Le Quaternaire dans le canton du Jura : les témoins de la période géologique la plus récente et leur signification

Autor(en): **Guélat, Michel**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Actes de la Société jurassienne d'émulation**

Band (Jahr): **108 (2005)**

PDF erstellt am: **27.04.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-555106

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

Le Quaternaire dans le canton du Jura

Les témoins de la période géologique la plus récente et leur signification

Michel Guélat

Considérée dès la fin du 19e siècle comme l'époque de l'apparition du genre *Homo* et de celle des plantes et faunes actuelles, le Quaternaire correspond à la période la plus récente et la plus courte de l'échelle géologique. Il se subdivise en un terme inférieur, le Pléistocène, époque qui débute vers 1,8 million d'années, et l'Holocène (ou Postglaciaire), époque qui couvre les dix derniers millénaires. Récemment, le débat sur le maintien du Quaternaire dans les chartes stratigraphiques et sur l'âge de sa limite inférieure a été vivement relancé (Braillard, ce volume). Mais les géologues sont presque tous d'accord pour admettre que, d'une part, le Quaternaire doit commencer avec le premier grand refroidissement succédant aux ambiances chaudes du Néogène et que, d'autre part, il se caractérise principalement par des oscillations climatiques assez brutales. En effet, les péjorations du climat ont conduit à une fantastique extension des zones englacées qui ont causé nombre de bouleversements à la surface de la planète: baisse des niveaux marins, recrudescence de la sédimentation sur les continents, modification voire érosion totale des sols, sans oublier la migration des faunes et des flores. Les forages océaniques, mais aussi les carottages dans les calottes du Grœnland ont permis d'établir une chronologie cohérente du Quaternaire, en particulier pour ses époques les plus jeunes, à savoir le Pléistocène supérieur et l'Holocène (fig. 1). D'une manière générale, on peut ainsi dire que les phénomènes glaciaires ont été contemporains sur tous les continents: la Dernière Glaciation, qui a débuté vers 115000 ans BP (pour *Before Present*, soit avant le présent) s'est achevée partout aux environs de 10000 ans avant notre ère. Dénommée encore «Würm» ou «Weichselien» par référence à des stratigraphies régionales, cette phase de refroidissement du climat fait suite à une précédente qui elle était tempérée: il s'agit du Dernier Interglaciaire («Riss-Würm» ou «Eemien») qui s'étend de 130 à 115000 ans BP environ et au cours duquel l'ambiance climatique était comparable avec celle que nous vivons actuellement. Pléistocène

supérieur et Holocène sont les deux termes chronologiques dans lesquels s'insèrent, pour l'essentiel, les dépôts du Quaternaire rencontrés sur le territoire du canton du Jura.

Age 10^3 BP	Epoque	SI	Chronologie glaciaire			Ambiance climatique
0						
	HOLOCÈNE	1	POSTGLACIAIRE			Période tempérée.
10						
	PLÉISTOCÈNE SUPÉRIEUR		WÜRM ou WEICHSELIEN	TARDI-GLACIAIRE		Période de transition comprenant deux phases froides séparées par une phase tempérée.
15		2		PLÉNIGLACIAIRE	Supérieur	Stade aride et froid. Dernière avancée maximale des glaciers alpins (ou LGM).
30						
		3			Moyen	Stade globalement froid, mais comprenant des phases un peu plus clémentes.
60						
		4			Inférieur	Stade aride et froid.
75						
		5a 5b 5c 5d		GLACIAIRE ANCIEN		Alternance de phases tempérées et de phases froides. Evolution générale vers des conditions climatiques plus rigoureuses.
115						
		5e	RISS - WÜRM	INTER-GLACIAIRE EEMIEN		Période tempérée. Ambiance climatique comparable à l'Holocène.
130						
	PLÉISTO. MOYEN	6	RISS ou SAALIEN	AVANT-DERNIÈRE GLACIATION		Stade globalement froid.
150						

Fig. 1: Chronologie des époques les plus récentes du Quaternaire. L'échelle du temps est donnée en milliers d'années avant le présent. SI: stades isotopiques définis à partir des forages dans les sédiments marins. Chronologie: les termes de «Würm/Weichselien» et «Riss/Saalien» se réfèrent à des stratigraphies régionales pour désigner les stades froids.

Travaux et méthodes

Les travaux archéologiques engendrés par la construction de l'autoroute A16 – dite Transjurane – et menés dès la fin des années 1980 ont permis de reprendre assez fondamentalement l'étude du Quaternaire dans le Jura. Dès leur début, ces recherches sur le tracé autoroutier poursuivaient un double but: à savoir, d'une part, le repérage des gisements archéologiques et, d'autre part, une prospection géologique afin d'établir l'histoire des terrains traversés. Des coupes stratigraphiques représentatives de chaque milieu ont ainsi été systématiquement enregistrées. Techniquement, la méthode consiste à creuser avec une pelle mécanique des tranchées de sondage dont l'espacement dépend de la topographie et des potentialités présumées du terrain. Les sédiments quaternaires sont de cette manière intégralement excavés jusqu'au substrat tertiaire (soit la molasse au sens large) ou secondaire (les calcaires jurassiques). En outre, des carottages ont également été effectués ponctuellement en dehors de ces zones, en liaison avec des problématiques liées à l'évolution du paysage. L'autoroute serpentant entre les fonds de vallées et les pentes, la plupart des milieux naturels caractéristiques de la région jurassienne tels que plaines alluviales, versants et plateaux ont finalement pu être documentés; mais il faut préciser que le territoire des Franches-Montagnes n'a bien évidemment pas été touché par ces investigations.

En plus de cette prospection systématique, des études géologiques plus ciblées ont été réalisées sur les gisements archéologiques, au sein desquels les processus naturels interagissent avec l'occupation humaine. Ces études ont permis la collecte de données chronologiques issues principalement des datations au carbone 14 (ou ^{14}C), mais aussi de nombreuses informations paléœnvironnementales.

Quant aux sols enfouis dans les séquences quaternaires, qui constituent de bons repères chronostratigraphiques, ils ont été soumis à une analyse microscopique sous lame mince, technique dénommée micromorphologie. Au final, au cours de ces vingt dernières années, une masse considérable de données géologiques et paléœnvironnementales ont pu être collectées dans le canton du Jura. Diffusées sous formes de rapports, monographies ou articles scientifiques, elles révèlent l'évolution du paysage et du climat au cours du Quaternaire, mais aussi l'effet des activités humaines sur l'environnement. C'est un aperçu synthétique de l'ensemble de ces résultats qui est proposé dans le présent article.

Le Jura au cours de la Dernière Glaciation

L'épaisseur des terrains quaternaires que nous avons rencontrés sur le tracé de l'autoroute A16 n'est, il faut bien l'avouer, pas très importante. Ces formations superficielles rarement plus épaisses que 5 m ne jouent en effet qu'un rôle secondaire dans le modelé du paysage, dont les principaux traits sont donnés par l'ossature des calcaires jurassiques. Un forage effectué récemment dans les gorges de Moutier, plus précisément à l'ancienne Verrerie de Choindez, a toutefois révélé une épaisseur de graviers dépassant 15 m (MFR 2004). Il s'agit à notre connaissance d'un maximum pour la région, mais cette mesure est encore bien modeste en comparaison avec celles relevées dans la zone alpine.

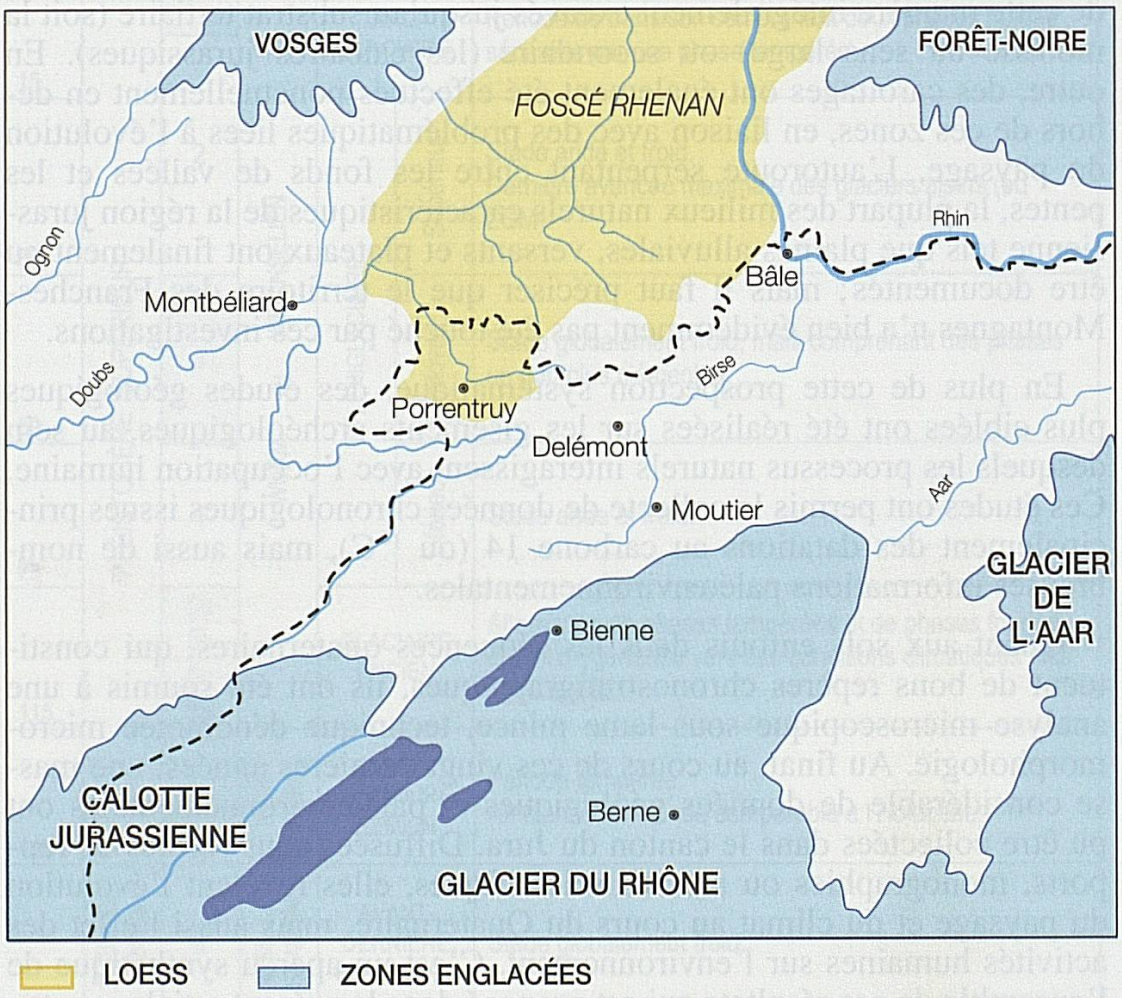


Fig. 2: Carte de la dernière extension maximale des glaciers dans le nord-ouest de la Suisse, il y a environ 22000 ans. Le territoire du canton du Jura est resté libre de glace, le glacier du Rhône venant buter contre le premier chaînon bordant le Plateau, tandis que la calotte jurassienne ne dépassait pas le Jura neuchâtelois. En jaune: aire de répartition des lœss (Aubry et al. 2005).

Dans la région de Martigny par exemple, le comblement quaternaire de la vallée du Rhône atteint 900 m d'épaisseur et se constitue principalement de dépôts morainiques et glaciolacustres (Rosselli et Olivier 2003). Or, sur l'ensemble du territoire prospecté dans le canton du Jura, aucun dépôt de ce type, d'origine spécifiquement glaciaire, n'a pu être identifié avec certitude.

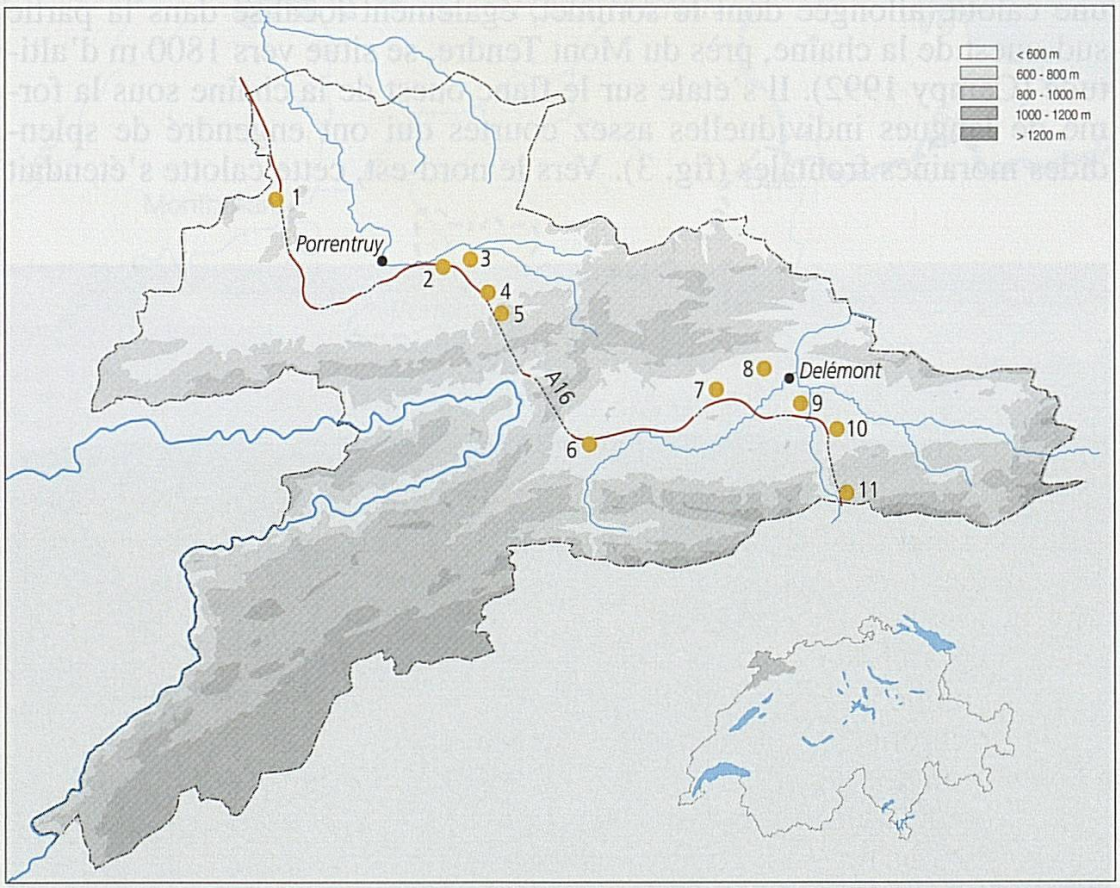
Cette absence peut s'expliquer en examinant de près la dernière extension maximale des glaciers (en abrégé LGM pour *Last Glacial Maximum*), qui a eu lieu en Suisse aux environs de 20000 ans BP, au Pléniglaciaire supérieur (fig. 2). Lors de ce stade «würmien» terminal, le glacier du Rhône n'a en effet pas franchi les crêtes du Jura: il est venu buter contre le flanc du premier chaînon bordant le Plateau. L'altitude supérieure de son bord nord atteint 1200 m au maximum, au pied de l'actuel Jura vaudois, et elle décroît latéralement vers le nord-est, l'extrémité de l'inlandsis se situant dans la région de Soleure (SKQ-CSQ à paraître-2006). Quant au glacier généré sur l'arc jurassien, il se présente comme une calotte allongée dont le sommet, également localisé dans la partie sud-ouest de la chaîne, près du Mont Tendre, se situe vers 1800 m d'altitude (Campy 1992). Il s'étale sur le flanc ouest de la chaîne sous la forme de langues individuelles assez courtes qui ont engendré de splendides moraines frontales (fig. 3). Vers le nord-est, cette calotte s'étendait

Fig. 3: Moraines frontales générées au débouché d'une vallée latérale dans la combe d'Ain (région de Champagnole, France), sur le flanc occidental de la chaîne jurassienne. On distingue deux rides morainiques, une au centre et la seconde plus à droite, dont la crête est soulignée par de la végétation (photo M. Guélat).

approximativement jusqu'au Jura neuchâtelois; au-delà, du fait de l'abaissement général des crêtes, le bilan entre le cumul et l'ablation de la neige était vraisemblablement négatif, ce qui a empêché l'accumulation de la glace et son écoulement (Campy, comm. orale). Ceci n'interdit pas l'émergence de petits glaciers locaux dans des combes mal drainées, propices à la rétention de la neige par retard de fonte (Aubert 1965).

Par conséquent, le territoire du canton du Jura est resté libre de glace lors de la dernière extension maximale des glaciers alpins (ou LGM), bien qu'il en ait subi l'influence vu leur relative proximité. Autrement dit, il correspond à un domaine périglaciaire caractérisé par des édifices sédimentaires assez originaux pour la Suisse, distincts des formations typiquement glaciaires telles que les moraines.

Fig. 4: Localisation géographique des sites et lieux-dits mentionnés dans le texte (infographie M.-C. Maître).



1 Plateau de Bure
2 Alle-Noir Bois
3 Plaine d'Alle
4 Cornol-Bottenier
5 Mont Terri
6 Boécourt-Les Montoyes
7 Plaine de la Pran
8 Delémont-Creux de la Terre
9 Plateau de la Beuchille
10 Courrendlin-En Solé
11 Choindez-Verrerie

Le Quaternaire en Ajoie

Chronique des travaux

Avant l'arrivée de l'autoroute A16, les études menées sur les dépôts quaternaires d'Ajoie sont relativement peu nombreuses. Les précurseurs tels Erzinger (1943) ou Perronne (1955) ont décrit les sédiments superficiels par interprétation des formes du paysage. De manière plus approfondie, Schneider (1960) fait le point des connaissances de l'époque sur les formations limoneuses recouvrant le plateau ajoulot: il suppose que les «lehms d'altération» (*Verwitterungslehme*), quand ils atteignent une certaine puissance, correspondent à des lœss altérés. Liniger (1967) reprend cette idée en soulignant que «la datation des lehms ajoulots pourrait progresser si l'on pouvait y découvrir des fossiles ou encore des couches archéologiques de l'âge de la Pierre».

Les sondages réalisés dès 1986 dans la plaine d'Alle jusqu'au pied nord du Mont Terri, ainsi que le suivi de la fouille du site préhistorique de Noir Bois (commune d'Alle), dans le vallon contigu à cette plaine vers l'ouest (fig. 4), ont permis d'établir plusieurs bilans des formations quaternaires (Guélat 1987 et 1997; Aubry et al. 2000). Ces résultats ne concernent donc que la partie sud-est de l'Ajoie mais, pour la séquence lœssique en tout cas, on peut les considérer comme valables à l'échelle régionale comme l'ont montré les travaux plus tardifs à l'ouest de Porrentruy.

Séquence et âge des dépôts

Le gisement du Noir Bois, à Alle, a révélé une succession de dépôts quaternaires d'une épaisseur maximale de 4 à 5 m, assez variée du point de vue des faciès sédimentaires, mais qui renferme bien entendu de nombreuses lacunes. Des datations par thermoluminescence (en abrégé TL) et par ^{14}C, mais aussi, dans une moindre mesure, la typologie du mobilier archéologique (artefacts de silex, céramique, etc.), ont permis d'insérer chronologiquement cette séquence. Ces données ont ainsi affiné la vision à plus grande échelle issue des sondages dans la plaine d'Alle, pour laquelle, malheureusement, très peu de datations sont disponibles. Nous tentons ci-après une corrélation schématique entre les résultats de ces deux campagnes de recherches (fig. 5).

A la base de la séquence du Noir Bois, on trouve l'unité E9 qui se subdivise en deux formations distinctes. D'une part, reposant sur le fond rocheux jurassique en nappe discontinue, des graviers fluviatiles se placent en position étagée dans le versant, soit une dizaine de mètres plus

Age 10^3 BP	SI	Chronologie		Alle, Noir Bois			Plaine d'Alle	
				Unité		Description	Unité	Description
	1	POSTGLACIAIRE (HOLOCÈNE)		E1		Terre végétale.	Ap	Terre végétale labourée.
				E2		Colluvions agricoles.	Fz	« Alluvions récentes » : graviers en comblements de chenaux coiffés de limons d'inondation et de colluvions (système fluvial à méandres).
10				E3		Sols enfouis (époques gallo-romaine, protohistorique et néolithique).		
		TARDIGLACIAIRE		E4		Limons argileux brun-jaune : loess remaniés et affectés par la pédogenèse (horizon Bt). Contiennent des silex du Magdalénien.		
15	2	PLÉNIGLACIAIRE	Supérieur (LGM)	E5		Cailloutis calcaire emballé dans une matrice loessique : coulées de gélifluxion (ou *head*).	Fy	« Alluvions moyennes » : nappe de graviers fluviatiles peu altérés, occupant le fond de vallée (système fluvial à bras multiples, de type tressage).
				E6		Lœss jaunes, francs, localement carbonatés avec des tests de mollusques, comblant des dolines.		
30	3		Moyen	E7	a	Petit sol humifère, brunâtre, développé lors d'un interstade.		
					b	Limons tachetés brun-jaune : lœss faiblement pédogénisés et localement remaniés. Contient des silex du Moustérien.		
60	4		Inférieur		c	Colluvions de base de la séquence loessique, sableuses, issues du démantèlement des paléosols interglaciaires (E8 et E9).		
75								
	5a	GLACIAIRE ANCIEN		E8		Complexe interglaciaire : sables limoneux brun-rouille résultant de plusieurs épisodes génétiques, dont deux phases de pédogenèse. Contient des silex du Moustérien.	LP	« Limons des plateaux » : paléosols, loess, limons loessiques.
	5b							
	5c							
115	5d							
130	5e	INTERGLACIAIRE EEMIEN						
	>6	anté-EEMIEN		E9		Altérite bariolée, développée sur limons ou sur cailloutis fluviatile, polyphasée (cryoturbation, pédogenèses).	(fx)	Partie supérieure, très altérée, des « alluvions anciennes ».
<800		GLACIATION « MAXIMALE » ?				Cailloutis calcaire d'origine fluviatile, en position étagée dans le paysage.	Fx	« Alluvions anciennes » : nappe de graviers discontinue, en position perchée.

Fig. 5: Insertion chronologique des dépôts quaternaires rencontrés dans le sud-est de l'Ajoie. SI: stades isotopiques marins.

haut que le fond de vallée. Ce cailloutis calcaire, d'une épaisseur pouvant atteindre plusieurs mètres, a été rencontré également dans la plaine d'Alle où il constitue l'unité alluviale Fx; celle-ci occupe aussi une position relativement élevée dans le paysage (par exemple à Cornol, au lieu-dit «Sur le Bottenier»), mais encore en relation avec le réseau hydrographique actuel. Aucun élément de datation n'est disponible pour ces «alluvions anciennes», mais on peut supposer que leur mise en place s'est effectuée au cours de l'un ou l'autre des cycles glaciaires qui ont eu lieu après 800000 ans BP (Schlüchter 2004). D'autre part, au sommet de l'unité E9, une altérite bariolée – ou unité (fx) – vient se plaquer sur ces graviers, dont elle constitue la tranche supérieure très altérée. Dans

la plaine d'Alle, une telle altérite coiffe aussi les «alluvions anciennes» sur une épaisseur dépassant parfois le mètre. L'analyse micromorphologique a montré l'aspect polyphasé de cette formation qui a évolué pendant plusieurs phases tempérées de type interglaciaire, mais qui a également subi une cryoturbation au cours d'un stade froid. Par conséquent, la genèse de ce dépôt s'est effectuée antérieurement au Dernier Interglaciaire.

L'unité E8 se présente au Noir Bois sous la forme d'une couche sableuse brun rouille, percée de racines fossiles et épaisse de quelques décimètres. Erodée au sommet, elle contient des silex moustériens. La micromorphologie a montré que ce dépôt résulte, à l'instar de l'unité sous-jacente, de plusieurs épisodes génétiques: consécutivement à un premier «coup de froid», la formation d'au moins deux sols prend place. Le premier sol résulte d'une longue évolution sous une forêt de feuillus typique d'un climat tempéré proche de l'actuel, tandis que le second a été engendré dans des conditions climatiques plus fraîches. Cette alternance de phases tempérées d'une durée de plusieurs milliers d'années avec des phases plus froides, et dont l'évolution générale mène à des conditions climatiques rigoureuses, est typique de la période allant de l'Interglaciaire Eemien au Glaciaire ancien, soit de 130000 à 75000 ans BP. C'est

Fig. 6: Coupe des lœss à Alle - Noir Bois (Ajoie). Ces sédiments éoliens se sont mis en place durant les stades les plus froids de la dernière glaciation. Hauteur du profil: 2,5 m (photo OCC/SAP).

pourquoi cette formation polyphasée est dénommée «pédocomplexe interglaciaire». Elle n'a pas pu être individualisée dans les séquences de la plaine d'Alle.

Beaucoup plus fréquents que ce complexe inférieur, des lœss comblent souvent en Ajoie les dépressions karstiques de type dolines ou «emposieux» (fig. 6). Sur le site du Noir Bois, deux unités principales y ont été reconnues. A la base se trouve tout d'abord l'unité E7, des limons sableux brun rouille d'une épaisseur proche du mètre. Sa limite inférieure avec E8, très nette, marque un épisode d'érosion provenant d'une réactivation du réseau karstique souterrain et d'une incision verticale en fond de vallée: ces événements sont en liaison avec un net rafraîchissement du climat que l'on peut corréler avec la transition entre le Glaciaire ancien et le Pléniglaciaire inférieur, vers 75000 ans BP. Les dépôts à la base de la séquence lœssique (unité E7c) remanient ainsi le pédocomplexe E8, selon des processus de colluvionnement. Les lœss de l'unité E7b se sont mis en place en plusieurs étapes interrompues par des épisodes colluviaux, mais la sédimentation éolienne, qui a eu lieu sous climat continental arctique, domine de plus en plus vers le sommet. Ce faciès caractéristique se rapporte au Pléniglaciaire inférieur et surtout moyen. Deux datations TL confirment cette insertion chronostratigraphique (Zöller 2000), tandis que des silex moustériens dispersés ont été découverts dans ces sédiments. Au sommet, un petit sol humifère – ou unité E7a – conservé dans une ancienne doline du site du Noir Bois marque un arrêt de la sédimentation lœssique: il indique une recolonisation du milieu par la végétation, le climat devenant un peu plus clément. Sa position stratigraphique ainsi que les datations TL permettent d'insérer cet interstade avant 28000 ans BP, ce qui est en accord avec les données disponibles pour le Plateau suisse (Schlüchter 2004).

La seconde unité éolienne principale, ou E6, correspond à des limons jaunâtres, dont l'épaisseur peut atteindre plusieurs mètres dans les dépressions karstiques. Reposant sur un contact d'érosion, ces lœss francs traduisent des conditions climatiques rigoureuses, de type continental aride et froid. Ils contiennent encore des carbonates lorsqu'ils sont recouverts par des coulées de gélifluxion (telles l'unité E5, voir plus bas), ce qui a permis la préservation locale de tests de mollusques (fig. 7): l'analyse faunistique montre que cette population malacologique est spécifique au Pléniglaciaire supérieur (Thew et Chaix 2000). Une datation ^{14}C de ces coquilles, de même que deux datations TL, confirment ce résultat: les lœss E6, dans lesquels ont également été découvertes des dents de rhinocéros laineux (Guérin 2000), s'insèrent entre 28000 et 20000 ans BP.

Des plaquages lœssiques ont bien entendu également été observés dans la plaine d'Alle, mais, en l'absence d'analyse et de datation, aucune distinction de faciès n'a été opérée au sein de cette unité désignée

Fig. 7: Vue au microscope des lœss du Pléniglaciaire supérieur (unité E6, Alle - Noir Bois). Ces dépôts sont formés de grains bien triés de quartz, mica et calcite d'une taille de 20 microns. A gauche, une coquille de mollusque. Lumière polarisée, hauteur réelle: 1,5 mm (photo M. Guélat).

sous le terme générique de «limons des plateaux» (ou unité LP). Dans cette zone, les dépôts éoliens ne sont conservés que dans les pentes où ils coiffent par endroits la nappe alluviale Fx. En fond de vallée effectivement, suite au phénomène d'incision déjà mentionné plus haut, une autre formation fluviatile, ou unité Fy, s'est mise en place durant tout le Pléniglaciaire. Rencontrée à de nombreuses reprises dans les vallées ajoulotes, cette nappe d'«alluvions moyennes», d'épaisseur plurimétrique, s'est édifiée selon un système à bras multiples de type tressage caractéristique d'une ambiance périglaciaire.

Plaquée en discordance sur la séquence lœssique, l'unité E5 se constitue de cailloux et graviers calcaires anguleux, mal triés, montrant une tendance au litage. Ce cailloutis est emballé dans une matrice silteuse brun-jaune d'origine lœssique. D'une épaisseur de l'ordre du mètre s'amincissant vers le bas de pente, cette nappe caillouteuse (ou *head*) s'est mise en place par gélifluxion; ses éléments calcaires proviennent du substrat jurassique affleurant au haut du versant. La présence simultanée d'éléments grossiers et de particules fines témoigne d'un milieu périglaciaire bien installé, à gel saisonnier profond (van Vliet-Lanöe 1988), sans pergélisol dans le cas de Noir Bois. Ces traits sédimentaires, mais aussi la position stratigraphique de cette unité permettent d'insérer sa genèse vers la fin du Pléniglaciaire supérieur. De telles nappes caillouteuses ont également été observées ailleurs en Ajoie, par exemple sur

le plateau de Bure; mais elles sont absentes de la plaine d'Alle, du fait sans doute que le substrat de ce petit bassin est de nature molassique et ne produit donc pas de tels cailloutis.

L'unité E4 se compose de limons argileux brun-jaune imprégnés d'oxydes fer dans leur partie sommitale. Son épaisseur varie du décimètre au mètre dans des dépressions karstiques. Il s'agit de limons lœssiques édifiés essentiellement par remaniement des dépôts éoliens plus anciens, à savoir les unités E6 et E7. Pendant leur mise en place, ces limons ont été affectés par la pédogenèse, ce qui a conduit à la formation progressive d'un horizon argilique (ou horizon Bt). Aucune datation n'a pu être réalisée dans cette formation qui renferme des silex magdaléniens en amas très localisés. Ces artefacts, mais aussi la genèse primaire de l'horizon Bt sont des indices plaidant en faveur d'une insertion chronologique de E5 dans le Tardiglaciaire, soit entre 15000 et 10000 ans BP. C'est également au cours de cette période qu'a vraisemblablement eu lieu dans la Plaine d'Alle la transition entre les «alluvions moyennes» Fy, de texture assez grossière et monotone, vers la nappe Fz, ou «alluvions récentes»: celle-ci se caractérise par des graviers chenalisés passant latéralement à des limons d'inondation. Cette mutation traduit un changement de style fluvial, à savoir du type tressage au type méandrage, ce dernier perdurant à l'Holocène.

Après 10000 ans BP, durant le Postglaciaire justement, les dépôts les plus superficiels, rarement épais de plus de 2 m, se sont mis en place. Dans les dolines cependant, les dépôts holocènes peuvent prendre une certaine ampleur et l'analyse du comblement de l'une de ces dépressions karstiques, au Noir Bois, a permis d'y distinguer différentes couches. Au-dessus des limons argileux E4, on trouve ainsi une succession de deux sols fossiles datés du Néolithique final et de l'âge du Fer. Constituant l'unité E3, de tels sols enfouis ont aussi été localement découverts dans la plaine d'Alle, comme par exemple au pied du Mont Terri, où un niveau charbonneux a été daté de l'âge du Bronze cette fois. Ces horizons humifères signalent les premiers défrichements et pratiques agricoles consécutives en Ajoie. Ils sont recouverts d'une nappe de limons bruns ubiquistes, ou unité E2, issue du développement de l'agriculture dans les périodes plus récentes: ces plaquages de colluvions proviennent en effet de l'érosion des sols dans les pentes. L'unité E1, soit la terre végétale actuelle (ou horizon labouré Ap), coiffe finalement la séquence du Quaternaire ajoulot.

Le Quaternaire dans la vallée de Delémont

Chronique des travaux

Au 19e siècle déjà, le géologue J.-B. Greppin (1855) s'attache à décrire les terrains quaternaires du bassin de Delémont et en propose une première insertion stratigraphique. Avec la publication, au début du 20e siècle, de la première feuille de l'Atlas géologique de la Suisse, les formations du Quaternaire sont clairement individualisées (Liniger 1925).

Age 10^3 BP	S I	Chronologie		Unité	Description
	1	POSTGLACIAIRE (HOLOCÈNE)		1	Terre végétale.
1.0				2	Limons bruns ou chenaux de graviers et sables calcaires. Genèse alluviale et colluviale.
				3.1	Sol enfoui du Haut Moyen Age.
				3	Séquence de limons et de comblements de chenaux gravelo-sableux, avec des niveaux tourbeux. Datations : époques mérovingienne et romaine.
2.0				3.1	Sol enfoui de l'âge du Bronze et/ ou du Fer.
				4	Limons argileux gris-jaune, pédogénisés (horizon Bg), avec chenaux graveleux altérés et des bois (< 3000 ans av. J.-C.).
10					En dessous, dans limons, amas de charbons de bois datés de 11'000 ans av. J.-C.
		TARDIGLACIAIRE		T1	Base: nappe de graviers fluviatiles occupant le fond de vallée.
15	2	PLÉNIGLACIAIRE	Supérieur (LGM)	5 T2	Graviers fluviatiles calcaires assez grossiers, en nappe de pied de versant étendue. Altérés au sommet.. Mise en place en contexte périglaciaire (système fluvial de type tressage).
30					
	3		Moyen	6	Limons argileux brun jaunâtre, avec chenaux sableux. Très altérés (horizon BTg). Dépôt fluviatile fin, associé à l'unité 7.
60					
	4		Inférieur	7 ou T3	Graviers fluviatiles calcaires, en nappe étagée discontinue dans le versant, très altérés au sommet. Mise en place en contexte périglaciaire.
75					
130	5	INTERGLACIAIRE (au sens large)		(t 4)	Plaquages limoneux brun-rouille, très altérés, en positon la plus élevée dans le paysage.
<800	>6	anté-EEMIEN			

Fig. 8: Insertion chronologique des dépôts quaternaires rencontrés dans la vallée de Delémont. S I: stades isotopiques marins.

Dans son approche géomorphologique publiée en 1969, le géographe D. Barsch reprendra sans grand changement ces principales unités. Accompagnée d'une carte, cette étude propose une datation des terrasses fluviatiles du bassin de Delémont établie par raccord avec les terrasses de la région bâloise via la vallée de la Birse. Menées dès la fin des années 1980, les prospections et forages ayant précédé la construction de la Transjurane ont permis d'acquérir une vision approfondie du sous-sol indispensable au géologue.

La partie occidentale de la vallée de Delémont a ainsi été sondée de 1986 à 1999, ce qui a permis la découverte d'une vingtaine de sites archéologiques d'importance inégale. Parmi ceux-ci, on retiendra les gisements du bas-marais de Boécourt - Les Montoyes (fig. 4) qui a livré la première séquence quaternaire significative pour la vallée (Guélat et al. 1993). Une autre zone essentielle consiste en la plaine de la Pran, qui s'étend de Develier à Delémont. Le suivi de la fouille de deux sites importants, le premier datant du haut Moyen Age (Guélat et al. à paraître-2006) et l'autre de la période protohistorique (Pousaz et al. 2000), ont permis la collecte de nombreuses données concernant plus particulièrement l'Holocène. Dès 1999, la zone centrale du bassin, au sud de Delémont, jusqu'à l'entrée du futur tunnel en direction de Moutier, a fait l'objet de telles recherches. Celles-ci ont permis des observations importantes pour le Quaternaire régional, en particulier sur le plateau de la Beuchille, au flanc nord du Montchaibeux (Braillard et Guélat 2002), mais aussi à proximité du portail du tunnel, à l'est de Courrendlin (lieu-dit «En Solé», Guélat 2005). En outre, une synthèse concernant l'occupation humaine et son interaction avec le milieu naturel a déjà été tentée (Braillard et al. 2002).

Les terrasses fluviatiles, témoins du dernier cycle glaciaire

Une succession schématique des dépôts quaternaires dans le bassin de Delémont peut déjà être proposée (fig. 8); celle-ci se verra sans doute encore affinée lorsque certaines données, en particulier d'ordre chronologique, seront disponibles. Cette description des unités est agrémentée par une coupe synthétique à travers la vallée qui révèle la géométrie des dépôts quaternaires dont l'épaisseur atteint 3 à 5 m en moyenne (fig. 9). D'un point de vue général, trois unités alluviales plaquées sur la molasse oligocène dessinent la géomorphologie locale.

La plus ancienne consiste en une nappe de graviers étagée, perchée dans le versant d'une quinzaine de mètres par rapport au fond de vallée, mais discontinue dans son extension latérale. Dans la plaine de la Pran, il s'agit de l'unité 7, d'une épaisseur de l'ordre du mètre et formée d'un

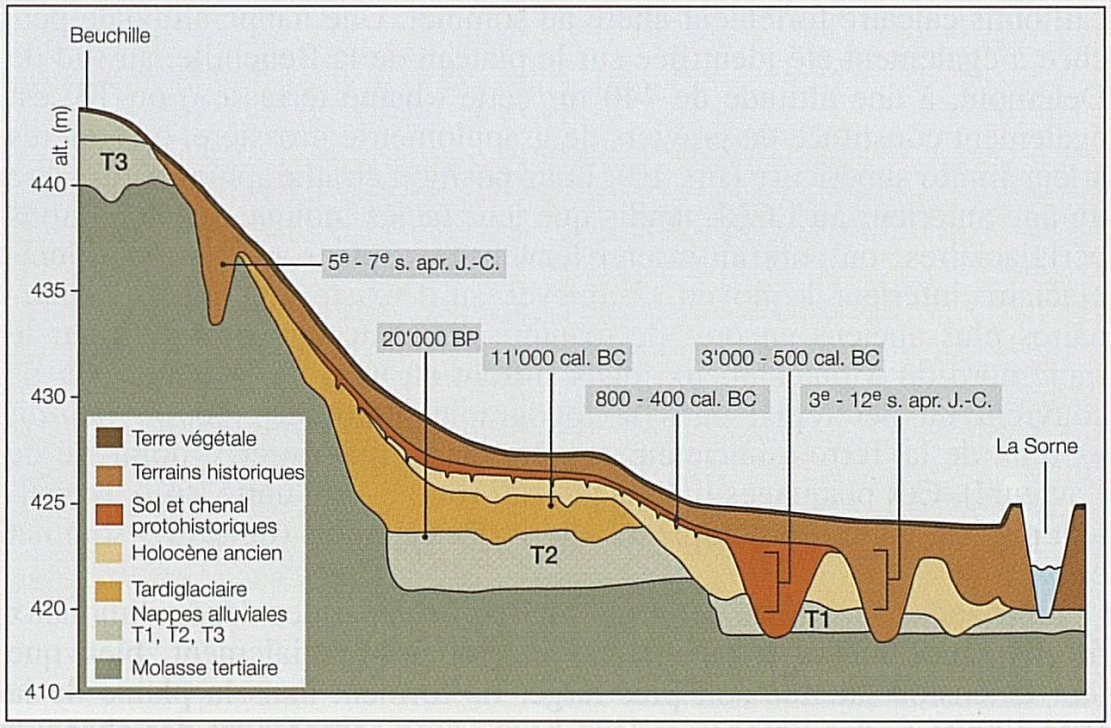


Fig. 9: Coupe géologique schématique à travers les dépôts quaternaires de la vallée de Delémont avec les principales datations obtenues (Aubry et al. 2005, modifié).

Fig. 10: Vue en coupe de la nappe alluviale T3 près de la ferme de la Beuchille (en médaillon), au sud de Delémont. Reposant sur la molasse du Tertiaire, cette formation est constituée de graviers fluviatiles coiffés par une séquence limoneuse d'origine partiellement lœssique. Hauteur de la coupe: environ 6 m (photos M. Guélat).

cailloutis calcaire fortement altéré au sommet. Une nappe alluviale perchée a également été identifiée sur le plateau de la Beuchille, au sud de Delémont, à une altitude de 440 m: cette «haute terrasse», ou T3, est également constituée de graviers de granulométrie grossière, très altérés à leur limite supérieure (fig. 10). Leur position stratigraphique implique un âge antérieur au LGM, tandis que leur faciès indique des conditions périglaciaires: on pourrait insérer leur mise en place au cours du Pléniglaciaire inférieur à moyen. A relever qu'il existe des dépôts quaternaires plus anciens encore: de manière disparate, ils se placent sur le flanc nord du Montchaibeux, mais surtout au nord de Delémont où ils couvrent un net replat dans la topographie (altitude 470 m, lieu-dit «Creux de la Terre», ancienne carrière d'une tuilerie et… domicile de l'auteur!). Ces plaquages limoneux brun-rouille – ou unité (t4) – rappellent par leur faciès les complexes altéritiques ajoulots (unités E9 sommet et fx).

Les nappes fluviatiles perchées sont coiffées par des dépôts limoneux de puissance métrique qui paraissent associés spatialement, bien que leur extension latérale soit plus large. Ils forment dans la plaine de la Pran l'unité 6, des limons argileux brun-jaune comprenant des chenaux sableux à leur base. Issue d'inondations, cette formation a subi une évolution sur place de longue durée qui a conduit au développement d'un horizon argilique Bt. On retrouve des dépôts similaires sur le plateau de la Beuchille où ils scellent les graviers T3.

La deuxième unité alluviale importante se situe au pied des versants et se caractérise, dans la partie centrale du bassin de Delémont, par une assez grande extension latérale. Composée de graviers plutôt grossiers scellés dans une matrice sableuse, la nappe alluviale T2 peut atteindre 6 m d'épaisseur, comme par exemple dans la carrière de la Ballastière (fig. 11). Il s'agit de graviers à stratification entrecroisée, caractéristique d'un style fluvial de type tressage; des déformations dues à l'action du gel ont été observées à leur base. La nappe T2 s'est donc mise en place dans des conditions périglaciaires. Cette information paléoclimatique et sa position stratigraphique indiquent que cet épais cailloutis s'est déposé au cours d'un épisode «würmien» froid, correspondant au Pléniglaciaire supérieur, comme le confirme une datation par luminescence réalisée à Courrendlin - En Solé. Cette insertion est en outre corroborée par l'équivalent latéral de T2 dans la plaine de la Pran, ou unité 5. Ces graviers ont en outre livré une unique date ^{14}C, mais aussi une vertèbre de bison de steppe, qui tous deux confortent l'hypothèse que cette nappe fluviatile s'est mise en place principalement au LGM.

La troisième nappe alluviale distinguée, ou T1, occupe la position géomorphologique la plus basse, en fond de vallée. Elle est formée de graviers grossiers dont l'épaisseur varie entre 2 et 4 m et qui ressemblent à T2 du point de vue faciès. Couverte par d'épais dépôts holocènes et

Fig. 11: La nappe alluviale T2 visible dans la carrière de la Ballastière à Delémont se compose de graviers à stratification entrecroisée, mis en place selon un style fluvial de type tressage. Cet épais cailloutis s'est donc déposé dans des conditions périglaciaires, sans doute au cours du Pléniglaciaire supérieur. Hauteur de la coupe: environ 4 m (photo M. Guélat).

noyée par la nappe phréatique, cette unité est d'accès techniquement difficile, ce qui explique pourquoi elle demeure encore assez méconnue. Aucune datation n'étant disponible pour ce cailloutis, son dépôt se place par déduction stratigraphique «quelque part» entre la fin du Pléniglaciaire et le Tardiglaciaire, voire jusqu'au début du Postglaciaire. Elle n'a pas de véritable équivalent latéral dans la plaine de la Pran où, pour des raisons de dynamique alluviale, elle se confond avec les graviers de l'unité 5.

Un scénario pour les périodes tardi- et postglaciaires

Après les terrasses fluviatiles, venons-en maintenant au second point d'intérêt du Quaternaire de la vallée de Delémont, à savoir les dépôts du Tardi- et Postglaciaire, qui sont relativement bien exprimés dans cette région. Pour ce parcours, nous allons affiner l'échelle chronologique, en ce sens que les dates seront dès à présent formulées en années calendaires avant (pour les dates ^{14}C: cal. BC – *Before Christ* –) ou après Jésus-Christ.

Reposant en contact érosif sur les graviers de la «basse terrasse» (unité locale 5 ou T2), la séquence rapportée au Tardiglaciaire est localement préservée, en particulier dans les secteurs proches des confluents, au débouché des vallées latérales. En pied de versant, elle est constituée d'accumulations sableuses à lits de graviers, de géométrie rappelant celle de cônes de déjection de petites dimensions. Pouvant atteindre 2 m d'épaisseur, ces formations passent latéralement à des dépôts alluviaux moins puissants. Il s'agit de l'unité 4, constituée de chenaux graveleux recouverts de limons argileux. Vers leur base, ceux-ci renferment des amas de charbons de bois à partir desquels plusieurs datations ^{14}C ont été réalisées, qui livrent toutes un âge proche de 11000 cal. BC. La limite entre le cailloutis pléniglaciaire et ces dépôts chenalisés marque donc un changement de style fluvial, à savoir du type tressage au type méandrage. Déjà évoquée plus haut pour les alluvions ajoulotes, cette métamorphose s'est opérée dans la vallée de Delémont entre 13000 et 12000 cal. BC environ, d'après la séquence du bas-marais de Boécourt - Les Montoyes datée par palynologie (fig. 12).

Comme en Ajoie, le système méandrisant a persisté tout au long de l'Holocène. Durant la majeure partie de celui-ci, les taux de sédimentation sont restés faibles, tandis que les migrations latérales des cours d'eau étaient plutôt réduites. En coupe, cela s'exprime par une troncature progressive des dépôts du Tardiglaciaire pour laisser place aux allu-

Fig. 12: Tranchée ouverte dans la cuvette de Boécourt - Les Montoyes. Les dépôts organiques de type tourbe de bas-marais (en sombre) alternent avec des limons d'inondation d'origine alluviale (en clair). Hauteur: 1,5 m (photo OCC/SAP).

vions chenalisées de l'Holocène ancien, elles-mêmes recoupées par des chenaux plus tardifs. Fréquemment, les dépôts tardi- et postglaciaires forment ainsi une succession chronologique allant du bord de la plaine d'inondation vers le lit actuel du cours d'eau. Consécutivement à ce faible taux d'accrétion, les limons d'inondation subissent une pédogenèse assez avancée, suite à une colonisation par la végétation: un sol se développe à leur sommet.

L'arrivée relativement tardive des premiers agriculteurs dans la vallée de Delémont constitue un événement important dans cette histoire sédimentaire. Dès le début de l'âge du Bronze en effet, vers 2000 avant J.-C., le paysage s'ouvre graduellement suite au défrichement du couvert forestier, comme le révèle une étude palynologique de dépôts d'origine végétale. Cette intervention de l'homme dans un environnement jusqu'alors en équilibre s'inscrit dans les séquences par un horizon humifère charbonneux, dénommé «sol protohistorique» parce qu'il renferme les traces d'occupations humaines des âges du Bronze et du Fer. Tel un niveau-repère, ce sol enfoui apparaît dans de nombreuses coupes observées sur le tracé de la Transjurane. Dans la plaine de la Pran, il constitue l'unité locale 4.1 qui se corrèle latéralement avec des séquences de comblement de chenal assez exceptionnelles, édifiées entre 3000 et 500 cal. BC (fig. 9). L'analyse des dépôts protohistoriques montre que vers 850 avant J.-C. le taux de sédimentation s'accroît, car les cours d'eau ont tendance à inciser la molasse oligocène. En revanche, les sols des versants ne semblent à ce stade pas encore érodés. Il en va de même dans la zone centrale du bassin de Delémont, comme par exemple sur le site archéologique de Courrendlin- En Solé: à cet endroit, le «sol protohistorique» coiffe une séquence limoneuse mise en place dès le Tardiglaciaire, comme en témoigne une datation ^{14}C de 11000 cal. BC environ.

Les dépôts plus tardifs, rapportés à la période historique, sont particulièrement bien développés dans la vallée de Delémont. Sur les versants, il s'agit de colluvions de sol issues d'une déstabilisation consécutive à une disparition du couvert végétal. En fond de vallée, les terrains historiques se constituent de limons d'inondation brun-gris, d'une épaisseur se situant entre 1 et 2 m. Dans la plaine de la Pran, un second sol enfoui datant du haut Moyen Age (unité 3.1) vient s'interstratifier au sommet d'une séquence attribuée aux périodes gallo-romaine et mérovingienne (unité 3). L'analyse sédimentologique diachronique de ces dépôts montre qu'une certaine instabilité du système fluvial se marque dès la fin de l'Antiquité: les cours d'eau fonctionnent dès lors selon un rythme jalonné par des crues assez brutales. L'étude menée dans la plaine de la Pran révèle aussi l'existence d'une oscillation humide et probablement plus fraîche du climat entre 550 et 750 après J.-C. Peut-être exacerbée par des facteurs anthropiques, cette crise s'exprime par une récurrence exceptionnelle des crues et par des épisodes de ravinement dans les

versants de la vallée. Ces indications paraissent corroborées régionalement par le plus haut niveau atteint par le lac de Seewen (Jura bâlois: Becker et al. 2000) et, dans une certaine mesure, par une transgression des lacs du Jura français (Magny 2004).

S'étendant de 900 à 1300 après J.-C. environ, l'«optimum climatique médiéval» désigne en général une période au cours de laquelle les hivers sévères étaient moins fréquents et plus modérés (Pfister et al. 1998). Puis, à l'échelle régionale, on assiste à une recrudescence des apports limoneux d'origine pédologique qui a conduit au revêtement de la plaine d'inondation par des limons bruns (unité 2), d'une épaisseur de 50 cm en moyenne. Elle s'explique par la conjonction du développement des activités agricoles avec la détérioration climatique du Petit Age Glaciaire entre environ 1350 et 1850 après J.-C., au cours de laquelle les glaciers alpins ont connu une importante avancée. Pour la vallée de Delémont, il faut rajouter l'impact des activités sidérurgiques, qui ont connu leur essor dès le bas Moyen Age et qui se sont poursuivies jusqu'au 20e siècle.

Conclusions

Au terme de cet aperçu du Quaternaire dans le canton du Jura, on soulignera une fois encore l'originalité de cette région par comparaison avec les Alpes et le Plateau suisse, puisqu'elle n'a pas été englacée au cours du dernier cycle glaciaire. Ceci ne signifie pas que l'influence des glaciations ne s'est pas fait sentir: bien au contraire, en contexte périglaciaire, chaque domaine de cette partie nord de l'Arc jurassien a eu une réponse sédimentaire spécifique face aux oscillations climatiques.

En Ajoie, des paléosols du Dernier Interglaciaire sont préservés au sommet d'anciennes nappes alluviales étagées dans le paysage. Relativement rares en Suisse, ces sols fossiles ont enregistré les modifications du climat durant cette période méconnue ayant précédé la glaciation «würmienne». Un autre point d'intérêt réside dans la présence de lœss, bien que ceux-ci atteignent des puissances assez modestes si on les compare avec les séquences du Fossé rhénan (fig. 2). Mis en place au cours des épisodes froids de la dernière glaciation, ces dépôts éoliens s'épaississent cependant dans les dépressions karstiques telles que les dolines où ils peuvent sceller des vestiges de grande faune (mammouth, rhinocéros laineux, etc.). En position remaniée dans les dépôts superficiels de l'Holocène, ces plaquages lœssiques ont engendré des sols profonds, typiques de la région ajoulote.

Dans la vallée de Delémont, ce sont plutôt les formations fluviatiles qui caractérisent la sédimentation au Pléistocène supérieur. Etagées dans

le paysage, ces nappes alluviales représentent différents stades, généralement rigoureux du point de vue du climat, dans la genèse du modelé en contexte périglaciaire. En fond de vallée, la séquence de sédiments mis en place aux Tardi- et Postglaciaire est relativement conséquente. Grâce entres autres à la présence de dépôts tourbeux permettant des datations, la succession des événements ayant marqué les écosystèmes aux cours des derniers 15000 ans est peu à peu reconstituée. Des crises climatiques telles des périodes de pluviosité excessive, ou au contraire des périodes relativement sèches, sont identifiables au cours de l'Holocène. Mais les sédiments superficiels ont également enregistré une certaine déstabilisation en liaison avec la colonisation, relativement tardive, de la vallée par l'homme. Ce type d'information paléœnvironnementale prend tout son sens en regard du dérèglement climatique qui s'amorce actuellement à l'échelle du globe.

Au final, il est tentant de vouloir tirer des parallèles entre les séquences quaternaires du plateau ajoulot et du bassin de Delémont, car si l'on compare les tableaux récapitulatifs (fig. 5 et 8), certaines convergences sont évidentes. Cette synthèse pourra être réalisée dans un proche avenir, lorsque seront disponibles les données complémentaires que certains gisements archéologiques en cours d'étude doivent encore fournir.

Géologue de formation, Michel Guélat s'est spécialisé dans la géologie du Quaternaire et la sédimentologie des sites archéologiques. Il est chargé d'études à la Section d'archéologie et de paléontologie de l'Office de la culture du canton du Jura et, en parallèle à cette activité à temps partiel, réalise des mandats à titre privé.
E-mail: mic.guelat@bluewin.ch

Remerciements

– A la direction de l'Archéologie A16 de l'Office de la culture du canton du Jura, soit R. Fellner et F. Schifferdecker, qui ont rendu possible ces recherches.
– A mes collègues L. Braillard et F. Lapaire pour leur relecture critique du manuscrit.
– Aux dessinateurs-rices (M.-C. Maître, L. Petignat Häni et S. Maître), qui ont bien voulu m'épauler dans la réalisation des figures.

BIBLIOGRAPHIE

Aubert D. (1965) Calotte glaciaire et morphologie jurassienne. Eclogae geologicae Helvetiae, 58/1, p. 555-578.

Aubry D., Guélat M., Detrey J., Othenin-Girard B. et al. (2000) Dernier cycle glaciaire et occupations paléolithiques à Alle, Noir Bois (Jura, Suisse). Office du patrimoine historique et Société jurassienne d'Emulation, Porrentruy. Cahier d'archéologie jurassienne, 10, 176 p.

Aubry D., Braillard L., Guélat M., Stalder L. et Stahl Gretsch L.-I. (2005) L'homme et l'environnement. Archéologie suisse, 28/ 2, p. 6-16.

Barsch D. (1969) Studien zur Geomorphogenese des zentralen Berner Juras. Basler Beiträge zur Geographie, 9, 221 p.

Becker A., Davenport C., Haeberli W., Burga C., Perret R., Flisch A. et Keller W. (2000) The Fulnau landslide and former Lake Seewen in the northern Swiss Jura Mountains. Eclogae Geologicae Helvetiae 93/3, p. 291-305.

Braillard L. et Guélat, M. (2002) Le plateau de «La Beuchille»: synthèse géologique. In: Mœschler P.-A., Sondages des sections 7 et 8 de l'A16-fouilles 2001. Office du Patrimoine historique, Porrentruy, rapport inédit, p. 11-28.

Braillard L., Guélat M., Pousaz N. et Rachoud-Schneider A.-M. (2002) Interactions entre occupation humaine et milieux naturels dans le bassin de Delémont (Jura, Suisse): l'âge du Bronze, un point de rupture manifeste dans la dynamique sédimentaire et l'évolution de la végétation. In: Richard, H. et Vignot, A. (dir.) Equilibres et ruptures dans les écosystèmes durant les 20 derniers millénaires en Europe de l'Ouest. Actes du colloque international de Besançon, septembre 2000. Besançon, Presses Universitaires Franc-Comtoises, p. 213-221.

Campy M. (1992) Palaeogeographical relationships between Alpine and Jura glaciers during the two last Pleistocene glaciations. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeocology, 93, p. 1-12.

Erzinger E. (1943) Die Oberflächenformen der Ajoie (Berner Jura). Mitteilungen der Geographisch-Ethnologischen Gesellschaft in Basel, IV, p. 1-138.

Greppin J.-B. (1855) Notes géologiques sur les terrains modernes, quaternaires et tertiaires du Jura Bernois et en particulier du val de Delémont. Nouveaux mémoires de la Société Helvétique des Sciences Naturelles, 14, Berne, 71 p.

Guélat M. (1987) Géologie. In: Masserey C. et al., Prospection archéologique: sondages en Ajoie et dans la Vallée de Delémont. Office du Patrimoine historique, Porrentruy, rapport inédit, p. 17-32.

Guélat M. et al. (1993) La dynamique fluviatile et palustre dans les vallées jurassiennes au cours des derniers 15000 ans: l'exemple de la région des Montoyes (Jura suisse). In: Guélat M. et al., Archives palustres et vestiges de l'âge du Bronze entre Glovelier et Boécourt. Cahier d'archéologie jurassienne, 4, p. 15-51.

Guélat M. (1997) Alle, Noir Bois: analyse micromorphologique de la coupe 33. In: Othenin-Girard B. et al., Le Campaniforme d'Alle, Noir Bois (Jura, Suisse). Cahier d'archéologie jurassienne 7, Porrentruy, p. 36-39.

Guélat M. (2000) Approche micromorphologique. In: Aubry D. et al., Dernier cycle glaciaire et occupations paléolithiques à Alle, Noir Bois (Jura, Suisse). Cahier d'archéologie jurassienne 10, Porrentruy, p. 61-80.

Guélat M. (2005) Etude géologique. In: Othenin-Girard B., Courrendlin, En Solé (JU, Suisse). Habitats protohistoriques et structures de drainage de l'Antiquité au 20e s. – fouilles 2004. Office de la culture, Porrentruy, rapport inédit, p. 11-18.

Guélat M., Brombacher C., Olive C., Rachoud-Schneider A.-M. et al. (à paraître-2006) Environnement et exploitation du terroir au début du Moyen Age. Cahier d'archéologie jurassienne 16, Porrentruy.

Guérin C. (2000) Etude des dents de rhinocéros de l'unité E6. In: Aubry D. et al., Dernier cycle glaciaire et occupations paléolithiques à Alle, Noir Bois (Jura, Suisse). Cahier d'archéologie jurassienne 10, Porrentruy, p. 96-98.

Liniger H. (1925) Geologie des Delsberger Beckens und der Umgebung von Movelier. Matériaux pour la Carte géologique de la Suisse, nouvelle série, 55/IV. Commission géologique de la Société helvétique des Sciences naturelles, Berne, 71 p.

Liniger H. (1967) Pliozän und Tektonik des Juragebirges. Eclogae geologicae Helvetiae, 60/2, p. 407-490.

Magny M. (2004) Holocene climate variability as reflected by mid-European lake-level fluctuations and its probable impact on prehistoric human settlements. Quaternary International, 113, p. 65-79.

MFR Géologie-Géotechnique SA (2004) A16, section 8, tronçon du km 45.850 au km 46.045, demi-jonction de Choindez – viaduc de la Verrerie. Etude géologique et géotechnique. Delémont, rapport inédit.

Perronne A. (1955) Vestiges des périodes glaciaires dans le Jura. In: Recueil d'études et de travaux scientifiques, Société jurassienne d'Emulation, Porrentruy, p. 47-79.

Pfister C., Luterbacher J., Schwarz-Zanetti G. and Wegmann M. (1998). Winter air temperature variations in western Europe during the Early and High Middle Ages (AD 750-1300). The Holocene 8, 5, p. 535-552.

Pousaz N., Elyatquine M., Guélat M. et Marchand K. (2000) Delémont JU-En La Pran. De l'âge du Bronze au Moyen Age. Une nécropole du Bronze final dans son environnement archéologique et sédimentaire. Annuaire de la Société suisse de Préhistoire et d'Archéologie, 83, p. 79-94.

Rosselli A. et Olivier R. (2003) Modélisation gravimétrique 2.5D et cartes des isohypses au 1: 100000 du substratum rocheux de la Vallée du Rhône entre Villeneuve et Brig (Suisse). Eclogae geologicae Helvetiae, 96/3, p. 399-423.

Schlüchter C. (2004) The Swiss glacial record- a schematic summary. In: Ehlers J. and Gibbard P. L. (eds.) Quaternary Glaciations – Extent and Chronology, Elsevier, p. 413-418.

Schneider A. (1960) Geologie des Gebietes von Siegfriedblatt Porrentruy. Matériaux pour la Carte Géologique de la Suisse, N.S. 109, 72 p.

SKQ-CSQ/Commission suisse pour la Recherche sur le Quaternaire (à paraître- 2006) Carte de la dernière extension maximale des glaciers en Suisse. OFEG – Office Fédéral des Eaux et de la Géologie.

Thew N. et Chaix L. (2000) Etude malacologique des lœss de l'unité E6. In: Aubry D. et al., Dernier cycle glaciaire et occupations paléolithiques à Alle, Noir Bois (Jura, Suisse). Cahier d'archéologie jurassienne 10, Porrentruy, p. 93-96.

van Vliet-Lanöe B. (1988) Le rôle de la glace de ségrégation dans les formations superficielles de l'Europe de l'Ouest. Thèse de doctorat d'Etat à l'Université de Paris I, 854 p.

Zöller L. (2000) Datations par thermoluminescence des lœss. In: Aubry D. et al., Dernier cycle glaciaire et occupations paléolithiques à Alle, Noir Bois (Jura, Suisse). Cahier d'archéologie jurassienne 10, Porrentruy, p. 89-91.