



KAMAX INNOVATIVE SYSTEM

Technologie XPolar® : Théorie et Applications

3 février 2020



TABLE DES MATIÈRES

1	Introduction : la polarisation de la lumière dans la nature	2
2	La technologie XPolar	3
3	Application : étude du vieillissement de la peau	5
3.1	Le collagène et la polarisation de la lumière	5
3.2	Mise en évidence expérimentale : glycation du collagène	6
3.3	En résumé	8
4	Application : étude de l'oxydation du cheveu	9
4.1	La kératine et la polarisation de la lumière	9
4.2	Mise en évidence expérimentale : test d'actif anti-oxydation	9
4.3	En résumé	13
5	Lexique	13
5.1	Anisotropie	13
5.2	Biréfringence	13
5.3	État de polarisation	14
5.4	Indice de réfraction	16
5.5	K_{\max}	16
5.6	Longueur d'onde	17
5.7	Microscopie en polarisation croisée	17
5.8	Onde électromagnétique	18
5.9	Polarimétrie	18

AVANT-PROPOS

Un [lexique](#) axé sur l'aide à la compréhension de la technologie [XPolar](#) se trouve en section [5](#), avec une description générale des principaux thèmes abordés, se référer par exemple au livre "*Polarized Light*" [[1](#)] pour une description plus détaillée.

1 INTRODUCTION : LA POLARISATION DE LA LUMIÈRE DANS LA NATURE

On s'intéresse au comportement [ondulatoire](#) de la lumière. La [polarisation](#) de la lumière décrit l'une de ses propriétés physiques, au même titre que son intensité ou sa [longueur d'onde](#) (couleur). Cependant, l'œil humain n'est pas sensible à la [polarisation](#). En revanche, de nombreux insectes y sont sensibles. Par exemple, l'abeille (*Apis*) [[2](#)] ou la fourmi du Sahara (*Cataglyphis bicolor*) [[3](#)], utilisent la [polarisation](#) de la lumière pour s'orienter, la [polarisation](#) étant variable en fonction de la direction d'observation dans la voûte céleste. Éga-

lement, la crevette-mante (Stomatopoda), qui possède un système visuel parmi les plus sophistiqués de tout le règne animal, est notamment sensible à la [polarisation](#) [4][5] qu'elle utilise pour communiquer, la crevette-mante étant aussi capable d'émettre de la lumière polarisée.

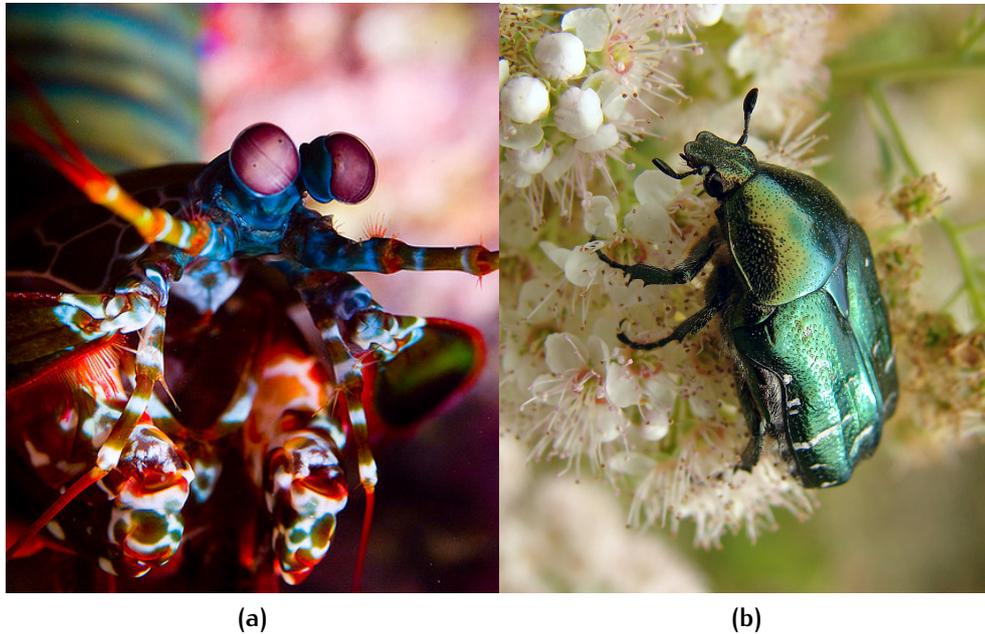


FIGURE 1 – (a) Crevette-Mante[†] (Stomatopoda), dont la vision est sensible à la polarisation de la lumière. (b) Cétoine Dorée (*Cetonia aurata*), dont la carapace réfléchit une lumière polarisée selon l'état circulaire gauche.

D'autres animaux ont développé des structures sur leur carapace leur permettant de réfléchir une lumière polarisée, comme certains scarabées, par exemple *Chrysina gloriosa* [6], *Anomala dubia*, *Anomala vitis*, *Cetonia aurata* et *Potosia cuprea* [7]. Le fait que certains animaux réfléchissent une lumière polarisée suggère que leur vision puisse y être sensible [8].

2 LA TECHNOLOGIE XPOLAR

La technologie [XPolar](#) est un mode d'imagerie intégré sur une plateforme de microscopie, permettant d'observer et de mesurer les modifications [polarimétriques](#) produites par les échantillons étudiés. Plus spécifiquement, la technologie [XPolar](#) apporte de l'information quand

. [†]CC BY-SA Nazir A.

à la **biréfringence** de l'échantillon.

Le fonctionnement optique est schématisé en Fig. 2 : la source laser émet un rayonnement qui traverse un circulateur (C), puis un brouilleur (Br) qui modifie son **état de polarisation**, et est finalement focalisé sur un échantillon (S) par une optique (O). L'onde réfléchie est collectée par l'optique (O), traverse le brouilleur (Br) en sens inverse, puis est séparée en deux composantes polarisées orthogonalement par le circulateur (C). L'intensité lumineuse des deux composantes est mesurée par deux photodiodes, respectivement (A) et (B). On appellera I_{\perp} l'intensité lumineuse mesurée par la photodiode (A), et I_{\parallel} l'intensité lumineuse mesurée par la photodiode (B), \perp et \parallel désignant les direction orthogonales de projection.

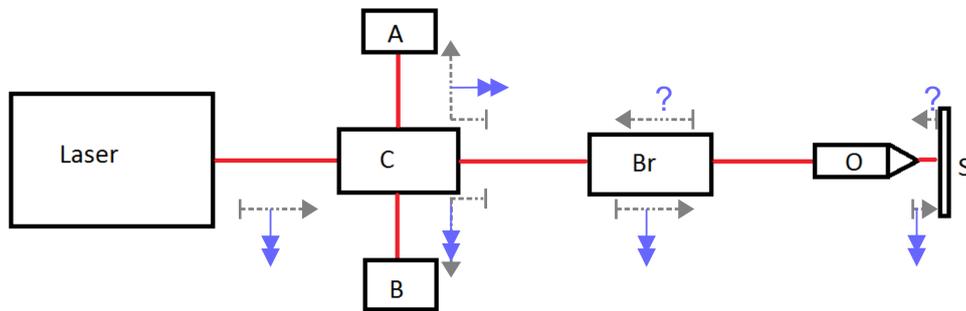


FIGURE 2 – Schématisation du montage optique. Il se compose d'une source laser, un circulateur (C), un brouilleur (Br), un échantillon (S), une optique (O), deux photodiodes (A) et (B). Gris : direction de propagation de la lumière. Bleu : schématisation de la **direction de polarisation** de la lumière, dans les différentes parties du montage optique.

L'**état de polarisation** de la lumière incidente est fixé par le brouilleur. Cet état change de façon maîtrisée au cours de la mesure, et prend une valeur aléatoire parmi toutes les valeurs d'**états de polarisation** possibles. Les deux niveaux d'intensité I_{\perp}^k et I_{\parallel}^k mesurés pour un **état de polarisation** k donné sont enregistrés par l'ordinateur. Cette opération est répétée pour N **états de polarisation** différents, l'ordinateur enregistre donc N valeurs I_{\perp} et N valeurs I_{\parallel} . A partir de ces mesures, un paramètre appelé K_{\max} [9] est calculé :

$$K_{\max} = \max_{k=1:N} \left\{ \frac{I_{\perp}^k}{I_{\parallel}^k + I_{\perp}^k} \right\}$$

Cette mesure (scalaire) est réalisée en 800×600 points sur l'échantillon, en déplaçant le point de focalisation de l'optique (O) dans le plan de l'échantillon, ce qui forme une image (matricielle).

Le paramètre K_{\max} apporte de l'information sur la **biréfringence** de l'échantillon en chaque point de l'image, il peut être utilisé de façon quantitative pour caractériser l'échantillon, et/ou pour quantifier ses variations au sein d'une image.

Le fait d'illuminer l'échantillon avec un grand nombre d'**états de polarisation** différents (N) pour former une valeur K_{\max} permet de s'affranchir des rotations de l'axe optique dans le plan de l'échantillon (voir section 5.2 pour la définition de l'axe optique des matériaux uniaxes). Cela peut être vu (bien que ce ne soit pas rigoureusement équivalent) comme une mesure prenant en compte tous les angles de rotation de l'échantillon entre **polariseurs croisés**.

TABLE 1 – Caractéristiques techniques du mode d'imagerie XPolar.

Caractéristique	Valeur
Taille d'image	800×600 pix.
Taille du champ	200 × 150 μm
Résolution spatiale	0.25 × 0.25 μm/pix.
Grossissement	400×
Épaisseur max. échantillon	150 μm
Longueur d'onde	780 nm
Fréquence d'image	15 Hz
Modes HDR	Low, Medium, High
Résolution K_{\max}	0.01

3 APPLICATION : ÉTUDE DU VIEILLISSEMENT DE LA PEAU

3.1 Le collagène et la polarisation de la lumière

Les collagènes font partie des protéines structurales. Présents dans la matrice extracellulaire des organismes animaux, ils confèrent aux tissus une résistance mécanique à l'étirement. Ils sont donc présents en grande quantité dans la peau.

Les fibres de collagène sont maintenues entre elles par des ponts hydrogènes entre la glycine de ses protéines. Cette structure forme un réseau assimilable à une maille cristalline, dont l'**anisotropie** mène à une modification de la **polarisation** de la lumière lorsqu'elle traverse le collagène. En effet, la lumière polarisée parallèlement aux fibres de collagène ne va pas se propager à la même vitesse que la lumière polarisée selon la direction perpendiculaire. Ce déphasage est décrit par

une propriété appelée **biréfringence**, qui est dépendante de l'état du maillage du collagène, ainsi que de l'épaisseur de collagène traversée.

La modification de polarisation provoquée par le collagène peut être amplifiée en utilisant un colorant, par exemple le rouge sirius [10], le colorant possédant lui même une réponse polarimétrique quand il est fixé sur le collagène. Cependant, l'utilisation d'un colorant n'est pas toujours nécessaire.

Ainsi, une modification de la quantité ou de la structure du collagène va mener à une modification de la **biréfringence** observée [11].

3.2 Mise en évidence expérimentale : glycation du collagène

La glycation du collagène est un processus naturel où un sucre va se lier à une protéine du collagène, ce qui va former des résidus appelés AGEs (advanced glycated end products) [12].

Avec la technologie **XPolar**, on va mesurer les modifications des propriétés **polarimétriques** du collagène au cours d'un processus de glycation. Pour ce faire, du méthylglyoxal est utilisé sur des explants de peau humaine [13].

On va également faire cette mesure sur un explant ayant reçu un traitement à base d'aminoguanidine hydrochloride 1%, un inhibiteur du processus de glycation [14].

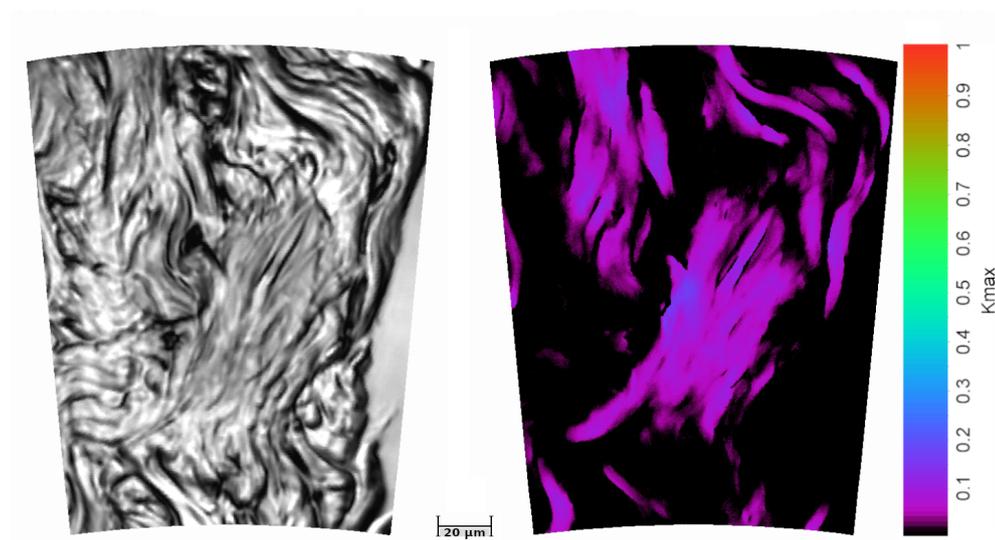


FIGURE 3 – Exemple de mesure XPolar sur un explant de peau. Gauche : image de l'intensité réfléchie. Droite : image du paramètre K_{max} .

Pour caractériser les propriétés **polarimétriques** des explants, on mesure le paramètre K_{max} (pour plus de détails sur ce paramètre, se référer à la section 5.5), plus précisément on calcule la moyenne de ce paramètre, sans prendre en compte les zones de l'image où la réponse **polarimétrique** est nulle. Ce paramètre est appelé moyenne pondérée et ne dépend que de l'épaisseur de collagène traversée, ainsi que sa structure.

Un exemple d'image de K_{max} est affiché en Fig. 11, mesurée sur un explant de 20 μm d'épaisseur sans coloration. L'image de l'intensité réfléchie est affichée à gauche, l'image **XPolar** du paramètre K_{max} est affichée à droite.

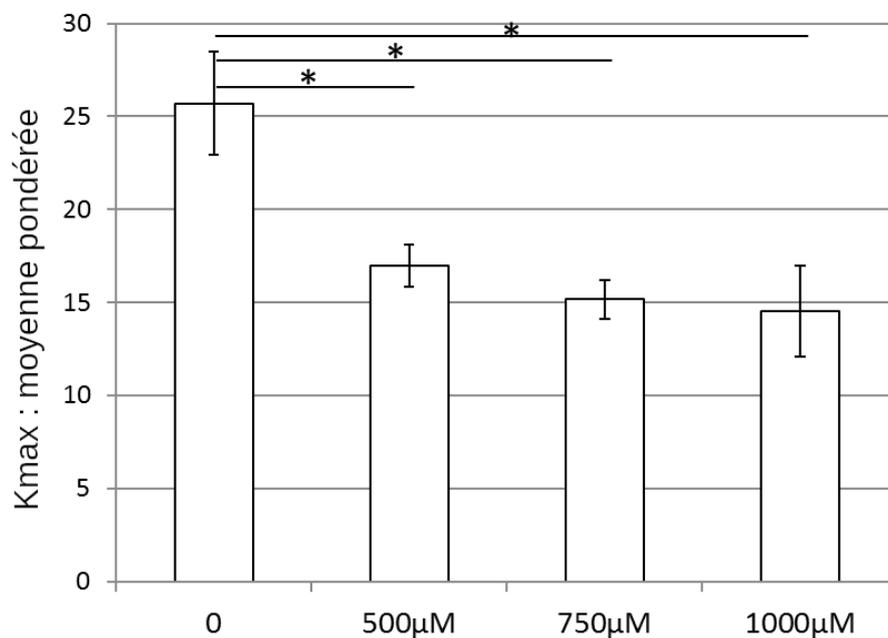


FIGURE 4 – Moyenne du paramètre K_{max} , en ne prenant en compte que les positions ayant une réponse non nulle, en fonction de la concentration en méthylglyoxal appliquée sur l'explant. Plus la concentration est importante (donc plus la glycation est importante), plus la moyenne pondérée de la **biréfringence** diminue.

On réitère cette mesure pour différentes concentrations de méthylglyoxal (500, 750 et 1000 μM), et on enregistre la moyenne pondérée. On mesure une diminution de la moyenne pondérée en K_{max} de respectivement 34 % ($p < 0.05$), 41 % ($p < 0.01$) et 43 % ($p < 0.01$) en fonction de la concentration en méthylglyoxal, comme représenté dans la Fig. 4.

Cette mesure est répétée sur des explants ayant été préalablement traités avec un actif anti-glycation (aminoguanidine hydrochloride 1%).

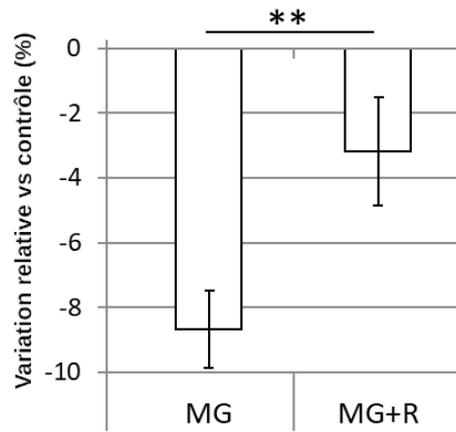


FIGURE 5 – Représentation de la variation relative par rapport au contrôle de la moyenne pondérée, pour l'échantillon ayant uniquement subi la glycation (MG) et l'échantillon ayant été traité préalablement avec un actif anti-glycation (MG+R).

Les résultats sont résumés en Fig. 5, on mesure une réduction de 63 % ($p < 0.05$) de la diminution de la moyenne pondérée après utilisation de l'actif.

3.3 En résumé

On a vu que le collagène, même sans utiliser de rouge sirius (ou tout autre colorant d'histologie modifiant la polarisation lorsqu'il est fixé à un tissu), possède une propriété **polarimétrique** mesurable avec la technologie **XPolar**. Cette propriété signe l'épaisseur de collagène traversée, ainsi que son état structural.

Cette mesure est ici appliquée pour mesurer l'épaisseur et l'état structural du collagène avant et après un processus de vieillissement appelé glycation, on a démontré que la méthode donne une mesure quantitative permettant de suivre le processus de glycation. Par ailleurs, on a démontré que la méthode permet aussi de quantifier l'efficacité d'un actif anti-glycation [11].

D'autres processus mènent à une modification de la **biréfringence** de la peau, par exemple l'utilisation de céramides pour renforcer la fonction barrière de la couche cornée.

4 APPLICATION : ÉTUDE DE L'OXYDATION DU CHEVEU

4.1 La kératine et la polarisation de la lumière

Le cheveu est composé de kératine, une famille de protéines fibreuses. Les fibres α -kératines comportent une partie cristalline [15], liée par des forces de Coulomb et des interactions hydrophobes. Ces fibres sont aussi connues pour avoir une forte concentration de pont disulfures [16] entre les chaînes de protéines, grâce à la cystéine.

Cette structure cristalline des fibres de kératine confère au cheveu la capacité de modifier la polarisation de la lumière qui le traverse, au travers d'une propriété appelée biréfringence.

En effet, la lumière dont l'état de polarisation est parallèle aux fibres de kératines ne va pas se propager dans le cheveu à la même vitesse que la lumière dont la polarisation est perpendiculaire aux fibres. Ce déphasage est appelé biréfringence, il dépend de l'épaisseur du cheveu, et de l'état de la structure cristalline de sa kératine. Si la structure cristalline de la kératine est dégradée, la biréfringence du cheveu diminue [15].

L'eau oxygénée (H_2O_2) est connue pour dégrader la mélanine et ainsi décolorer le cheveu. Cependant, elle cible également les ponts disulfures, en oxydant la cystéine en acide cystéique [17]. Cette dégradation de la structure des fibres mène à une diminution de la biréfringence du cheveu, qui peut être mesurée avec la technologie XPolar.

4.2 Mise en évidence expérimentale : test d'actif anti-oxydation

A titre de démonstration, on réalise le protocole suivant :

- Sélection de 6 cheveux au sein d'une même mèche.
- Section de 3 échantillons contigus au sein de la mèche, d'environ 1 cm de longueur, comme schématisé en Fig. 6.
- Application d'actif anti-oxydation pendant 45 mn sur l'échantillon E2.
- Application d'eau oxygénée (6 % H_2O_2) sur les échantillons E1 et E2 pendant 45 mn puis rinçage à l'eau distillée.
- Séchage pendant 30 mn à 37°C, puis montage des échantillons entre lame et lamelle.

Un exemple de lame montée avec 6 cheveux est affiché en Fig. 7. On réalise deux mesures XPolar par cheveu, ce qui nous donne des

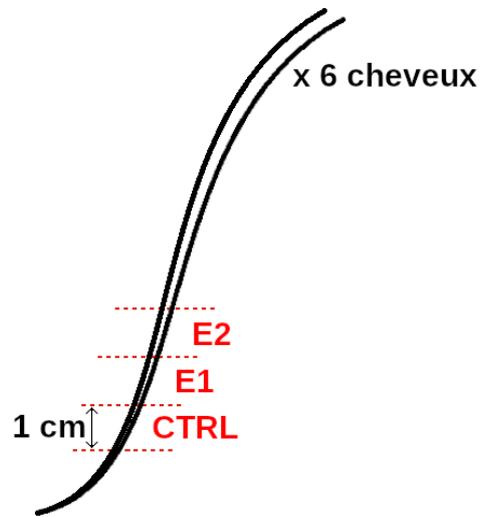


FIGURE 6 – Schématisation de la préparation de 3 échantillons prélevés au sein d'une même mèche.

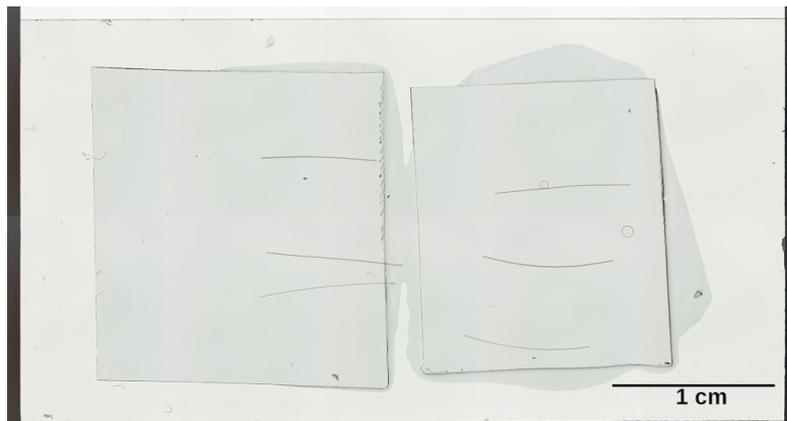


FIGURE 7 – Exemple de lame montée avec 6 cheveux.

images telles que celle représentée en Fig. 8. On remarque une périodicité en valeur de K_{\max} dans l'image de droite : en fonction de la position transversale au cheveu, la valeur K_{\max} augmente du noir au rouge, diminue puis ré-augmente, etc. Cette périodicité s'explique par le fait que la valeur K_{\max} est dépendante de l'épaisseur traversée (pour plus de détails, se référer à la section 5.5), qui varie ici transversalement étant donné que le cheveu est approximativement cylindrique.

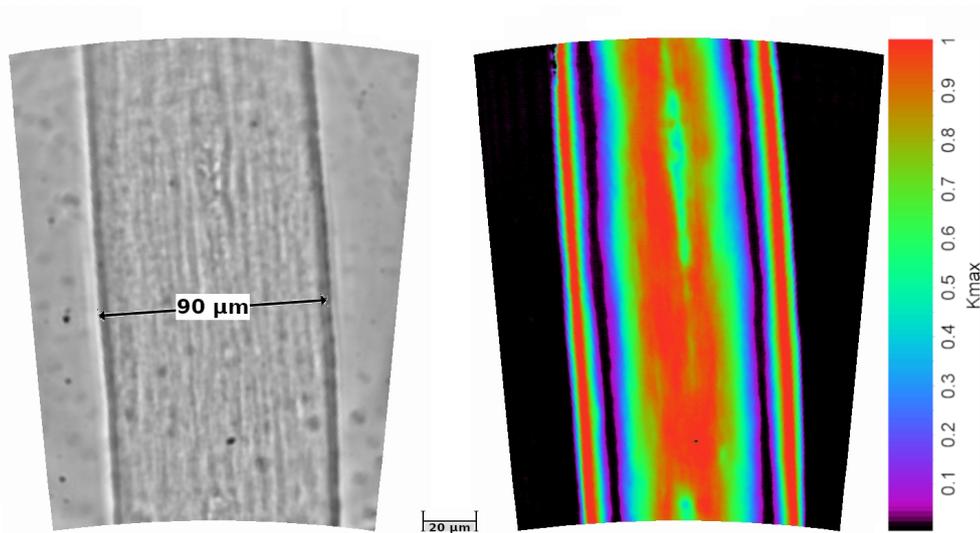


FIGURE 8 – Exemple de mesure XPolar sur un cheveu. Gauche : image en intensité. Droite : valeur du paramètre K_{\max} .

Pour pouvoir déterminer la valeur de biréfringence du cheveu à partir de l'image de K_{\max} , on génère une table de correspondance en supposant que le cheveu possède une géométrie cylindrique, puis on simule les différentes images qu'on obtiendrait pour différentes valeurs de biréfringence. Ainsi, il suffit de connaître le diamètre du cheveu pour estimer la biréfringence du cheveu à partir de l'image de K_{\max} .

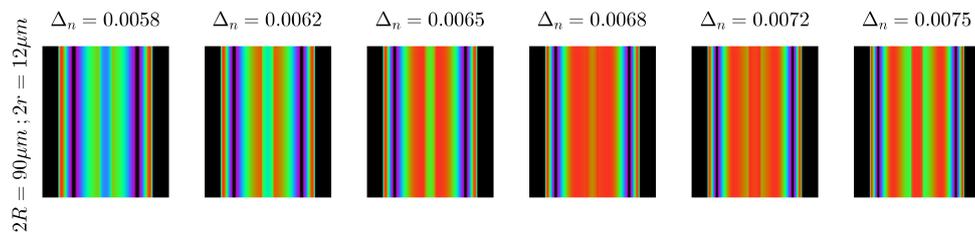


FIGURE 9 – Extrait de l'abaque permettant de lier une image de K_{\max} à la biréfringence du cheveu étudié, en connaissant son diamètre.

Un extrait de cet abaque est représenté en Fig. 9, pour un cheveu de 90 μm de diamètre, avec une médulla de 12 μm de diamètre. Pour estimer la biréfringence du cheveu en Fig. 8, on compare l'image de droite avec les images de l'abaque (Fig. 9) : on trouve une biréfringence Δ_n de 0.0065 ± 0.0003 . Cette mesure est réitérée pour tous les points de mesure de tous les échantillons, les résultats sont affichés en Fig. 10, et résumés dans le Tab. 2. On remarque que l'oxydation a mené à une diminution de 15 % de la biréfringence moyenne par rapport à la valeur mesurée sur l'échantillon contrôle, avec une significativité statistique de 10%. En revanche, l'actif utilisé pour protéger le cheveu a permis de limiter cette diminution à 2 %, avec une significativité statistique de 6%. Pour augmenter la significativité statistique (c'est à dire une p-value $\leq 5\%$ et idéalement p-value $\leq 1\%$), on peut augmenter le nombre de cheveux par échantillons et / ou augmenter l'oxydation du cheveu.

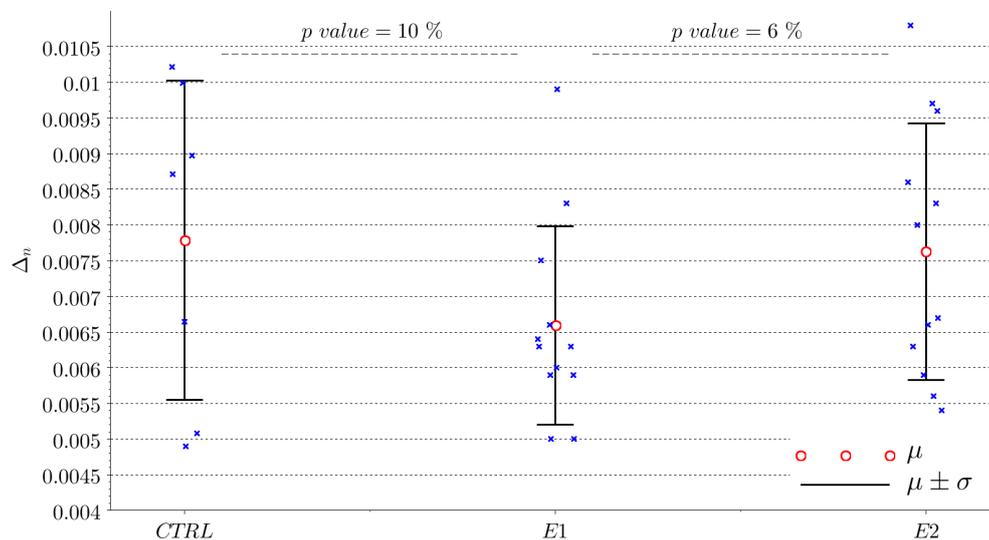


FIGURE 10 – Représentation des biréfringences mesurées sur chaque cheveu de chaque échantillon (croix bleues), leur valeur moyenne (rond rouge) et ± 1 écart-type (ligne noire).

TABLE 2 – Valeur moyenne (μ) et écart-type (σ) des biréfringences mesurées pour chaque échantillon. La valeur de diminution est calculée à partir des valeurs moyennes et relativement à l'échantillon contrôle.

Échantillon	μ ($\cdot 10^{-4}$)	σ ($\cdot 10^{-4}$)	Diminution (%)
CTRL	77.9	22.4	NA
E1	65.9	13.9	15
E2	76.3	18.0	2

4.3 En résumé

On a démontré que la technologie **XPolar** est sensible à l'état de la structure cristalline de la kératine du cheveu, ici au travers de l'oxydation de ses ponts disulfures. En effet, une oxydation du cheveu par de l'eau oxygénée a diminué la **biréfringence** moyenne du cheveu de 15 %. Cependant, l'actif utilisé pour limiter cette diminution a démontré son efficacité puisque la diminution en **biréfringence** moyenne après oxydation est seulement de 2 % par rapport à sa valeur sans oxydation.

Expérimentalement, d'autres processus de dégradation ou de protection / soin de la kératine ont mené à une variation mesurable de la **biréfringence** du cheveu : application de certaines huiles, températures élevées, dégradation naturelle (pointes), etc.

5 LEXIQUE

Ci-dessous un lexique à vocation didactique axé sur l'aide à la compréhension de la technologie **XPolar**.

5.1 Anisotropie

L'anisotropie (en opposition à l'isotropie) désigne le fait que la valeur d'un paramètre est dépendante de la direction considérée. Par exemple, le bois présente une résistance variable en fonction de la direction des fibres, ou la dilatation thermique de matériaux cristallins, qui n'est pas égale selon toutes les directions.

Ici, on s'intéresse à l'anisotropie de l'**indice de réfraction** des matériaux : en fonction de la **direction de polarisation** de la lumière, l'**indice de réfraction** du matériau ne sera pas le même, donc en conséquence la vitesse de propagation de la lumière ne sera pas la même. Un tel matériau est dit **biréfringent**, et il peut modifier la **direction de polarisation** de la lumière qui le traverse.

5.2 Biréfringence

Les matériaux biréfringents présentent une valeur d'**indice de réfraction** anisotrope : sa valeur est dépendante de la **direction de polarisation** de la lumière incidente.

Dans le cas des matériaux biréfringents uniaxes (majorité des matériaux biréfringents naturels), il existe une direction de propagation

pour laquelle le matériau apparaît isotrope (non biréfringent). Cette direction est appelée axe optique du milieu.

Pour toutes les autres directions de propagation, les valeurs d'**indice de réfraction** vues par la lumière polarisée selon deux directions orthogonales (par exemple x et y) vont varier entre deux valeurs extrêmes appelées indice ordinaire n_o et indice extraordinaire n_e . La valeur de biréfringence du milieu est la valeur $\Delta_n = n_e - n_o$.

Il y a donc deux **directions de polarisation** selon lesquelles l'**indice de réfraction** est aux valeurs extrêmes, ces directions sont appelées axes propres du milieu. L'axe selon lequel l'**indice de réfraction** est le plus faible est appelée axe rapide, celui où l'indice est le plus élevé est appelé axe lent. En fonction de la direction de l'axe rapide dans le plan objet d'un microscope, l'intensité de l'image observée entre **polariseurs croisés** va varier, ce qui est une limitation pour des applications de quantification.

La traversée d'un matériau d'épaisseur e et de biréfringence Δ_n par une **onde** polarisée mène à un déphasage maximal (en fonction de l'orientation de la **polarisation** par rapport aux axes propres du milieu) entre ses projections orthogonales qui s'obtient avec :

$$\theta = \frac{2\pi e \Delta_n}{\lambda}$$

La technologie **XPolar** présente la propriété d'être insensible à une rotation dans le plan objet des axes propres, c'est à dire que si l'axe optique de l'échantillon est inclus dans le plan objet, le résultat de mesure sera toujours égal à la valeur maximale de déphasage décrite ci-dessus. Ceci ouvre la voie à une caractérisation quantitative d'échantillons via la **polarisation**.

Le paramètre θ impacte l'équation de l'**ellipse de polarisation** : les matériaux biréfringents modifient l'**état de polarisation** d'une lumière incidente.

5.3 État de polarisation

L'état de polarisation d'une **onde** représente la direction selon laquelle son champ électrique oscille au cours du temps / de sa propagation.

L'amplitude du champ électrique $\vec{E}(z, t)$ d'une onde plane monochromatique se propageant en espace libre selon l'axe z s'écrit :

$$\vec{E}(z, t) = \begin{bmatrix} E_x(z, t) = E_{0x} \cdot \cos(\omega t - kz + \delta_x) \\ E_y(z, t) = E_{0y} \cdot \cos(\omega t - kz + \delta_y) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

avec $\omega = 2\pi c/\lambda$ la pulsation de l'onde dans le vide, $k = 2\pi/\lambda$ le nombre d'onde, δ_x et δ_y les phases des sinusoides projetées respectivement sur l'axe x et y .

On définit $\theta = \delta_y - \delta_x$ la valeur de déphasage entre les deux projections orthogonales de l'onde. En développant l'équation ci-dessus, on peut démontrer qu'on obtient l'équation d'une ellipse [1], décrivant l'ensemble des directions prises par le vecteur champ électrique au cours de sa propagation :

$$\frac{E_x(z, t)^2}{E_{0x}^2} + \frac{E_y(z, t)^2}{E_{0y}^2} - \frac{2E_x(z, t)E_y(z, t)}{E_{0x}E_{0y}} \cos(\theta) = \sin^2(\theta),$$

avec :

- $E_x(z, t)$ (resp. $E_y(z, t)$) l'amplitude sinusoidale du champ électrique projeté sur l'axe x (resp. y),
- E_{0x} (resp. E_{0y}) l'amplitude à l'origine sur l'axe x (resp. y),
- θ la valeur du déphasage entre les deux sinusoides $E_x(z, t)$ et $E_y(z, t)$.

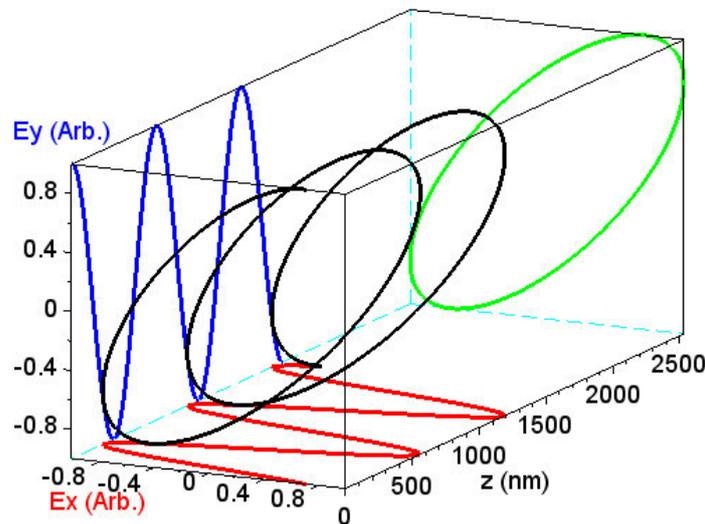


FIGURE 11 – Champ électrique $\vec{E}(z, t)$ pour un exemple d'onde plane monochromatique (noir), $E_x(z, t)$ (rouge), $E_y(z, t)$ (bleu), état de polarisation (vert).

Cette ellipse est appelée état de polarisation de l'onde. Les matériaux biréfringents ont la propriété de pouvoir modifier la valeur du

déphasage θ entre les deux sinusoides $E_x(z, t)$ et $E_y(z, t)$, ils peuvent donc modifier l'état de polarisation de la lumière les ayant traversés.

La technologie **XPolar** permet de sonder l'échantillon avec tous les états de polarisation possibles.

5.4 Indice de réfraction

L'indice de réfraction n d'un milieu est une grandeur sans dimension caractérisant la vitesse de propagation v de l'onde dans le milieu :

$$n = \frac{c}{v}$$

avec $c = 3.10^8$ m/s la vitesse de la lumière dans le vide.

Cette description est valide pour les matériaux homogène, c'est à dire avec un indice de réfraction constant pour toutes les directions de polarisation de l'onde incidente. Cependant, certains matériaux présentent un indice de réfraction différent en fonction de l'état de polarisation de l'onde incidente : en fonction de sa direction de polarisation, l'onde va se propager plus ou moins vite dans le milieu. De tels milieux sont dits **biréfringents**, ils peuvent modifier l'état de polarisation de l'onde incidente.

5.5 K_{\max}

Paramètre de la lumière mesuré par la technologie **XPolar**.

Considérons un échantillon **biréfringent** déposé sur une lame **K-slide** réfléchissant l'intensité lumineuse ayant traversé l'échantillon, l'intensité détectée a donc traversé deux fois l'échantillon. L'intensité à l'illumination est polarisée selon un état de polarisation donné S_k . Deux intensités sont mesurées : I_{\parallel}^k (resp. I_{\perp}^k) en projetant l'intensité détectée selon l'état de polarisation parallèle (resp. perpendiculaire) à S_k .

Cette mesure est réitérée pour un grand nombre (N) d'états de polarisation différents à l'illumination. La valeur de K_{\max} s'obtient alors avec :

$$K_{\max} = \max_{k=1:N} \left\{ \frac{I_{\perp}^k}{I_{\parallel}^k + I_{\perp}^k} \right\}$$

il est lié à la **biréfringence** de l'échantillon via la relation :

$$\begin{aligned} K_{\max} &= \sin^2\left(\frac{\theta}{2}\right) \\ &= \sin^2\left(\frac{2\pi e\Delta_n}{\lambda}\right), \end{aligned}$$

avec θ le déphasage produit par la **biréfringence** Δ_n de l'échantillon d'épaisseur e , à la **longueur d'onde** λ .

5.6 Longueur d'onde

Un des principaux paramètres décrivant une **onde électromagnétique** est sa longueur d'onde, λ , en mètres. La longueur d'onde représente la distance séparant deux maximums consécutifs de l'amplitude de l'onde. La lumière visible est décrite par les **ondes électromagnétiques** dont la longueur d'onde est comprise entre 400 nm et 800 nm.

La longueur d'onde est liée à la fréquence ν (Hz) de l'**onde** via la vitesse de propagation v (m/s) :

$$\lambda = \frac{v}{\nu}$$

La vitesse de propagation v de l'**onde** dépend de l'**indice de réfraction** n du milieu dans lequel se propage l'**onde**. Dans le vide ($n = 1$), la vitesse de propagation est environ égale à $3 \cdot 10^8$ m/s, les fréquences de la lumière visible (dans le vide) vont de 375 THz à 750 THz.

5.7 Microscopie en polarisation croisée

La microscopie en **polarisation** croisée consiste à imager l'échantillon en l'éclairant avec une source de lumière blanche polarisée selon une direction donnée, et détecter l'intensité polarisée selon la direction perpendiculaire après la traversée de l'échantillon.

En fonction de sa **biréfringence**, l'échantillon va apparaître d'intensité et couleurs variables. La couleur apparente et la **biréfringence** sont reliés par l'échelle des teintes de Newton, cependant cette méthode ne permet pas une mesure précise de la valeur de **biréfringence**.

La société Kamax Innovative system commercialise le K-probe version silver, qui permet d'imager les échantillons en mode **polarisation** croisée ; ainsi que le K-probe version gold, qui intègre la technologie **XPolar** permettant la mesure quantitative de **biréfringence**.

5.8 Onde électromagnétique

L'onde électromagnétique est une représentation décrivant les rayonnements électromagnétiques. Elle se propage dans l'espace sans requérir de support matériel en transportant de l'énergie radiative électromagnétique. Elle décrit les oscillations spatiales et temporelles du champ électrique et du champ magnétique, tous deux liés par les équations de Maxwell. Pour simplifier, on peut donc représenter l'onde au travers d'un seul de ces champs, le champ électrique.

Le champ électrique est décrit par une grandeur vectorielle, \vec{E} , dont la direction est décrite par son [état de polarisation](#).

5.9 Polarimétrie

La polarimétrie (ellipsométrie) désigne la science de la mesure de la [polarisation](#) de la lumière. La technologie [XPolar](#) désigne un polarimètre capable de donner de l'information sur la [biréfringence](#) de l'échantillon.

RÉFÉRENCES

- [1] D. Goldstein, *Polarized Light*. CRC Press, 2017.
- [2] P. Kraft, C. Evangelista, M. Dacke, T. Labhart, and M. V. Srinivasan, "Honeybee navigation : following routes using polarized-light cues," *Philos. transactions Royal Soc. Lond. Ser. B, Biol. sciences*, vol. 366, no. 1565, pp. 703–708, 2011.
- [3] T. Labhart, "Polarization-sensitive interneurons in the optic lobe of the desert ant *cataglyphis bicolor*," *Die Naturwissenschaften*, vol. 87, pp. 133–6, 2000.
- [4] N. W. Roberts, T.-H. Chiou, N. J. Marshall, and T. W. Cronin, "A biological quarter-wave retarder with excellent achromaticity in the visible wavelength region," *Nat. Photonics*, vol. 3, no. 11, pp. 641–644, 2009.
- [5] T. Cronin, T.-H. Chiou, R. Caldwell, N. Roberts, and J. Marshall, "Polarization signals in mantis shrimps," *Proc. SPIE*, vol. 7461, 2009.
- [6] P. Brady and M. Cummings, "Differential response to circularly polarized light by the jewel scarab beetle *chrysina gloriosa*," *The Am. Nat.*, vol. 175, no. 5, pp. 614–620, 2010.
- [7] M. Blahó, Ádám Egri, R. Hegedüs, J. Jósvai, M. Tóth, K. Kertész, L. P. Biró, G. Kriska, and G. Horváth, "No evidence for behavioral responses to circularly polarized light in four scarab beetle

- species with circularly polarizing exocuticle," *Physiol. & Behav.*, vol. 105, no. 4, pp. 1067 – 1075, 2012.
- [8] T. W. Cronin, N. Shashar, R. L. Caldwell, J. Marshall, A. G. Cheroske, and T.-H. Chiou, "Polarization Vision and Its Role in Biological Signaling₁," *Integr. Comp. Biol.*, vol. 43, no. 4, pp. 549–558, 2003.
- [9] J. Desroches, D. Pagnoux, F. Louradour, and A. Barthélémy, "Fiber-optic device for endoscopic polarization imaging," *Opt. Lett.*, vol. 34, no. 21, pp. 3409–3411, 2009.
- [10] R. Lattouf, R. Younes, D. Lutomski, N. Naaman, G. Godeau, K. Senni, and S. Changotade, "Picrosirius red staining : A useful tool to appraise collagen networks in normal and pathological tissues," *J. Histochem. & Cytochem.*, vol. 62, no. 10, pp. 751–758, 2014.
- [11] L. Peno-Mazzarino, J. Desroches, G. Percoco, U. Faradova, K. Laquerriere, S. Scalvino, C. Fays, T. Judith, and E. Lati, "The k-probe imaging system as a new tool to analyze human skin aging," *CO-MET*, 2019.
- [12] C. Miki Hayashi, R. Nagai, K. Miyazaki, F. Hayase, T. Araki, T. Ono, and S. Horiuchi, "Conversion of amadori products of the maillard reaction to ne-(carboxymethyl)lysine by short-term heating : Possible detection of artifacts by immunohistochemistry," *Lab. Investig.*, vol. 82, no. 6, pp. 795–808, 2002.
- [13] P. Gasser, F. Arnold, L. Peno-Mazzarino, D. Bouzoud, M. T. Luu, E. Lati, and M. Mercier, "Glycation induction and antiglycation activity of skin care ingredients on living human skin explants," *Int. J. Cosmet. Sci.*, vol. 33, no. 4, pp. 366–370, 2011.
- [14] P. J. Thornalley, "Use of aminoguanidine (pimagedine) to prevent the formation of advanced glycation endproducts," *Arch. Biochem. Biophys.*, vol. 419, no. 1, pp. 31 – 40, 2003.
- [15] M. Feughelman, *Mechanical properties and structure of alpha-keratin fibres : wool, human hair, and related fibres*. Sydney : UNSW Press, 1997.
- [16] R. Fraser, T. MacRae, L. Sparrow, and D. Parry, "Disulphide bonding in α -keratin," *Int. J. Biol. Macromol.*, vol. 10, no. 2, pp. 106 – 112, 1988.
- [17] A. J. Grosvenor, S. Deb-Choudhury, P. G. Middlewood, A. Thomas, E. Lee, J. A. Vernon, J. L. Woods, C. Taylor, F. I. Bell, and S. Clerens, "The physical and chemical disruption of human hair after bleaching – studies by transmission electron microscopy and redox proteomics," *Int. J. Cosmet. Sci.*, vol. 40, no. 6, pp. 536–548, 2018.