

Les défis de l'imagerie pour guider la Radiothérapie

Philippe BOISSARD - Physicien médical, PhD

Centre Léon Bérard – Lyon

Philippe.boissard@lyon.unicancer.fr

Le Centre Léon Bérard – Lyon

- Centre de Lutte Contre le Cancer
 - ~1800 employés
 - ~500 chercheurs
- Radiothérapie
 - ~3700 patients / an
 - 2 Sites: Lyon et Villefranche
 - 8 Machines de traitement
 - 4 VersaHD +1 Synergy Elekta
 - 2 Tomotherapy + 1 Cyberknife Accuray
 - Service de Curiethérapie
 - ~13 Radiothérapeutes
 - 11 Physiciens Médicaux
 - 3 Aides Physiciens + 1 Alternant
 - 7 Dosimétristes
 - ~50 Manipulateurs en Electro-Radiologie
 - 3 Personnes Compétentes en Radioprotection

2 Pet Scan, **3** gamma camera,
2 MRI **3** CT-Scan...





Plan

- Introduction Radiothérapie et Imagerie
- Prise en compte des mouvements
- Matériels disponibles et leurs utilisations
- Dosimétrie Adaptative
- Perspectives
- Conclusions

Workflow Patient en Radiothérapie

- L'imagerie est utilisée à toutes les étapes

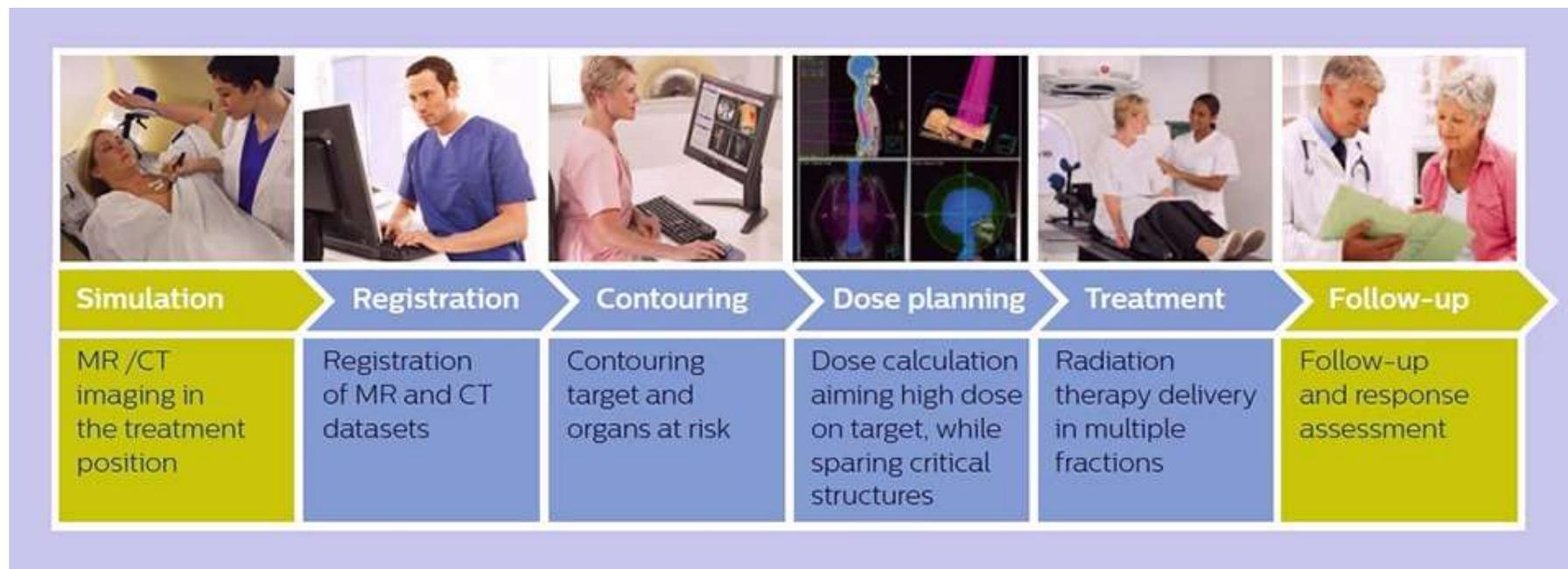


Image from: <https://www.philips.com.tr/healthcare/education-resources/publications/hotspot/mr-radiation-therapy>



Radiothérapie et imagerie

- **Planning:** délinéation Volumes Cibles et Organes à Risques (OARs), mouvements, distribution biologique
 - **Traitement:** positionnement patient, recalage tissus mous, suivi du volume cible
 - **Vérification et adaptation**
 - **Suivi de la réponse au traitement**
- ...**Big Data:** récolte de données, IA...

Disponibilité croissante de l'imagerie

Imagerie de référence

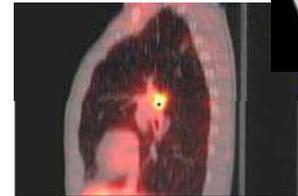
Simulateur



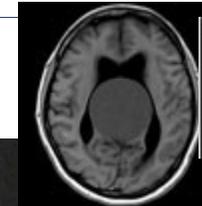
Plan de Tt 3D



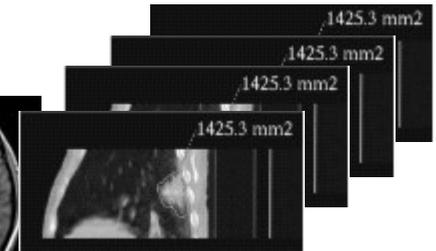
PET-CT



IRM



4D CT



2008

2000



Cone beam

1990



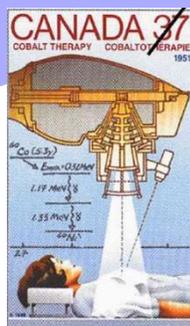
Image portale

1980

1970

Imagerie de contrôle

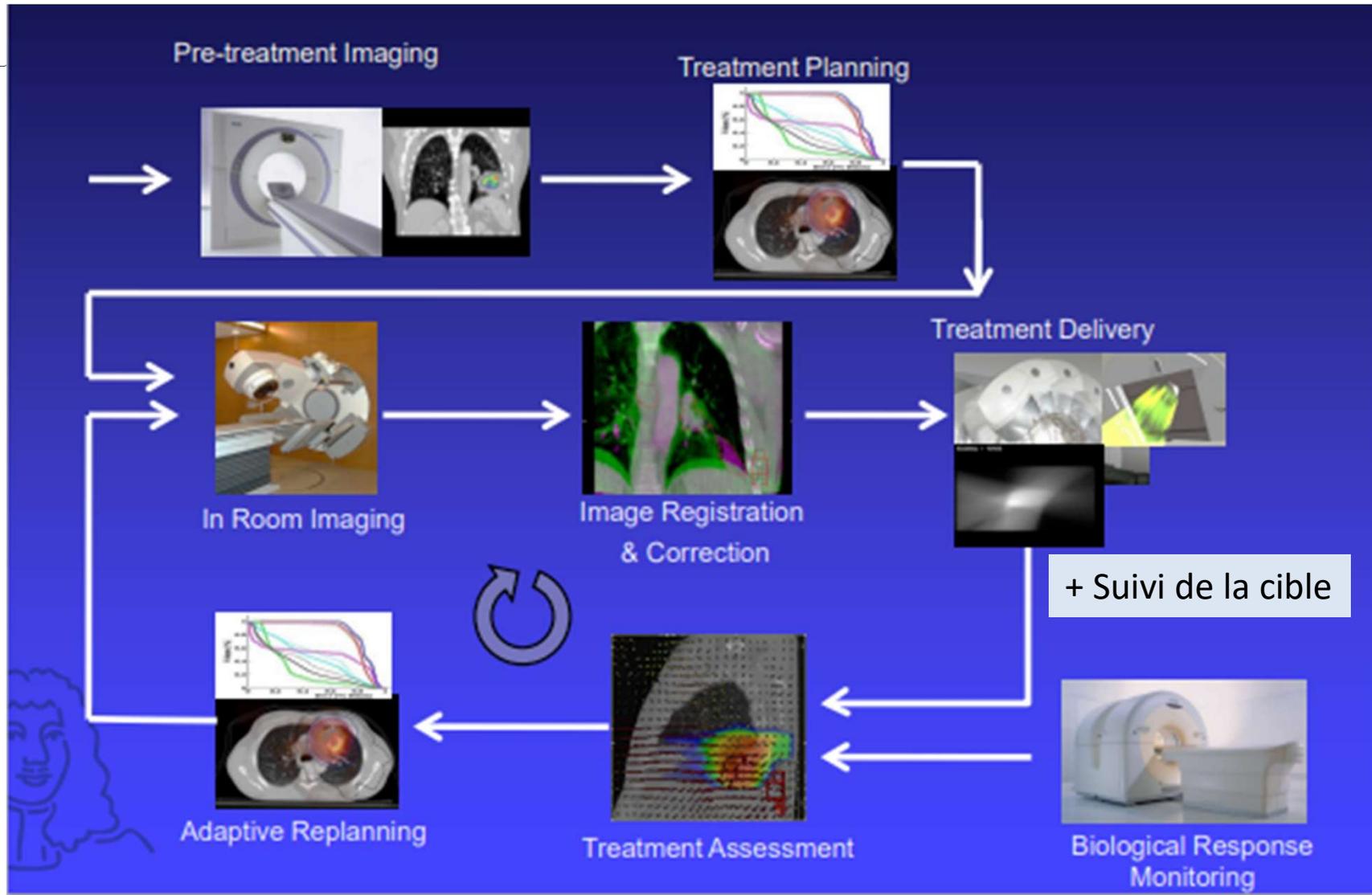
1960



1950

CBCT: 41% en 2013 vs 86% en 2019

De l'imagerie à toutes les étapes



*JJ Sonke, cours Estro IGRT 2022



IGRT: Image-Guided Radiation Therapy

Radiothérapie Guidée par l'Image

Utilisation fréquente de l'imagerie dans la salle de traitement avec prises de décisions permettant d'améliorer la précision de délivrance de la radiothérapie

-> pour toutes les techniques de traitement

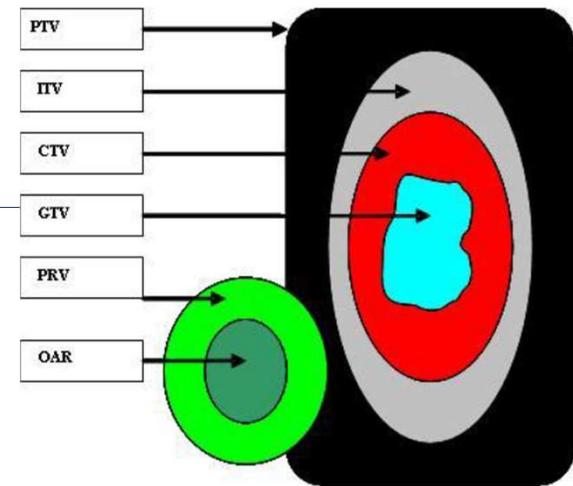


Les objectifs de l'IGRT

- Améliorer l'efficacité du traitement / Réduire les toxicités
 - Délivrer la bonne dose au bon endroit
 - Adapter le traitement aux évolutions
- Réduire le nombre de séances
- Permettre les ré-irradiations
- Faire progresser les pratiques et les techniques

Les marges de traitement

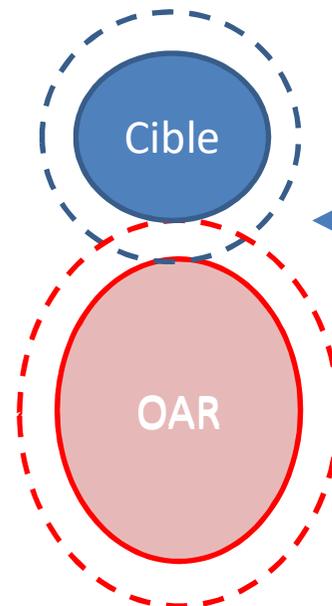
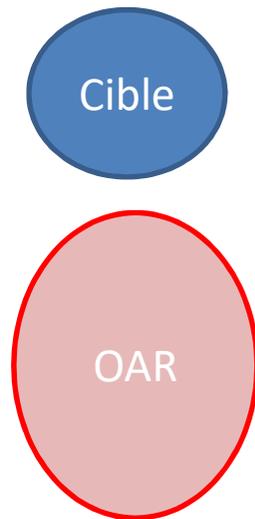
- Cible et Organes à risques
- Planification initiale \neq Traitement
 - Incertitudes = nécessité de marges



Définitions ICRU



Simulation du traitement



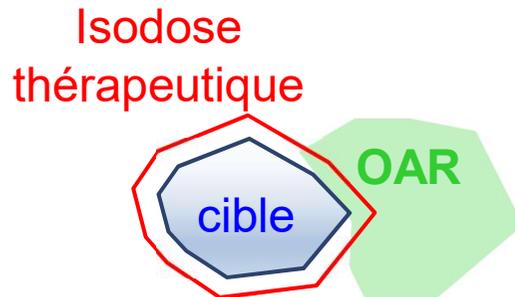
Traitement

Compromis
entre control
local et toxicité

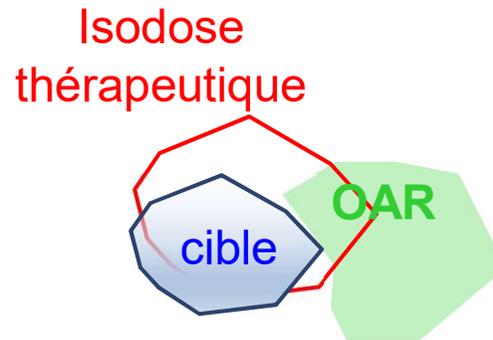
1. Gérer le positionnement de la cible

- Avant la séance
 - Eviter les erreurs systématiques
 - Prise en compte des modifications inter-séances
 - Pendant la séance
 - Prise en compte des modifications intra-séances
 - Suivi des mouvements de la lésion
- Remplissage Vessie/Rectum
- Perte de poids
- Réduction tumorale
- Œdème
- Inflammation
- Epanchement pleural
...

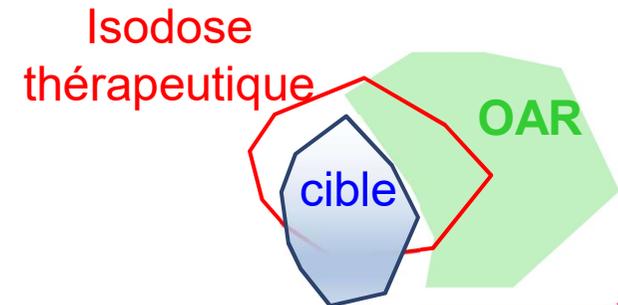
Planification
initiale



Mauvais
repositionnement



Modifications anatomiques
Intra-séance et inter-séance





2. Prise en compte des mouvements

- Maitrise / Personnalisation des marges nécessaires
- Réduction des volumes traités
- Organes concernés: Poumons, Œsophage, Foie, Pancréas, Reins, Glandes surrénales, Prostate...
- Protection du cœur (cancer du sein), du poumon...

Exemple: Prise en compte de la respiration

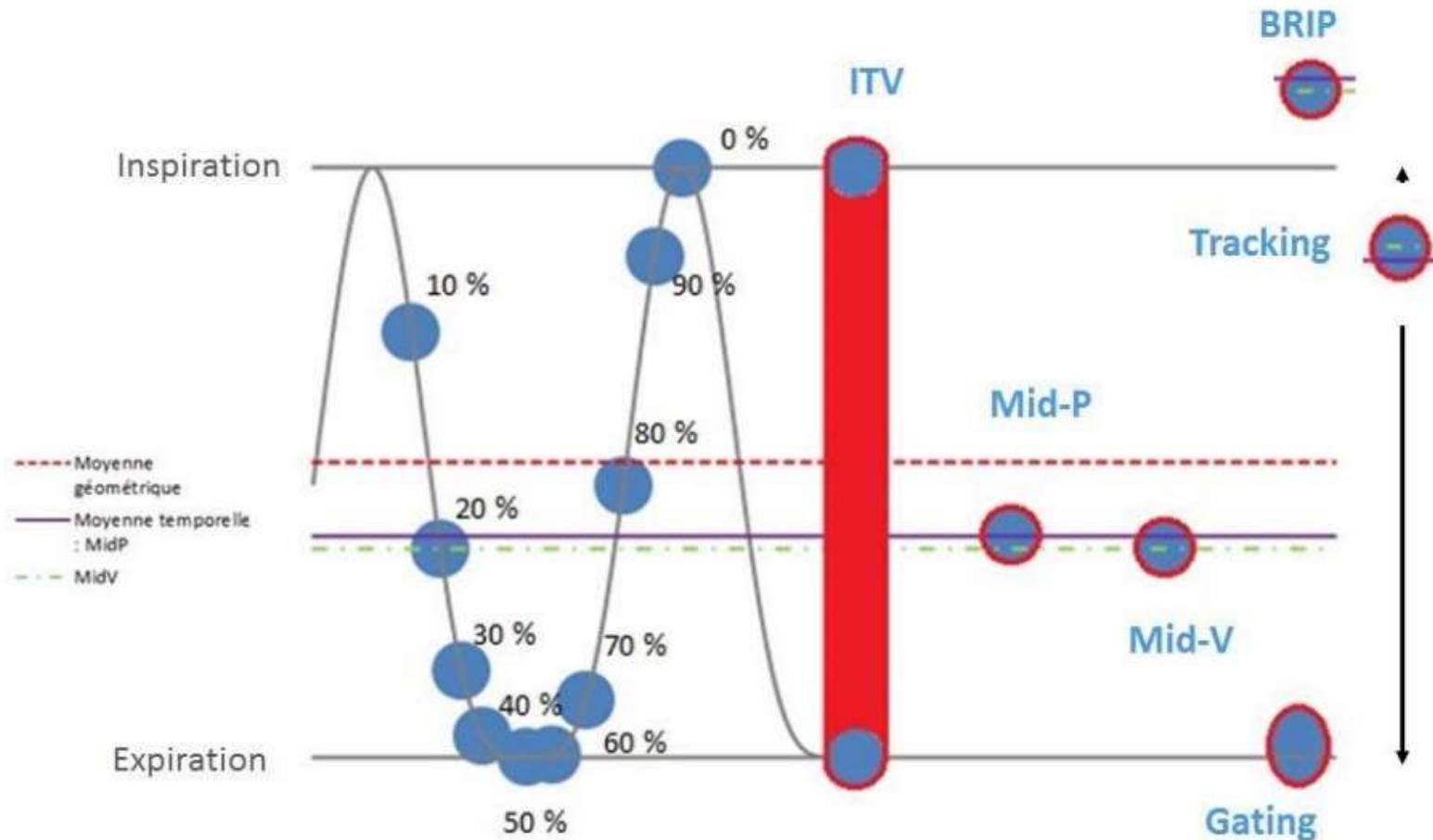


Diagramme représentant les stratégies de gestion respiratoire actuelles (Image F. Oger).



Définitions

- Gating
 - L'irradiation est permise uniquement quand la cible se trouve dans la « fenêtre » de position souhaitée
- Tracking
 - L'irradiation suit la position de la cible en temps réel et s'adapte
- Blocage respiratoire
 - La respiration est bloquée afin de délivrer le traitement dans la position définie



Matériels

- Imageries ionisantes (RX kV, MV...)
- Imageries non ionisantes (US, IRM, Radiofréquence...)
- Différents techniques
 - Planaire (2D)
 - Ciné (2D dynamique)
 - Volumétrique (3D)
 - Localisation de marqueurs
 - Suivi (tracking) de marqueurs
 - Détection de surface et recalage
 - Suivi de surface
- Techniques pouvant être complémentaires

Systemes Irradiants



Systemes embarques

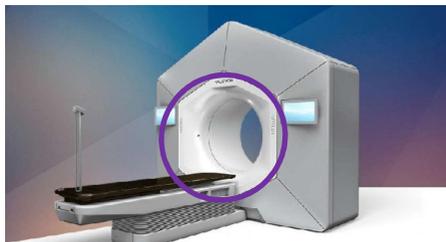
MV kV



I view (I.portale) XVI Elekta (CBCT)



I view (I.portale) OBI Varian



Halcyon Varian

Systemes kV peripheriques



ExacTrac Brainlab



Cyberknife Accuray

CT on rails



MVCT



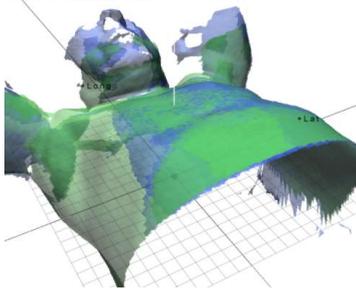
Tomotherapy

Systemes non irradiants

DéTECTEURS DE SURFACE

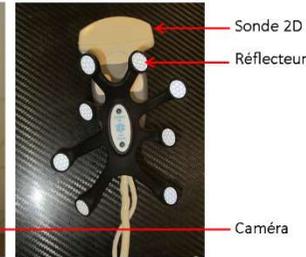


Align RT (VisionRT)



Catalyst (C-Rad)

US

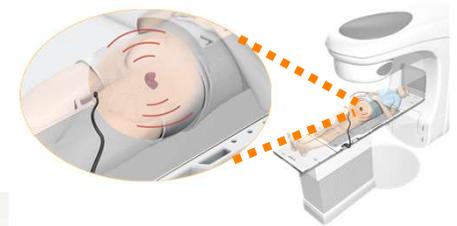


Clarity, Elekta

RADIO-FRÉQUENCE

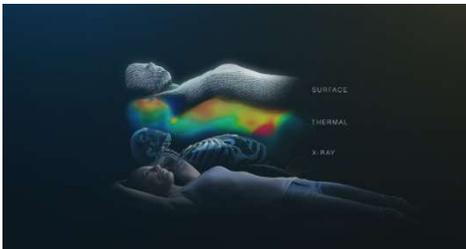


Calypso, Varian



RayPilot, MicroPos

IRM



Exac Trac Dynamic (Brainlab)



MRIdian (Viewray)



Unity (Elekta)

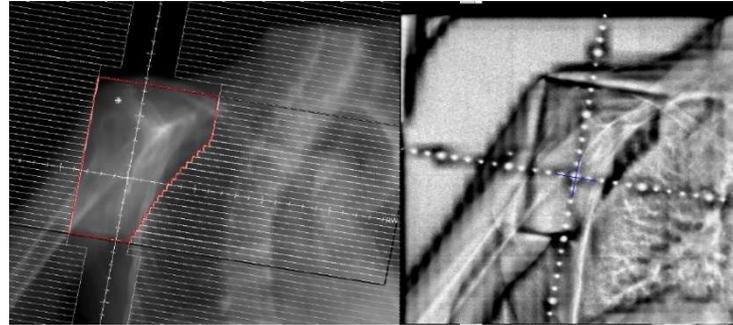


Imageries 2D Embarquées sur l'appareil

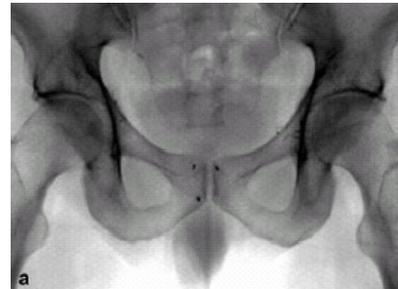
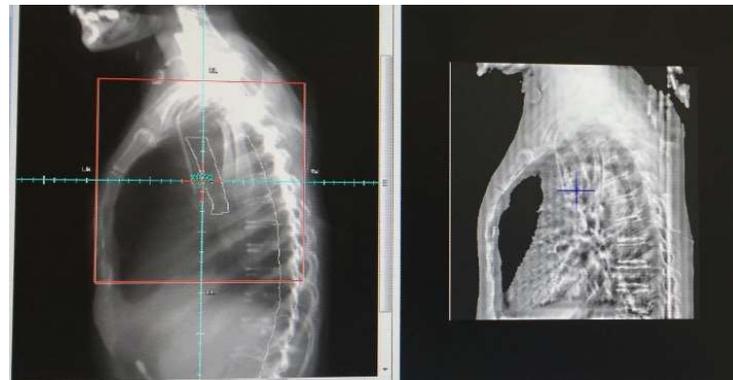


Exemple Elekta

MV



kV



- Rapide
- Faible contraste
- Recalage osseux principalement
- Pose de fiduciaires pour certaines localisations

Imagerie 2D Externe

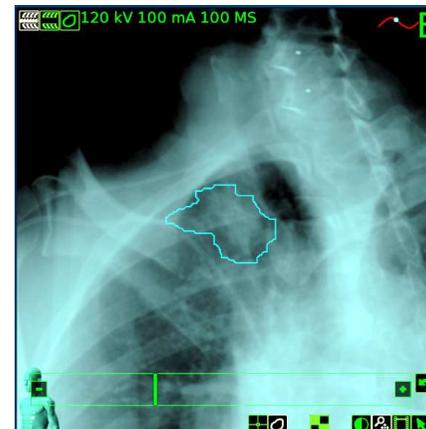
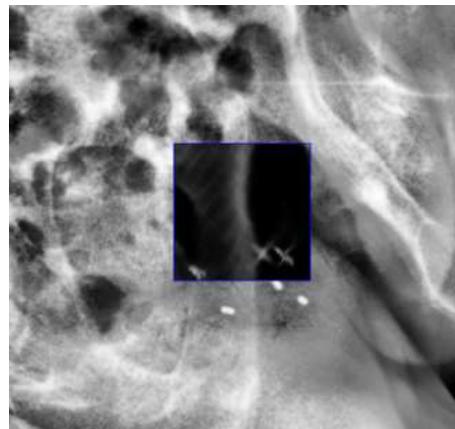
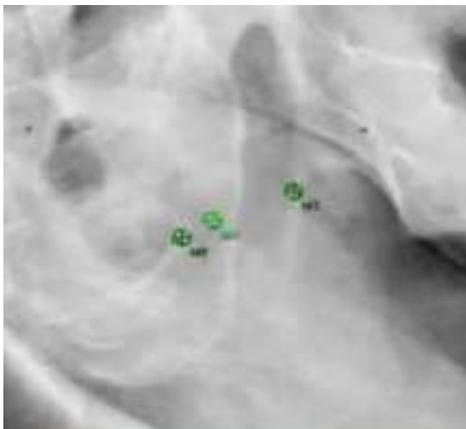
Exactrac sur Linac



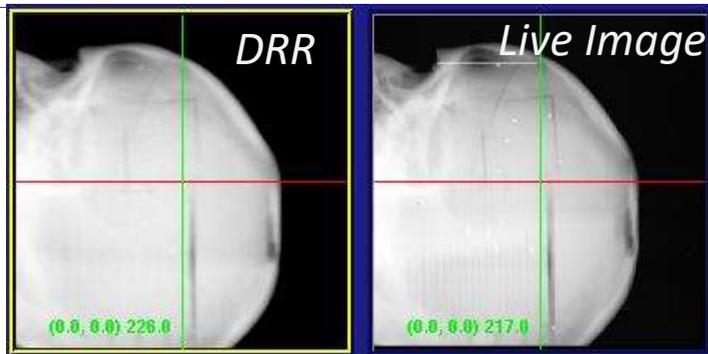
Cyberknife



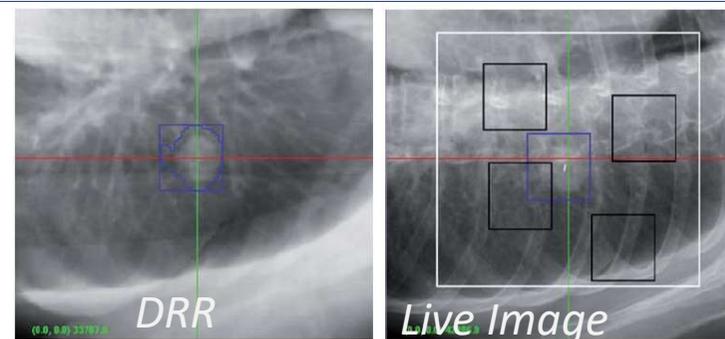
Mis au point en 1987 par J. Adler



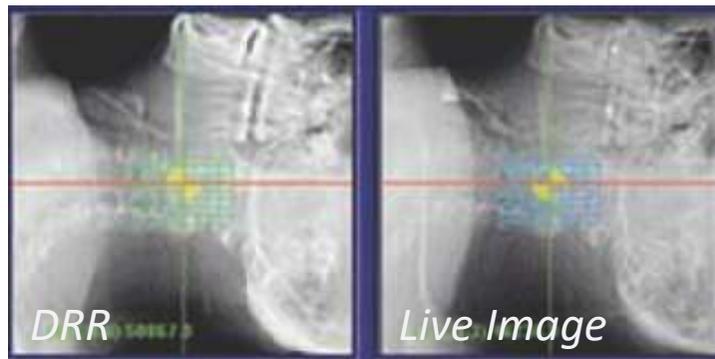
Utilisation du 2D-kV: exemple du *Cyberknife*



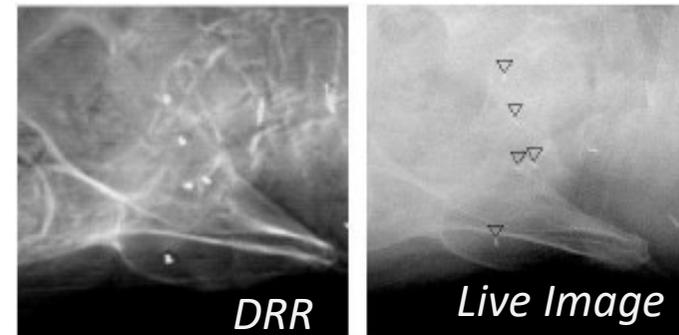
6D Skull Tracking
Reconnaissance basée sur la boîte crânienne



Xsight® Lung Tracking System
Pour les lésions périphériques >15mm,
reconnaissance basée sur les différences de contraste



Xsight® Spine Tracking System
Reconnaissance basée sur les corps vertébraux

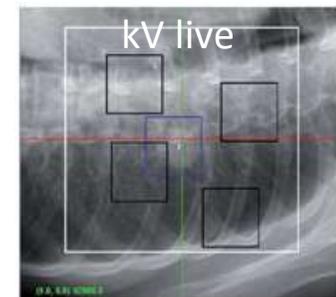
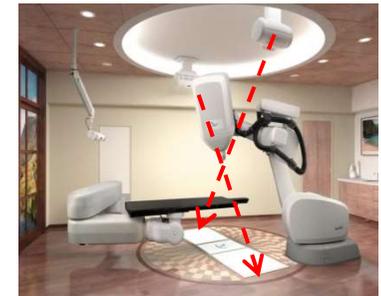
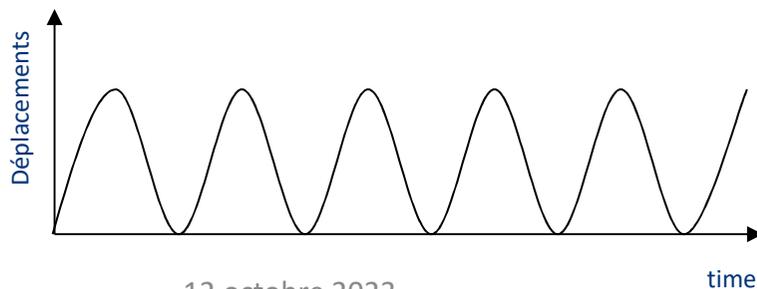


Fiducial Marker Tracking
Utilisation de 3 à 5 grains d'or +/- suivi respiratoire

Tumeurs pulmonaires au Cyberknife

X-SIGHT LUNG + SYNCHRONY

- Identification de la tumeur en dosimétrie (**contourage**)
- Génération des DRR avec le *volume de tracking*
- Réalisation de clichés avec les tubes RX
- Identification du volume par recherche de similarités sur les images *kV live*
- Gating respiratoire en parallèle :
 - Utilisation d'un gilet
 - Mise en place de diode
 - Modèle de cycle respiratoire

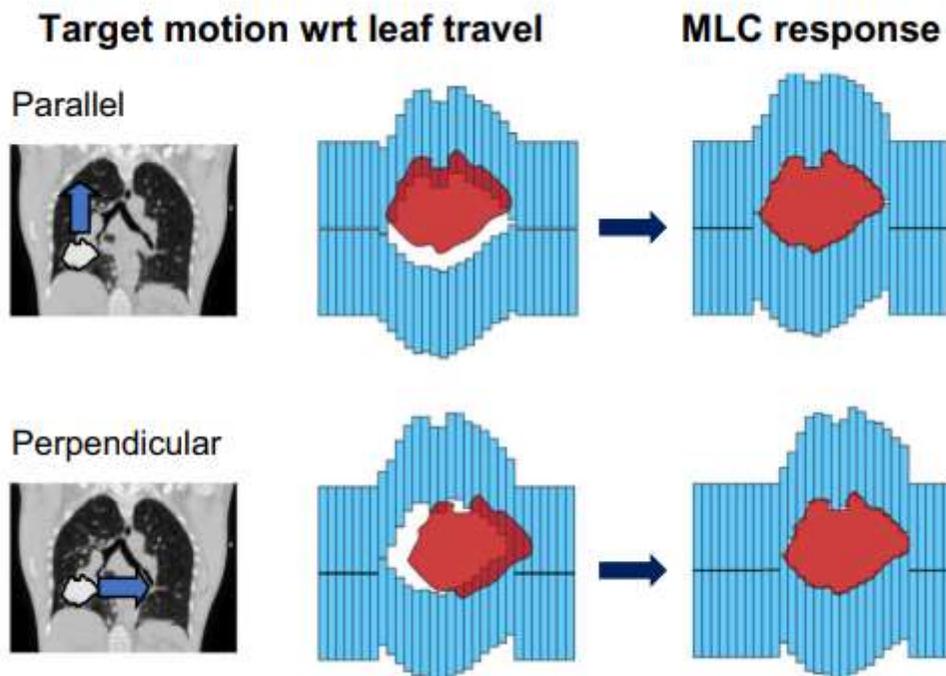


12 octobre 2023

21

Tracking: Adaptation de la forme du collimateur

AAPM 2021 Task Group 264

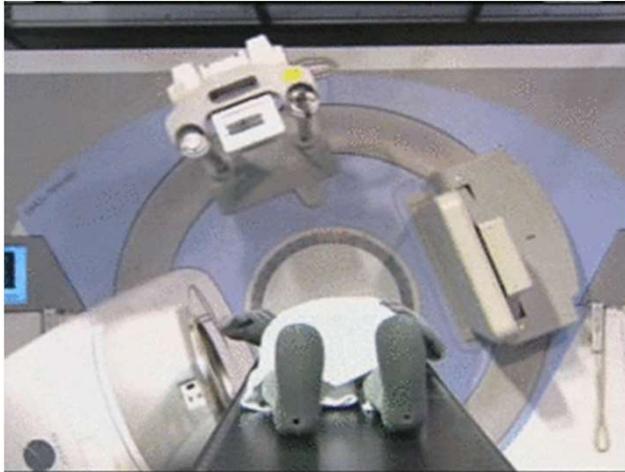


- Prise en compte de la latence du système?
- Boucle d'asservissement

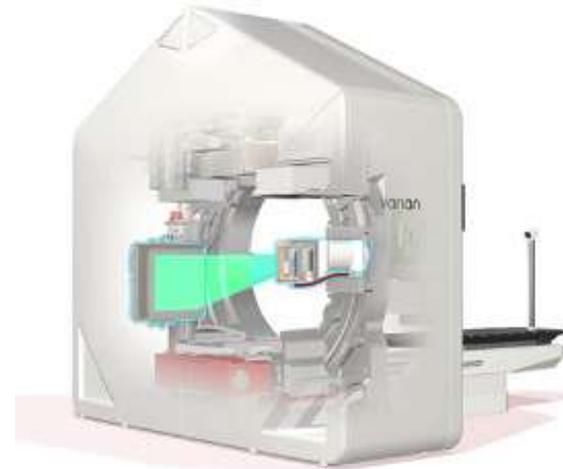


- En développement chez tous les constructeurs
- Intérêt pour les IRM linacs
- Radixact avec Synchrony (Accuray)
- Varian TrueBeam Developer Mode

Imagerie kV 3D (kV-CBCT/kV-CT)



XVI Elekta



kV Halcyon sur
même ring que
linac

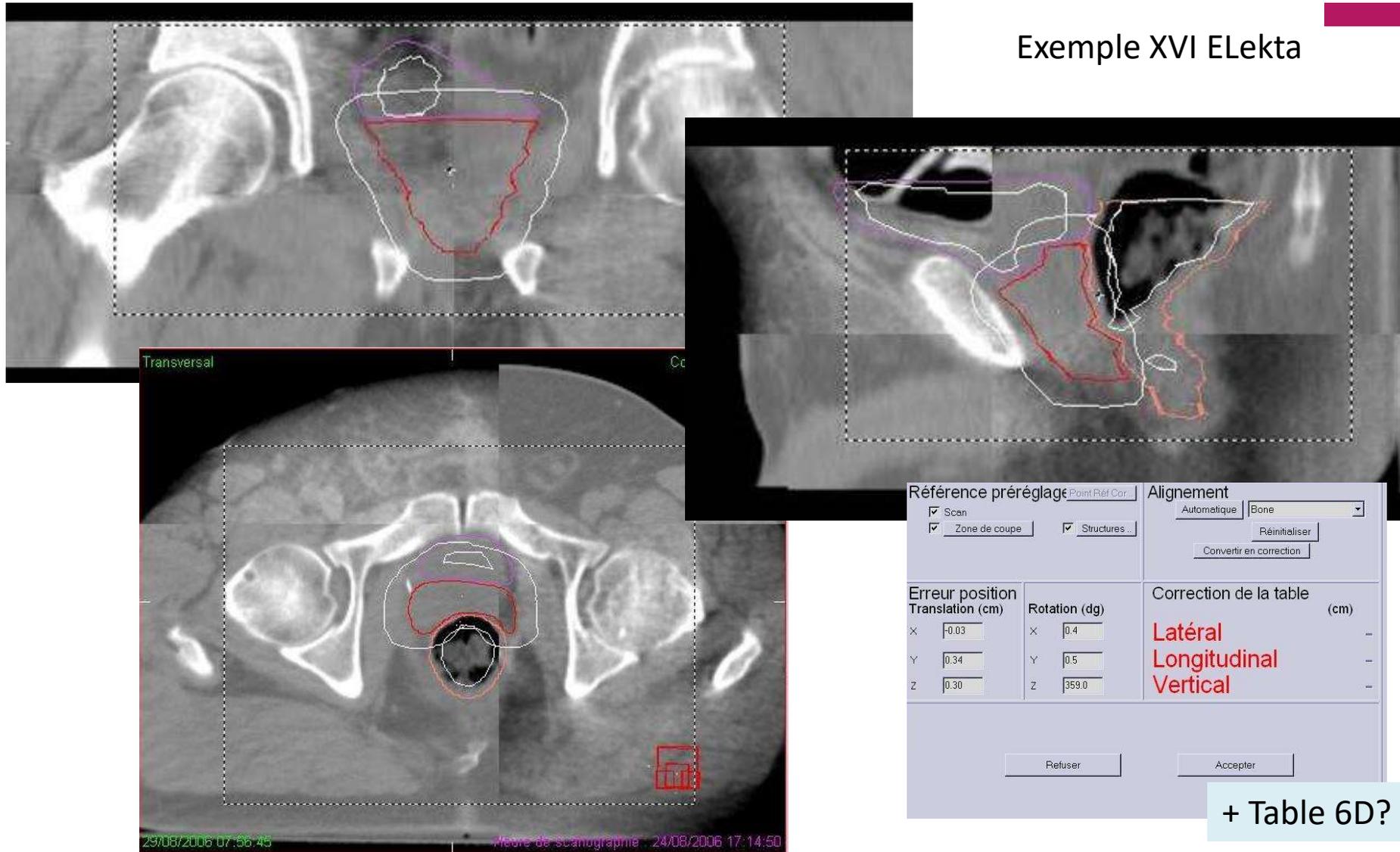


OBI Varian



kV-CT Radixact
Helicoïdal
ClearRT System

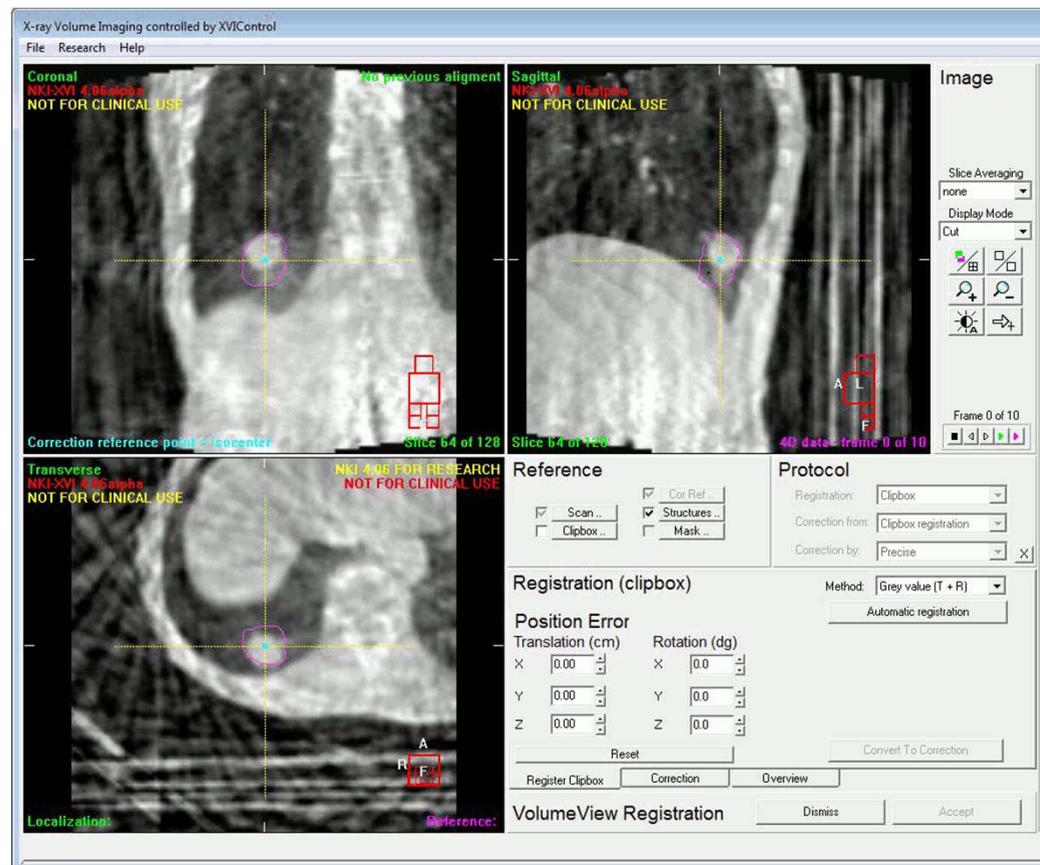
Exemple XVI ELEKTA



- Recalage sur repères osseux, sur les tissus mous, suivi des modifications anatomiques...
- les défis: FOV, Qualité d'image, artefacts, Unités Hounsfield...

kV- CBCT 4D

- Exemple CBCT4D (Symmetry™, Elekta), à partir des projections
 - Etude aussi sur CBCT compensé en mouvement (Rit 2009)
- Varian -> suivi avec marqueur externe (RPM)
- Objectifs: Vérifier l'amplitude ou la position moyenne, réduction des artefacts et du flou par exemple proche diaphragme



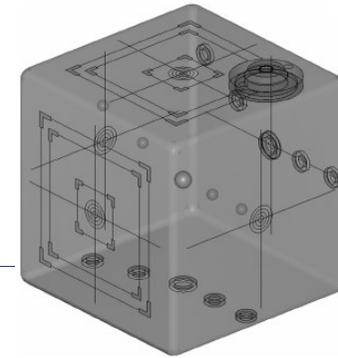
Acknowledgments: J. J. Sonke



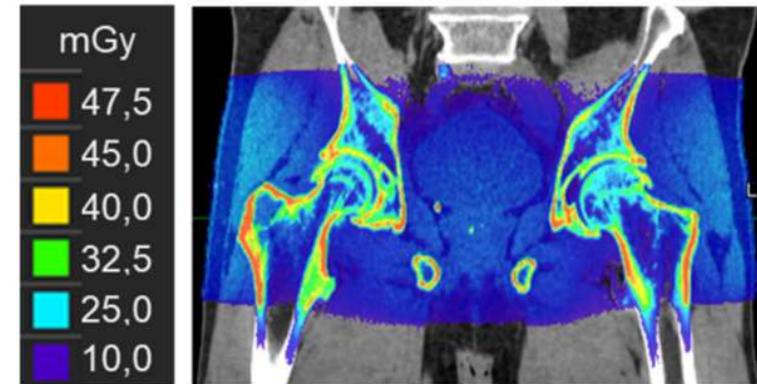
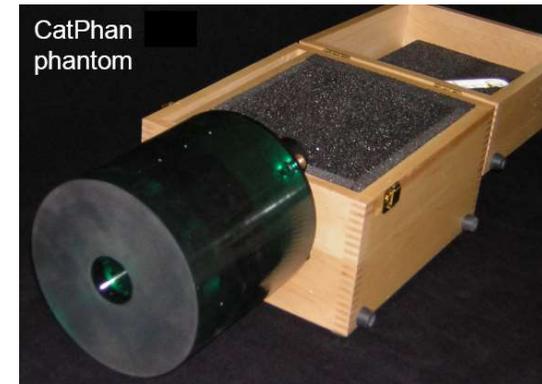
Stratégies

- Quelle(s) modalit (s) pour quel traitement?
- Impact sur le choix des contentions
- Fréquence
- Volume Cible ou organes à risques à privilégier
- Recalages tissus mous, repères osseux, fiduciaire, surfacique
- Correction On-line ou off-line
- Automatique ou manuel
- Qui valide le recalage? Médecin ou Manipulateur
- Degré d'action
- Que faire si hors tolérances?
- Quel bilan clinique?

Contrôles de qualité



- Qualité du rayonnement
- Dose
- Résolution spatiale
- Qualité d'Image
- Uniformité
- Positionnement automatique
- Fusion
- Précision
- Sécurité
- Contrôles End to End
- Fantômes 4D



Exemple recommandations: Report 29 SFPM

Ex dose kvCBCT. Delpon et al. 2020

Les systèmes non irradiants

LES SYSTÈMES ULTRA-SONS

Exemple du système CLARITY®

Image US acquise en simulation versus l'image US acquise le jour du traitement

Application-> Monitoring hypo-fractionnement dans le cancer de la prostate (expérience du CLB)

Caméra infra-rouge

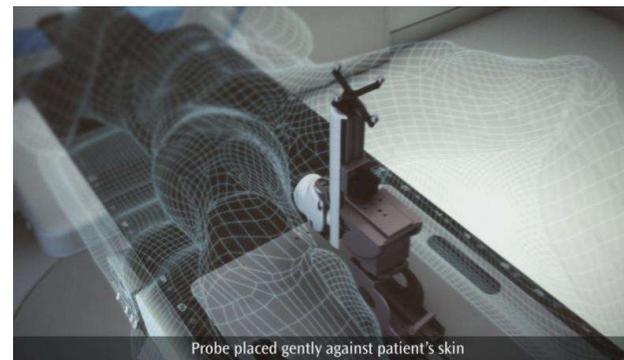


échographe

sonde

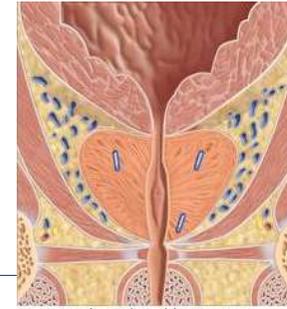
billes infrarouges

sonde transabdominale



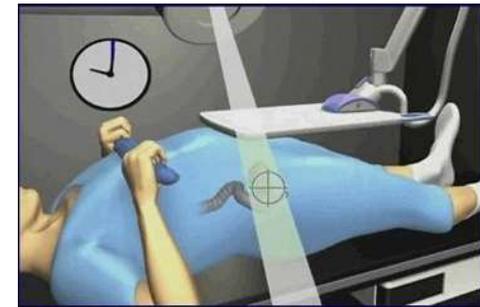
sonde transpérinéale

Traceurs implantables



Transponders placed in prostate

- Complémentaire à l'imagerie
- Suivi en temps réel (Prostate, Poumon...)
- Transpondeurs Calyspo – Varian:
 - 32 micro bobines placées dans un appareil en regard du patient
 - La puissance est délivrée par induction
 - Résonance dans le marqueur implanté
 - Réception de la relaxation par les bobines (triangulation)
- Système Raypilot - Micropos – Medical



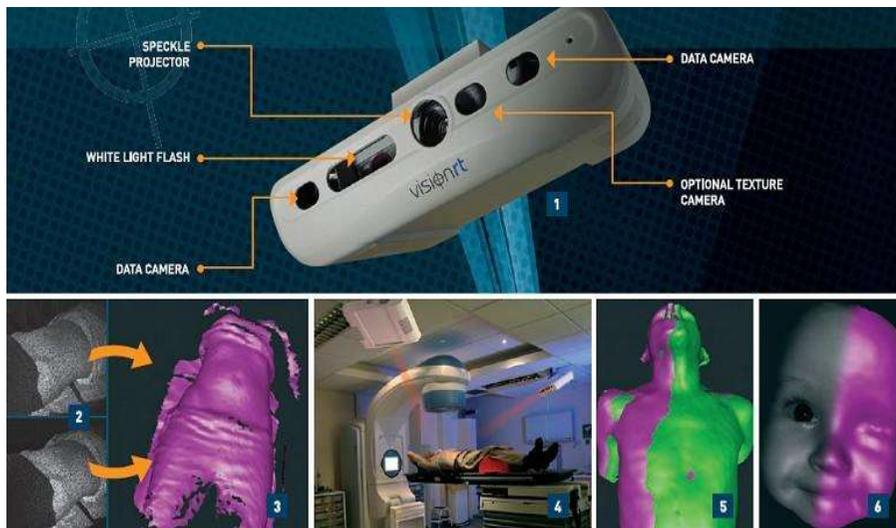
SGRT: Surface Guided Radiation Therapy

Repositionnement sur la surface externe

Complémentaire imagerie RX

Suivi des mouvements:

-> monitoring + blocage respiratoire



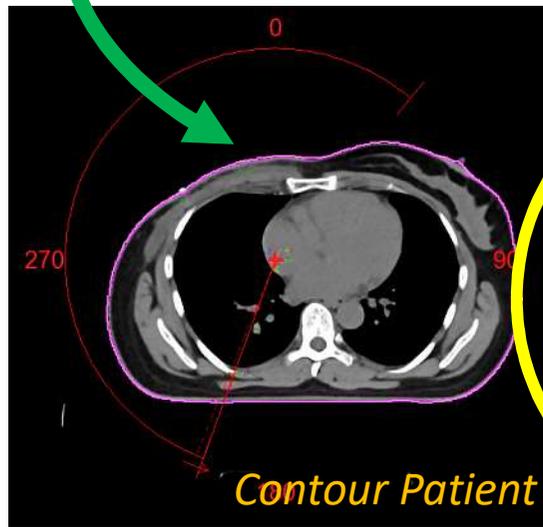
Utilisation de la SGRT?

SGRT = Comparaison des surfaces
Mise en corrélation (\pm facile) avec Imagerie interne (CBCT...)



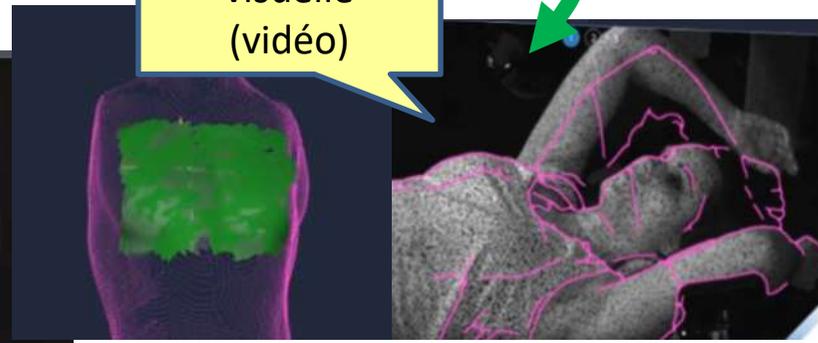
Comparaison quantitative sur la ROI iso

Comparaison visuelle (vidéo)



VRT _{cm}	0.27
LNG _{cm}	-0.02
LAT _{cm}	-0.21
MAG _{cm}	0.34
YAW'	0.1
Roll'	-0.9
Pitch'	0.8

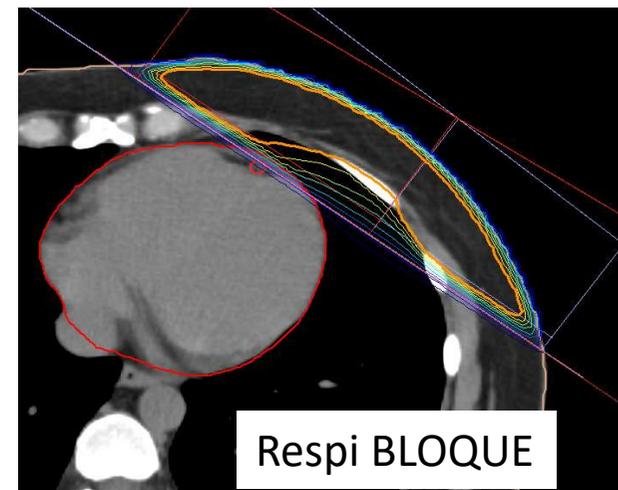
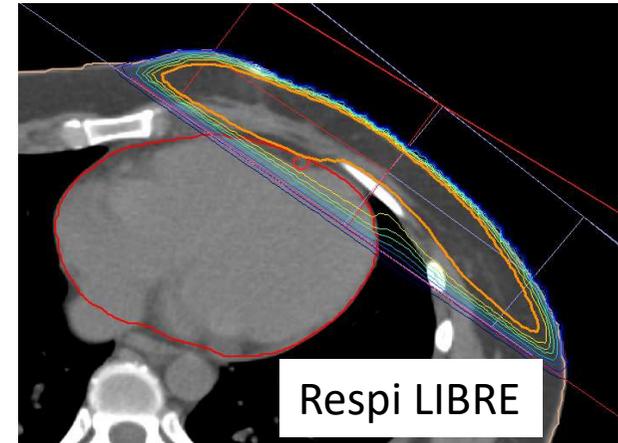
Monitoring patient movement



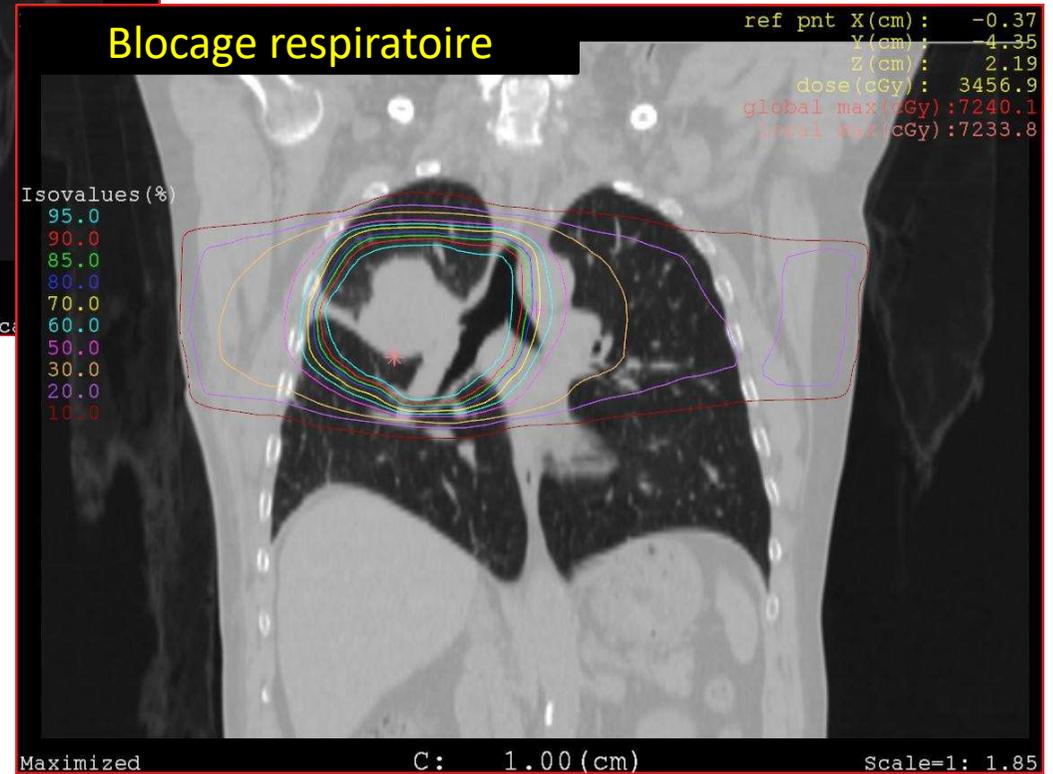
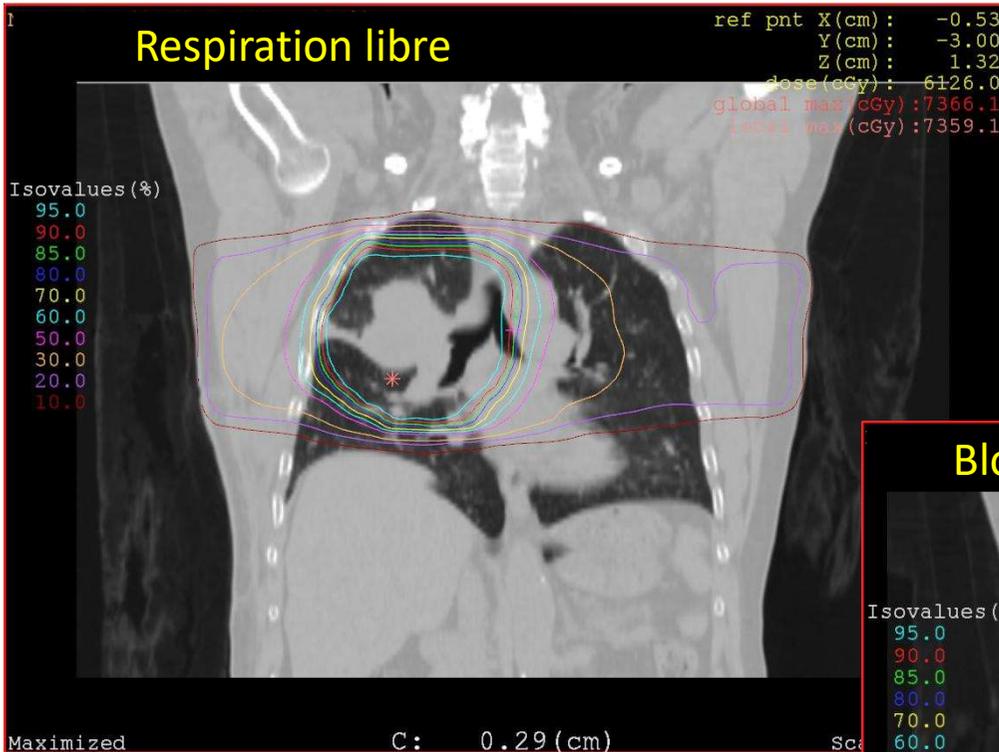
Surface ou video temps réel
Contour Patient reporté

Blocage respiratoire: Traitement du sein

- Développement ++ avec SGRT
- But: **Réduction Dose Coeur**
- Sélection des patients
- Coaching ++
- Apnée autour de 30s
- Amplitude suffisante: > 1cm
- Images + Traitements rapides



Autres applications: poumon

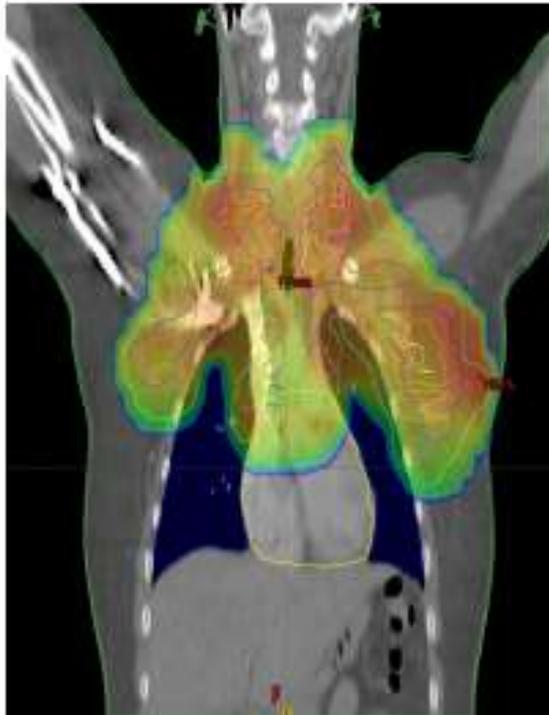


Avantage blocage:

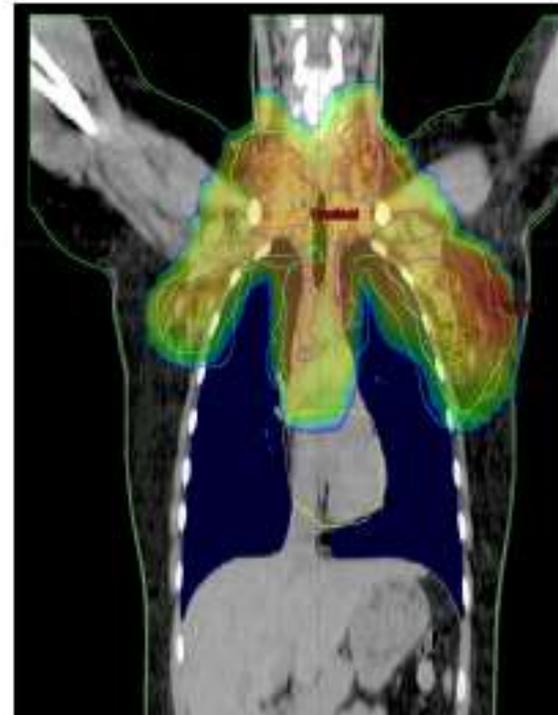
- Réduction du volume cible
- Dilatation des poumons

Maladie d'Hodgkin

Free breathing



DIBH

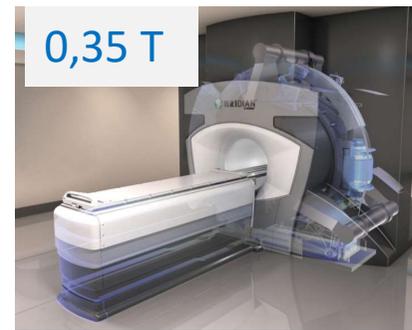


M. Aznar, cours ESTRO IGRT 2022

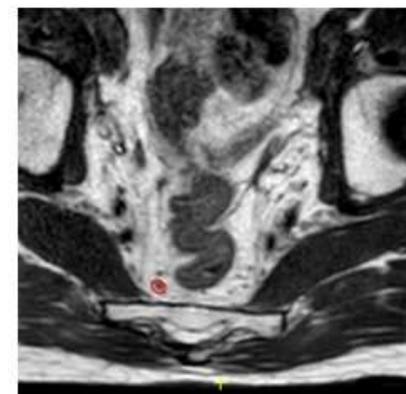
IRM Linacs



- Imagerie IRM
 - non ionisante
 - Visualisation tissus mous ++
 - Multi-séquences
 - Anatomique et fonctionnelle
- Surtout région abdomen
- Images pendant le traitement
 - Monitoring
 - Asservissement Respiratoire
 - Dosimétrie Adaptative!
- Evaluation de la réponse au traitement
- Difficultés
 - Dépôt de dose perturbé
 - Encombrement, Antenne
 - Distorsion spatiale
 - Artefacts métalliques dans le crâne
 - Réduction des volumes cibles contourés
 - ex: Volume Prostate -15 à -20% MRI vs CT
 - Densité électroniques? (CT synthétique)



 VIEWRAY* | Visibly Different

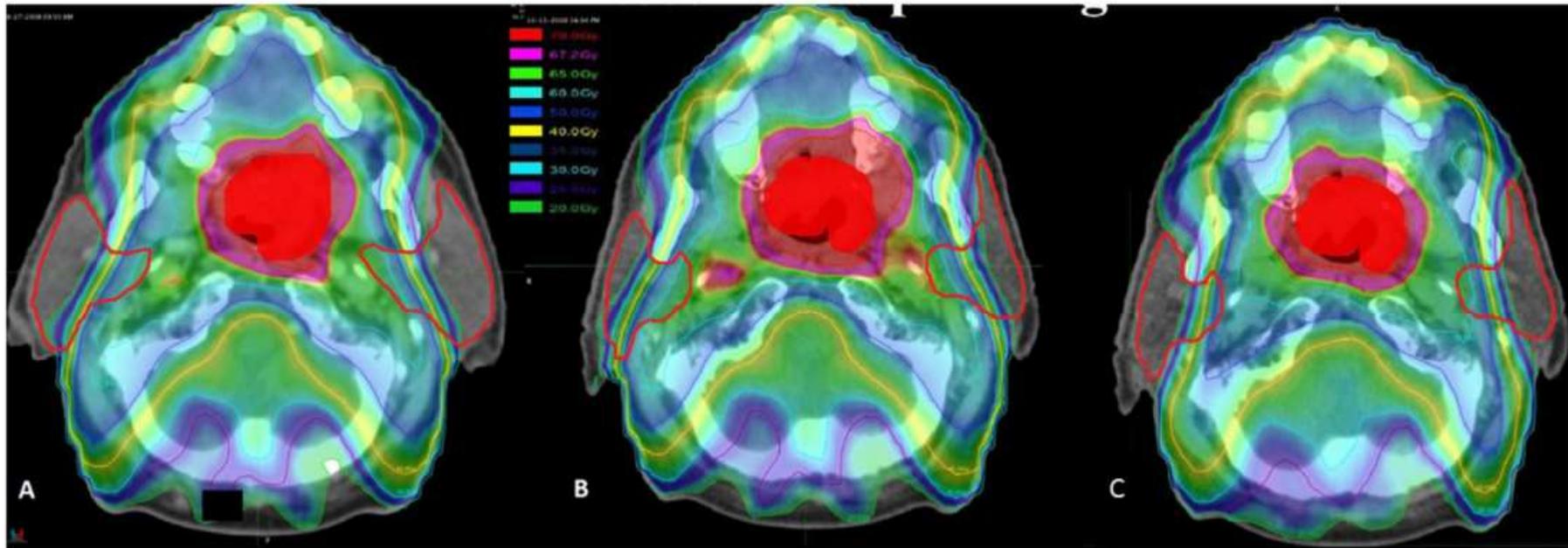


MR - Imaging @ Unity



CBCT

Dosimétrie Adaptative



Initial planning:
Parotid gland sparing

During treatment
(in absence of replanning)

Replanning:

De Crevoisier et al. 2022



Critères d'évaluation?

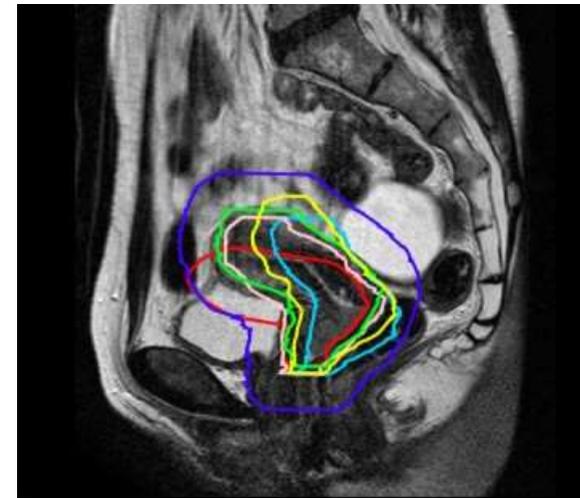
- Surdosages
- Couverture des CTVs
- Doses au OARs...

Dosimétrie adaptative

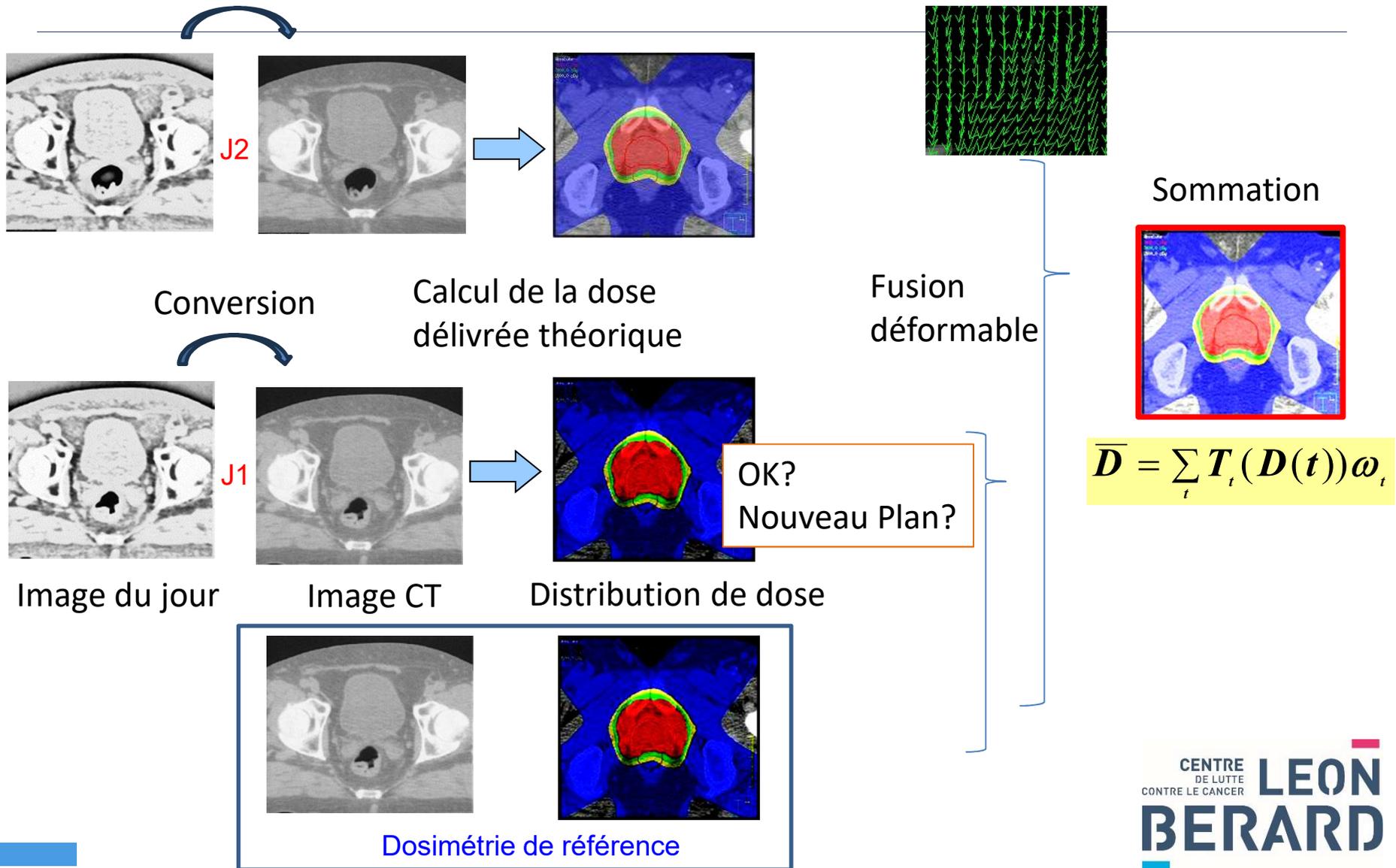
- Variation aléatoires (Prostate...)
 - Evaluation On-line
 - Exemple IRM Linac
 - Bibliothèque de plans
- Image 3D du jour -> densités électroniques?
 - Densités forcées
 - Déformation (CT dosi -> Images du jour)
 - Intelligence artificielle
 - Autres: Correction à partir du CT dosi,...
- Variation progressive (ORL...)
 - Evaluation off-line de la dose délivrée
 - Ou sur nouveau scanner dosimétrique
 - Outils de fusion élastique + contourage automatique
 - Nouvelle dosimétrie si nécessaire
 - Automatisation
 - IA
- Outils disponibles ou en cours de développement chez tous les constructeurs

MRI/linac integration Jan J.W. Lagendijk et al.

Radiotherapy and Oncology 86 (2008) 25–29
www.thegreenjournal.com

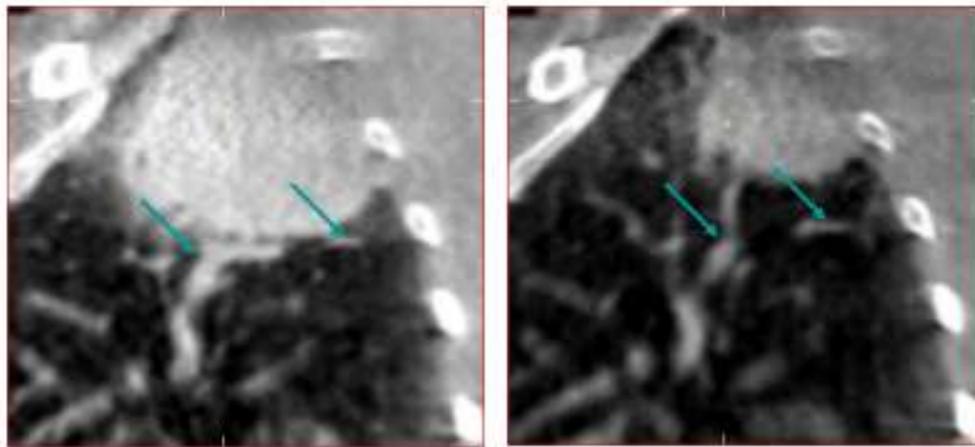


De nouveaux workflow



Dosimétrie Adaptive: Discussion

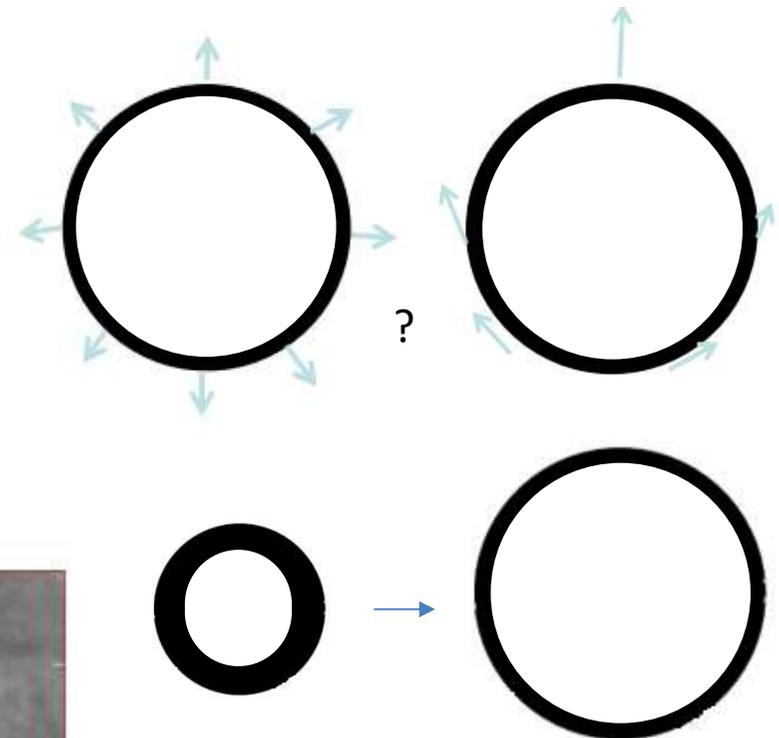
- Maladie résiduelle invisible
- Validation des fusions déformables?
- Impact clinique réel à démontrer
- Allongement des séances
- Formation / disponibilité du personnel
- Délégations des tâches
- Gestion des pannes



Ex: Tumeur pulmonaire

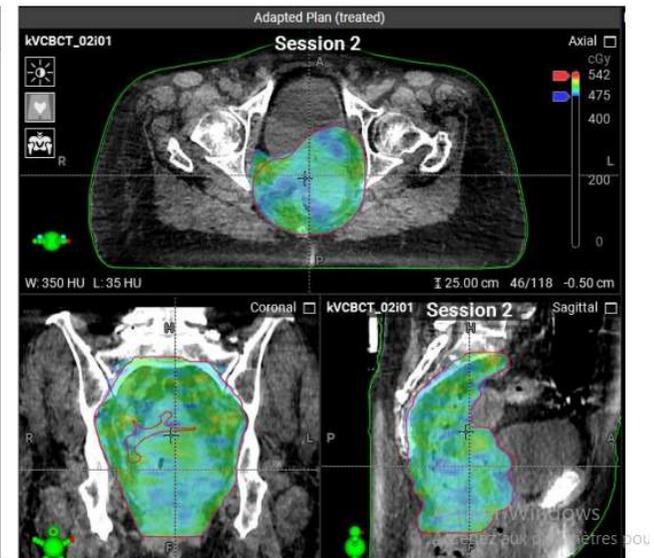
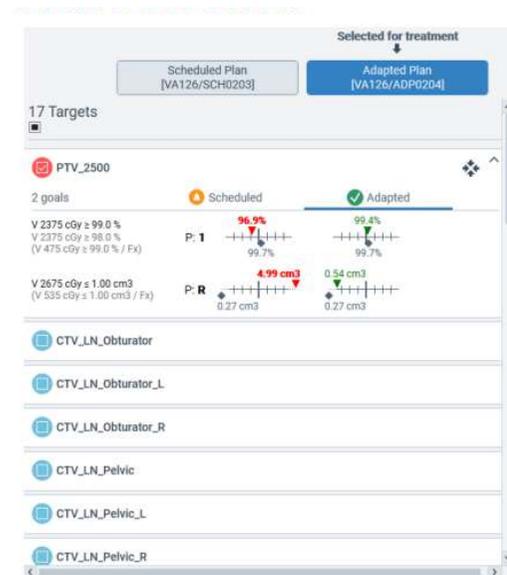
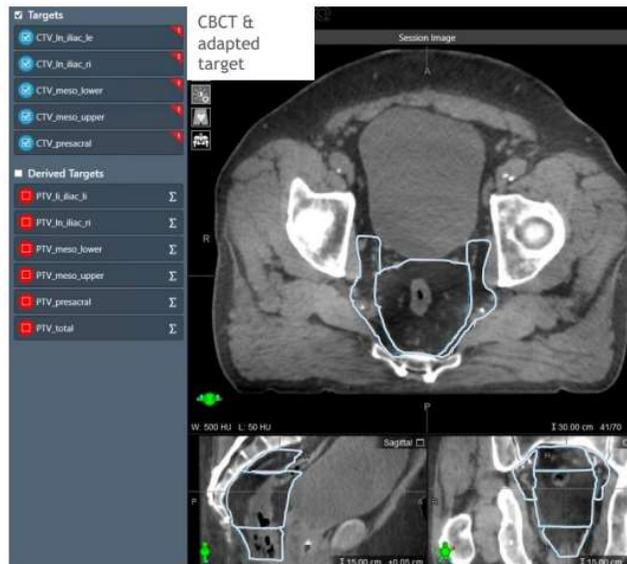
JJ Sonke NKI

The Christie NHS Foundation Trust



Ex: Paroi Vésicale

Exemple ETHOS (Varian)



Workflow intégré, outils IA, aides à la décision...

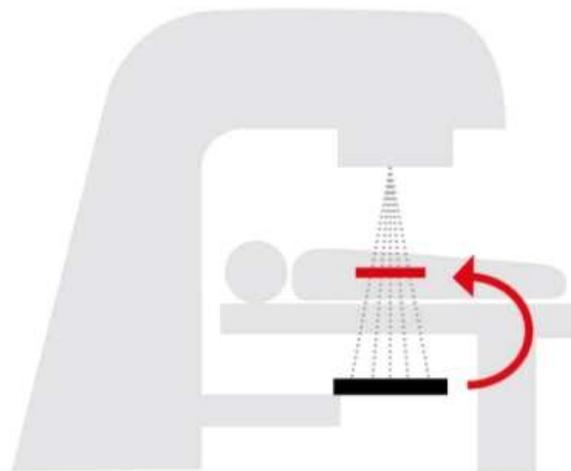
Information Complémentaire:

« Dosimétrie in vivo »

- Dose planifiée = Dose délivrée?
 - Mesure en sortie d'accélérateur
 - Mesure en sortie de patient
- Vérification du plan de traitement « du jour »



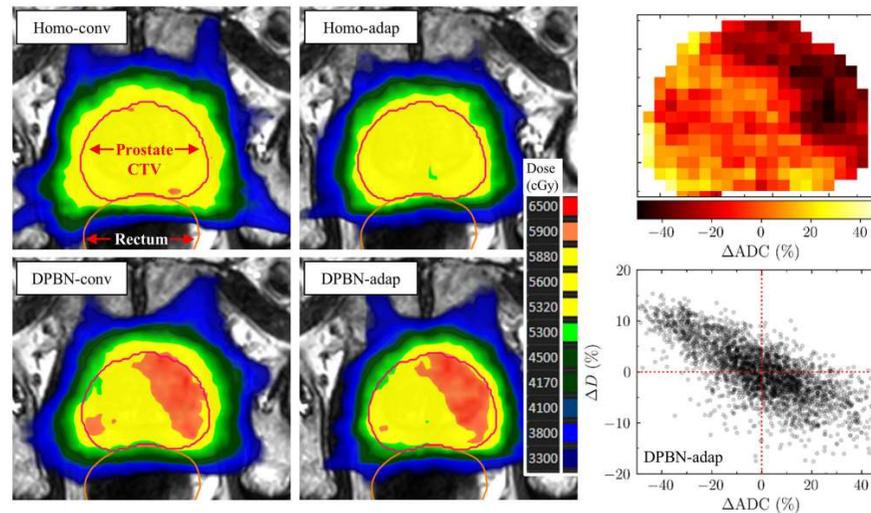
*exemple: IBA Dosimetry: Dolphin



*exemple: VERIQA PTW

Réponse au traitement

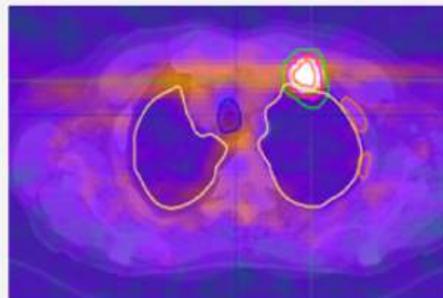
- Une tumeur est biologiquement hétérogène
 - > hypoxie, vascularité, prolifération cellulaire...
 - > Imagerie Fonctionnelle, Biologique (TEP, IRM...)
 - > Boost Intégré - Dose Painting
- La réponse au traitement est également hétérogène
 - > Biological Treatment Adaptation (IRM-linac...)
- Prédiction de la réponse après Radiothérapie



DPBN = Dose Painting By Numbers
ADC = Apparent Diffusion Coefficient

Fredén et al. 2022

Biology-Guided Radiotherapy: PET-Linac

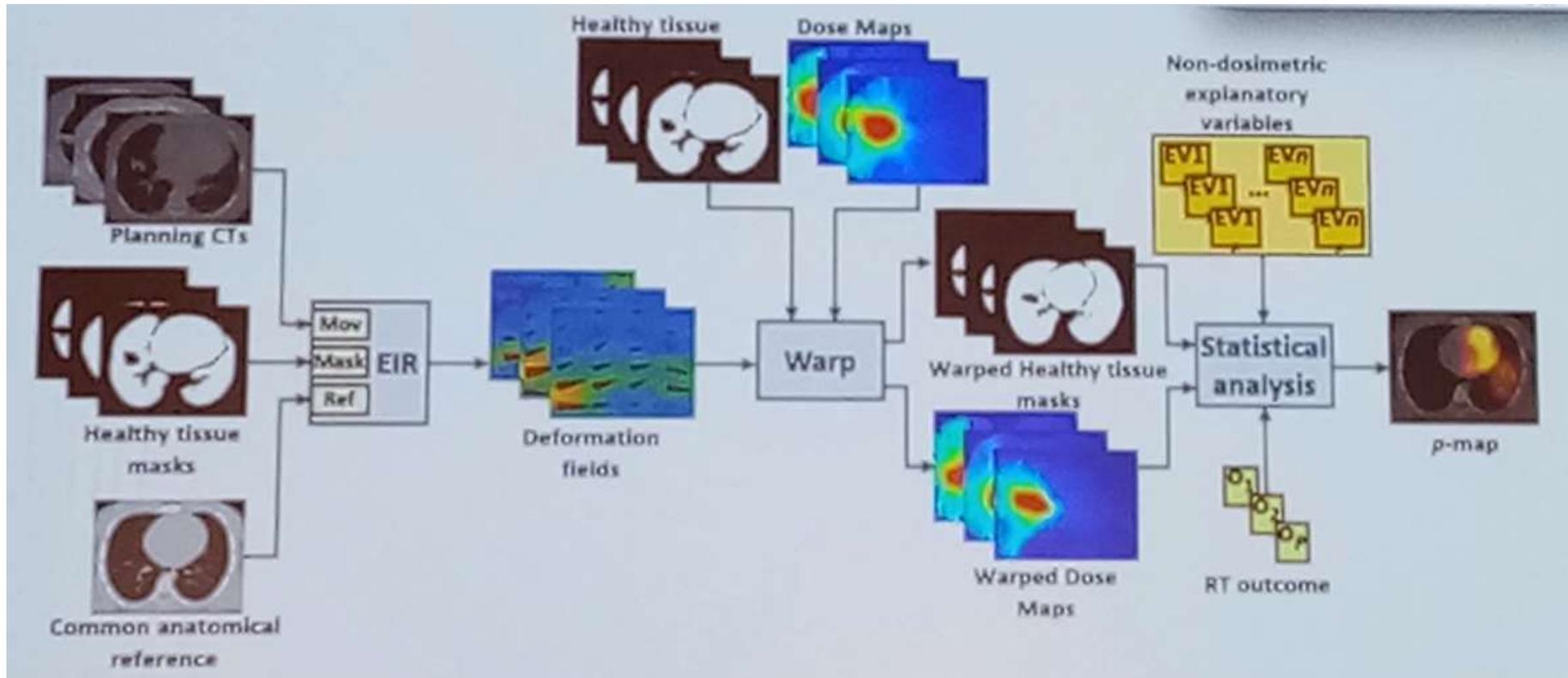


The prostate-specific PET radiotracer, ^{18}F -DCFPyL, signals avid bone metastasis in a patient with prostate cancer. Image courtesy of City of Hope.

- Réduire / Mieux définir les volumes cibles
- Dose personnalisée, adaptée
- Tracking des mouvements



Big Data, Data Mining



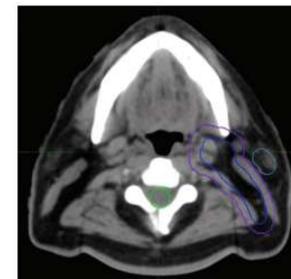
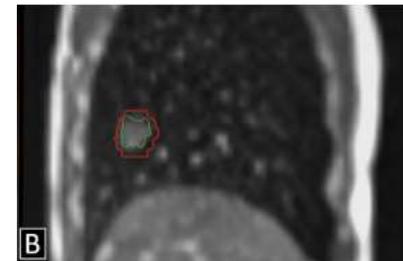
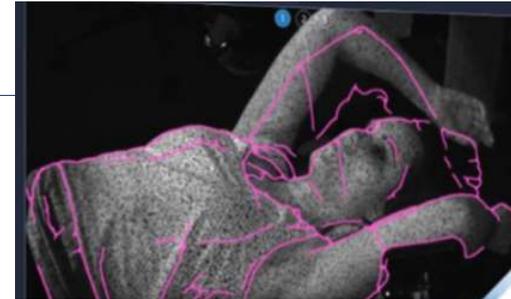
Exemple de travaux

Dose surface maps of the heart can identify regions associated with worse survival for lung cancer patients treated with radiotherapy

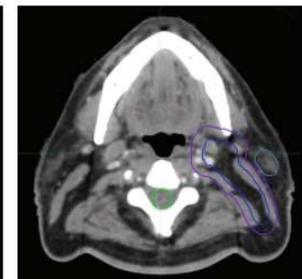
Alan McWilliam^{a,b,*}, Chloe Dootson^c, Lewis Graham^c, Kathryn Banfill^{a,b}, Azadeh Abravan^{a,b}, Marcel van Herk^{a,b}

SYNTHESE

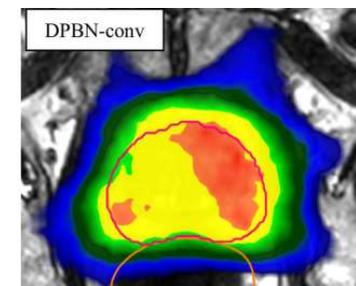
- Plusieurs Imageries
 - Alignement du patient avec large FOV (Surfacique?)
 - Images rapides peu irradiantes synchronisées à l'irradiation (2D?)
 - Images 3D anatomique (suivi des modifications anatomiques, organes à risques...)
 - ...Imagerie Biologique et fonctionnelle
- Compatibles avec l'environnement de Radiothérapie
 - Flux de patient élevé
 - Qualité du faisceau de traitement et sa délivrance
 - Encombrement des salles



ClearRT™



Planning CT







CONCLUSION

- Vers des traitements ciblés et personnalisés
- Améliorer l'expérience, le confort du patient
 - Temps de séance, contention, nombre de séance
- Améliorer l'efficacité / la tolérance au traitement
 - A évaluer!
- Sécuriser la prise en charge

Merci

