

Des études systématiques effectuées notamment par Ward et ses collaborateurs à Leeds ont démontré que les polyéthylènes de masses molaires d'environ 100 kg / mole peuvent être étirés efficacement à l'état solide jusqu'à des rapports d'étirement de plus de 20, soit proches de la valeur maximale calculée pour cette longueur de chaîne. Fait plus important encore, les auteurs en ont conclu que la rigidité finale des polyéthylènes étirés était dictée uniquement par le rapport d'étirement absolu, et non par la masse moléculaire, et que le rapport d'étirement maximal des polyéthylènes linéaires cristallisés à partir du polymère fondu diminue quand la masse molaire augmente.

Ce comportement est contradictoire avec notre analyse antérieure des chaînes isolées. La cause de cette diminution du rapport d'étirement maximal en fonction de l'augmentation de la longueur de la chaîne de polyéthylène fondu, puis cristallisé, réside dans l'augmentation linéaire du nombre d'enchevêtrements («nœuds moléculaires») par molécule. Ces enchevêtrements de chaînes agissent comme des points de friction et bloquent la déformation.

Des techniques pour contourner ces limites ont été mises au point à la fin des années 1970 chez la Société DSM, aux Pays-Bas. On découvrit alors que les gels de polyéthylène à ultra-haute masse moléculaire (supérieur à 1 000 000 kg / kmole) obtenus par cristallisation à partir de solutions semi-diluées, où les molécules de polymère sont pour la plupart désenchevêtrées, s'allongent facilement jusqu'à des rapports d'étirement 25 fois supérieurs à ceux du même polymère cristallisé à partir de la masse fondue, dans des conditions expérimentales par ailleurs identiques.

Les rapports d'étirement extraordinairement élevés du PE UHPM cristallisé en solution s'accompagnent d'augmentations marquées de la rigidité et de la résistance à la traction. L'utilisation de masses moléculaires encore supérieures, associée à une optimisation des concentrations des solutions de polymère initial, amène une résistance à la traction encore plus élevée. Les rapports d'étirement très élevés modifient la forme et la structure de la chaîne, et améliorent les propriétés mécaniques, ce qu'ont montré les photographies au microscope électronique à balayage et

les diagrammes de diffraction X. Le bon alignement exceptionnel des chaînes de polyéthylène, mis en évidence par les rayons X contraste avec l'orientation obtenue avec des matières à l'état de cristaux liquides.

Le procédé décrit ci-dessus, couramment appelé filage en gel, a été commercialisé par DSM / TOYOBO et ALLIEDSIGNAL. Les fibres disponibles sur le marché ont en général une résistance à la rupture de 4 à 5 gigapascals et un module de 100 à 150 gigapascals. L'inconvénient majeur de ces matières est leur faible température maximale d'utilisation (environ 130 °C), plus basse que celle des aramides ; en revanche, les fibres de polyéthylène résistent mieux que les aramides à l'abrasion et aux chocs.

Le procédé et les éléments examinés ici ne concernent pas exclusivement le polyéthylène. Le filage à l'état de gel a également été appliqué avec un certain succès au poly(vinylalcool) et au polypropylène, même si l'on a obtenu des caractéristiques mécaniques moins spectaculaires (pour le polypropylène, en raison d'une rigidité intrinsèque plus faible du polymère due dans sa conformation cristalline hélicoïdale).

Autres développements

Outre la recherche de nouvelles fibres de performances accrues, d'importants efforts visent à développer des fibres et des textiles plurifonctionnels, c'est-à-dire possédant des propriétés et des fonctionnalités additionnelles. Parmi ces développements, citons la réalisation remarquable, notamment par les producteurs de fibres japonais, de la fabrication de filaments «sub-deniers» par exemple en polyester, de diamètres inférieurs à environ trois micromètres. Les textiles constitués de ces fibres exceptionnelles (*Shin-gosen*) présentent, selon leur structure, la qualité *high touch* (l'apparence et le toucher du cuir ou de la suédine) et peuvent être nettoyés avec une extrême facilité. Un exemple typique, bien que quelque peu exotique, de fibres plurifonctionnelles sont les fibres caméléons, qui changent de couleur avec la température ou la lumière. D'autres fibres ayant des propriétés additionnelles spéciales sont les fibres biorésorbables (par exemple, à base d'acide lactique), utilisées en chirurgie et les fibres optiques utilisées dans les

télécommunications. Chacune de ces fibres doit avoir, pour être fonctionnelle, un ensemble de caractéristiques extrêmement contraignantes. Pour les premières, les conditions préalables sont la biocompatibilité et la dégradation contrôlée dans le corps humain, en plus de propriétés mécaniques appropriées, tandis que les secondes doivent présenter une pureté absolue et un profil spécifique d'indices de réfraction.

Parmi les autres nouveaux développements, encore balbutiants, figure celui de fibres de polymères conducteurs (par exemple, la polyaniline) et plus généralement des fibres de semi-conducteurs. Outre les applications évidentes en électronique, de telles fibres permettront des utilisations nouvelles où l'élasticité et la remarquable transformabilité de nombreux polymères s'ajouteront à la fonctionnalité opto-électronique.

Que reste-t-il à trouver ?

Que reste-t-il à faire ou à inventer ? Par certains aspects, cette question (quelque peu rhétorique) est déjà résolue. Établissons une liste de ce que l'homme n'a pas pu obtenir jusqu'à présent : (1) conférer aux fibres le confort exceptionnel qu'offrent les fibres de coton, ainsi que d'autres fibres naturelles ; (2) produire des filaments polymériques possédant la propriété de résistance à la compression des fibres de verre ; (3) imiter le processus de formation de la soie, dans lequel un polymère hautement résistant est produit dans les conditions ambiantes à partir de l'eau.

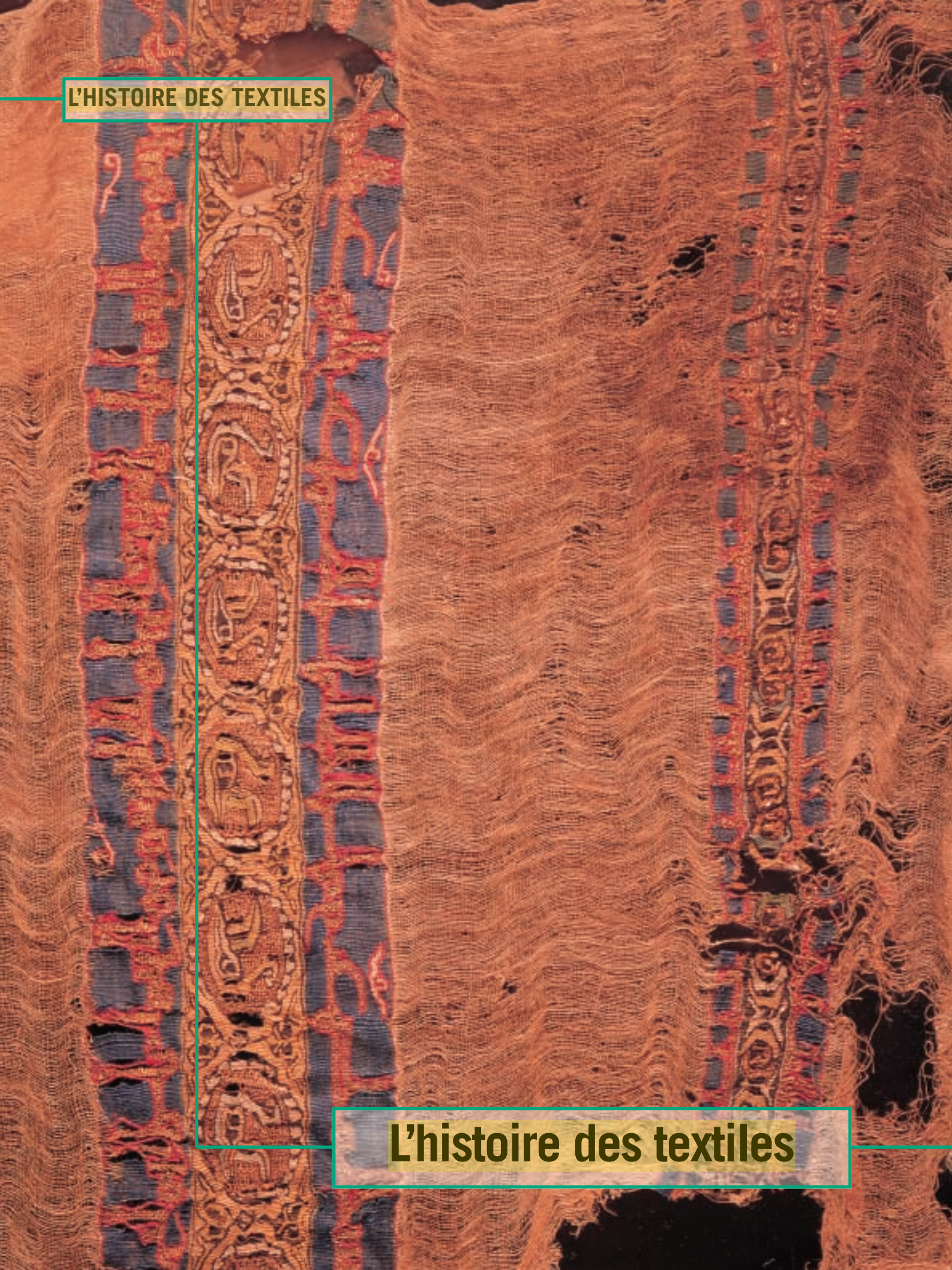
Les efforts visant à résoudre les problèmes qui subsistent devraient se révéler non seulement gratifiants sur le plan intellectuel, mais également d'une grande valeur sociale.

Theo TERVOORT et Paul SMITH sont professeurs dans le Département Matériaux-Polymères de l'École polytechnique fédérale de Zurich.

W.E. MORTON et J.W.S. HEARLE, *Physical Properties of Textile Fibers*, The Textile Institute, Manchester, 1993.

Advanced Fiber Spinning Technology, Woodhead, Cambridge, 1994.

T. HONGU et Glyn O. PHILLIPS, *New Fibers*, deuxième édition, Woodhead, Cambridge, 1997.



L'HISTOIRE DES TEXTILES

L'histoire des textiles

Les textiles des princes celtes

CHRISTOPHE MOULHERAT

Les textiles découverts dans les sépultures aristocratiques de l'Europe celtique révèlent le haut degré technique atteint par les Celtes au cours du premier âge du fer.

Le début du premier millénaire avant notre ère, du VIII^e au V^e siècle, est une période clé de l'histoire des textiles : au cours de ce premier âge du fer, encore nommé période de Hallstatt (du nom d'une vaste nécropole autrichienne), le traditionnel métier à tisser vertical à deux barres (voir la figure 3), hérité du Néolithique et de l'âge du bronze, est remplacé par le métier vertical à quatre barres. C'est aussi à cette époque qu'apparaît le métier à tablettes. Avec ces nouveaux outils, les tisserands fabriquent des étoffes complexes, où le jeu des couleurs, les nouvelles techniques de tissage et l'utilisation de fibres variées produisent des motifs harmonieux dont on ne retrouvera l'équivalent que sous l'Empire romain.

Ces bouleversements dans le domaine des textiles correspondent aux changements sociaux, politiques et culturels des sociétés d'Europe celtique (voir la figure 2). Ce territoire, occupé par les Celtes du premier âge du fer, s'étend alors du Nord de l'Allemagne au Nord de la Suisse et du Massif central à la Bohême. L'aristocratie qui apparaît doit sa prospérité aux contrôles des voies de communication. Elle s'implante sur des sites en hauteur, fortifiés, sur des axes de commerce, telles les vallées du Danube, du Rhin et du Rhône. Elle se fait inhumer dans des tombes fastueuses, avec un mobilier de bronze, des bijoux en or, les premiers objets en fer et de nombreux vestiges textiles.

De la fin de l'âge du bronze à la fin du premier âge du fer (du IX^e au V^e siècle avant notre ère), les pratiques funéraires aristocratiques se transforment : du IX^e au VII^e siècle, les défunts sont enterrés avec une épée de bronze ou de fer ; au VI^e siècle, les tombes contiennent de la vaisselle métallique, des parures en or

et un char à quatre roues ; au V^e siècle, ces tombes à inhumation cèdent la place à des sépultures à incinération en urne de bronze. Parfois, ces pratiques coexistent, au cours des périodes de transition. Ces changements sont représentatifs des différentes formes de pouvoir, symbolisées dans la tombe par une combinaison d'objets distincts.

Du fait de leur nature organique, les textiles de ces tombes ont été souvent décomposés. On n'en retrouve des traces que lorsqu'ils se sont conservés grâce à des conditions particulières, comme dans les tombes des princes celtes. Les vestiges de textiles sont minéralisés en raison du contact étroit avec un objet métallique qui se corrode ; le matériau organique est alors soit imprégné, soit recouvert de sels produits lors de la corrosion. Cette minéralisation des textiles par des sels métalliques est une opportunité extraordinaire pour la recherche archéologique, notamment pour la recherche sur l'environnement et les animaux de l'âge du fer.

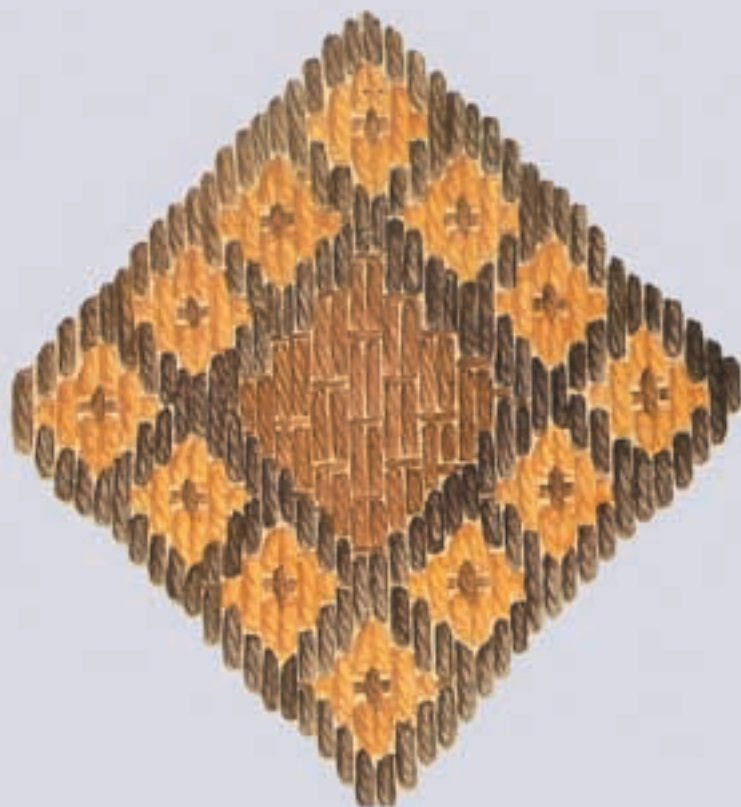
On a déjà beaucoup étudié les textiles minéralisés, mais, jusqu'à ces dernières années, on ne savait pas identifier avec certitude les fibres textiles. La méthode d'analyse mise au point au Centre de recherche et de restauration des musées de France, à Paris (voir l'encadré de la page 40), permet aujourd'hui d'identifier la nature végétale ou animale des fibres, quel que soit leur état de conservation. On détermine ainsi les conditions d'obtention des fibres et les propriétés qui ont motivé leur choix : qualités techniques (facilité de filage, pouvoir hydrophobe, etc.), économiques (facilité d'approvisionnement, produits de luxe destinés aux échanges...), et aussi culturelles (préférence pour tels matériaux, dédain pour d'autres...).

L'analyse d'un ensemble textile de tombes aristocratiques du centre et de l'Est de la Gaule, enrichie d'exemples pris dans les régions limitrophes, révèle les permanences et les évolutions des tissus en Europe celtique sur près de cinq siècles. Ces vestiges de textiles recouvrent les objets des sépultures des princes celtes : d'abord des épées, puis des chars et, enfin, des urnes. Ils nous renseignent sur les pratiques funéraires, les techniques de tissage, ainsi que sur la nature des fibres utilisées.

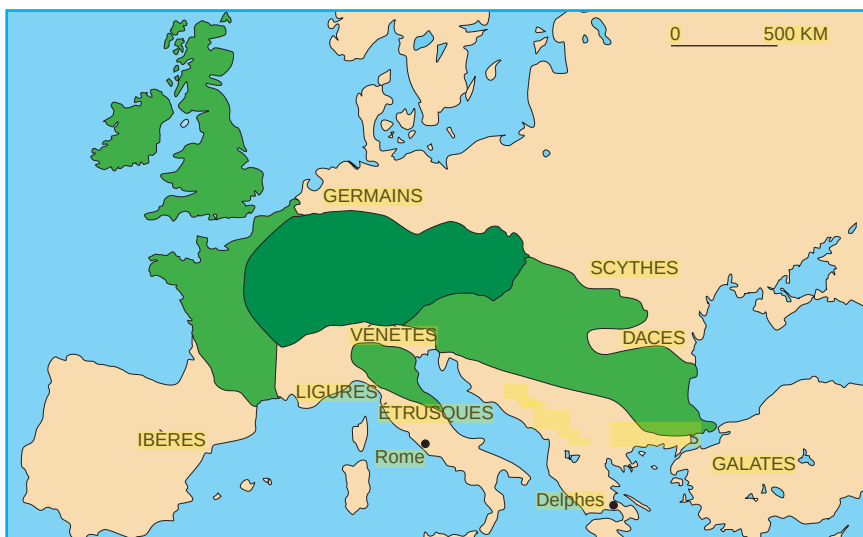
Des épées enveloppées de tissus

À partir du IX^e siècle avant notre ère, de nombreux tertres sont érigés, de la Bohême au centre de la France actuelle. Leur hauteur est généralement inférieure à 1,5 mètre et leur diamètre à 20 mètres. Le mobilier funéraire, c'est-à-dire l'ensemble des objets que contient une tombe, est principalement constitué d'une épée, d'abord de bronze puis de fer, symbole du statut exceptionnel du défunt. Les épées font l'objet d'un traitement particulier où le textile tient une place prépondérante : la plupart conservent sur la lame les restes d'un ou de plusieurs tissus minéralisés. Les autres objets métalliques (rasoir, éléments de harnachement) sont rarement associés à des vestiges organiques.

Le tissu a-t-il été utilisé comme élément de fourreau ? Plusieurs épées de la fin de l'âge du bronze (à Saint-Romain-de-Jalionas, dans l'Isère, ou à Chavéria, dans le Jura) et du début du premier âge du fer (à Soucia, dans le Jura, et à Bastheim, en Bavière) ont été disposées entre deux planchettes de bois, maintenues par une étoffe fixée avec un résidu noir. Dans certains cas, comme celui d'Hossingen (Bade-Wurtemberg),



1. TISSUS CELTES ANCIENS reconstitués, datant du premier âge du fer, dont les vestiges ont été découverts dans la tombe d'un prince, à Hochdorf en Allemagne. Ces tissus décoraient la chambre mortuaire et emballaient les objets précieux avec lesquels était enterré le défunt. Le tissu de gauche a été réalisé au métier à tablettes (une technique qui apparaît au premier âge du fer et permet de produire des tissus élaborés), tandis que le motif de svastikas (croix à branches coudées) sur le tissu en haut à droite, est fait avec la technique de la navette volante (également une nouvelle technique de l'âge du fer) ; à droite, en bas, le losange est l'un des motifs géométriques décoratif que les Celtes affectionnaient à cette époque.



2. L'EUROPE CELTIQUE : territoire originel des Celtes au premier âge du fer (en vert foncé) ; principale zone d'expansion des Celtes au second âge du fer (en vert clair).

le tissu est remplacé par du cuir. Est-ce un fourreau ou bien une simple protection de la lame ? À partir du VII^e siècle avant notre ère, une bande de tissu de cinq à dix centimètres de large enveloppe la lame ; différents tissus peuvent être superposés, comme à Appenwihr (Haut-Rhin). Ces tissus sont une simple protection, car le fourreau est parfois posé à proximité de l'épée, comme sur les sites de Clayeures et de Haroué, en Lorraine. Au total, on sait aujourd'hui que l'usage des planchettes maintenues par un tissu est remplacé par celui de l'enveloppement par une bande d'étoffe.

L'analyse des tissus conservés sur ces épées montre que l'apparition de nouveaux systèmes d'entrelacement des fils de chaîne et des fils de trame ont été employés. Ces systèmes, ou armures de tissage, ne peuvent être obtenus qu'avec des métiers élaborés à quatre barres (voir la figure 3). À partir du IX^e siècle avant notre ère, c'est grâce à cette évolution du métier que les armures de tissage se diversifient. L'armure principale est le sergé : le décalage des fils de chaînes au-dessus ou au-dessous desquels passe la trame engendre des côtes obliques (voir la figure 6). On obtient des sergés de types différents en fonction de ce décalage. Par exemple, pour un sergé de 2/2, la trame passe au-dessus de deux fils consécutifs, puis au-dessous des deux suivants, avec un décalage d'un fil à chaque passage de la trame. Le sergé sert de base à d'autres armures dérivées, tels le chevron et le losange, qui apparaissent au même moment. La

qualité et la variété des sergés laissent supposer que des tentatives de réalisation de ces armures ont eu lieu dès la période précédente, dont peu d'éléments nous sont parvenus. Ainsi, une étoffe en sergé avec motifs de losanges, de la fin du II^e millénaire ou du début du I^{er} avant notre ère, a été découverte à Gerumsberg, dans le Sud de la Suède. L'empreinte d'une armure sergé de l'extrême fin du second millénaire a été découverte dans la grotte des Fraux, en Dordogne.

Malgré l'apparition de nouvelles armures, la plupart des tissus observés sur les épées sont des toiles, c'est-à-dire les plus simples armures qui soient, où les fils de chaîne alternent au-dessus et au-dessous de la trame (voir la figure 6). Elles sont régulières ou à dominante trame, c'est-à-dire que les fils de trame, tassés, recouvrent les fils de chaîne. Dans toute l'Europe celtique, ces armures sont d'une finesse étonnante et d'une grande solidité.

Grâce à l'identification des fibres, on sait aujourd'hui quand les tisserands ont commencé à utiliser la laine en Gaule. Au premier âge du fer, les Celtes sélectionnent les moutons pour leur toison. La «toison moyennement crineuse» et la «toison de finesse moyenne» sont les plus fréquentes. Elles apparaissent dès la fin de l'âge du bronze et ont été observées au Danemark et dans le Nord de l'Allemagne. La première a des poils qui ont perdu de leur rudesse et se transforment en laine, ainsi qu'une sous-couche laineuse qui s'épaissit. Une réduction supplémentaire du diamètre

des poils, accompagnée d'une augmentation du diamètre des fibres de la sous-couche laineuse, marque l'évolution vers la deuxième toison.

De nombreuses variétés de fibres d'origine végétale comme le lin, le chanvre et l'ortie sont utilisées. Le lin est la matière première la plus courante. Son exploitation remonte au néolithique. Les fibres d'ortie sont plus rares dans les tissus. Les plus anciens exemples datent du VIII^e siècle avant notre ère et ont été découverts dans la sépulture de Bohøj, au Danemark, et dans celle de Pierrefitte-sur-Sauldre, dans le Loir-et-Cher. Enfin, plusieurs tissus mélangent des matériaux différents. Sur l'épée de Pierrefitte-sur-Sauldre, certaines toiles sont composées de fibres de lin et d'ortie.

L'usage de textiles associés aux épées, apparu au début du IX^e siècle avant notre ère, se perpétue tout au long du premier âge du fer. À partir du VI^e siècle avant notre ère, quelques cas isolés de poignards comportent des traces de tissus, comme à Larçon (Côte-d'Or) et témoignent de pratiques semblables. Au début du second âge du fer, l'épée en fer de Rascheid (Allemagne du Sud) rappelle les pratiques des périodes précédentes.

L'emballage des épées par du tissu est indissociable des pratiques funéraires aristocratiques du premier âge du fer et se retrouve dans tous les types de sépultures d'Europe celtique.

Les textiles des tombes à char

À la fin du VIII^e siècle avant notre ère, les tombes à char succèdent aux tombes à épée. Comme les sépultures précédentes, elles sont disposées à proximité d'un site en hauteur, le long d'axes d'échanges. Elles s'en distinguent, cependant, par un tertre plus large et plus haut, à l'intérieur duquel se trouve une chambre mortuaire de planches et de rondins de bois. Un char à quatre roues, de la vaisselle de bronze parfois importée d'Italie et de la parure annuelle en or (bagues, boucles d'oreilles, torques) constituent l'essentiel du mobilier, auquel s'ajoutent de nombreuses pièces de tissu.

En 1978, la découverte de la sépulture exceptionnellement bien conservée de Hochdorf, dans le Bade-Wurtemberg, en Allemagne du Sud, a permis d'apprécier l'éventail des