramme palynologique de la base du sondage n°5

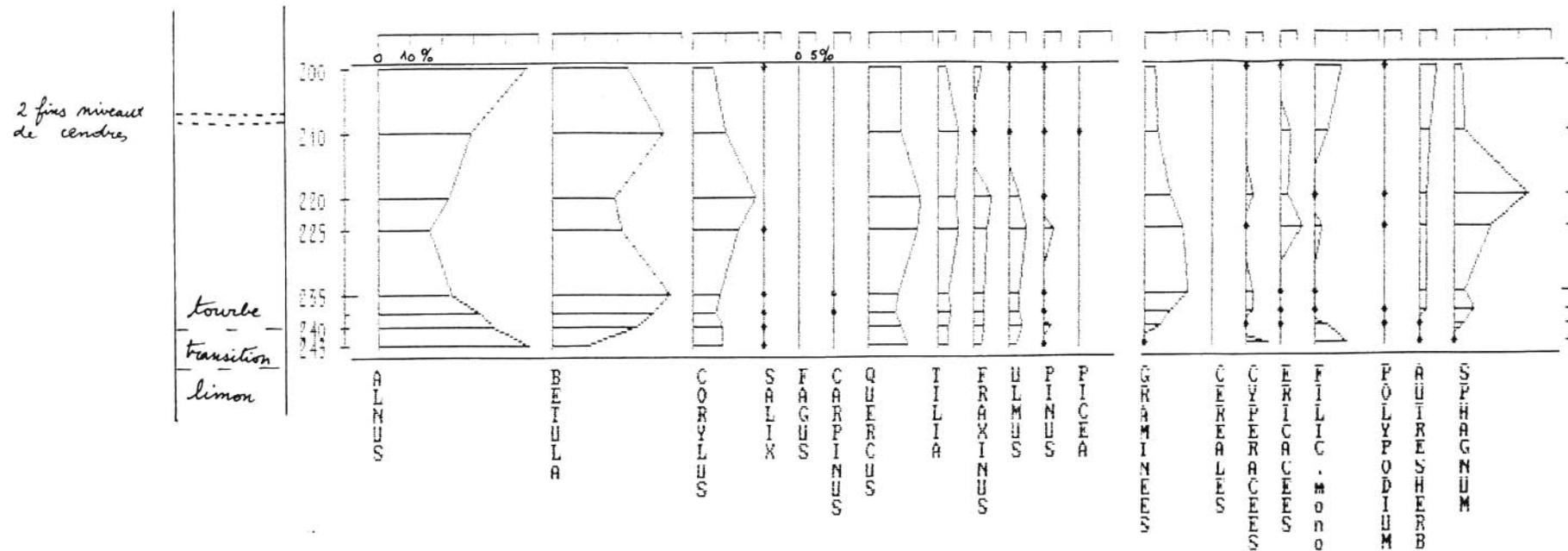


Fig. 40. Diagramme palynologique de la base du sondage n°6

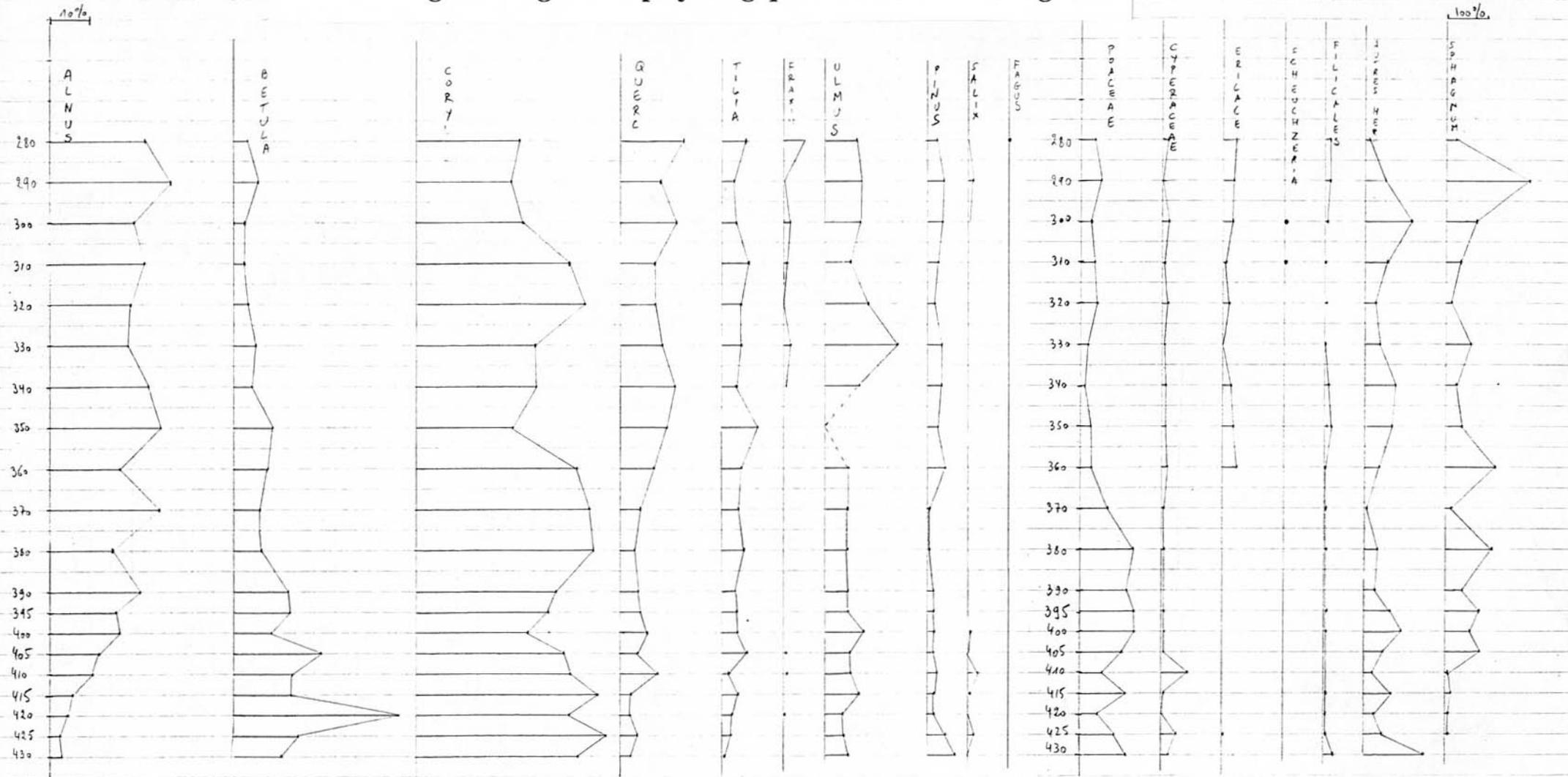


Fig. 41. Sondage n°6: image de la subsurface

Deux-Séries, massif A

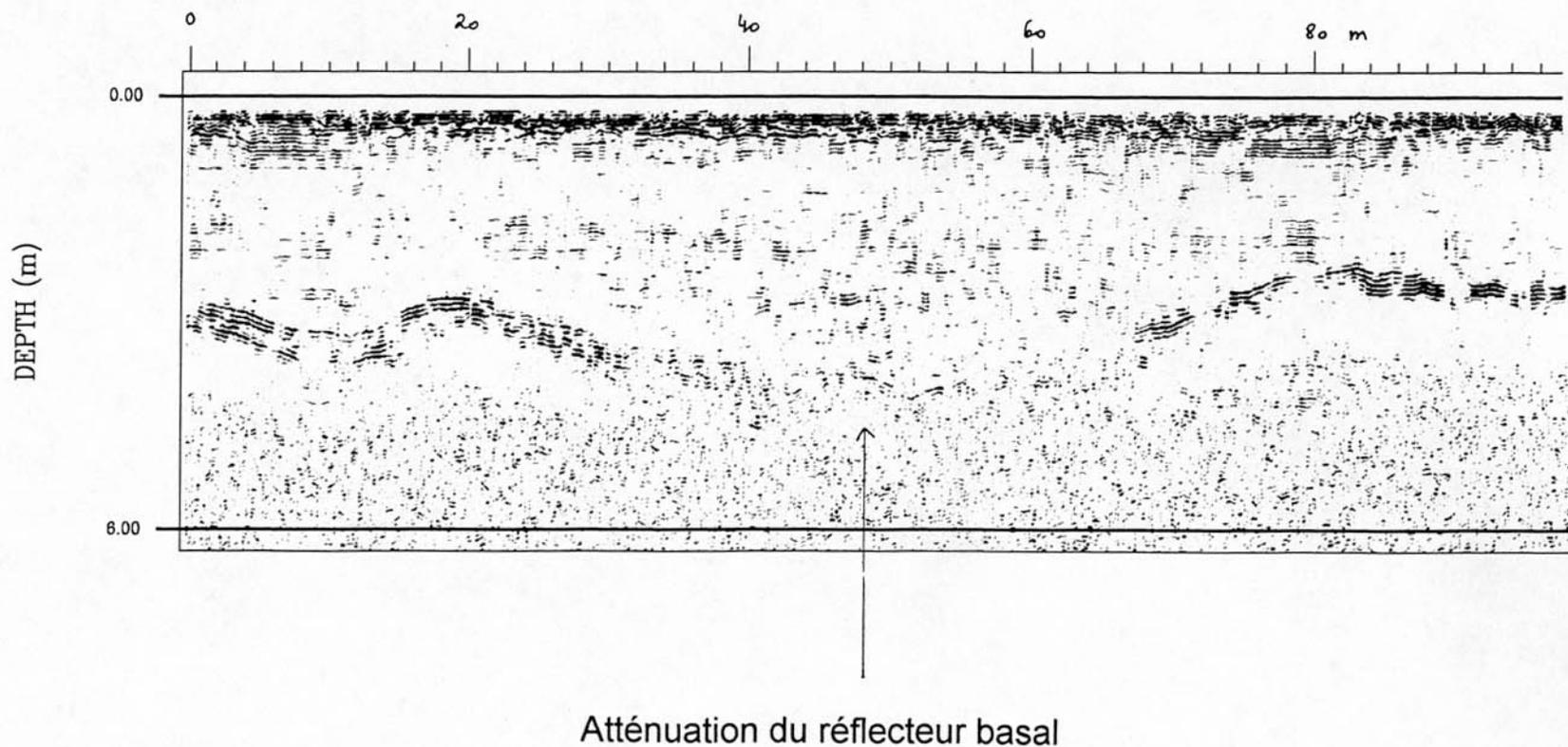


Fig. 42. Sondage n°7: image de la subsurface

sources de la Soor

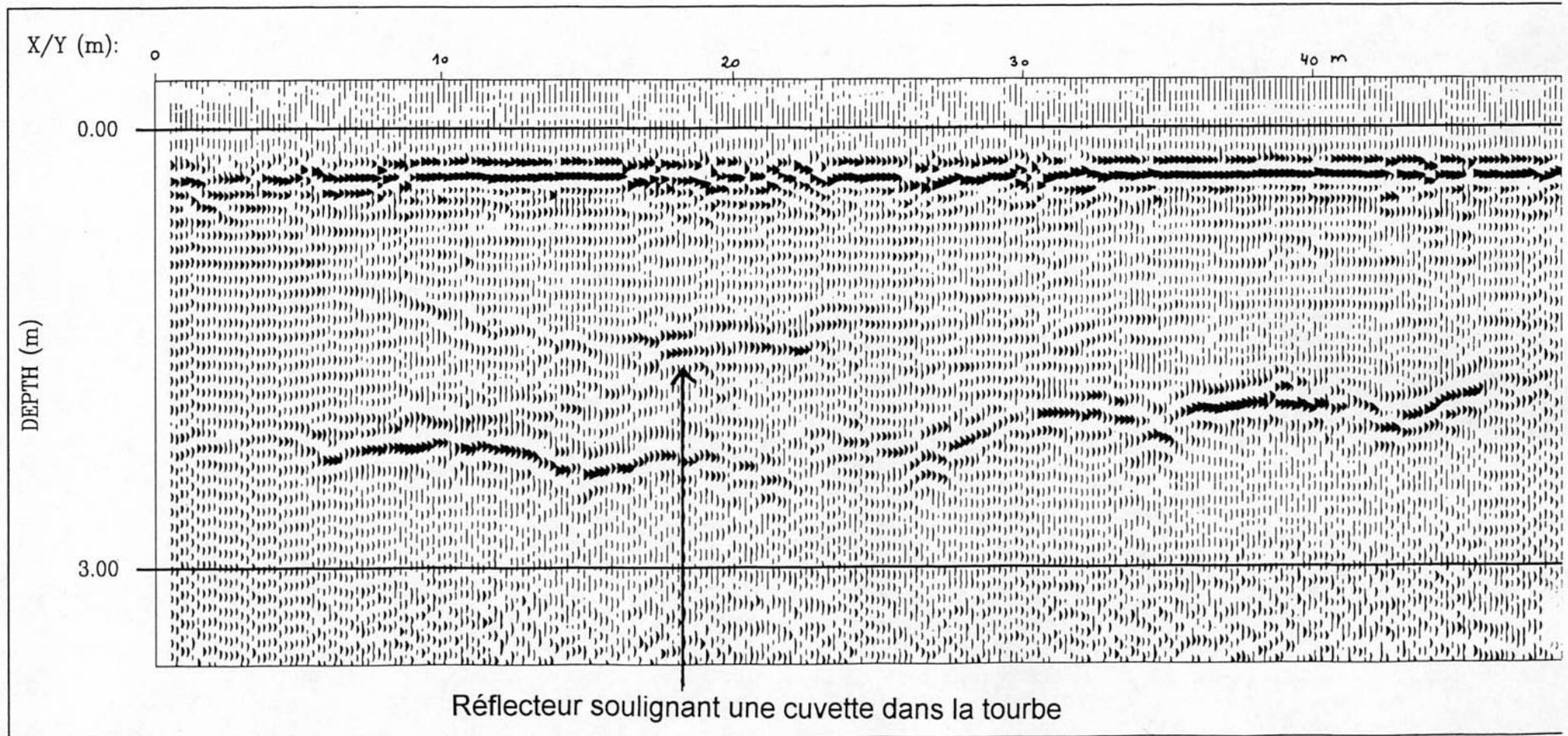


Fig. 43. Diagramme palynologique du sondage n°7

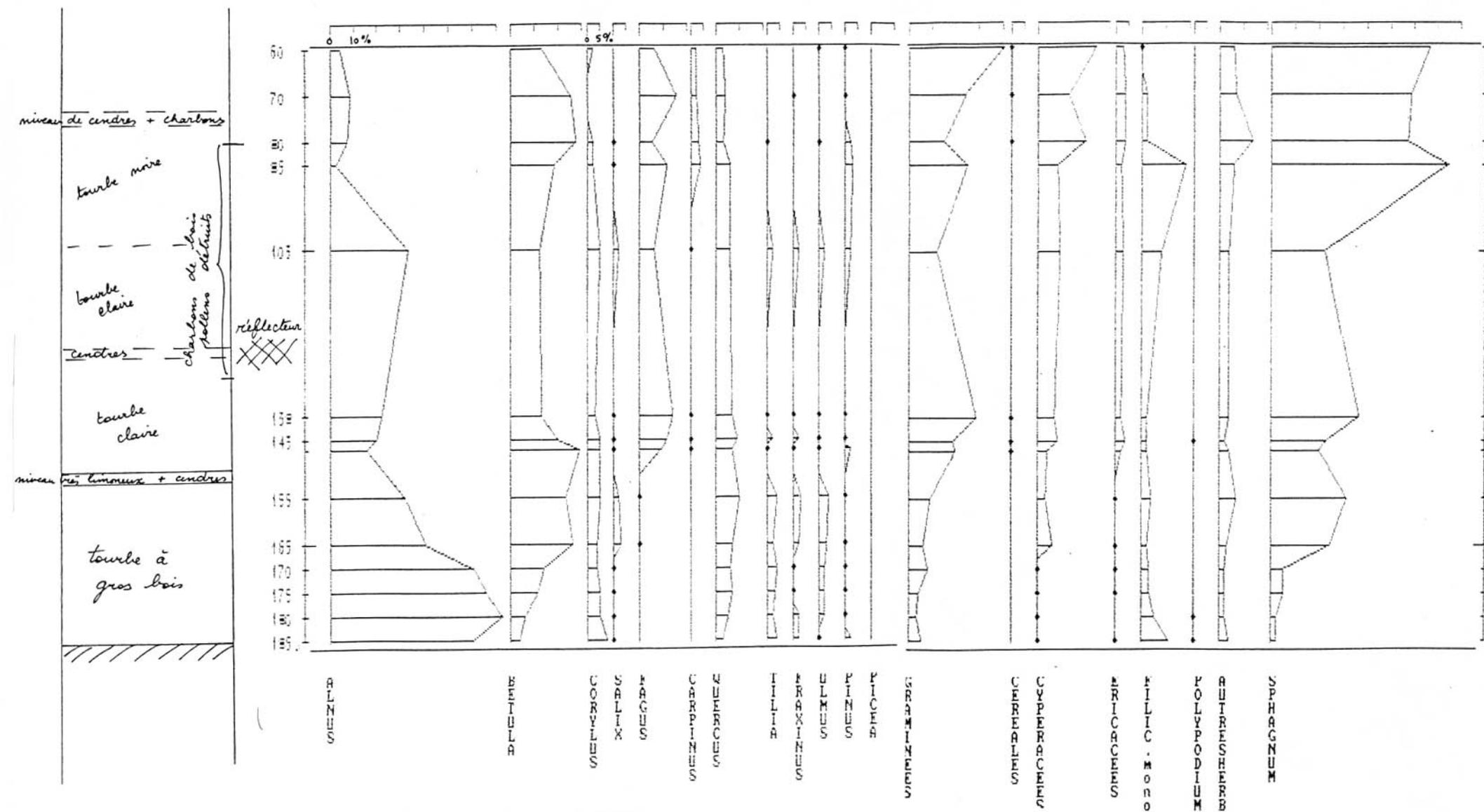


Fig. 44. Sondage n°8: image de la subsurface

Deux-Séries, butte à *Phragmites*

Coordonnées Lambert belge: 274315 137385

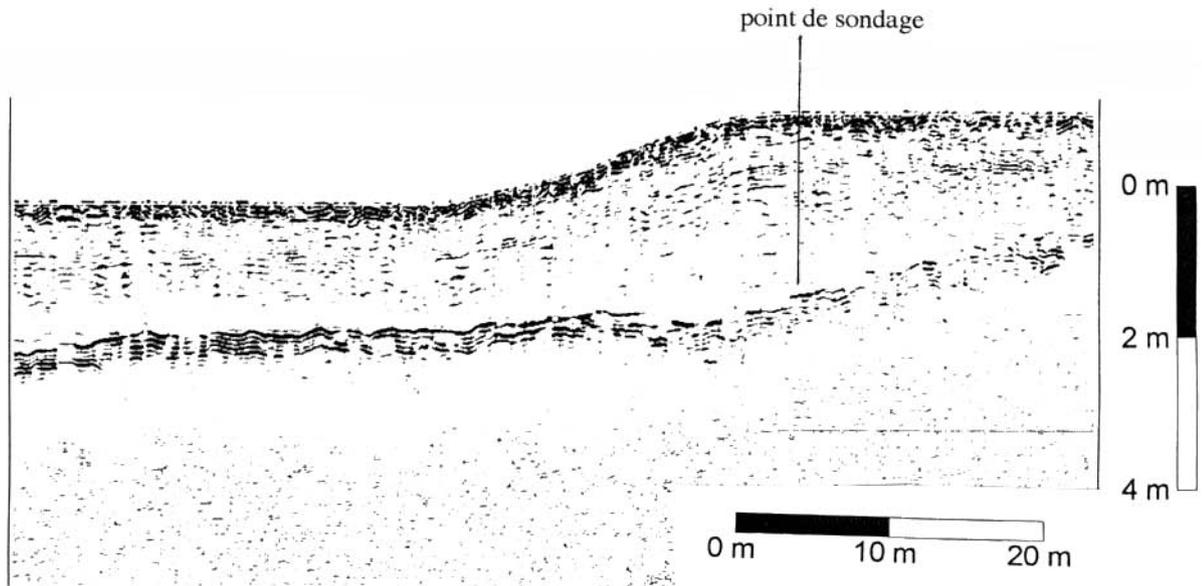


Fig. 45. Diagramme palynologique de la base du sondage n°8

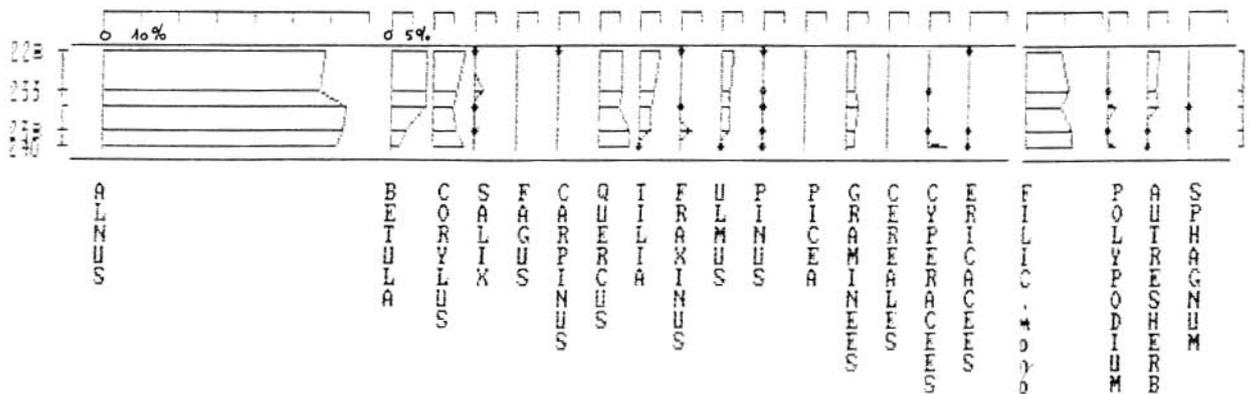


Fig. 46. Sondage n°10: image de la subsurface

Fagne Wallonne

point de sondage Coordonnées Lambert belge: 273569 135322

E

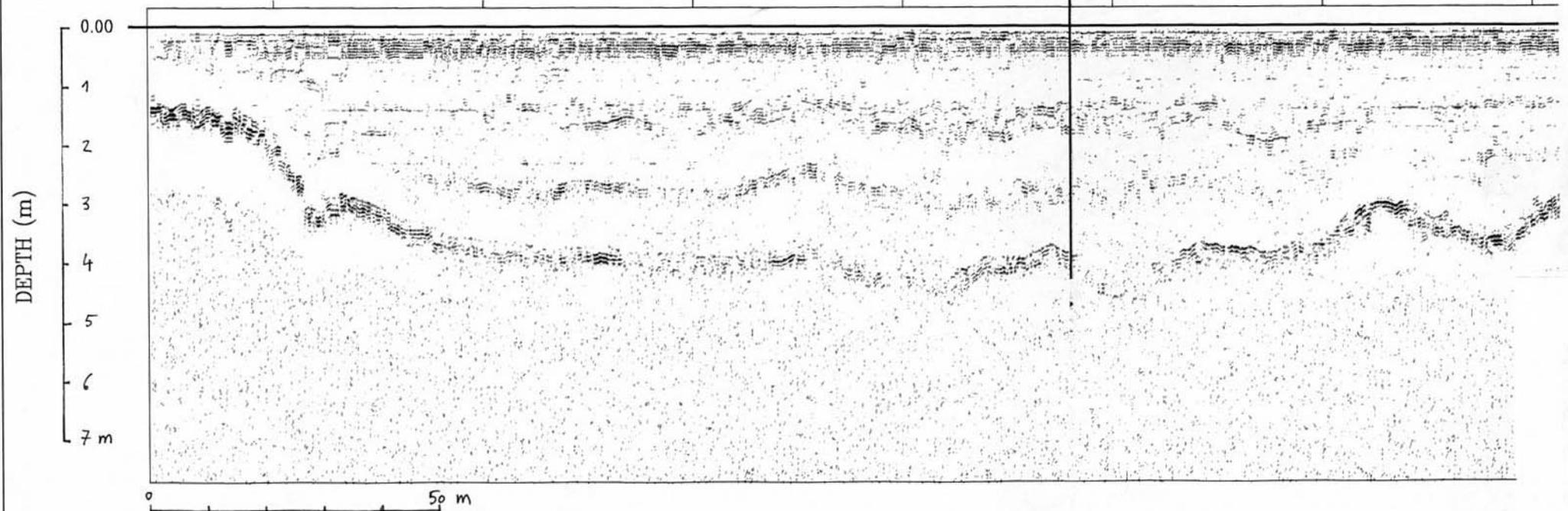
W

X/Y (m):

273611.88
135340.00

273542.16
135320.00

273472.
135300.



0 50 m

Fig. 47. Diagramme palynologique du sondage n°10

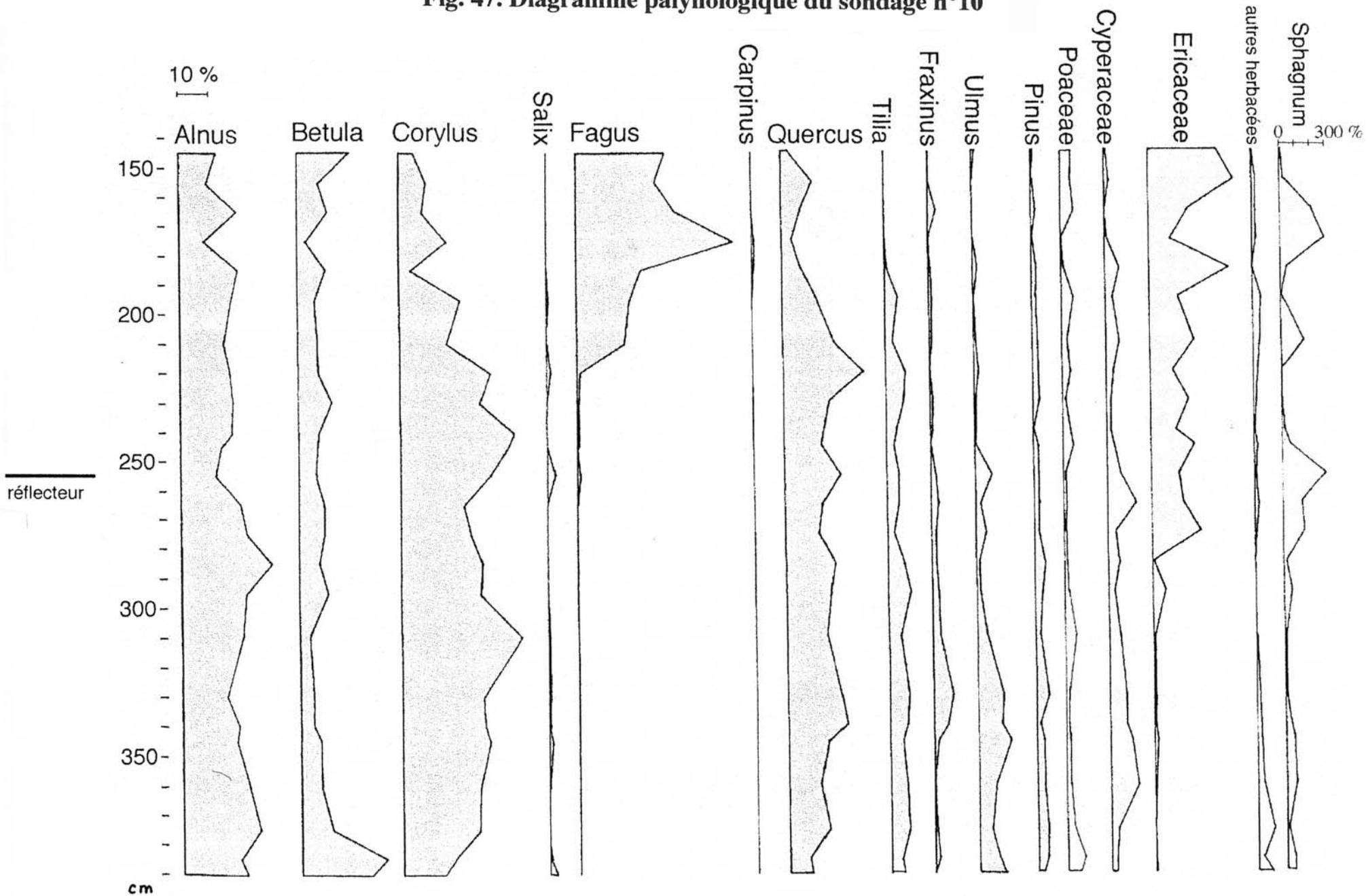


Fig. 48. Teneurs en eau et en cendres dans la tourbe du sondage n°10

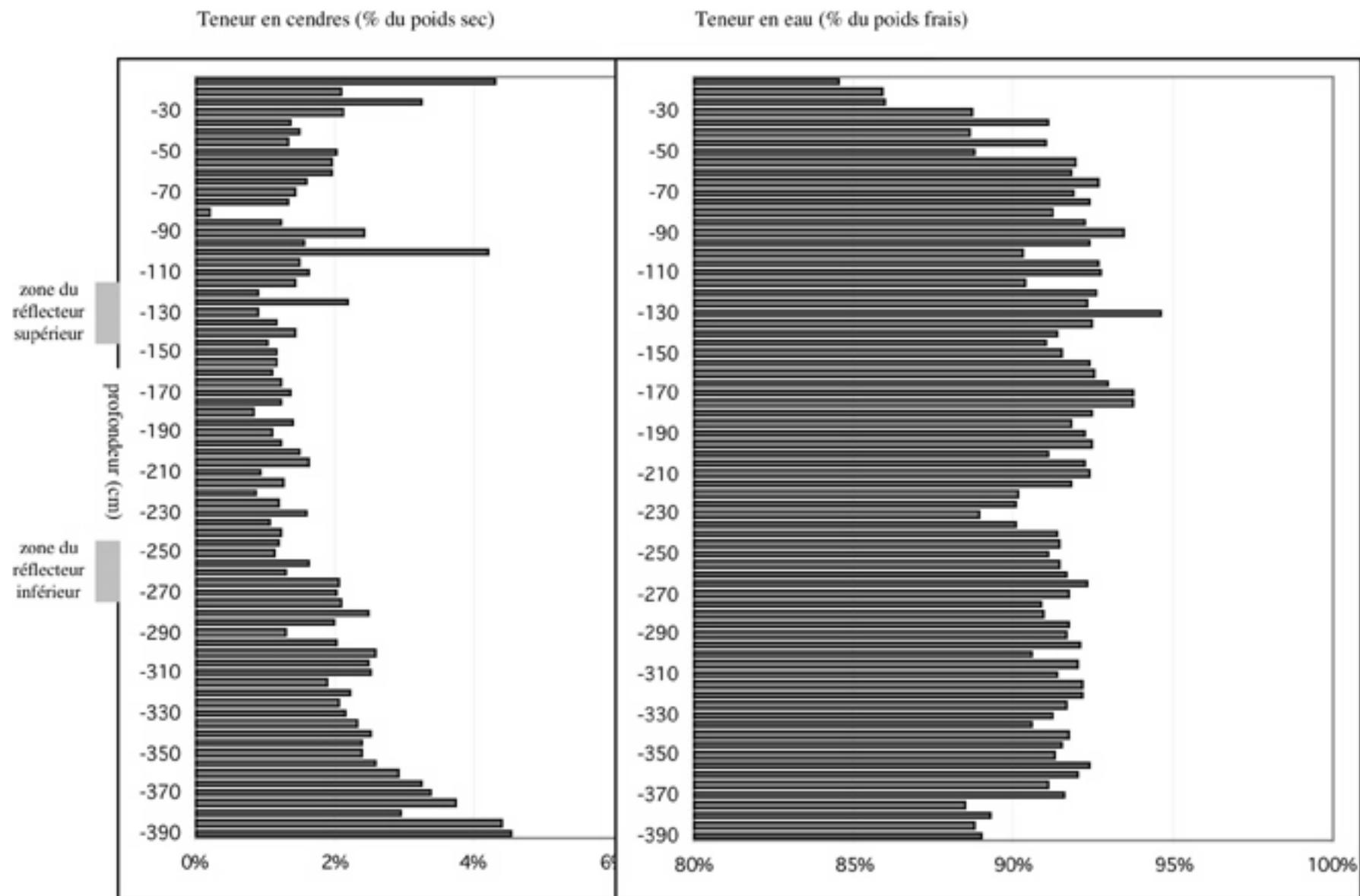


Fig. 48

Fig. 49. Degré d'humification de la tourbe du sondage n°10

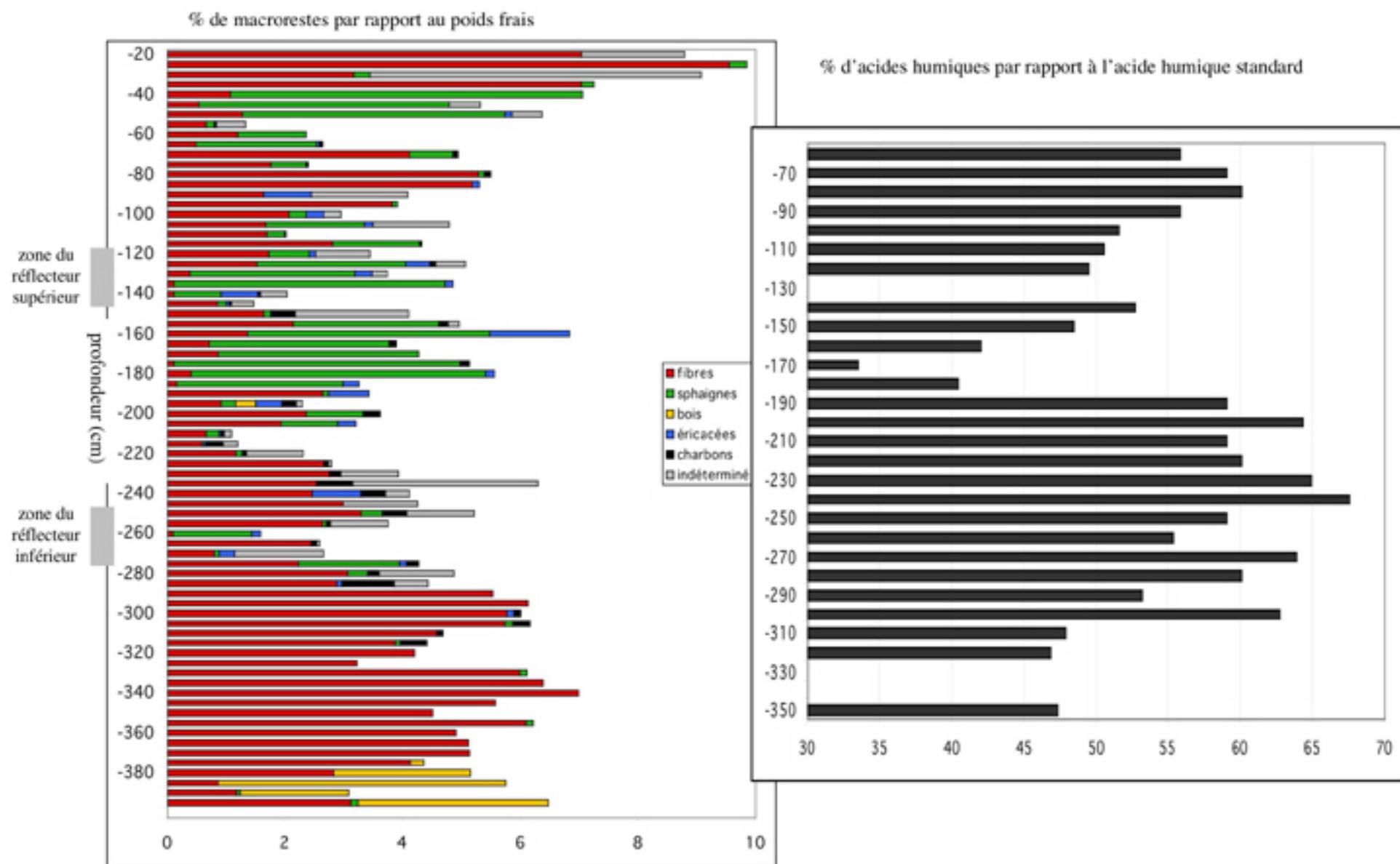


Fig. 49

Fig. 50. Sondage n°18: image de la subsurface

Deux-Séries, structure allongée

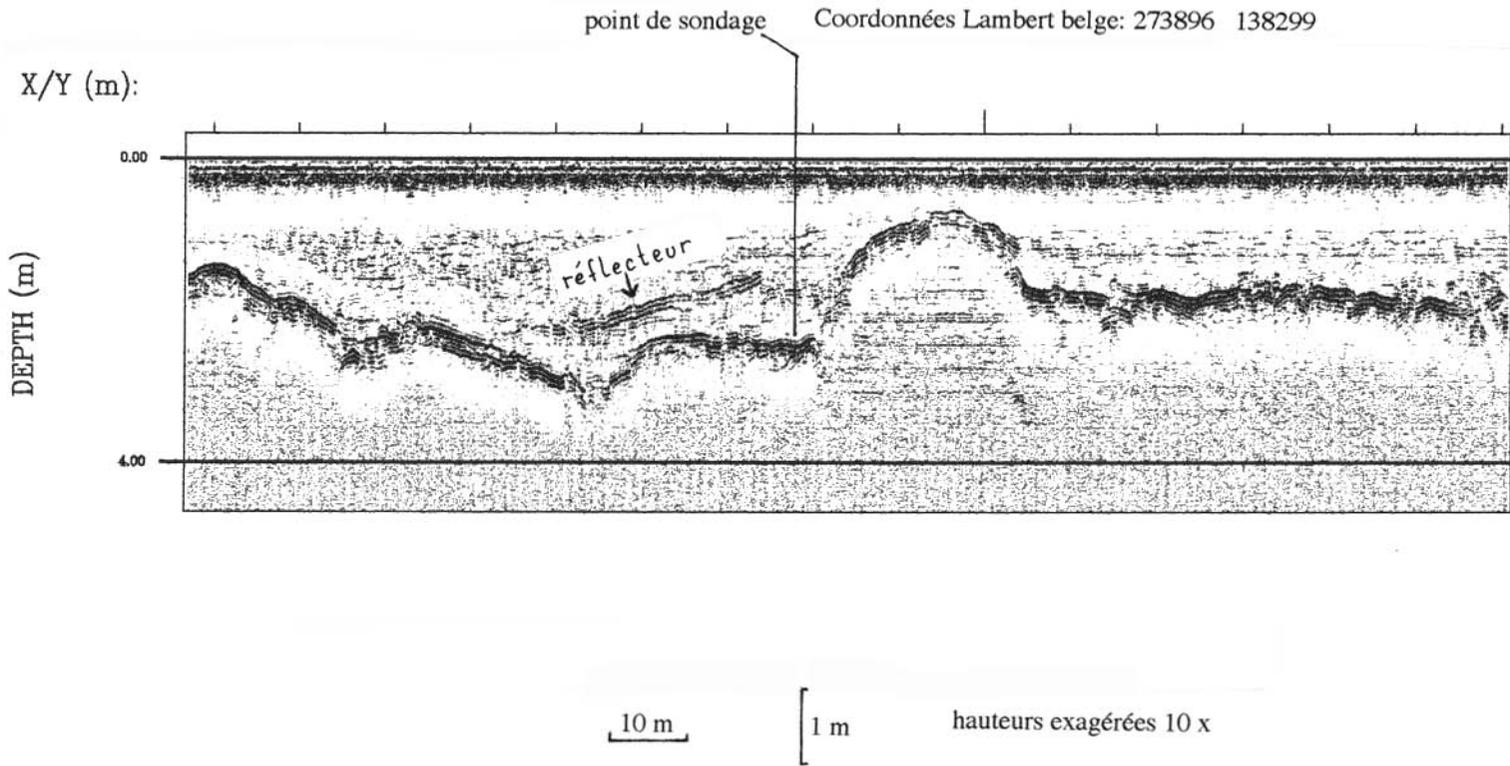


Fig. 51. Sondage n°13: image de la subsurface

trace de lithalse, Deux-Séries

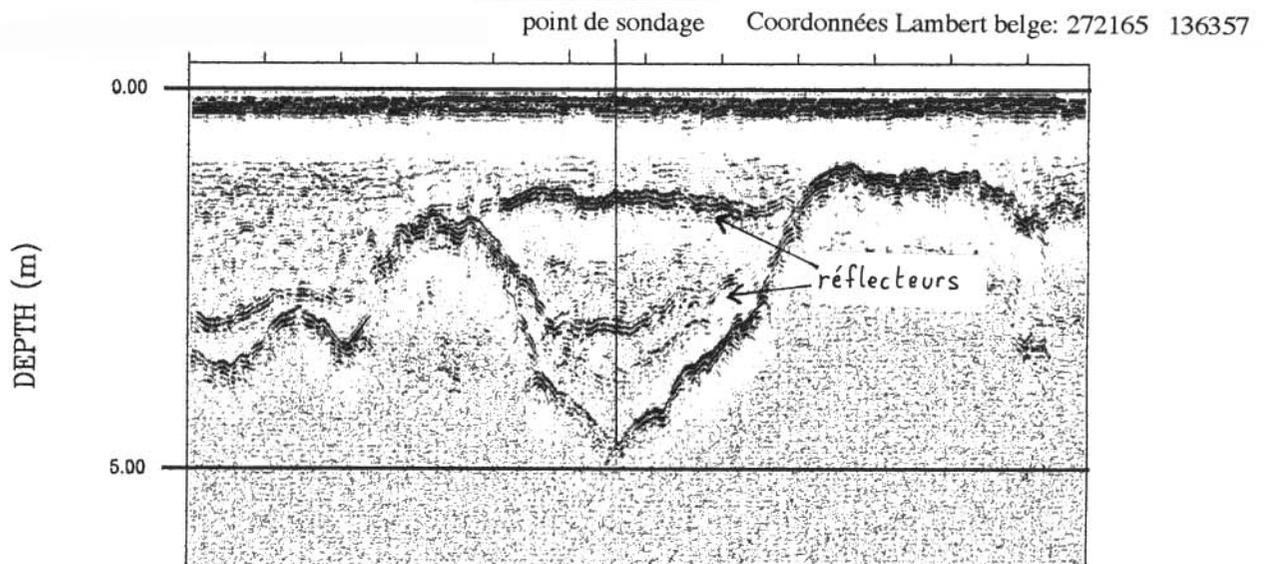


Fig. 52. Sondage n°11: image de la subsurface

Deux-Séries, dépôt de crue de la Helle

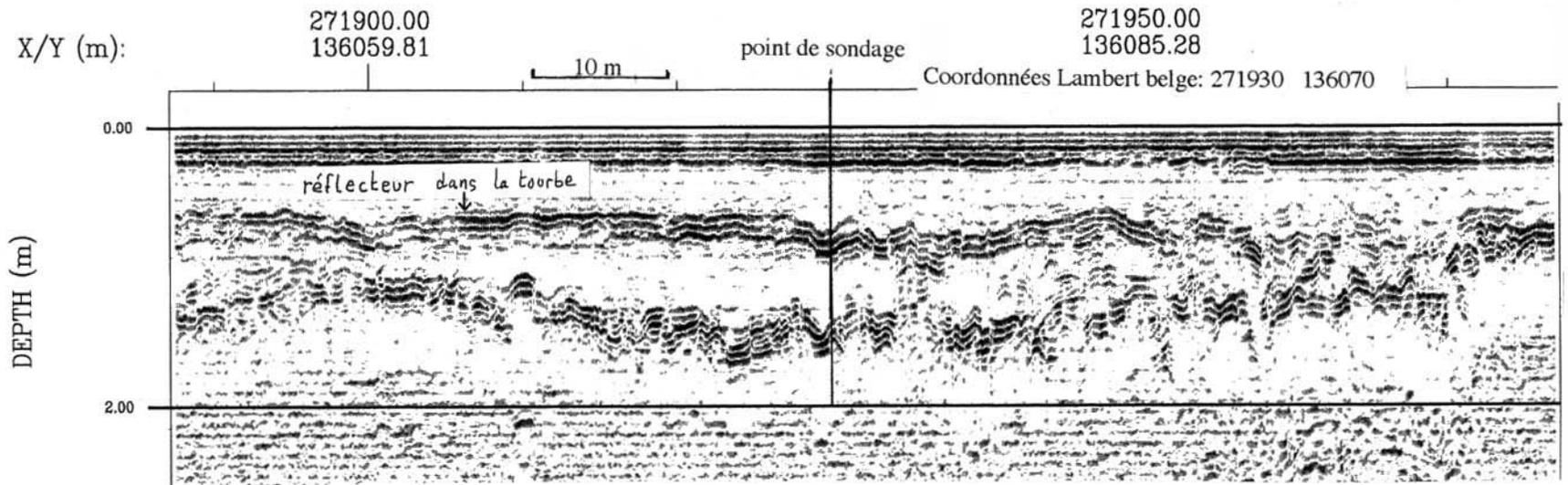


Fig. 53. Extension du dépôt de crue de la Helle

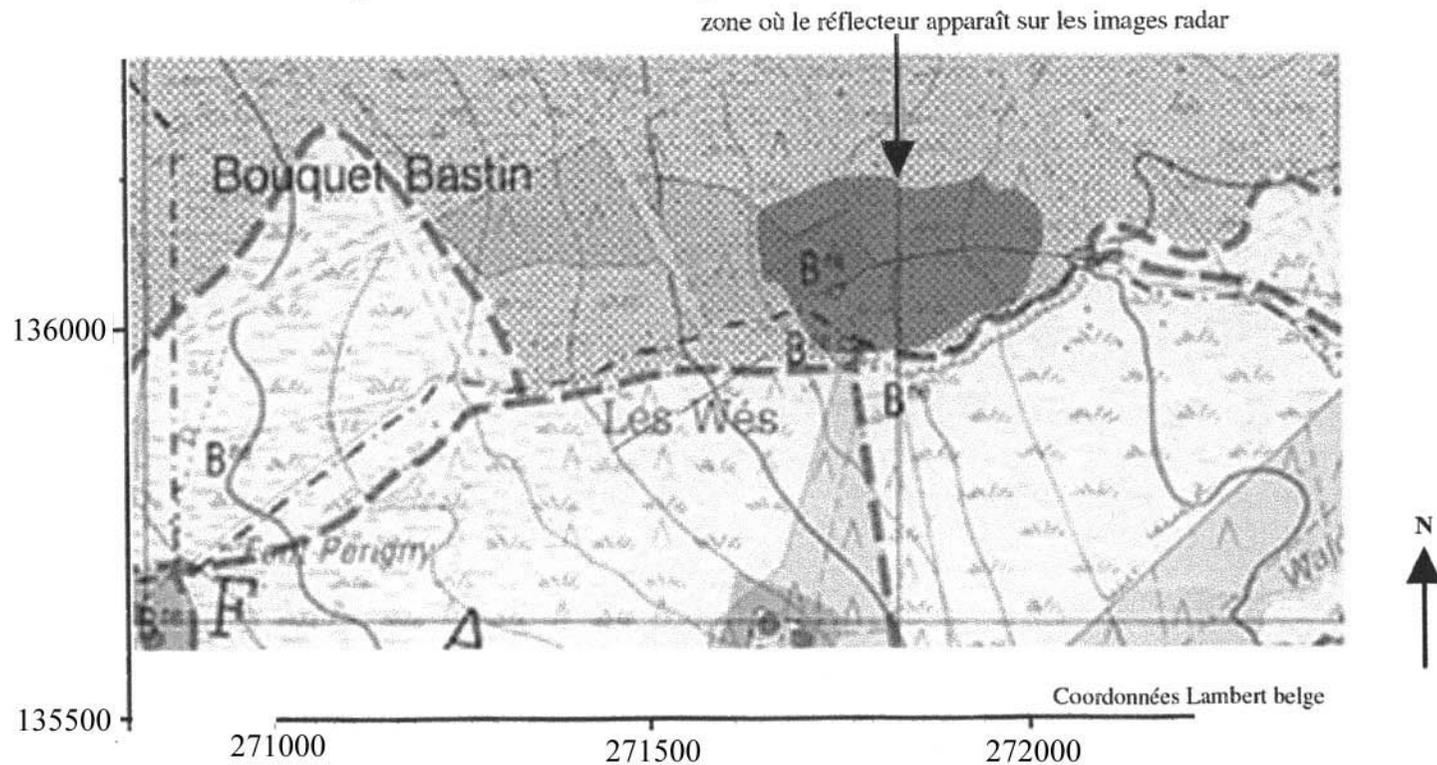


Fig. 54. Teneurs en eau et en cendres dans le dépôt du sondage n°11

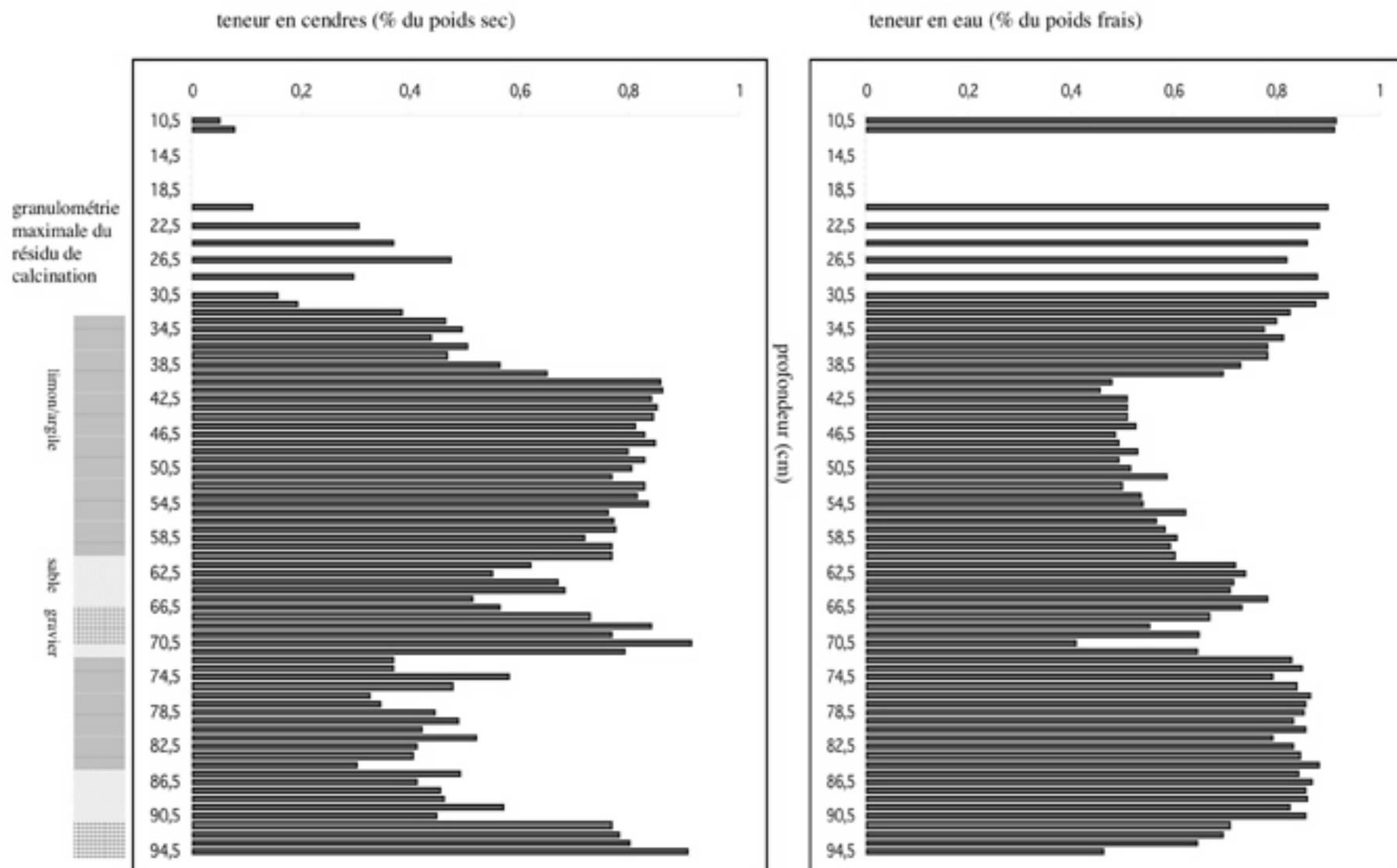


Fig. 54

Fig. 55. Réflecteur au Misten

sw

NE

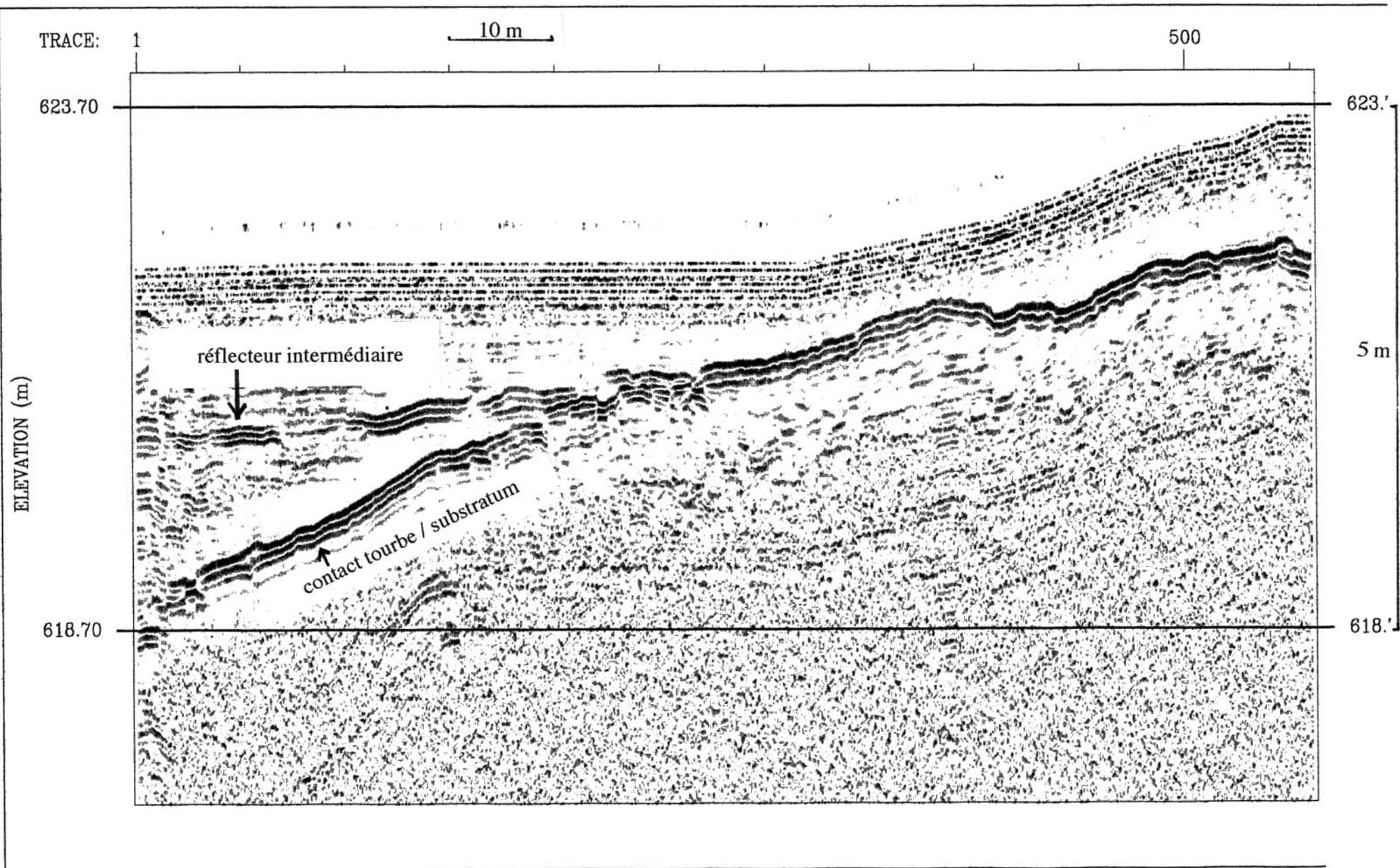


Fig. 56. Relation entre la végétation de surface et la morphologie des dépôts tourbeux

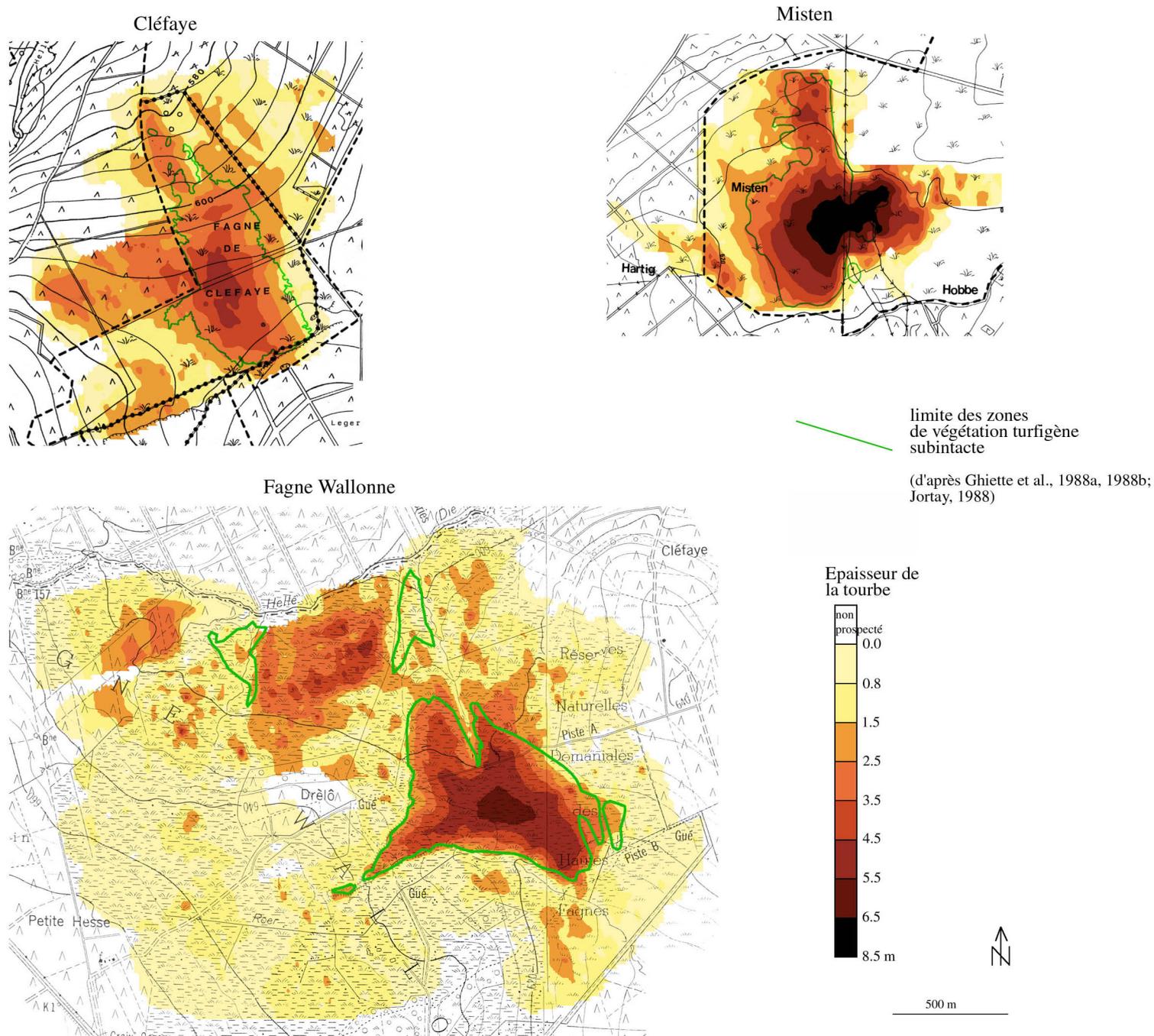


Fig. 57. Carte des zones à végétation mésotrophe prospectées - relation avec le relief de subsurface

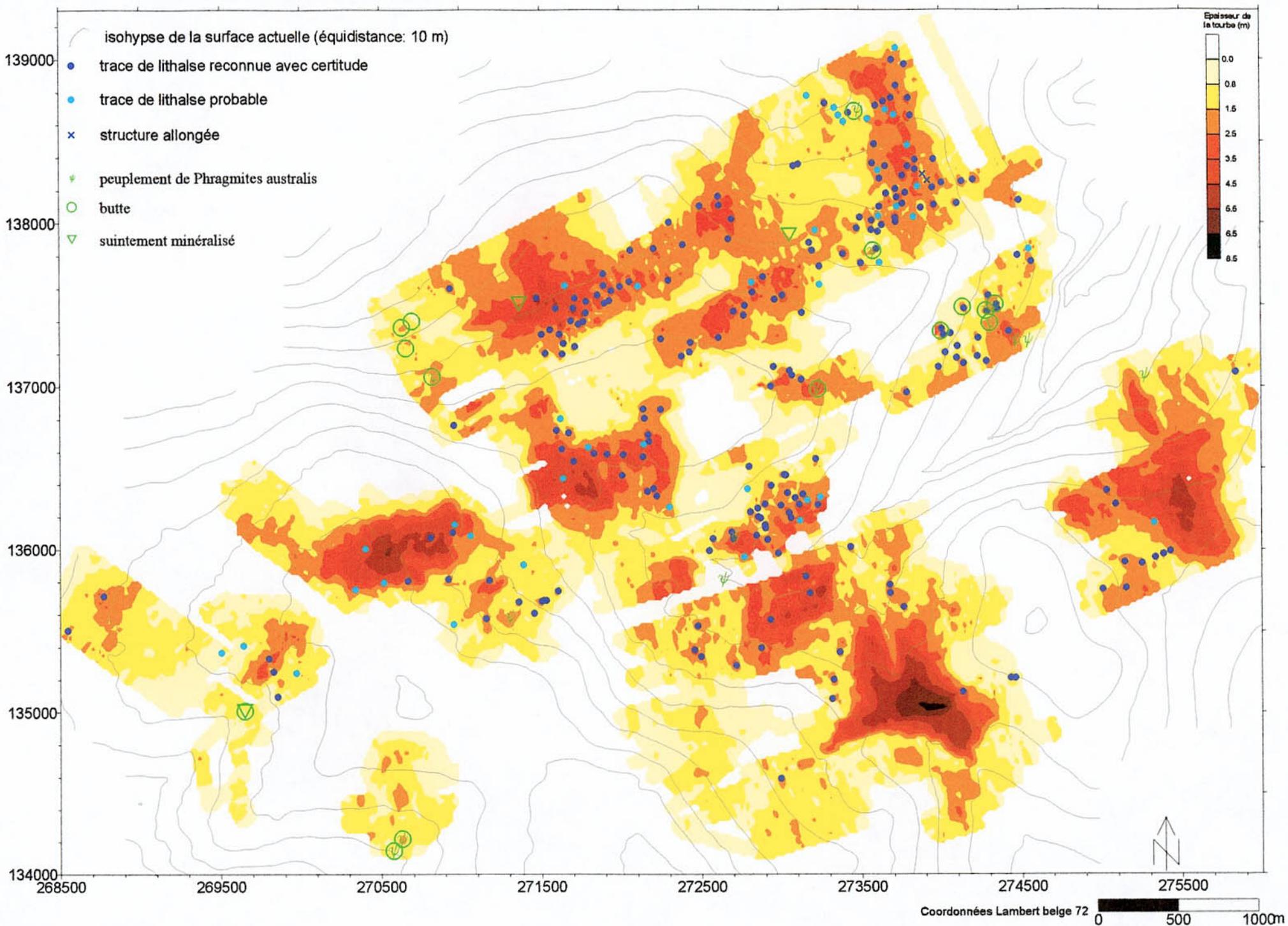
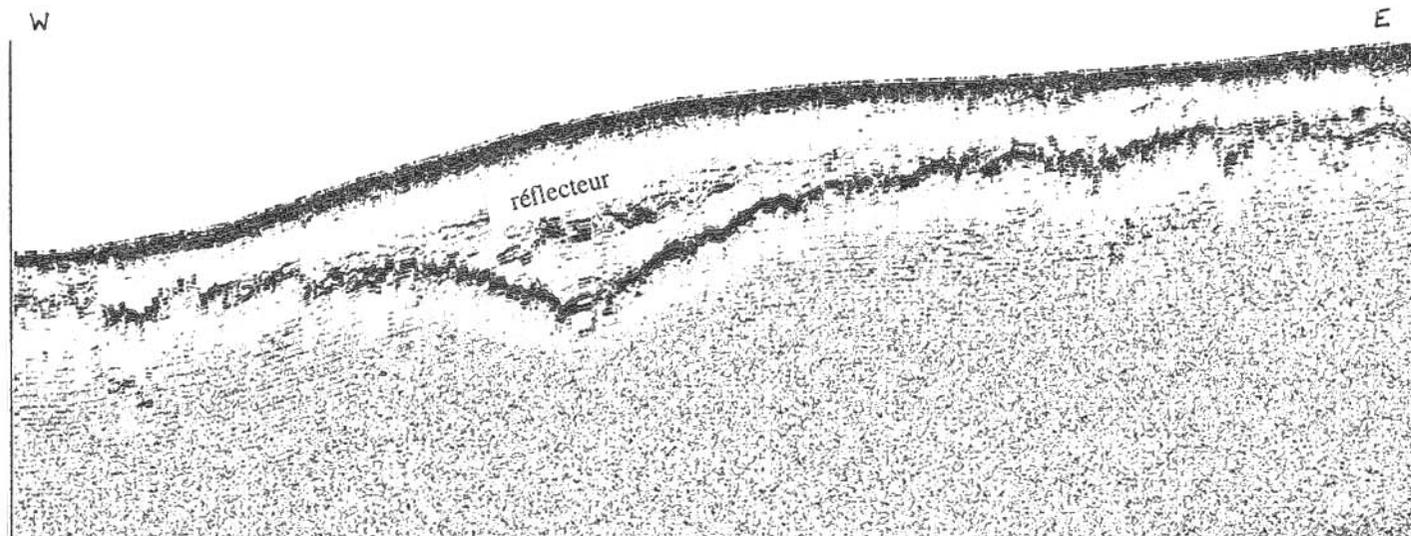


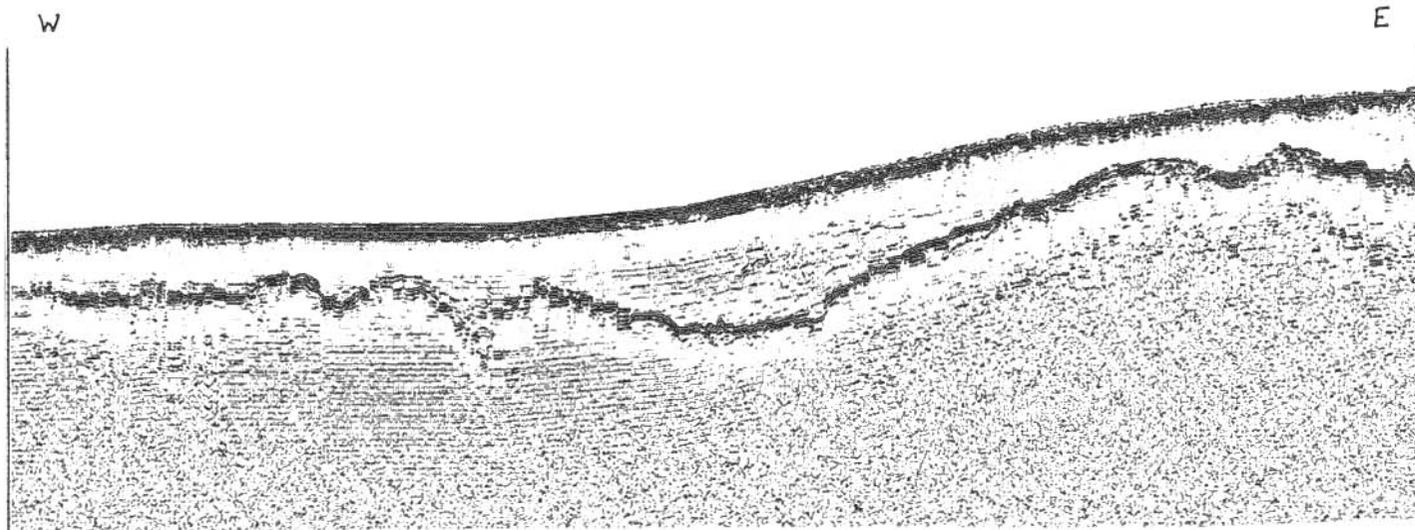
Fig. 58. Buttes à *Phragmites* de la Poleûr: image de la subsurface



Butte E

la topographie de surface n'a une précision que de 1 m

1 m 10 m



Butte W

hauteurs exagérées 10 x

Fig. 59. Inclinaison du réflecteur dans une butte à *Phragmites* des Deux-Séries (n°12, fig. 27)

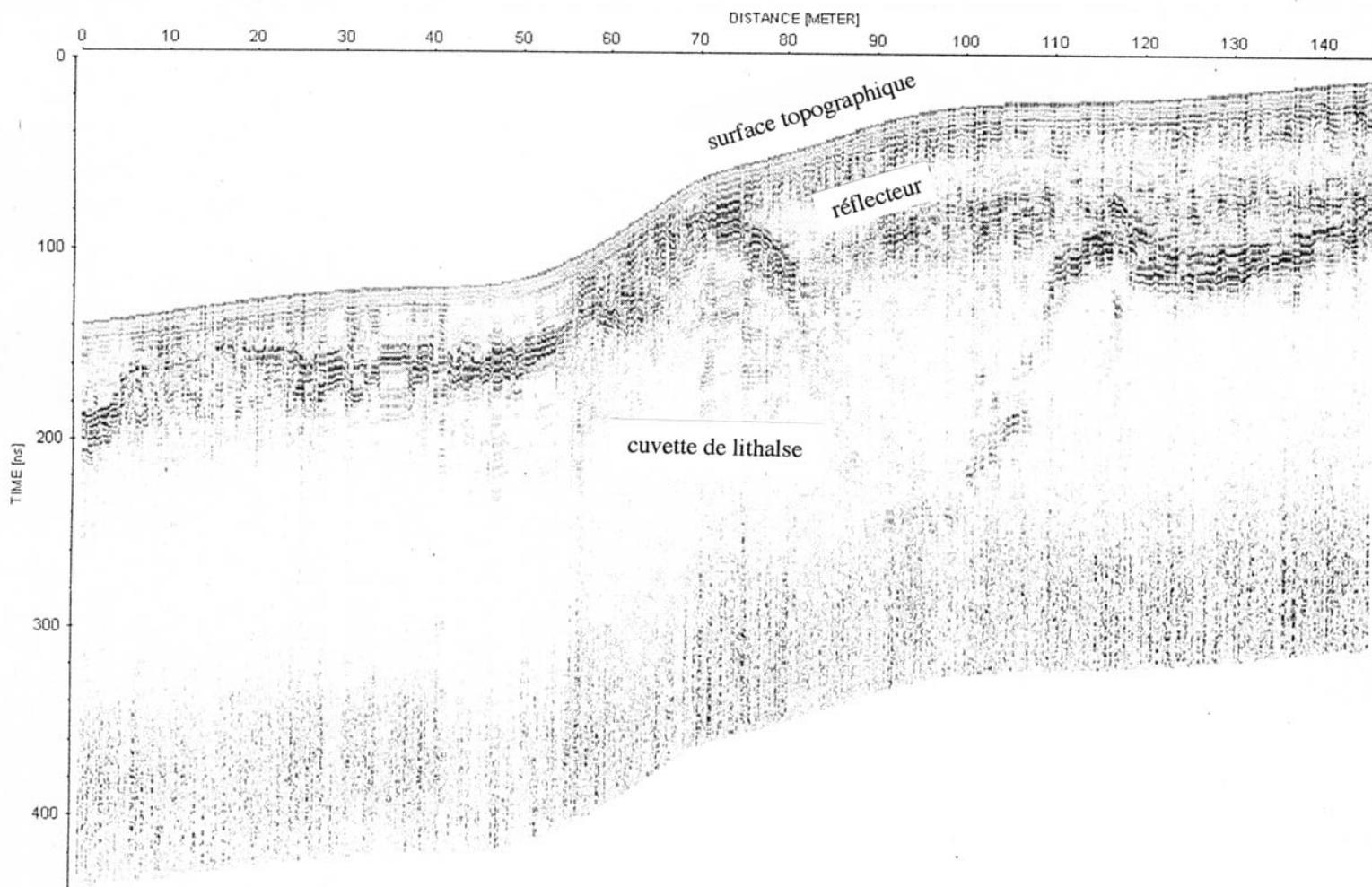


Fig. 60. Points de prélèvement d'eau et résultat d'une campagne de mesures

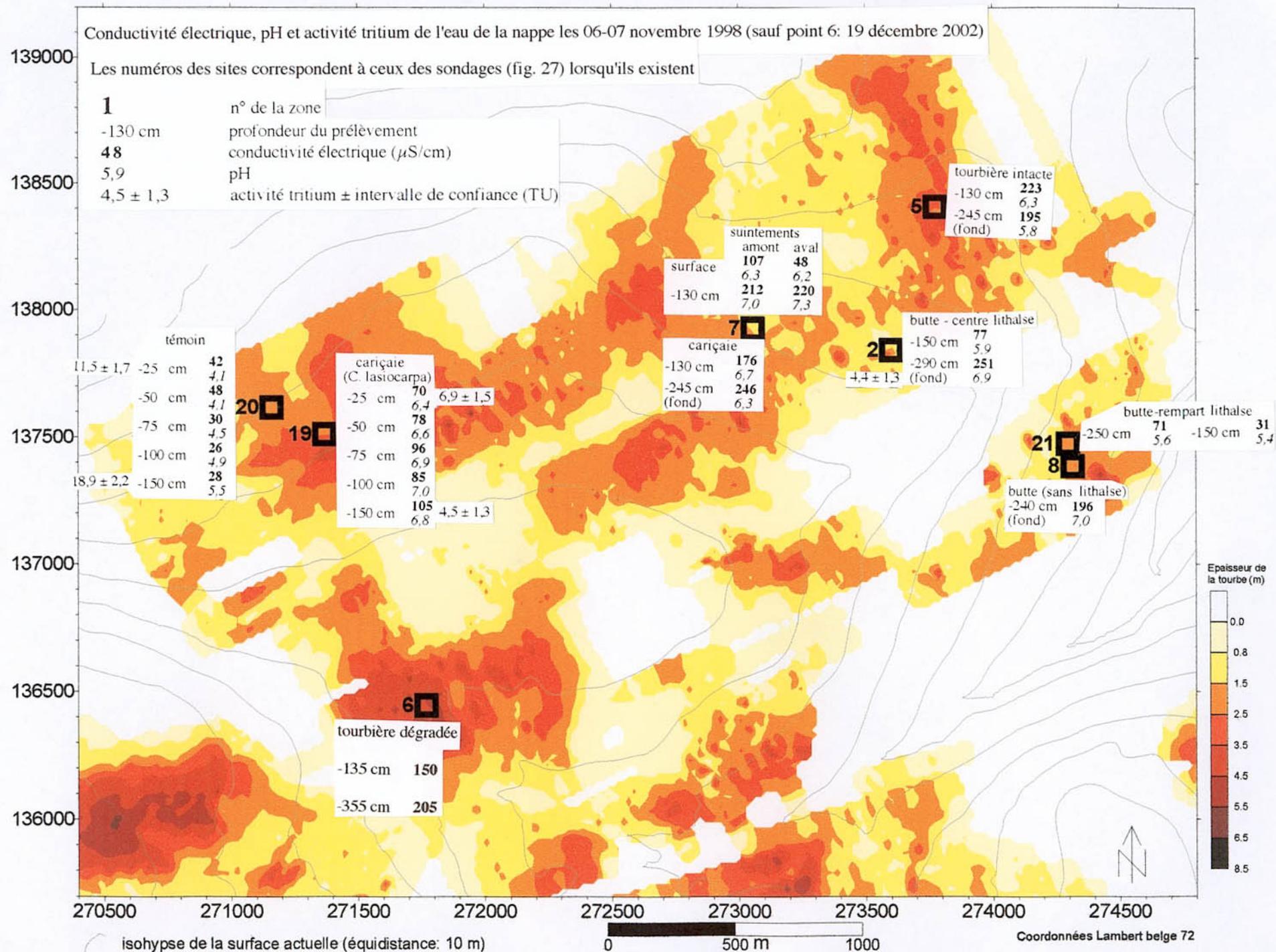


Fig. 61. Localisation des profils radar en fagne des Deux-Séries

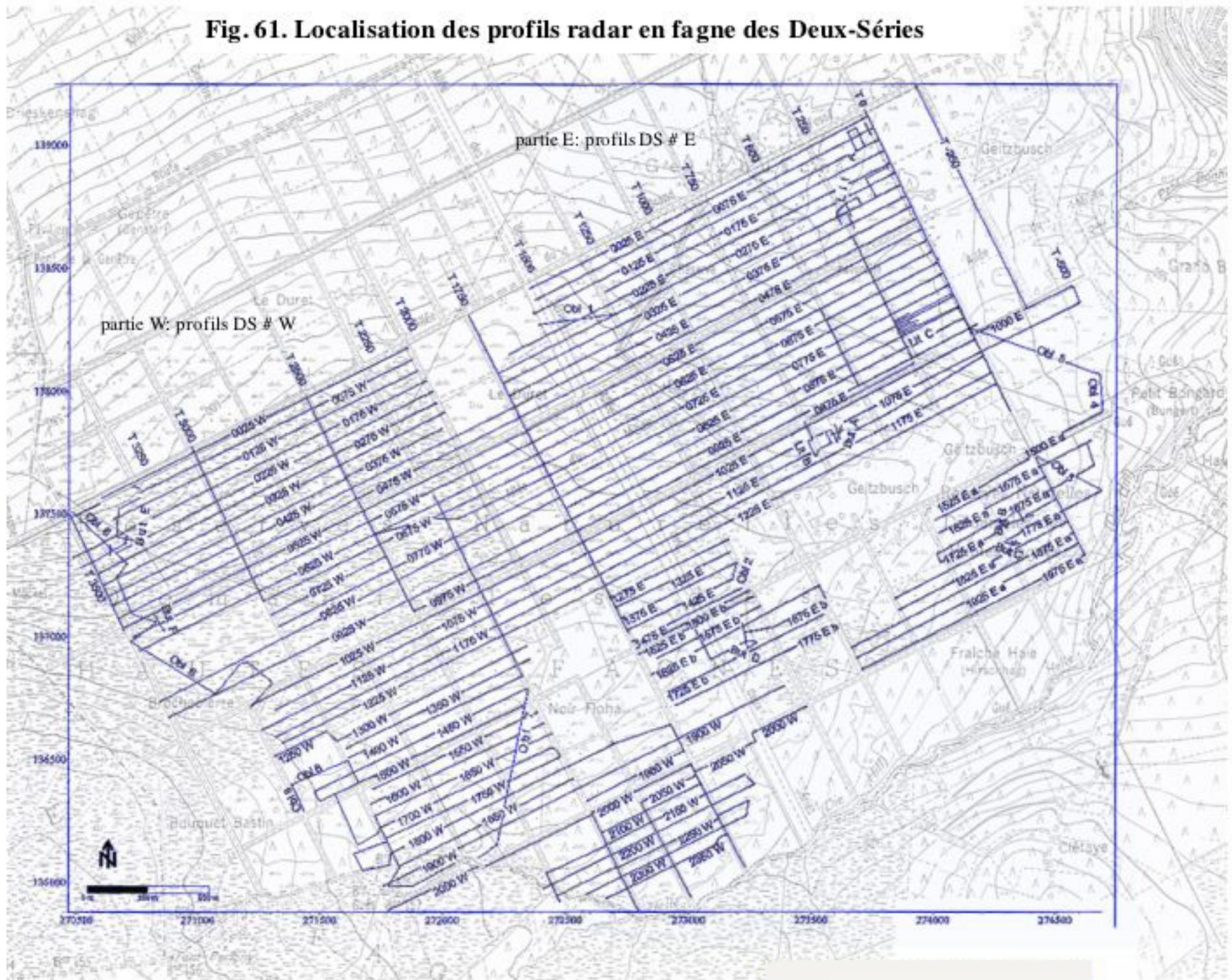


Fig. 62. Localisation des profils radar en fagne Wallonne

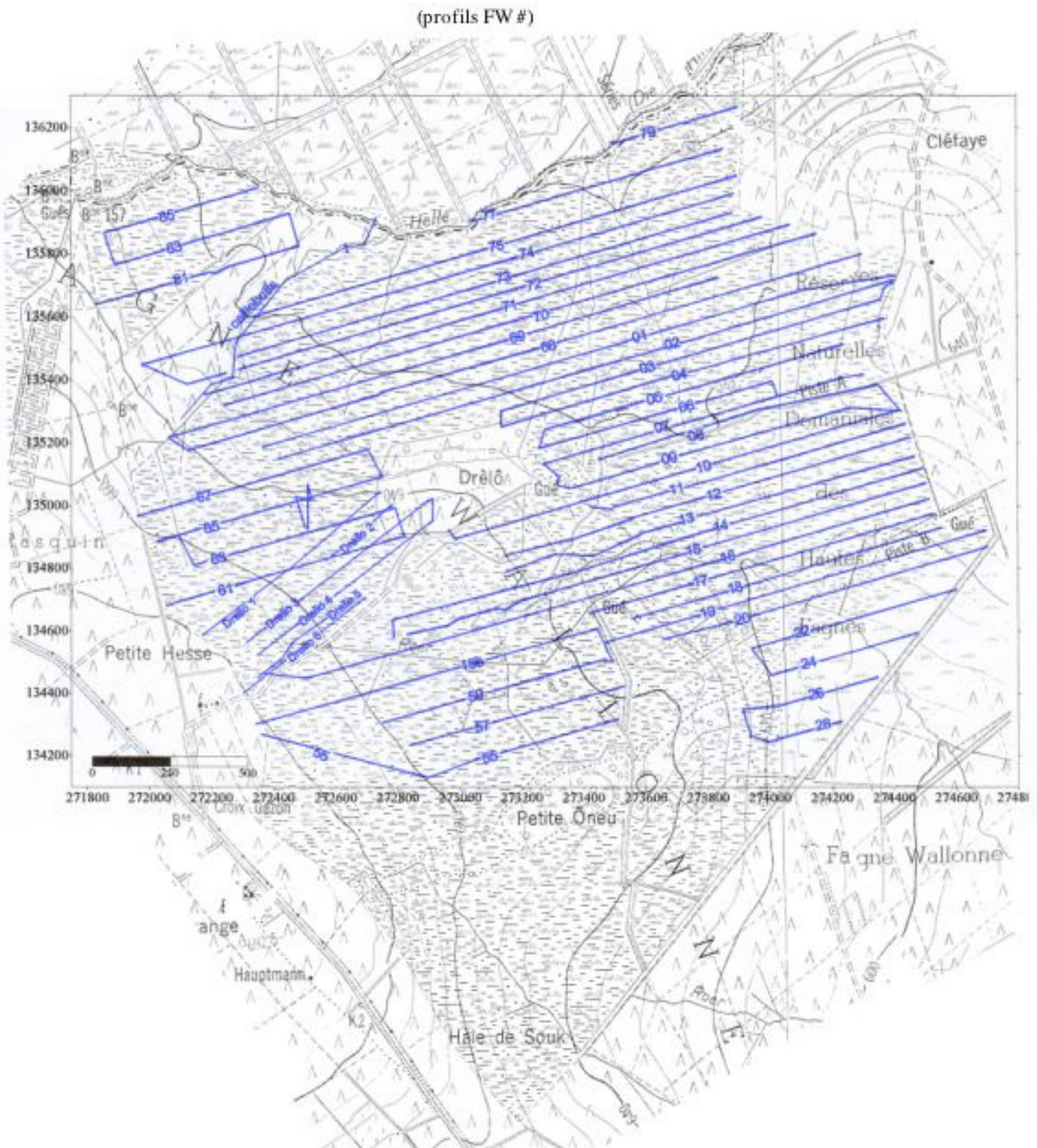


Fig. 63. Localisation des profils radar en fagne de Cléfaye

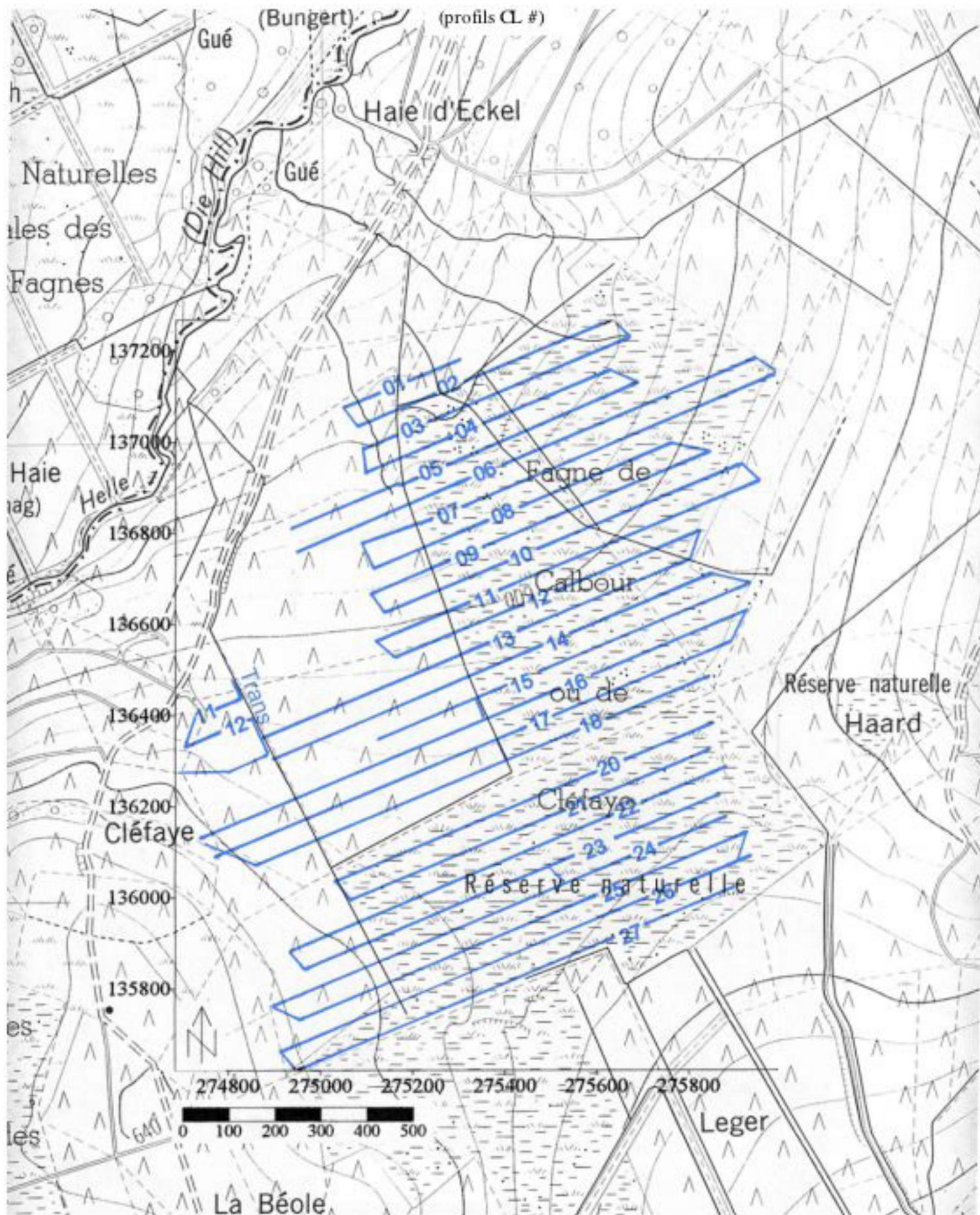


Fig. 64. Localisation des profils radar en fagne du Misten

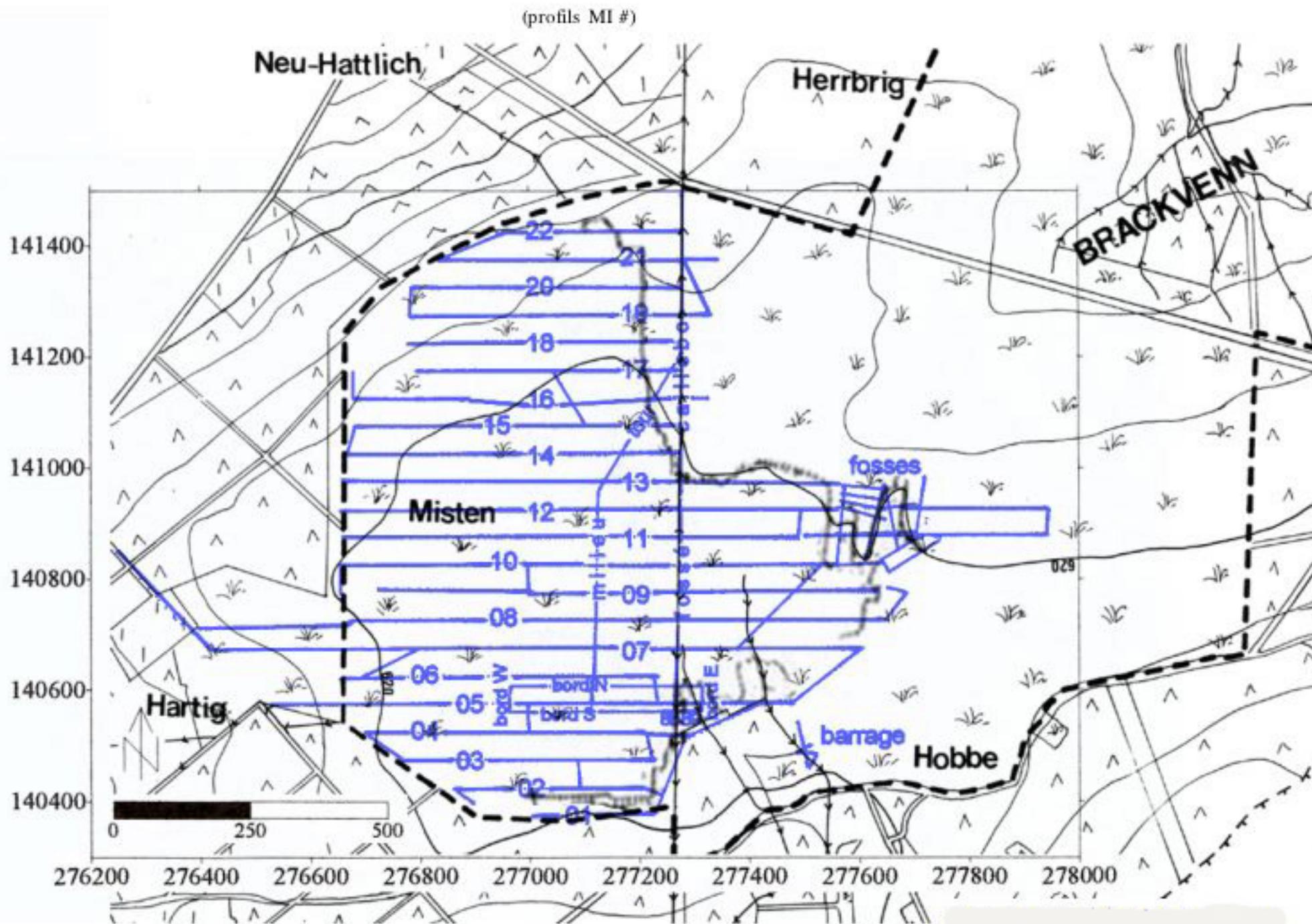


Fig. 65. Localisation des profils radar dans les fagnes des Potales et des Wéz

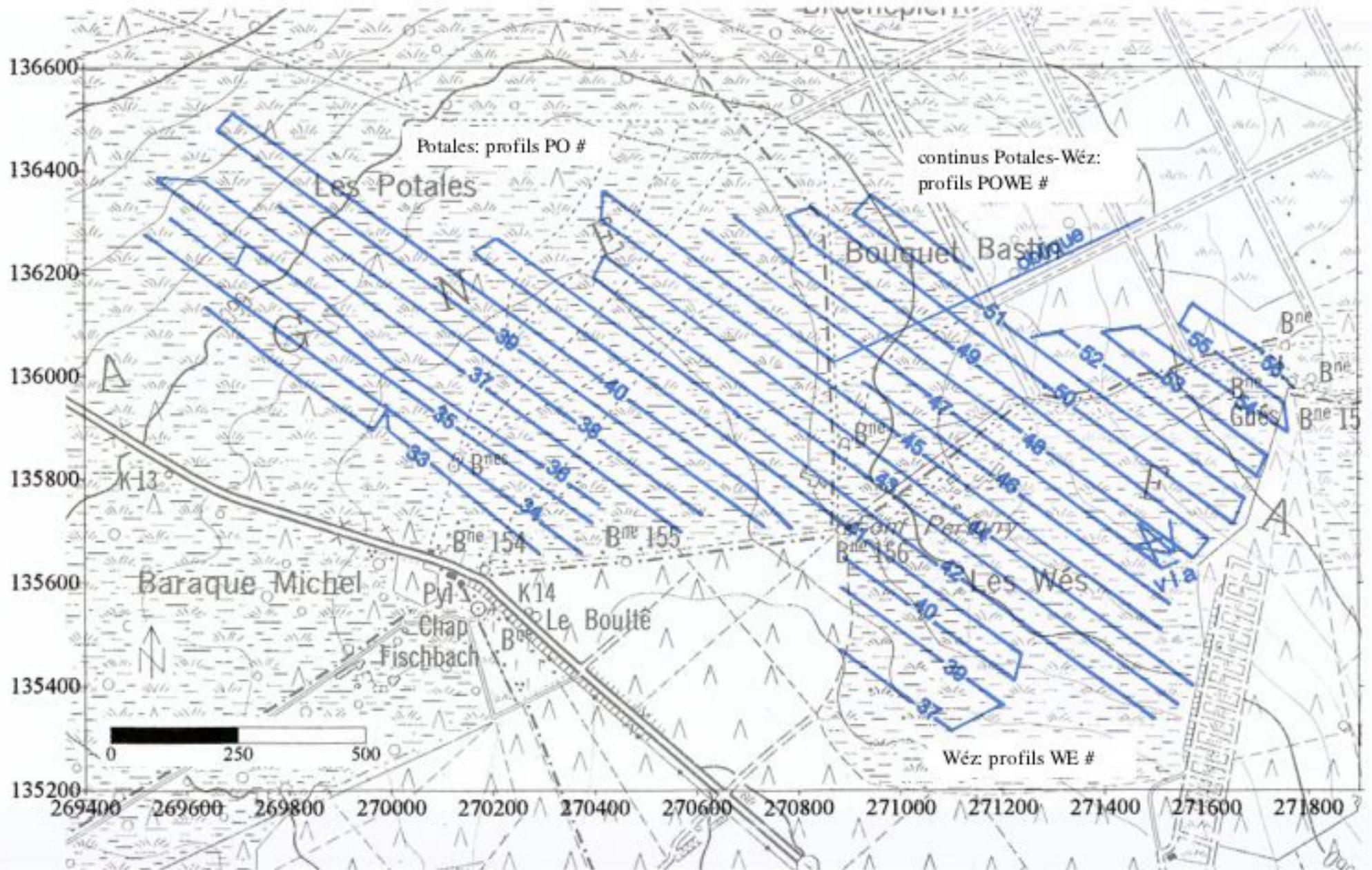


Fig. 66. Localisation des profils radar dans les fagnes des Trous-Brôlis, Herbofaye, Poleûr

