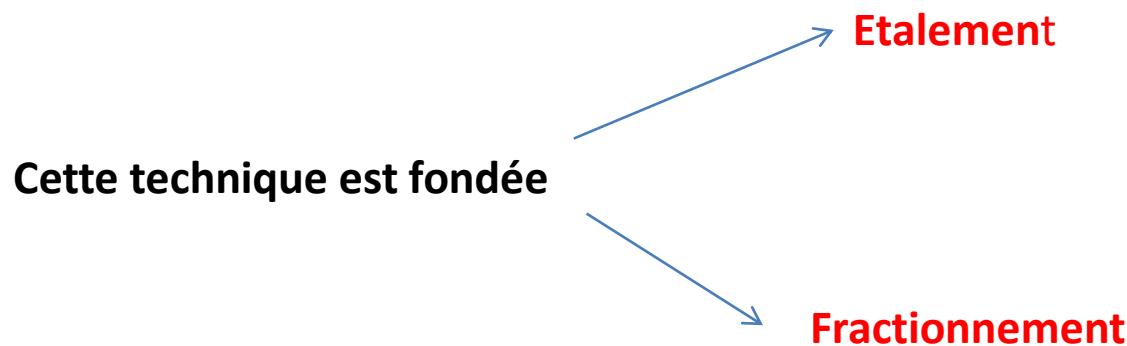


# **CHAP. II RADIOTHÉRAPIE EXTERNE PAR FAISCEAUX DE PHOTONS ET ÉLECTRONS**

**La radiothérapie** est une technique médicale qui utilise les rayonnements ionisants pour détruire les cellules des tumeurs cancéreuses.

**Son objectif** est de délivrer de la manière la plus précise possible la dose de rayonnement prescrite au volume de la tumeur, en épargnant au mieux les tissus sains avoisinants.

La radiothérapie externe consiste à diriger des rayonnements ionisants à fortes doses, 20 à 80 grays (Gy) selon la tumeur et l'organe, à travers la peau et les tissus pour détruire la tumeur tout en épargnant les cellules saines avoisinantes. En bloquant la capacité à survivre ou à se diviser des cellules cancéreuses, l'irradiation va entraîner la disparition de la tumeur.



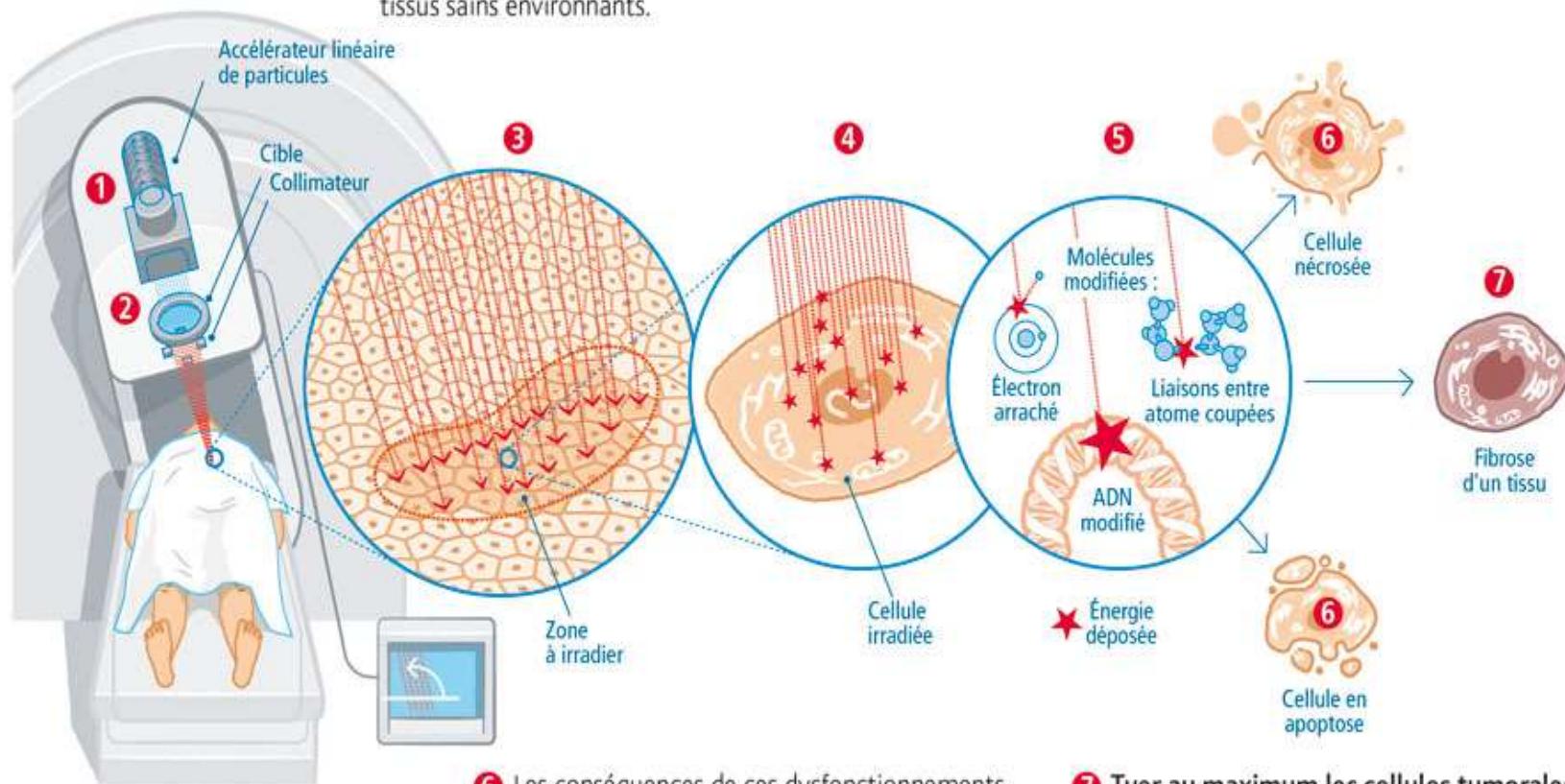
Ce qui permet, entre chaque séance, aux tissus sains traversés par le faisceau d'irradiation de se régénérer plus rapidement que la tumeur. En effet, si les cellules cancéreuses prolifèrent plus rapidement que les cellules saines, elles sont également plus sensibles au rayonnement.

**1** Un accélérateur linéaire de particules accélère des électrons qui vont bombarder une cible en tungstène.

**2** Arrivés sur la cible, les électrons sont freinés. Cela génère une énergie sous forme de photons invisibles à l'œil (rayons X). Un logiciel choisit les meilleurs angles d'incidence pour bombarder la tumeur de ces rayons en épargnant autant que possible les tissus sains environnants.

**3** Les rayons sont « collimatés ». Un collimateur, constitué de lamelles multiples indépendantes les unes des autres, donne au faisceau de rayons la forme souhaitée pour suivre au mieux les contours de la tumeur.

**4** Les rayons déposent de l'énergie sur les molécules biologiques dans les cellules : lipides, protéines, ADN...



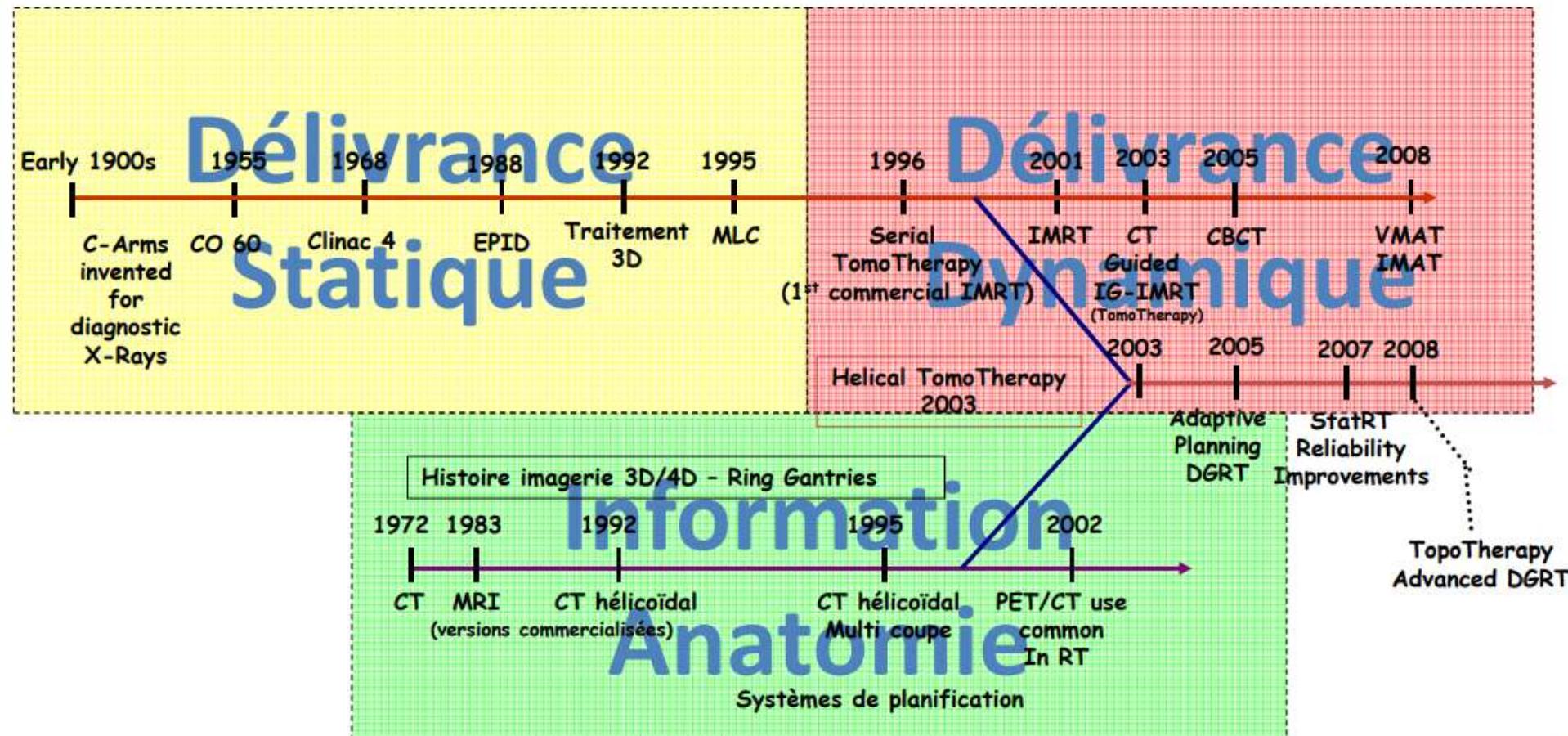
**5** Ces molécules sont modifiées : électrons arrachés, liaisons entre atomes coupées... Elles créent notamment des cassures de l'ADN qui altèrent le fonctionnement des cellules.

**6** Les conséquences de ces dysfonctionnements peuvent conduire la cellule à :

- mourir par nécrose – elles sont détruites;
- mourir par apoptose – une sorte de « suicide » cellulaire – ou être éliminées par d'autres cellules – autophagie;
- continuer à vivre, mais de manière anormale.

**7** Tuer au maximum les cellules tumorales est le but recherché. Les cellules saines voisines peuvent aussi être affectées. Apparaissent alors les effets secondaires comme la fibrose – processus de cicatrisation anormal, qui durcit les tissus – ou un risque de cancer secondaire aux rayons.

## Histoire de La radiothérapie externe



# **Radiothérapie Externe**

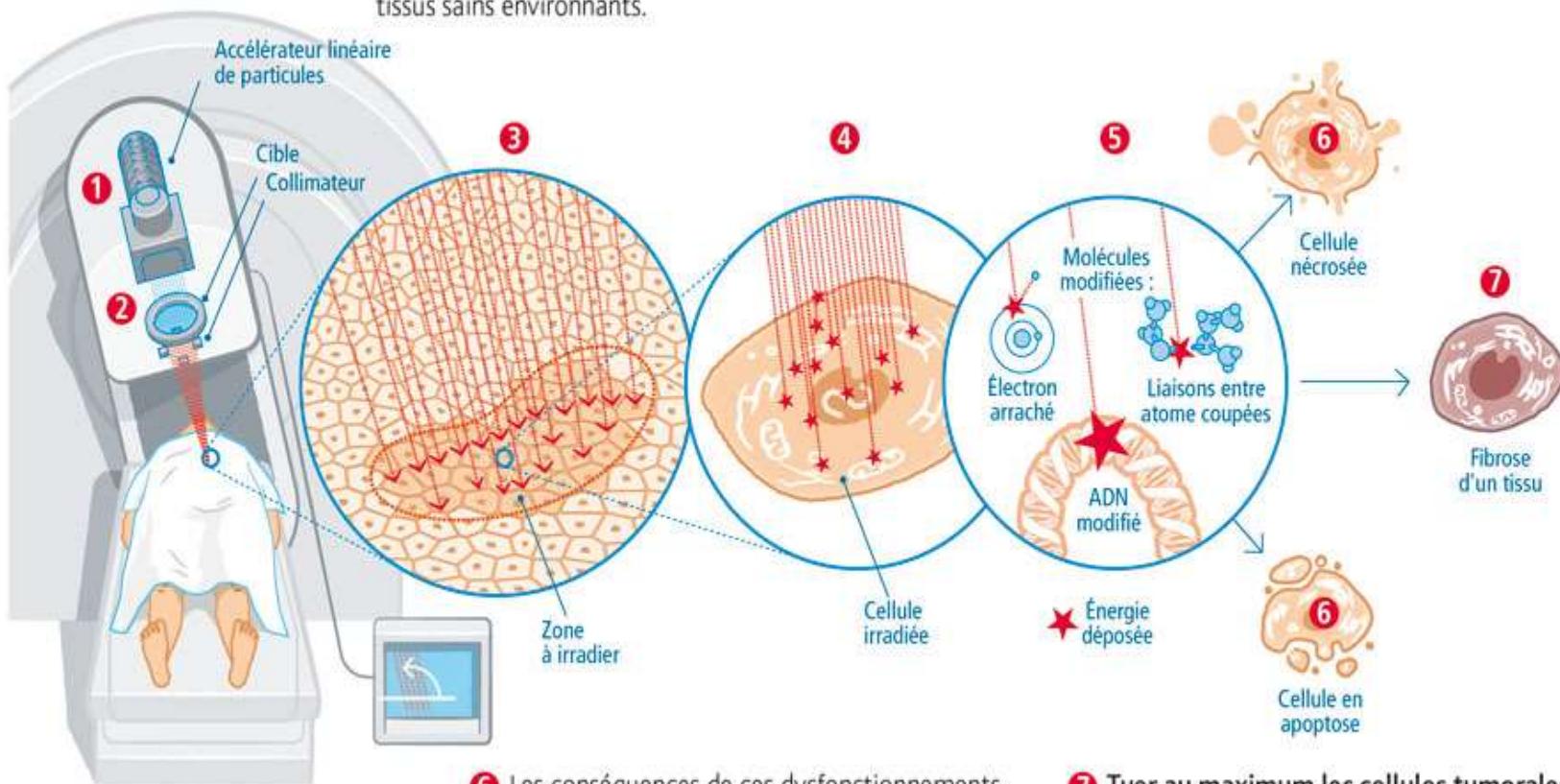
## **Par faisceaux de photons**

**1** Un accélérateur linéaire de particules accélère des électrons qui vont bombarder une cible en tungstène.

**2** Arrivés sur la cible, les électrons sont freinés. Cela génère une énergie sous forme de photons invisibles à l'œil (rayons X). Un logiciel choisit les meilleurs angles d'incidence pour bombarder la tumeur de ces rayons en épargnant autant que possible les tissus sains environnants.

**3** Les rayons sont « collimatés ». Un collimateur, constitué de lamelles multiples indépendantes les unes des autres, donne au faisceau de rayons la forme souhaitée pour suivre au mieux les contours de la tumeur.

**4** Les rayons déposent de l'énergie sur les molécules biologiques dans les cellules : lipides, protéines, ADN...



**5** Ces molécules sont modifiées : électrons arrachés, liaisons entre atomes coupées... Elles créent notamment des cassures de l'ADN qui altèrent le fonctionnement des cellules.

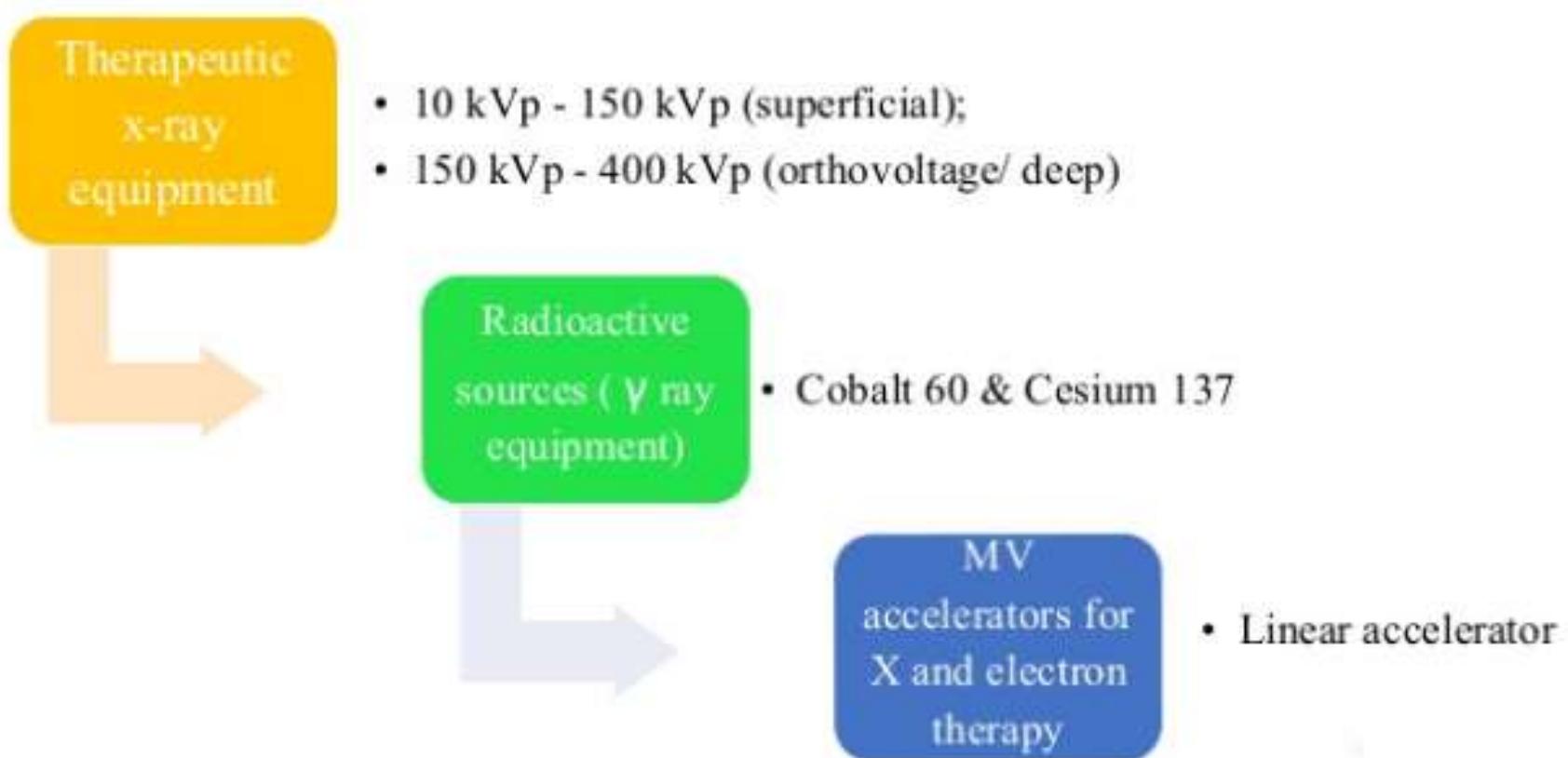
**6** Les conséquences de ces dysfonctionnements peuvent conduire la cellule à :

- mourir par nécrose – elles sont détruites;
- mourir par apoptose – une sorte de « suicide » cellulaire – ou être éliminées par d'autres cellules – autophagie;
- continuer à vivre, mais de manière anormale.

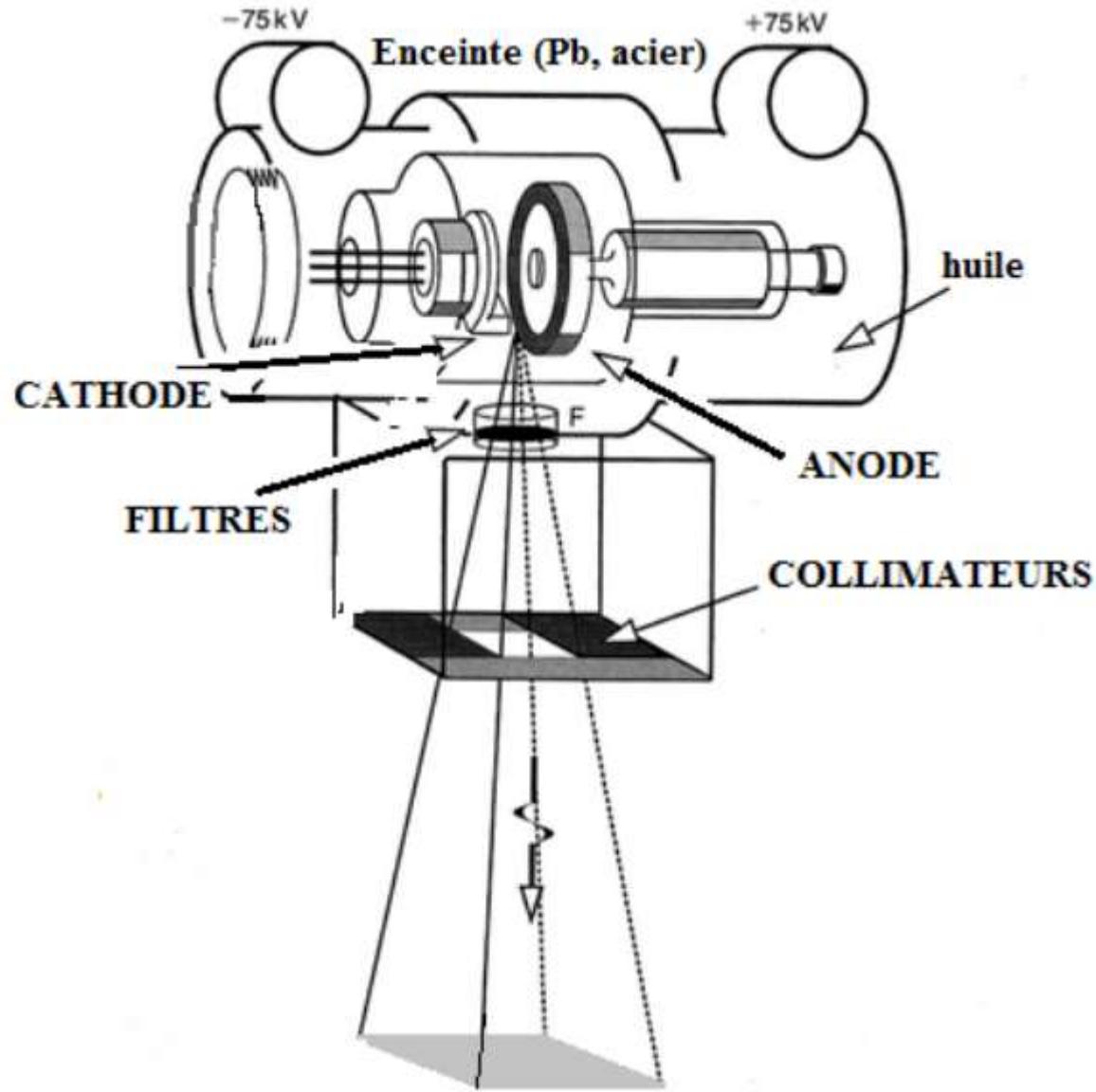
**7** Tuer au maximum les cellules tumorales est le but recherché. Les cellules saines voisines peuvent aussi être affectées. Apparaissent alors les effets secondaires comme la fibrose – processus de cicatrisation anormal, qui durcit les tissus – ou un risque de cancer secondaire aux rayons.

# I, Délivrance d'un faisceau de photons en RT externe

La radiothérapie externe avec les faisceaux de photons comporte trois types de machines de traitement : **unités des rayons X, unité de télétherapie isotopique** (unités de cobalt-60), et **les accélérateurs linéaires**.

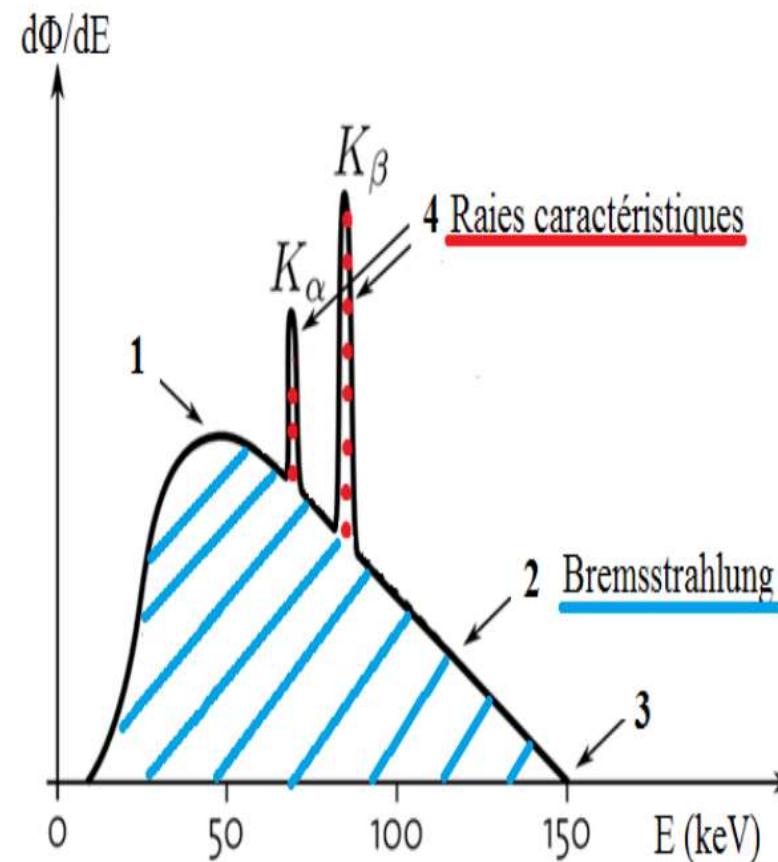
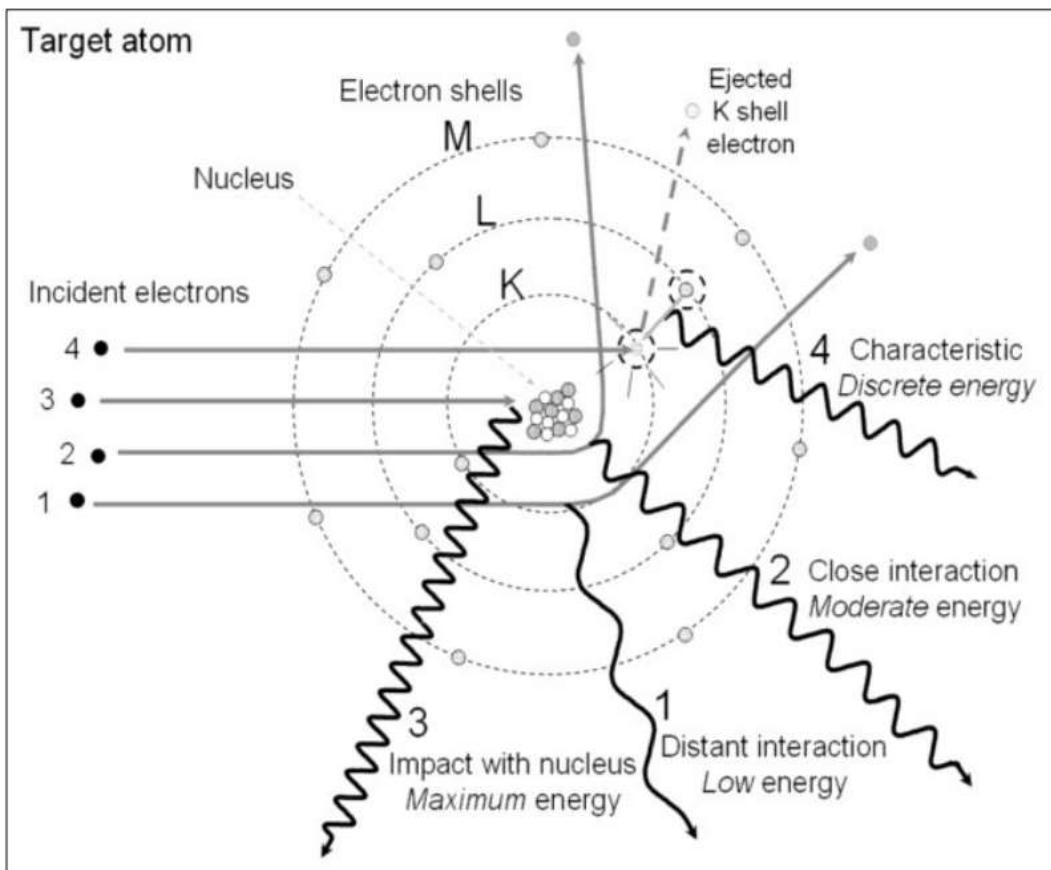


# 1. Les tubes à rayon X



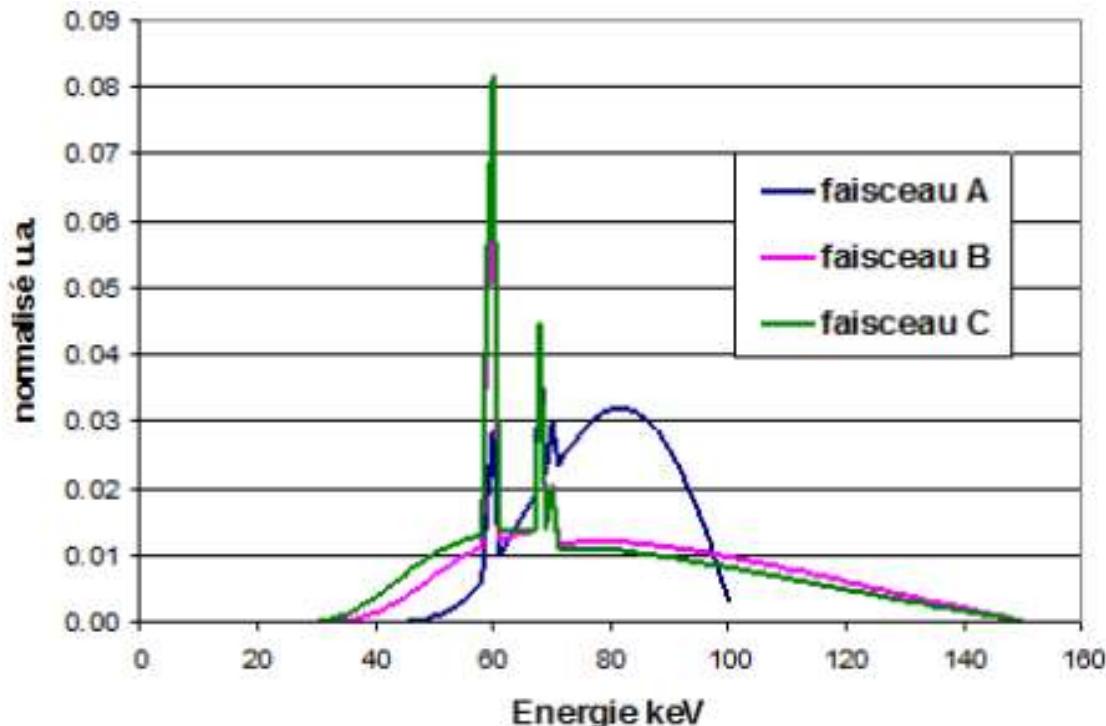
# Spectre énergétique de rayons X

- Interaction des électrons avec les atome de l'anode
- Interaction des électrons avec les noyaux des atomes de l'anode



## Caractéristiques de trois faisceaux de rayon X

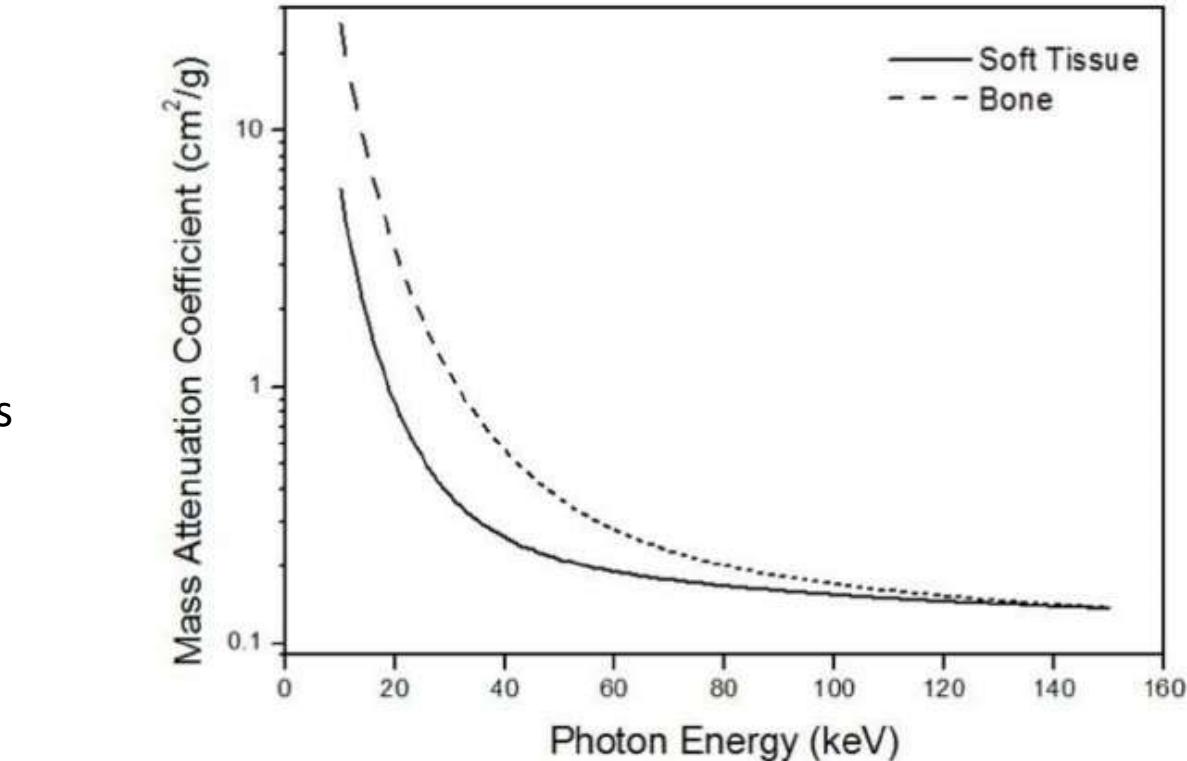
la tension appliquée au bornes de la tube X et les filtrations additionnelle influés sur la forme et l'intensité du spectre énergique du faisceaux de rayon X produit



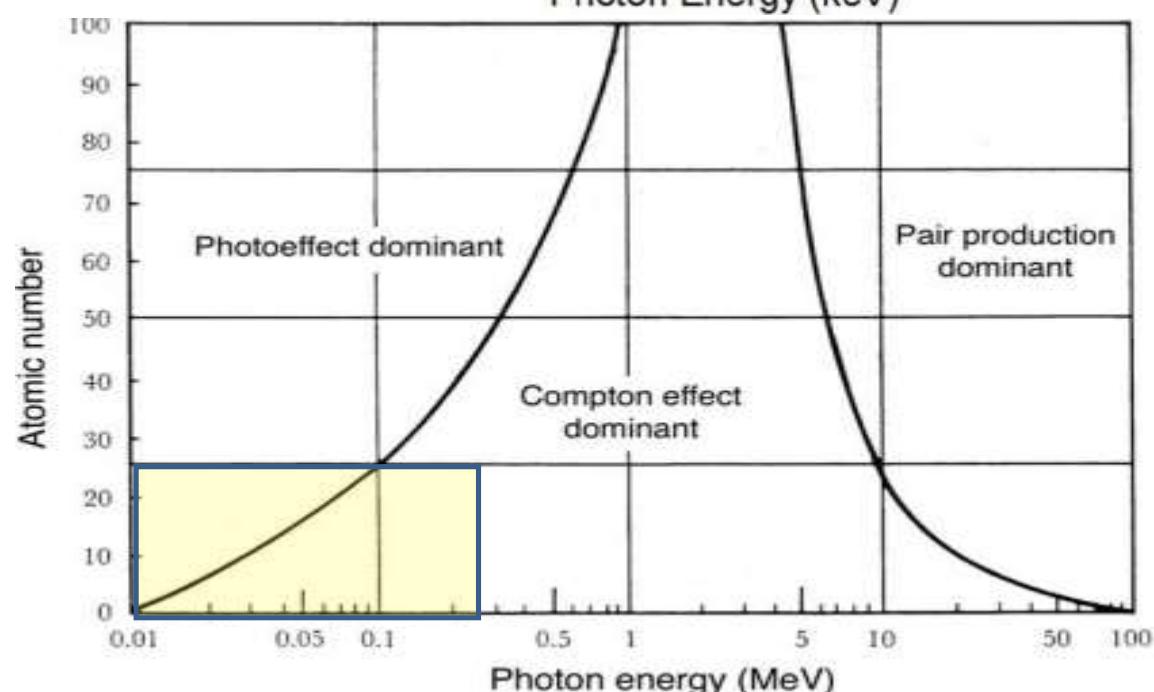
faisceau	HT kV	Filtration additionnelle mm Cu	1 <sup>ere</sup> CDA mm Al	2 <sup>eme</sup> CDA mm Al	Energie moyenne keV
A	100	3	12.11	12.30	77.7
B	150	0.875	12.11	12.92	82.2
C	150	0.575	11.14	12.18	77.7

## Orthovoltage X rays

Atténuation des photon est importante vers les basses énergies



Dans la matière biologique  
Effet photoélectrique  
et effet Compton



Les appareils de radiothérapie superficielle utilisent des tubes à rayons X produisant des photons X de 300 kV maximum ; leurs faibles énergies font qu'ils ne sont plus utilisés que pour des cancers cutanés (maximum de dose à la surface, faible rendement en profondeur 0,5 à 2cm )



Système de radiothérapie superficielle rayons X **XSTRAHL 150**

## 2- RT externe par substances radioactives (Gamma Ray)

### Caractéristique des radionucléides utilisés en RT

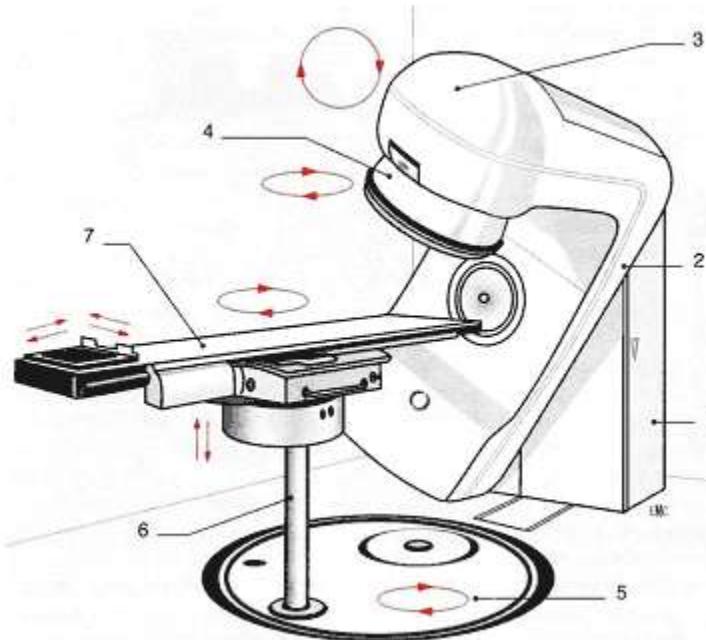
Radionuclide	Co-60	Cs-137	Eu-152	Ra-226
Half-life (y)	5.26	30	13.4	1600
Energy (MeV)	1.25, 1.33	0.660	0.6 – 1.4	0.18 – 2.2
Specific activity (Ci/g)	1130 (300)	80	180 (150)	0.988
$\Gamma_{AKR} [\mu\text{Gy} \cdot \text{m}^2 / (\text{GBq} \cdot \text{h})]$	309	78	250	194
Means of production	$^{59}\text{Co+n}$ <i>in reactor</i>	<i>Fission</i> <i>by-product</i>	$^{151}\text{Eu+n}$ <i>in reactor</i>	<i>Natural</i> $^{238}\text{U series}$

$$(\dot{K}_{\text{air}})_{\text{air}} = \frac{\mathcal{A} \Gamma_{AKR}}{d^2}$$

## Téléradiothérapie

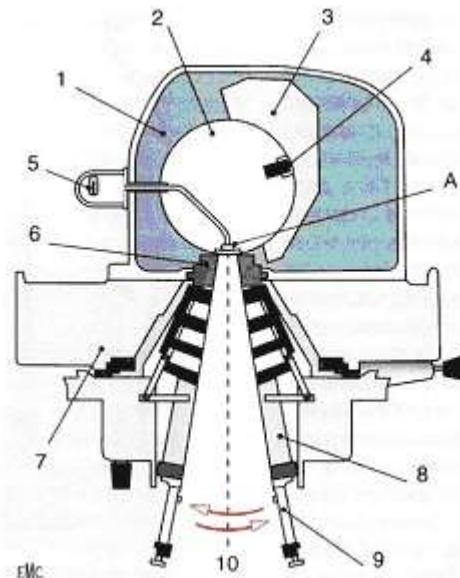
1. Statif ; 2. Bras ; 3. Tête ;
4. Collimateur ; 5. Socle de la table ; 6. Fût de la table ;
7. Plateau de la table.

## Télécolbalt et table de traitement



## Tête de télécobalt avec son système de collimation

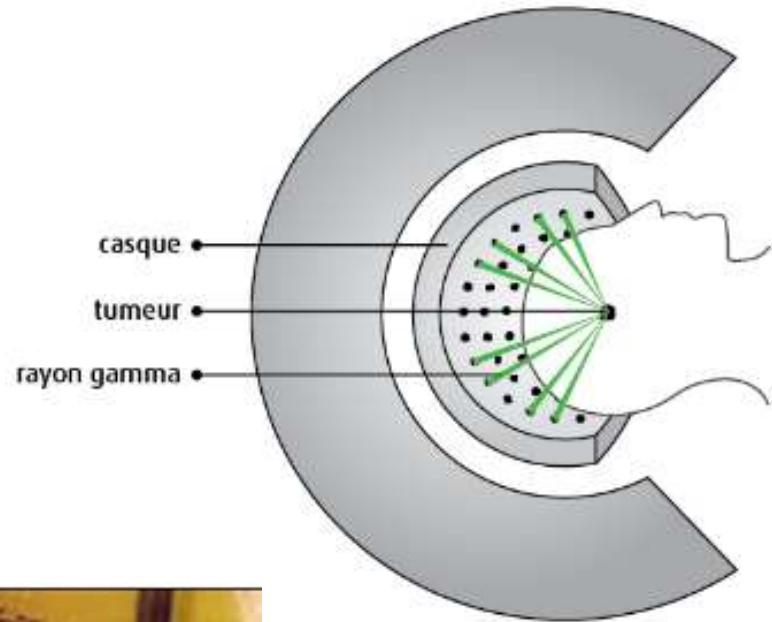
1. Protection en plomb ; 2. bâillet porte source en tungstène qui tourne pour mettre la source en position de traitement (A) ; 3. Protection en uranium appauvri ; 4. Source de cobalt 60 en position arrêt faisceau ; 5. Lampe de simulation ; 6. Pré-collimateur ; 7. Support mobile ; 8. Collimateur ; 9. Prolongateurs amovibles ; 10. Axe du faisceau du rayonnement.



# Radio chirurgie à couteaux gamma à faible coût

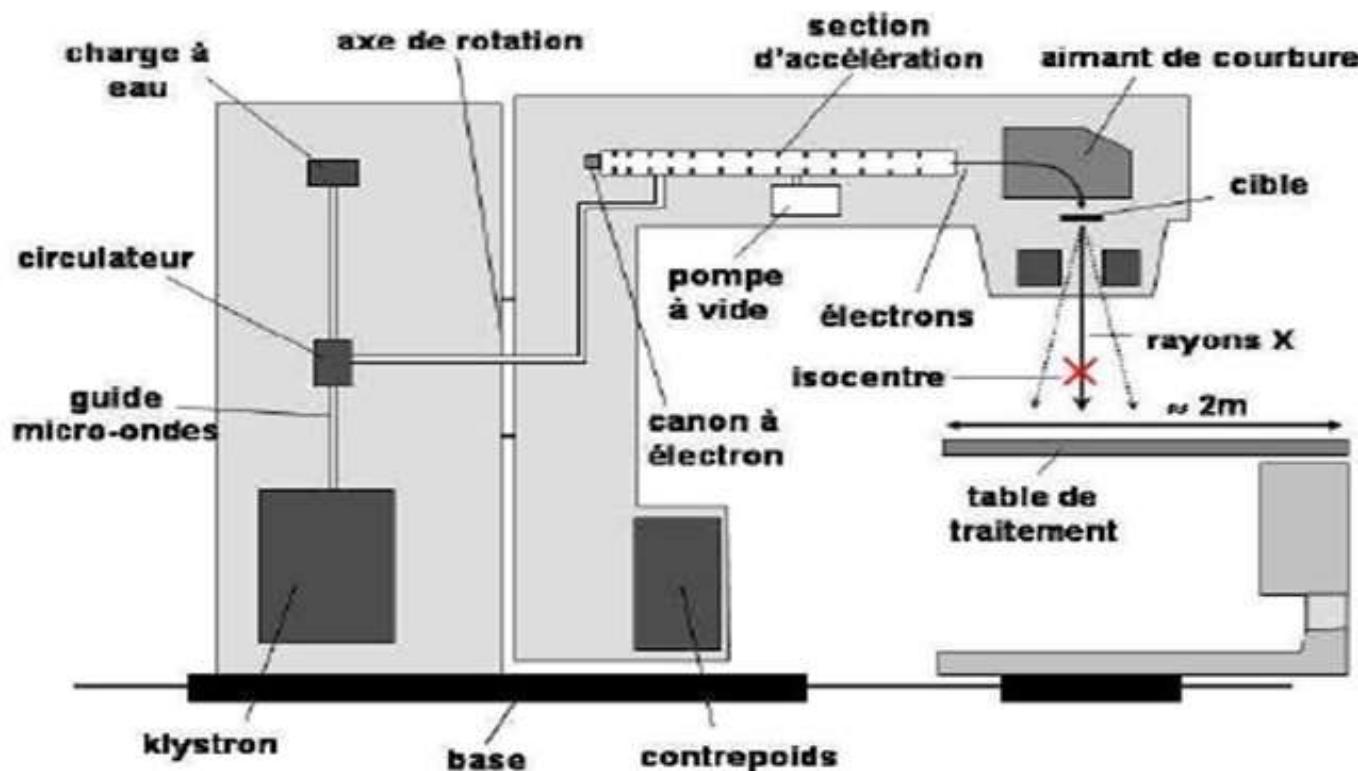
## Le scalpel gamma (**Gamma knife**)

est conçu pour administrer une radiothérapie externe au cerveau. Il émet environ 200 faisceaux étroits de radiation de haute énergie vers la tumeur. La plus forte dose est reçue là où les faisceaux se croisent. En général, on administre une seule séance pour traiter une tumeur primitive au cerveau ou des métastases cérébrales. Cette technique est parfois appelée radiochirurgie au scalpel gamma.

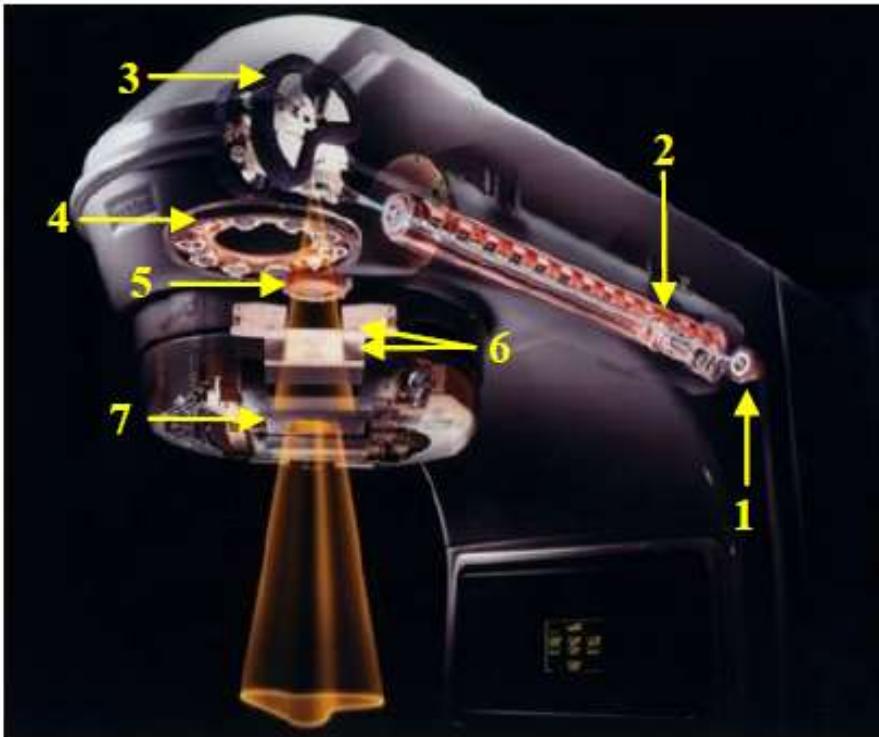


### 3 Accélérateur linéaire Médial

Les accélérateurs de particules sont les appareils produisant les faisceaux de rayonnements pour les traitements. Les faisceaux produits sont :  
**des photons ou rayons X,**  
**des électrons.**



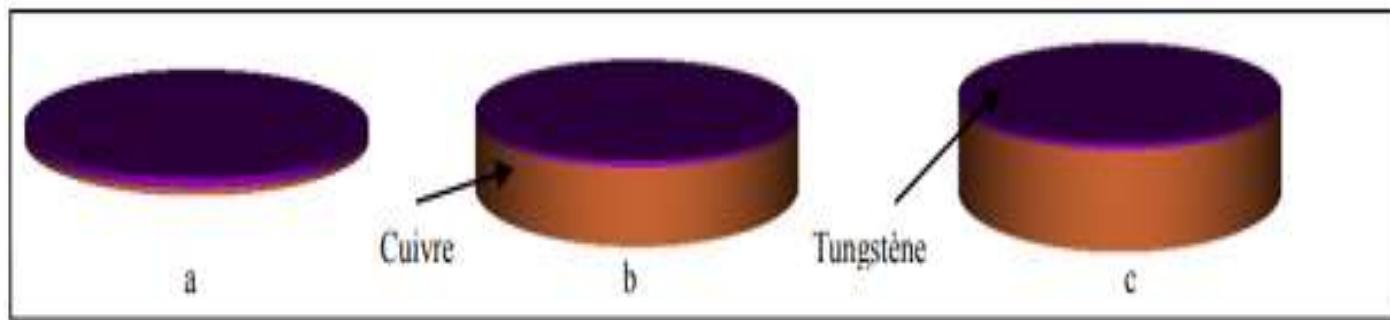
## Tête de l'accélérateurs



- 1 : Le canon à électron
- 2 : La section accélératrice
- 3 : La déviation magnétique
- 4 : Le carrousel intégrant les cônes égalisateurs et les diffuseurs
- 5 : Les chambres “ moniteur ”
- 6 : Les mâchoires XY
- 7 : Le collimateur multilames

## La cible

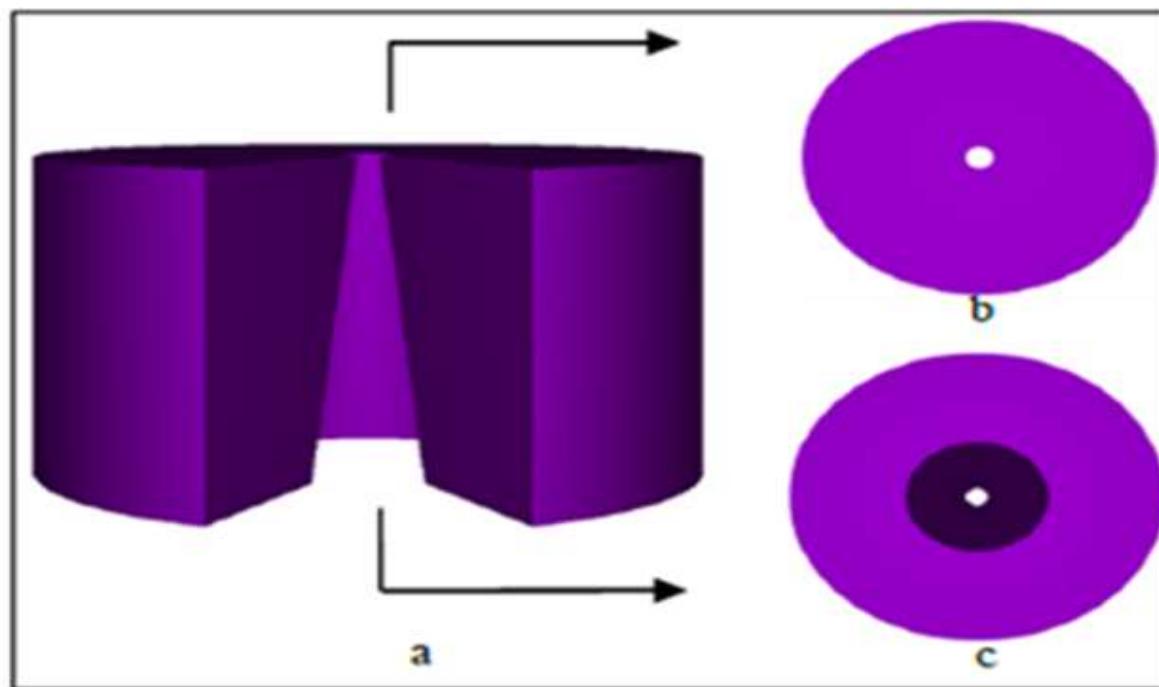
La cible est constituée d'une plaque de tungstène de quelques millimètres d'épaisseur et d'une plaque de cuivre. Le tungstène permet la production de photons principalement par rayonnement de freinage alors que le cuivre est utilisé pour stopper les RX de basse énergie



La cible photonique : a) X6,b) X16,c) X18

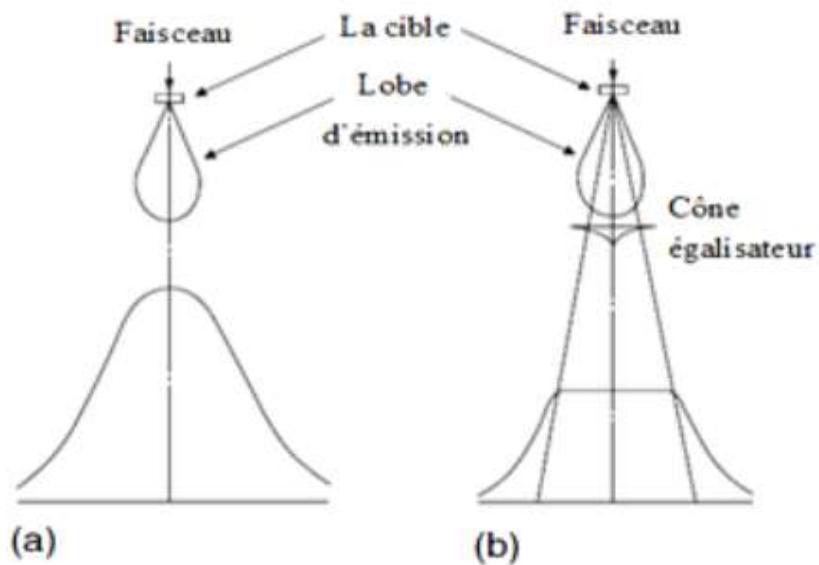
## 2. Le collimateur primaire

Le collimateur primaire est de forme conique et composé principalement de tungstène. Il permet de limiter la propagation des RX dans toutes les directions afin d'assurer une première collimation vers le patient

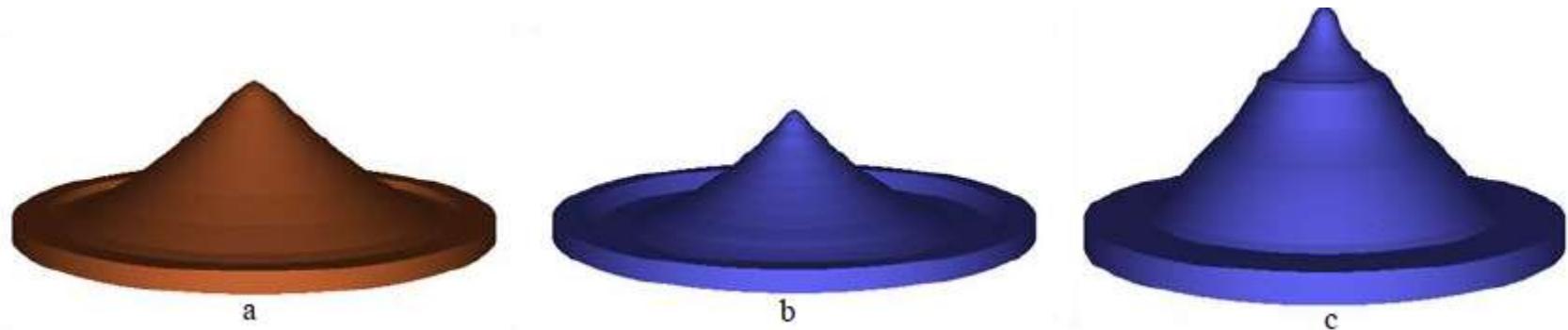


### 3. Le cône égalisateur

**Il est utilisé pour uniformiser la fluence.** La forme de ce module est due à l'hétérogénéité du faisceau en sortie de la cible. les photons sont issus du phénomène de bremsstrahlung, tendant ainsi à créer plus de photons dans la direction privilégiée des électrons incidents  
Il est donc nécessaire de compenser cette répartition en intensité en atténuant subséquemment le faisceau



**La forme et le martiaux composite dépond de  
l'énergie des faisceau  
a) X6, b) X16 et c) X18**



composé de cuivre en X6, de tungstène en X16, de tungstène et de tantale en X18

## 4. Les chambres moniteurs

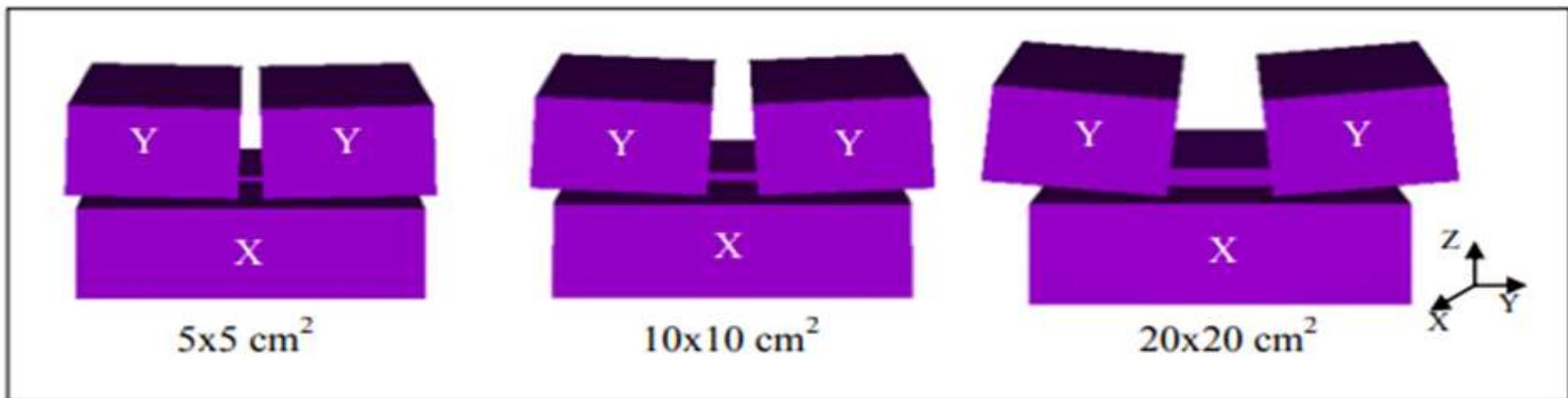
Le rôle de la chambre d'ionisation est de mesurer par transmission, la dose pendant l'irradiation afin d'asservir la valeur du débit de dose. Elle est constituée par une cavité fermée lui permettant de garantir une réponse indépendamment de la température et de la pression.



**Le contrôle de la dose se fait en Unité Moniteur (UM)**

## 5. Les mâchoires X/Y

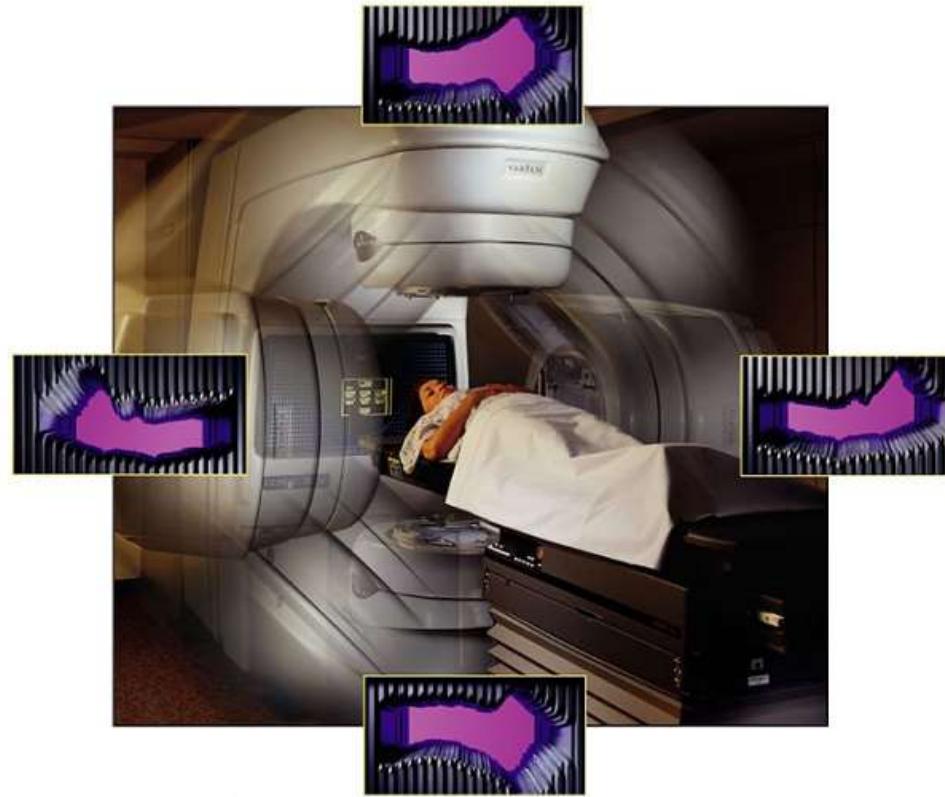
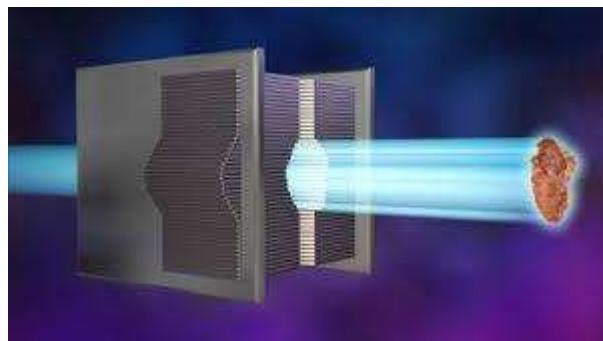
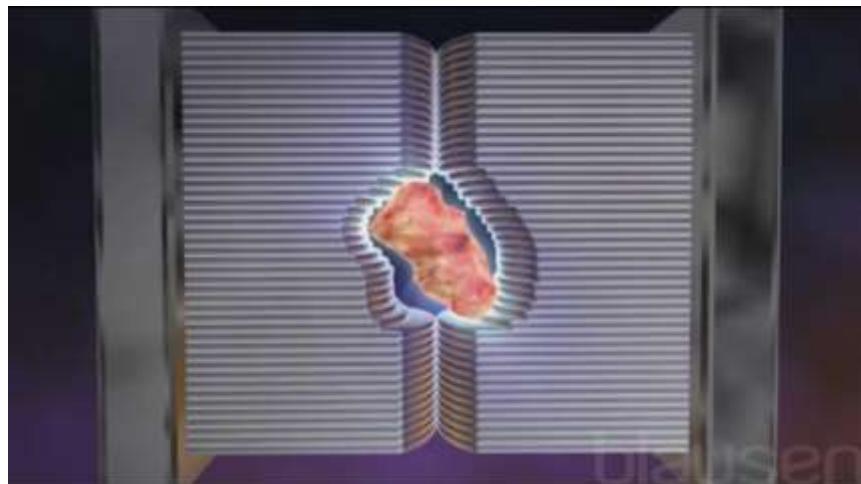
Les mâchoires X et Y sont composées de deux paires de blocs placées à deux hauteurs différentes dans la tête d'irradiation. Elles permettent la collimation du faisceau et délimitent la **taille de champ**.



Représentation 3D des mâchoires XY dans le cas de 3 tailles de champ

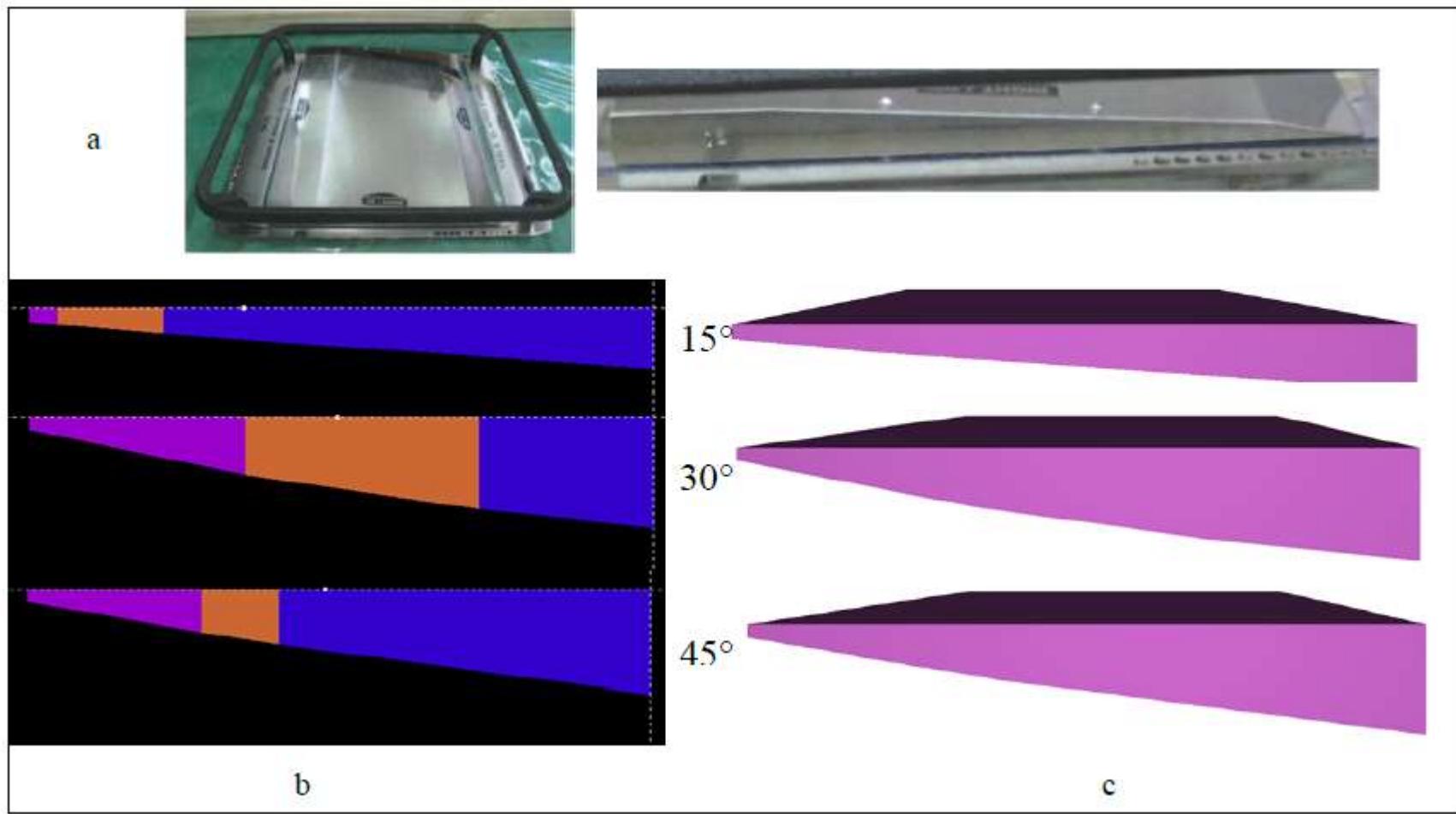
## 6. Le collimateur multi-lames (MLC)

Il consiste en 40 à 60 paires de lames en tungstène ou plomb disposées en deux rangés opposées soit un total de 80 à 120 lames (selon les constructeurs). Ces lames peuvent être déplacées individuellement afin de moduler la forme du champ d'irradiation, pour permettre de s'adapter à la forme de la tumeur

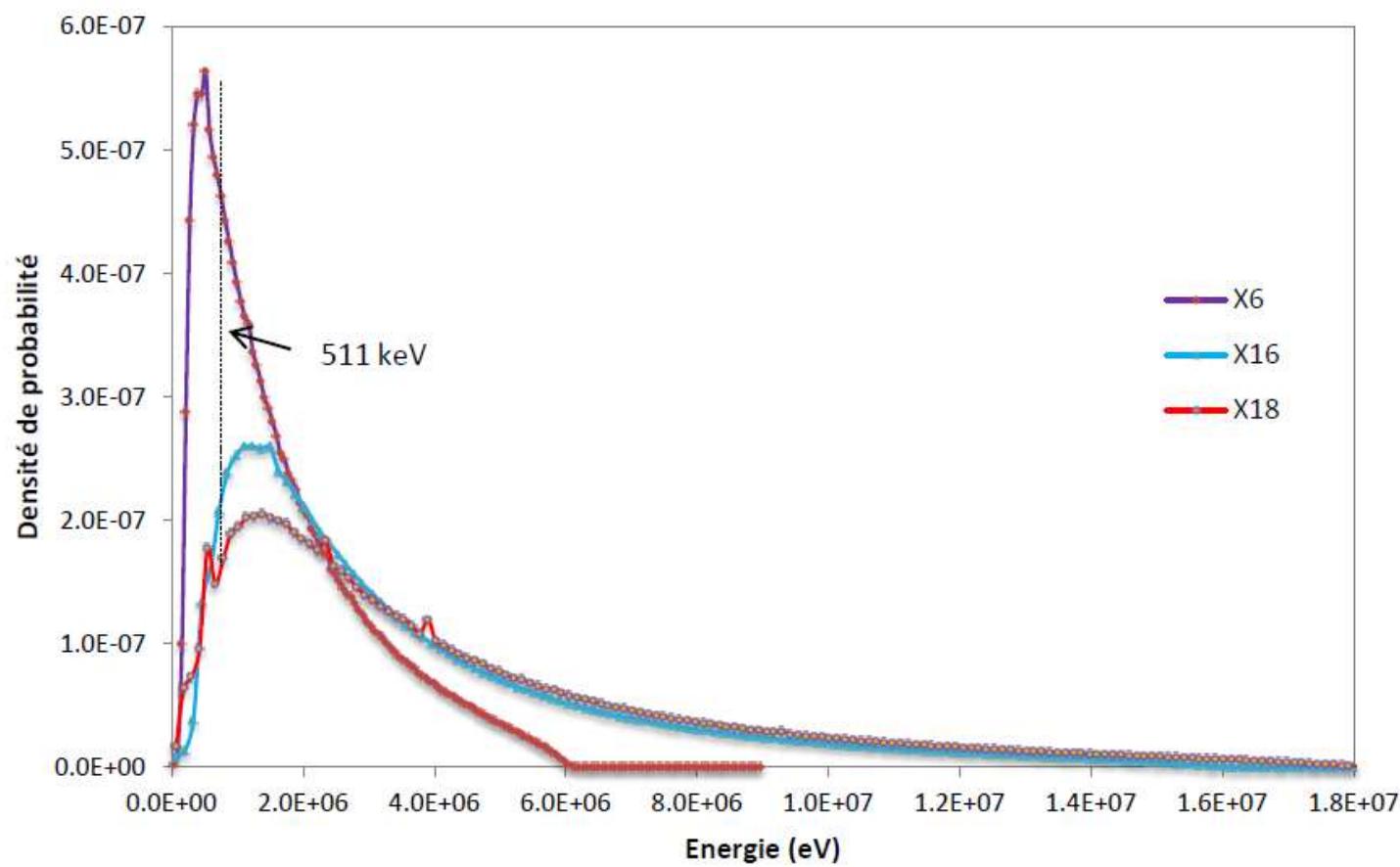


## 5. Le filtre en coin

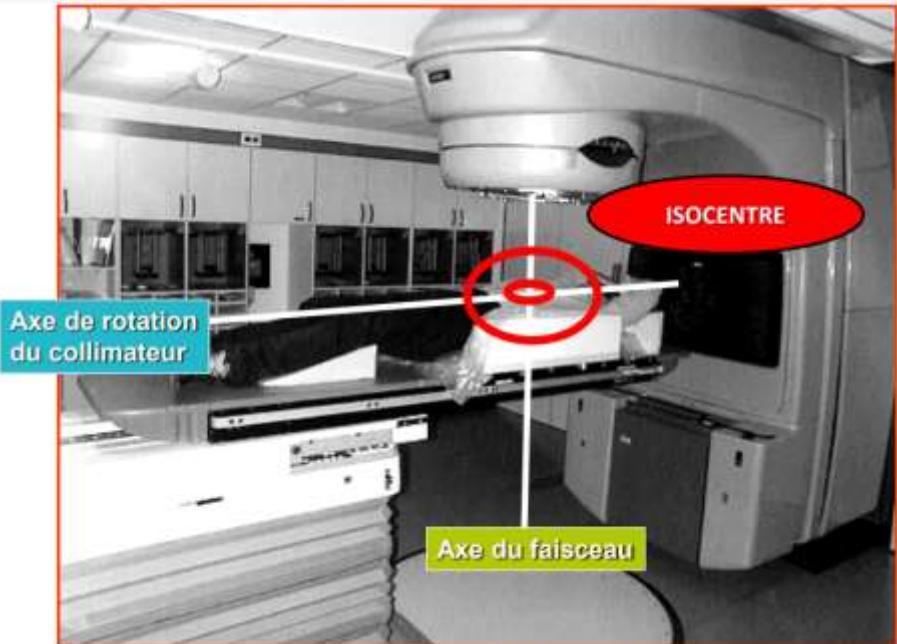
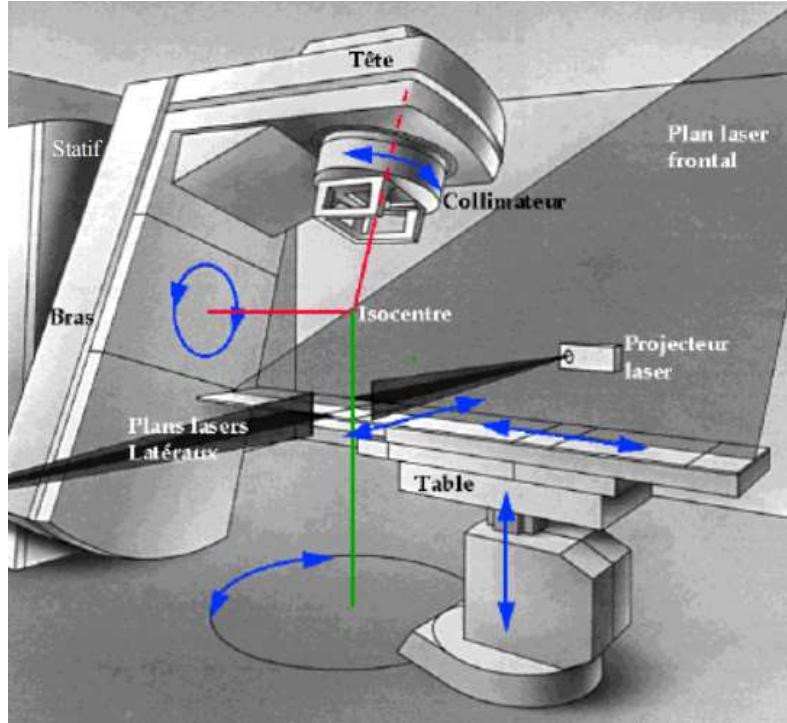
Le filtre en coin lorsqu'il est utilisé, permet d'adapter la distribution de la dose à la morphologie du patient afin d'incliner les iso-doses



## Le spectre énergétique

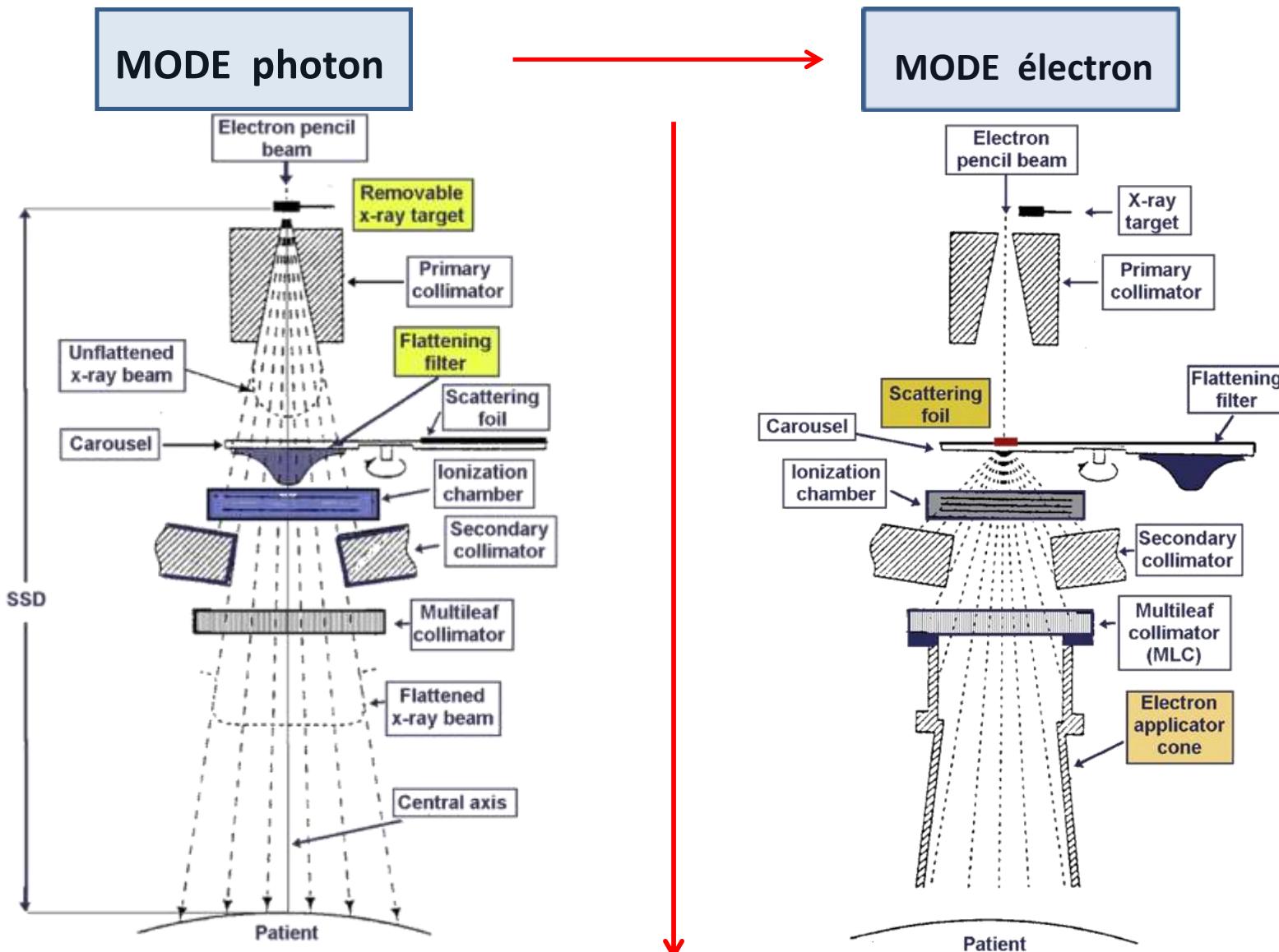


# Degrés de liberté et iso-centre



L'iso-centre est le point d'intersection entre l'axe de rotation de l'accélérateur et de l'axe du faisceau

# Les accélérateurs médicaux offrent des possibilités de traitement en électrons ou en photons



**1-Elimination de la cible , 2 remplacer le cône égalisateur par feuil de diffusion,**  
**3- ajout de l applicateur**

# Types de radiothérapie

## 1-La radiothérapie conformationnelle

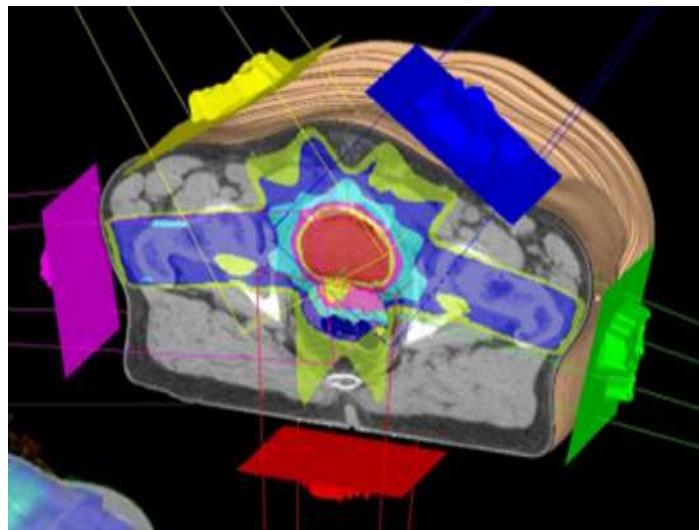
Cette technique vise à faire correspondre le volume irradié au volume de la tumeur, en épargnant au maximum les tissus sains avoisinants. Pour ce faire, 4 à 6 orientations de faisceau peuvent être utilisées afin que la forme du champ irradié soit adaptée à la forme du volume tumoral grâce à des caches, parfois intégrés à l'accélérateur.

## 2-La radiothérapie conformationnelle par modulation d'intensité (RCMI)

La RCMI permet de moduler en cours de séance le débit de dose délivré par chacun des faisceaux afin de protéger les tissus sains.

Cette modulation est assurée par un collimateur multi-lames qui se déplacent d'avant en arrière afin de cibler la tumeur avec la meilleure dose possible.

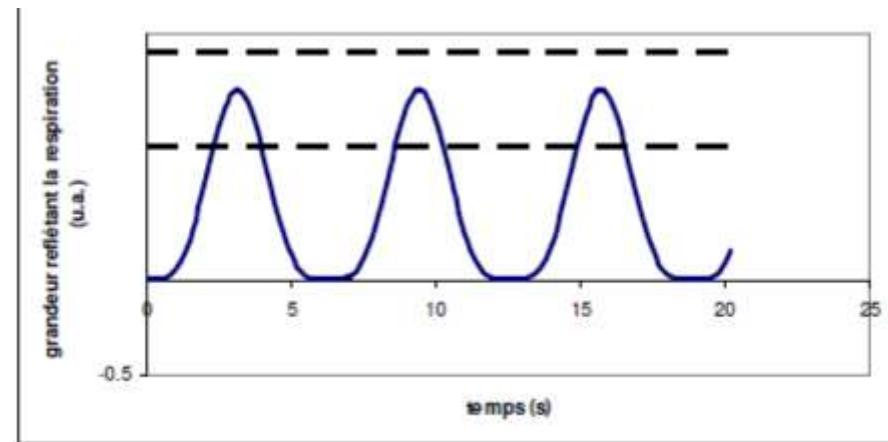
Cas de la prostate



### 3- La radiothérapie asservie à la respiration

Les organes du patient peuvent légèrement bouger en cours de séance, principalement à cause de la respiration. Ce sera également le cas d'une tumeur située dans un organe mobile comme les poumons. Afin d'améliorer la précision des traitements, certaines services utilisent des techniques innovantes d'asservissement du faisceau de rayonnement aux mouvements des organes.

#### Synchronisation respiratoire

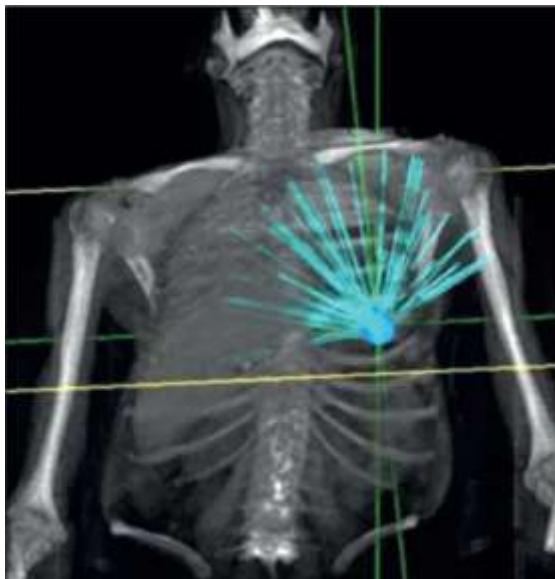


Scanner 4D permettant de réaliser la radiothérapie synchronisée à la respiration.mp4

## 4-La radiothérapie stéréotaxique

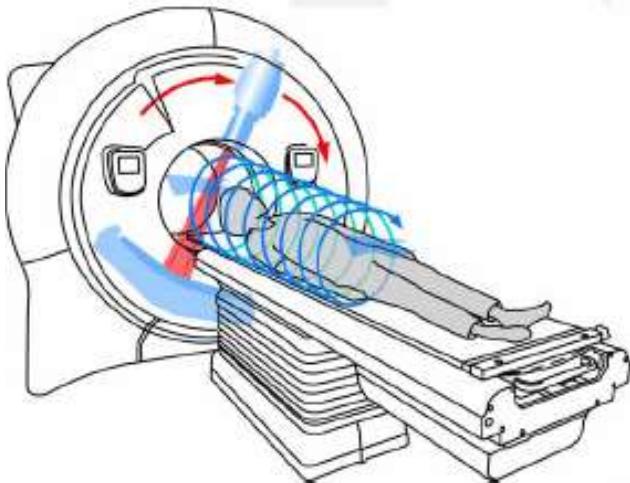
La radiothérapie stéréotaxique est une forme de radiothérapie de haute précision qui utilise des microfaisceaux convergents. Cela permet d'irradier à haute dose de très petits volumes dans le corps du patient et ainsi de concentrer davantage de radiation sur la tumeur. Plusieurs résultats de recherche récents montrent son intérêt pour la survie des patients.

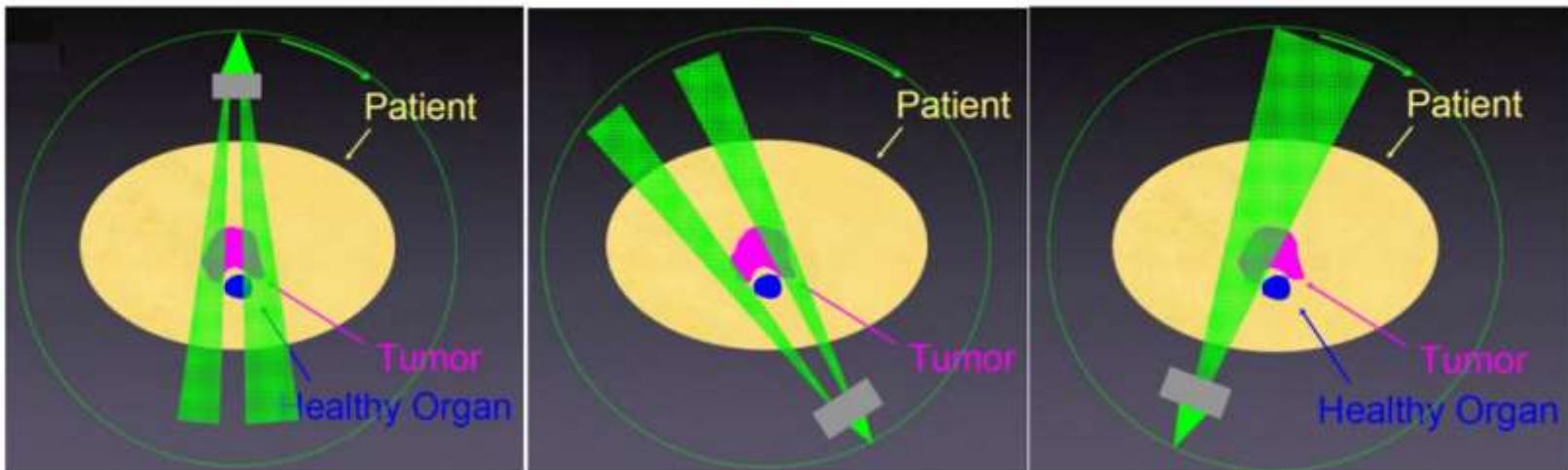
La radiothérapie stéréotaxique fractionnée, à savoir en plusieurs séances, est en développement pour le traitement de lésions plus volumineuses.



## 5-La tomothérapie

Cette technique de radiothérapie stéréotaxique couple un scanner et un accélérateur de particules miniaturisé qui tourne autour du malade pendant que la table se déplace. L'appareil délivre de manière hélicoïdale une dose qui va s'adapter à la tumeur en épargnant mieux les organes à risques avoisinants, tout en contrôlant en temps réel la position du patient.

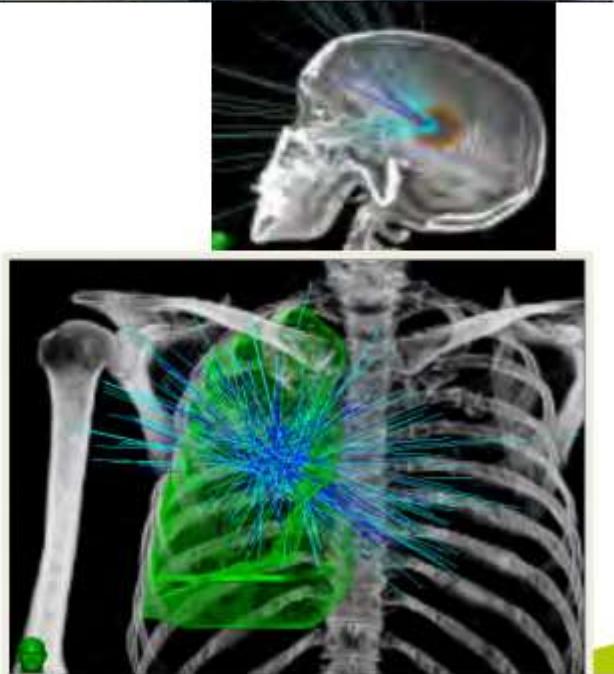




Faisceau modulé de tomothérapie

## 6- Le Cyberknife

- Système d'irradiation monté sur un bras robotisé associé à un système d'imagerie en temps réel
- Contraintes des mouvements supprimées : Correction en temps réel des mouvements du patient.
- Irradiation très précise (< 1mm) : stéréotaxie intra ou extra crânienne
- Jusqu'à + de 1200 petits faisceaux possibles
- Irradiation conformatrice de la tumeur en évitant les organes sensibles (moelle, ...)



# Compagnie fabricant des accélérateurs médicaux

- Accuray
- Brainlab
- Elekta
- Gamma Star
- Neusoft Medical Systems
- Panacea Medical Technologies
- Shinva Medical Instrument
- Varian Oncology

# Définition des volumes en radiothérapie

**Le volume tumoral macroscopique** (Gross Tumor Volume : GTV)

C'est celui qui est visible sur l'imagerie (scanner, IRM). Il recevra la dose la plus forte.

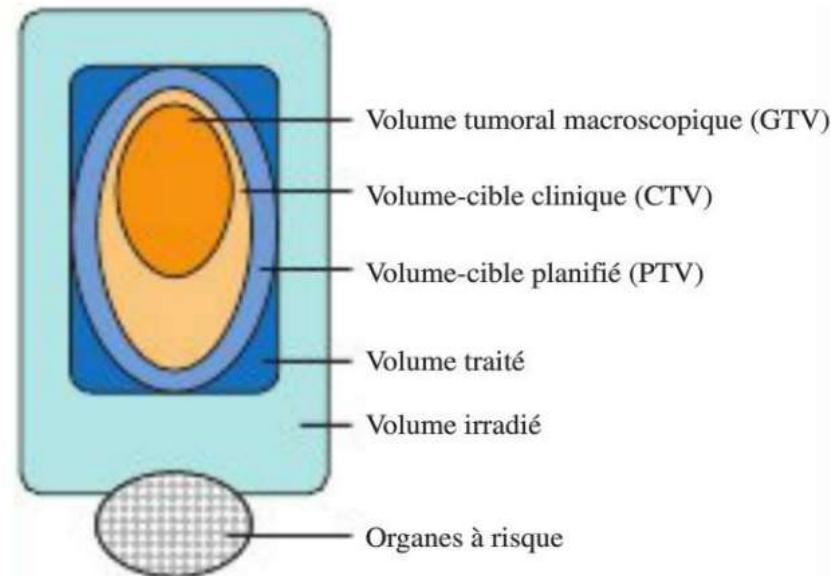
**Le volume cible clinique** (Clinical Target Volume : CTV)

Il comprend le GTV, ainsi que des tissus avec une probabilité tumorale forte même si cela est non visibles à l'imagerie. La définition du CTV reste encore subjective pour beaucoup de localisation et est fondé sur l'expérience et les connaissances de la maladie (atteintes ganglionnaires occultes, par exemple). La définition du GTV et du CTV constitue une part essentielle de la prescription.

**Le volume cible planifié** (Planning Target Volume : PTV)

Il comprend le CTV et une marge de sécurité qui permet de prendre en compte les incertitudes de positionnement, les mouvements éventuels des organes et du patient.

L'ICRU recommande d'optimiser les paramètres de la chaîne de traitement pour homogénéiser le plus possible la dose à l'intérieur du PTV. Il est recommandé de réaliser une planification de manière à ce que **la dose au PTV se trouve entre 95% et 107% de la dose prescrite.**



## **Le volume traité**

Il s'agit du volume entouré d'une surface isodose spécifiée par le radiothérapeute, correspondant à un niveau de dose minimal permettant d'atteindre le but du traitement. Idéalement, ce volume traité devrait correspondre au volume prévisionnel (PTV).

## **Le volume irradié**

C'est le volume de tissus recevant une dose considérée comme significative vis-à-vis de la tolérance des tissus sains. On pourra évaluer, par exemple, le volume de l'isodose correspondant à 80%, 50%, ou 25% de la dose prescrite.

## **Volumes à protéger**

Les organes à risque (Organs At Risk, OAR) sont des tissus pour lesquels il est crucial de limiter l'irradiation afin de limiter les effets secondaires. Une attention toute particulière doit être portée à la distribution de dose aux OARs, essentiellement en raison de l'importance des gradients observés en bordure de volume cible. Comme nous le verrons dans la troisième partie du mémoire, les contraintes de dose aux OARs interviennent souvent comme des pénalités dans la fonction de coût à optimiser pour définir le plan de traitement

## Chronologie des étapes d'un traitement par radiothérapie



# Système de planification de traitement TPS

Un système de planification de traitement, couramment abrégé TPS pour l'anglais : treatment planning system, est un logiciel permettant de préparer un plan de traitement par irradiation en radiothérapie

Lors de la première consultation, le patient est informé de toutes les modalités techniques de la radiothérapie et des effets indésirables et secondaires à surveiller.

Dans un premier temps, **les données anatomiques du patient** sont acquises grâce à un simulateur ou un **scanner de simulation**, auxquelles peuvent être associées des images d'IRM ou de médecine nucléaire. En parallèle, **les protocoles de radiothérapie vont être définis en fonction de la tumeur**, de sa localisation, de sa taille, de son extension et de son grade.

Ces données exploitées via des calculs informatiques, permettent au radiothérapeute de définir le volume à irradier et **de localiser les organes à risque** avoisinants qu'il faudra protéger. De même, le médecin va pouvoir établir **le plan de traitement du patient**, en l'occurrence le nombre de séances et la dose délivrée par séance.

Selon la technique qui sera utilisée, le **radiophysicien** a ensuite la responsabilité de **définir la balistique du traitement** : choix du nombre de faisceaux, de leurs caractéristiques (orientation, énergie, taille des champs), utilisation ou non de modificateurs de faisceaux ou de la modulation d'intensité, etc... Cette balistique est validée par le radiothérapeute.



## 1. Détermination de la position de traitement

- *Confection éventuelle de moules de contention*

## 2. Réalisation du scanner (APC)

- *Patient en position de traitement, dans le système de contention*

**Transfert des images sur le TPS**

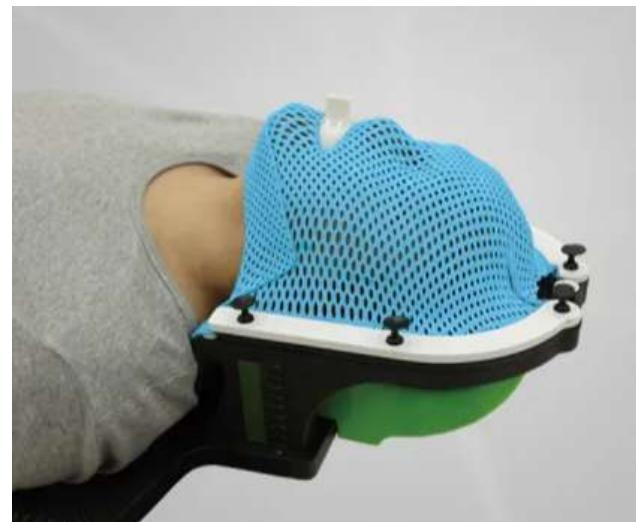


## Positionnement du patient

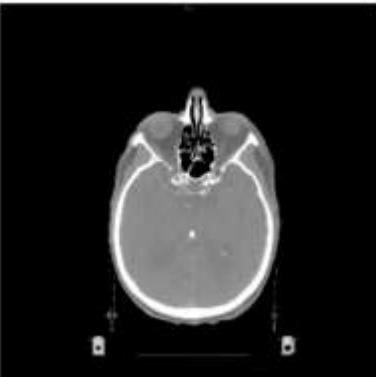
Consiste à positionner le patient comme lors de la simulation grâce aux repères et aux Systèmes de lasers. Ceci permet de contrôler que la balistique choisie est compatible avec le patient.

Un contrôle de la zone irradiée peut être effectué grâce à des clichés radiologiques ou par une imagerie portale.

La reproductibilité du positionnement du patient à quelques millimètres près est essentielle a fin de dispenser un traitement efficace et sûr. Le patient doit évidemment demeurer parfaitement immobile durant l'irradiation



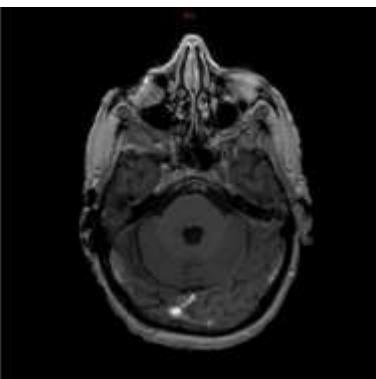
Système SRS Klarity pour la position du patient



### Scanner tomo-densitométrique (CT)

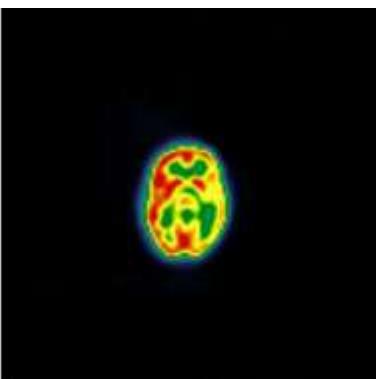
Il s'agit d'une représentation 3D, réalisée par coupes, du patient. Cet examen utilise les rayons X pour « voir » l'intérieur du patient. Les tissus durs (notamment les os), sont visibles sur ce type d'examen . Le principe est de mesurer l'absorption des rayons X par les tissus du patient

Exemple d'image CT (coupe d'une tête)



**Imagerie par Résonance Magnétique (IRM)** Elles sont de deux sortes, l'IRM anatomique (la plus courante), et l'IRM fonctionnelle. Le but de la première est de compléter le scanner en visualisant les tissus mous, alors que la seconde permet d'obtenir une imagerie du métabolisme et des fonctions du patient. Cet examen est généralement lui aussi 3D, réalisé par coupes également. Le principe est d'exploiter les propriétés magnétiques de certains noyaux atomiques des cellules du patient

Exemple d'IRM anatomique (coupe d'une tête)



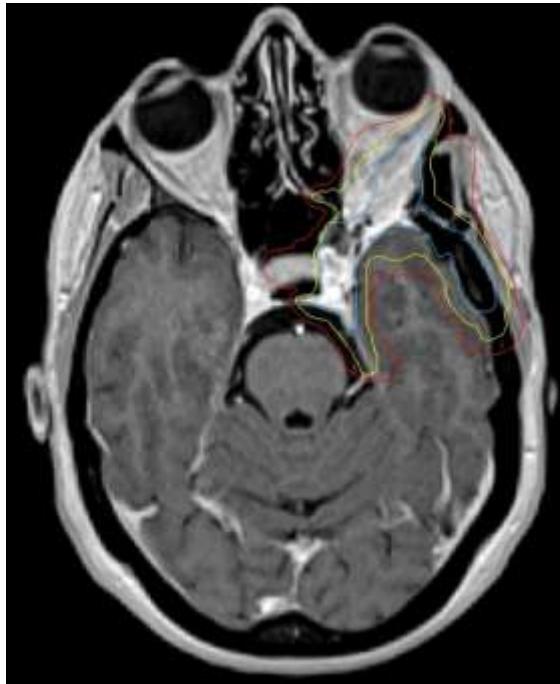
**Tomographie par Émission de Positrons (TEP)** Cet examen permet de mesurer les émissions de positrons (anti-particule de l'électron), d'un produit injecté dans le corps du patient. Généralement, le produit utilisé ne réagit qu'en présence de cellules malades, ce qui permet d'obtenir une cartographie des cellules à traiter

Exemple d'image TEP (coupe d'une tête)

Ces différents examens vont servir de base aux personnes intervenant au cours du traitement du patient et seront la représentation virtuelle du patient sur laquelle la planification complète sera réalisée

## Segmentation Contourage

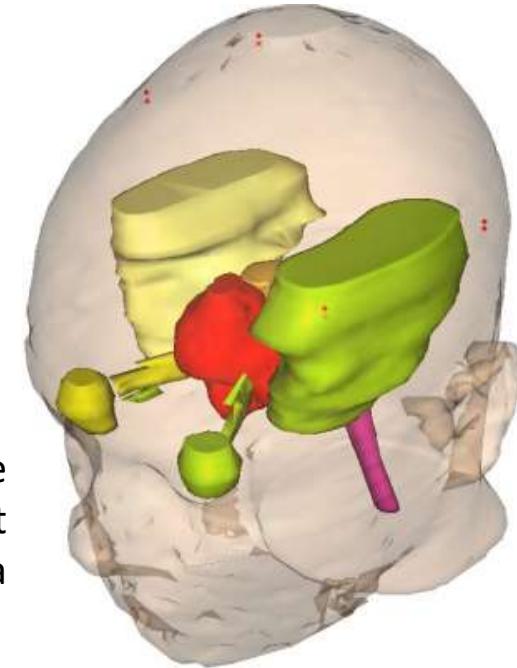
A partir des différents examens réalisés, le radiothérapeute va délimiter les organes nécessaires à la bonne planification du traitement



GTV (en bleu), CTV (en jaune), PTV (en rouge)

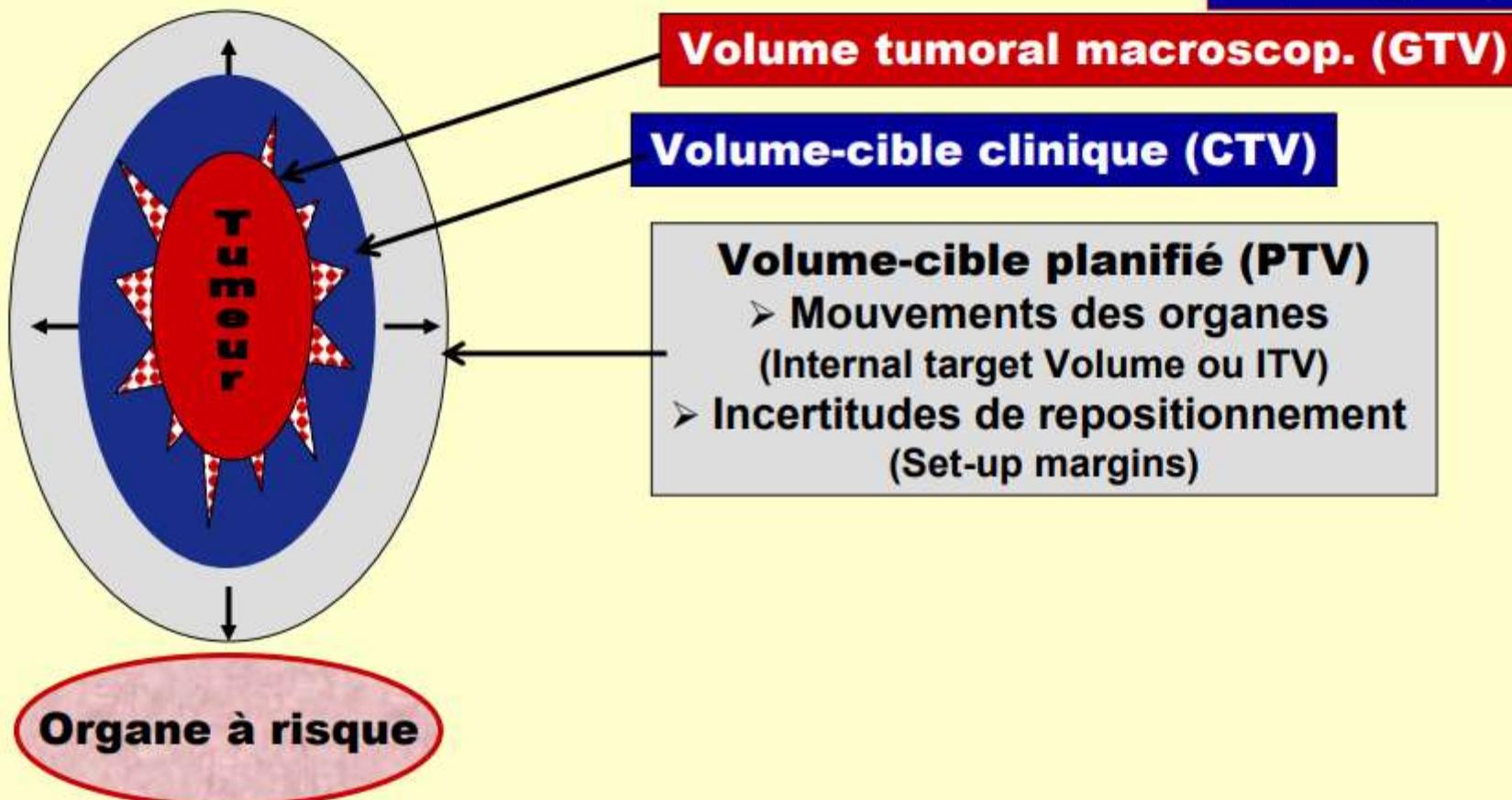
Les Organes A Risque (OAR)

En rouge, nous pouvons voir le PTV, en vert et en jaune, ce sont des organes à risque (ici les yeux, les nerfs optiques, et les lobes temporaux), et en semi-transparent, il s'agit de la reconstruction 3D du contour externe du patient.



**Exemple de segmentation d'un patient réel**

## 2- Application de marges de sécurité autour de la tumeur primitive et des ganglions pathologiques

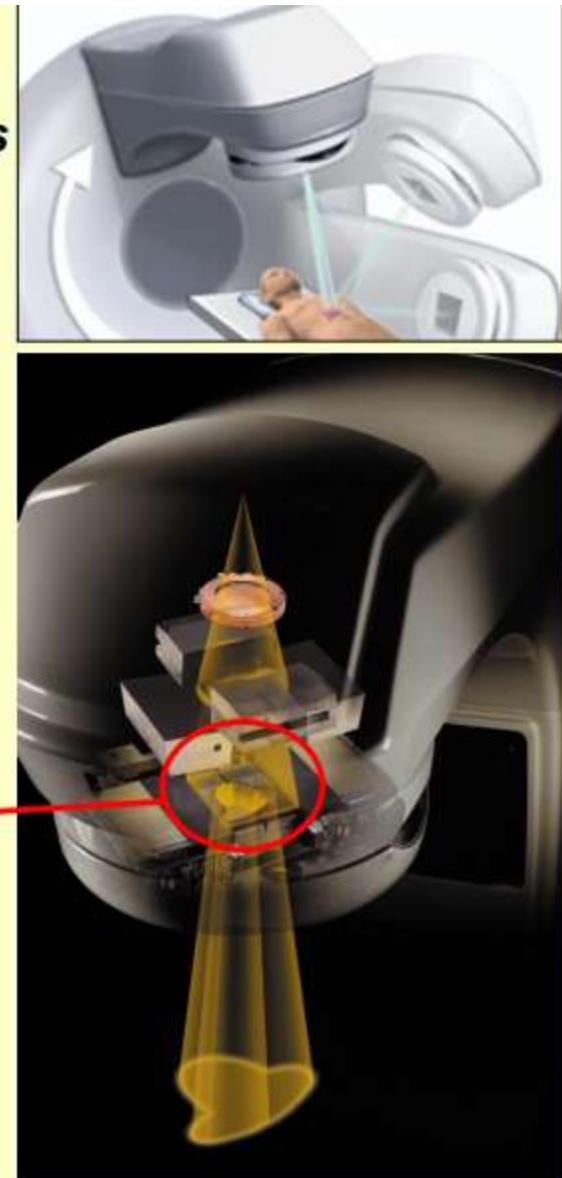
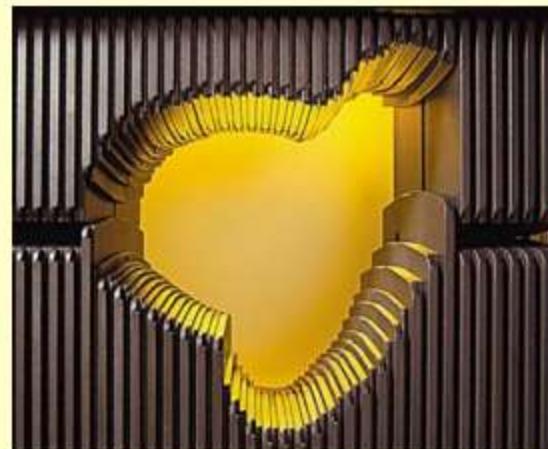
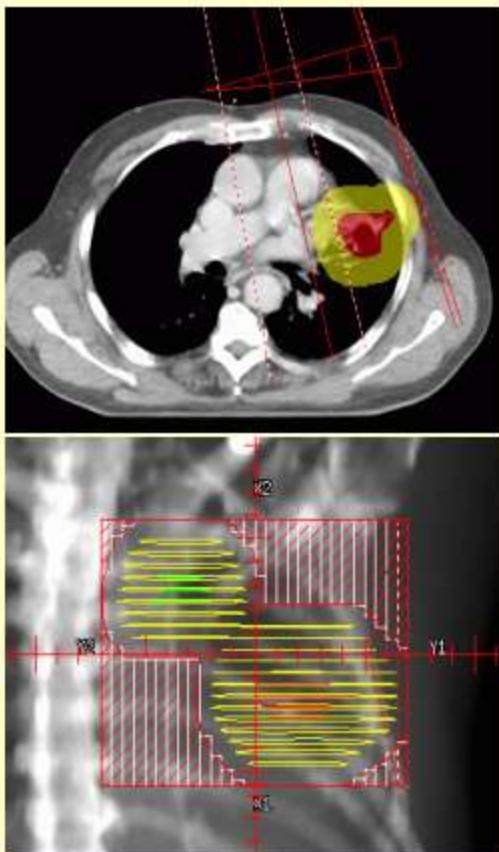


### 3- Simulation de la géométrie des faisceaux

- ***Nombre de faisceaux, angulation, énergie, filtres éventuels***
- ***Conformation des fx à la forme de la cible***

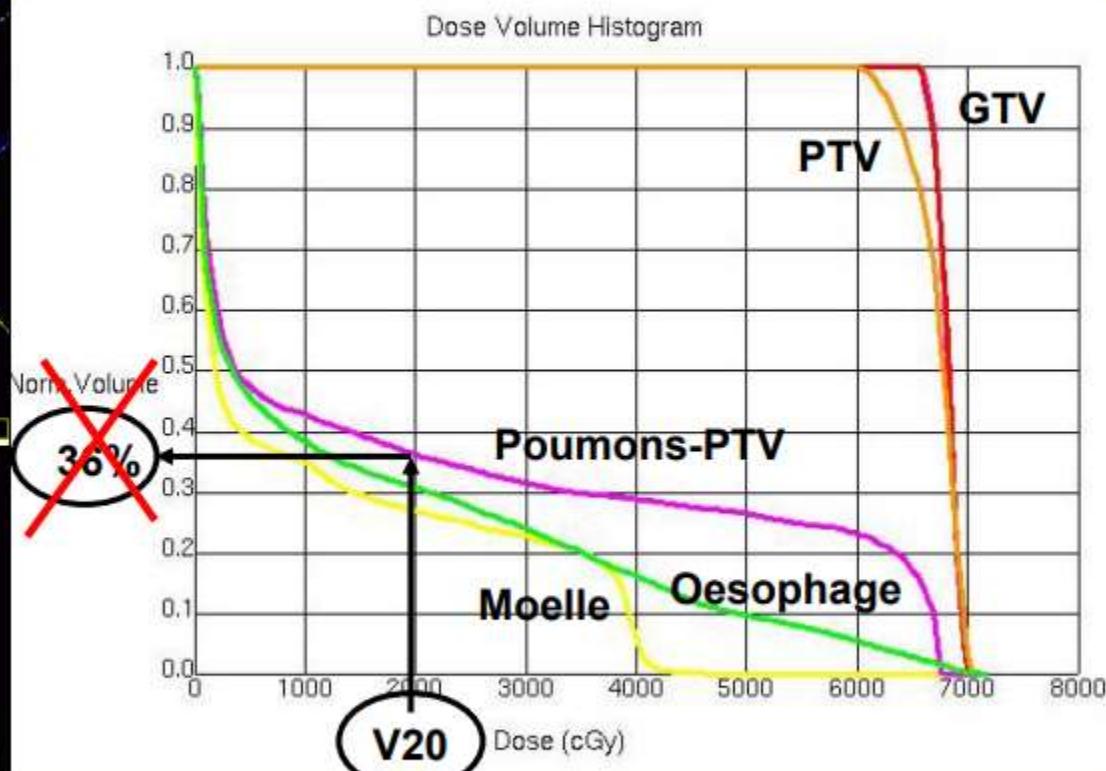
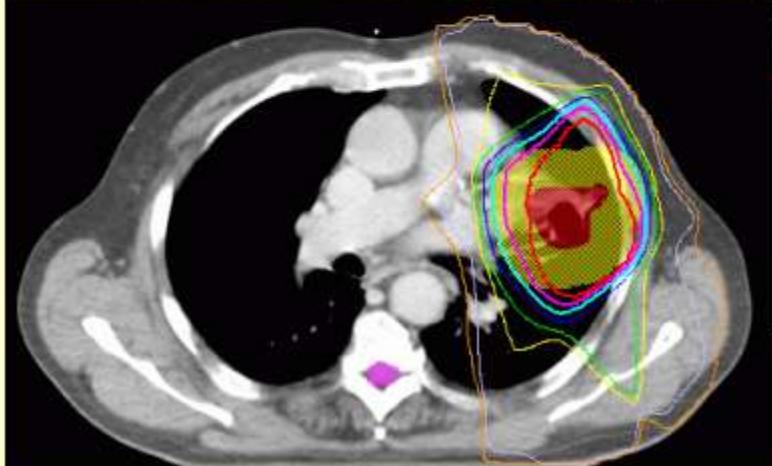
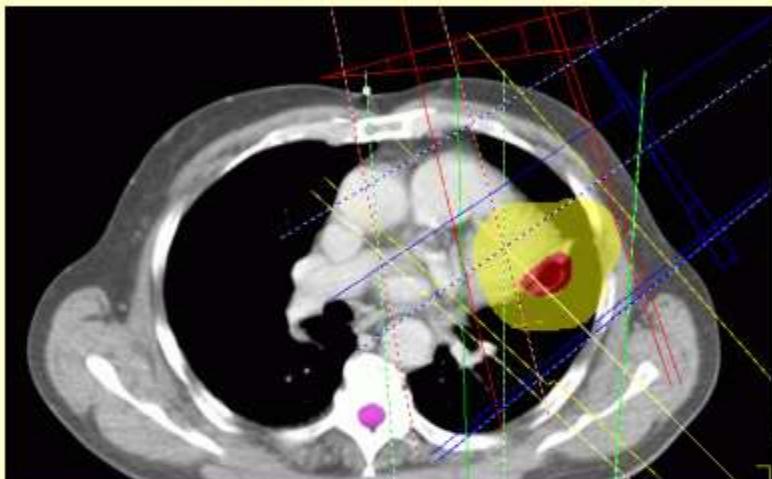


**Collimateur multi-lames**



## 4- Étude de la distribution de dose

- *Modifications successives de la géométrie jusqu'à obtenir une distribution de dose correcte => histogrammes dose-volume*



## **1. Installation du patient en position de traitement**

## **2. Appel des paramètres de l'irradiation**

- Angulation du bras
- Énergie des faisceaux
- Position des lames du collimateur
- Filtres éventuels

## **3. Contrôle du positionnement du patient**

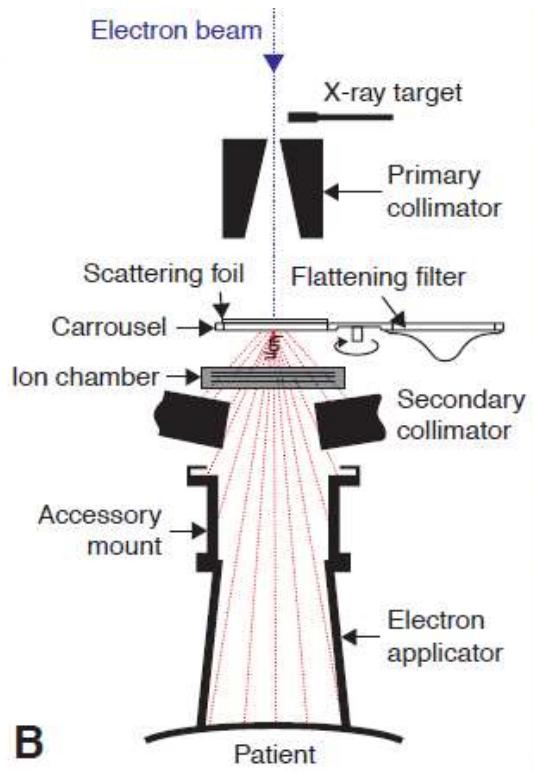
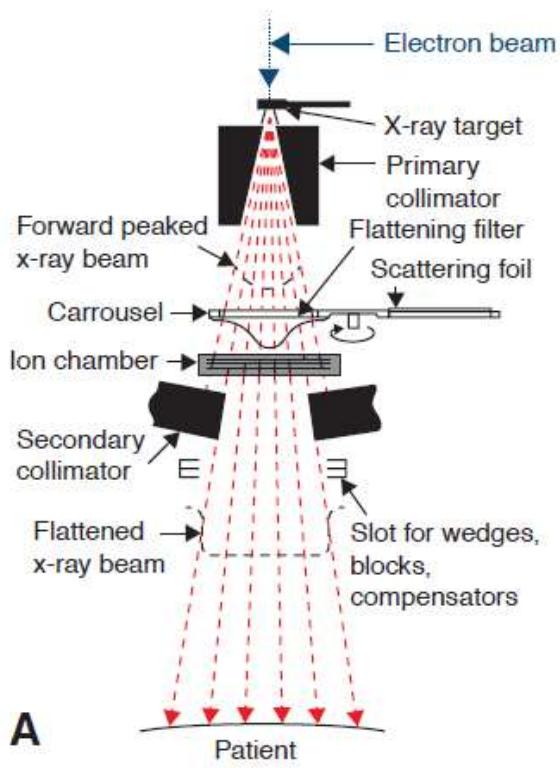
- Images « portales » (IP)
  - MV
  - kV
- Dosimétrie in vivo
  - Capteurs à l'entrée ou à la sortie du faisceau

## **4. Traitement**



<b>Tumeur histologique :</b>	<b>Dose moyenne pour 90 % de stérilisation</b>
Leucémie	15 - 25 Gy
Séminome	25 - 35 Gy
Dysgerminome	25 - 35 Gy
Tumeur de Wilms	25 - 40 Gy
Maladie de Hodgkin	30 - 45 Gy
Lymphome non hodgkinien	35 - 55 Gy
Carcinome épidermoïde	55 - 75 Gy
Adénocarcinome	55 - 80 Gy
Carcinome urothelial	60 - 75 Gy
Sarcome conjonctif	60 - 90 Gy
Gliome cérébral	60 - 80 Gy
Mélanome	70 - 85 Gy

# **Radiothérapie par faisceau d'électron**



les applicateurs, positionnés sous les mâchoires, qui délimitent le champ d'irradiation



## ***Considérations physiques***

Les modalités de radiothérapie par faisceaux d'électrons représentent souvent l'unique alternative pour le traitement des tumeurs superficielles (de profondeur inférieure à 5 cm).

Utilisés depuis les années 1950, les faisceaux d'électrons sont produits par des accélérateurs linéaires. Les machines de traitement accélèrent des électrons pour constituer un faisceau primaire, diffusé dans des couches fines et collimaté.

Les énergies utilisées pour la thérapie vont de 4 MeV à 22 MeV

## Le concept de parcours

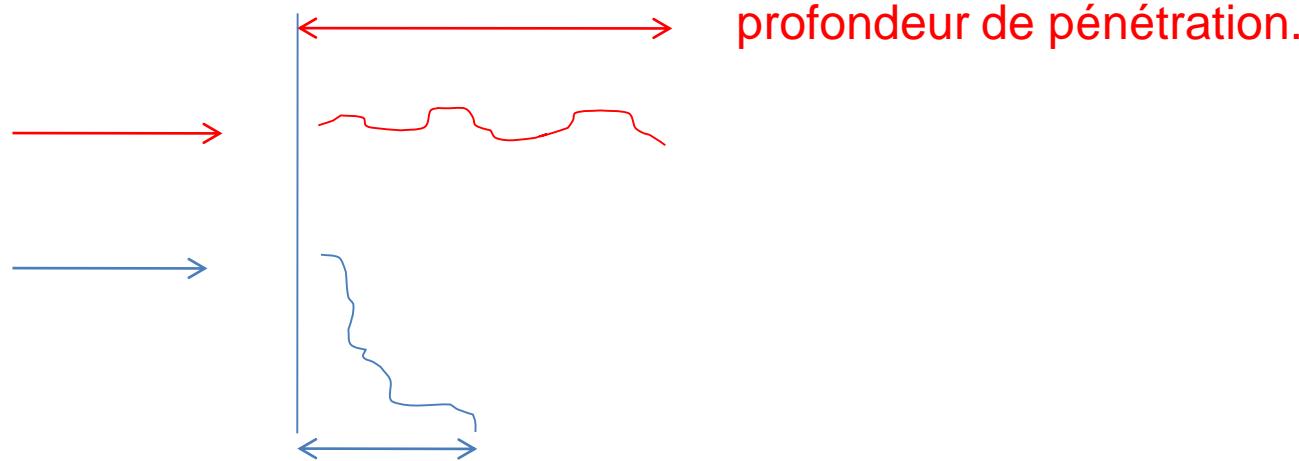
Le parcours CSDA ( $R_{CSDA}$ ) d'un électron d'énergie cinétique  $E_0$  est une quantité calculée suivant la relation

$$R_{CSDA} = \int_0^{E_0} \left[ \frac{S(E)}{\rho} \right]^{-1} dE$$

où  $\frac{S(E)}{\rho}$  est le pouvoir d'arrêt massique total.

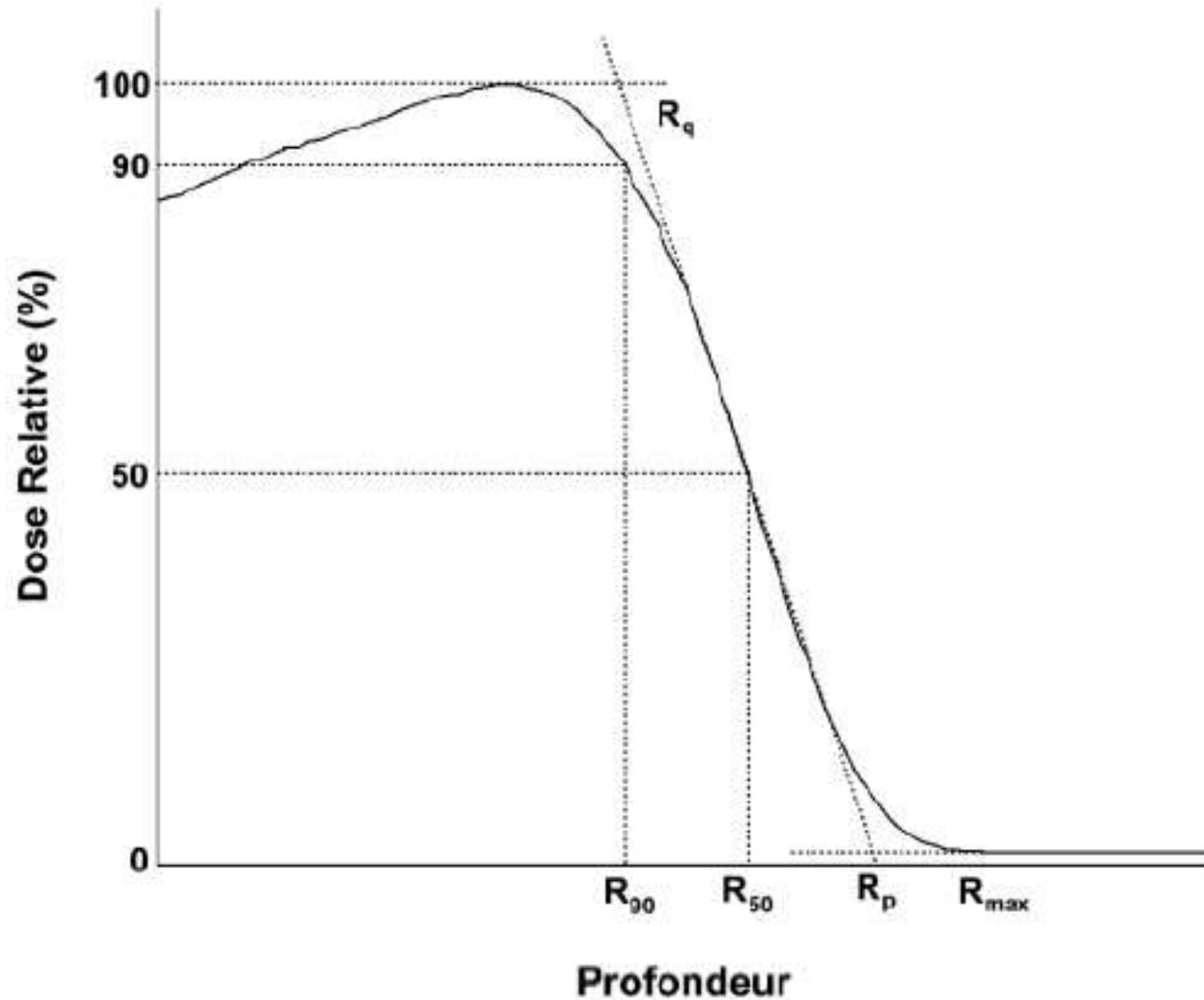
Le parcours CSDA représente la moyenne du parcours d'un électron dans un milieu donné **il ne s'agit pas de la profondeur de pénétration.**

**(CSDA) Continuous Slowing Down Approximation**



profondeur de pénétration.

Electron energy (MeV)	CSDA range in air (g/cm <sup>2</sup> )	CSDA range in water (g/cm <sup>2</sup> )
6	3.255	3.052
7	3.756	3.545
8	4.246	4.030
9	4.724	4.506
10	5.192	4.975
20	9.447	9.320
30	13.150	13.170

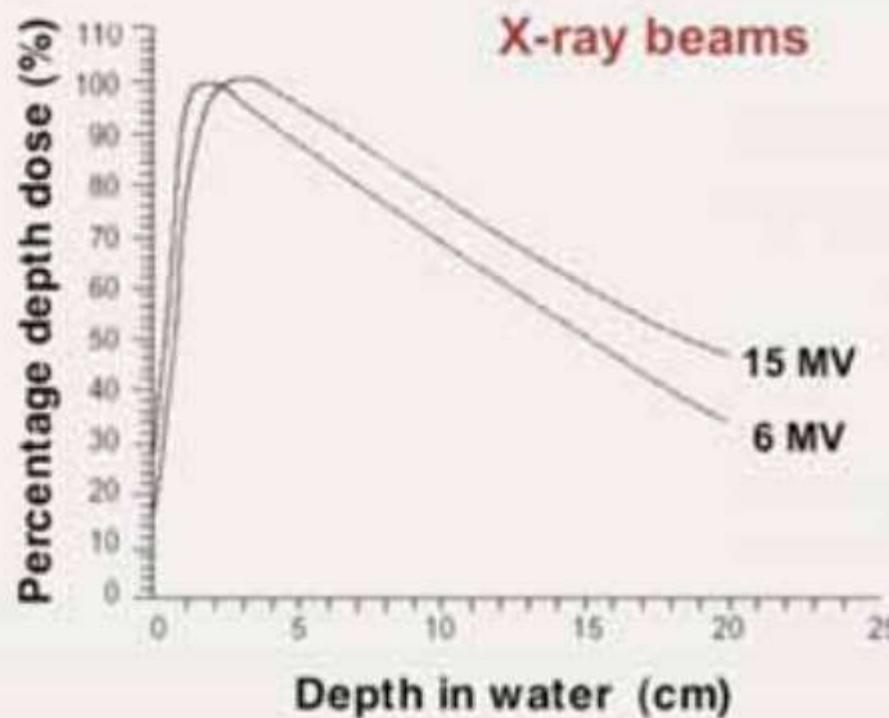
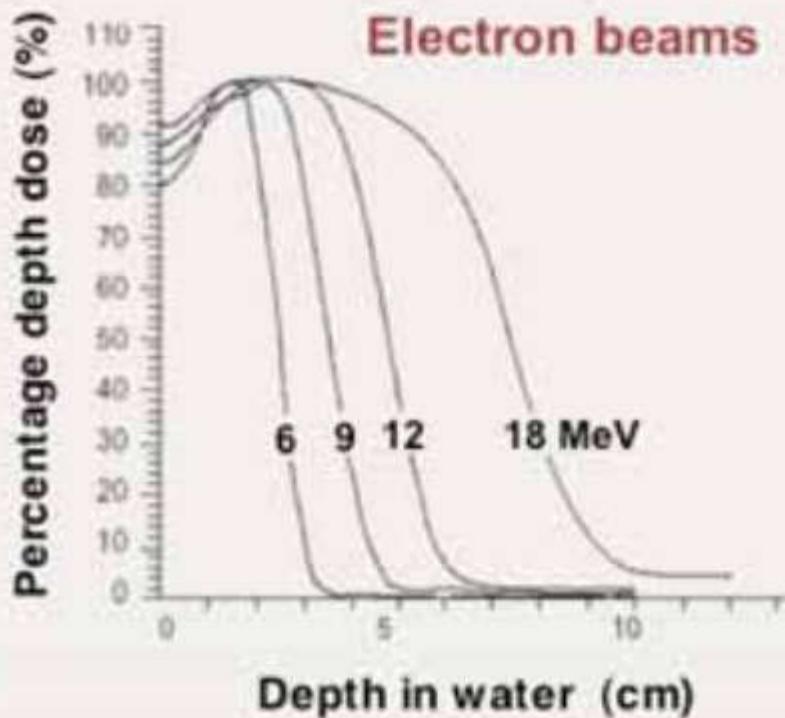


faisceau d'électrons dans l'eau et définition des parcours  $R_{90}$ ,  $R_{50}$ ,  $R_p$ ,  $R_{max}$  et  $R_q$ .

- le parcours maximal  $R_{\max}$  est la profondeur à laquelle le rendement en profondeur rejoint le fond bremsstrahlung ;
- le parcours pratique  $R_p$  est la profondeur de l'intersection entre la tangente au gradient de dose absorbée du rendement en profondeur et le fond bremsstrahlung ;
- Les profondeurs  $R_{90}$  et  $R_{50}$  sont les profondeurs auxquelles le rendement en profondeur atteint respectivement les valeurs 90% et 50% au-delà de la profondeur du maximum de dose absorbée  $Z_{\max}$  ;
- La profondeur  $R_q$  est la profondeur du point d'intersection de la tangente au gradient de dose absorbée et le niveau du maximum de dose absorbée.

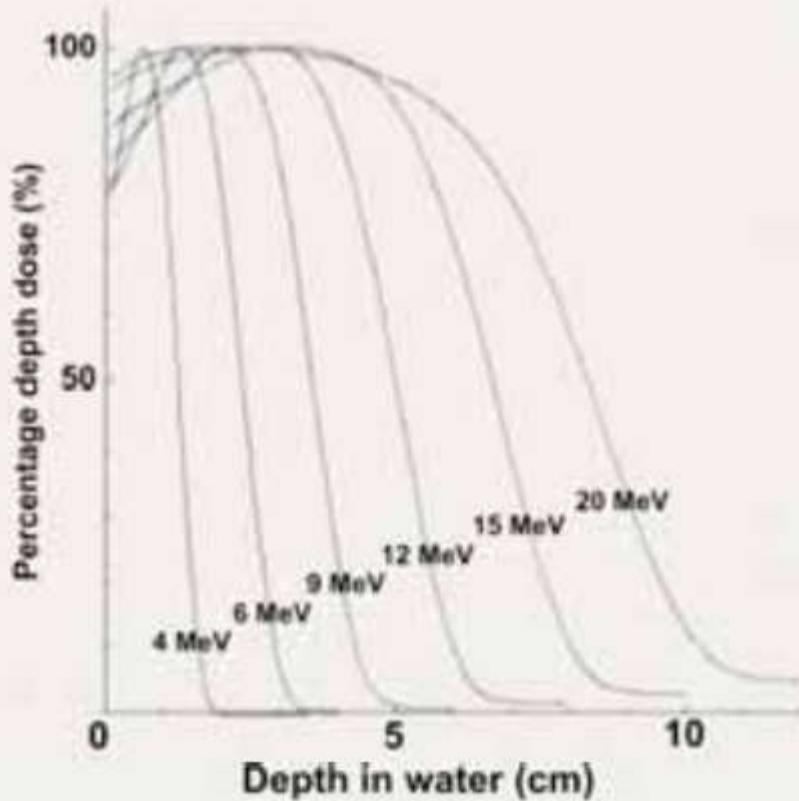
Energy (MeV)	$R_{90}$ (cm)	$R_{80}$ (cm)	$R_{50}$ (cm)	$R_p$ (cm)
6	1.7	1.8	2.2	2.9
8	2.4	2.6	3.0	4.0
10	3.1	3.3	3.9	4.8
12	3.7	4.1	4.8	6.0
15	4.7	5.2	6.1	7.5
18	5.5	5.9	7.3	9.1

- The general shape of the central axis depth dose curve for electron beams differs from that of photon beams.



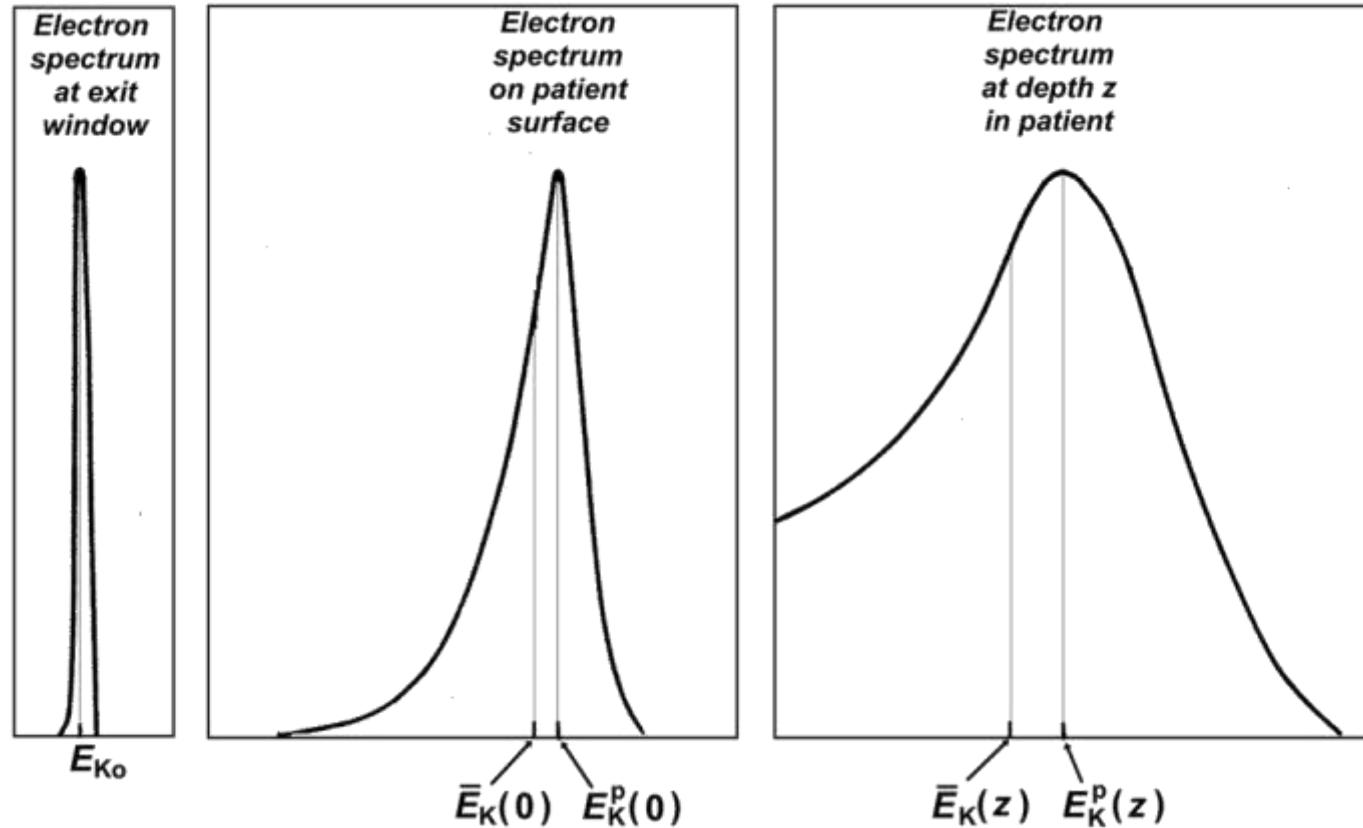
The bremsstrahlung contamination of electron beams depends on electron beam energy and is typically:

- Less than 1% for 4 MeV electron beams.
- Less than 2.5% for 10 MeV electron beams.
- Less than 4% for 20 MeV electron beams.



## Spectres des électrons

Depend de la position choisie



## Courbes iso dose des électrons

La thérapie par faisceau d'électrons est généralement appliquée dans le traitement des tumeurs superficielles ou sous-cutanées.

Le traitement est généralement administré avec un seul champ d'électrons directs à un SSD nominal de 100 cm.

La dose est généralement prescrite à une profondeur qui se situe au niveau ou au-delà de la marge distale de la cible.

