

Paysages du sud-est du Massif de Fontainebleau et leur mise en place



Médard Thiry,

Référence :
No. Rapport : E151115MTHI

Centre de Géosciences
Ecole des mines de Paris, Fontainebleau,
France

Mines ParisTech
PSL Research University
Centre de géosciences
35, rue St Honoré,
77300 Fontainebleau, France

Tél. 01 64 69 49 27

Fax 01 64 69 47 13

Référence type :

Thiry M. (2015). Paysages du sud-est du Massif de Fontainebleau et leur mise en place. Sortie géologique du 15 novembre 2015, livret guide, document pédagogique N° E151115MTHI, Centre de Géosciences, École des Mines de Paris, Fontainebleau, France, 12 p.

Ce document a été élaboré dans le cadre d'une sortie géologique pour l'Association des Naturalistes de la Vallée du Loing et les Naturalistes Parisiens.

Médard Thiry, Mines-ParisTech – Centre de Géosciences, 35, rue Saint Honoré,
77300 Fontainebleau, France, medard.thiry@mines-paristech.fr

association des
naturalistes de la
vallée du
Loing et du massif de Fontainebleau



sortie géologique du dimanche 15 novembre 2015

livret guide

Paysages du sud-est du Massif de Fontainebleau et leur mise en place.

Médard Thiry

Mines ParisTech
PSL Research University
Centre de géosciences
35, rue St Honoré,
77300 Fontainebleau

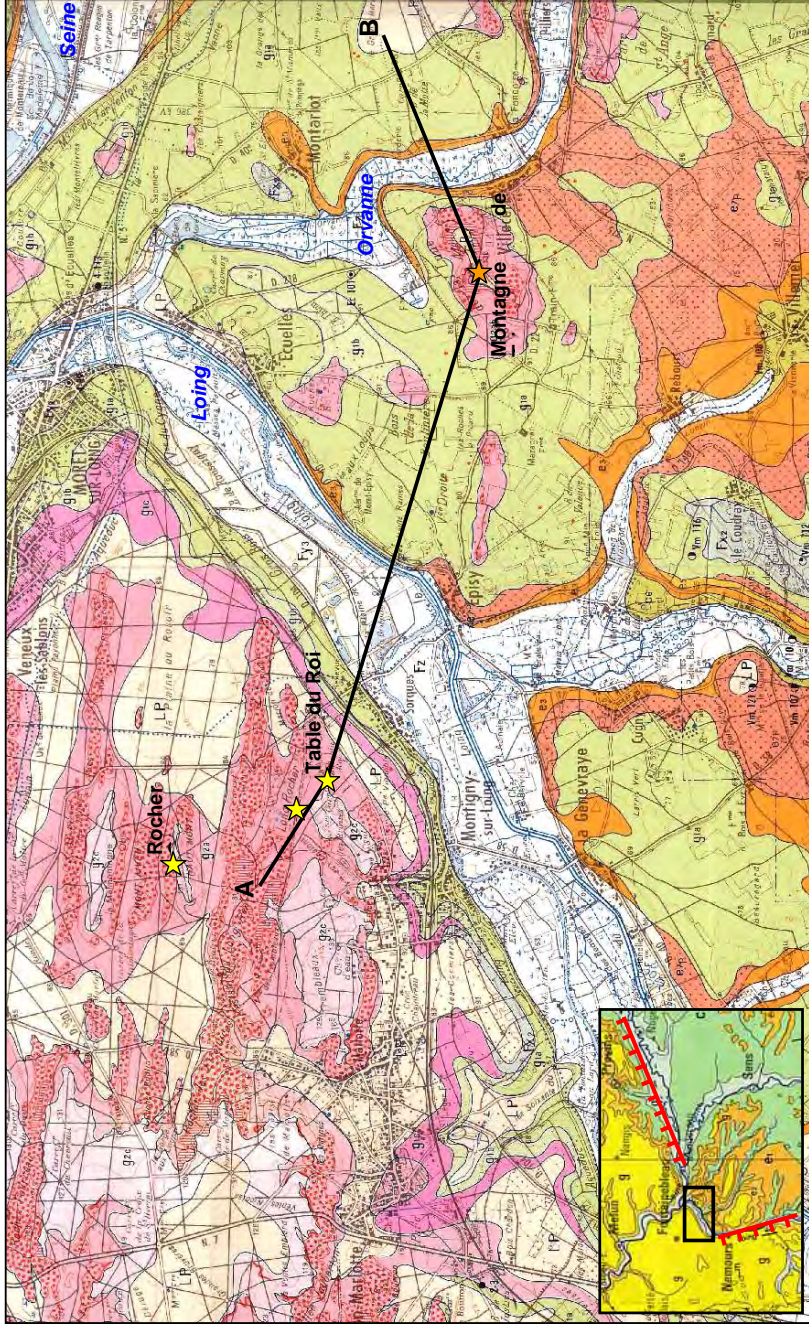
medard.thiry@mines-paristech.fr

<http://members.geosciences.ensmp.fr/medard/>

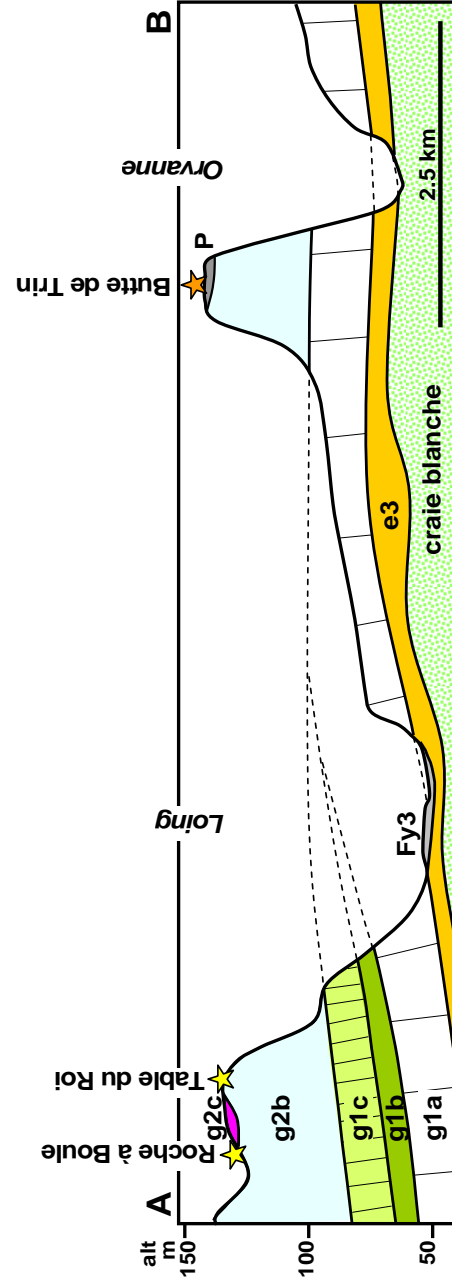
La mise en place des paysages c'est avant tout l'érosion. L'érosion entaille les vallées, fait reculer les escarpements et déblaye les matériaux. L'érosion laisse en place des morphologies et des formes de relief, mais ne dépose pas ou très peu de matériaux, et ne laisse donc pas d'éléments de datation directe par les outils de la stratigraphie. Il n'y a guère que les dépôts alluvionnaires des vallées qui puissent être datés et éventuellement corrélés plus ou moins directement à des formes d'érosion.

Dans ce contexte, la bordure sud-est du Massif de Fontainebleau, aux confluences du Loing, de l'Orvanne et de la Seine peuvent apparaître comme un secteur propice pour l'étude de la mise en place des reliefs bellifontains. Malheureusement les vallées de ce secteur n'ont que peu d'alluvions différenciées et leurs relations avec les reliefs posent plus de problèmes qu'elles n'en démêlent.

Néanmoins, la reconnaissance et la datation de différentes variétés de calcites sableuses au sein des Sables de Fontainebleau apportent un regard nouveau sur l'érosion du massif et la vitesse des phénomènes.



e3 – Eocène inférieur – conglomérats, sables et argiles g1g – Sannoisien inf. - Mame Verte
 g1c – Sannoisien sup. – Calc. de Brie g2b – Sables de Fontainebleau g2c – Stampien sup. – Calc. Etampes
 P – graviers culminants – Montagne de Trin = alluvions à galets siex Ø 2-8 cm. Fy3 – très basse terrasse (bronze final à médiéval à Roussigny).



Structure géologique

Le Massif se trouve à la croisée de 2 structures majeures du bassin de Paris.

(1) La flexure de Brie, d'orientation WSW-ENE (orientation varisque, héritée du socle) qui a limité la subsidence du Bassin de Paris vers le Sud. Cette flexure a fonctionné comme bordure SE du bassin dès l'Éocène inférieur (Argiles de Provins) et jusqu'à l'Oligocène (Calcaire de Brie - Sables de Fontainebleau). La vallée de la Seine a emprunté cette zone de transition au cours du Pliocène.

(2) L'accident N-S de la vallée du Loing constitue la seconde structure. Il correspond à un accident profond du socle, hérité de la tectonique hercynienne, et qui court de la Limagne de l'Allier au Fossé de la Loire (Sancerre) et se prolonge par la Vallée du Loing. Cet accident n'est guère sensible durant l'Éocène, même si les chenaux fluviaux à l'origine de la décharge des Conglomérats de Nemours sont guidés par cette structure. En tout cas il ne se distingue pas du tout à l'Éocène supérieur : le Calcaire de Château-Landon se met en place en travers de la Vallée du Loing. C'est au Néogène que cet axe a été actif, limitant la zone subsidente de la Beauce à l'est. Dès l'Oligocène le Calcaire de Brie et les Marnes Vertes sont limités à la région à l'ouest de la vallée, et les Sables de Fontainebleau ne débordent que peu vers l'Est de la vallée. Au Miocène, la partie orientale est complètement à l'écart de l'aire de subsidence de la Beauce. L'individualisation de la vallée du Loing est récente, elle a été entaillée après le dépôt des Sables de Lozère et des Sables de Sologne.

Solubilité de la calcite

Pour interpréter les calcites sableuses et les replacer dans leur paléopaysage il faut rappeler les facteurs géochimiques qui conduisent à leur précipitation.

Influence du pH et de la fugacité de CO_2

La calcite est soluble sous forme de bicarbonate ($\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$) et relativement insoluble sous forme de mono-carbonate (CaCO_3) = calcite. Trois réactions fondamentales règlent la dissolution et la précipitation de la calcite

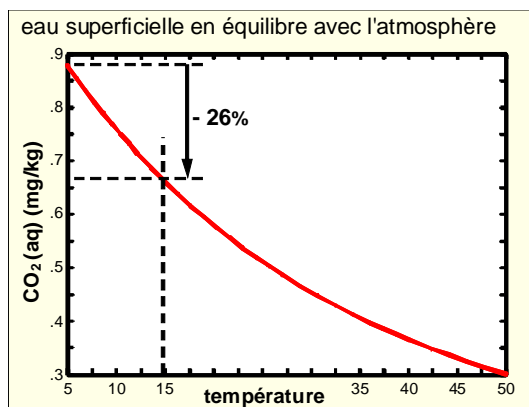
- (1) $\text{CO}_2(\text{g}) \rightleftharpoons \text{CO}_2(\text{aq})$
- (2) $\text{CO}_2(\text{aq}) + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{HCO}_3^- + \text{H}^+$
- (3) $\text{CaCO}_3 + \text{HCO}_3^- + \text{H}^+ \rightleftharpoons \text{Ca}^{++} + 2\text{HCO}_3^-$

A pH suffisant, l'élévation de la fugacité de CO_2 (teneur en CO_2 dissous) déplace successivement les équilibres (1), (2) et (3) vers la droite et entraîne la dissolution de calcite. La diminution du pH a le même effet et déplace (2) et (3) dans le même sens

Effet de la température

Le CO_2 est plus soluble dans l'eau froide que dans l'eau chaude. En réchauffant de l'eau elle se dégage. C'est ce qui se produit quand vous chauffez de l'eau dans une casserole : les petites bulles accrochées au fond de la casserole vers 50-60° ne sont pas des bulles de vapeur d'eau, mais des bulles de gaz (O_2 , CO_2 , N_2) qui s'échappent (l'eau se dégaze) car la solubilité des gaz diminue avec la température.

L'élévation de température déplace (1) vers la gauche et par contrecoup (3) également vers la gauche conduisant à la précipitation de calcite.

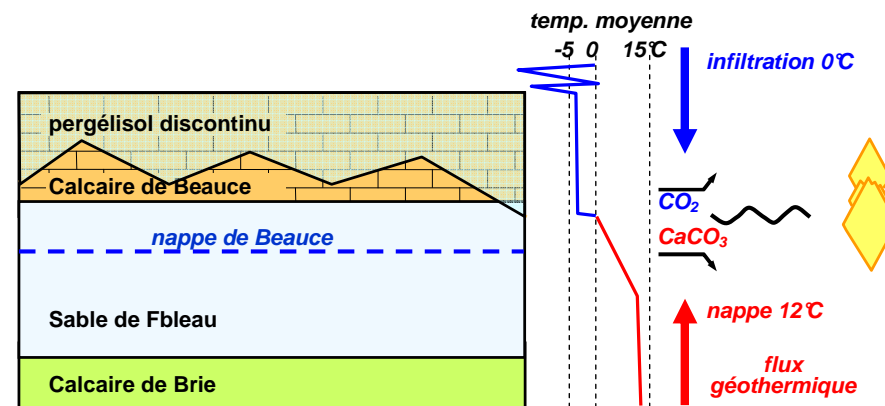


Le CO_2 et les carbonates sont plus solubles dans les eaux froides que dans les eaux chaudes. Quand une eau en équilibre avec le CO_2 atmosphérique se réchauffe de 5 à 15°C elle perd 25% de son CO_2 dissous et 25% de la calcite dissoute précipite ... à 50°C (dans votre casserole) c'est les 2/3 du carbonate qui précipite et entartre votre bouilloire ... ne jetez pas l'eau "bouillie", cela évitera d'importer encore plus de tartre dans votre bouilloire.

Mécanisme de précipitation des calcites sableuses

Les datations radiochronologiques montrent que les calcites sableuses (dites de Belle-Croix) et les concrétions similaires (cristallarias, boules, concrétions multilobées, billes et grappes, ...) ont précipité pendant les périodes froides du Quaternaire. Ce sont des calcites "glaciaires". C'est la machine thermique des pergélisols qui est à l'origine du gradient thermique qui provoque la précipitation de la calcite.

Pendant les périodes froides la partie supérieure des sols est gelée jusqu'à des profondeurs de 10-20-50 m et même plus dans le Bassin de Paris. En revanche, en profondeur le flux thermique provenant du centre de la terre continu à réchauffer le sous-sol. En raison de l'inertie thermique des roches il s'établit un front de température entre les formations superficielles gelées et le sous-sol et les nappes qui ne subissent qu'un faible abaissement de température. Ce gradient est le plus "abrupt" lors du refroidissement, en début de période froide.



Dans ces conditions, les eaux froides qui s'infiltrèrent ont une fugacité (gaz dissous) de CO_2 relativement élevée. La fugacité de CO_2 est d'autant plus élevée dans les environnements froids (taïga et toundra) que les sols y sont très riches en matière organique (podzols et tourbières). Quand elles se réchauffent en atteignant les terrains plus chauds du sous-sol, leur fugacité de CO_2 diminue et la calcite précipite. Pour cela, il faut que le pergélisol ne soit pas trop épais pour rester discontinu, au moins temporairement, pour permettre les infiltrations.

L'examen des accumulations de sphérolithes de calcite sableuse qui forment le Rocher Carrosse et la Roche à Boule permet de préciser les conditions hydrodynamiques qui ont prévalu à leur formation pendant les périodes glaciaires, ou plus précisément au moment du maximum d'accumulation de glace de la dernière glaciation pour les affleurements qui nous concerne.

Rocher Carrosse

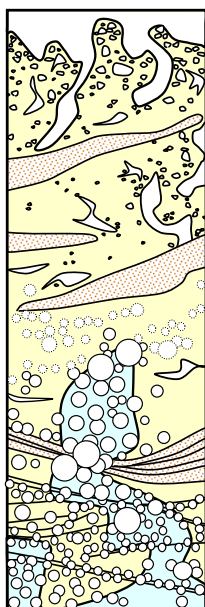
Description

Le sommet du rocher présente une morphologie en "roche éponge" avec puits karstiques bien délimités, de 5 à 30 cm de diamètre. Les puits sont essentiellement verticaux, souvent obstrués par de la terre et des végétaux, mais certains sont vides et l'un d'entre eux a près de 1 m de profondeur. Les conduits sont anastomosés et branchus, avec des passages horizontaux ("planchers" bien distincts). La roche entre les conduits montre des dissolutions en petits vermicules millimétriques, jusqu'à des cavités centimétriques aux contours irréguliers.

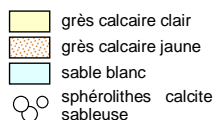
A mi-hauteur du rocher apparaissent de grande bande de 2-15 cm d'épaisseur, jaunâtres, d'inclinaisons entrecroisées (vers le nord, le sud-ouest et l'ouest). Ce sont des grès calcaires rubanés montrant de grands clivages de calcite.

La base du rocher est presque exclusivement constituée de sphérolithes de calcite sableuse (Ø 1 à 5 cm) coalescents, parfois interpénétrés, souvent reliés par de fines bandes de grès calcaire blanc d'épaisseur millimétrique et d'inclinaisons entrecroisées. Par endroit les sphérolithes sont "libres" au sein du sable blanc. La taille des sphérolithes diminue vers la base de la coupe.

La datation de la calcite au ^{14}C a donné un âge à $31\,700 \pm 300$ ans BP.



calcaire à vide mermiculés recoupé par des conduits de dissolution karstiques



dalle grès calcaire, jaune/ocre, résistant et massif, avec grandes calcites

calcaire vacuolaire constitué de sphérolithes coalescents ± estompés

grès calcaire vacuolaire rubané, bandes de 2-4 cm d'épaisseur, grandes calcites

sphérolithes (1-5 cm de diamètre) avec rhomboèdres de calcite en surface, dans une matrice calcaire ou sableuse, les sphérolithes sont pris en écharpe par des bandes calcaires (2-4 mm épaisseur) qui les relient et les cimentent partiellement

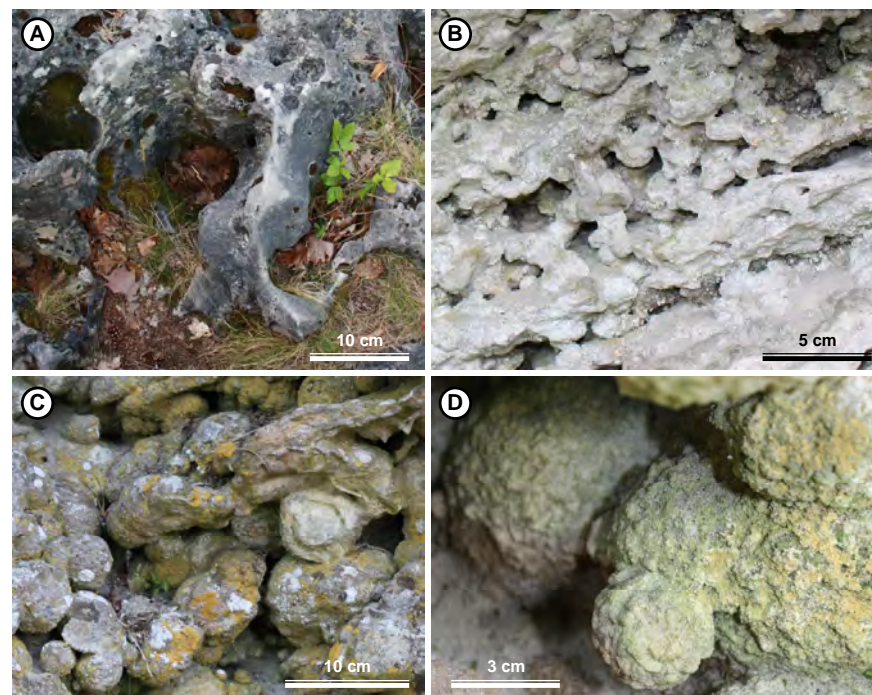
Enfin, un second rocher existe au nord de la Route du Carrosse, il se compose de sphérolithes plus gros (Ø 2-10 cm), parfois "libres" dans le sable, avec beaux rhomboèdres de calcite (2-4 mm) en surface, et quelques rhombes isolés juste posés dessus. Ces sphérolithes (cristallarias de Calcite de Fontainebleau) montrent une zonation, avec cortex de 3-5 mm constitué de rhomboèdres alors que l'intérieur ne semble pas présenter de grands cristaux. Aussi raies ferrugineuses ocre qui traversent les cristallarias et sont donc antérieures à leur cristallisation.

Interprétation des structures

Les structures sphériques ont du se former dans un milieu isotrope, dans la nappe des sables. Si la calcite avait précipité en milieu dénoyé, dans la zone vadose des sables,

les concrétions de calcite montreraient : soit des structures géotropes, allongées verticalement, avec éventuellement des polarités d'écoulement ; soit des niveaux horizontaux correspondant à des niveaux de nappe.

Mais à l'échelle de l'affleurement, la coupe montre néanmoins un fort géotropisme, avec facies massif et dissolutions en tête, structures laminées entrecroisées dans la partie moyenne et des sphérolithes "libres" au sein du sable à la base de la coupe. Ces structures résultent de la dynamique des écoulements et de l'évolution des équilibres géochimiques des eaux d'infiltration. Les structures de dissolution en tête indiquent que les eaux froides qui s'infiltrent sont au moins périodiquement sous-saturées vis à vis de la calcite. Les structures laminées entrecroisées indiquent des écoulements énergétiques au sein d'une structure confinée similaire à un conduit karstique et en zone saturé. La calcite précipite le long de ces structures au fur et à mesure que l'eau se réchauffe. Enfin, les sphérolithes précipitent dans un environnement où les écoulements sont ralentis et les précipitations de calcite se font dans des conditions proches de l'équilibre (réchauffement lent des eaux) qui favorise la croissance des habitus rhomboédriques.



A – sommet du Rocher Carrosse, grès calcaire avec conduits de dissolution karstique (vue par audessus). B – base du rocher, sphérolithes centimétrique de calcite sableuse recimentée par des raies calcaires obliques. C – rocher "latéral" sphérolithes anastomosés et zonés au sein du sable non cimenté. D. sphérolithes avec rhomboèdres de calcite.

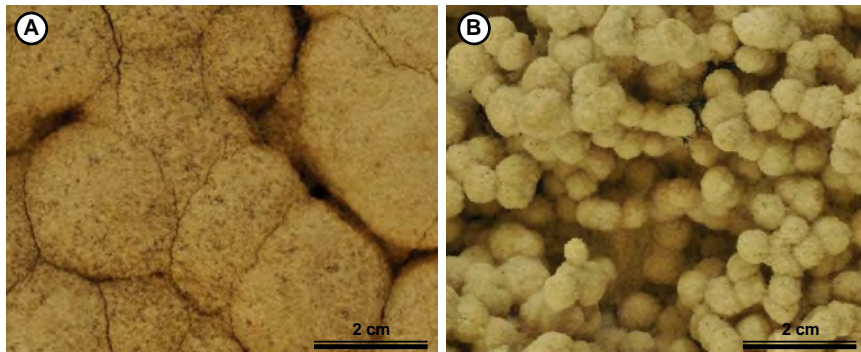
Roche à Boule

La Roche à Boule se situe à environ 1,5 km au sud-est du Rocher Carrosse. C'est un groupement de rochers massifs et irréguliers qui émergent du sable à l'intérieur d'une propriété privée clôturée. Par ailleurs, des amas de sphérolithes coalescents sont visibles dans d'anciennes exploitations de sable en limite de la forêt domaniale.

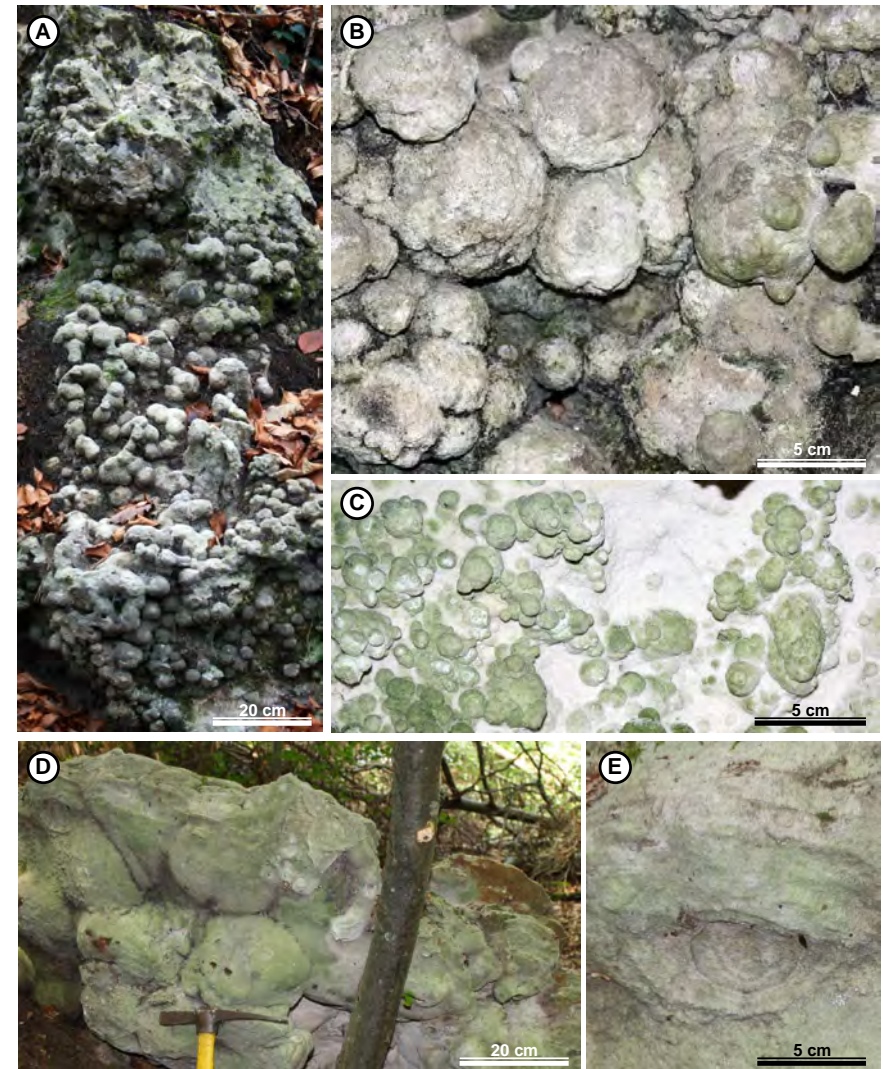
L'affleurement principal est essentiellement constitué de 3 rochers, chacun d'une surface d'environ 1 m². Les sphérolithes sont de taille relativement régulière, de 1 à 4 cm de diamètre, coalescents, quelquefois agglomérés en un sphérolithe plus grand. Des zonations se distinguent souvent. En revanche, très peu de formes rhomboédriques sont visibles et sont émoussées par altération. Il y a aussi relativement peu d'organisation d'ensemble à l'échelle de ces petits affleurements. La taille des sphérolithes semble souligner des organisations obliques, la tête des rochers montre une structure plus cimentée et quelques figures de dissolution, la base des rochers est moins cimentée avec des sphérolithes "libres" au sein du sable blanc. D'autres faciès peuvent être reconnus dans les déblais de l'exploitation. Il a en particulier été trouvé une plaque de 60x25x5 cm formées à sa partie supérieure de sphérolithes coalescents, d'environ 3 cm de diamètre, complètement soudés, et à sa partie inférieure de granules d'environ 0.4 cm de diamètres formant des "grappes" aérées. La plaque indique clairement la relation avec un niveau de nappe (locale et/ou perchée ?) et un géotropisme vertical.

A quelques 200m au sud-est, un bloc ≈1/4 m³ de grès calcaire, et des petits blocs à boules jonchent le fond d'une ancienne carrière partiellement remblayée. Les boules atteignent Ø 20 cm. Le bloc montre une organisation plus ou moins horizontale des boules. Des lamines recoupent les boules, elles correspondent soit à une cimentation particulière, soit à la stratification primaire du sable. Les boules montrent de belles organisations concentriques avec plusieurs enveloppes successives d'environ 1 cm d'épaisseur. Mais on n'y distingue pas de rhomboédres.

La datation de la calcite au ¹⁴C a donné un âge à 21 100 ± 210 ans BP.



Roche à Boule. Plaque horizontale montrant l'opposition entre la face supérieure (A) et l'inférieure (B).



A – Roche à Boule, noter des faciès plus cimentés, massif en tête et des sphérolithes coalescents, peu cimentés qui forment le corps de l'affleurement. B – sphérolithes coalescents englobés dans une concrétion plus grande. C – sphérolithes "libres" dans le sable blanc. D – bloc éboulés à gros sphérolithes décimétriques. E – détail d'un gros sphérolithe montrant une structure concentrique à couches multiples.

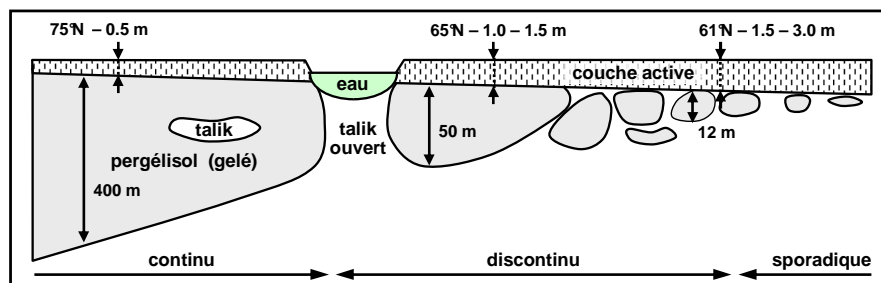
NB – Ces grès calcaires se distinguent très bien par le fait que les araignées y logent, ce qui n'est jamais le cas des grès siliceux communs de la forêt. Je remercie Jean-Pierre Galerne de l'ONF de m'avoir indiqué cela.

Agencement et hydrologie des pergélisols

Les pergélisols (permafrost en anglais) se composent principalement de 2 unités. (1) Une couche superficielle dite couche active car elle subit et réagit aux variations saisonnières : dégel en été et gel pendant l'hiver. Ces variations saisonnières s'accompagnent de mouvements de sols (dilatations et effondrements) qui conduisent à la formation des sols cryoturbés (déformés par le gel). (2) Une couche profonde gelée en permanence.

L'épaisseur de ces couches est variable avec la durée et l'intensité des saisons de gel : la couche active est réduite en épaisseur aux latitudes élevées, alors que le permafrost s'épaissit à ces latitudes. Aux latitudes plus basses et/ou pendant les périodes moins froides, le permafrost devient discontinu. Enfin, des zones non gelées peuvent exister au sein du permafrost : (1) dans des zones plus poreuses, moins conductrices du froid, par lesquelles s'écoulent des eaux issues des parties profondes non gelées ; (2) des thermokarsts ou taliks ouverts qui se forment sous des lacs relativement profonds, car l'eau n'y gèle pas ou peu longtemps en profondeur et de ce fait le bilan thermique annuel est positif et conduit au dégel du permafrost au droit du lac.

Les taliks sont donc des zones où l'eau peut circuler au sein du permafrost. Soit par écoulement vers la surface, "naturellement" s'il existe un gradient hydraulique régional, ou sous l'effet de l'augmentation de pression due au gel d'une partie de l'eau de la nappe (avec augmentation de volume). Soit par écoulement vers la profondeur des eaux de surface, à la manière d'un karst (d'où la dénomination de thermokarst), s'il existe une zone non saturée ou en dépression sous la couche gelée. Le fonctionnement hydraulique des taliks n'est pas indépendant de la dynamique climatique : en période de refroidissement le pergélisol s'approfondit et des surpressions dans la nappe alimentent des écoulements vers la surface, en période de réchauffement des lacs se développent en surface conduisant à des thermokarsts qui alimentent les nappes mises en dépression par le dégel du permafrost à sa base.



d'après Dobinski (2012)

Position des paléotaliks et recul des paysages

Une troisième occurrence de sphérolithes de calcite sableuse est connue de part et d'autre de la descente de la Route du Cuvier Châtillon (environ 1 km à l'ouest de la Grotte aux Cristaux). La datation de cette calcite au ^{14}C a donné un âge à $32\,900 \pm 500$ ans BP.

Toutes les occurrences du Massif de Fontainebleau se présentent dans une position géomorphologique similaire : en haut de pente sableuse, à peu de distance ou directement sous le Calcaire d'Etampes couronnant les "monts". On peut s'interroger sur la signification de cette position : soit c'est la position effective des taliks lors de leur formation (avec néanmoins de l'érosion de la pente pour les mettre à l'affleurement ; soit leur position initiale n'a rien à voir avec les pentes sableuses et que des structures existent sous les monts calcaires, mais sont cachées par la couverture limoneuse. C'est cette dernière proposition qui paraît la plus plausible.

Ces "gouffres" nécessitent une alimentation en eau conséquente pour précipiter les masses de calcite que représentent les grès à calcites sableuses. On ne peut guère imaginer une telle alimentation sur une pente, qui plus est probablement gelée en surface. L'eau ruissellerait sur la pente et très peu de ruissellement serait collectée par les "gouffres". Pour satisfaire le bilan calcite déposée/masse d'eau nourricière il faut au contraire imaginer un impluvium relativement important, c'est à dire une dépression large en position de plateau. La dimension de la dépression est plus difficile à apprécier. Néanmoins, on peut penser à une dépression de 1 km de diamètre et qui se situe en arrière du talus sableux sinon l'érosion aurait tôt fait de se creuser une évacuation vers la pente et mettre fin au fonctionnement du système.

Il faut éventuellement affiner les estimations de débit et de durée en faisant intervenir les pluviosités mises en avant par les modélisations climatiques. Mais en tout état de cause il n'est pas invraisemblable d'imaginer une érosion de 1, 2 ou 3 km des talus sableux depuis la formation de ces taliks, c'est à dire de l'ordre de 1 km/10 000 ans.

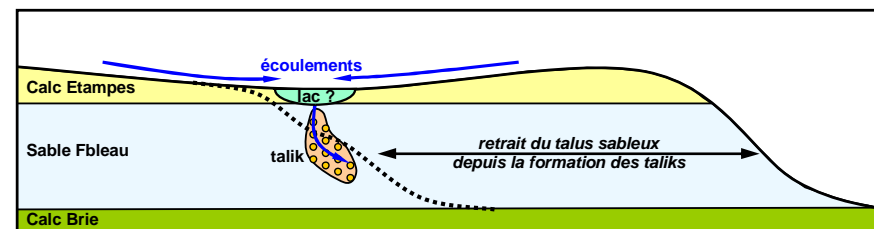


Schéma de la paléomorphologie et paléohydrologie lors de la formation des sphérolithes de calcite sableuse.

Il faut encore préciser que si les cristallisations de calcite (type Calcite de Belle Croix) se développent pendant les phases de refroidissement des périodes glaciaires, les calcites sphérolithiques paraissent se former au maximum de l'accumulation de glace polaire, c'est à dire au début du réchauffement climatique sous nos latitudes, tout comme les taliks actuels sur le bouclier canadien

Incision du paysage

Le point de vue de la Table du Roi s'étend sur la confluence Seine-Loing et leurs affluents. Paysage relativement plat d'où émerge la Montagne de Trin, couverte du Bois de la Lune. La Montagne de Trin culmine à 139 m, c'est à dire à la même altitude que la Table du Roi. Elle est taillée dans les sables stampiens, coiffée d'une dalle de grès et surmontée d'un lambeau alluvial formé de gros galets de silex et de chailles patinées emballés dans une matrice argilo-sableuse.

Les alluvions ont été rapportées au Pliocène sup - Pléistocène inférieur (3.0 – 0.8 Ma) par Tourenq et al. (1993) ... en admettant que les minéraux lourds symptomatiques n'ont pas été remaniés d'alluvions antérieures.

Le paysage permet d'apprécier le volume des terrains qui ont été déblayés par la Seine et le Loing. La Seine a coulé sur la surface de la butte à un moment donné et y déposé des galets de près de 10 cm de diamètre. Si les alluvions ont été déposées avant la cimentation des grès leur datation donnerai un âge maximal pour la silicification. En revanche, si les alluvions ont été déposées après la formation de la dalle de grès, leur âge contraindrait un âge minimal pour la silicification. Pour l'heure aucun argument de terrain ne permet de trancher entre les 2 hypothèses. Néanmoins, si on retient la seconde hypothèse cette dalle isolée à l'avant du massif de Fontainebleau pourrait être plus ancienne que celles du massif lui-même. On tiendrait là un argument fort pour : (1) montrer un exemple de formation des dalles pendant le retrait des talus d'érosion et (2) quantifier des vitesses d'érosion. Mais, il faut aussi envisager que l'érosion pouvait avoir débuté avant la silicification de la Montagne de Trin qui se présentait déjà alors comme une butte résiduelle, plus étendue que l'actuelle, mais peut-être pas de beaucoup ? Difficile en tout cas de trancher entre les hypothèses ... l'érosion enlève et ne laisse pas ou peu de traces.

La vallée du Loing au pied de la butte montre des alluvions récentes. Dans le Bois de Roussigny, quelques 2-3 km en aval, un sondage archéologique a montré qu'il y a plus de 3 m de dépôts depuis l'âge du Bronze final (1200 ans avant notre ère). Mais une partie de ces dépôts est vraisemblablement éolienne, donc déposés sur les rives, au-dessus du niveau du Loing.

Dernier point, l'importance des gravières. Leur exploitation a cessé il y a une trentaine d'année ... mais nombre d'écosystèmes ont été détruits de façon irrémédiable ... du marais "alcalin" d'Episy ne subsiste plus que la moitié qu'on essaye de faire survivre par des aménagements.

Références

- Dobinski W., 2012, Permafrost and the contemporary meaning of the term and its consequences. Bulletin of Geography – Physical Geography Series, 5, 2012, p. 29–42.
- Galbois J., Thiry M., 2007, Sondages archéologiques du Bois de Roussigny (Moret-sur-Loing, 77) : I- Stratigraphie et interprétations archéologiques. Bull. Ass. Natur. Vallée du Loing, 83/4, p. 152-166.
- Tourenq J., Pomerol C., Pupin J.P., 1993, Découverte de zircons d'origine montdorienne dans les alluvions anciennes de la Montagne de Trin (Seine-et-Marne, France), un nouvel élément de datation des premières nappes alluviales du bassin de la Seine. C.R. Acad Sci. Paris, 316, série II, p. 1099-1106.