ACADÉMIE D'AGRICULTURE DE FRANCE

Encyclopédie : *Question sur*

Les erreurs passent, il n'y a que le vrai qui reste (Diderot)

Les nanotechnologies ont-elles un intérêt pour le bois et ses dérivés ?

Fiche *QUESTIONS SUR…*n° 02.07.Q09 | **2020, révisée 2026**

Michel VERNOIS, membre de l'Académie d'Agriculture de France

Mots clés : cellulose, nanocomposite

La société recherche de produits biosourcés performants à faible impact environnemental, et disponibles en grandes quantités ; ils doivent pouvoir se substituer à d'autres matériaux traditionnels, en présentant des propriétés d'usage au moins équivalentes à des coûts compétitifs. À cet égard, les additifs de renfort sont en pleine expansion et donc promus à un brillant avenir, compte- tenu de propriétés remarquables qu'ils confèrent aux matériaux composites auxquels ils sont associés. Les avancées en matière de procédés industriels – empruntés pour la plupart aux technologies papetières – laissent entrevoir un fort potentiel pour des nano-composites à base de fibre cellulosique issue du bois ou de certaines plantes annuelles. Jusqu'à un passé récent ces nano-éléments ne provenaient pas de composés naturels renouvelables.

Qu'en est-il actuellement ? La cellulose du bois peut-elle être une source de nanoparticules renforçantes ? Quels sont les mécanismes physicochimiques mis en jeu ? Comment produire la nano-cellulose ? Quelles en sont les applications ?

Qu'appelle-t 'on nano-composites ?

On parle de nano-composites dès lors que les nano-éléments qui les composent (pour tout ou partie) possèdent une de leurs dimensions inférieure à 100 nanomètres[1] (un dix millième de millimètre). À cette échelle, ces nanoparticules présentent le plus souvent des caractéristiques physicochimiques très intéressantes, mises à profit comme éléments de renforcement, même ajoutées en faibles quantités (accroissement sensible des caractéristiques mécaniques, modification du comportement de surface des matériaux à titre d'exemples).

Pourquoi un tel comportement ?

À ce stade dimensionnel, ces nanoparticules ont une structure moléculaire plus ordonnée que les particules millimétriques, avec un taux de cristallinité élevé et de moindres défauts. Elles présentent, par ailleurs, une surface spécifique considérable, qui va générer une activité physicochimique de surface importante due à la présence de très nombreux groupes hydroxyles, les liaisons hydrogène jouant alors un rôle prépondérant sur la cohésion du matériau.



Fig. 1 : microfibrilles de cellulose enchevêtrées

Lorsque ces nanoparticules sont de forme asymétrique (cas des microfibrilles de cellulose), leur orientation conduisant à des propriétés unidirectionnelles privilégiées.

Du bois à la nano-cellulose

Le bois – constitué de fibres lignocellulosiques : cellulose-lignine-hémicelluloses-tanins etc… – est par excellence un des plus remarquables matériaux composites orientés. La constitution de la paroi cellulaire, la présence de fibres, fibrilles et microfibrilles partiellement orientées, induisent des propriétés mécaniques

[1] Pour atteindre ces dimensions, il est très difficile de déstructurer de la matière, et cela requiert généralement beaucoup d'énergie.

Fiche consultable sur le site internet www.academie-agriculture.fronglet "***Publications***" puis "***Table des matières des documents de l'Encyclopédie***".Reproduction autorisée sous réserve d'en citer la provenance

élevées au regard de la densité du matériau. En revanche, les nombreuses inhomogénéités du bois ne permettent pas de profiter pleinement des caractéristiques intrinsèques particulièrement intéressantes des éléments les plus fins que sont les nano-fibrilles.

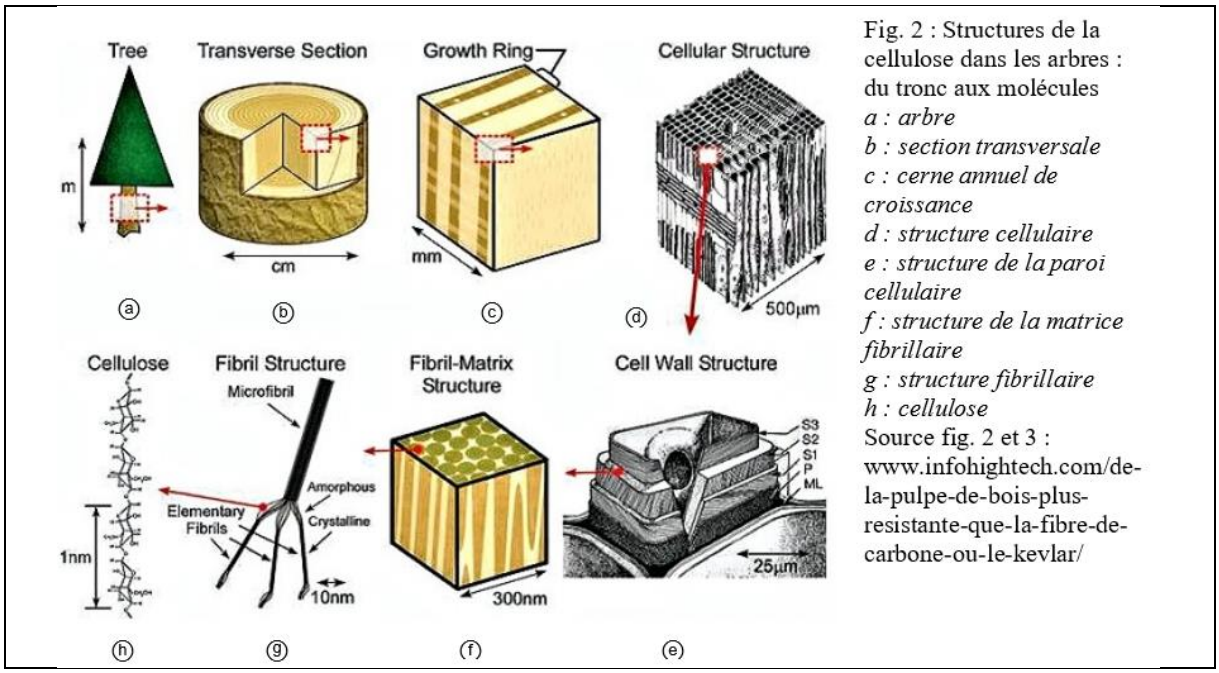


Fig. 2 : Structures de la cellulose dans les arbres : du tronc aux molécules
a : arbre
b : section transversale
c : cerne annuel de croissance
d : structure cellulaire
e : structure de la paroi cellulaire
f : structure de la matrice fibrillaire
g : structure fibrillaire
h : cellulose
Source fig. 2 et 3 : www.infohightech.com/de-la-pulpe-de-bois-plus-resistante-que-la-fibre-de-carbone-ou-le-kevlar/

Les fibres natives de cellulose sont agrégées en longs filaments de cellulose, constitués de domaines moléculaires à caractères cristallin et amorphe, plus ou moins alternés. Du fait de la structure hiérarchique et de la nature semi-cristalline de la cellulose, on peut en extraire – après traitement physicochimique adéquat – les nano-fibrilles de cellulose qui correspondent essentiellement aux domaines à forte cristallinité.

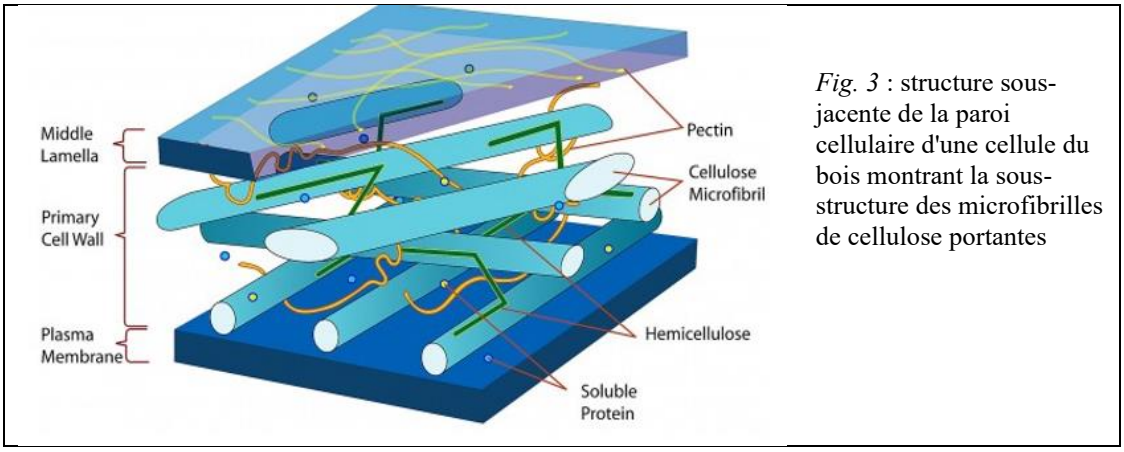


Fig. 3 : structure sous-jacente de la paroi cellulaire d'une cellule du bois montrant la sous-structure des microfibrilles de cellulose portantes

Comment obtenir la nano-cellulose ?

À partir du bois ou des plantes annuelles, les procédés papetiers permettent de libérer les fibres de cellulose par dissolution chimique de la lignine ; il est alors possible, par traitement d'hydrolyse par un acide fort, de dissoudre les domaines moléculaires amorphes de ces fibres. Il en résulte l'obtention de nano-cristaux, appelés whiskers de cellulose. Utilisant des fibres cellulosiques, de nouveaux prétraitements chimiques ou mécano-enzymatiques (enzymes produites à partir de champignons filamenteux de la pourriture du bois) permettent d'initier la déstructuration des fibres pour faciliter la libération des microfibrilles de la paroi cellulaire. Un traitement mécanique à très haute pression hydraulique est ensuite nécessaire pour individualiser les microfibrilles, qui se présentent sous la forme d'un gel ; ces prétraitements sont

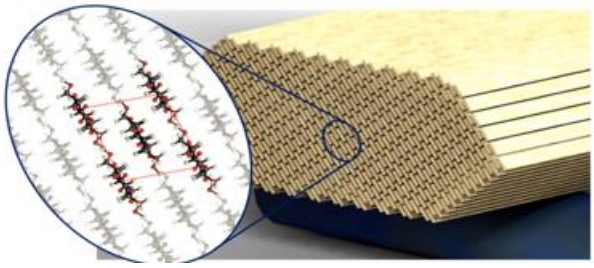


Fig. 4 : détail de la structure des nanocristaux de cellulose (Purdue University, image : Pablo Zavattieri)

 Fiche consultable sur le site internet www.academie-agriculture.fronglet "***Publications***" puis "***Table des matières des documents de l'Encyclopédie***".Reproduction autorisée sous réserve d'en citer la provenance

encore très consommateurs d'énergie électrique, mais des travaux de recherche sont en cours pour la réduire.

Des propriétés remarquables

Leur surface spécifique très importante et leur module de Young[2] de l'ordre de 150 GPa sont de nature à conférer aux particules de nano-cellulose un potentiel de renforcement important dans des matrices polymères, même à faible taux d'incorporation. Leur transparence peut être mise à profit pour la réalisation de films résistants. Leur réactivité de surface est propice au greffage moléculaire pour l'obtention de propriétés spécifiques remarquables, tel le relargage sélectif de principes actifs pour médicaments.

La nano-cellulose cristalline (CNC) constitue un domaine de recherche particulièrement prometteur qui est désormais produit à l'échelle d'unités- pilotes, voire de petites entités industrielles. Ainsi, l'usine de *CelluForce* (Québec) est en mesure de produire plus d'une tonne par jour. Le marché mondial s'avère porteur avec un chiffre d'affaires de l'ordre de 1 milliards $, et une estimation de 3 à 4 milliards $ en 2035.



Fig. 5 **:** unité pilote de fabrication de nano-cellulose (Université de Toronto, prof. M. Sain)

Les applications actuelles et futures

Les applications potentielles sont particulièrement variées et non exhaustives :

- L'adjonction de 0,5 % de nano-cellulose à la pâte de cellulose conduit à une amélioration très sensible des caractéristiques mécaniques du papier : +25 % en résistance au déchirement, +20 % en résistance à l'éclatement.
- L'incorporation de faibles quantités de nano-cellulose dans des vernis et revêtements de surface accroît la résistance à l'abrasion et la durabilité dans le temps (applications sur bois, panneaux et cuir, à titre d'exemples).
- Des membranes électroacoustiques à base de films de nano-cellulose sont incorporées dans des casques audio Hi-Fi en mettant à profit l'exceptionnelle rigidité dynamique du matériau.
- La nano-cellulose additionnée aux boues de forage en modifie la rhéologie, permettant une réduction de l'énergie requise pour l'extraction du pétrole.
- Des composites plastiques renforcés avec de la nano-cellulose sont envisagés dans des applications automobiles.
- Des composants électroniques transparents à base de nano-cellulose sont en cours de tests pour la réalisation de diodes électroluminescentes (LED).

Ce qu'il faut retenir :

On peut produire de la nano-cellulose à partir de bois. Cette nano-cellulose présente des propriétés originales très intéressantes, pouvant conduire à de nombreuses applications.

Les procédés d'obtention de nano-cellulose sont en cours d'industrialisation, notamment au Canada, au Japon, aux États-Unis et dans les pays nordiques.

La ressource ligneuse – très abondante, renouvelable, recyclable et de faible coût – offre de grandes perspectives pour de futurs matériaux composites incorporant de la nano-cellulose.

La faisabilité en France de ces applications industrielles dépendra de la compétitivité de notre industrie.

[2] Contrainte mécanique qui engendrerait un allongement de 100 % de la longueur initiale d'un matériau, doublant alors de longueur.

 Fiche consultable sur le site internet www.academie-agriculture.fronglet "***Publications***" puis "***Table des matières des documents de l'Encyclopédie***".Reproduction autorisée sous réserve d'en citer la provenance



Fig. 6 : écran ultra-mince et flexible (sce : Samsung)

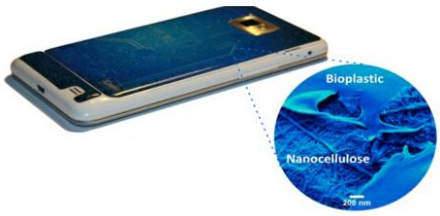


Fig. 7 : protection de smartphone en nano-composite (sce : Gary Chinga-Carasco, PFI)

Reproduction autorisée sous réserve d'en citer la provenance