



Etude hydrogéologique, géologique et géomorphologique du bassin versant de la tourbière de Machais (Lorraine)

J.-L. Mercier

Le présent rapport est composé d'un texte général de sept annexes et d'un CD-ROM

*NB : Ce dossier est le complément d'un rapport portant le même titre et rédigé par
L. Messoussi en 2001.*

Strasbourg 2005

PLAN

Introduction

I. Traces glaciaires

Une vallée suspendue

Un cirque glaciaire

Les roches moutonnées

Difffluence

Les nunataks

Les dépôts morainiques et moraines

Niveaux de stabilité (stagnation) de la glace

Cirque et niches de nivation

Conclusion

II. Les formes périglaciaires

La cryoreptation

Les structures de congélation dans les formations superficielles

Replats de cryoplanation

Conclusion

III. Les processus actuels

Eroulement – éboulis du versant Est

La solifluxion

La reptation généralisée

Le fauchage de la tourbe

Le gel actuel

Les formes alluviales

IV. Le cadre chronologique

V. Les tourbières de pente

Les tourbières et leurs positions géomorphologiques

Aspects physiques du fonctionnement d'une tourbière de pente

Géométrie et limites du système « tourbière de pente »

La topographie des tourbières de pente

Les interactions eau-sol-ruisseau-topographie

Evolution temporelle et vitesse des processus

Conclusion

VI. Laves torrentielles et autres processus catastrophiques

Les laves torrentielles

Le Valsche et le ruisseau TH-173

Laves torrentielles des parcelles 170-171

Conclusion

Bibliographie

Annexes

I. Lorentz Claire, Robert Céline ; Etude géomorphologique de la RN de Machais.

II. Breting Joanne, Chielewska Paulina, Collinet Marion, Szymczyk Tomasz ; Les tourbières de pente de la RN de Machais.

III. Baumert Philippe, Gran Michaël, Morang Romy, Wiederkehr Juliane, Witz Emmanuelle ; Tourbière de Machais : essai de contribution à l'étude hydro-géomorphologique.

IV. Compléments photographiques : Synthèse réalisée en avril 2005 par les étudiants de la Licence de Géographie de l'Université Louis Pasteur sous la direction de J.-L. Mercier

V. Mercier J.-L., photos Messoussi L ; Lave torrentielle de la RN de Machais.

VI. Mercier J.-L., Echantillonnage et figures Messoussi L ; Coupes du remplissage de la tourbière principale.

VII. Messoussi L ; MNT de la RN de Machais.

Introduction

Nous savons que dès la fin de l'ère tertiaire et pendant toute la durée du Quaternaire au cours des 3 derniers millions d'années, notre globe a été soumis à une succession d'oscillations climatiques comportant plus d'une centaine de phases froides (Schakelton *et al.* 1990) durant lesquelles d'immenses glaciers ont recouvert une grande partie des terres actuellement tempérées. Ces glaciations ont eu, à leur apogée, une extension considérable : plus du quart des terres émergées étaient alors couvertes de glaces, tant dans l'hémisphère nord que dans l'hémisphère sud. Les glaciers, par leur action érosive et par les dépôts dont ils ont encombré certaines vallées, ont marqué profondément les paysages, les ont façonnés d'une manière caractéristique. Un phénomène d'une telle ampleur ne pouvait manquer de laisser de nombreuses traces, en particulier dans les montagnes de l'Europe moyenne. Certes, les vallées existaient déjà avant l'apparition des premières glaces. Mais les glaciers les ont élargies, ont aiguisé les arêtes et affiné la forme des montagnes, auparavant beaucoup plus massives. Après le maximum glaciaire (18000 ans BP), la dernière phase froide du Dryas récent (YD = 11500 ans BP) a laissé les traces glaciaires les mieux individualisées dans nos régions. La difficulté vient ainsi de reconnaître dans le paysage actuel les marques de ces différentes phases glaciaires.

L'appareil glaciaire de Machais n'est autre que l'un des organes locaux qui sont apparus dans les moyennes montagnes européennes, lors des dernières phases froides.

Pour caractériser ces marques nous nous sommes exclusivement fondés sur l'observation directe du modelé glaciaire dans le paysage. Ainsi, nous avons utilisé les repères morphologiques suivants :

Glaciaires

- les roches moutonnées et autres formes mineures (stries, délogement de blocs, ...)
- les replats ou épaulements de versant
- les moraines latérales et les dépôts glaciaires

L'analyse morphologique glaciaire nous a permis de déterminer l'altitude approximative atteinte par les glaciers, lors des derniers stades glaciaires en utilisant ces repères morphologiques, relativement abondants sur le site de la tourbière de Machais.

Périglaciaires

- les formes périglaciaires affectant les sédiments et les versants

En particulier, l'identification des actions périglaciaires nous a permis d'expliquer la localisation de certaines tourbières de pente.

Processus actuels

- Reptation et solifluxion
- Erosion fluviale

La généralité des mouvements de masse a été mise en évidence tant sur les versants tapissés de moraines que pour les tourbières de pentes.

L'objectif du travail est donc de caractériser l'empreinte géomorphologique glaciaire du quaternaire sur la Réserve naturelle de Machais, de manière à obtenir un cadre chronologique et physique naturel au fonctionnement des écosystèmes de la RN.

I. Traces glaciaires

I.1. Une vallée suspendue

La première évidence glaciaire de la RN de Machais est la position elle-même de ce cirque suspendu au dessus de la vallée de la Moselotte. Ce type de forme est caractéristique des régions glaciaires dans lesquelles la continuité « topographique » est assurée des sommets par le toit de la couverture neigeuse et le remplissage de glace qui régularise les topographies sous jacentes. Ce type de forme est en opposition aux reliefs d'origine fluviale qui sont régularisés par les points bas du réseau hydrographique.

I.2. Un Cirque glaciaire

La seconde évidence glaciaire de la RN de Machais est la forme du cirque glaciaire. Cette forme est limitée par l'altitude du col de l'Etang. En effet ne seront dénommés « glaciers de Machais » que les glaciers inscrits en dessous de l'altitude du col. Toutes les traces glaciaires situées au-dessus seront donc plus anciennes et attribuées à des calottes glaciaires ou glaciers régionaux.

I.3. Les roches moutonnées

Elles sont formées sur la roche en place et dénotent le passage de la glace. Elles ne sont le plus souvent recouvertes que d'une faible épaisseur de végétation.

Sur le versant NE, le long du chemin du « tour de Machais », il est possible d'observer des roches moutonnées en deux endroits [Photos I.1, I.2]¹, proches de 50 mètres environ. Secondairement, ces éperons rocheux semblent offrir un appui à la moraine. Ces roches moutonnées se retrouvent aisément sur l'ensemble du site, tout comme les blocs striés par l'action glaciaire ainsi que les traces de délogement glaciaire.

Un très bel exemple et facilement accessible se trouve au bord de la route des américains, 100 m au dessus du chalet, avec là aussi une moraine bloquant une petite tourbière.

I.4. Difffluence

Rappelons que l'on appelle difffluence le flot de glace qui, empruntant un point bas d'une des rives d'un glacier – ici, un col - se déverse dans une vallée voisine. Une difffluence affecte principalement les couches supérieures du glacier ; son action s'est donc exprimée lors des maxima glaciaires, lorsque la surface de la glace dépassait sensiblement le niveau du col. De plus, le débit de glace était limité, moins important que celui de l'appareil principal.

A 1039 m d'altitude nous avons trouvé une accumulation de blocs morainiques ; du fait de son altitude supérieure à celle du col de L'Etang (1009 m), nous pouvons en déduire que lors du maximum glaciaire la hauteur de la glace dépassait largement cette altitude.

D'où la présence de nombreux blocs erratiques et émoussés, témoignant de la difffluence du glacier au niveau du col de l'Etang. De plus, la découverte de deux types de granites (blocs de granite porphyrique allochtones, blanchis par l'altération, sur un granite en place rosé), conforte cette hypothèse. Le granite allochtone a donc certainement été apporté par cette

¹ Les notes entre [] font référence aux photographies soit situées dans le texte, soit dans les annexes : [annexe I. photo 1 ...]

diffluence passant par le col, dont le débit se tarissait dès le début de la décrue glaciaire, ne laissant subsister que les appareils locaux.



Photo. 1. Bloc erratique allochtone, col de l'Etang.

1.5. Les nunataks

Ce sont les reliefs qui surmontaient la nappe de glace, ils étaient soumis aux processus périglaciaires et en particulier à la gélifraction. Ce processus va peu à peu s'étendre à tous les sommets au cours de la déglaciation.

- Présence de petites buttes (SUD OUEST) qui aurait pu former des nunataks au cours de la période de déglaciation.
- Sur le versant EST, le système hydrographique incise directement la roche en place à certains endroits, ce qui nous laisse à penser que des éperons rocheux étaient susceptibles de former des nunataks.

1.6. Les dépôts morainiques et moraines

Les dépôts morainiques de la RN de Machais n'ont rien de caractéristique, ils tapissent tous les versants de plusieurs mètres de matériel, sauf dans la zone 173 où les dépôts morainiques sont recouverts par l'éboulis de l'Est.

Ces dépôts morainiques sont hétérométriques et relativement compacts, ils sont composés de blocs granitiques décimétriques à métriques emballés dans une matrice de sables et graviers

fins. Les blocs qui composent le matériel morainique ont un façonnement typique en boules émoussées ou en forme de parallélépipède à arêtes émoussées [Photos 3-5]

Les matériaux appartenant à la moraine de fond sont plus triturés (présence de limon). L'hétérométrie est donc très marquée.

Environ à 20 m sous la crête le matériel morainique accumulé, comporte également des blocs anguleux et est donc témoin d'une action glaciaire plus courte dans le temps.

A 1059 m un affleurement dévoile l'organisation des dépôts morainiques, où l'on observe des poches de matériaux plus anguleux. Au bas de cette formation nous avons pu trouver des blocs granitiques émoussés et anguleux de différentes tailles, notamment des « fer à repasser », façonnés par les formes de cisaillement dans la glace et à l'usure du glacier lui-même. La courbure des arbres est révélatrice de la dynamique actuelle de ce versant, qui supporte également de nombreux blocs, striés et de taille importante.



Photos 2 – 3. Chenal proglaciaire contenant du matériel allochtone entaillé dans le matériel morainique du col de l'Etang. Bloc caractéristique façonné dans les conduits glaciaires.

Ce type de poche contenant du matériel allochtone à la RN de Machais se retrouve à plusieurs reprises le long du chemin Vaxelaire. La présence de galets décimétriques très émoussés implique un façonnement et un séjour dans des galeries sous glaciaires. Des écoulements proglaciaires pourraient être à l'origine de la mise en place de ces formations, mais leur pétrographie et leur altitude supérieure à celle de la diffluence du col de l'Etang indique qu'ils ont été mis en place par un glacier régional. Dans l'état actuel nous n'avons pu définir ni la géométrie de ces écoulements ni leur origine.

Des poches contenant des matériaux anguleux sont aussi présentes le long du même chemin. Une hypothèse pour expliquer ces poches résiderait en l'érosion de la moraine par les eaux de fusion du glacier, lors d'une période de déglaciation, entraînant ainsi la formation d'un petit vallon qui, par la suite, a pu être comblé par une coulée de solifluxion. Les processus actuels de versant régularisent à la fois le matériel morainique et le remplissage de ces petits vallons.



Photos 4 – 5. Matériel de solifluxion anguleux, comblant un chenal dans une moraine antérieure. La topographie actuelle régularise les deux formations.

Ces poches de matériaux plus anguleux se retrouvent plusieurs fois sur le même versant à une altitude similaire. Dans le cirque de Machais tous les versants sont tapissés de matériaux morainiques, seule près du chalet, une moraine pourrait être qualifiée du nom de moraine terminale.

1.7. Niveaux de stabilité (stagnation) de la glace

Nous venons d'évoquer plusieurs niveaux de stagnation de la glace antérieurs à l'installation d'un petit glacier dans le cirque de Machais.

Ces niveaux font référence à des glaciers régionaux soient issus de la vallée de la Thur soit (et) issus de la vallée de la Moselotte. Cette dernière pouvant affecter préférentiellement la zone du chalet nous la laisserons de côté.

Les niveaux anciens ont laissé des dépôts proglaciaires (1060 m) et des erratiques au niveau du col de l'Etang (1020 m) ; mais ce glacier ancien a aussi laissé des traces dans la dépression de Machais.

A 1049 m sur le versant Ouest nous avons trouvé une première rupture de pente, ce versant - de fait – polygénique, indique une stabilisation du niveau glaciaire à cet endroit, un élargissement au dessus et un creusement au-dessous.

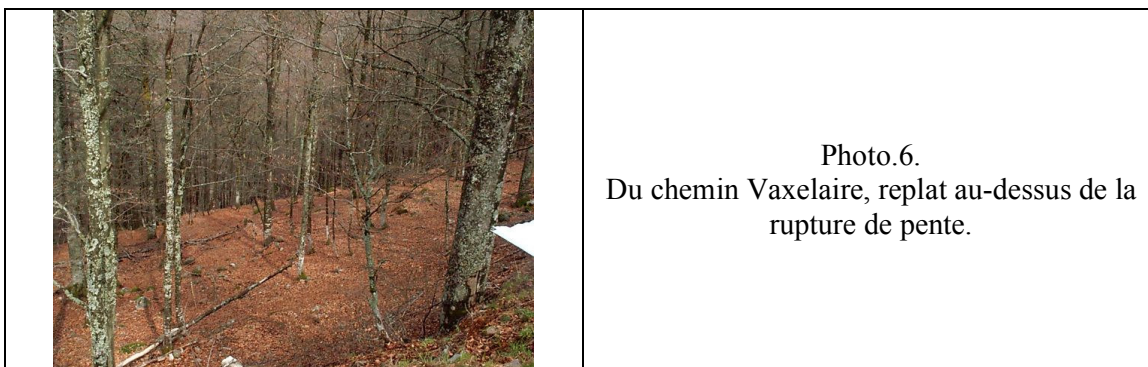


Photo.6.
Du chemin Vaxelaire, replat au-dessus de la rupture de pente.

Cette limite, clairement visible [Photos 6-8] peut être oblitérée par la présence de petits vallons postérieurs à cette période. Souvent ces vallons sont issus de tourbières de pente ce qui pourrait indiquer une mise en place relativement précoce pour ces formations. Cette rupture de pente est toutefois aisément remarquable; des indices tels que des roches moutonnées puis gélifractées la jalonnent et confortent cette hypothèse.



Photo. 7. Versant Ouest, rupture de pente, vue vers le SUD-EST d'un bloc morainique abandonné



Photo. 8. Versant Ouest : vue de la rupture de pente vers le Nord-Ouest

Cette limite a été identifiée de la parcelle 171 à la parcelle 146 soit sur la plus grande partie du secteur W-SW du bassin ; elle s'incline d'amont en aval (1070-1040 m).

Les replats caractérisants les différents niveaux de glaciations ne sont pas visibles à proximité du col de L'Etang, puisqu'un cirque est toujours collé à son amont et ainsi ne peut pas engendrer ce type de modelé.

Sur le versant E-NE, l'éboulis masque une partie de ce contact qui ne redevient nettement visible qu'à l'occasion de l'entaille du lit du Valsche. Les altitudes seraient comprises entre 1040-1020 m. Par conséquent, on imagine une dissymétrie du niveau de la glace entre les deux versants, dissymétrie qui pourrait être causée par l'alimentation neigeuse. Le deuxième niveau glaciaire semble se situer à environ 990 m d'altitude.



Photo. 9. Versant du Valsche incision brutale du ruisseau correspondant au franchissement de la rupture de pente (niveau de stabilité de la glace)

A 1074 m, nous avons observé la rupture pente à l'extrémité de la tourbière 170-0, correspondant à la limite de cirque (versant EST)

I.8. Cirque et niches de nivation

Une niche de nivation a été mise en évidence à 1037 m d'altitude (versant OUEST). De nombreux blocs de taille importante sont déposés au centre de cette forme en berceau. Une niche de nivation est un lieu favorable à l'accumulation ; la partie inférieure de la combe était remplie de glace, les pentes supérieures, plus inclinées, demeuraient exposées aux cycles gel - dégel. Le fond du cirque qui s'est formé peu à peu était, quant à lui, soumis à une érosion moins intense. La glace avait ici, certainement un rôle plutôt protecteur, du fait de sa possible épaisseur et de sa vitesse assez faible. Ce petit glacier a cependant joué un rôle important, celui d'un tapis roulant chargé d'évacuer les éléments rocheux arrachés aux pentes supérieures par le gel - dégel. Sans lui, de nombreux éléments seraient bloqués en bas des pentes supérieures et la combe à neige aurait finie par être occupée par un talus d'éboulis. Glaciation après glaciation, le cirque prenait ainsi naissance.

A l'aval, le chenal de sortie possède une forme en « V » caractéristiques des milieux soumis au fonctionnement hydrologique et non plus aux phénomènes nivaux ou périglaciaires.



Photos. 10 – 11. Vues vers l'amont d'une petite niche de nivation voisinant avec un niveau de stabilité du glacier.

1.9. Conclusion : Ces divers éléments permettent de reconstituer une partie de l'évolution chronologique de l'appareil glaciaire dans la RN de Machais.

1. Ainsi, lors du MGE (Maximum Glacial Extend) une grande partie des Vosges était totalement recouvertes par la glace, la topographie sous jacente, noyée sous cette glace.
2. Puis lorsque le niveau de glace s'est progressivement abaissé, des nunataks sont apparus. Les formes sommitales au SUD-OUEST de la RN, alors exposées à la gélifraction ont pu jouer ce rôle.
3. Progressivement, les nunataks sont devenus de plus en plus imposants et les gélifracts abondants.
4. Un niveau de stabilité de la glace s'est formé vers 1070 m, des écoulements proglaciaires ont laissé des dépôts de matériel allochtone sur la partie haute des versants.
5. A un stade de déglaciation plus avancé, le col de l'Etang a été libéré de la glace, des blocs allochtones ont ainsi été déposés sur ce col. et le cirque glaciaire de Machais s'est individualisé.
6. Un second niveau de stabilité, local celui-là, s'est formé.
7. Puis, des dépôts glaciaires locaux se sont mis en place dans la partie basse.

II. Les formes périglaciaires

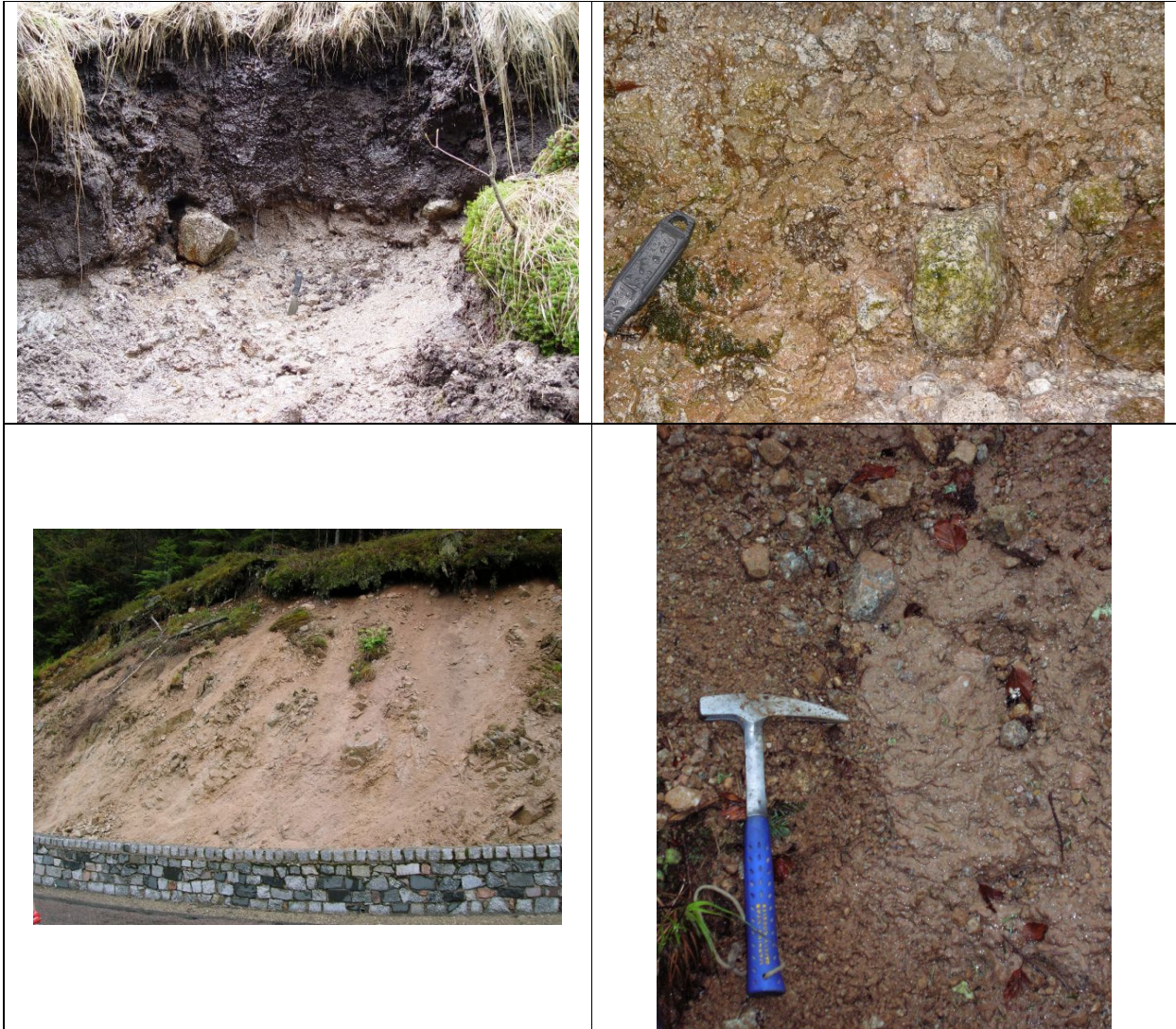
II.1. La cryoreptation

La reptation affecte la quasi-totalité des versants de la RN ; elle consiste en un déplacement et une redistribution des particules au sein d'une formation relativement meuble sous l'action de la pesanteur. En surface, elle s'exprime le long des versants en pente marquée, par la courbure de la base des troncs des arbres. La reptation a une origine hydrique et thermique. Les changements de température peuvent causer des variations de volumes susceptibles d'entretenir le processus. De plus quand une masse est imbibée d'eau l'alternance gel - dégel joue un rôle efficace.

II.2. Les structures de congélation dans les formations superficielles

La présence de structures lamellaires localement compactées par des coiffes limono sableuses a été observée en de nombreux sites de la RN.

En particulier la tourbière perchée (170) montre a sa base la structure feuilletée caractéristique de l'action du gel dans les matériaux meubles (Fitzpatrick 1956 ; Van Vliet-Lanoë 1976). On remarquera que l'eau s'écoule à la partie supérieure du matériel morainique blanchi et en particulier sur les feuillets compactés.



Photos 12-15. Tourbière perchée (12), 85 cm de tourbe reposent sur une moraine blanchie par l'altération. Au toit de la moraine (13), feuilletage de congélation sur lequel s'écoule l'eau. Granite en place (14) à l'extérieur de la RN, feuilletage dans le matériel morainique (15).

En effet il a été montré (Oh *et al.* 1987) que la congélation des formations superficielles entraînait la création d'un feuilletage, celui-ci produit une augmentation locale de la densité apparente, une diminution de la rétention hydrique et une diminution de la conductivité hydraulique.

Ainsi, le niveau feuilleté du fait de sa faible conductivité joue le rôle de roche à faible perméabilité susceptible de ralentir les transferts hydriques verticaux et d'induire des déplacements obliques à l'intérieur des formations superficielles, d'où son importance dans un bilan hydrologique stationnel.

Ce rôle des structures de congélation sera repris lors de l'étude des tourbières de pente, car une division par 10 de la conductivité hydraulique à saturation permet d'expliquer l'existence de tourbière de pente.

II.3. Replats de cryoplanation

Photo 16.

L'association entre la lithologie, le façonnement glaciaire et les actions périglaciaires donnent des formes particulières dans la zone 146. Des filons de microgranites apparaissent et occasionnent des ruptures de pentes, ces zones, plus résistantes à l'abrasion glaciaire ont été mises en relief par la glace pour donner des roches moutonnées. Lors de la déglaciation, la gélifraction a débité ces roches pour en faire des amas de blocs. La solifluxion, active à l'amont du versant s'est bloquée sur ces arêtes ce qui donne des formes de replats.



III.4. Conclusion : ces éléments permettent de reconstituer l'évolution chronologique des processus géomorphologiques dans la RN de Machais.

8. Installation d'un gel saisonnier sur les versants avec création de structures de congélation.
9. Mobilisation des blocs à courte distance et solifluxion discontinue créant des replats.
10. Cryoreptation généralisée sur les versants.

III. Les processus actuels

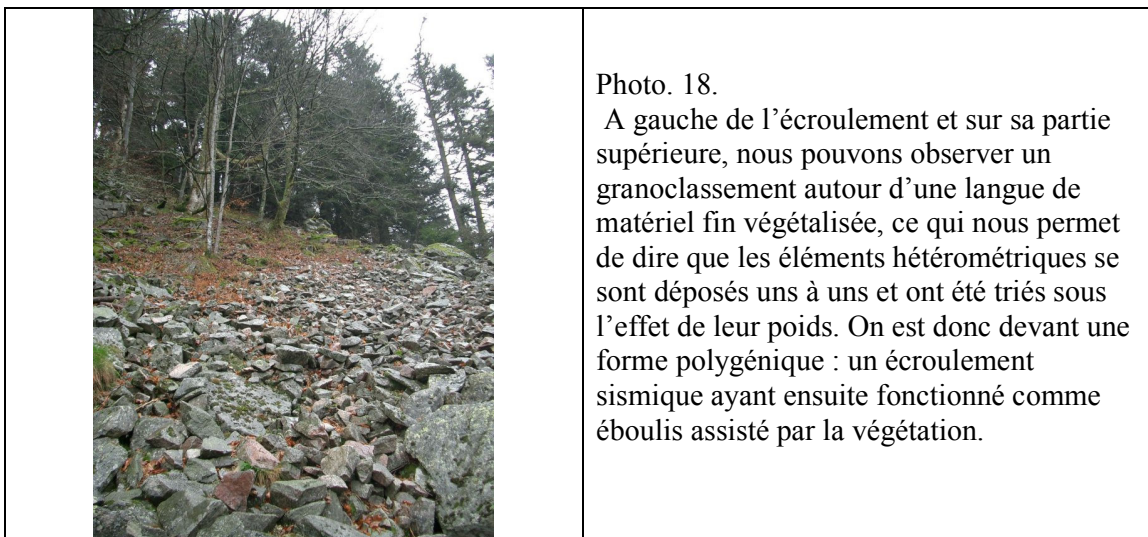
Les formations ont été oblitérées depuis leur formation et au cours de la période postglaciaire. En effet, elles étaient et sont encore soumises aux dégradations du système périglaciaire, l'érosion fluviale travaille aussi à les détruire. Ici les formes de la dernière glaciation sont relativement conservées, elles sont par conséquent assez récentes.

III.1. « Eroulement - Eboulis » du versant EST

L'absence de matrice fine nous permet de dire que ce sont des éboulis libres. Ce qui signifie que le milieu est relativement poreux. De plus nous observons un mauvais granoclassement de ces éléments hétérométriques et anguleux, ce qui confirme que la zone a été sujette à un mouvement d'ensemble et non à la chute maintes fois répétée d'un bloc individuel. Ceci permet d'exclure les phénomènes périglaciaires dans l'origine de cette forme.



Photo. 17. Ecoulement – Ecoulement détail.



L'affouillement ou le sapement des roches sus jacentes (roche moutonnée ayant évolué en nunatak) peut provoquer leur mise en surplomb puis leur cisaillement selon le plan des diaclases. Des secousses sismiques peuvent aussi entraîner des dislocations et des déséquilibres générateurs d'écroulements. La photographie aérienne montre qu'à partir du même massif un éboulement symétrique est localisé sur le versant de la vallée de la Thur. Cette forme semble être un écoulement causé par une secousse sismique.

III.2. *La solifluxion*

Il s'agit d'un déplacement qui affecte une masse boueuse décollée d'un sous bassement stable et touche plutôt les matériaux meubles. L'intervention de l'eau est décisive du fait de l'imbibition qui rend le matériel plus lourd et qui remplit les vides jusqu'à saturation d'où une

diminution des frottements et un accroissement de la mobilité de l'ensemble. Lorsque la teneur en eau atteint la limite de liquidité, un écoulement a lieu.

Une solifluxion sous cutanée crée des boursofflures que l'on trouve sur toutes les tourbières de pente. Parfois le tapis végétal peut se déchirer, cela donne une cicatrice d'arrachement qui est lavée par les écoulements d'eau.

Sous pelouse et quand les pentes sont plus raides on parle de solifluxion en terrassettes. Mais dans la RN, la solifluxion consiste en des cicatrices en coup de cuillère et par des niches de décollement délimitées par un talus semi-circulaire.

III.3. La reptation généralisée

Les formations superficielles se déplacent de l'amont vers l'aval versant, ce déplacement, plus important en surface qu'en profondeur crée des discontinuités dans le profil vertical des vitesses.

Ces discontinuités de vitesse s'expriment, par la courbure de la base des troncs des arbres et par l'apparition d'une structure particulière dans les formations superficielles appelée « fauchage ».

La reptation tempérée est causée par l'interaction de trois facteurs : hydrique, thermique, et biologique. L'eau joue deux rôles : par sa teneur (le poids) elle accentue la contrainte tangentielle, par la tension hydraulique, elle soulève les horizons organiques superficiels ce qui facilite leur déplacement. Par ailleurs, les changements de température peuvent causer des variations de volumes susceptibles d'entretenir le processus. De plus, en altitude, quand un versant est humide, l'alternance gel - dégel joue un rôle efficace.



Photo. 19-20. Base d'un tronc. Versant SUD-EST du cirque de Machais
Enfin, bien que les racines des arbres paraissent tenir le rôle de soutien de la structure, l'insinuation de celles-ci désolidarise le terrain qui leur sert de prise.

III.4. Le fauchage de la tourbe

Outre la généralisation des moraines, des tourbières de pente, et du creep de versant, l'une des particularités de la RN de Machais concerne le déplacement des tourbières vers l'aval.



Photo. 21. Tourbière perchée (170), forme de fauchage, coupe au bord du chemin.

Sur la photo 21, il apparaît nettement des formes obliques qui correspondent au déplacement du matériel. « Si des horizons de sols ou des dépôts superposés sont en mouvement le long d'un versant, il existe entre les éléments stables et ceux-là une ou des discontinuités cinématiques que l'on appelle surface de glissement. On observe l'existence de telles surfaces dans tous les mouvements lorsque le matériel encaissant est suffisamment fin pour donner des structures lisibles. En d'autres termes, l'existence d'une surface de glissement est l'illustration d'une discontinuité de vitesses à ce niveau » (Mercier 1984).

III.5. *Le gel actuel*

Sur les faces des anciennes roches moutonnées, les feldspaths de grande taille apparaissent en relief, ceci est l'effet du gel de la fin de la dernière période froide et du gel actuel. Le gel actuel fournit aussi les éboulis assistés sur l'écroulement de parcelle 170.



Photo. 22. Microformes de gel actuel

III.6. Les formes alluviales

D'amont en aval, plusieurs types de lits et de formes d'érosion et de formes d'accumulation ont été identifiés (cf. Annexe III).

La première partie d'un torrent est le bassin de réception, qui procède à un rassemblement des eaux et forme le lit du torrent, le second est une vallée linéaire de profil transversal en V (canal d'écoulement), la troisième est le cône de déjection lorsqu'il existe.

Le torrent est un organisme court à pente forte dont le débit est saccadé et qui connaît des crues soudaines. Les blocs dont la masse est supérieure à la compétence s'y accumulent et jouent le rôle de wagons puisqu'ils partent à la prochaine crue. Un cône de déjection est un éventail alluvial qui s'installe par rupture de charge sur une surface à faible pente.

Sur le cône de déjection, sa pente est faible à nulle et par conséquent la vitesse de l'eau est freinée, elle n'a plus l'énergie nécessaire pour le transport des matériaux qui se déposent.

A l'aval du Valsche, et visible du chemin une lave torrentielle a laissé sa trace reconnaissable aux dépôts latéraux.

Arrivé au niveau de la tourbière, le matériel s'est étalé et a créé un cône de déjection visible en amont du chemin et séparé du versant morainique par un arc de cercle. Un second cône s'étend en aval vers le centre de la tourbière.

IV. Le cadre chronologique

Il n'existe pas de synthèses géomorphologiques récentes sur cette région, le travail de G. Seret (1967) reste toujours une base incontournable. Cependant le système de référence utilisé à cette époque a évolué et il est parfois difficile de préciser les relations avec le système actuel. Les aspects glaciaires vosgiens ont été revus par Mercier et Jeser (2004) mais pour la RN de Machais, le document le plus précis reste encore l'analyse palynologique de Woillard (1975-1978). Dans ce travail, G. Woillard analyse le Préboréal et le Boréal. Ce qui signifierait que le dernier remplissage glaciaire daterait du Dryas récent mais que curieusement les dépôts plus récents que 8000 BP n'auraient pas laissé de traces.

Après le Dryas récent, G. Woillard détermine une première phase (A) divisée elle-même en deux parties est caractérisée par un réchauffement brutal dans lequel *Juniperus* se développe suivi de *Salix* et de l'arrivée de graminées. *Betula* et *Pinus* arrivent ensuite éliminant *Juniperus* et les espèces herbacées héliophiles.

Une oscillation froide est indiquée par le recul de *Pinus* au profit de *Betula* et le retour d'héliophiles typiques du Dryas récent. Cette oscillation froide et humide (Preboreal climatic cooling oscillation) a été étudiée récemment par Björck *et al* (1997), et elle serait due à une perturbation (ralentissement) de la circulation thermohaline ce qui aurait déplacé le front polaire vers le sud. Cette phase aurait duré un siècle, approximativement datée à 11 300-11 150 BP calendaire). Ce climat aurait été une version continentale du climat actuel avec des hivers plus froids et des été plus chauds plus de neige et moins de vent. Le climat était aussi plus humide qu'aujourd'hui. L'insolation était très différente de l'insolation actuelle (+30 W/m² l'été) et (-10 W/m² l'hiver).

Les deux phases suivantes (C-D et E) voient le retour de la forêt Pin-Bouleau puis arrivent *Corylus* *Quercus* et *Ulmus*.

Le Boréal voit le développement des espèces arboréennes thermophiles. Avec une réduction des espèces herbacées.

Comme on l'a déjà noté, la curiosité principale vient de l'absence de sédimentation durant les phases ultérieures mises en évidence sur le versant alsacien des Vosges (Mercier, Jeser 2004).

V. Les tourbières de pentes

Les tourbières sont à la fois nombreuses, diverses et diversement localisées. Tourbières bombées, de vallée, de bords d'étangs ..., dans le cas de la RN de Machais nous nous sommes intéressés en premier lieu aux tourbières de pente. Dans tous les cas les tourbières doivent être alimentées en eau quelle que soit leur origine ; le plus souvent cette eau est acide et pauvre en nutriments.

V.1. Les tourbières et leurs positions géomorphologiques

Hors des fonds de vallée ou de vallon, les tourbières de pente sont localisées dans les reliefs montagneux, en Bretagne, dans le Massif Central, dans les Alpes, en Ardenne et dans les Vosges. Ces tourbières peuvent avoir des positions topographiques variées : sommets plans, cols, versants, ... Dans le cadre de Machais nous verrons que les tourbières qui sont sur pente, bénéficient d'une alimentation en eau pérenne et ont des relations complexes avec le réseau hydrographique.

V.2. Aspects physiques du fonctionnement d'une tourbière de pente

Si l'on appelle E une grandeur extensive par exemple la masse d'eau, la variation de cette quantité au cours du temps t est une simple équation de bilan

$$\Delta E / \Delta t = (E_{t+1} - E_t) = (\Sigma E_{\text{source}} - E_{\text{puits}}) + (\Sigma E_{\text{in}} - E_{\text{out}})$$

dans laquelle les E_i sont exprimés par unité de volume et par unité de temps [EL⁻³T⁻¹], avec

E_{source} = production de E dans l'unité de volume, c'est-à-dire l'eau provenant d'une écoulement hypodermique et drainée vers la tourbière ;

E_{puits} = destruction de E dans l'unité de volume, il pourrait s'agir d'une perte dans des fissures du granite, ou d'une perte dans les formations superficielles sous jacente en milieu

non saturé ou alors il peut s'agir de pertes accidentelles ou catastrophiques et portant sur des volumes exceptionnels ;

E_{in} = Flux de E vers l'unité de volume, cela serait la somme des précipitations et des apports provenant d'un ou plusieurs ruisseaux ;

E_{out} = Flux de E hors de l'unité de volume c'est l'évapotranspiration et le drainage par les ruisseaux. Il est à noter une particularité, dans le cas des tourbières, l'évapotranspiration réelle est très proche de l'évapotranspiration potentielle et en première approximation elles peuvent être égalisées.

La quantité $\Delta E/\Delta t$ est importante, si elle est égale à 0, le système est en « régime permanent ou stationnaire » et ce cas peut être atteint par de nombreuses combinaisons des 4 E_i .

Le cas le plus intéressant (celui qui se réalise dans la nature) est lorsque les 4 $E_i \neq 0$, on est alors dans un état stationnaire de non équilibre c'est-à-dire que le système est ouvert et qu'il échange énergie et matière avec son environnement.

E_i	Fonctionnement « normal »	Fonctionnement « exceptionnel »
E_{source}	Alimentation hypodermique ou latérale	<i>Ibid.</i>
E_{puits}	Fissures,	Vidanges exceptionnelles par rupture des tourbières
	Alimentation des formations superficielles	
E_{in}	Précipitations	Entrées exceptionnellement fortes et brutales
	Neige	
	Débit des ruisseaux	
E_{out}	Evapotranspiration	Débit des ruisseaux
	Débit des ruisseaux	

Tab : 1. Origine et destination de la ressource en eau.

Nous reviendrons sur cette relation de bilan pour comprendre les différentes formes de disparition des tourbières.

V.3. Géométrie et limites du système « tourbière de pente »

Tout système naturel doit d'abord être délimité, pour une tourbière de pente cela signifie : identifier et déterminer le volume dans lequel l'accumulation d'eau a permis l'installation et l'entretien de la tourbière. Les conditions géomorphologiques nécessaires à l'existence d'une tourbière de pente sont les suivantes :

Substrat

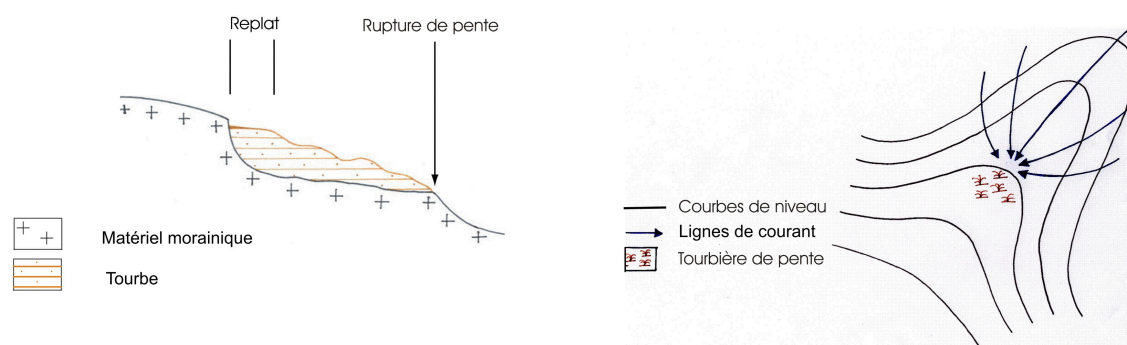
Nous avons identifié deux types de substrats : le granite qui forme le soubassement de la RN de Machais (T-146, TIII-173) [Photo II.8] et des consolidations d'origine périglaciaire affectant le matériel morainique qui tapisse les versants (T perchée 170) [Photos 12-15, II.10]. Pour l'instant nous ne savons pas quel est le substrat le plus fréquent. Du point de vue géomorphologique, les surcreusements glaciaires (série de petits ombilics-verrous) qui sont fréquents dans les vallées glaciaires sont propices à la localisation des tourbières, mais la généralisation du matériel morainique sur les versants, nous pousserait à penser que la majorité des substrats imperméables sont formés de matériaux morainiques consolidés par le gel postérieurement à la fusion des glaces.

Amont

Contre toute attente, une alimentation externe n'est pas absolument nécessaire à l'existence de la tourbière. Très souvent l'eau circule latéralement dans le matériel morainique, il suffit que la topographie recoupe les lignes de courant (ou de potentiel) de la nappe phréatique pour que l'eau se concentre dans une dépression. Dans un certain nombre de cas, un ruisseau né en amont, « alimente » ou « draine »² la tourbière en son centre ou plus fréquemment latéralement.

Une petite rupture de pente (1 – 2 m) est suffisante pour permettre l'existence de la tourbière. Ces ruptures de pente peuvent être des vallons en berceau d'origine périglaciaire [Photos II.3, III.2] et que l'on trouve au-dessus de 1100 m (Valsche), ou des ruptures de pente associées à la présence de bancs rocheux, ou encore des entailles de ravins (T-170-2) [Photo II.4].

A. Schéma simplifié de tourbière de pente



B. Drainage de l'eau vers une tourbière

Fig. 1. Localisation des tourbières de pente et origine de l'eau

Aval

Le réservoir « eau » peut avoir deux types d'extrémités : soit le substrat est un surcreusement dans le granite et celui-ci réapparaît sous la forme d'une roche moutonnée, soit c'est une rupture de pente de grande ampleur (T-146, T170-0, T-170-1, TI-173, TIII-173) qui accentue brutalement le gradient piézométrique, et force la nappe phréatique à affleurer et s'écouler à surface libre³ [Photo II.6].

L'intérêt complémentaire de la RN de Machais est que dans un certain nombre de cas, nous avons pu faire coïncider cette rupture de pente avec des niveaux de stabilité des glaces [Photos 6-8]. Donc la géomorphologie glaciaire et les tourbières de pente pourraient avoir le même cadre chronologique, celui de la déglaciation.

V.4. La topographie des tourbières de pente

L'amont des tourbières de pente est formé par un replat quasiment horizontal (T-146, T-170, TI-173, TII-173) [Photos II.1, II.2, III.4] auquel succède vers l'aval une série de bombements [Photos II.2, III.6]. L'extrémité se fait par un amincissement et aplatissement de la tourbière [Photo III.5]. La végétation ajoute ses touffes et coussinets. Lorsqu'ils sont présents, les

² Nous verrons plus loin la raison de ces doubles guillemets.

³ C'est-à-dire dans un ruisseau.

ruisseaux drainent la tourbière, c'est-à-dire qu'ils sont légèrement encaissés dans la topographie.

V.5. Les interactions eau-sol-ruisseau-topographie

Les milieux

Trois types de milieux sont en interaction : les zones morainiques non saturées, le plus souvent boisées (hêtraie et hêtraie sapinière) ; les zones saturées des tourbières ; les écoulements à surface libre, ceux-ci pouvant se faire sur la végétation [Photo III.4] et / ou entre les touradons ou en chenaux dans la tourbe ou dans les formations superficielles [Photos II.12, II.13]. La vitesse de transfert de l'eau est croissante des uns aux autres :

Non saturé < saturé < écoulement entre touradons < écoulement en surface < écoulement libre

Donc, tout étant égal par ailleurs, une goutte d'eau sera exportée de préférence par le réseau hydrographique. Mais les moraines et matériaux morainiques étant le principal réservoir d'eau ; l'alimentation latérale (hypodermique) sera avec des précipitations abondantes et régulières, la principale ressource en eau.

Les relations Eau-Sol sont ensuite compliquées par l'intervention de la topographie. Nous avons vu précédemment que la topographie pouvait expliquer la localisation du réservoir « tourbière », mais la topographie intervient d'une seconde manière, elle est aussi le résultat du fonctionnement du système Eau-Sol-Topographie [Photo II.4].

Transfert d'eau dans et sur le sol en conditions de régime permanent

Milieu eau-sol	Régime hydrologique	Écoulement « normal »	Eau-sol-Topographie
Dans le sol	Non saturé	Très lent à nul	Hydrolyse, effet non mesurable
	Saturé	Très Lent	Hydrolyse et soutirage des fines, les blocs apparaissent La topographie s'abaisse
En surface	Écoulement entre les touradons	Lent	Exportation des solutions Effet non mesurable à nul
	Écoulement sur la végétation	Rapide	
	Écoulement en chenaux	Très rapide	Exportation des solutions Erosion faible La topographie s'abaisse

Tab. 2 : Réponse du système en régime permanent.

En régime permanent, la topographie des tourbières va s'abaisser sous l'effet du soutirage des solutions, des limons et des sables fins [Photos II.13, II.14, II.15]; des blocs morainiques apparaissent à l'aval de la tourbière [Photos III.7, III.8]. Cette soustraction va abaisser la topographie voisine des ruisseaux qui sont en équilibre hydrodynamiques avec la nappe phréatique de la tourbière. Il en est de même à l'aval [Photos II.19, II.20]. Tout se passe

comme si la tourbe était une couverture qui se draperait sur un milieu en cours de soutirage [Photo III.5].

Les écoulements sur la végétation ne déplacent que des brindilles et parfois des sables. Les écoulements entre les touradons vont déplacer des solutions, limons et sables. Les ruisseaux déplacent d'amont en aval les éléments limoneux et sableux tirés des moraines ainsi que les solutions provenant de l'hydrolyse du matériel morainique et de la tourbe.

Transfert d'eau dans et sur le sol en conditions de régime exceptionnel

En régime exceptionnel ou catastrophique, le milieu non saturé va être affecté par le ruissellement diffus, mais la matière organique du sol est là pour limiter les effets de l'érosion.

Au contraire, sur la tourbière, les écoulements déjà saturés dès la surface vont très vite se concentrer, la réponse du milieu va être très rapide, elle va porter sur la création de chenaux, l'érosion sera très importante ainsi que l'exportation des solutions en début d'événement. La décrue et le retour aux faibles débits sera rapide. Dans ce second cas, la couverture de tourbe « suivra » le substrat minéral qui aura été érodé.

Milieu eau-sol	Régime hydrologique	Ecoulement « exceptionnel »	Eau-sol-Topographie
Dans le sol	Non saturé	Très lent à nul	Ruissellement en surface
	Saturé	Lent	Réponse immédiate aux précipitations
En surface	Écoulement entre les touradons	Très rapide	Ruissellement concentré
	Écoulement sur la végétation		Erosion forte à l'aval des tourbières
	Écoulement en chenaux		Entaille du réseau hydrographique Décrue rapide

Tab. 3 : Réponse du système à des événements catastrophiques

Localisation des ruisseaux

Les ruisseaux vont s'installer dans les zones qui à la fois fournissent de l'eau et qui peuvent être facilement érodées. Ce sont les marges des tourbières, au contact des zones non saturées qui offrent cette double possibilité [II.4, II.19, II.20].

V.6. Evolution temporelle et vitesse des processus

Les tableaux 2 et 3 donnent l'évolution qualitative de l'interaction eau-sol-ruisseau-topographie, bien évidemment une étude quantitative serait nécessaire pour articuler plus finement ces processus. Néanmoins les observations de terrain ont montré la généralité des soutirages sous la tourbe, le déplacement de la tourbe par reptation et solifluxion (photo) ainsi que l'existence d'entailles hydrographiques dépassant la compétence des ruisseaux actuels.

On est conduit à devoir chercher dans le passé [de 8000 BP au petit âge glaciaire] les événements climatiques qui ont à la fois contribué à détruire une partie des tourbières de pente, fortement éroder le substrat morainique et alluvionner la tourbière du fond de l'étang.

La topographie actuelle des tourbières de pentes et du réseau hydrographique associé est donc issue des deux séries de processus : soutirage lent et imperceptible d'une part associé à la reptation : et d'autre part des accidents climatiques créant l'instabilité et la destruction d'une partie des tourbières et des vallons qui les drainent.

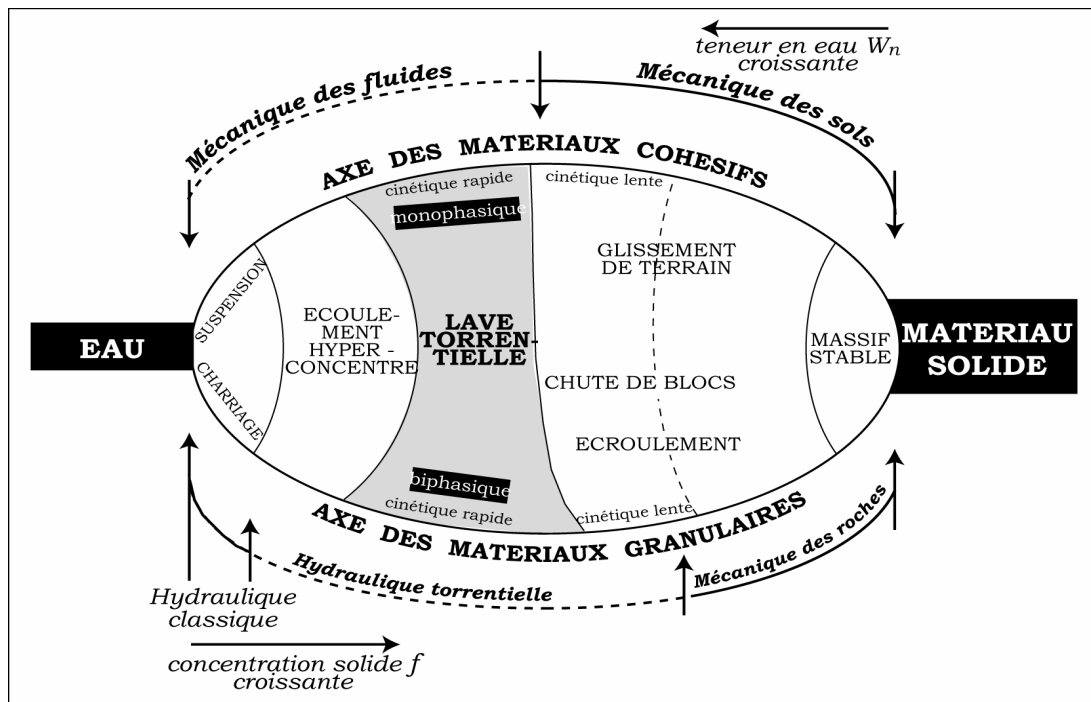
V.7. Conclusion sur les tourbières de pente

- Il serait intéressant de connaître la géométrie réelle de ces écosystèmes et pour cela associer une topographie fine de la surface (un modèle numérique de terrain) et une cartographie de la base (Radar). Cela permettrait d'obtenir leur volume, et de préciser les substrats à leur base.
- Une étude climatologique (bilan d'énergie), et hydrologique permettrait de savoir si ces écosystèmes sont en équilibre avec le climat actuel et quel va être leur devenir avec le réchauffement climatique.
- Une analyse hydro-chimique permettrait de mieux comprendre le fonctionnement de ces milieux et d'identifier la part qui reviendrait à la végétation de celle qui reviendrait aux ruisseaux.
- Et il faudrait commencer par dater ces formations de pente et ces écosystèmes car si notre hypothèse de travail est exacte, ces formations sont plus anciennes que la tourbière de l'étang de Machais.

VI. Laves torrentielles et autres processus catastrophiques

VI.1. Les laves torrentielles

Une lave torrentielle est un écoulement hyper concentré, d'un matériel partiellement à totalement saturé d'eau (entre 45 et 80% en volume de fraction solide dans l'écoulement).



Les laves torrentielles se situent à l'interface entre les **glissements de terrain** (*landslides*) et la géomécanique et le **charriage ordinaire** (*stream flows*) et les phénomènes hydrauliques. En réalité, elles se situent au sein du continuum de phénomènes évoqué par Coussot et Meunier (1996).

- Le mouvement débute comme un glissement de terrain avec une cicatrice d'arrachement et se déplace rapidement à des vitesses de quelques m/s.
- Le chenal d'écoulement peut fournir la plus grande partie (ou une partie significative) des sédiments ; latéralement, le dépôt de matériel est peu trié, les berges de l'écoulement sont surélevées, et les gros blocs s'y accumulent. Le lit est encaissé dans la topographie antérieure, les berges en relief, sont formées par l'accumulation des sédiments abandonnés. D'amont en aval le chenal est caractérisé par l'existence de « vagues », ces ondulations affectent la topographie du matériel déposé et en plan il existe des ventres et des nœuds.
- Le front de l'accumulation est composé de très gros blocs. Le record a été obtenu au Japon où un bloc de 3000 tonnes s'est déplacé de plusieurs km. Les fines et l'eau abandonnent la partie grossière du matériel.

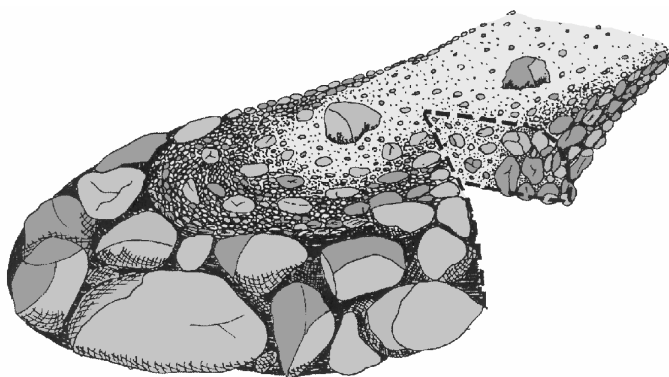


Fig 3. Représentation schématique 3D d'une lave torrentielle (Bardoux E. 2002)

- Le déclenchement est dû à des précipitations exceptionnelles mêmes brèves ou à des fusions brutales de neige, les laves torrentielles sont des processus très rapides.
- Le phénomène n'est pas unique, souvent plusieurs pulsations successives dévalent le même chenal ; de même, dans un bassin versant les laves torrentielles ne sont pas isolées, le plus souvent elles descendent les versants en groupes parallèles. D'autre part les laves torrentielles fonctionnent souvent dans les mêmes couloirs.

La typologie de ce type de phénomènes a été faite par Hung *et al.* 2001.

VI.2. Le Valsche et le ruisseau TH-173

Le cours du Valsche

Le Valsche a sa source à l'aval de deux vallons en berceau [Photo III.2] qui drainent les matériaux morainiques au-dessus de 1150 m. Il s'enrichit sur sa gauche d'un troisième vallon en berceau au niveau de la tourbière TI-173. A l'aval de cette tourbière, le Valsche n'est plus un petit ruisseau qui draine une tourbière, il est encaissé de 1 m dans un vallon de 2.5 m de large [Photo III.8]

La tourbière TII-173 débute elle aussi par un vallon en berceau [Photo III.6], elle a un replat, sa forme est brutalement convexe avant de passer à une entaille profonde en V [Photo III.7].

Ce sont donc les deux extrémités convexes des tourbières [Photo III.11], les deux entailles parallèles du Valsche et du ruisseau TII-173 qui nous conduisent à proposer ces couloirs comme d'anciens chenaux de **laves torrentielles**. Ceci est confirmé par la forme et l'importance des deux chenaux d'écoulement, sur 120 m le Valsche s'entaille de 2 à 3 m dans le matériel morainique [Photos III.9, III.12], par l'encombrement de blocs résiduels et surtout par la forme de leur confluence [Photo III.10] qui indique que la morphologie de ces vallons est commandée par leur amont et non par l'aval.

A l'aval de la route, le cours du Valsche débute par une forme d'accumulation peu inclinée [Photo III.13]. Ceci est tout à fait normal, le transfert des sédiments en régime non exceptionnel se fait par substitution de charge : d'amont en aval, le ruisseau érode et alluvionne.

La tourbière III est légèrement entaillée dans l'ensemble du plan du versant [Photo III.14] composé de matériel morainique ; une part significative de la tourbière et du matériel sous-jacent a donc disparu à l'aval. Le cours du Valsche est entaillé dans cette forme, cela signifie que l'on se trouve devant deux entailles : l'une débutant aux tourbières I et II et plutôt linéaire et récente, l'autre à la tourbière III est plus vaste et plus ancienne. Il pourrait s'agir d'une lave torrentielle ou d'un « **Peat Flow** » (Hungry *et al.* 2001) plus ancien.

L'apparition d'un banc rocheux [Photo III.15] est probablement la cause de cette double érosion. Comme dans le cas précédent, après une forme d'érosion, le ruisseau nettoie et lave le matériel qui encombre son lit, exporte les sables et graviers, les blocs forment soit un pavage lorsqu'ils sont de petite taille soit un système en escalier de seuils et mouilles (steps – pools) [Photo III.16].

A partir de 1020 m, une incision exceptionnelle canalise le Valsche. Cette incision est composée de deux parties, l'une d'une largeur de 30 à 50 m épaisse d'un à deux mètres, la seconde, profonde de longue de 125, profonde 5 à 10 m et de 20 m de large [Photo III.17]. Les relations entre le Valsche et ses affluents sont toujours les mêmes [photo III.20], le contrôle par l'amont domine.

La trace des laves torrentielles est encore visible à l'aval [Photo III.21] ou sur la rive droite, la levée est composée de blocs déposés sur le matériel antérieur.

Origine du Peat Flow et des laves torrentielles

Toutes les formes topographiques lisibles dans le paysage sont associées aux tourbières. La plus ancienne semble celle issue de la tourbière III ; elle est caractérisée par son étendue, et sa faible épaisseur ces caractéristiques ne correspondent pas aux zones de départ habituelles des laves torrentielles, par contre la zone d'entaille située à l'aval correspond parfaitement au transit des laves.

C'est la raison pour laquelle, dans ce cas je trancherai pour un « Peat Flow » qui a été décrit de la manière suivante par Hungry & Evans (1984) « A distinctive type of flow derives from the failure of peat deposits » « Peat Flow is a slow to very rapid flow-like movement of saturated peat, involving high pore-pressures »

Des événements climatiques excessifs (précipitations liquides et / ou solides abondantes) associés à une faible évapotranspiration ont pu provoquer la vidange brutale et la destruction partielle des tourbières TI-173 et TII-173, celles-ci saturées d'eau, leur tapis tourbeux a pu se déchirer et une vidange brutale a entaillé le substrat morainique avant de s'écouler vers le fond de la vallée. L'écoulement a érodé la partie supérieure du cours du Valsche entre la route et l'extrémité des deux tourbières. Au-delà, l'écoulement s'est concentré dans l'entaille préexistante. La durée totale d'un tel événement peut être comprise entre 2 et 3 minutes.

Le premier événement était lui aussi catastrophique "It may be triggered by some external processes causing rapid loading of a saturated peat layer or naturally by the breaching of an oversteepened rim of a raised bog" (Hungar, Evans 1984). Si l'on suit la proposition précédente, la proximité de la principale rupture de pente (niveau de stabilité de la glace) a sans doute été un élément important dans le déclenchement du « bog burst » (Colhoun *et al.* 1965).

La progression brutale de la vague d'eau et de sédiment a eu les mêmes effets morphogénétiques qu'une lave torrentielle.

Dynamique du Valsche

Deux dynamiques coexistent : un lent transfert de sédiments fins (graviers et sables) d'amont en aval, ces sédiments proviennent du lit du ruisseau ou de ses berges. Un processus rare et catastrophique a au moins deux fois au cours du temps façonné le lit du Valsche et de certains de ses affluents : Peat Flow et laves torrentielles.

VI.3. Laves torrentielles des parcelles 170-171 (cf. Annexe V)

Les événements de la parcelle 170-171 ont toutes les caractéristiques de laves torrentielles, pente raides, événements brefs, matériel grossier abandonné au cours du trajet, rives plus élevées que le centre de l'écoulement, prise en charge des sédiments dans le chenal, éléments grossiers à l'aval. Dans la classification des laves torrentielles, il s'agit d'un événement de la Classe 1 : faible magnitude car le matériel n'arrive pas à la rivière principale et s'arrête sur le cône de déjection (Brochot *et al.* 2002).

Photos de la lave torrentielle de Machais (Annexe V)

Photos	Description
V.1 V.2	Cicatrice d'arrachement
V.3	Matériel disponible
V.4 V.5	Concentration de l'écoulement vers le chenal
V.6 V.7	Prise en charge des sédiments
V.8 V.9 V.10	Chenal et levées
V.11 V.12 V.13	Accumulation de blocs à l'aval

VI.4. Conclusion

- Avril 2002 est un petit événement qui s'est installé sur un versant raide et dans des matériaux meubles non consolidés, 150 à 200 tonnes de sédiments ont été déplacés.
- Habituellement, dans un bassin versant, les laves torrentielles ne sont pas uniques mais sont souvent répétitives, elles produisent alors plusieurs écoulements sur un versant.
- Un événement plus grave déclencherait donc plusieurs laves torrentielles au même endroit, sur la paroi Sud-Est du cirque glaciaire.
- Un événement catastrophique serait généralisé à toute la Réserve Naturelle, il se produirait à partir des tourbières de pente qui seules, ont les réserves d'eau suffisantes pour déclencher de très gros arrachements à l'amont et au cours du trajet.
- Le cours du Valsche a fort probablement été sculpté par des laves torrentielles anciennes, la morphologie de la partie amont permet d'identifier deux vagues. Au contraire à l'aval, l'ampleur du ravinement ne permet pas de séparer des événements successifs.

Bibliographie

Bjorck S., Rundgren M., Ingolfsson O., Funder S., 1997 : The Preboreal oscillation around the Nordic Seas : terrestrial and lacustrine responses. *Journal of Quaternary Science* 12(6) 455-465.

Brochot S., Marchi L., Lang M. 2002 : L'estimation des volumes des laves torrentielles : méthodes disponibles et application au torrent du Poucet (Savoie). *Bull. Eng. Geol. Env.* 61, 389-402.

Colhoun E.A., Common R., Cruikshank M.M. 1965 : Recent bog flows and debris slides in the north of Ireland. In *Proc. Scientific Meetings of the Royal Dublin Society*, Vol. A2 N°1, 163-174.

Coussot P., Meunier M., 1996 : Recognition, classification and mechanical description of debris flows. *Earth-Science Reviews* 40, 209-227.

Fitzpatrick B.A., 1956 : An indurated soil horizon formed by permafrost. *Journal of Soil Science*, Tome 7, p 1-13.

Hungr O., Evans S.G. 1984 : An example of a peat flow near Prince Rupert, British Columbia : *Canadian Geotechnical Journal*, Vol 22, 246-249.

Hungr O., Evans S.G., Bovis M.J., Hutchinson J.N. 2001 : A Review of the Classification of Landslides of the Flow Type. *Environmental & Eng. Geosciences*, Vol. VII, 221-238.

Mercier J.-L., 1984 : La mesure du creep : exemple de fonctionnement d'un système géomorphologique. In *Analyse de systèmes en Géographie*, Presses Universitaires de Lyon, p 147-185.

Mercier J.-L., Jeser N, (2004). A misappreciated glacial past period in the Vosges mountains. in "Quaternary Glaciations - Extent and Chronology", Part I: Europe, J. Ehlers, J. & Gibbard, P.L. (eds) *Developments in Quaternary Science*, Vol. 2a. Amsterdam, Elsevier p 113-118.

Oh K.S., Reutenauer D., Mercier J.-L., 1987 : Caractérisation micromorphologique et hydrodynamique des niveaux structurés par le gel quaternaire dans les formations superficielles du bassin-versant de la Fecht. *Catena* vol. 14, p 485-499.

Reille M., 1990 : Leçons de palynologie et d'analyse pollinique. *Editions du CNRS*, Paris 206 p.

Schakelton N.J., Berger A., Peltier W.R., 1990 : An alternative astronomical calibration of the lower Pleistocene timescale based on ODP site 677. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh; Earth Sciences reviews*, 11, 387-400.

Seret G., 1967 : Les systèmes glaciaires du bassin de la Moselle et leurs enseignements. *Société Royale Belge de Géographie*, Bruxelles 577 p.

Van Vliet-Lanoë B., 1976 : Traces de ségrégation de glace en lentilles associées aux sols et phénomènes périglaciaires fossiles. *Biuletyn peryglacjalny*, Tome 26, p 41-54

Woillard G., 1975 : Recherches palynologiques sur le Pléistocène dans l'est de la Belgique et dans les Vosges lorraines. *Acta. Géogr. Lovaniensa* 14. 118 p.

Woillard G., 1978 : Grande Pile peat bog : a continuous pollen record for the last 140.000 years. *Quaternary Research* 9, 1.

Annexes

- I. Lorentz Claire, Robert Céline** ; Etude géomorphologique de la RN de Machais.
- II. Breting Joanne, Chielewska Paulina, Collinet Marion, Szymczyk Tomasz** ; Les tourbières de pente de la RN de Machais.
- III. Baumert Philippe, Gran Michaël, Morang Romy, Wiederkehr Juliane, Witz Emmanuelle** ; Tourbière de Machais : essai de contribution à l'étude hydro-géomorphologique.
- IV. Compléments photographiques** : Synthèse réalisée en avril 2005 par les étudiants de la Licence de Géographie de l'Université Louis Pasteur sous la direction de J.-L. Mercier
- V. Mercier J.-L., *photos Messoussi L*** ; Lave torrentielle de la RN de Machais.
- VI. Mercier J.-L., *Echantillonnage et figures Messoussi L*** ; Coupes du remplissage de la tourbière principale.
- VII. *Messoussi L*** ; MNT de la RN de Machais.

Ont participé au travail :

Baumert Philippe
Breting Joanne
Chielewska Paulina (Erasmus, Université de Silésie)
Collinet Marion
Gran Michaël
Lorentz Claire
Morang Romy
Robert Céline
Szymczyk Tomasz (Erasmus, Université de Silésie)
Wiederkehr Juliane
Witz Emmanuelle

Encadrement :

Professeur Mercier Jean-Luc, Université Louis Pasteur, Strasbourg.
Professeur Pulina Marian, Université de Silésie, Sosnowiec.