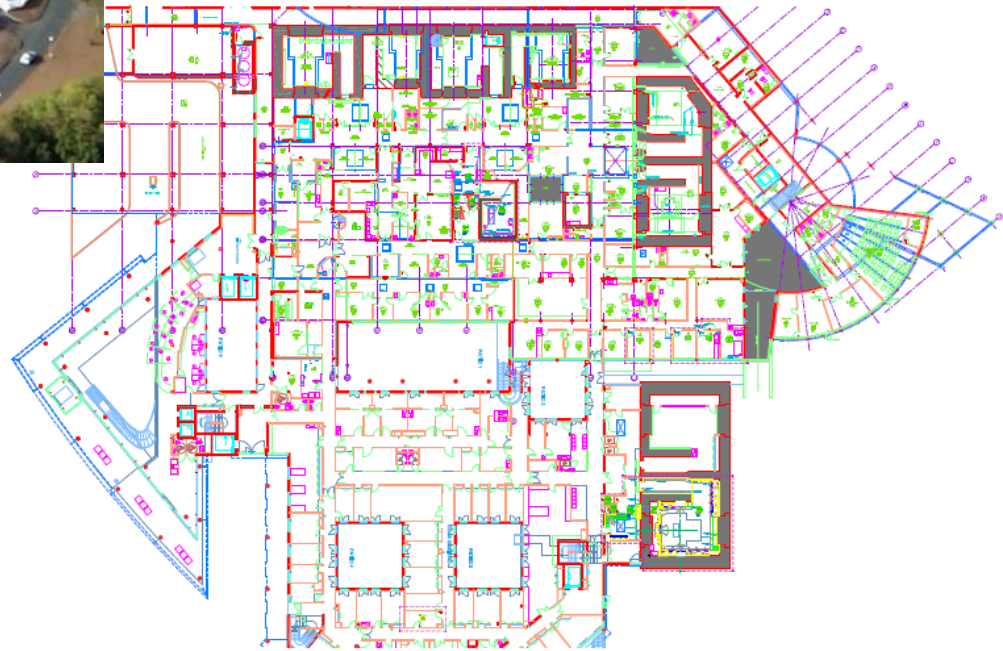


Techniques Avancées de Radiothérapie Externe par Photons

Albert LISBONA

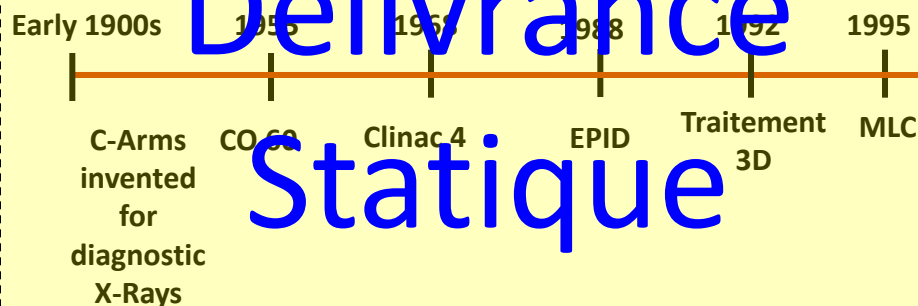
Institut de Cancérologie de l'Ouest

ICO

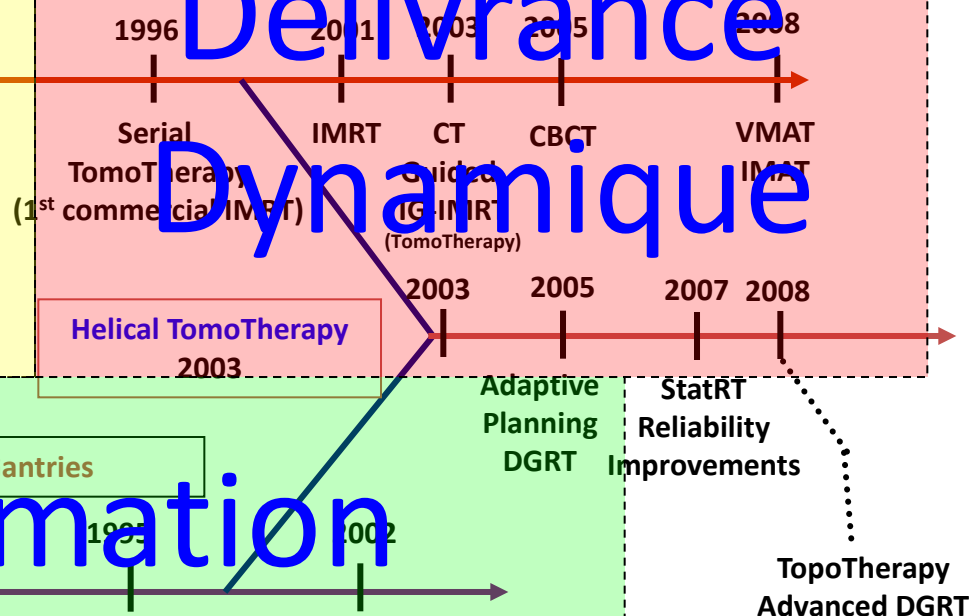


(Très) Brève histoire de la radiothérapie externe

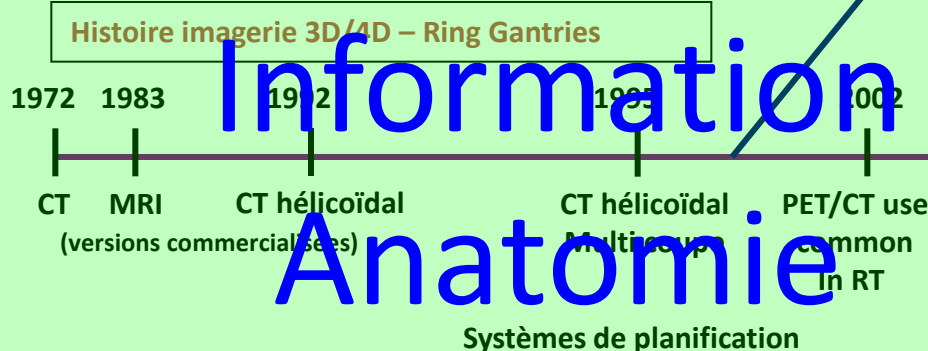
Délivrance Statique



Délivrance Dynamique



Information Anatomie



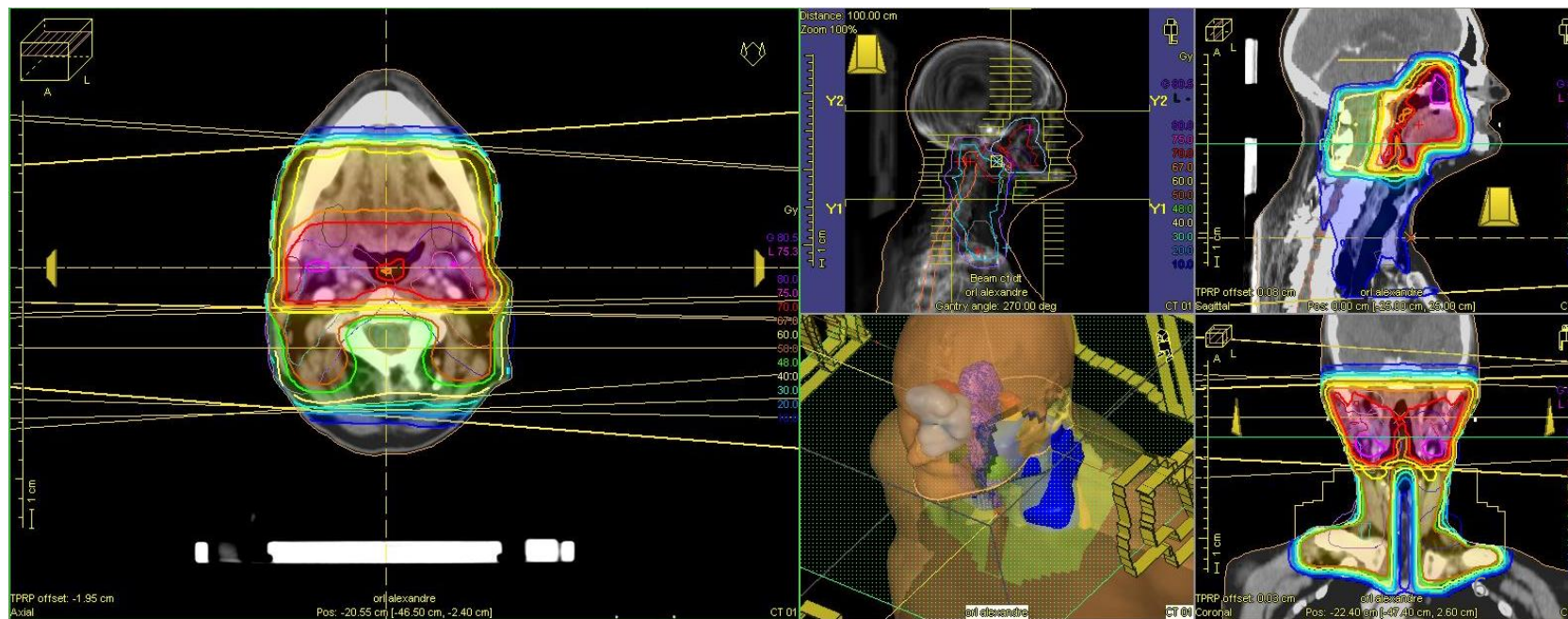
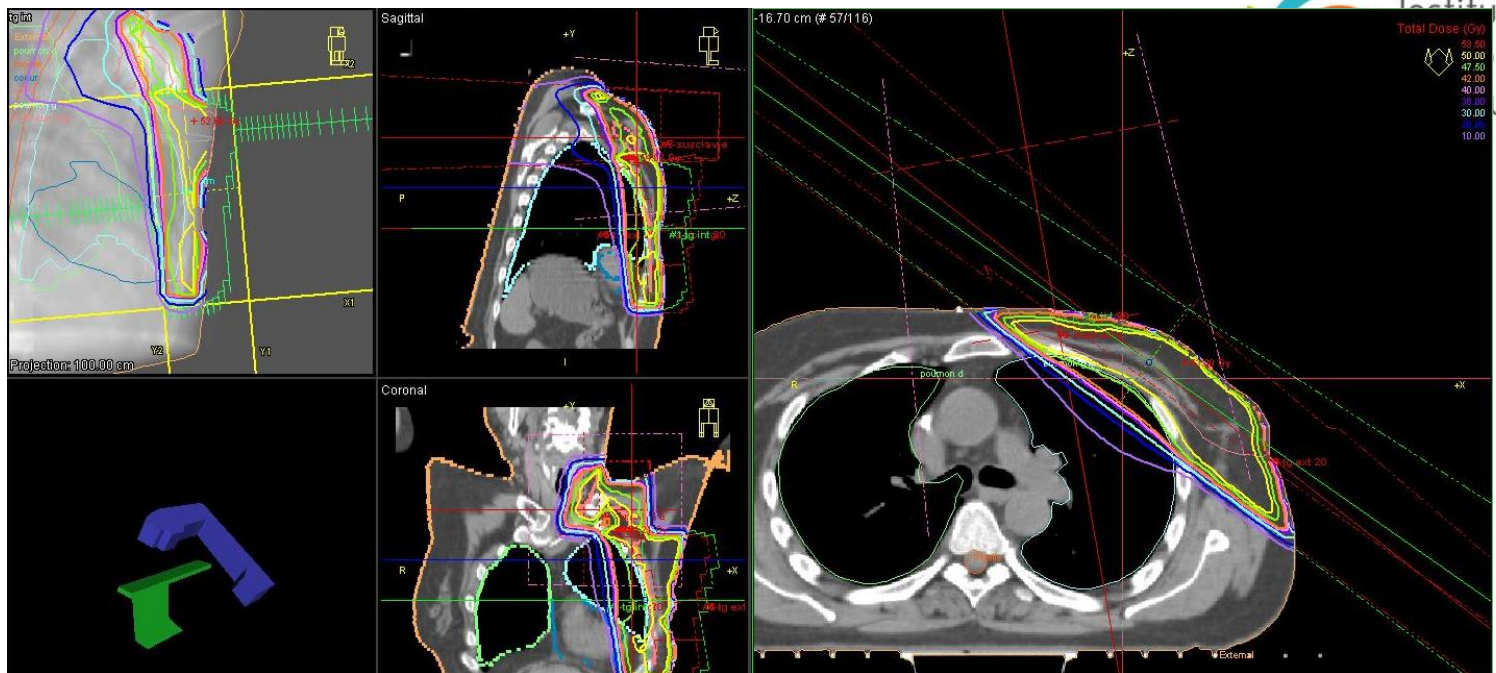
La radiothérapie conformationnelle 3D

- Les paramètres d'irradiation :
 - nombre de faisceaux
 - incidences des faisceaux (plan transverse + obliquité)
 - nature du rayonnement (photons, électrons)
 - énergie du rayonnement
 - pondération des faisceaux
 - filtres en coin, filtres dynamiques
 - collimateur multilames (MLC)

→ la planification est dite **directe** (« forward-planning ») : l'utilisateur définit des paramètres d'irradiation pour arriver à un certain résultat de calcul de dose (par opposition à la planification inverse de la RCMI)

La radiothérapie conformationnelle 3D

- Les limites techniques
 - Le nombre de faisceaux limité par le temps de préparation et de traitement
 - La conformité de dose limitée pour les formes trop complexes (ex : volumes cibles de forme concave)
 - Les limites de précision sur les petites tailles de champ (< 5 cm de côté)
 - L'augmentation de la complexité
 - lorsque le nombre de paramètres augmente :
- les solutions existantes sont décuplées et les possibilités de traitement sont potentiellement meilleures



Accélérateurs linéaires médicaux

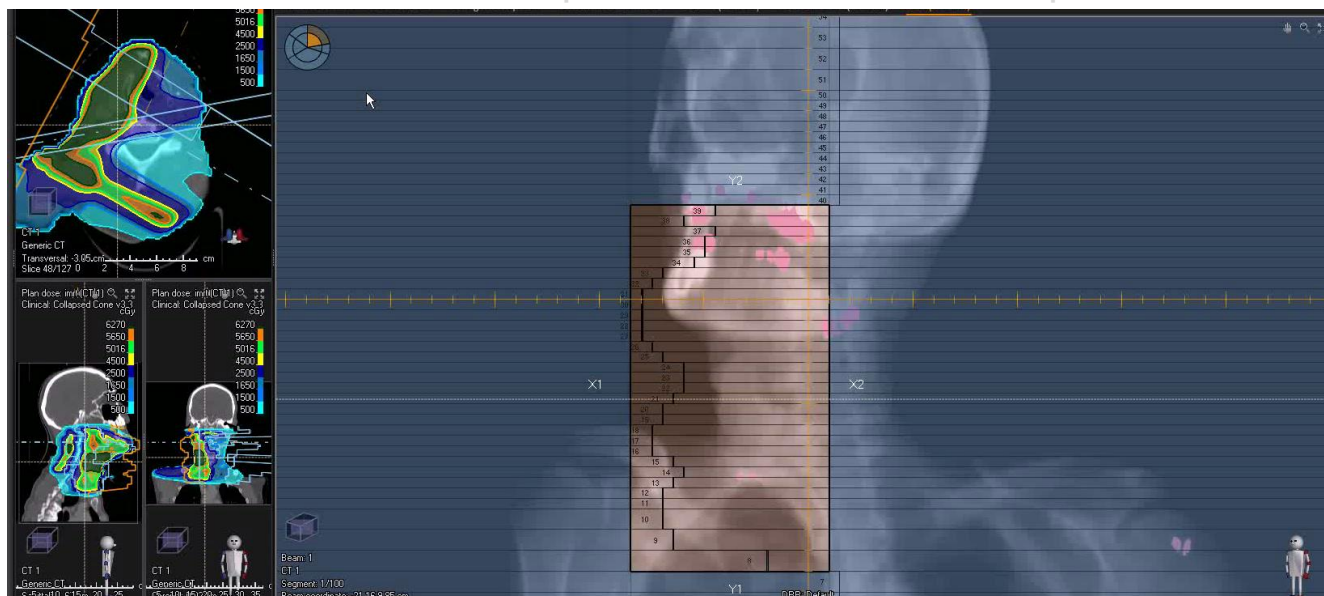
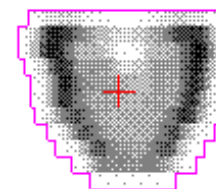
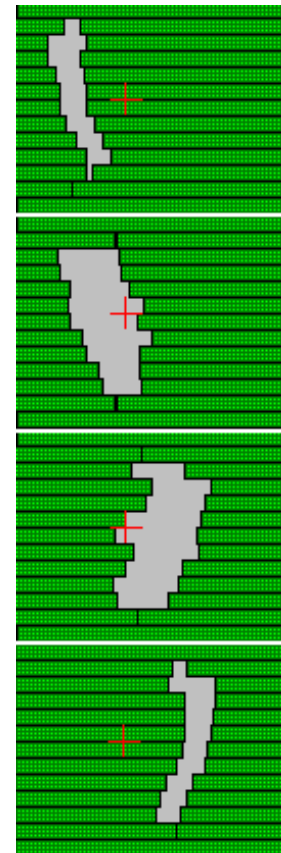


La radiothérapie conformationnelle avec modulation d'intensité

La radiothérapie conformationnelle avec modulation d'intensité (RCMI)



- La fluence du faisceau est **modulée** à l'aide du collimateur multilames :
- Cas des faisceaux statiques :
 - Step-and-shoot* : chaque incidence est divisée en plusieurs **sous-segments** de faisceau ou **beamlets**
 - Sliding window* : mouvement des lames pendant l'irradiation, permettant de délivrer un profil

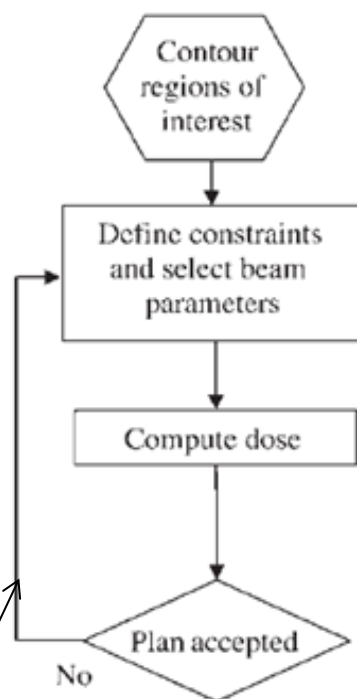


La radiothérapie conformationnelle avec modulation d'intensité (RCMI)

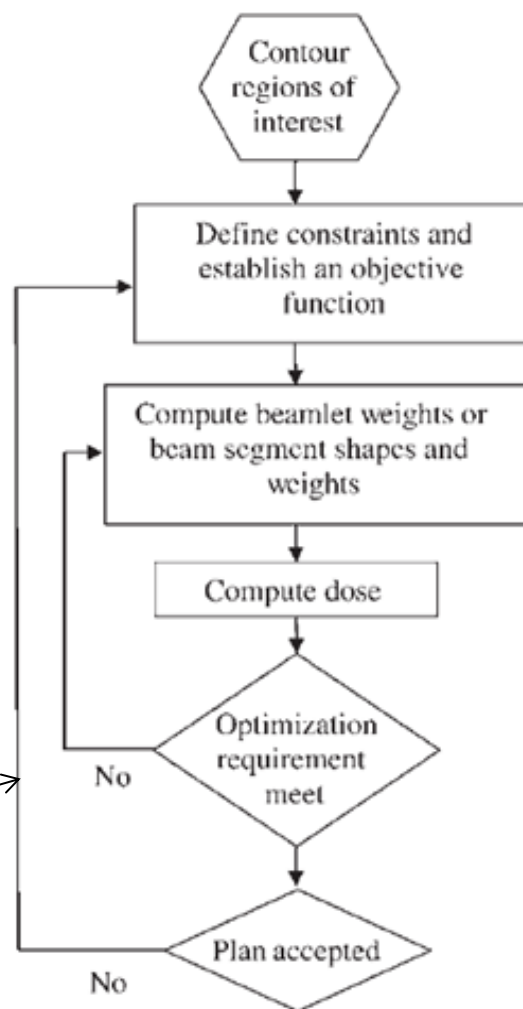
- Les avantages
 - Le traitement de cibles complexes (concavités)
 - Une meilleure protection des organes à risque (OAR)
- La planification **inverse** : on part de la solution (distribution de dose) pour arriver aux données de départ (paramètres des faisceaux)
- La solution au problème inverse n'est pas unique
 - nécessité d'optimisation

Planification directe / inverse

Traditional optimization



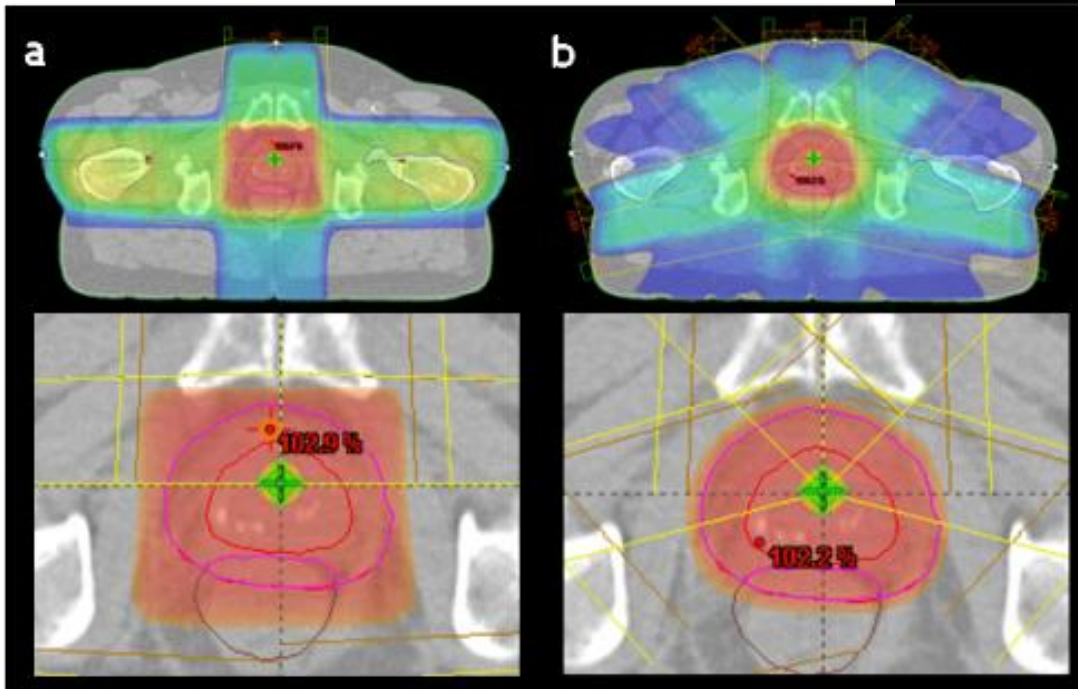
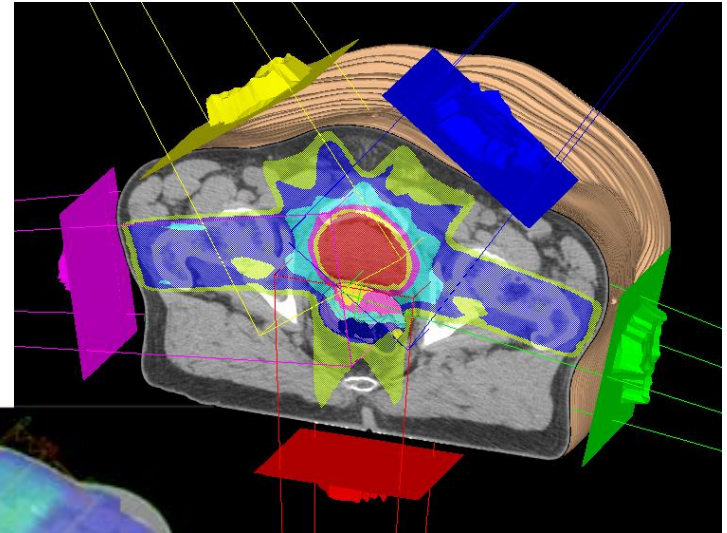
IMRT optimization



boucles !

La radiothérapie conformationnelle par modulation d'intensité (RCMI)

- Cas de la prostate



Le processus d'optimisation

Contouring ROIs Plan Settings Beam Angles **Optimization** Fractionation

Prescription

Median For: PTV T will receive **45.00 Gy** in 25 Fractions ⓘ ROI contours have been resampled.

Target Constraints

Name	Display	Color	Blocked	Importance	Max Dose [Gy]	Max Dose Pen.	DVH Vol	DVH Dose [Gy]	Min Dose [Gy]	Min Dose Pen.	
PTV T	☒	Red	2 Unblocked	☒	15	45.00	40	Median	45.00	45.00	40
CTV T	☐	Magenta	1 Unblocked	☐							

- La prescription médicale définit les buts du traitement
 - Couverture de la cible en fonction de la dose prescrite,
 - Contraintes dose-volume aux organes à risque,.....
- Ces buts peuvent s'exprimer dans la **fonction de coût** ou dans les **contraintes**

Le processus d'optimisation

- La fonction de coût
 - la fonction de coût est construite en prenant en compte les objectifs du plan (pour le volume cible et les OAR), de telle manière que le plan **optimal** corresponde au **minimum** de la fonction
 - les poids des beamlets sont modifiés à chaque itération pour faire varier la valeur de la fonction, et la faire tendre vers un minimum

- Les contraintes

- les contraintes permettent de **réduire l'espace de solutions possibles**

→ l'algorithme cherchera dans l'espace des solutions possibles (définies par les contraintes) la solution qui minimise la fonction de coût

Le processus d'optimisation

- Exemples de contraintes
 - dose minimale sur la cible
 - dose maximale sur la cible

 - dose maximale sur un OAR
 - dose moyenne sur un OAR

 - contraintes sur des points de l'histogramme dose volume (HDV) d'un OAR
 - $V_{20 \text{ Gy}} < 30 \%$
- Exemples d'objectifs
 - minimiser la somme des différences entre doses prescrites et délivrées
 - minimiser une dose intégrale
 - maximiser la dose minimale à la cible

Objectifs et contraintes en tomothérapie

Tumor Constraints												
Name	Display	Color	Blocked	Use?	Importance	Max Dose [Gy]	Max Dose Pen.	DVH Vol [%]	DVH Dose [Gy]	Min Dose [Gy]	Min Dose Pen.	
Target	☒	■	None	☒	50	10.0	100	95.0	10.0	10.0	100	

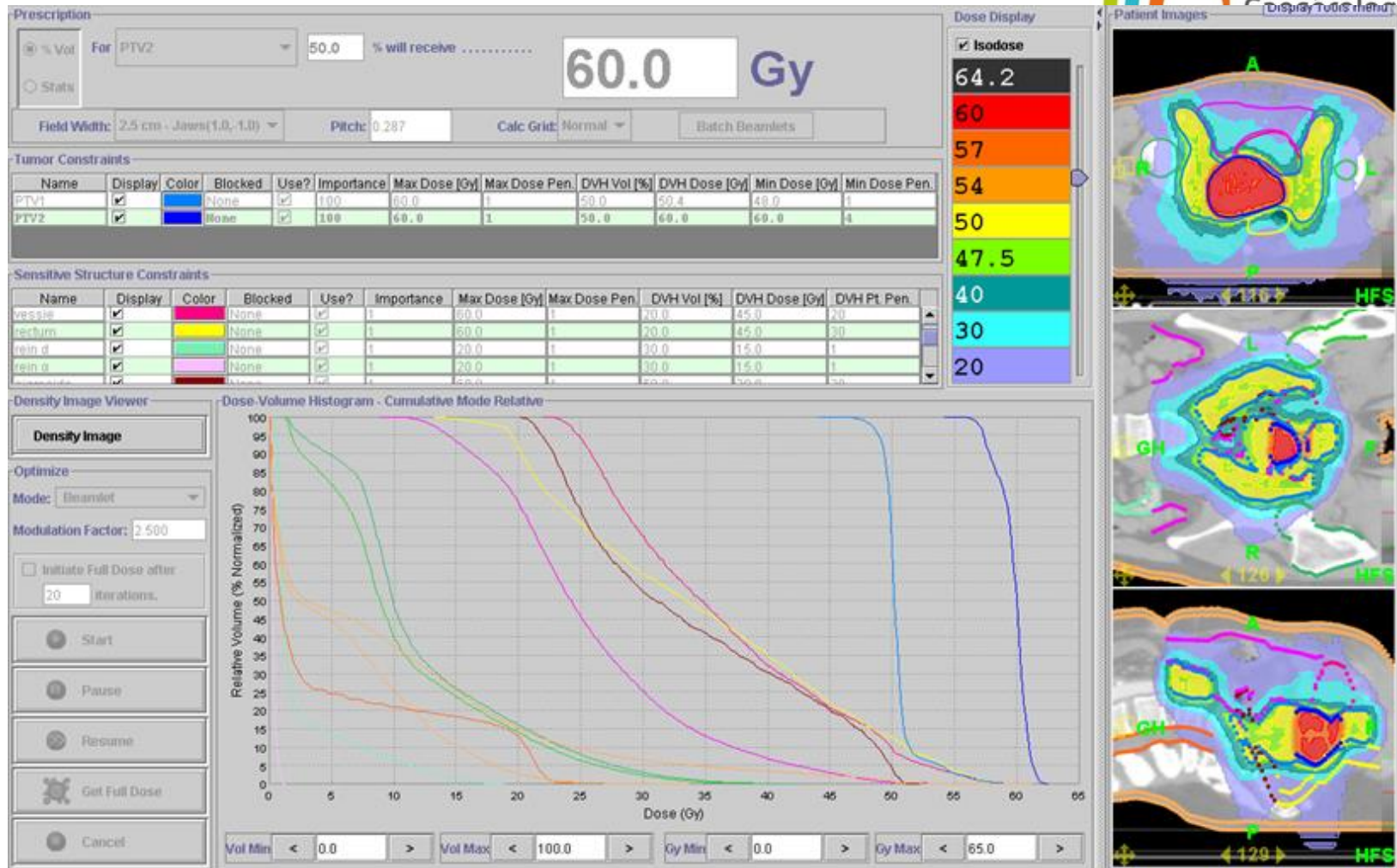
Sensitive Structure Constraints												
Name	Display	Color	Blocked	Use?	Importance	Max Dose [Gy]	Max Dose Pen.	DVH Vol [%]	DVH Dose [Gy]	DVH Pt. Pen.		
couch	☐	■	None	☐								
ROI 1	☒	■	None	☒	10	10.0	1	15.0	3.0	10		
ROI 2	☒	■	None	☒	10	10.0	1	15.0	3.0	10		

$$\text{Objective Function} = \sum \left[(\text{Prescribed} - \text{Actual})^2 \right] \left[\frac{\text{Importance}}{\text{ROI Volume}} \right] \text{DVH Penalty}$$

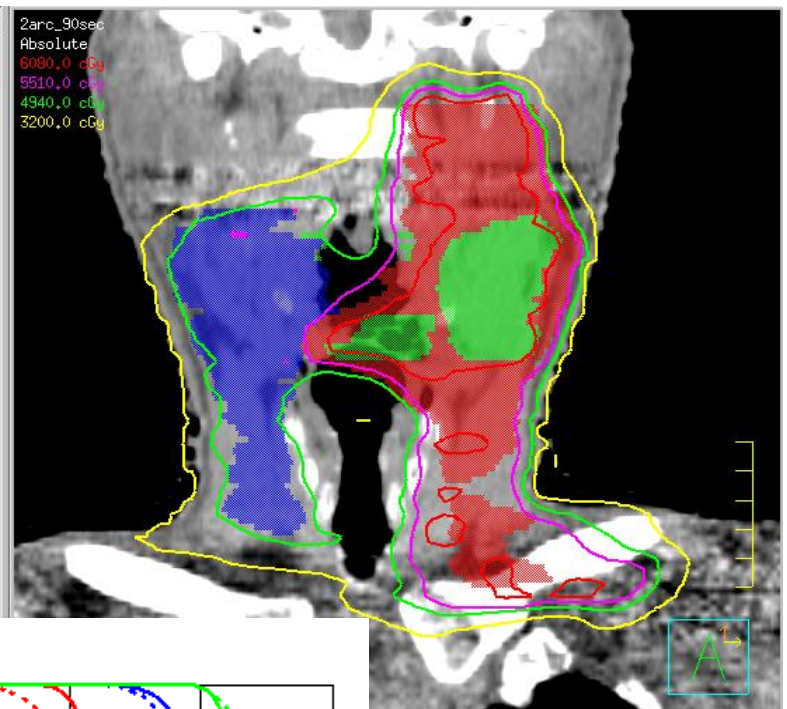
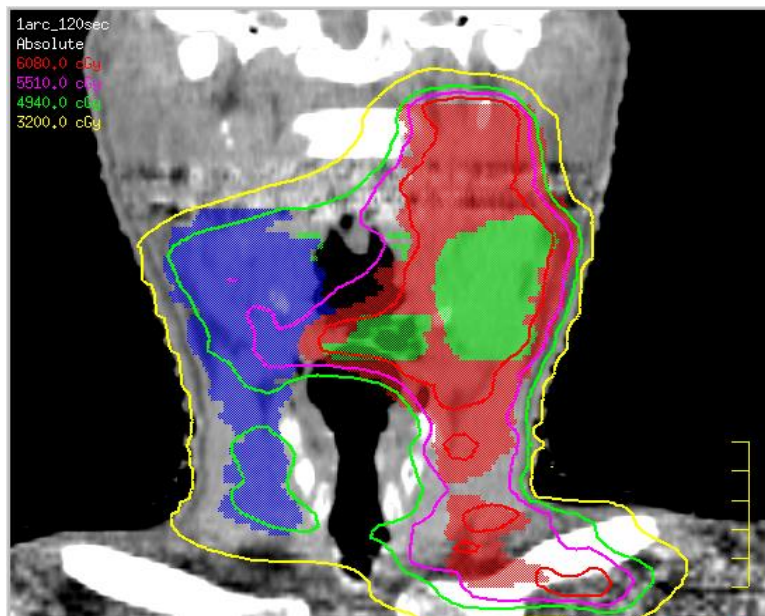
This is a simplified version of the objective function, to illustrate the roles of importance & penalty.

Sum over all
"used" voxels

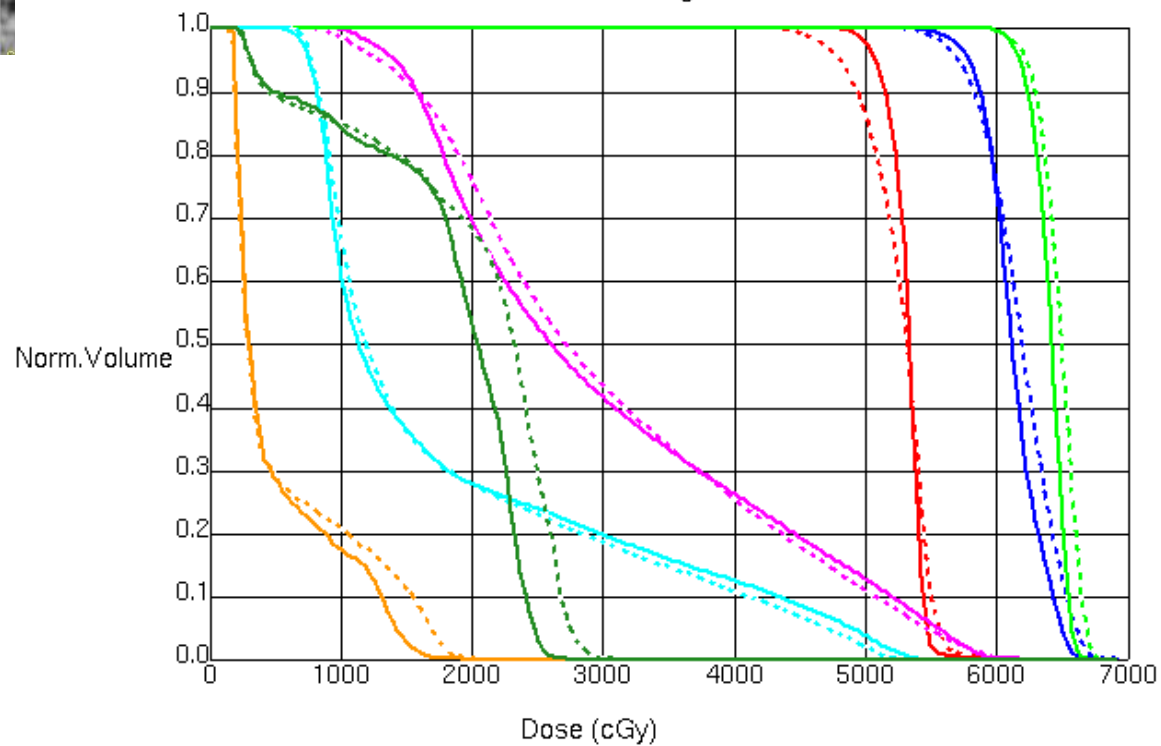
- pour chaque volume on définit une importance globale, et des pénalités s'appliquant individuellement aux objectifs de dose max, dose min et points DVH



- le processus itératif est répété et on suit l'évolution des DVH
 - les contraintes peuvent être modifiées à tout moment en fonction des résultats obtenus
- optimisation en « parallèle » des différents PTV et OAR



Dose Volume Histogram



Solid lines: 2 arcs
Dashed lines: 1 arc

L'arcthérapie avec modulation d'intensité

- IMAT (*Intensity-Modulated Arc Therapy*) délivre des arcs en faisant varier certains paramètres pendant la rotation du bras :
 - forme du MLC
 - débit de dose
 - vitesse de rotation

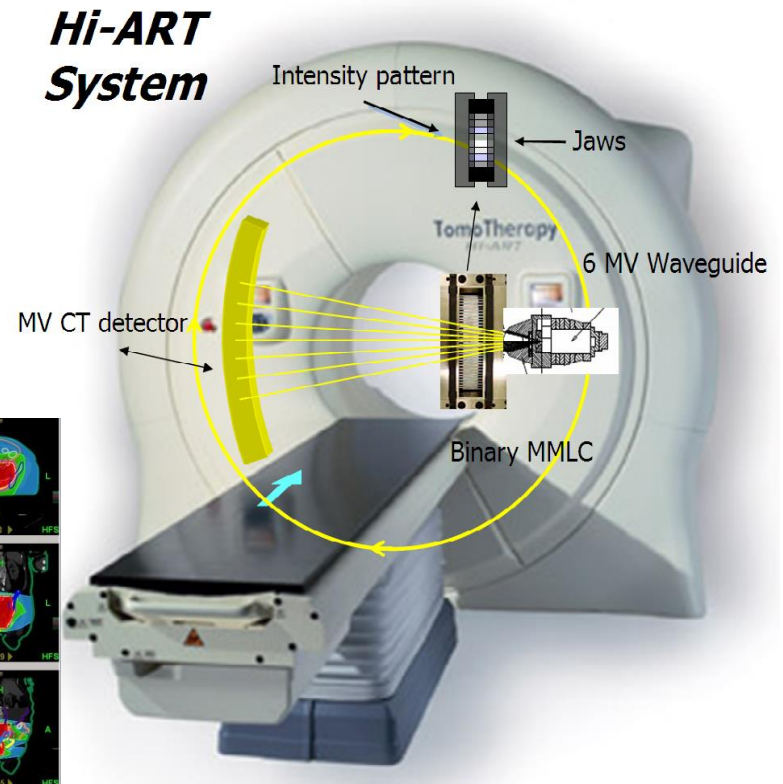
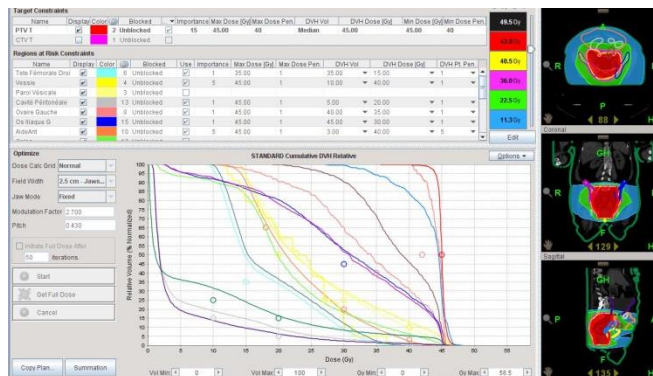


Tomothérapie

→ **Tomotherapy** (« *traitement par coupes* ») : délivre des faisceaux modulés en intensité sur une coupe à la fois

- concept proposé en 1992
- premiers patients traités en 2002

- linac de 6 MV en rotation
- lit en mouvement longitudinal
- champ de 40 cm sur 1 - 2,5 ou 5 cm d'épaisseur
- MLC binaire (lame ouverte ou fermée / 20 ms)
- détecteur MVCT face au tube



Conclusion

- La radiothérapie conformationnelle avec modulation d'intensité (RCMI) représente une optimisation de la radiothérapie conformationnelle 3D elles constituent toutes les deux des techniques de traitement standard.
- La RCMI améliore en général le ratio dose absorbée à la cible / dose absorbée aux organes à risque.
- Le guidage par l'image (IGRT) est systématiquement associé à la RCMI.
- La RCMI est réalisable selon plusieurs techniques à choisir en fonction des situations cliniques.
- RCMI rotationnelle : Tomo / IMAT
 - Des capacités équivalentes en termes de distribution et gradients de dose
 - Des différences liées à l'utilisation, au compromis temps/modulation, l'indication etc.
- De nouvelles techniques d'optimisation apparaissent
 - **multi-critères** : réduction de la variabilité inter-opérateur et des boucles d'interaction entre les acteurs du service
 - **robuste** : prise en compte des incertitudes liées au traitement de manière plus individualisée (localisation, mouvement, rayonnement utilisé etc.), sous forme de densités de probabilité

Irradiations en conditions stéréotaxiques

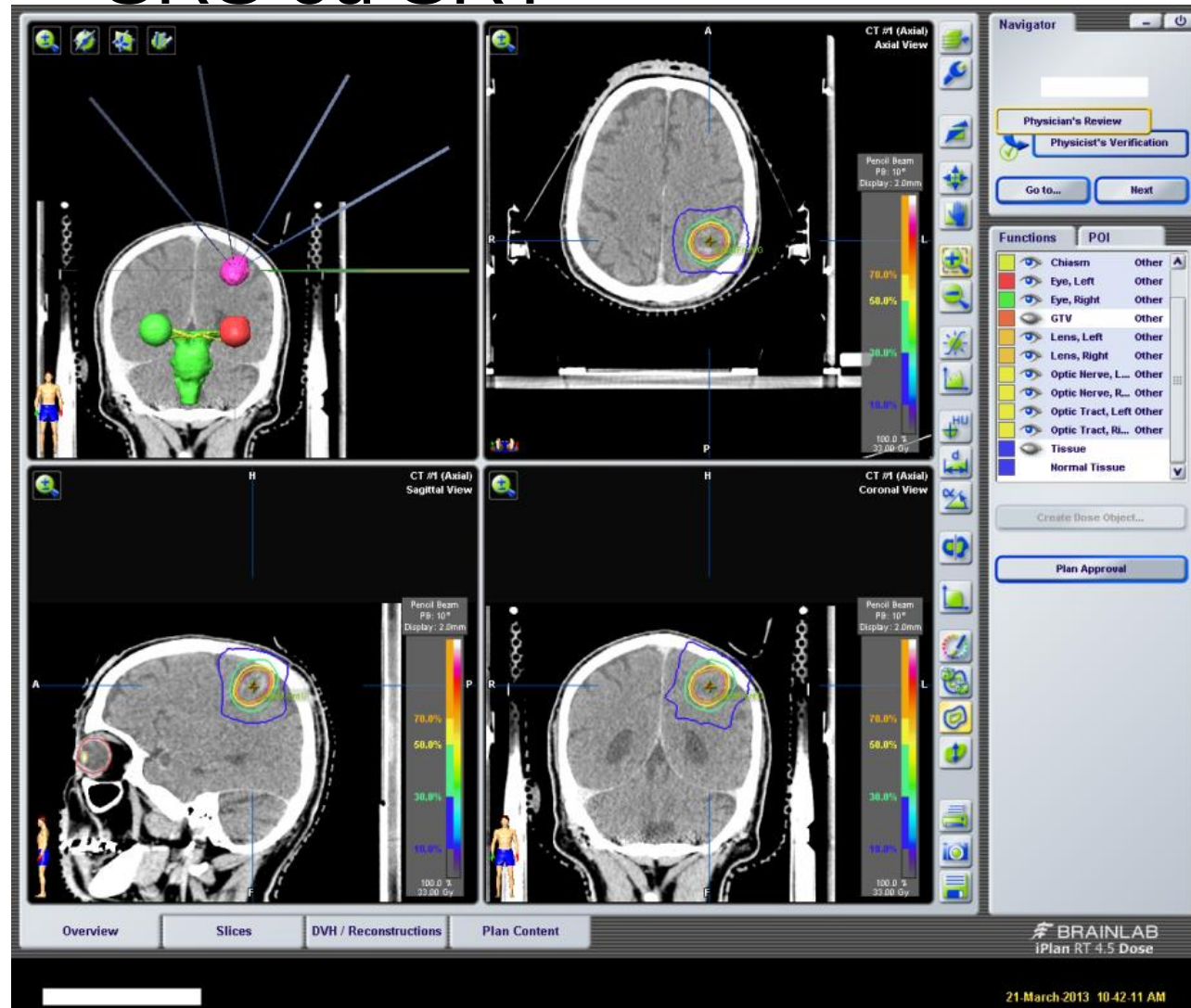
La radiothérapie en conditions stéréotaxiques

- Le principe fondateur de la radiothérapie en conditions stéréotaxiques est de délivrer une dose tumoricide à une cible de faible volume située dans un organe en réduisant la dose délivrée aux tissus adjacents à un seuil permettant d'éviter une complication ou la défaillance de cet organe.
- Elle nécessite :
 - une visualisation et une localisation parfaite de la cible,
 - des plans d'irradiation complexes,
 - un programme d'assurance de qualité entourant toutes les étapes de préparation, vérification, délivrance du traitement et surveillance, incluant la prise en considération en continu, de la position de la cible tout au long du traitement.
- L'élément fondamental est constitué par l'équation revisitée de la dose totale qui avoisine celle prescrite en fractionnement conventionnel, la dose par fraction qui est considérablement plus élevée et l'étalement réduit.

Exemple de planification SRS ou SRT

Novalis

- Tumeurs bénignes ou malignes, MAV
- 5 arcs dynamiques 6MV non coplanaires, rarement RCMI
- Isodose de prescription : 70% (SRT) à 80% (SRS) ; calcul PB
- Positionnement des lames : average, marge 0-1mm / PTV



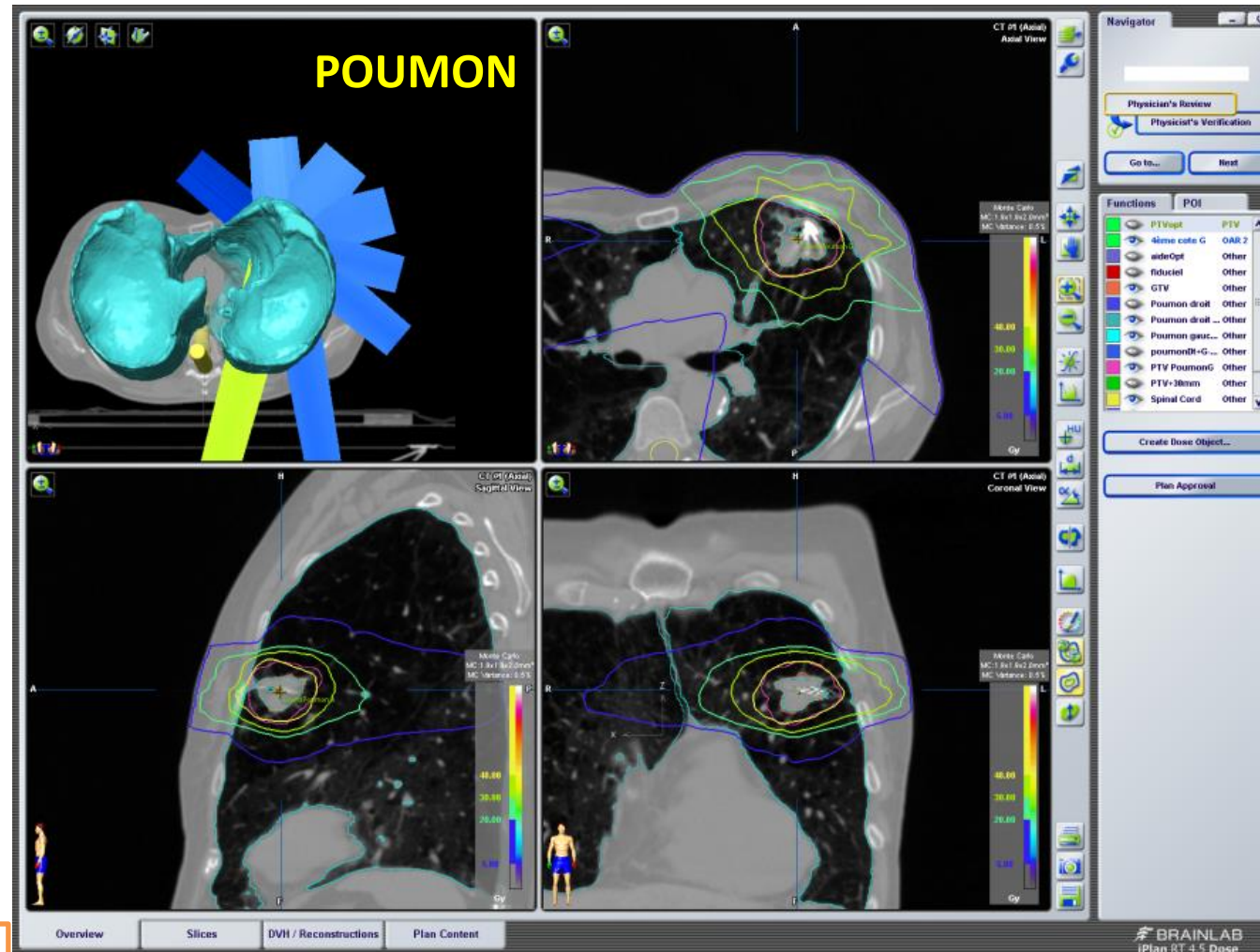
METASTASE CEREBRALE

Planification SBRT tumeurs mobiles

8 à 10 faisceaux 6MV
coplanaires non
opposés

Isodose de prescription
: 65 à 80% (poumon)

Positionnement des
lames : average, marge
0mm / PTV

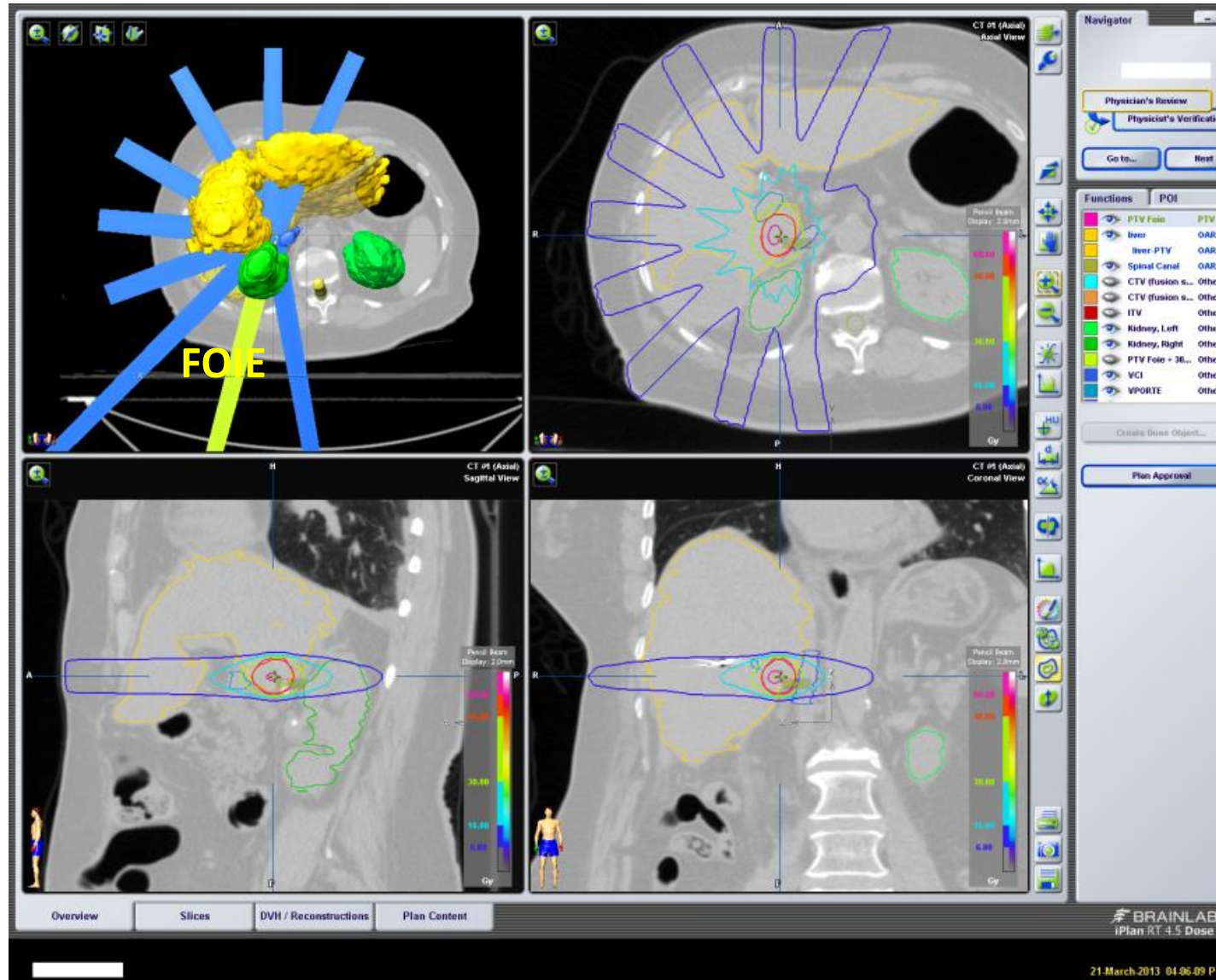


Calcul MC (RS 2mm ; V0,5% ; D_{eau})

Exemple de planification

Novalis

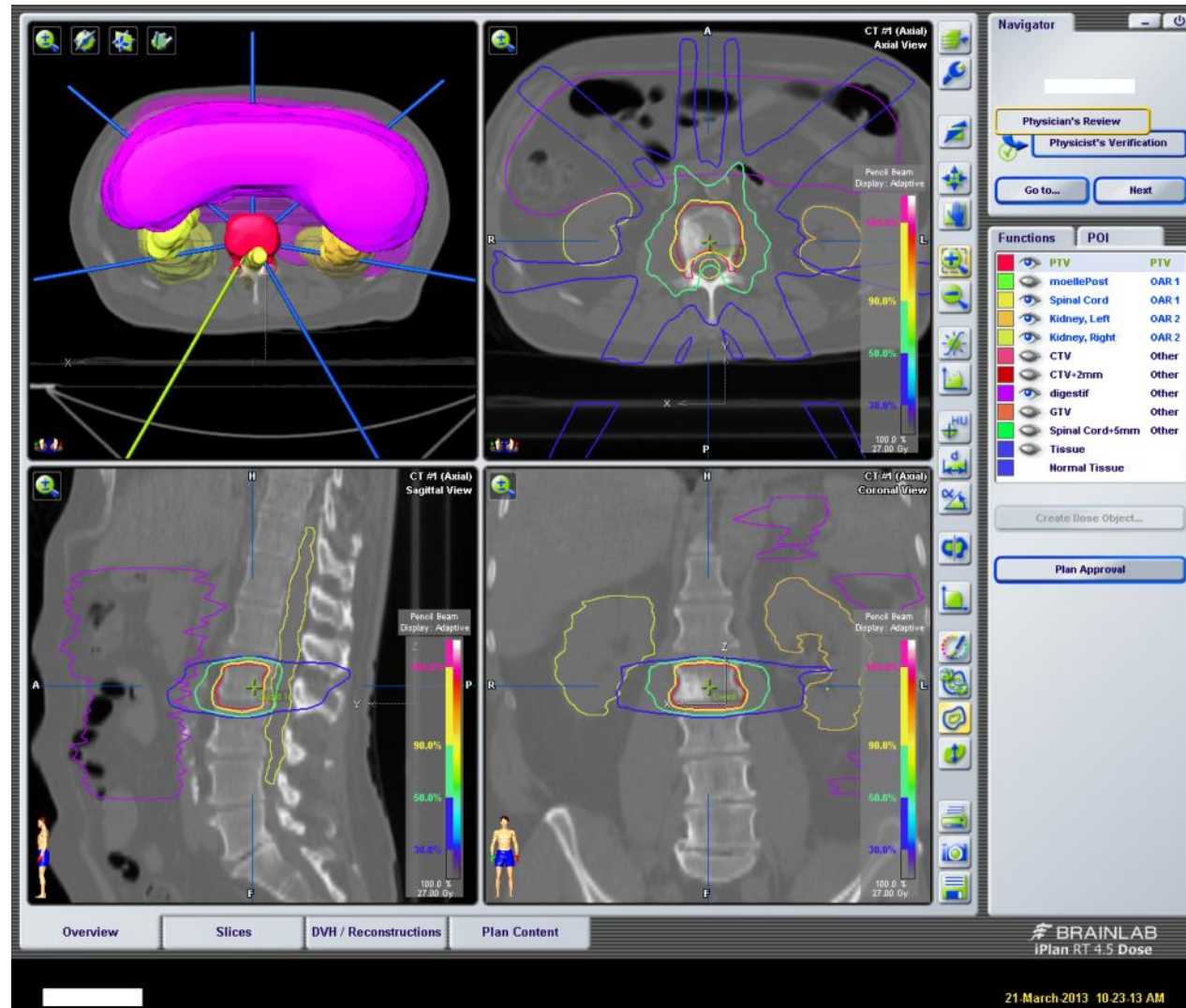
- 8 à 10 faisceaux 6MV coplanaires non opposés
 - arcs dynamiques si traitement en respiration libre (arcs non compatibles avec gating)
- Isodose de prescription : 80% (foie, calcul PB), 65 à 80% (poumon, calcul MC)
- Positionnement des lames : average, marge 0mm / PTV



Exemple de planification SBRT tumeurs vertébrales

Novalis

- 7 faisceaux modulés 6MV (non) coplanaires non opposés
- Prescription sur la dose médiane, calcul PB



Conclusion

- Les avancées techniques, informatiques et en imagerie médicale ont permis plus de possibilités de traitements en radiothérapie externe.
- Les gradients de dose obtenus permettent d'optimiser le rapport dose à la cible / dose aux tissus sains.
- L'assurance de la qualité, la maîtrise des processus, la gestion des risques sont des éléments indispensables pour la réalisation de ces traitements.