

La prothèse de la momie

On a retrouvé un orteil de bois sur une momie de 3 000 ans.

A quand remonte la première intervention chirurgicale ? La première prothèse ? On l'ignore, mais la découverte d'une momie égyptienne datant de plus de 1 000 ans avant notre ère et pourvue d'un gros orteil de bois montre qu'à cette époque, on pratiquait déjà l'art de la prothèse.

Dans divers papyrus figurent des descriptions d'interventions chirurgicales, mais aucune mention de prothèses. Au cours d'une campagne de fouilles dans la nécropole de Thèbes, Andreas Nerlich et ses collègues de l'Université de Munich ont découvert dans une chambre funéraire datant de quelque 3 500 ans, mais utili-

sée longtemps, divers vestiges et, notamment la momie bien conservée d'une femme d'une cinquantaine d'années. Un examen minutieux de la momie a révélé que le gros orteil du pied droit avait été amputé (peut-être en raison d'une gangrène) et remplacé par une prothèse de bois, peinte en maron. Elle est constituée d'un morceau de bois de 12 centimètres de longueur et de trois centimètres de largeur et d'épaisseur. Cet élément était attaché à deux plaquettes de bois latérales, elles-mêmes reliées par des cordelettes de cuir. Le prothésiste avait même poussé l'art du détail jusqu'à sculpter l'ongle. Un morceau de tissu fixé aux plaquettes latérales était enroulé autour du pied assurant une bonne cohésion de l'ensemble. Le gros orteil porte environ 40 pour cent du poids d'une personne au cours de la marche, et quand il est amputé, la marche devient périlleuse. Le doigt de pied



Prothèse de bois d'une momie égyptienne de quelque 3 000 ans.

amputé, a été remplacé par une prothèse fonctionnelle et qui semble avoir été utilisée, étant donné les traces d'usure que les archéologues ont retrouvées sur sa face inférieure.

En effet, nombre de prothèses que l'on retrouve sur des momies semblent avoir été placées après la mort, pour préparer la momie à sa vie posthume. C'est le cas de diverses prothèses de membres, de nez ou même de dents, ajoutées par les embaumeurs pour restituer leur intégrité physique aux momies : leur mode de fixation ou leur absence d'usure plaident en faveur d'une pose postérieure à la mort.

La coloration des vitraux

Avec des faisceaux d'ions, les chimistes choisissent l'intensité et la nuance d'un verre coloré.

D'où viennent les couleurs profondes des verres et des vitraux des cathédrales ? Pendant longtemps, cette question est restée sans réponse. Au XIX^e siècle, Michael Faraday a montré que les métaux ou les oxydes métalliques dissous dans le bain fondu du verre ne participent pas au squelette atomique du verre, mais forment des agrégats minuscules. Ces agrégats constituent moins de un pour cent de la matière, mais suffisent à colorer le verre. La couleur des vitraux fut longtemps le fruit, parfois aléatoire, du savoir-faire des alchimistes du verre. Grâce à une méthode mise au point par les équipes du Centre de spectrométrie nucléaire et de spectrométrie de masse d'Orsay et du Laboratoire de minéralogie et de cristallographie de Paris, les chimistes maîtriseront mieux la couleur du verre.

Au début du XX^e siècle, le physicien allemand Gustav Mie a expliqué comment ces agrégats absorbent la lumière et donnent aux verres de belles couleurs. Les électrons de l'agrégat vibrent ensemble à une fréquence caractéristique. Quand la fréquence est située dans la gamme des longueurs d'onde visibles, l'agrégat absorbe une partie de ces rayon-

nements, et le verre apparaît de la couleur complémentaire à la fraction absorbée. Ainsi, la couleur du verre dépend de la nature des agrégats, de leur taille, tandis que leur densité détermine l'intensité de la couleur. Pour choisir les couleurs à leur guise, les verriers – artisans, artistes ou industriels – aimeraient, bien sûr, pouvoir contrôler parfaitement ces agrégats pour prévoir la couleur du verre quand il sortira du four.

La méthode des équipes d'Orsay et de Paris consiste à irradier un verre, où est dissous un oxyde de cuivre, avec des ions lourds – oxygène ou silicium, par exemple – de haute énergie (plusieurs millions d'électronvolt). Quand ils pénètrent dans le verre, les ions sont freinés et arrachent sur leur passage des électrons au réseau vitreux. Ces électrons rompent des liaisons entre atomes d'oxygène et de cuivre dans l'oxyde de cuivre. Quelques uns des atomes de cuivre métalliques libérés se regroupent pour former des agrégats de cuivre métallique. Le verre est ensuite recuit à basse température (environ 400 °C). Sous l'effet de la chaleur, les atomes de cuivre diffusent, les agrégats grossissent et le verre rougit. Comme la densité et la répartition des agrégats dépendent de l'énergie du faisceau d'ions, et que leur diamètre varie en fonction de la température et de la durée du recuit, on maîtrise tous ces paramètres.

En fait, les chimistes se sont inspirés de la technique photographique, où les photons frappent le film photographique (une émulsion riche en sels métalliques d'argent) et y provoquent de

minuscules précipités métalliques, lesquels grossissent dans le révélateur, laissant l'image se dessiner point à point. Ici, les ions remplacent les photons et le «développement» s'effectue lors du recuit.

Cette nouvelle technique par faisceaux d'ions pourrait rencontrer des succès dans l'industrie optronique. Couplée à la lithographie couramment utilisée dans l'industrie de la microélectronique, elle faciliterait la fabrication de commutateurs optiques par exemple : on fabriquerait des fibres de silice contenant des oxydes métalliques et on activerait à l'aide d'un faisceau d'ions les agrégats métalliques dans une zone très précise en masquant le reste de la fibre. On pourrait ainsi obtenir des zones de motifs et de couleurs spécifiques qui laisseraient passer des longueurs d'ondes et en absorberaient d'autres. En quelque sorte des interrupteurs optiques sélectifs.



Un manuscrit mystérieux

Probablement rédigé au XVI^e siècle, le manuscrit Voynich (du nom de l'Américain qui l'a découvert en 1912, en Italie, dans un collège de jésuites) est écrit dans un alphabet et en une langue inconnus. Le texte présente pourtant des particularités de répétition et de structures à différentes échelles, mais, comme la langue de l'île de Pâques, aucun cryptanalyste n'a pu en venir à bout. Les illustrations sont également mystérieuses. Le manuscrit est-il un canular génial, rédigé pour être vendu à prix d'or? L'empereur germanique Rodolphe II de Hasbourg (1552-1612) l'avait acheté pour 600 ducats d'or, une fortune à l'époque.

L'origine de l'homme moderne

Les récentes analyses d'ADN de l'homme de Mungo, découvert en 1974 dans l'Est de l'Australie, ont révélé qu'il a vécu il y a environ 60 000 ans et qu'il descendait d'un *Homo sapiens* chinois, baptisé *Gracile*, lequel venait lui-même d'un *Homo erectus* issu d'Afrique. Or des crânes de ces précurseurs d'*Homo sapiens* vieux de 250 000 à 100 000 ans ont été découverts dans diverses régions de Chine, ce qui relance le débat sur l'origine de l'homme moderne : selon Wu Xinzhi, de l'Institut de paléontologie des vertébrés de Beijing, l'évolution de l'*Homo erectus* vers l'*Homo sapiens* aurait eu lieu simultanément en Afrique, et dans le Sud-Ouest de la Chine, selon deux modes d'évolutions convergentes.

L'omnibus de Coutances

L'anecdote selon laquelle Poincaré a pensé, en mettant le pied sur l'omnibus de Coutances, à une éclairante analogie entre les nouvelles géométries hyperboliques et les fonctions thêtafuchsiennes (utilisées pour la résolution d'équations différentielles) est, pour les mathématiciens, l'image d'Épinal de la fulgurance de l'intuition. Restait à déterminer ce qu'était cet omnibus : un train ou une voiture à chevaux? Des recherches auprès des mathématiciens

n'ayant donné aucun résultat, la mairie de Coutances, contactée, a livré la solution du problème : il s'agissait bien d'un omnibus à chevaux du plus pur style de la Belle Époque.



Dans les filets de Scarlet

Des papillons de nuit protègent des prédateurs les femelles et les œufs.

La galanterie et la prévenance envers les dames ne sont pas l'apanage des êtres humains. Dans le monde animal, d'autres mâles entourent leurs femelles de délicates attentions. C'est le cas des Scarlets, une sorte de papillon de nuit rouge, de deux centimètres de longueur, qui vit dans les prairies de Floride. Pendant l'accouplement, les mâles recouvrent les femelles d'un filet empoisonné qui les protégera des prédateurs, telles les araignées ou les chauves-souris.

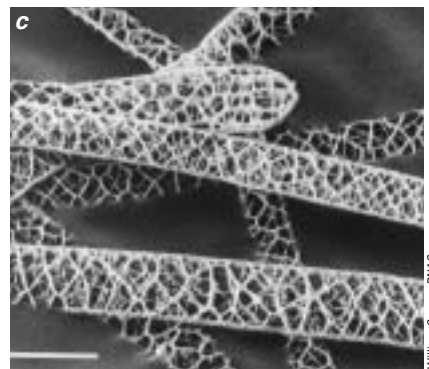
L'équipe de William Conner, de l'Université de Caroline du Nord, a étudié le comportement de ce papillon. La nuit, les mâles adultes se nourrissent des sécrétions de certaines plantes : parmi elles, une plante de la même famille que les chrysanthèmes, les asteracées, sécrète deux alcaloïdes puissants, l'intermédine et la lycopsamine. Plutôt que de les éli-

miner, le mâle assimile ces alcaloïdes, puis il les oxyde : insensible à ces substances toxiques (la morphine ou la strychnine sont des alcaloïdes), il est protégé de son plus redoutable prédateur, l'araignée *Nephila clavipes*, qui, elle, ne supporte pas ces alcaloïdes.

Quand vient la saison des amours, la femelle émet des phéromones qui attirent un mâle. Ce dernier ne se pose pas immédiatement, mais reste quelques instants en vol stationnaire au-dessus de la femelle, puis libère un nuage floconneux qui entoure peu à peu la femelle comme un banc de brouillard. Ce nuage est constitué de filaments légers, souples et résistants, que le mâle libère de son abdomen par une pression musculaire. Ils sont composés d'acides gras et... des deux toxines. La structure des filaments confère au nuage une surface maximale pour une quantité minimale de matière. Les deux insectes ne s'accouplent que lorsque la femelle est «enveloppée».

Pour tester le rôle protecteur de ces alcaloïdes, les entomologistes ont offert en pâture à des araignées différents types d'insectes : des femelles fécondées ou enveloppées par des mâles, dont certains n'avaient pas été en contact avec les alcaloïdes. La conclusion est sans équivoque : les insectes protégés par les alcaloïdes sont dédaignés ; les autres sont impitoyablement dévorés.

Outre la protection physique du nuage de filaments, qui résiste mal au vent, la femelle reçoit des alcaloïdes par le liquide séminal du mâle lors de l'accouplement. De cette façon, elle n'est plus la seule à être protégée : ses œufs fraîchement fécondés le sont aussi. La quantité d'alcaloïdes qu'ils contiennent suffira, quand ils seront pondus, à écarter leurs prédatrices : les fourmis et les coccinelles. La protection nuptiale telle que la pratiquent les Scarlets est un cas unique de galanterie.



Les mâles Scarlets (a), des papillons de nuit, protègent leurs femelles avant de s'accoupler en les enveloppant dans un nuage (b) de filaments fins, résistants (c) et riches en alcaloïdes toxiques, issus des plantes dont les mâles se nourrissent. Les alcaloïdes sont également présents dans le liquide séminal : ils protégeront aussi les œufs.



Le froid qui accélère

Des réactions chimiques en phase gazeuse s'accroissent quand la température baisse!

Les marmottes hibernent lorsqu'il fait froid. Les espèces chimiques aussi. C'est du moins ce que laisse penser la loi d'Arrhénius, selon laquelle la vitesse des réactions chimiques décroît avec la température. Cette loi, vérifiée pour la majorité des réactions, est mise en défaut pour certaines réactions en phase gazeuse entre des espèces neutres à très basses températures, comme viennent de le montrer expérimentalement Bertrand Rowe, André Canosa et leurs collègues du Laboratoire d'astrochimie expérimentale de l'Université de Rennes, en collaboration avec le groupe dirigé par Ian Smith, de l'Université de Birmingham. Cette découverte bouleverse la chimie des milieux interstellaires, car les températures qui règnent dans certaines régions de l'espace sont très basses. Elle a aussi valu à ses inventeurs le Prix Descartes, qui récompense chaque année des découvertes issues d'une collaboration européenne.

Avec le froid, les molécules ralentissent et les vitesses des réactions chimiques diminuent. Pourtant, paradoxalement, au-dessous de 20 kelvins, certaines réactions s'accroissent. Ce résultat était prédit par la théorie, mais la démonstration expérimentale tardait. En effet, dans une enceinte d'expérimentation refroidie à dix kelvins, les gaz se condensent sur les parois refroidies, à l'exception d'un très petit nombre d'espèces, notamment l'hydrogène et l'hélium. Collées contre les parois, les espèces ne peuvent plus réagir. Une autre technique permet de refroidir le gaz : il suffit de le détendre à très grande vitesse. On le comprime d'abord dans un réservoir, puis on le laisse s'échapper par un minuscule orifice vers une chambre maintenue sous vide. Le gaz s'écoule à une vitesse supérieure à la vitesse du son et se refroidit à moins de 20 kelvins par une brusque détente. Les

espèces gazeuses sont libres de réagir. Toutefois, cet écoulement gazeux présente des gradients thermiques trop élevés pour que l'on puisse y mesurer des vitesses de réaction.

B. Rowe a créé des écoulements supersoniques uniformes en température, grâce à une technique inspirée des essais de maquettes aéronautiques en soufflerie. Il a placé sur l'orifice un embout, qui fait converger, puis diverger le gaz. En adaptant la forme de la tuyère à chaque gaz, il obtient des écoulements supersoniques uniformes en température sur une longueur de dix centimètres à un mètre. Pour créer les radicaux que l'on souhaite étudier, un laser à impulsions, dirigé sur l'axe de l'écoulement du gaz, casse les molécules précurseurs de ces espèces. Un second laser les excite à intervalles de temps réguliers et des photomètres mesurent la fluorescence, c'est-à-dire l'émission de photons quand le radical se désexcite. Le nombre de photons renseigne directement sur le nombre de radicaux présents. S'ils se réagissent pas, alors le nombre de photons ne varie pas. Sinon, le nombre de photons diminue. Il est proportionnel au nombre de radicaux qui n'ont pas réagi et sert d'indicateur de la cinétique de réaction.

D'après des dizaines d'expériences menées avec différents radicaux, la vitesse de réaction augmente souvent quand la température décroît! Comment l'expliquer? Les vitesses étant plus lentes, les espèces restent plus longtemps à proximité l'une de l'autre, ce qui favoriserait la formation de complexes intermédiaires et des molécules finales.

Ce résultat bouleverse l'astrochimie des milieux interstellaires. Ces milieux sont hétérogènes. Les régions les plus chaudes atteignent une température de près d'un million de degrés Celsius. Elles sont presque désertes. En revanche, dans les régions froides, la température ne dépasse pas 10 kelvins. Ces régions contiennent des nuages denses, qui sont les lieux de naissance des étoiles. Les astronomes y ont répertorié plus de 100 types de molécules. L'hydrogène et l'hélium constituent 99,9 pour cent de la composition, mais des molécules plus complexes, combinant 13 atomes, ont aussi été détectées. Jusqu'à présent, les astronomes pensaient que la chimie interstellaire reposait surtout sur des réactions entre des molécules et des ions provenant de l'ionisation des molécules par les rayons cosmiques. Les expériences menées par les équipes de Rennes et de Birmingham, montrent que de nombreuses réactions entre molécules neutres se produisent. Les expériences se poursuivent, l'enjeu restant de comprendre la formation des molécules de plus en plus complexes.

L'ADN en direct

Première observation du repliement d'une molécule d'ADN en temps réel.

Chez tous les organismes vivants, à l'exception des virus et des bactéries, le matériel génétique est localisé dans le noyau des cellules sous forme de chromatine, une structure complexe qui ressemble à un collier de perles. L'organisation de la chromatine change selon les besoins des cellules : au moment de la division cellulaire, elle se condense sous la forme de chromosomes. À l'inverse, lorsqu'un gène doit être exprimé ou réparé, la chromatine se déplie localement pour faciliter l'accès des protéines chargées d'effectuer ces opérations. Afin de percer les secrets de l'organisation de la chromatine, l'équipe de Jean-Louis Viovy, en collaboration avec celle de Geneviève Almouzni, toutes deux à l'Institut Curie, ont élaboré un dispositif expérimental qui permet de visualiser en temps réel le repliement d'une molécule d'ADN sous forme de chromatine.

Déployée, la molécule d'ADN contenue dans chaque chromosome humain serait capable d'encercler plusieurs milliers de fois le noyau d'une cellule (l'ADN d'un chromosome humain mesure un mètre de longueur). Chaque perle de la structure en collier de la chromatine est nommée nucléosome. Elle est constituée d'une région de l'ADN génomique, enroulée autour d'un cœur formé de huit protéines, les histones. Dans notre système, nous greffons de courts fragments d'ADN (16 micromètres de longueur) par une de leurs extrémités sur une lamelle de microscope. La lamelle sert de base à une petite cuve transparente où l'on



La molécule d'ADN, attachée ici par son extrémité droite, est entraînée par le flux de liquide qui s'écoule de droite à gauche (1). On ajoute alors au liquide des protéines concentrées. L'extrémité libre de la molécule commence à se replier (2) et, au bout de 60 secondes, l'ADN est complètement replié en une pelote compacte de chromatine (3).

peut observer les fragments d'ADN au microscope.

Ces fragments sont préalablement marqués par une molécule fluorescente, qui se fixe sur toute leur longueur. Lorsque les molécules d'ADN évoluent librement, elles sont brassées par un mouvement d'agitation aléatoire (le mouvement brownien) et se replient en une pelote lâche autour de leur point d'ancrage. Lorsqu'on crée un flux de liquide dans la cuve, les molécules d'ADN se déplient et sont étirées dans le sens de l'écoulement. Pour étudier le mécanisme d'assemblage de l'ADN en chromatine, nous avons ajouté dans la cuve des extraits riches en protéines, qui contiennent notamment les histones et les facteurs d'assemblage nécessaires à l'organisation de l'ADN en chromatine.

En présence de ces extraits protéiques, et malgré la force de cisaillement, les molécules d'ADN commencent rapidement à s'enrouler, par leur bout libre, jusqu'à l'extrémité liée à la lamelle. À l'aide d'un microscope à force atomique, qui permet d'explorer des surfaces à l'échelle de l'atome, nous avons étudié la structure de l'ADN en fin de condensation : elle ressemble beaucoup à la structure de la chromatine que l'on extrait directement des cellules. Nous avons ainsi modélisé la formation des nucléosomes et mesuré les constantes cinétiques des réactions chimiques associées : d'après notre modèle, l'ADN ne s'enroule autour des histones, qui constitueront le cœur du nucléosome, que lorsque ces histones sont déjà parfaitement assemblés.

L'organisation de l'ADN en chromatine joue un rôle important dans la régulation de l'expression des gènes. Il est donc primordial pour les cellules que cette structure soit conservée au cours des différents événements où l'ADN est concerné : la division cellulaire, la synthèse des protéines, ou la réparation de l'ADN. Ainsi, la dynamique d'assemblage et de désassemblage de la chromatine est la clé du maintien de l'intégrité fonctionnelle du génome. Notre méthode permettra d'étudier les différentes molécules qui participent à ces mécanismes. On espère établir un catalogue des agents nécessaires au maintien de l'intégrité du génome ; étudier l'organisation de l'ADN lorsque celui-ci subit des lésions, par exemple celles que l'on observe dans les maladies génétiques ou dans les cancers ; enfin, préciser les mécanismes de diverses maladies liées à l'instabilité chromosomique, telle la maladie de Fanconi, rare, mais responsable de malformations multiples.

Benoît LADOUX, Physico-chimie et séparation de l'ADN, Institut Curie-CNRS

L'intérieur de la neige

La microstructure de la neige a été photographiée aux rayons X.

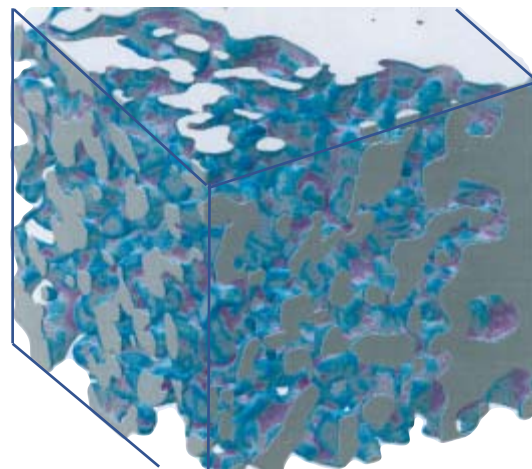
La neige ressemble-t-elle plus à un tas de billes ou à une éponge ? À l'un et à l'autre, répondent les physiciens du Centre d'études de la neige de Météo-France, à Grenoble, d'après des images de la microstructure de la neige obtenues au synchrotron de Grenoble. La neige fraîche est un enchevêtrement des cristaux de glace. Sa structure évolue en fonction de la température et de l'humidité. Les particules de glace grossissent, soit par diffusion de la vapeur d'eau dans la neige sèche (quand la température est négative), soit par échange de molécules d'eau à l'état liquide ou à l'état de glace dans la neige humide (quand la température est proche de 0 °C). La forme, l'arrangement des grains et leurs liaisons déterminent les propriétés mécaniques des couches de neige. Or une couche fragile, ou mal ancrée aux couches déjà déposées, constitue un maillon faible dans le manteau neigeux. Elle risque de se détacher et de déclencher une avalanche. L'étude de la microstructure de la neige est déterminante pour que l'on puisse expliquer les avalanches et, peut-être, les prévoir.

Pourquoi utilise-t-on un rayonnement synchrotron pour étudier quelques centimètres cube de neige ? Jusqu'à présent, les techniques utilisées ne fournissaient, sur la structure de la neige, que des valeurs moyennes sur des volumes importants : on perdait toute information sur la structure fine. Au contraire, le synchrotron fournit des images très précises de la structure des différents grains qui constituent une couche neigeuse. Dans un synchrotron, des électrons sont accélérés et déviés, et cette déviation s'accompagne de l'émission d'un rayonnement X qui sert à l'observation des échantillons. Ce rayonnement chauffe les échantillons, mais la taille de la zone chauffée ne dépasse pas un micromètre. Pour éviter la fusion des zones proches de la zone chaude, on maintient la neige à -50 °C pendant l'expérience.

Les rayons qui traversent la neige sans être absorbés sont détectés et à partir des images du cœur de l'échantillon enregistrées sous différentes incidences, un logiciel reconstruit l'objet en relief et fournit des images dont la résolution est proche de dix micromètres. Pour la première fois, on a observé la microstructure de différentes neiges (plus ou moins sèches ou humides) : on a cartographié le « relief » interne d'un échantillon de glace. On a constaté que le rayon

de courbure local de la structure interne de la neige change (la courbure est positive pour une surface arrondie, comme une bille, et négative pour une surface en creux, tels les pores d'une éponge). Plus la courbure est élevée, plus l'eau s'évapore : les métamorphoses de la neige dépendent de cette courbure locale. Par exemple, dans le cas d'une couche de neige sèche, à faible gradient thermique (la température est homogène dans la couche), la neige s'organise en un enchevêtrement de grains et de pores, une configuration intermédiaire entre une éponge (courbures négatives presque partout) et un tas de billes (courbures positives presque partout).

Les physiciens ont évalué la courbure de la glace en tout point de l'échantillon analysé, à partir des images obtenues avec le synchrotron. Les valeurs des courbures calculées varient d'un point à l'autre, ce qui montre bien que les aspérités (billes) jouxtent les creux (éponge) dans la neige. L'analyse a été réalisée sur un échantillon à un moment précis. L'enjeu est de prévoir l'évolution d'une telle couche dans le temps. Maintenant qu'ils ont découvert la structure intime de la neige, les physiciens vont établir des modèles d'évolution d'une couche de neige en fonction des paramètres extérieurs (les variations de température et d'humidité) ; ils vont modéliser la diffusion de vapeur au sein de la neige, les transferts thermiques, les métamorphoses des différentes microstructures neigeuses. Ils espèrent en déduire comment une couche de neige se transforme et, par conséquent, comment ses liens avec les couches sous-jacentes changent. Peut-être saura-t-on alors prévoir le moment où une couche superficielle instable se détachera de son support.



Cet échantillon de neige observé aux rayons X révèle des courbures locales positives en forme de billes (en bleu) et des courbures locales négatives (en rose) en creux. La répartition des courbures locales influence sur le comportement global d'une couche de neige.

Centre Météo-France
Grenoble