





République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université des Sciences et de la Technologie d'Oran
(USTO-MB)



Faculté de Physique
Département de Génie Physique

MEMOIRE

En vue de l'obtention du diplôme de Master

Spécialité : Physique

Option : Sciences Radiologiques et Imagerie (SRI)

Sujet du mémoire

***Etude de l'interaction d'un rayonnement
électromagnétique avec un tissu biologique en fonction de
la longueur d'onde***

Présenté par:

M^{lle}. MEZIANE Leila

M^{lle}. BOULENOUAR Hafida

Encadré par:

Pr. BELBACHIR Ahmed Hafid

Dr. Dib Anis Samy Amine

Soutenance de PFE

07 juin 2016

Plan de travail



I. Lumière et matière biologique

II. Applications biomédicales des interactions lumière-tissu

III. Etude de l'interaction de la lumière avec la peau humaine en fonction de la longueur d'onde

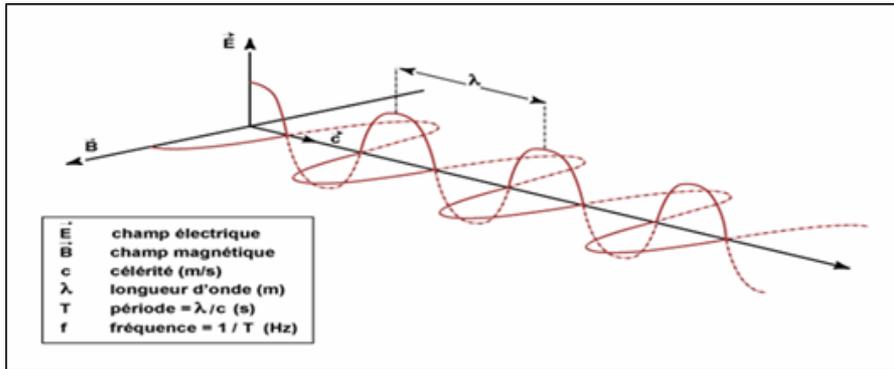
IV. Simulation de l'interaction de la lumière avec la peau humaine en fonction de la longueur d'onde avec Geant4

V. Conclusion

Le rayonnement électromagnétique

Onde

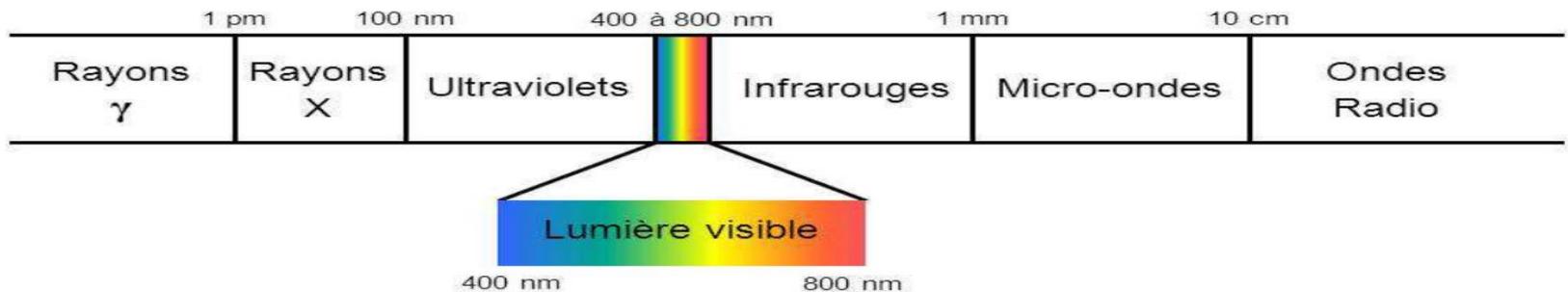
Photons



$$E(\text{énergie photonique}) = h\nu = hc/\lambda$$

h: constante de Planck
 $h = 6.62606957 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$

Spectre électromagnétique



Tissu biologique →

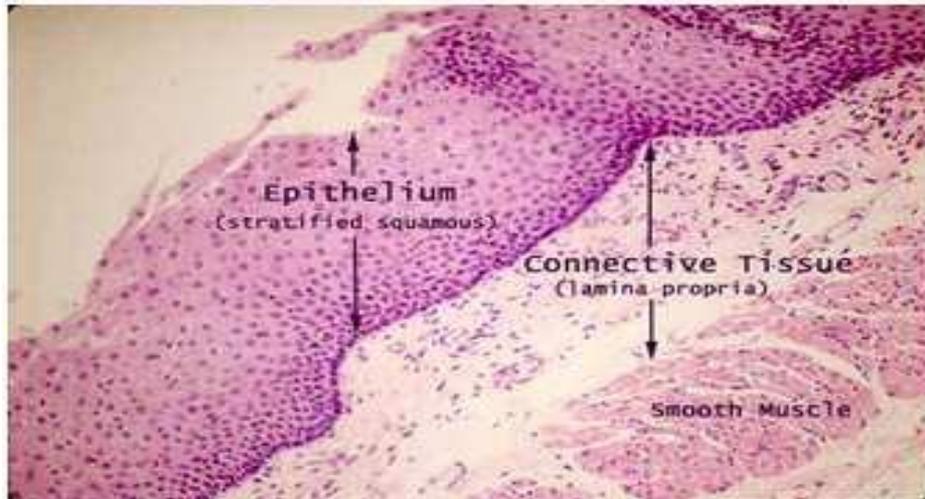
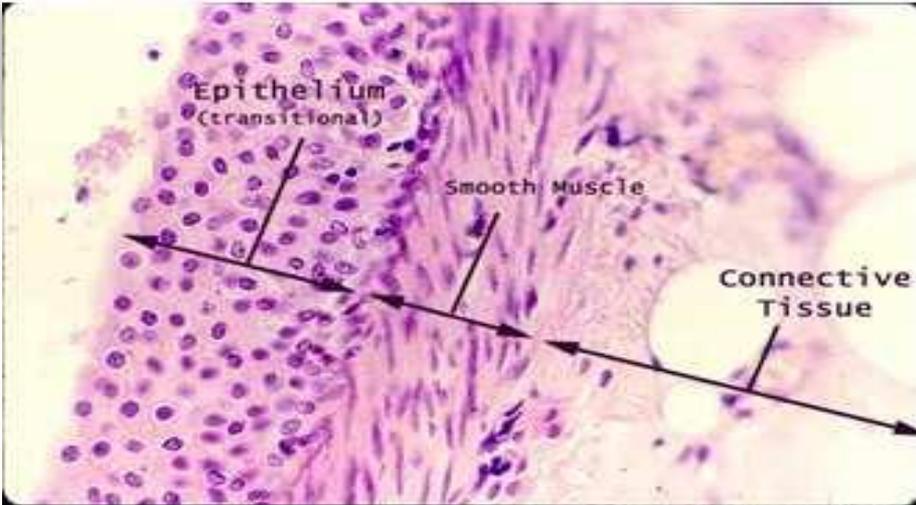
4 types

Tissu conjonctif

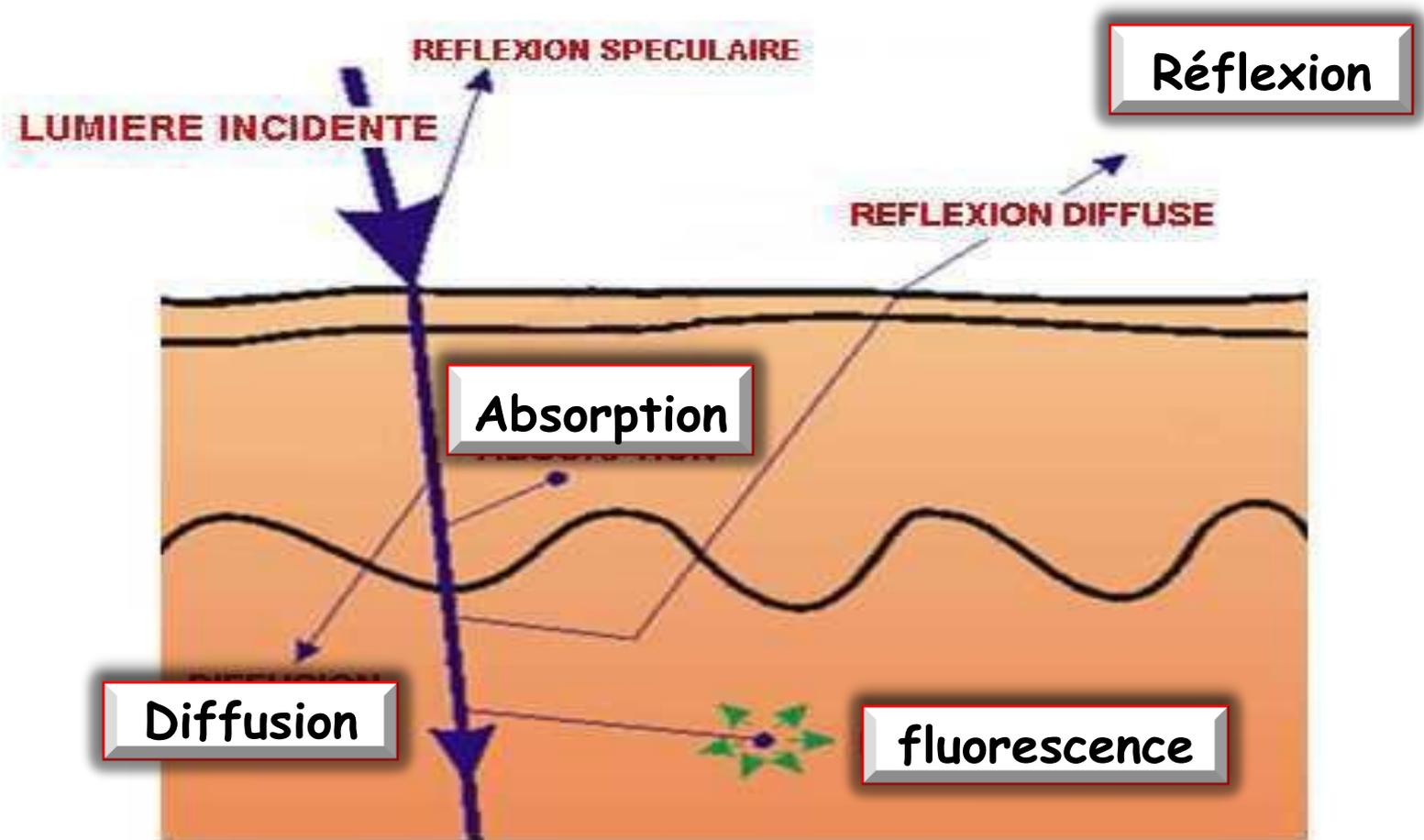
Tissu épithélial

Tissu nerveux

Tissu musculaire

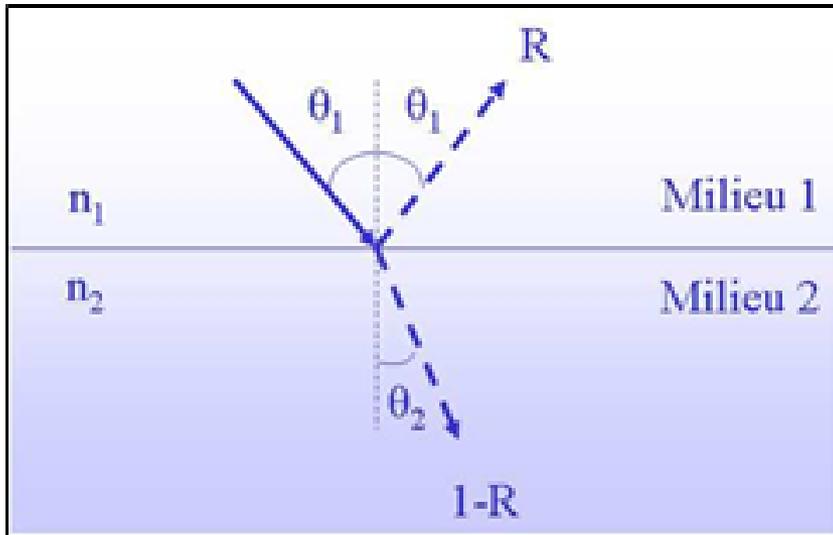


Interaction lumière-tissu biologique



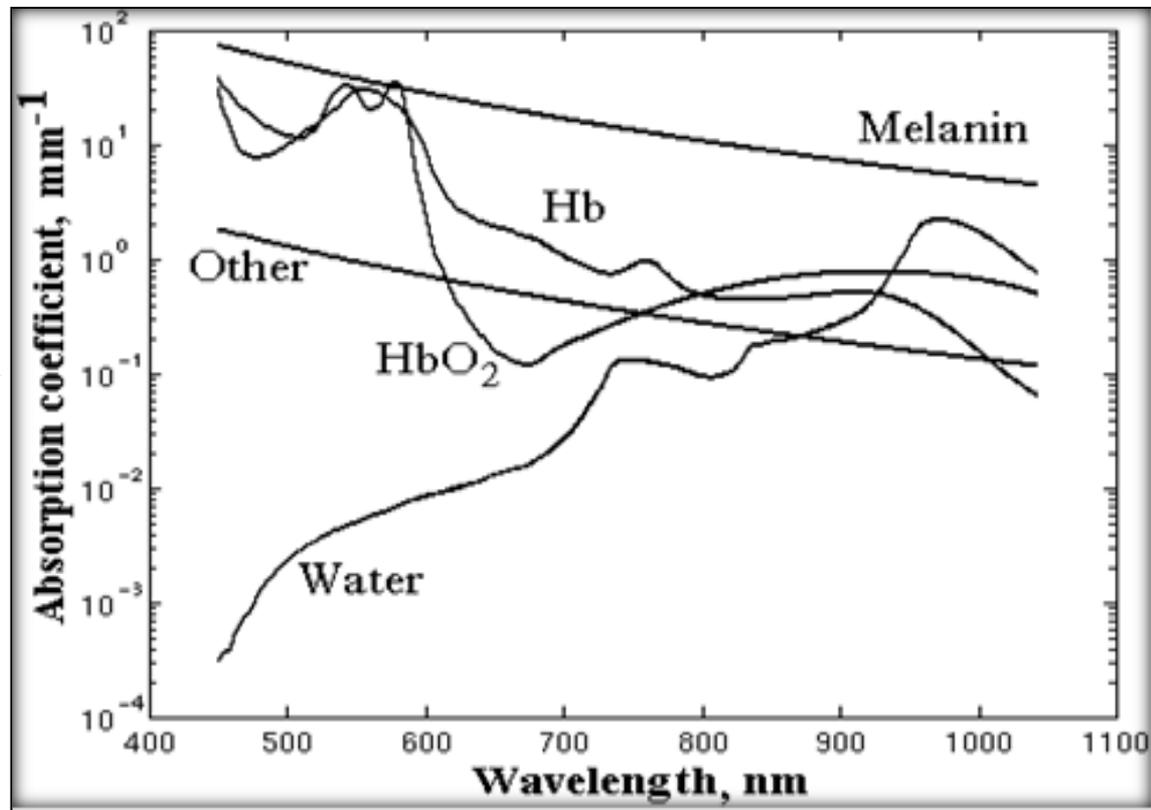
Réflexion

Pour les tissus biologiques
 $1,33 < n < 1,45$

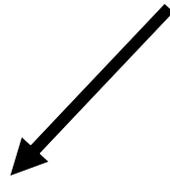


La réflexion conditionne non seulement la portion de lumière pénétrant dans le tissu pour y interagir, mais aussi l'intensité du signal lumineux sortant du milieu biologique pour la détection

Absorption

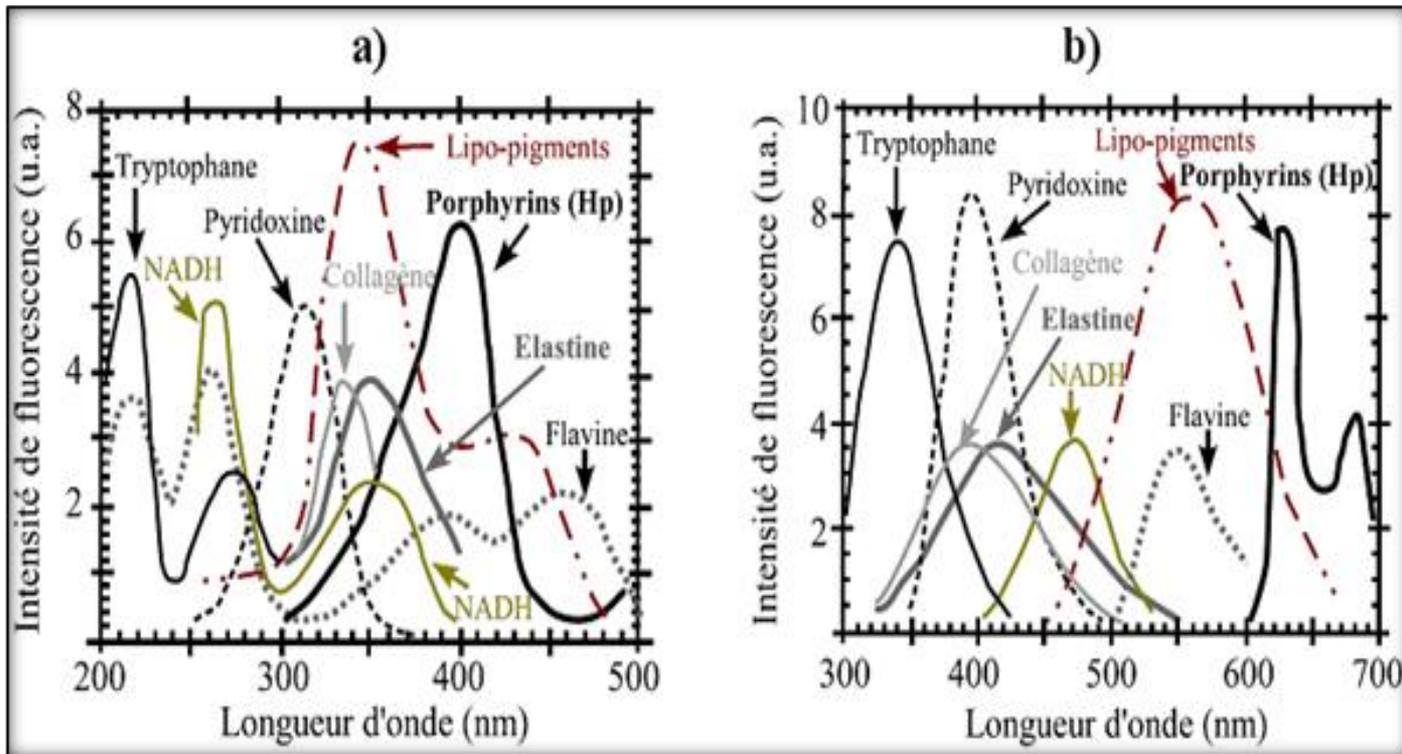


«Fenêtre thérapeutique»
700-1000 nm



Au sein des tissus biologiques, les principaux chromophores absorbeurs de la lumière:
l'eau, les protéines comme l'hémoglobine et la mélanine

Fluorescence

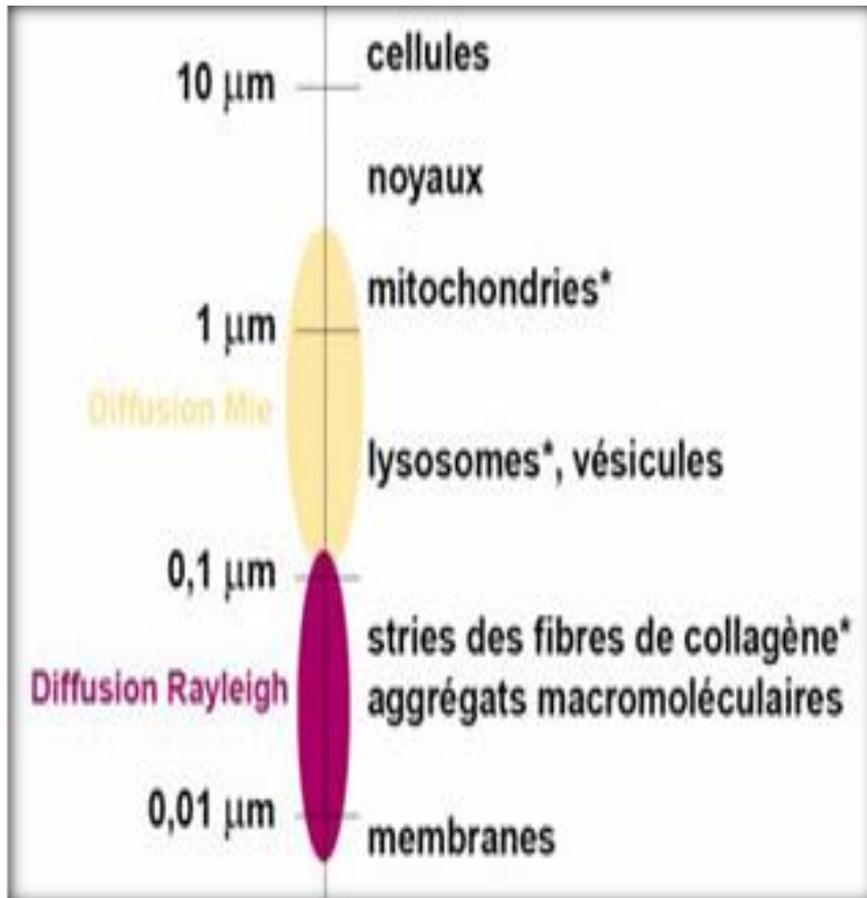


- Chaque fluorophore a une longueur d'absorption et d'émission.
 - Un tissu biologique contient plusieurs fluorophores à différentes longueurs d'onde.
 - La distribution de ces fluorophores n'est pas homogène, en particulier dans l'axe de la profondeur du tissu.
- Parmi les fluorophores endogènes: le collagène, l'élastine, le tryptophane et le nicotinamide adénine dinucléotide réduit (NADH)

Diffusion



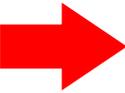
- Diffusion de Rayleigh
- Diffusion intermédiaire
- Diffusion de Mie



L'organisation tissulaire et la diversité des particules diffusantes à l'intérieur d'un tissu complique la spécification de la nature de diffusion.

Plan de travail

I. Lumière et matière biologique

 II. Applications biomédicales des interactions lumière-tissu

III. Etude de l'interaction de la lumière avec la peau humaine en fonction de la longueur d'onde

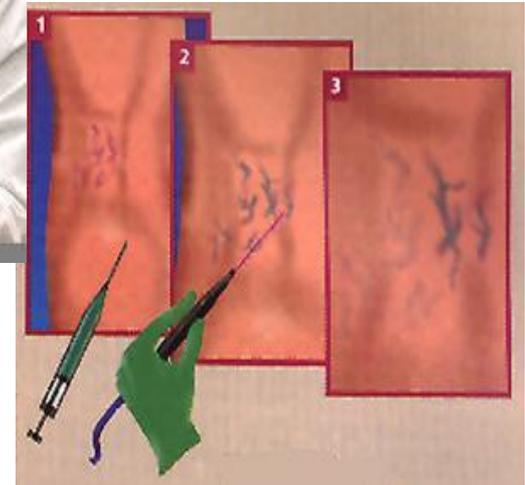
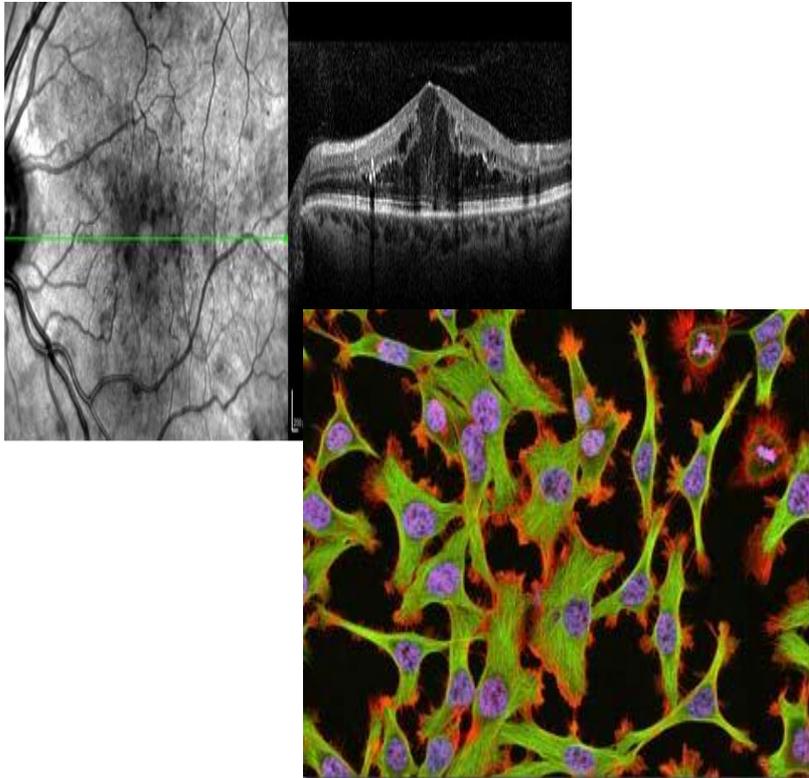
IV. Simulation de l'interaction de la lumière avec la peau humaine en fonction de la longueur d'onde avec Geant4

V. Conclusion

Applications biomédicales des interaction Lumière-tissu biologique

Diagnostique

Thérapeutique



Les applications de diagnostic médicale

Spectroscopie proche-infrarouge



Figure: Deux grands succès commerciaux :
l'oxymètre de pouls et le Bilichek®.

Tomographie optique diffuse

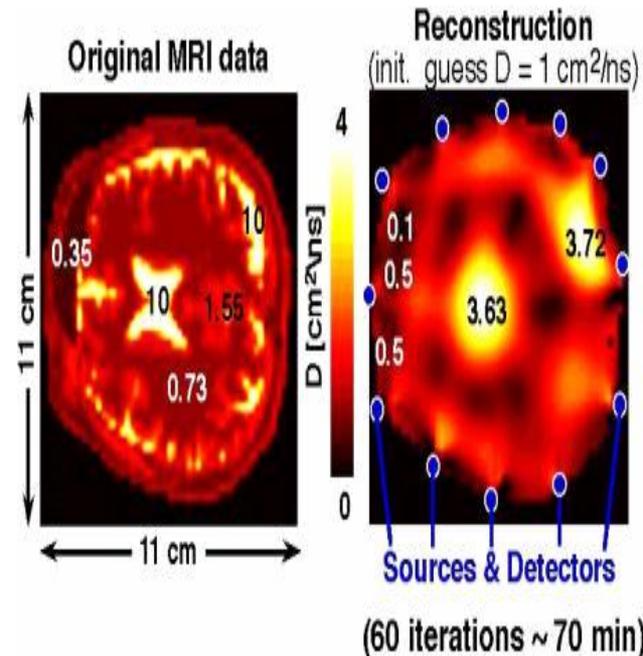


Figure: Imagerie optique du cerveau du nouveau-né
(comparée à l'IRM).

Les applications thérapeutiques médicales

Ophthalmologie

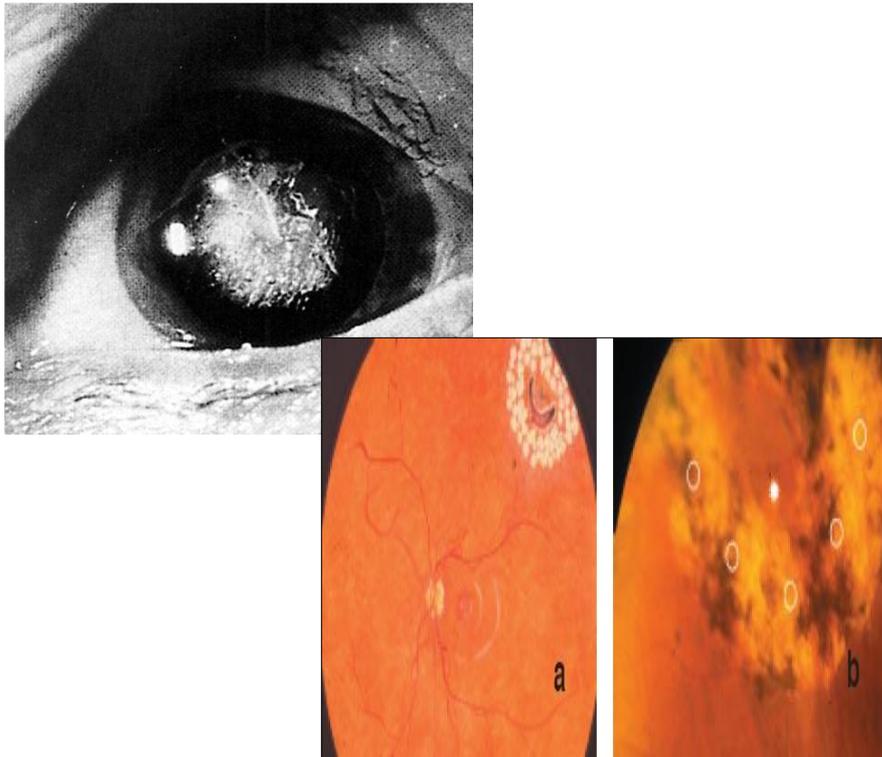


Figure: Traitement préventif du décollement de la rétine.

La dermato-esthétique



Figure: Avant et après trois séances de traitement 'les taches café au lait' par laser Q-switched Nd:YAG 532 nm.

Plan de travail

I. Lumière et matière biologique

II. Applications biomédicales des interactions lumière-tissu

 III. Etude de l'interaction de la lumière avec la peau humaine en fonction de la longueur d'onde

IV. Simulation de l'interaction de la lumière avec la peau humaine en fonction de la longueur d'onde avec Geant4

V. Conclusion

La peau humaine

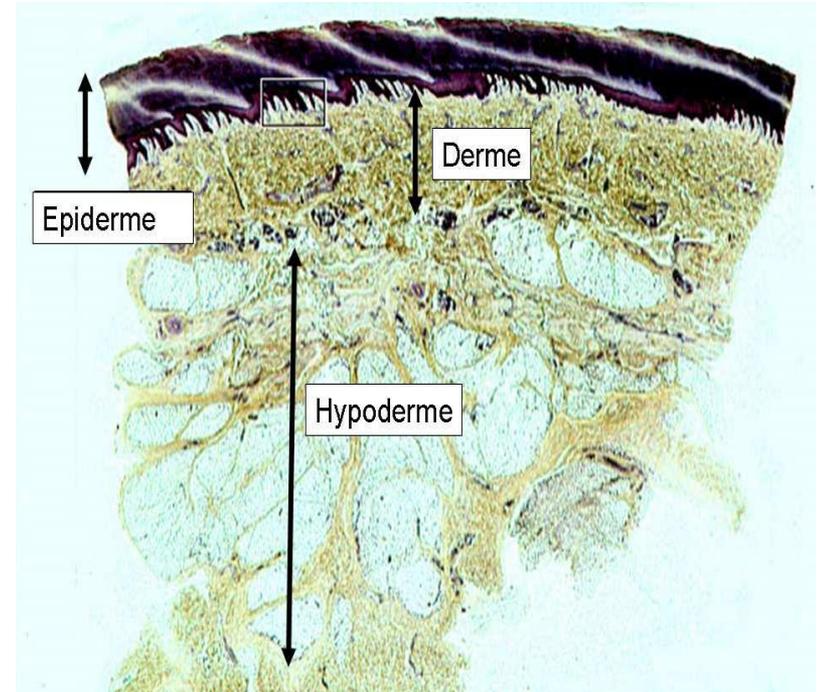
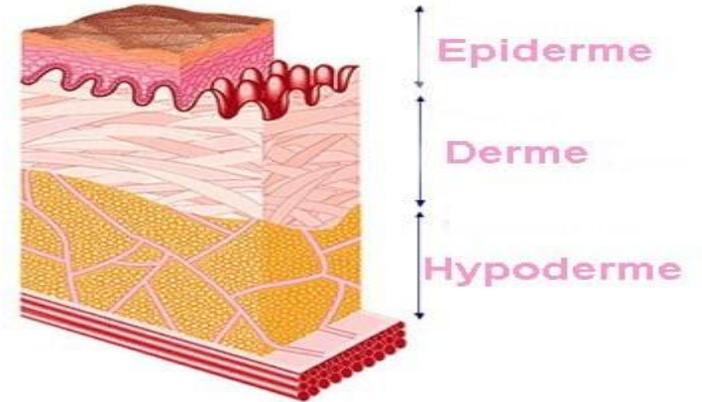
Un tissu conjonctif

Trois couches

L'épiderme (0.027 - 0.15) mm

Le derme (0.6 - 3) mm

L'hypoderme (4 - 9) mm



lumière

la peau

Réflexion est de l'ordre de 4 à 7%

93 à 96% de la lumière incidente

Absorption

Diffusion

Transmission

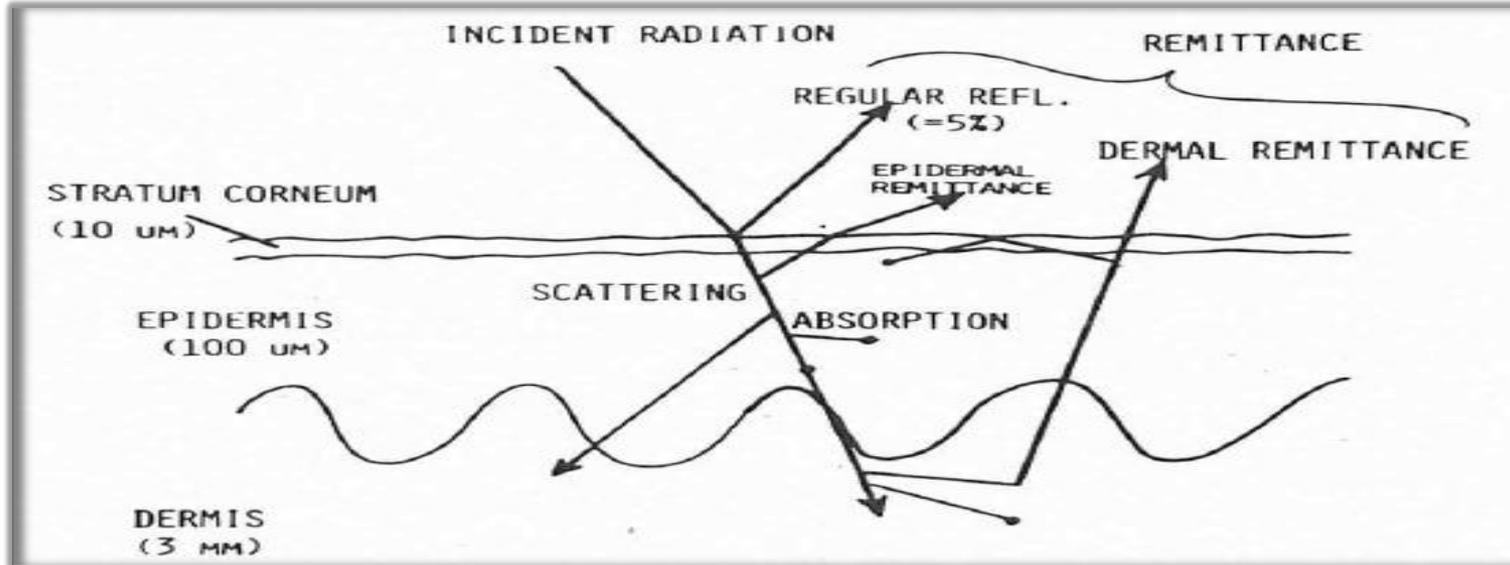


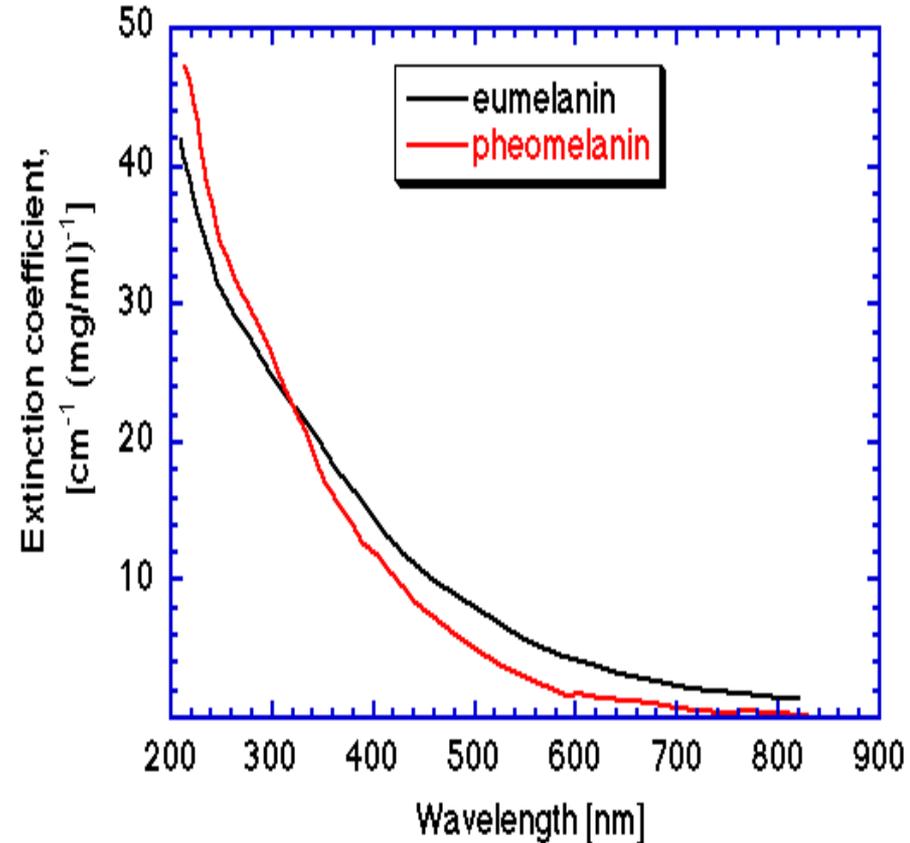
Figure: Les chemins optique de la lumière dans la peau.

Propriétés optiques de l'épiderme humaine

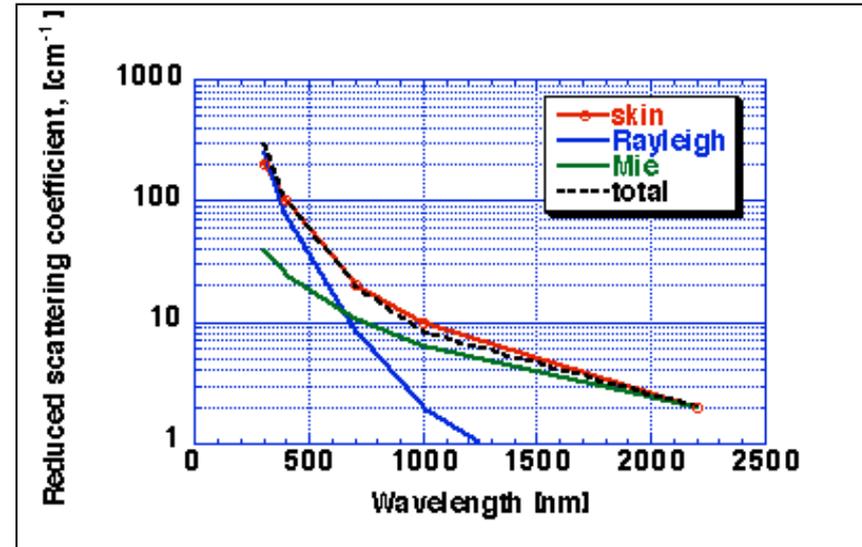
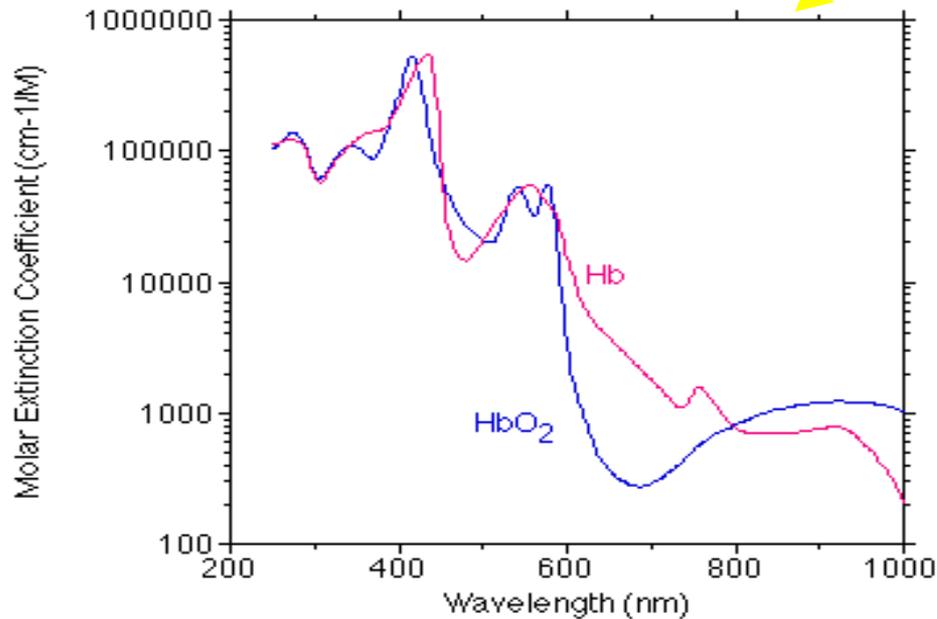
La différence entre l'indice de réfraction de la couche cornée ($n= 1.55$), surface externe de la peau, et celui de l'air ($n=1$) fait qu'une partie de lumière incidente est réfléchiée vers l'extérieur.

La mélanine, polymère important de la couche épidermique, possède des propriétés absorbantes accrues pour les rayonnements UV.

Il existe deux types de mélanine: eumélanine (couleur brun/noir) et pheomélanine (couleur rouge/jaune).



Propriétés optiques du derme humain



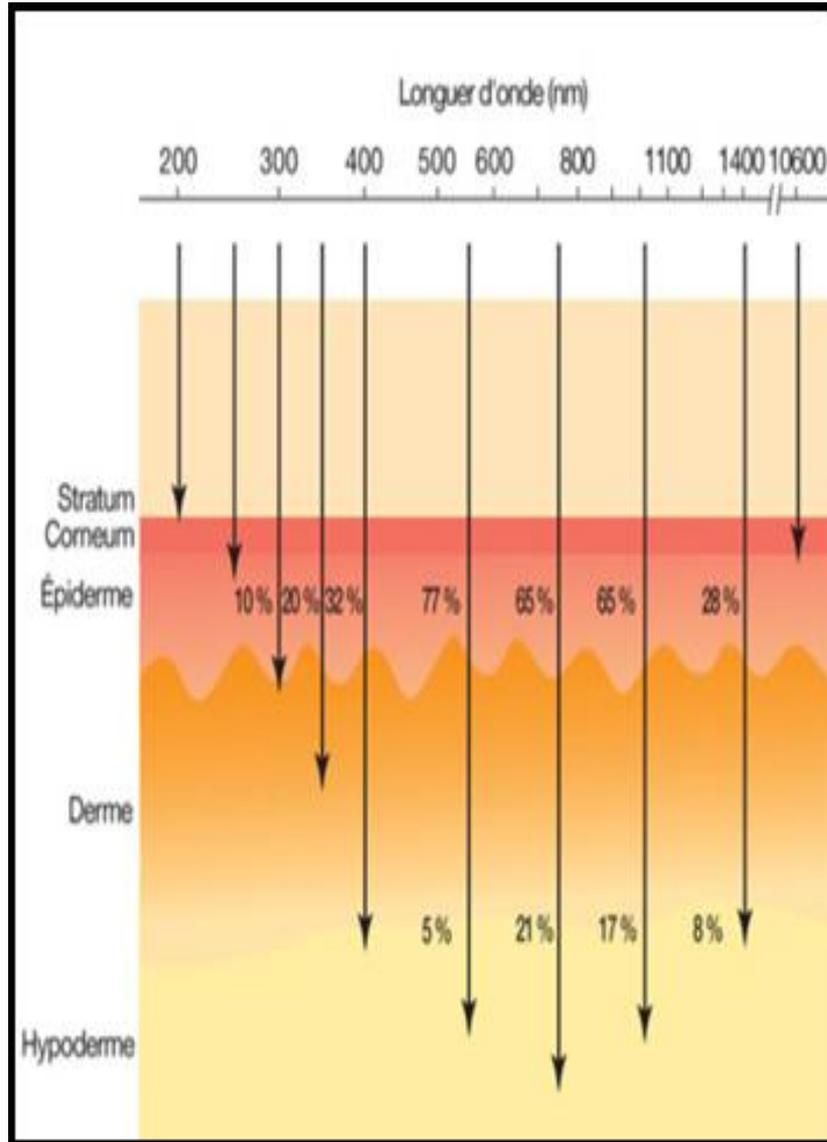
L'hémoglobine est le chromophore prédominant de cette couche nutritive.

Il existe 2 types d'hémoglobine oxygénées et désoxygénée, qui ont des spectres d'absorption légèrement différents.

Le collagène confère des propriétés particulières de diffusion de la lumière au derme.

Les fibres de quelques μm de diamètre de collagène sont d'origine de la diffusion de Mie, tandis que des grands faisceaux de fibres de collagène et d'autres microstructures de cette couche provoquent une diffusion de Rayleigh plus isotrope.

Propriétés optiques de l'hypoderme humain

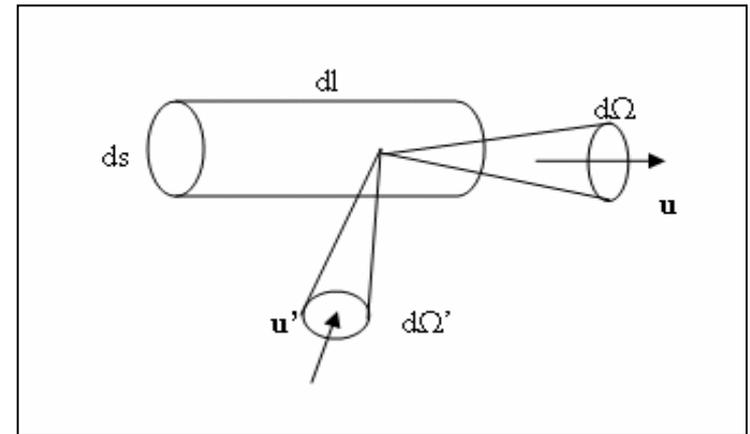


Un nombre important de vaisseaux sanguins traversent l'hypoderme avant de pénétrer dans le derme, et confère également à cette couche une propriété absorbante dans le domaine du visible, à cause de l'absorption par l'hémoglobine.

Compte tenu de la profondeur à laquelle se situe cette couche (> 3mm) et de la pénétration limitée de la lumière dans la bande de 350 - 750 nm (profondeur de pénétration 0.8-3.1 mm) dans ces tissus, l'hypoderme est rarement pris en compte pour l'étude des tissus cutanés humains en spectroscopie.

Modélisation et simulation de l'interaction Lumière-peau

L'équation de transfert radiatif établit en fait le bilan énergétique dans ce milieu, tout en tenant compte des flux d'entrée et de sortie et des pertes par absorption.



$$L(r, u, t) = \frac{d^2 \Phi(r, t)}{dS d\Omega}$$

$$\frac{dL(r, u)}{dI} = -\mu_{\text{ext}} L(r, u) + \frac{\mu_s}{4\pi} \int L(r, u') p(u', u) d\Omega'$$

Approximation de la diffusion

Simulation Monte-Carlo

Approximation de la diffusion

ETR est habituellement simplifiée par l'équation de diffusion.

$$\frac{1}{c} \frac{\partial \Phi(r, t)}{\partial t} + \mu_a \Phi(r, t) - \Delta [D \Delta \Phi(r, t)] = S_0(r, t)$$

Où D [cm^{-1}] est le coefficient de diffusion et qui est reliée aux caractéristiques du milieu par :

$$D = \frac{1}{3} (\mu_a + \mu_s')$$

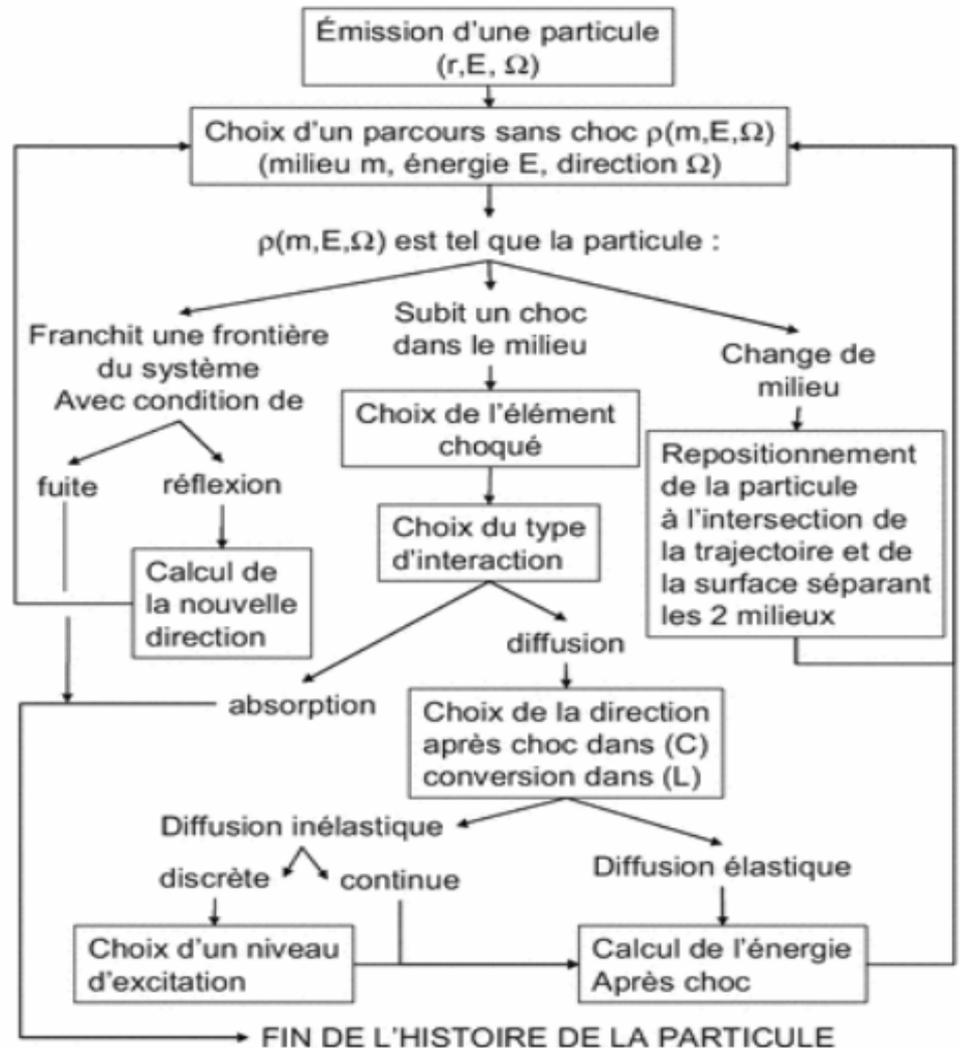
Dans le cas stationnaire, l'équation précédente devient:

$$\Delta \Phi(r) - \frac{\mu_a}{D} \Phi(r) = - \frac{S_0(r)}{D}$$

Simulation Monte-Carlo

La méthode de Monte Carlo est couramment utilisée pour modéliser le transport de l'énergie radiatif dans les tissus de la peau.

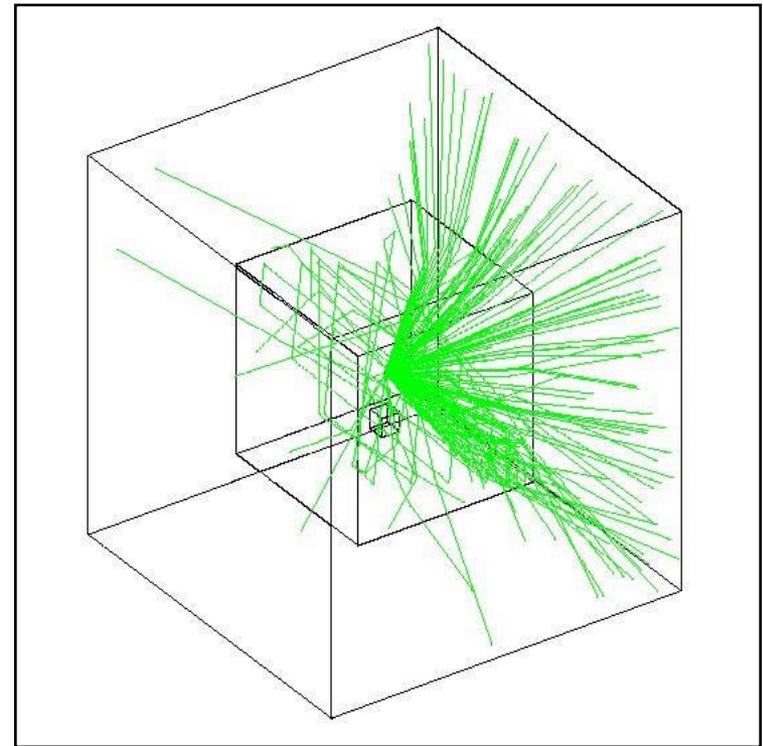
Elle cherche à évaluer le comportement macroscopique de ce milieu à partir d'une étude statistique de son comportement microscopique.



Simulation Monte-Carlo

Geant4

Le code est structuré avec un minimum de trois classes, permettant de définir la géométrie et les matériaux (Detector Construction), les particules et la physique (Physics List), et le générateur des événements (Primary Generator Action).



Plan de travail

I. Lumière et matière biologique

II. Applications biomédicales des interactions lumière-tissu

III. Etude de l'interaction de la lumière avec la peau humaine en fonction de la longueur d'onde

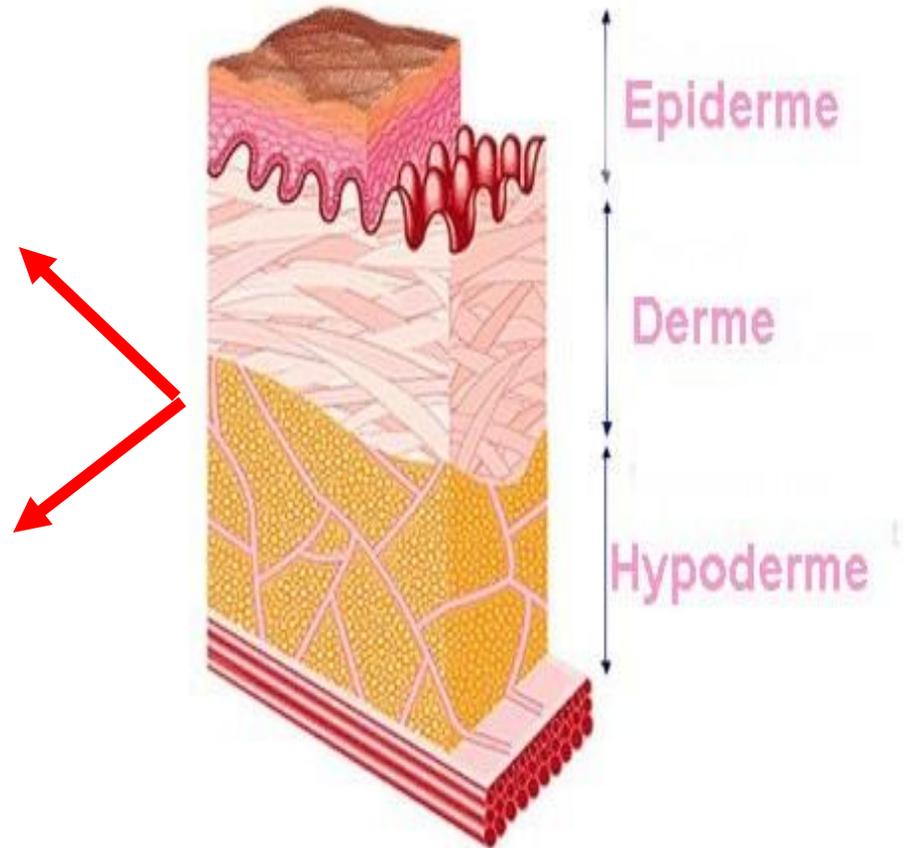
 IV. Simulation de l'interaction de la lumière avec la peau humaine en fonction de la longueur d'onde avec Geant4

V. Conclusion

Simulation de l'interaction de la lumière avec la peau humaine en fonction de la longueur d'onde avec Geant4

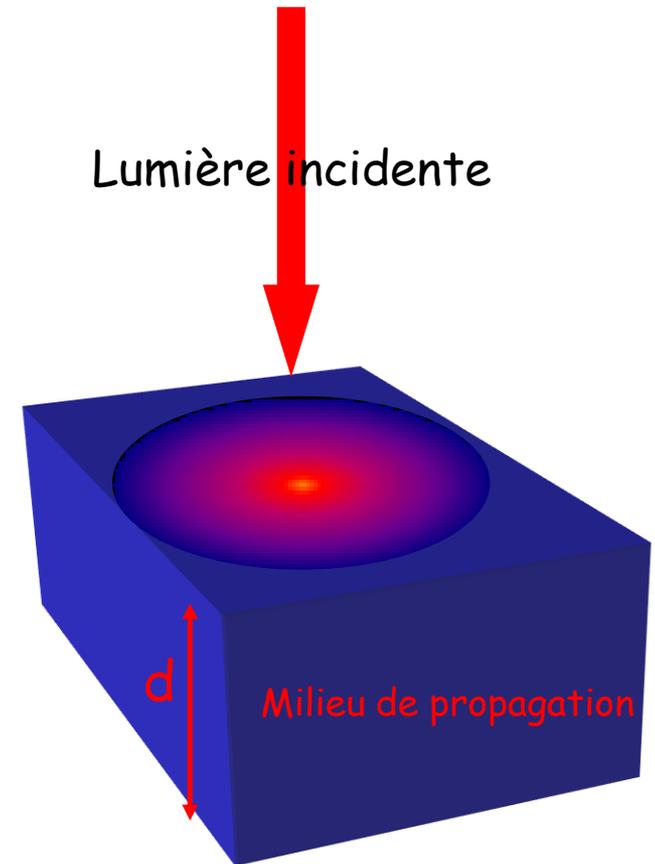
La peau humaine comprend plusieurs couches distinctes. Chaque couche est constituée de divers éléments et d'une structure unique.

Pour avoir un bon aperçu du comportement optique global de la peau, nous étudions les propriétés optiques de ces différentes couches.



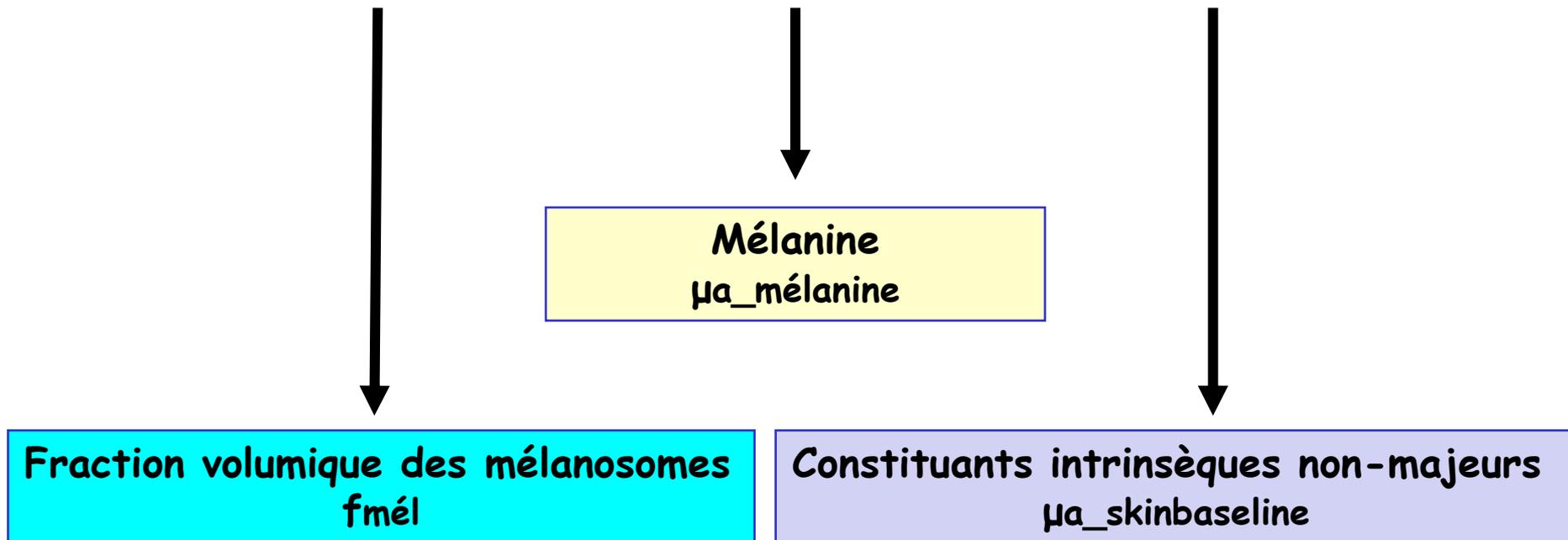
A l'échelle Macroscopique, les tissus humains ont souvent une structure en couche.

- Le nombre de photons et leur longueur d'onde
- L'épaisseur du milieu (d) et le nombre des couches le constituant
- Les propriétés optiques du milieu de propagation:
 - Indice de réfraction $n(\lambda)$
 - Coefficient d'absorption $\mu_a(\lambda)$
 - Coefficient de diffusion $\mu_s(\lambda)$
 - Coefficient d'anisotropie $g(\lambda)$



Etude des propriétés optiques de l'épiderme humain

L'absorption optique de l'épiderme



Etude des propriétés optiques de l'épiderme humain

Mélanine →

Le chromophore majeur déterminant le comportement optique de la couche épidermique non-vascularisée.



En moyenne, le coefficient d'absorption de la mélanine est donnée par:



$$\mu_{a_mélanine}(\lambda) = 6.6 \times 10^{11} \lambda^{-3.33}$$



Par exemple :

À la longueur d'onde de laser à rubis (694 nm)	$\mu_{a_mélanine} = 230 \text{ cm}^{-1}$
À la longueur d'onde du laser à alexandrite (755 nm)	$\mu_{a_mélanine} = 170 \text{ cm}^{-1}$
À la longueur d'onde laser Nd:YAG (1064 nm)	$\mu_{a_mélanine} = 55 \text{ cm}^{-1}$

Etude des propriétés optiques de l'épiderme humain

La question suivante est "Combien de mélanosomes par unité de volume sont dans l'épiderme?".

Fraction volumique des mélanosomes
 $f_{mél}$

Adultes à peau claire peu pigmentée
Adultes à peau modérément pigmentés
Adultes à peau africaine très pigmentée

$f_{mél} = 1.3-6.3\%$
 $f_{mél} = 11-16\%$
 $f_{mél} = 18-45\%$

Etude des propriétés optiques de l'épiderme humain

Coefficient d'absorption de base de l'épiderme

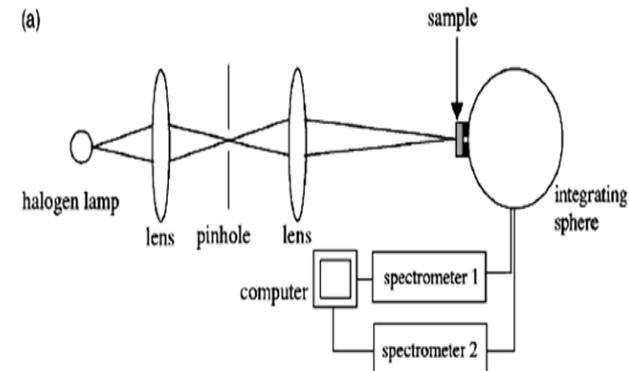
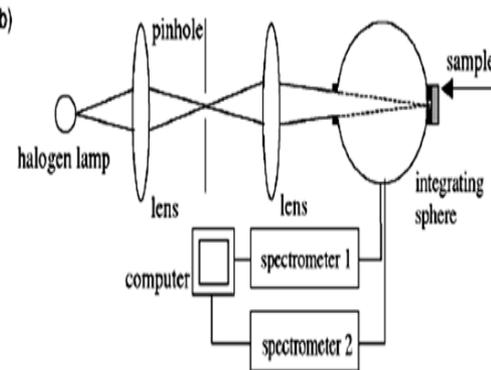


Le coefficient d'absorption de base de l'épiderme, pour ces constituants non majeur, est donnée par:

à l'intégration calibrée avec des mesures précises de fantômes (Ruiping Huang, S. Jacques, données non publiées).

L'épiderme n'est pas seulement composée de leur principale chromophore (mélanine), d'autres constituants intrinsèques de cette couche affectent également la lumière (la kératine, tryptophane...).

$$H_{a_skinbaseline}(\lambda) = 0.244 + 85.3 \exp\left(-\frac{(\lambda-164)}{66.2}\right)$$



Etude des propriétés optiques de l'épiderme humain

Le coefficient d'absorption totale de l'épiderme
($\mu_{a,\text{épiderme}}$)

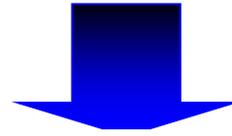


$$\mu_{a,\text{épiderme}}(\lambda) = f_{\text{mél}} \cdot \mu_{a,\text{mélanine}}(\lambda) + (1 - f_{\text{mél}}) \mu_{a,\text{skinbaseline}}(\lambda)$$

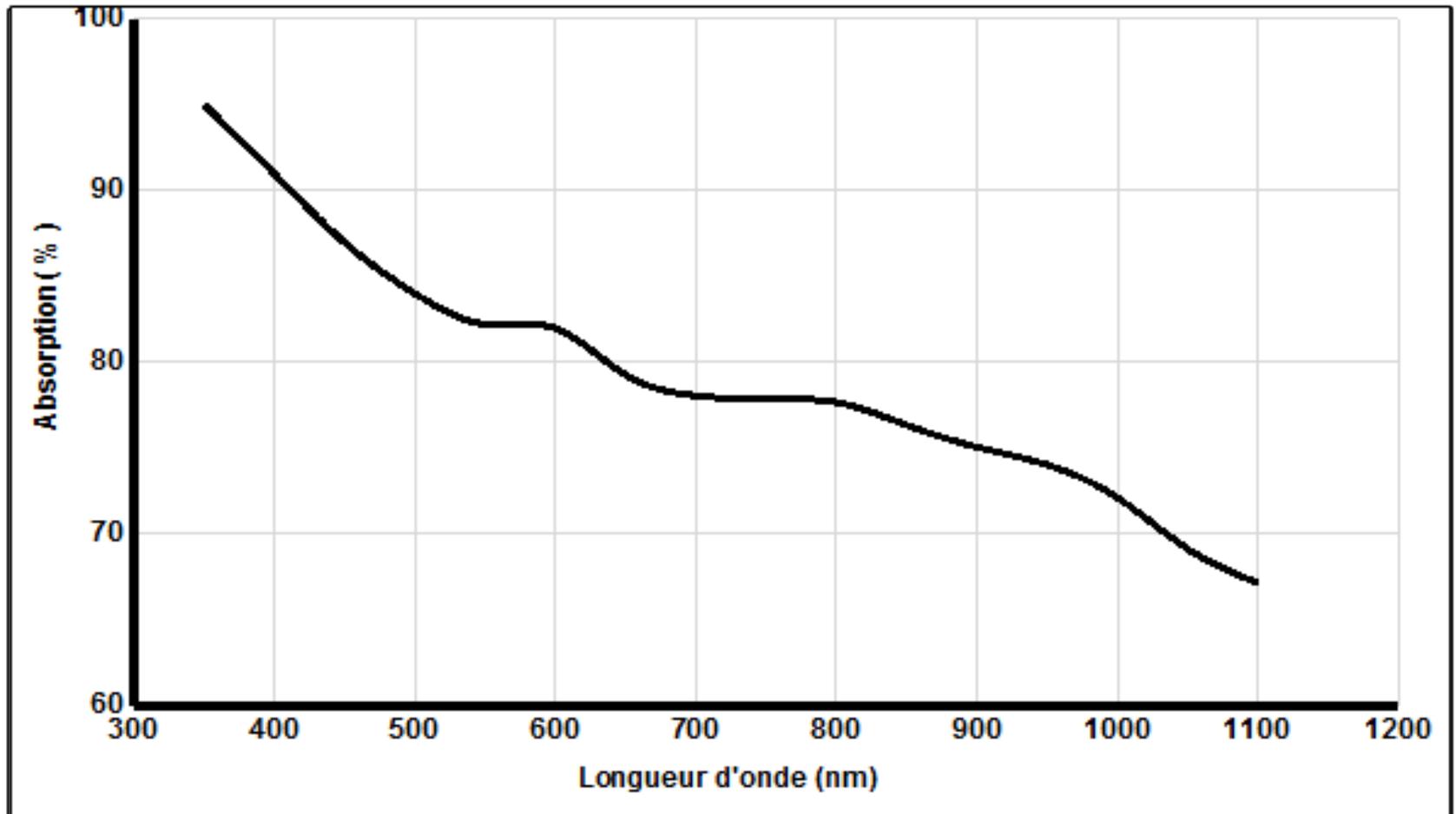
Réflexion, transmission et absorption optique de la mélanine dans la bande spectrale 350-1100 nm

La concentration massique de la mélanine	$C_{\text{mélanine}} = 14.26 \text{ g/l}$
La masse molaire de la mélanine	$M_{\text{mélanine}} = 208 \text{ g/mole}$
Les coefficients d'absorption de la mélanine sont calculées par	$\mu_{a_mélanine}(\lambda) = 6.6 \times 10^{11} \lambda^{-3.33}$
Les indices de réfraction sont calculées par	$n_{\text{mél}} = 1.684 - 1.8723 \times 10^{-4} \lambda^{-2} + 1.0964 \times 10^{-10} \lambda^{-4} - 8.6484 \times 10^{-14} \lambda^{-6}$
Épaisseur du milieu de propagation	$d = 0.1 \text{ mm}$

Résultats obtenus par la simulation Monte Carlo « Geant4 »



Le spectre d'absorption de la mélanine en fonction de la longueur d'onde

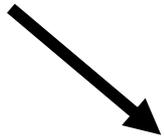
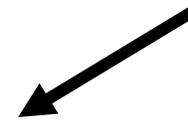


Réflexion, transmission et absorption optique de l'épiderme dans la bande spectrale 350-1100 nm

$$\mu_{a_épiderme}(\lambda) = f_{mél} \cdot \mu_{a_mélanine}(\lambda) + (1 - f_{mél}) \mu_{a_skinbaseline}(\lambda)$$

- $\mu_{a_mélanine}(\lambda) = 6.6 \times 10^{11} \lambda^{-3.33}$

- $\mu_{a_skinbaseline}(\lambda) = 0.244 + 85.3 \exp\left(-\frac{(\lambda-164)}{66.2}\right)$

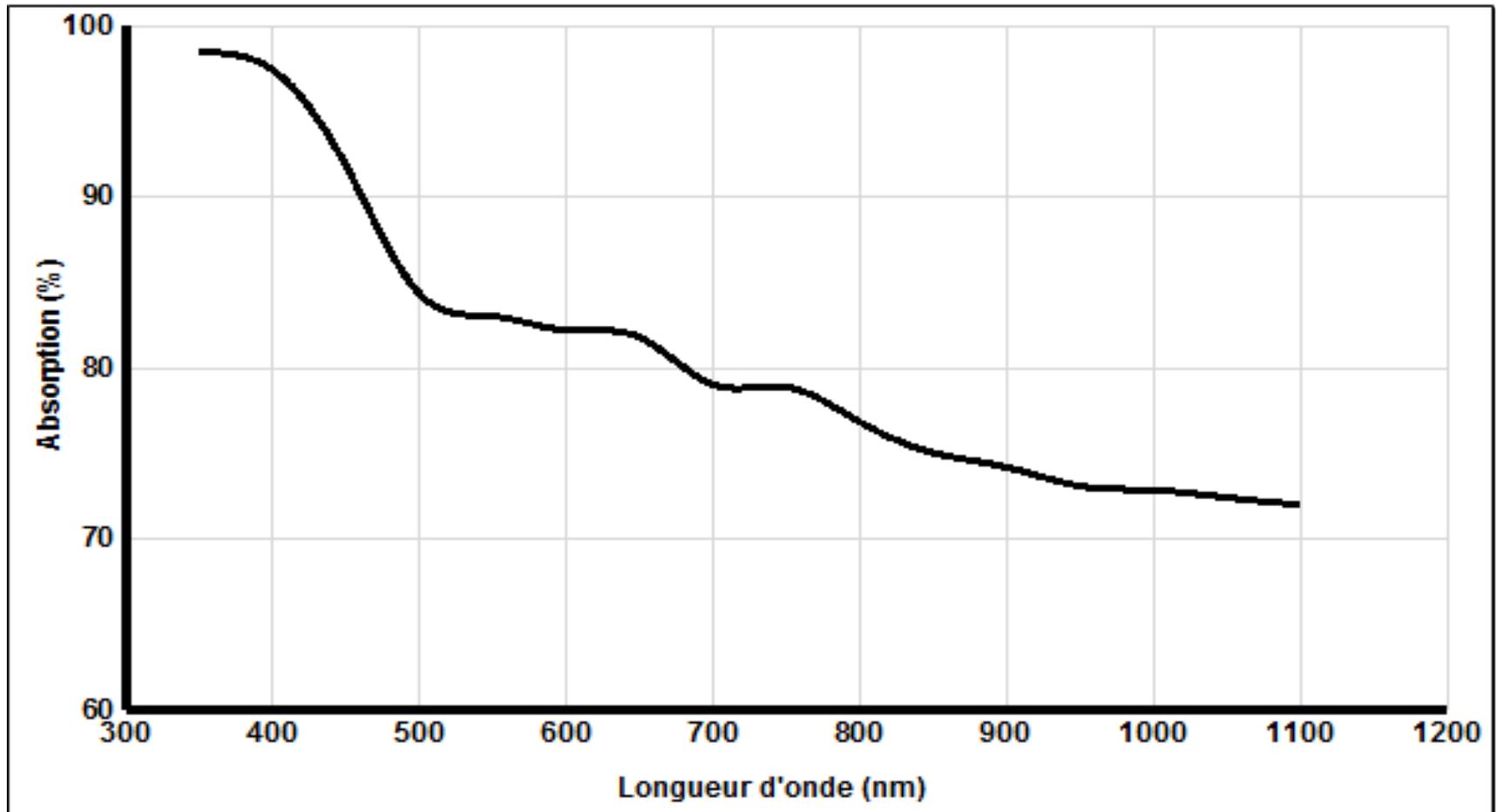


Longueur d'onde (nm)	Indice de réfraction de l'épiderme $n(\lambda)$	Fraction volumique de mélanosomes	L'épaisseur de la couche d'épiderme
325	1.489	f _{mel} = 20 %	d = 0.1 mm
442	1.449		
532	1.448		
633	1.433		
850	1.417		
1064	1.432		
1310	1.425		

Résultats obtenus par la simulation Monte Carlo « Geant4 »

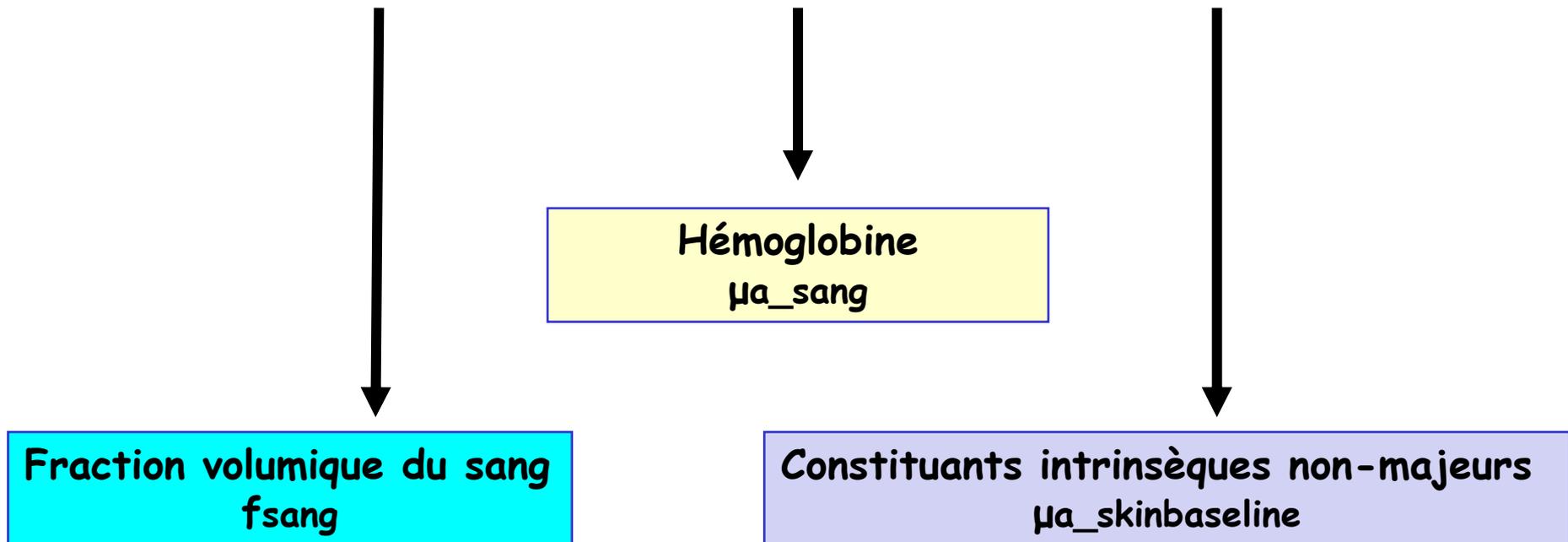


Le spectre d'absorption de l'épiderme en fonction de la longueur d'onde



Etude des propriétés optiques du derme humain

L'absorption optique du derme



Etude des propriétés optiques du derme humain

Hémoglobine



Un chromophore de couleur rouge trouvée dans le réseau microvasculaire du derme, il transporte l'oxygène à travers les vaisseaux et les capillaires.

Oxyhémoglobine



$C_{\text{hemg}} = 150 \text{ g/l}$

Désoxyhémoglobine



$SO_2 = 60 \%$



- $E_{\text{oxy}}/E_{\text{désoxy}}$ [$\text{cm}^{-1}(\text{mole/l})$]: coefficients d'extinction molaire de l'oxyhémoglobine et désoxyhémoglobine.
- C_{hemg} (g/l): la concentration moyenne d'hémoglobine dans le sang
- SO_2 (%): la saturation en oxygène

Etude des propriétés optiques du derme humain

La question suivante est "Combien de sang il y a dans le derme?"

Fraction volumique du sang
 f_{sang}

$2\% < f_{\text{sang}} < 5\%$

Une valeur typique f_{sang} pour le derme est de 0,2%

Etude des propriétés optiques du derme humain

Coefficient d'absorption
de base du derme



Le derme n'est pas seulement composée de leur principale chromophore (hémoglobine), d'autres constituants intrinsèques de cette couche affectent également la lumière (le collagène, carotène...).

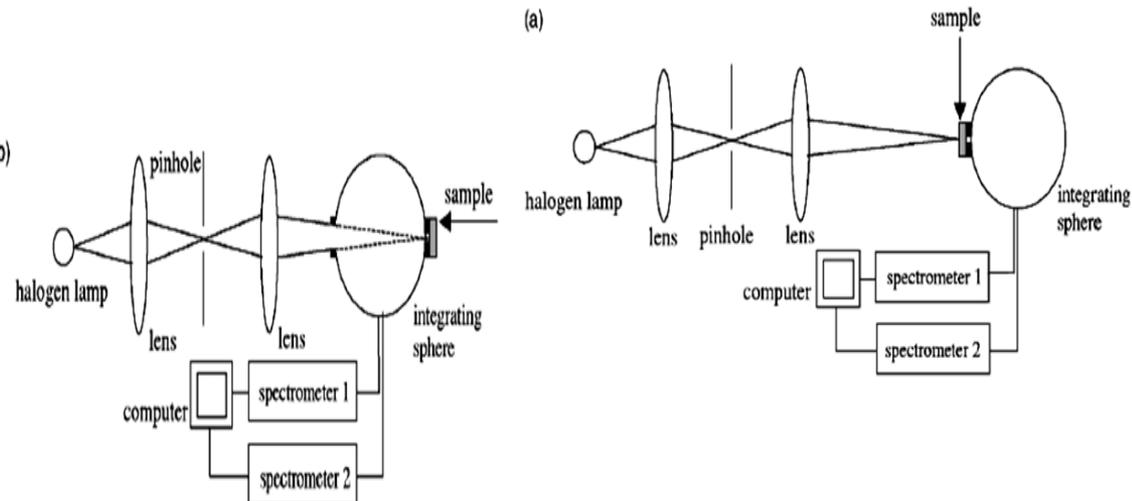
Le coefficient d'absorption de base du derme, pour ces constituants non majeur, est donnée par:



$$\mu_{a_skinbaseline}(\lambda) = 0.244 + 85.3 \exp\left(-\frac{(\lambda-164)}{66.2}\right)$$

sanguines, en utilisant une sphère d'intégration calibrée avec des mesures précises de fantômes (Ruiping Huang, S. Jacques, données non publiées).

(b)



Etude des propriétés optiques du derme humain

Le coefficient d'absorption totale du derme
($\mu_{a,derme}$)

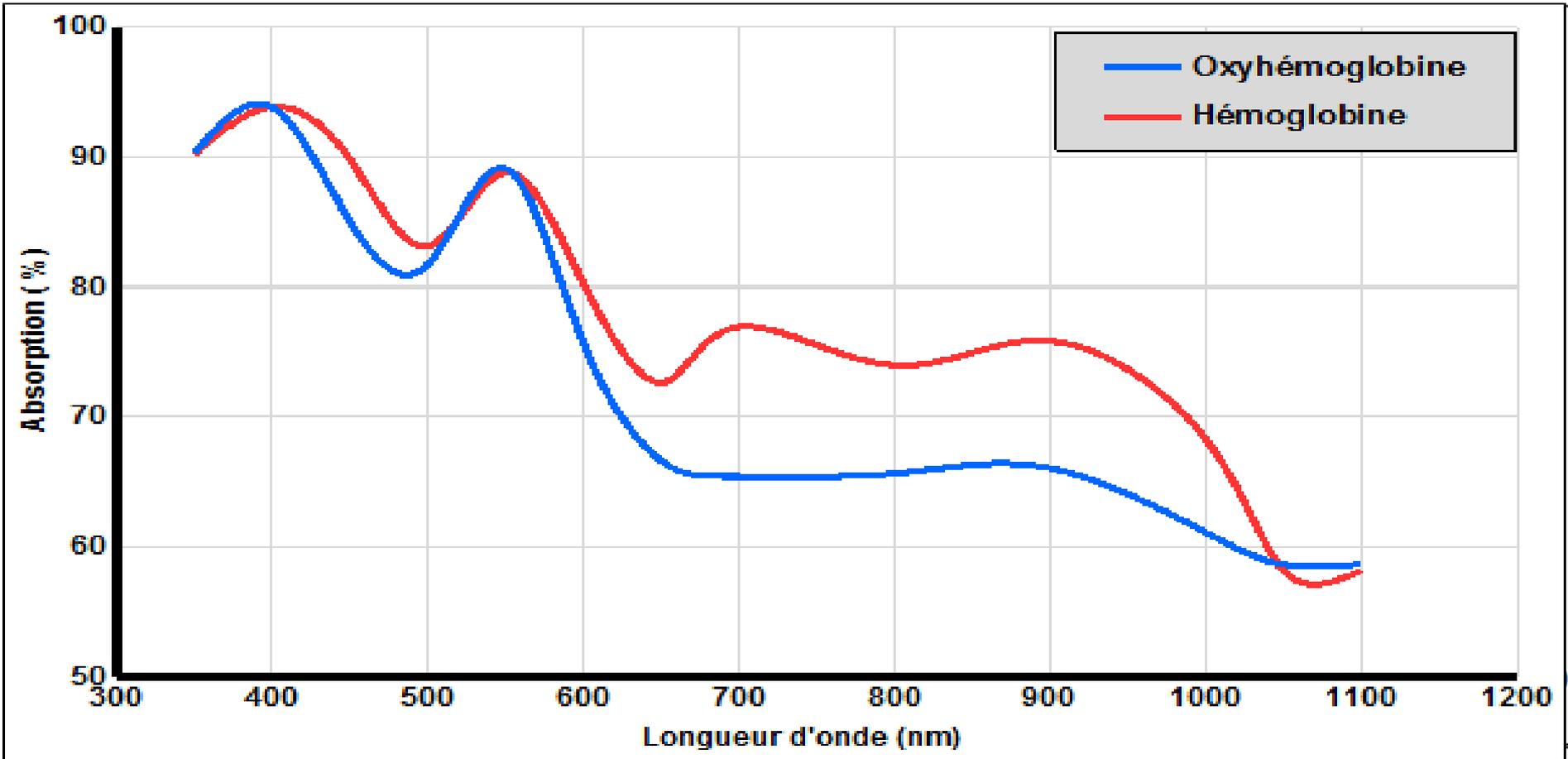


$$\mu_{a,derme}(\lambda) = f_{sang} \cdot \mu_{a,sang}(\lambda) + (1 - f_{sang}) \mu_{a,skinbaseline}(\lambda)$$

Réflexion, transmission et absorption optique du sang oxygénée et désoxygénée « oxyhémoglobine & désoxyhémoglobine » dans la bande spectrale 350-1100 nm

La concentration moyenne d'hémoglobine dans le sang	$C_{\text{hemg}} = 150 \text{ g/l}$
La saturation en oxygène	$SO_2 = 60 \%$
Les coefficients d'absorption de l'oxyhémoglobine sont calculées par	$\mu_{a_oxy}(\lambda) = \frac{E_{oxy}(\lambda) \cdot C_{\text{hemg}} \cdot SO_2}{64,500}$
Les coefficients d'absorption de désoxyhémoglobine sont calculées par	$\mu_{a_désoxy}(\lambda) = \frac{E_{désoxy}(\lambda) \cdot C_{\text{hemg}} \cdot (1 - SO_2)}{64,500}$
Épaisseur du milieu de propagation	$d = 2 \text{ mm}$

Résultats obtenus par la simulation Monte Carlo « Geant4 »



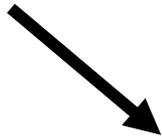
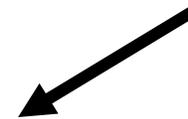
Le spectre d'absorption de l'oxyhémoglobine et désoxyhémoglobine
en fonction de la longueur d'onde

Réflexion, transmission et absorption optique du derme dans la bande spectrale 350-1100 nm

$$\mu_{a_derme}(\lambda) = f_{sang} \cdot \mu_{a_sang}(\lambda) + (1 - f_{sang}) \mu_{a_skinbaseline}(\lambda)$$

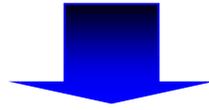
- $\mu_{a_sang}(\lambda) = \mu_{a_oxy}(\lambda) + \mu_{a_désoxy}(\lambda)$

- $\mu_{a_skinbaseline}(\lambda) = 0.244 + 85.3 \exp\left(\frac{-(\lambda-164)}{66.2}\right)$

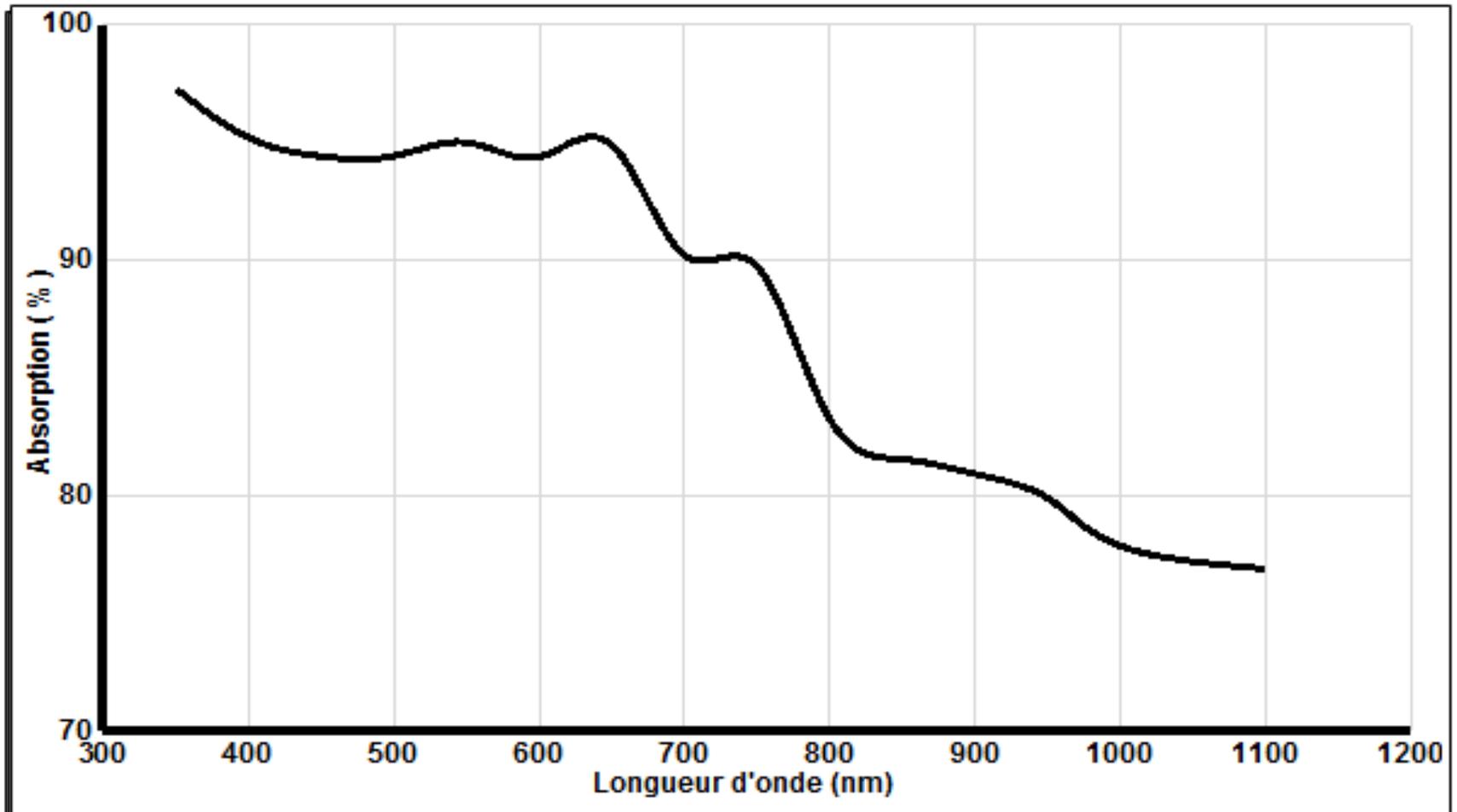


Longueur d'onde (nm)	Indice de réfraction du derme	Fraction volumique de sang	L'épaisseur de la couche du derme
325	1.401	$f_{sang} = 0,2\%$	$d = 2 \text{ mm}$
442	1.395		
532	1.378		
633	1.396		
850	1.384		
1064	1.375		
1310	1.358		

Résultats obtenus par la simulation Monte Carlo « Geant4 »



Le spectre d'absorption du derme en fonction de la longueur d'onde



Réflexion, transmission et absorption optique de la peau humaine dans la bande spectrale 350-1100 nm

Modélisation par une succession
de 2 couches

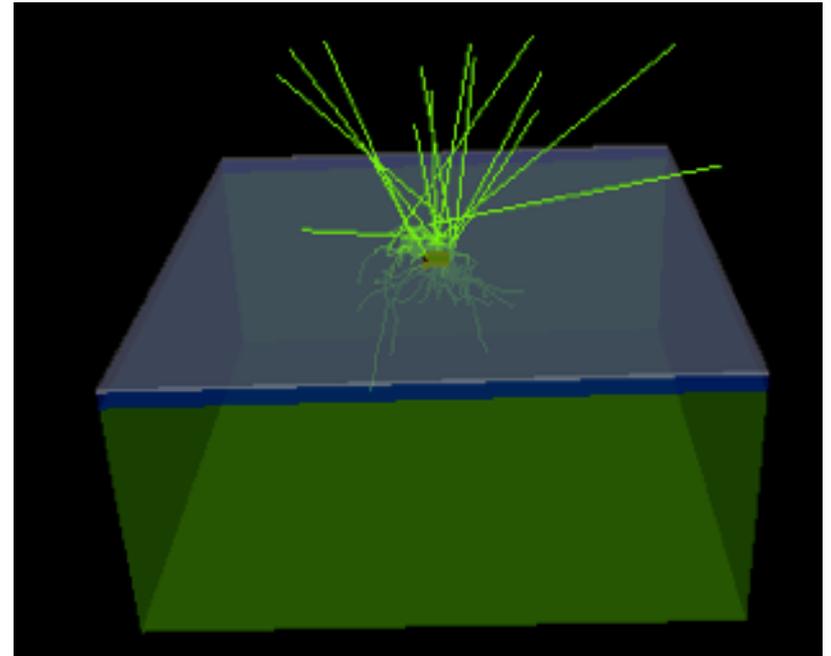
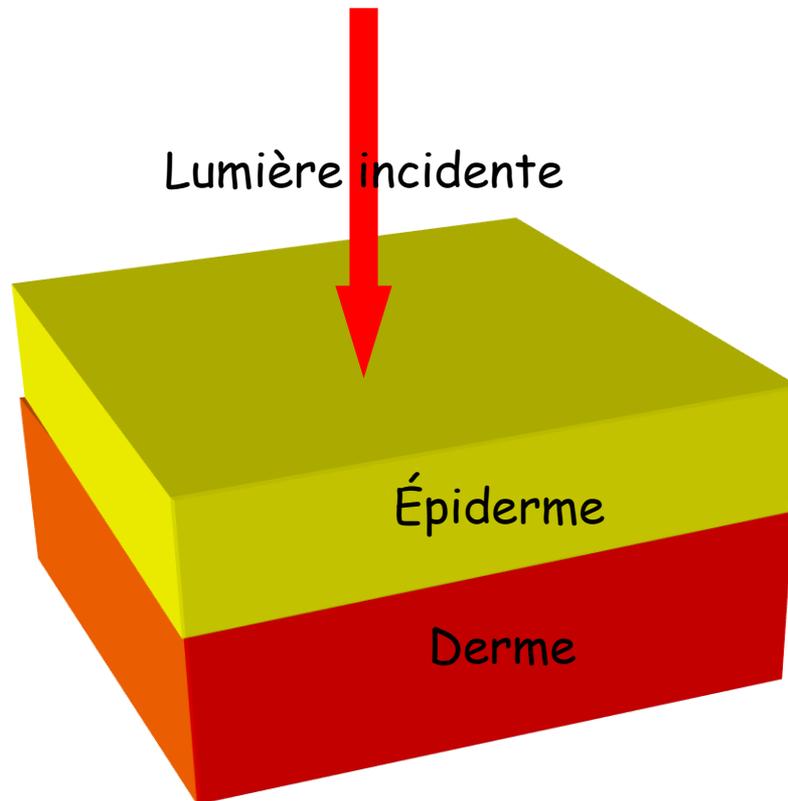
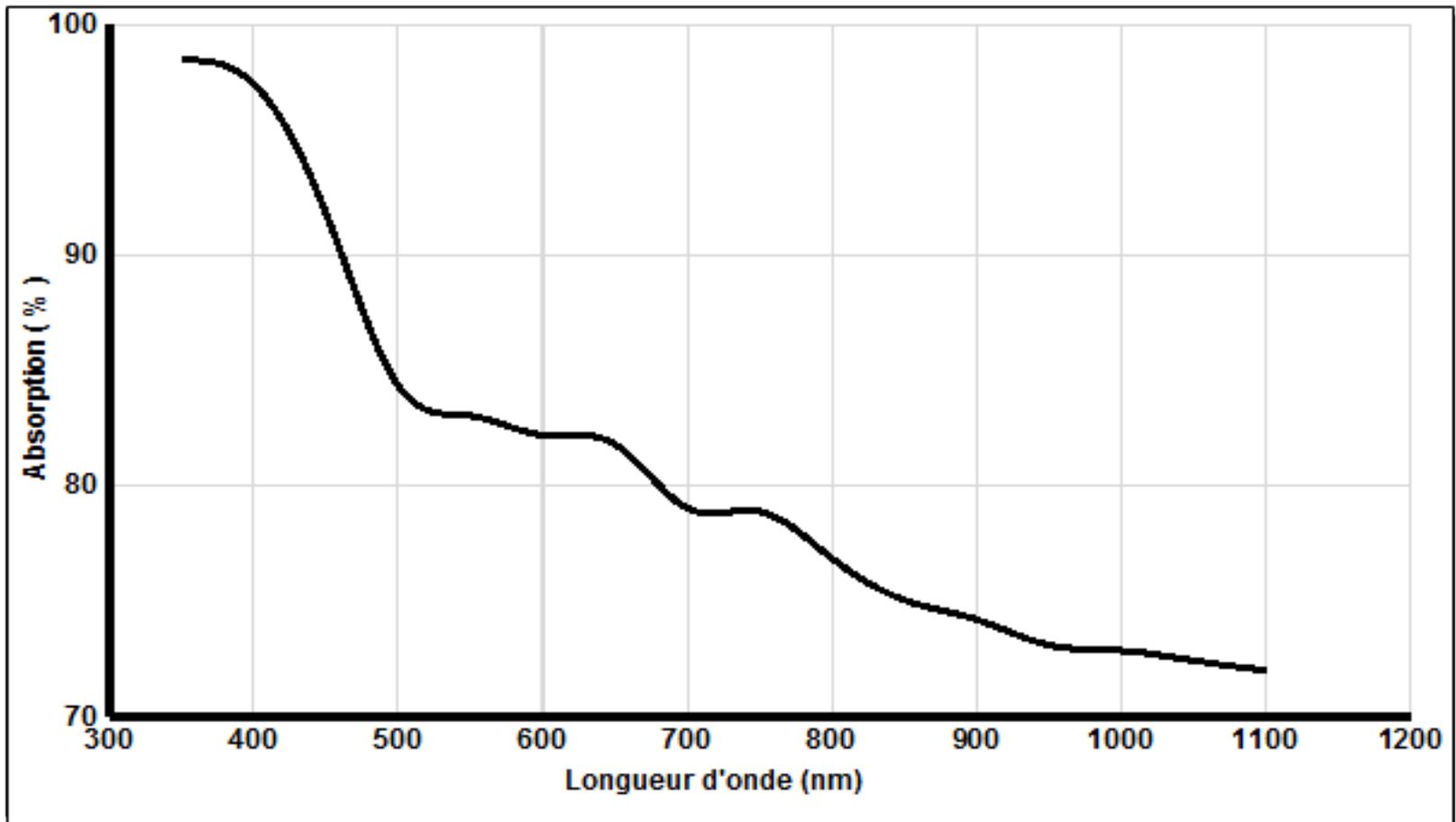


Figure: Une vue d'ensemble de la géométrie du modèle de la peau lors la simulation ou la couche blanche est l'air, la couche bleue est l'épiderme, et la couche verte est le derme avec les traces de photons en vert clair soit se terminant par l'absorption dans la peau ou être réfléchi(e) dehors.

Résultats obtenus par la simulation Monte Carlo « Geant4 »



Le spectre d'absorption de la peau en fonction de la longueur d'onde



Plan de travail

I. Lumière et matière biologique

II. Applications biomédicales des interactions lumière-tissu

III. Etude de l'interaction de la lumière avec la peau humaine en fonction de la longueur d'onde

IV. Simulation de l'interaction de la lumière avec la peau humaine en fonction de la longueur d'onde avec Geant4

V. Conclusion

Conclusion

Dans ce mémoire, nous avons étudié l'interaction de la lumière avec la peau humaine en fonction de la longueur d'onde.

Dans cette étude nous avons pu trouver les points suivants :

- La peau humaine reflète très peu de lumière en particulier à des longueurs d'onde plus courtes du visible.
- La transmission de la lumière à travers la peau croit avec l'augmentation de la longueur d'onde pour atteindre le maximum dans le proche infrarouge à 1100 nm.
- La peau absorbe fortement dans le visible, présentant des pics d'absorption entre 600-800nm due à l'hémoglobine dermique. Alors que le maximum d'absorption de la peau est à 350 nm, provoquée par la mélanine épidermique, qui constituent une barrière optique principalement par absorption du rayonnement ultraviolet .



Merci pour votre aimable attention

