



UNIVERSITÉ  
DE LORRAINE

# Reconstruction 3D de tissus biologiques par la lumière Application à la détection de tumeurs cancéreuses

S. Contassot-Vivier, F. Asllanaj, A. Addoum

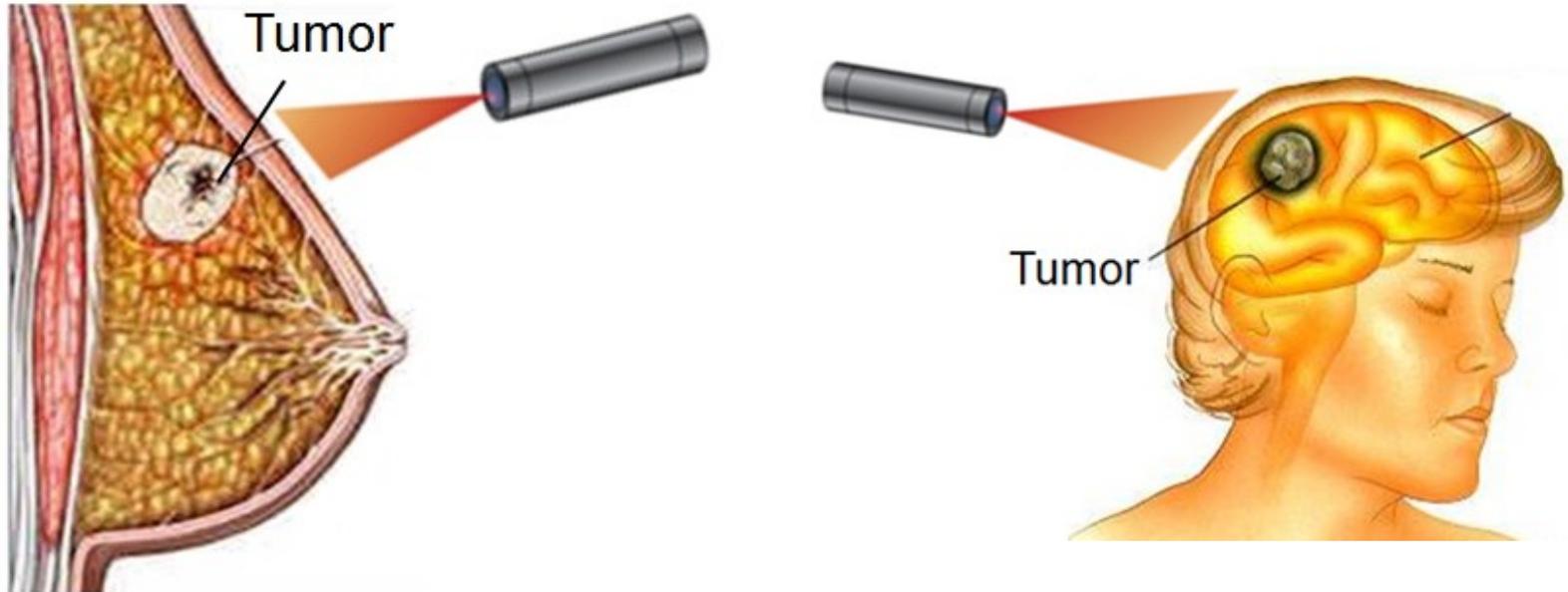
# Motivation : diagnostic des cancers

- Le cancer est la 2<sup>nd</sup>e cause de mortalité dans le monde
- Plan cancer 2014-19 :
  - Recherches sur prévention, traitement, diagnostics
- La plupart des diagnostics sont chers et désagréables
- Trois intérêts de nos recherches :
  - Santé publique : détection précoce avec méthode non invasive
  - Économique : faible coût (laser)
  - Recherche : comprendre, modéliser et simuler les interactions de la lumière avec les tissus biologiques



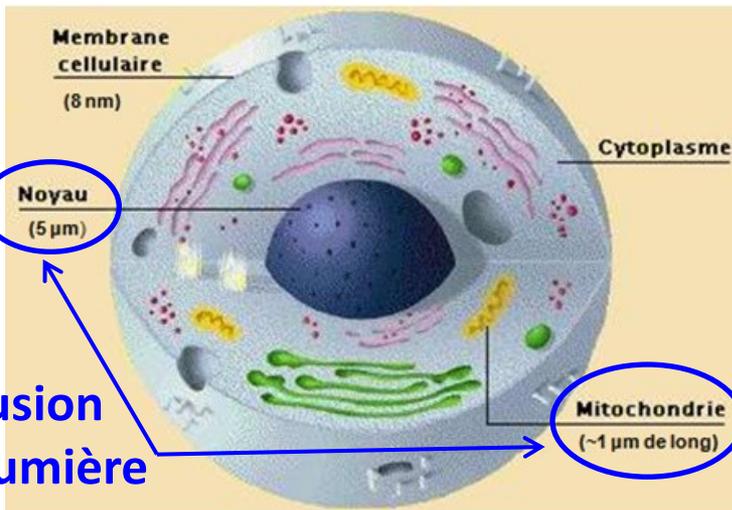
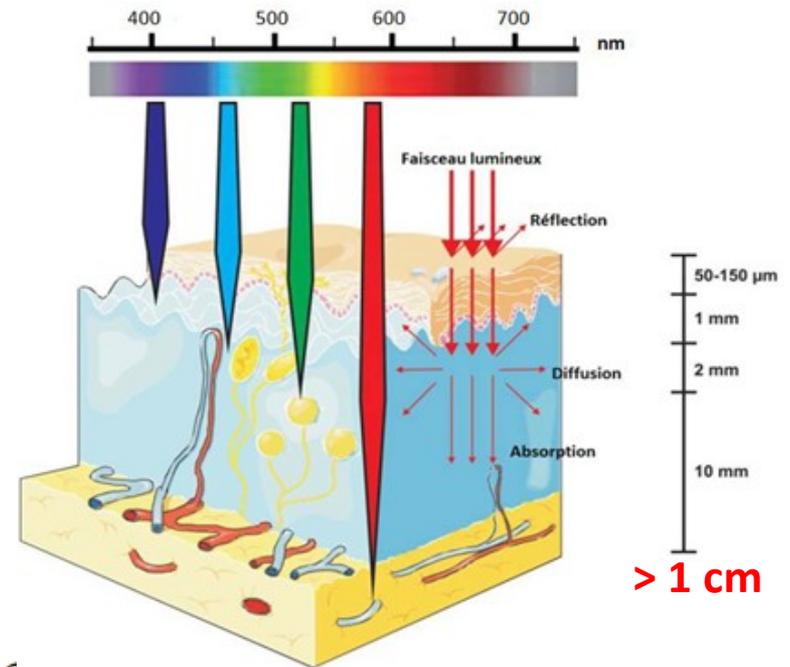
# Diagnostic médical

---

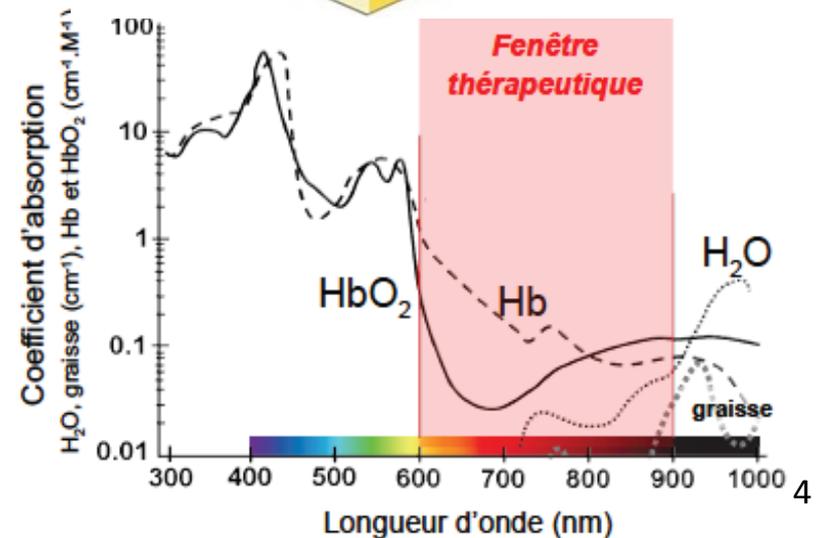


- Un problème important en **tomographie optique** est de disposer d'un **solveur direct** (précis et rapide) combiné à une **méthode inverse** afin de reconstruire les propriétés optiques aux échelles mésoscopiques ( $\sim$ cm)
- Cela permettrait d'avoir un outil de diagnostic **non invasif**

# Interaction de la lumière dans les tissus

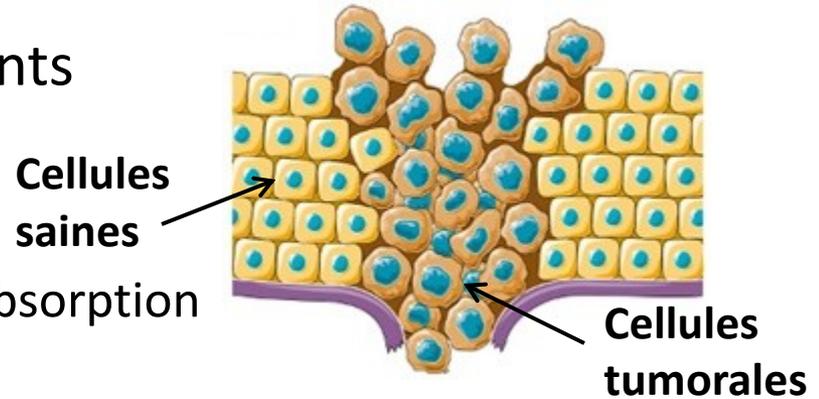


membranes (lipides)  
et fibres collagènes



# Comment détecter une tumeur ?

- Le cancer implique des changements physiologiques qui affectent les **propriétés optiques** des tissus :
  - Tumeurs sont très vascularisées → absorption
  - Noyaux sont plus gros → diffusion
- Change aussi le facteur d'anisotropie :
  - Influence la plus importante sur les flux



	Foie sain	Foie malade
Coefficient d'absorption ( $\text{mm}^{-1}$ )	0,1	0,06
Coefficient de diffusion ( $\text{mm}^{-1}$ )	20,4	10,8
Facteur d'anisotropie	0,955	0,902

Germer et al. (1998) Laser Sureg Med

# Équation de Transfert Radiatif (Boltzmann)

- Optique géométrique : lumière = rayons

$$\underbrace{\frac{n_\lambda(\mathbf{r})}{c} \frac{\partial \psi_\lambda(\mathbf{r}, \boldsymbol{\Omega}, t)}{\partial t}}_{\text{Variations temporelles}} + \underbrace{\boldsymbol{\Omega} \cdot \nabla \psi_\lambda(\mathbf{r}, \boldsymbol{\Omega}, t)}_{\text{Variations spatiales}} = \underbrace{-\mu_{t\lambda}(\mathbf{r}) \psi_\lambda(\mathbf{r}, \boldsymbol{\Omega}, t)}_{\text{Perte par extinction (a + d)}}$$

Variations temporelles    Variations spatiales    Perte par extinction (a + d)

$$+ \underbrace{\mu_{s\lambda}(\mathbf{r}) \int_{\Omega'=4\pi} p_\lambda(\boldsymbol{\Omega}', \boldsymbol{\Omega}) \psi_\lambda(\mathbf{r}, \boldsymbol{\Omega}', t) d\Omega'}_{\text{Renforcement par diffusion selon } \Omega} + \underbrace{S_\lambda(\mathbf{r}, \boldsymbol{\Omega}, t)}_{\text{Terme source}}$$

Renforcement par diffusion selon  $\Omega$

Terme source

- Indice de réfraction
- Coefficients d'absorption et de diffusion
- Coefficient d'extinction    ( $= \mu_{a\lambda} + \mu_{s\lambda}$ )
- Facteur d'anisotropie de la fonction de phase

$n_\lambda$

$\mu_{a\lambda}, \mu_{s\lambda}$

$\mu_{t\lambda}$

$g_\lambda$

intervient dans  $p_\lambda(\boldsymbol{\Omega}', \boldsymbol{\Omega})$

# Méthodes de résolution

---

- Plusieurs méthodes pour résoudre l'ETR :
  - Méthodes statistiques : Monte-Carlo (MC)
    - Précis et géométries quelconques
    - Long mais versions parallèles MPI + GPU
    - Problème inverse ? Difficile...
  - Méthodes déterministes : résolution d'EDP
    - Solutions semi-analytiques : précis, très rapides mais uniquement sur des cas simples, problème inverse ?
    - **Solutions numériques** :  
Algorithme itératif, discrétisation spatiale et angulaire,  
Géométries quelconques, bonne précision,  
Méthode efficace (adjointe) pour le problème inverse

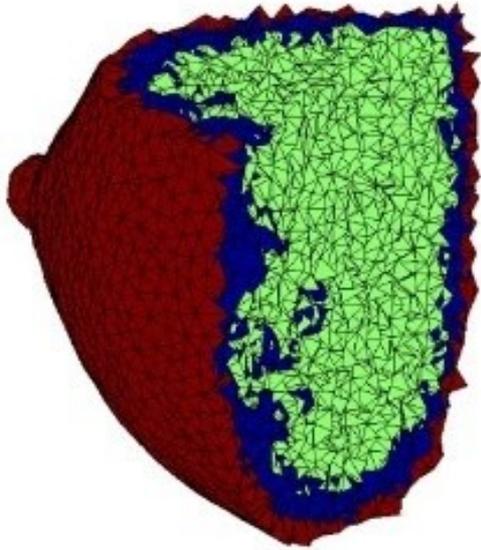
# État de l'art

---

- Assez peu de travaux sur les méthodes numériques déterministes :
  - Quelques publications des groupes de Hielscher (2003, 2008, 2009 et 2010) et de Arridge (2011)
- Pas de comparaison avec des solutions analytiques et différences importantes avec solutions M-C
- Nous développons un code déterministe très précis, et accélééré par le recours au parallélisme intensif
- Basé sur une méthode originale : MFVM
  - Modified Finite Volume Method

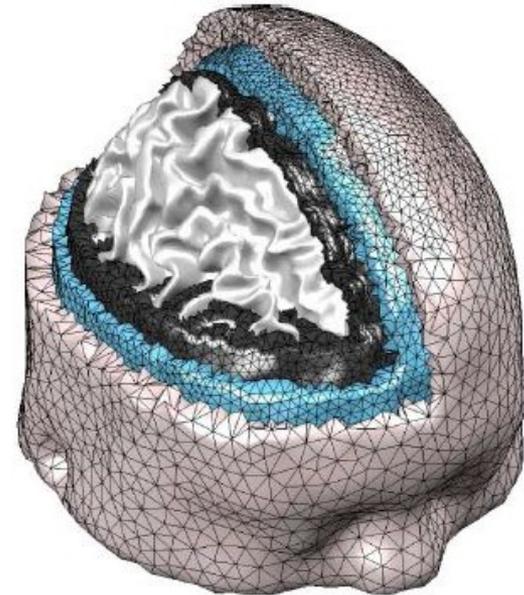
# Maillages non structurés

---



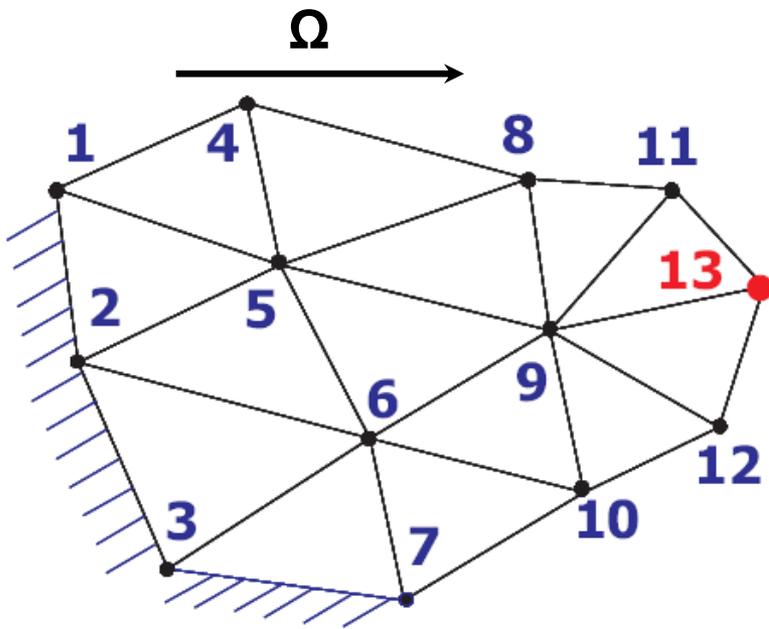
Vue en coupe d'un maillage  
tétraédrique modélisant un sein

Maillage tétraédrique utilisé  
en imagerie IRM

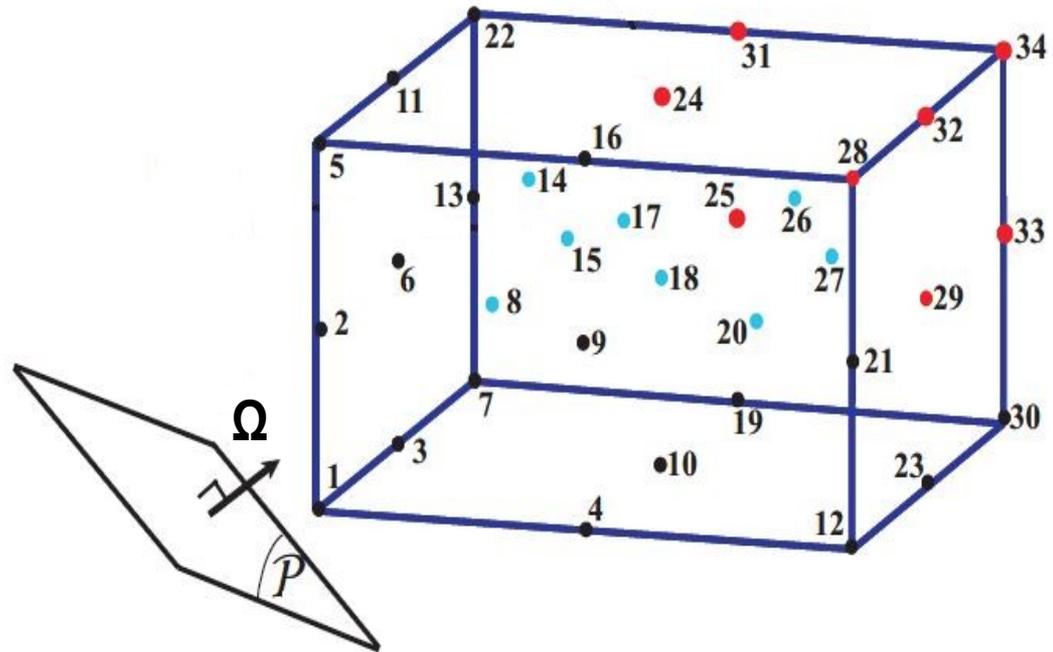


# Méthodologie de calcul

- L'ETR doit être résolue en chaque point du maillage selon un ordre imposé par chaque direction discrète de propagation de la lumière (discrétisation angulaire)



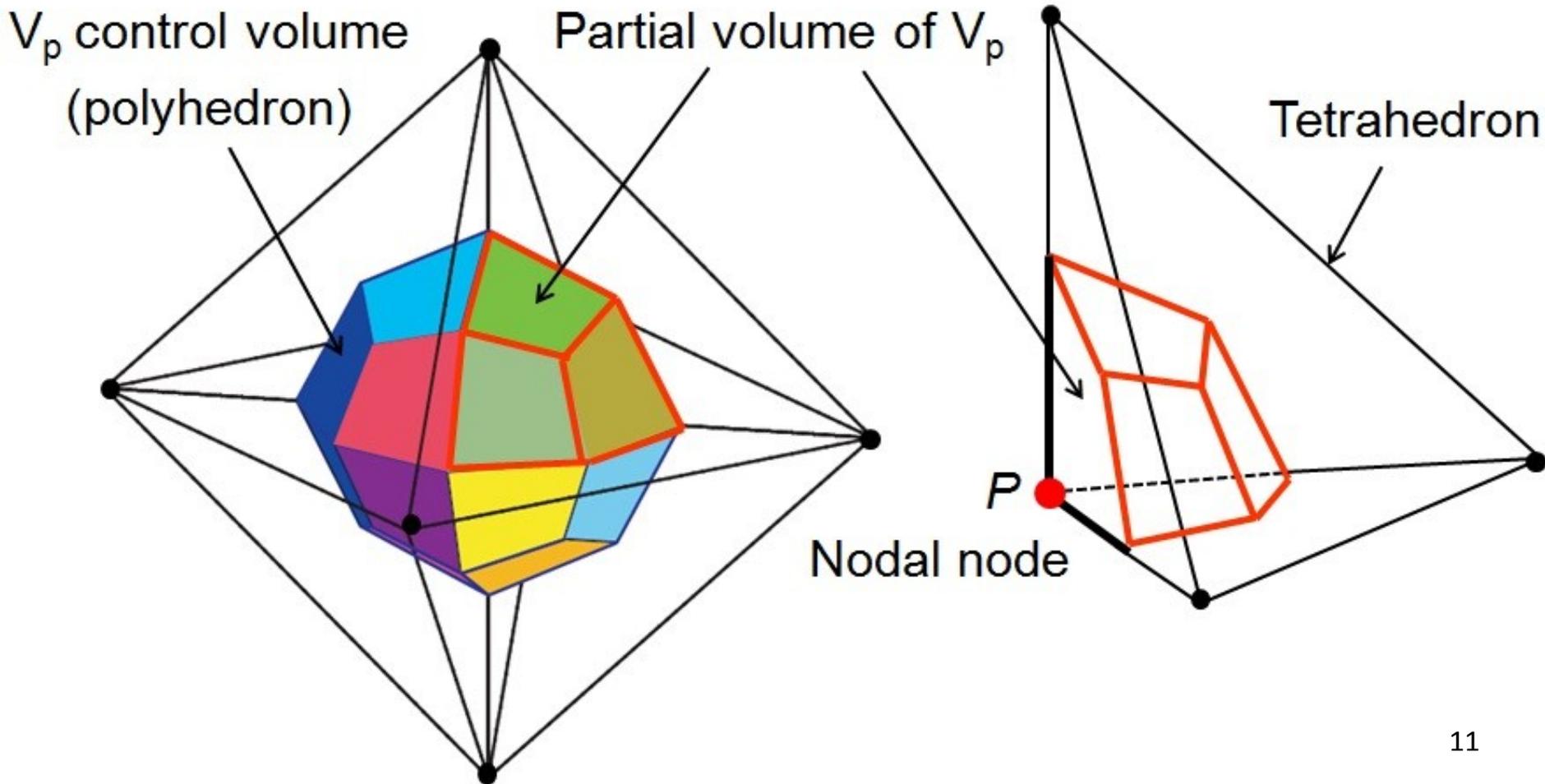
2D



3D

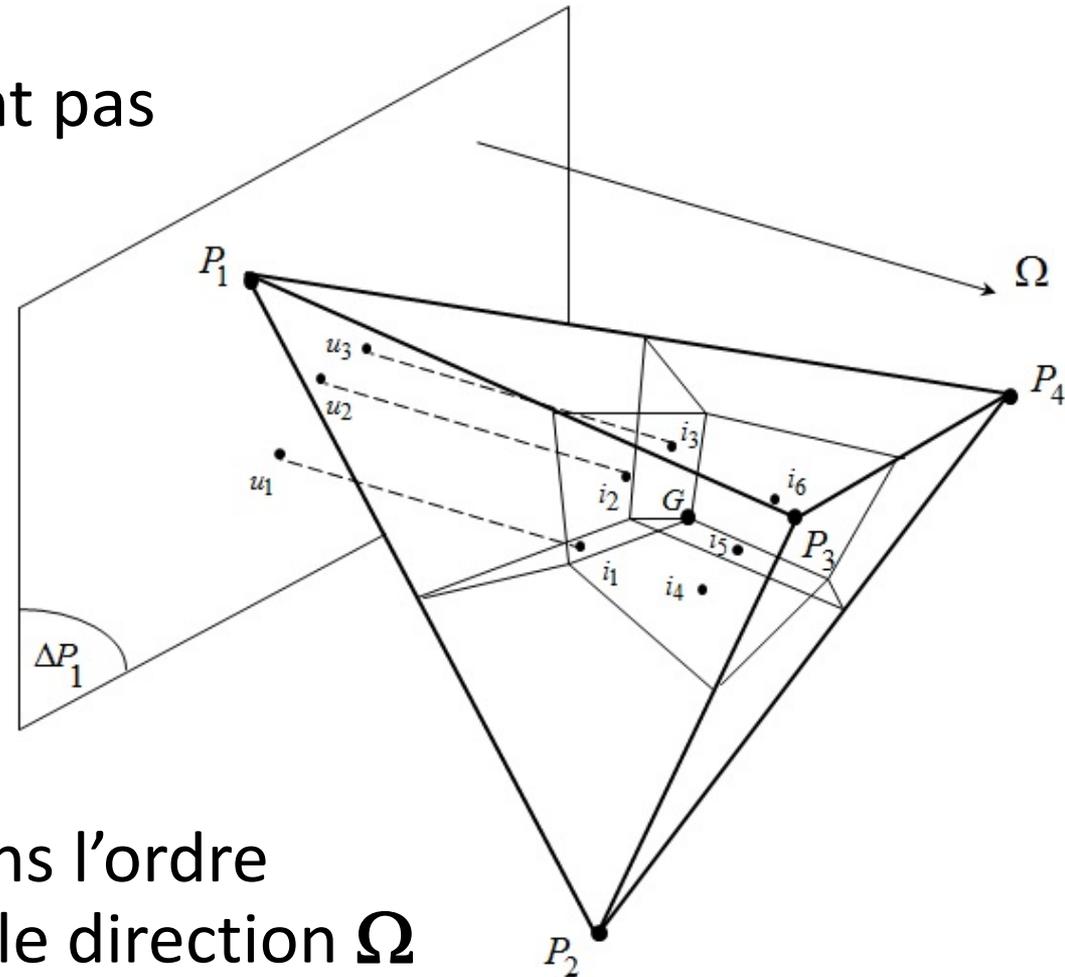
# Volumes de contrôle 3D avec formulation cell-vertex

- La résolution est basée sur des calculs de flux à travers des volumes de contrôle



# Projections 3D et interpolations

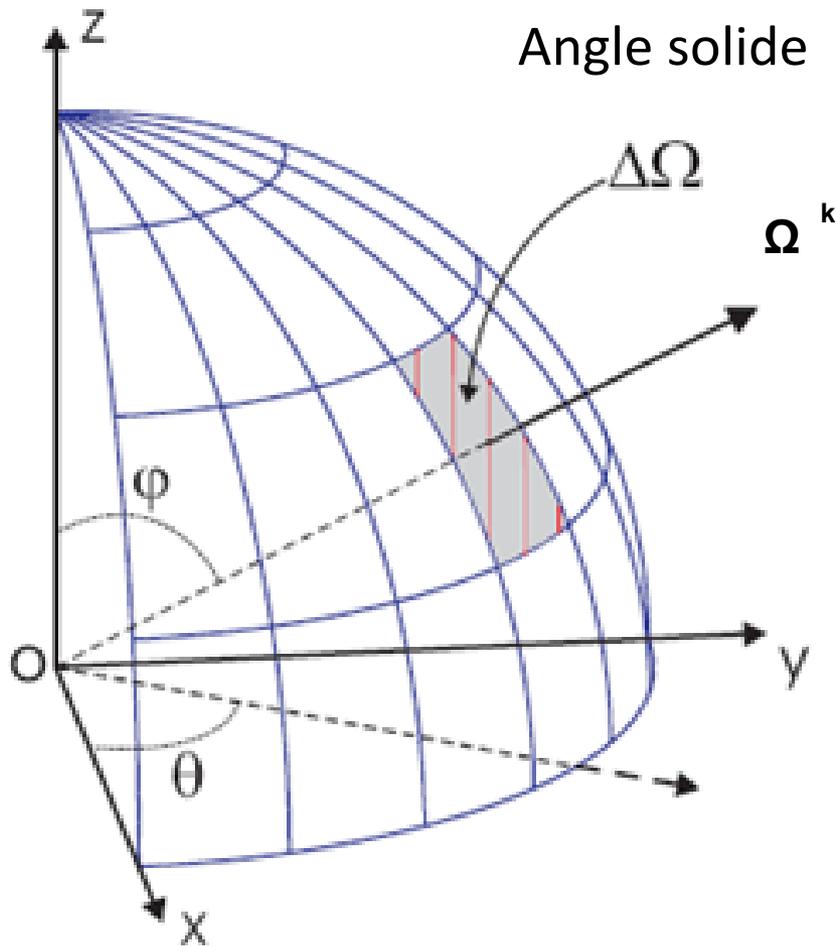
- Les valeurs aux points d'interpolation ne sont pas toutes disponibles pour calculer le point courant
- Une projection de ces points sur le plan courant de calcul selon la direction est nécessaire
- Le plan « avance » dans l'ordre des points en suivant la direction  $\Omega$



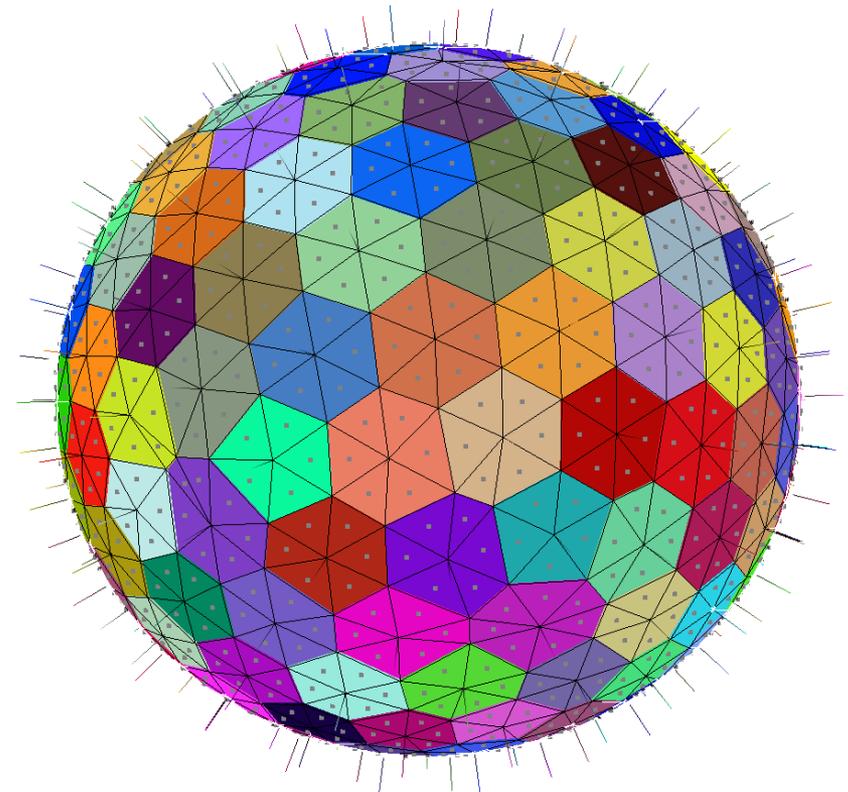
➔ **Calcul intrinsèquement séquentiel !**

# Discrétisation angulaire

Versions classiques  
présentent des biais



Version personnelle  
plus équilibrée



# Problème inverse

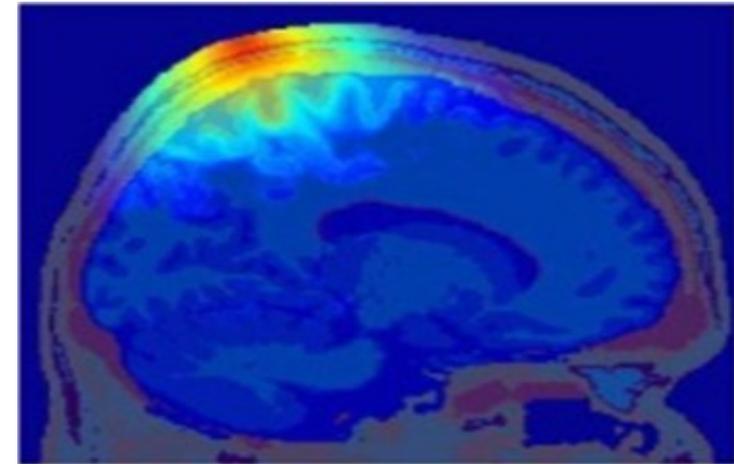
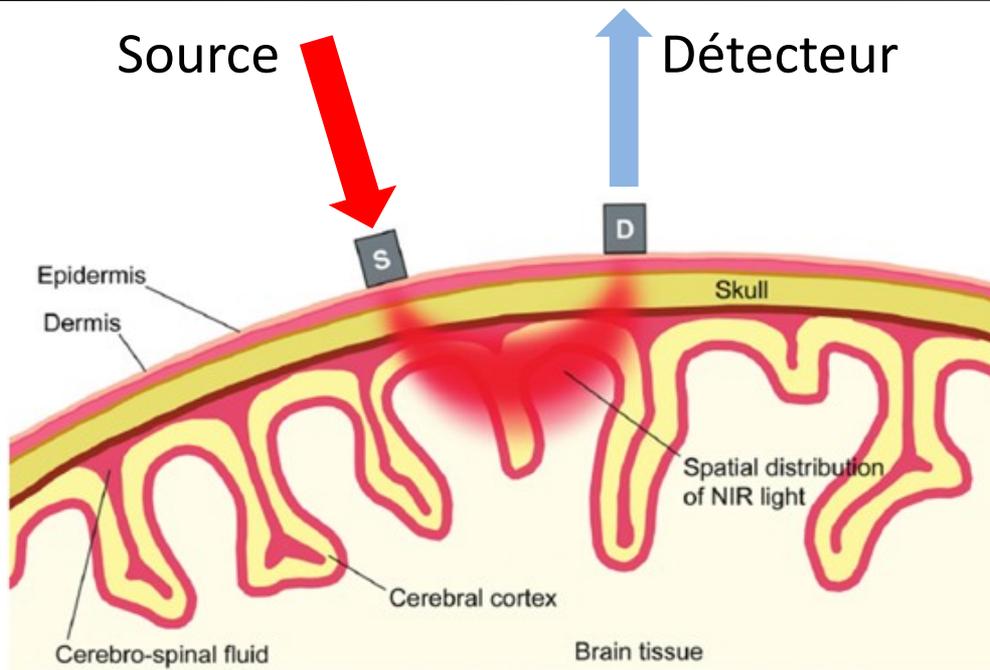


Image optique

- Retrouver les propriétés optiques du milieu :
    - À partir du retour en surface
    - D'une lumière envoyée dans le milieu
- ➔ Solution itérative avec ETR et son état adjoint (MVFM)

# Reconstruction fréquentielle

---

- Utiliser plusieurs fréquences d'émission du laser
  - Améliore la précision de la reconstruction
- Coefficients souvent estimés (valeur constante) ou reconstruits (spatialement) :
  - Coefficient d'absorption
  - Version simplifiée du coefficient de diffusion
- Reconstructions avec notre méthode :
  - Coefficient d'absorption
  - Coefficient de diffusion
  - Facteur d'anisotropie (plus difficile à reconstruire)

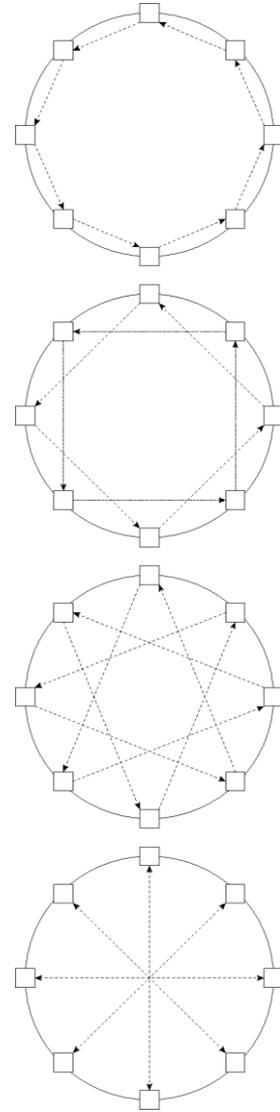
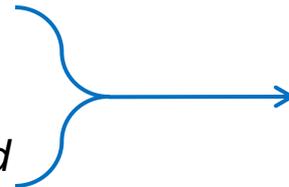
# Parallélisme multi-cœurs

- Algorithme multi-threads (OpenMP) :
  - Phénomène cumulatif sur les **directions angulaires**
    - Calculs séparés de l'ETR selon chaque direction
  - Deux parties :
    - Mise à jour des nœuds à la frontière
    - Mise à jour des nœuds internes
  - Inclues dans la boucle des itérations de l'ETR :
    - Évite des créations/destructions de threads
  - Partie commune à la fin de chaque itération :
    - Mise à jour des luminances et des flux
    - Critère de convergence
    - Sauvegardes éventuelles

```
parallel section
{
  for(iterations){
    parallel for(directions){
      // update frontiers
    }
    parallel for(directions){
      // update mesh
    }
    sequential section
    {
      // common part
    }
  }
  // Data updates
}
```

# Parallélisme multi-nœuds 1/2

- Algorithme distribué (MPI)
- Distribution des calculs selon les **directions angulaires**
  - Réduction des coûts mémoire sur chaque nœud
  - Communications pour les calculs globaux :
    - Réduction + diffusion possible pour certaines données  
Mais pas pour toutes !
    - Multi-diffusions à cause de la diffusion du rayonnement
  - Nécessité de limiter le coût mémoire !
    - Chaque nœud ne reçoit des données que d'un seul autre nœud à la fois (échange circulaire)
  - Schéma classique non efficace (deux tampons de données)
  - Version utilisée : pour un nœud  $n$ 
    - Boucle sur distances  $d$  :
      - Réception des données du nœud  $n-d$
      - Envoi des données locales vers le nœud  $n+d$

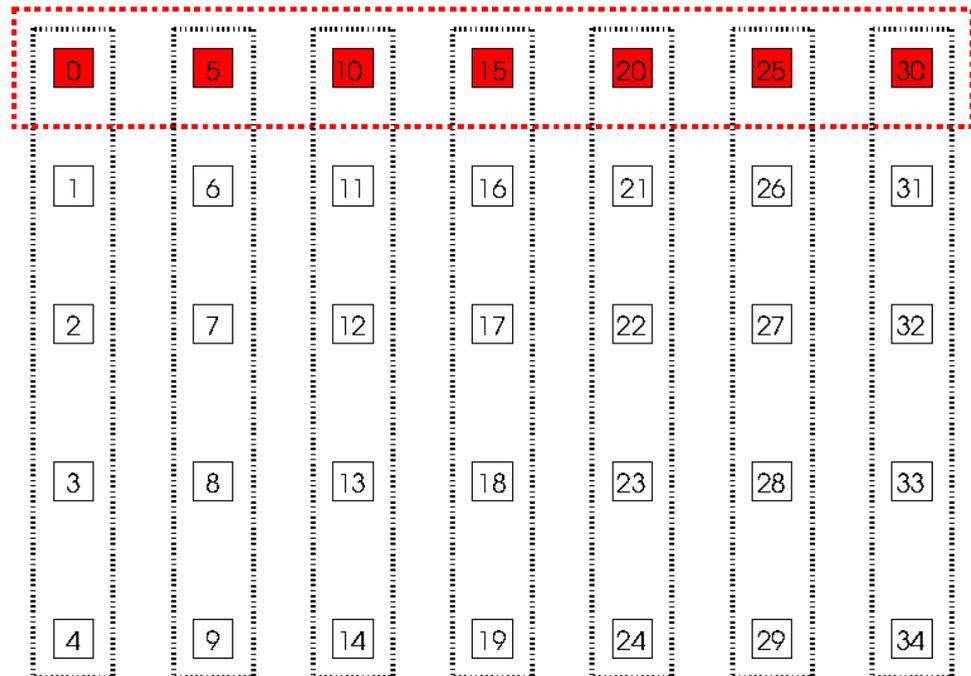


# Parallélisme multi-nœuds 2/2

- Distribution des calculs selon les **fréquences**
  - Utile pour le problème inverse
  - Groupes de nœuds pour traiter un nombre de fréquences ( $\geq 1$ )
    - Toutes les directions réparties sur les nœuds de chaque groupe
  - Groupe des leaders de chaque groupe pour réduire/diffuser

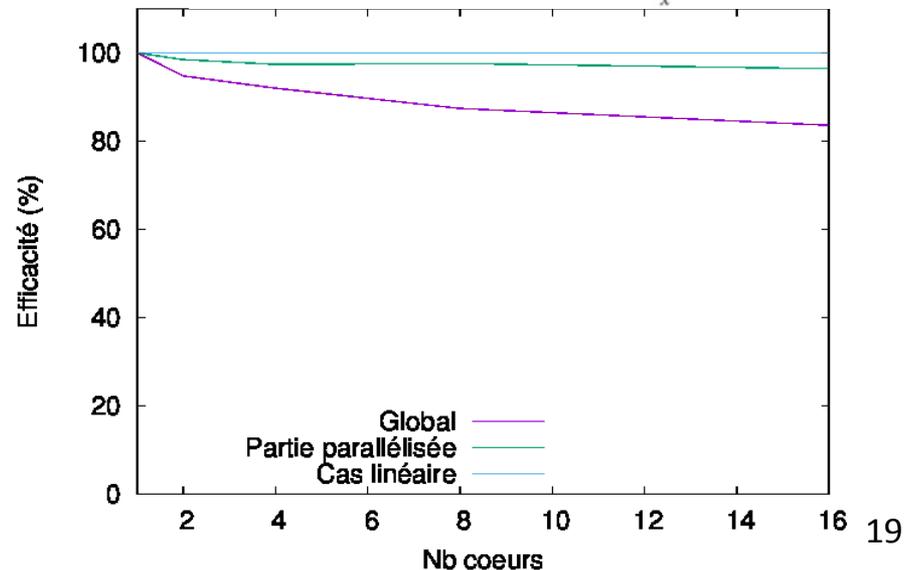
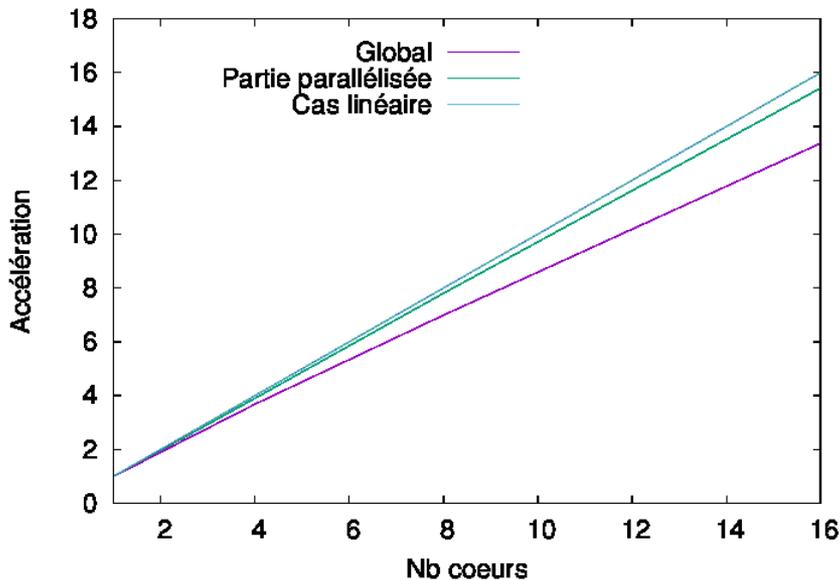
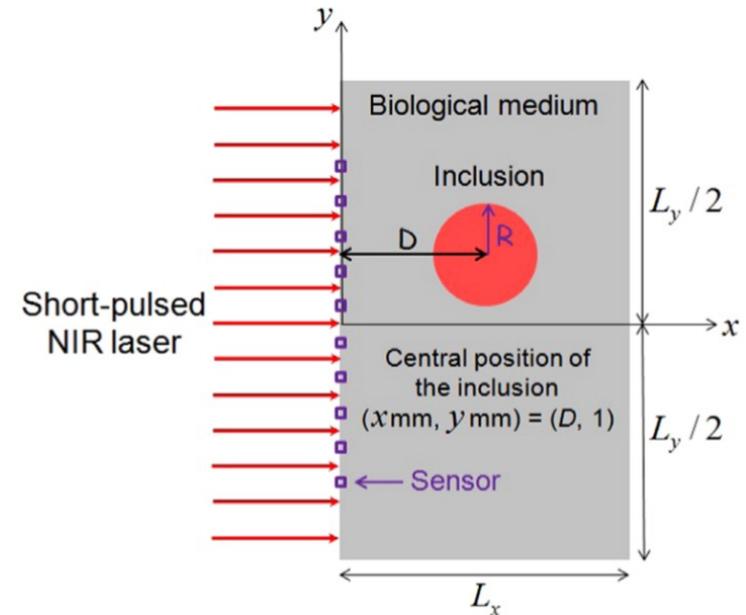
- Exemple :

- 160 directions
- 14 fréquences
- 35 nœuds de 32 cœurs
- Chaque nœud traite :
  - 32 directions
  - 2 fréquences



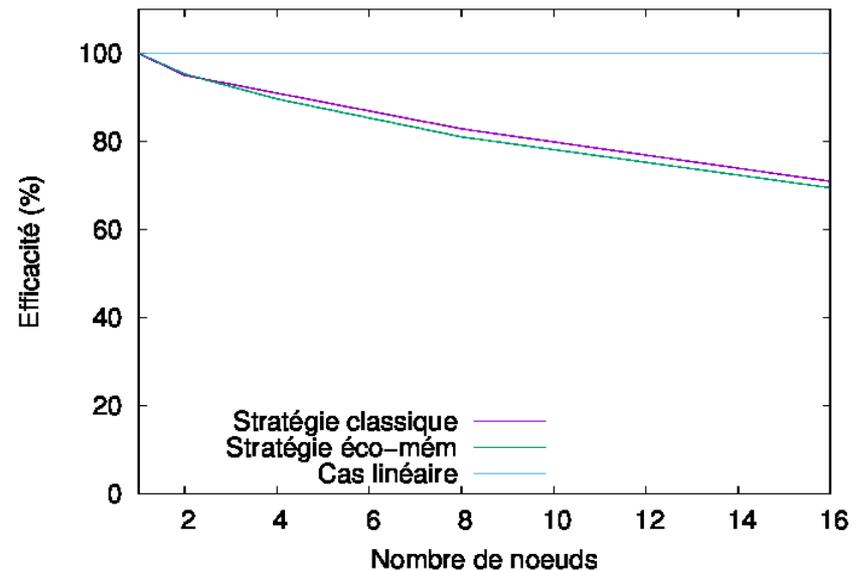
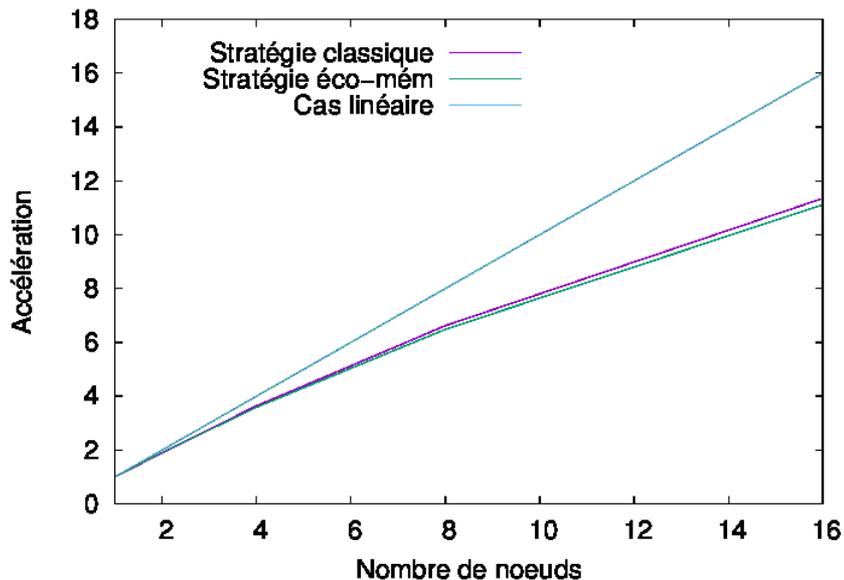
# Efficacité multi-cœurs du problème direct

- Contexte :
  - CPUs Intel@2.0 GHz, 16 cœurs
  - 252 GB RAM
  - Maillage de  $\sim 34,000$  noeuds
  - 64 directions
- Résultats :



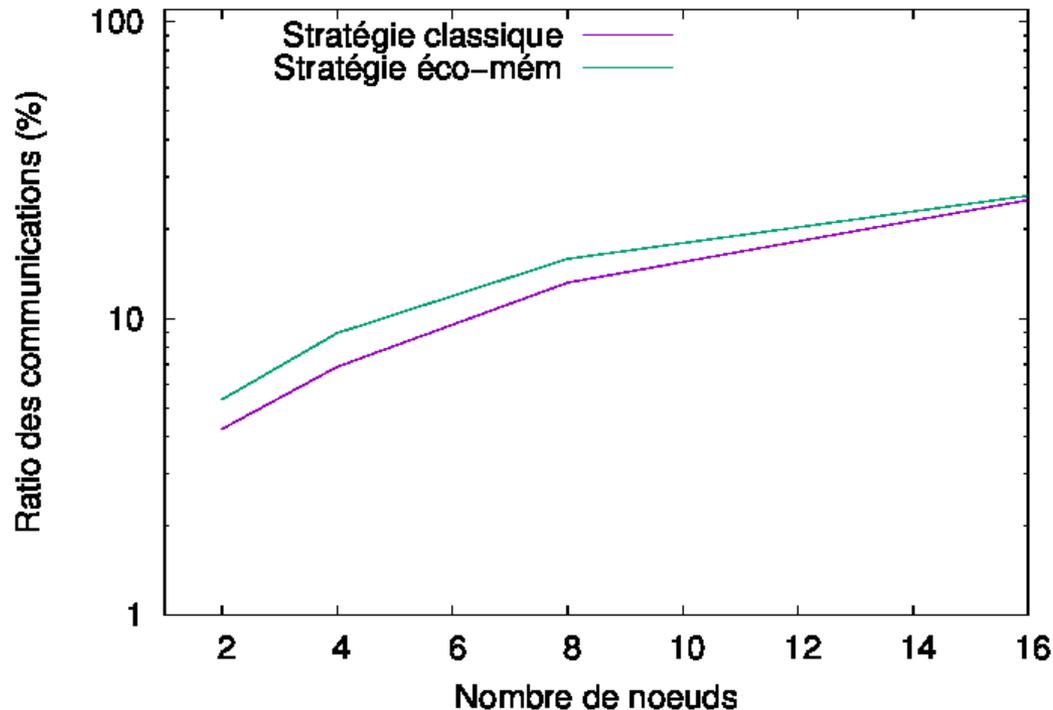
# Efficacité multi-machines du problème direct

- Contexte : 1 à 16 noeuds Grid5000
  - CPUs Intel E5-2630 v3, 16 cœurs
  - 126GB RAM, 10Gbps Ethernet
  - Maillage 805879 noeuds
  - 256 directions
- Résultats : impact des multi-diffusions



# Efficacité multi-machines du problème direct

- Évolution du ratio des communications



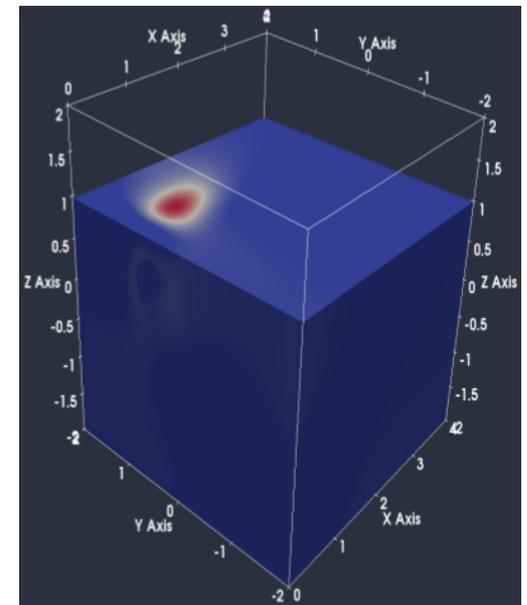
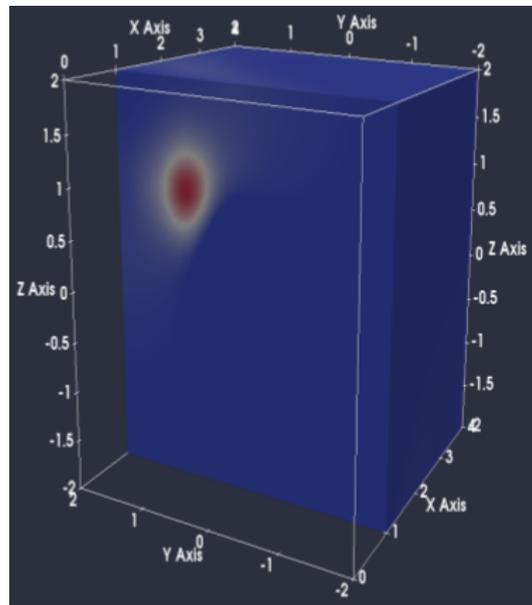
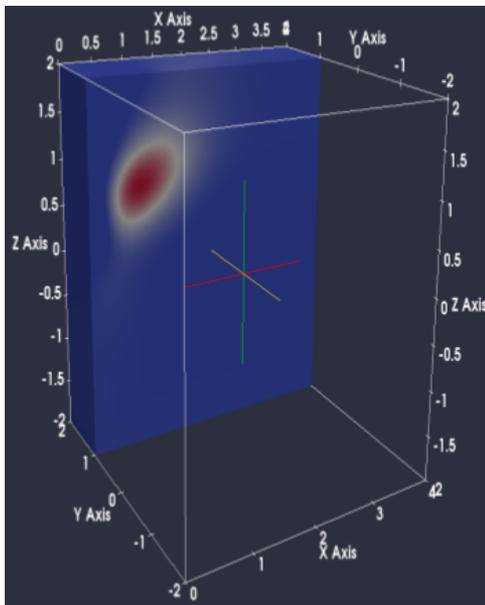
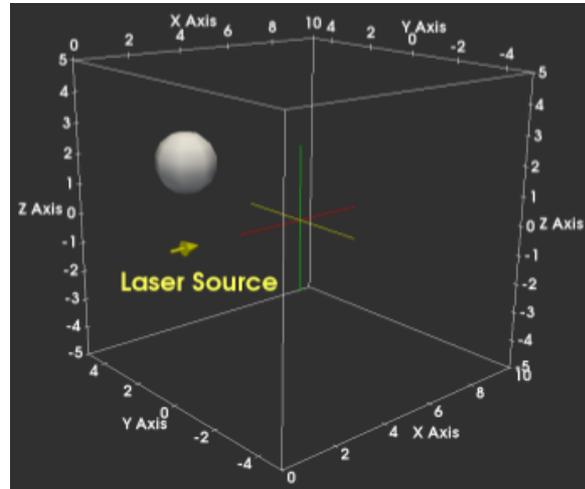
- Étudier des alternatives pour réduire les coms :
- Compression à la volée ?

# Challenge sur Explor

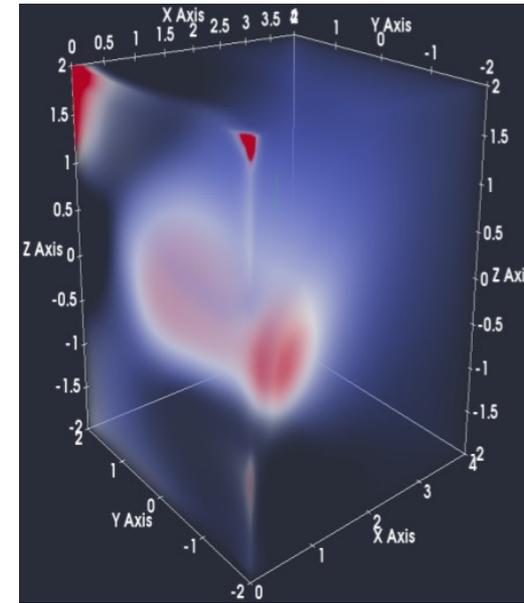
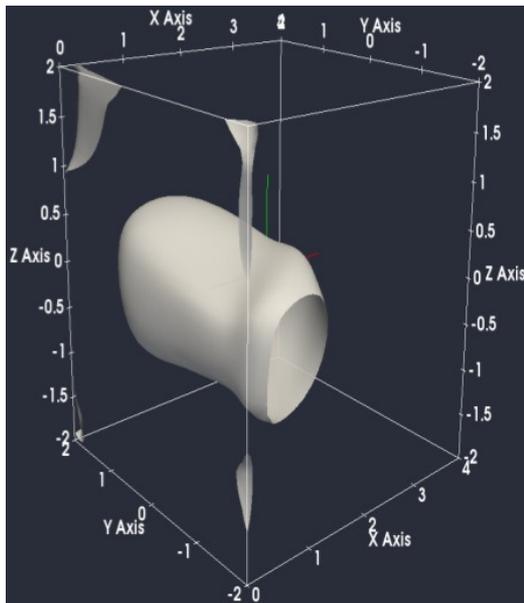
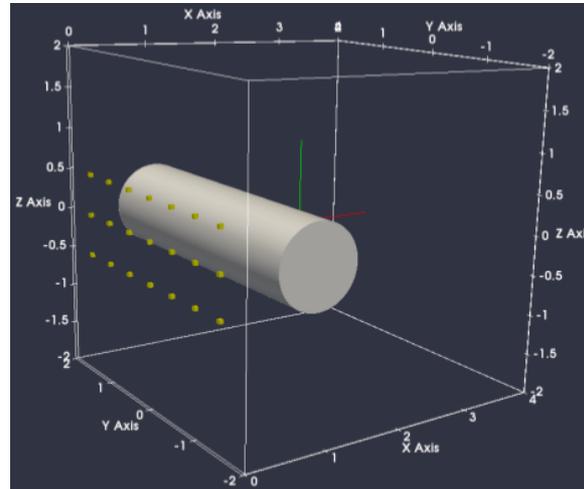
---

- Explor :
  - Plateforme régionale (Université de Lorraine)
  - Nœuds utilisés :
    - CPU Intel E5-2683 v4
    - 32 cœurs, 128Go RAM, 100Gbps Omni-Path
- Calcul inverse complet sur une semaine :
  - Maillage 1411551 nœuds
  - 256 directions
  - 8 fréquences
  - 8 groupes de 8 nœuds de 32 cœurs
- Temps :
  - 7,07 jours avec ratio des communications à 17,05 %

# Exemple de reconstruction 3D (diffusion)



# Exemple de reconstruction 3D (diffusion)



# Conclusion

---

- Algorithme parallèle :
  - Multi-cœurs : répartition des directions
  - Multi-nœuds : distribution des directions et des fréquences
- Bonne efficacité multi-cœurs
- Efficacité correcte mais moins bonne en multi-nœuds
  - Problème des multi-diffusions
- Études en cours :
  - Nouvelles optimisations des calculs et des coms
  - Étude du portage GPU de certaines parties