

Module 10 Cancérologie Oncohématologie		Auteurs : Pr Schraub & Dr Noël
Titre	RADIOTHERAPIE DES CANCERS	
Objectifs pédagogiques	<ul style="list-style-type: none"> ○ Connaître les bases de la radiothérapie ○ Connaître les types de radiothérapie et principe d'utilisation (radiothérapie externe, curiethérapie) ○ Connaître les effets secondaires de l'irradiation ○ Connaître les principales indications de la radiothérapie 	
ENC Item 141	Traitement des cancers : chirurgie, radiothérapie, chimiothérapie, hormonothérapie. La décision thérapeutique multidisciplinaire et l'information du malade	
Objectifs ENC :	<ul style="list-style-type: none"> ○ Décrire les grands principes des traitements en cancérologie et expliquer la nécessité d'une décision multidisciplinaire en tenant compte de l'avis du patient. ○ Expliquer les effets secondaires les plus fréquents et les plus graves des traitements, leurs signes d'appel et leur prévention. 	

Introduction:

La radiothérapie s'est développée très rapidement après la découverte des rayons X par W. Röntgen, le 8 novembre 1895, de la radioactivité par H. Becquerel en 1896 et du radium 226 par P. et M. Curie en 1898. En effet, dès le mois de juillet 1896, une première publication française dans la revue Lyon médicale rapportait le cas d'un patient dont la survie aurait été prolongée grâce à une irradiation.

La radiothérapie est souvent associée à la chirurgie et à la chimiothérapie. Elle participe au caractère curatif des traitements dans 45% des cas. De plus, près de 70% des patients auront une radiothérapie au cours de leur maladie cancéreuse, en particulier pour les métastases osseuses ou cérébrales. Ainsi, dans une année où 300 000 nouveaux cas de cancers sont diagnostiqués, 210 000 patients auront une radiothérapie.

Les différentes méthodes d'irradiation:

La terminologie reste encore floue et peu homogène en matière de radiothérapie. On retiendra schématiquement les différentes méthodes suivantes :

- **Radiothérapie externe** ou *radiothérapie transcutanée*: c'est l'ensemble des techniques où la source d'irradiation est placée à l'extérieur du malade et généralement à une certaine distance de lui. Elle utilise des accélérateurs linéaires.
- **Curiothérapie** : c'est l'utilisation de sources radioactives scellées (iridium, césium) placées au cours d'une intervention dans les tissus tumoraux ou dans une cavité naturelle (vagin-utérus).

- **Radiothérapie métabolique** : c'est l'utilisation de sources radioactives généralement injectables (non scellées) qui vont se fixer grâce à leur métabolisme sur les cellules cibles (iode 131 et thyroïde- phosphore 32 et maladie de Vaquez). Elle est du ressort de la médecine nucléaire et n'appartient pas au sens courant du terme à la radiothérapie.

Les rayonnements utilisés en radiothérapie

Les photons: ce sont les principales particules utilisées en radiothérapie. Il s'agit de particules électromagnétiques qui n'ont pas de masse. Dans la matière, la dose qu'ils distribuent décroît de façon "pseudo-exponentielle" à partir de la source et sont indirectement ionisants car non chargés. Ceux sont:

- les rayons X. Ils sont caractérisés par une énergie variant de 4 à 25 MV (MégaVolt). Les rayons X sont produits freinage d'un faisceau d'électrons (par exemple dans du tungstène).

- les rayonnements gamma issus des désintégrations nucléaires de certains isotopes (Césium, Iridium, Cobalt...).

Les électrons: c'est la particule produite dans la quasi-totalité des accélérateurs pour la radiothérapie, qui sert de source pour la production des photons mais qui est également utilisée directement pour le traitement, dans le traitement de tumeurs peu profondes. Leur énergie se situe dans la gamme 4 à 25 MeV. Les électrons sont aussi produits dans la matière par l'interaction des photons et de celle-ci et participent ainsi à leur action biologique.

Les hadrons (Protons, neutrons et ions légers (hélium, carbone, argon,...)). Ce sont des particules utilisées en radiothérapie que dans un nombre limité de centres (3 en France). Elles sont caractérisées soit par un effet biologique plus important (pour une même dose déposée, l'effet biologique est plus important que pour les photons) c'est le cas des neutrons et des ions, soit par des avantages balistiques (capacité de contrôler précisément le parcours des particules), c'est le cas des protons et des ions.

Action biologique et radiobiologie des rayonnements ionisants

La radiothérapie agit par l'intermédiaire de radiations ionisantes. L'action des radiations est physique, chimique puis biochimique. Les radiations ionisantes ont la capacité de pénétrer dans la matière et d'y déposer de l'énergie le long de leur parcours. Ce dépôt d'énergie se fait soit par **l'action directe** de particules incidentes chargées avec le milieu (électrons, protons), soit **indirectement** par la mise en mouvement d'électrons du milieu par des particules non chargées (photons, neutrons).

La première étape est **l'ionisation de l'eau** qui par des réactions chimiques et biochimiques en chaîne va produire des radicaux libres. Les **radicaux libres** les plus réactifs sont ceux qui sont formés via l'interaction avec l'**oxygène** (O₂). Ceux-ci vont interagir avec les molécules cellulaires et principalement l'**ADN** qui est la cible principale des rayonnements ionisants. Ces interactions vont produire diverses lésions de l'ADN: altérations de bases, adduits, pontages protéine-ADN, pontage ADN-ADN, **cassures** simple-brin ou **double-brin**. Bien que de loin les plus rares, ces dernières sont responsables de la **mort cellulaire** car leur **réparation** n'est pas possible.

La sensibilité des cellules à l'irradiation dépend de plusieurs facteurs:

- la phase du cycle, les cellules en phase G2-M sont les plus radiosensibles
- de la concentration en oxygène

- des capacités de réparation
- de la sensibilité intrinsèque

Les cellules saines sont moins souvent en cycle, ont de meilleures capacités de réparation et une plus faible sensibilité intrinsèque que les cellules tumorales. Ces facteurs sont la cause d'un effet différentiel entre les cellules saines et les cellules tumorales. La mort cellulaire est plus importante dans les tissus tumoraux que dans les tissus sains après une dose d'irradiation. Cependant, l'oxygénation des tissus sains est souvent meilleure que celle des tissus malins dans lesquels l'angiogénèse est souvent anarchique. La mort cellulaire radio-induite dans les tumeurs solides ou dans la plupart des tissus sains n'est pas immédiate, elle est dite **retardée** et correspond à la **mort mitotique**. Dans les tumeurs hématologiques, cette mort peut être plus rapide car elle procède d'un mécanisme particulier, la mort programmée ou **apoptose**.

Unité de dose et doses en radiothérapie

Une radiothérapie a pour objectif de délivrer une dose suffisante au volume cible tumoral tout en épargnant les organes sains de voisinage. La dose s'exprime en Gray (Gy) ($1 \text{ Gy} = 100 \text{ cGy}$) et correspond à des Joules par kilogramme ($1 \text{ Gy} = 1 \text{ J/Kg}$). La radiothérapie peut être utilisée dans plusieurs objectifs, **curatif** d'une tumeur en place, **préventif** d'un site opéré ou d'une région potentiellement site de métastases (ganglions lymphatiques, cerveau...) ou **palliatif** dans le cadre de métastases.

La **dose totale** ne suffit pas à exprimer un traitement par irradiation, il faut préciser, la **dose par fraction**, le **nombre de fractions** et le **nombre de fraction par jour** (ou semaine).

- Une **radiothérapie classique** délivre la dose totale par **fraction de 1,8 à 2 Gy, une fraction par jour, 5 jours par semaine**. *Le fait de traiter 5 jours par semaine tient dans les résultats empiriques obtenus par Claudius Régaud afin d'obtenir le meilleur ratio efficacité/tolérance.*

- Une **radiothérapie hypofractionnée** délivre une dose totale par des fractions supérieures à 2 Gy afin d'atteindre une dose totale dont la valeur est inférieure mais équivalente à une dose totale délivrée par fraction de 1,8 à 2 Gy par jour, 5 jours par semaine (*30 Gy en 10 fractions de 3 Gy est équivalent à 39,6 Gy délivrée par 22 fractions de 1,8 Gy*). L'irradiation hypofractionnée est utilisée principalement dans des contextes palliatifs. L'hypofractionnement extrême est le **monofractionnement** qui consiste à délivrer la dose en une seule fraction.

- Une **radiothérapie hyperfractionnée** délivre une dose en deux ou trois fractions, inférieures à 1,8 Gy, par jour pour atteindre une dose totale supérieure mais équivalente à une dose totale délivrée par fraction de 1,8 à 2 Gy par jour (*87,5 Gy en 70 fractions de 1,25 Gy, 2 fractions par jour, 5 jours par semaine est équivalent à 70 Gy en 35 fractions de 2 Gy, une fraction par jour, 5 jour par semaine*). L'hyperfractionnement est utilisé pour augmenter la dose dans la tumeur sans augmenter le risque de complications dans les tissus sains. *Les fractions sont séparées de 6 à 8 heures pour permettre aux tissus sains de réparer les lésions radio-induites (temps insuffisant pour les tumeurs fassent de même).*

Les doses délivrées dépendent de l'objectif à atteindre. Les **doses curatives** varient, 25-30 Gy pour guérir un séminome testiculaire, 65-70 Gy pour un carcinome et 70-80 Gy pour un sarcome (fractionnement classique). Les **doses préventives** sont de l'ordre de 24-40 Gy pour un encéphale à 50 Gy pour les aires ganglionnaires ou un sein après tumorectomie (fractionnement classique). Les **doses palliatives** sont extrêmement variables, 30 Gy en 10 fractions pour un encéphale siège de multiples métastases ou pour une localisation osseuse voire 8 Gy en une fraction pour une métastase osseuse hyperalgique sans risque de fracture, chez un patient très altéré, ou 20 Gy en une fraction dans une site métastase encéphalique....

Indépendamment de la dose délivrée, la **radiocurabilité** d'une tumeur dépend de la **radiosensibilité intrinsèque** de la tumeur liée au type histologique, de la **taille** de la lésion, de son **siège de la tumeur** par rapport aux organes sains critiques

L'organisation de traitement:

La radiothérapie nécessite une organisation qui ne permet pas (hormis les urgences palliatives) de traiter les patients le jour même de la demande. Une procédure est instituée qui consiste, pour la radiothérapie externe, en une **consultation**, une **simulation**, une **délinéation**, une **dosimétrie**, une **mise en place avec contrôle** et enfin le **traitement**.

- **la consultation:** permet d'examiner le patient (tumeur des VADS, cicatrice...), de préciser l'objectifs de l'irradiation, de choisir la technique d'irradiation (radiothérapie externe, curiethérapie...), la position du patient pendant le traitement (décubitus dorsal ou ventral, main le long du corps ou sur la tête...). Elle permet aussi d'expliquer et de dédramatiser le traitement.

- **La simulation:** consiste à faire une scanographie (grâce à un scanner dosimétrique dédié) de la zone d'intérêt où se trouve la tumeur ou le site à irradier. Ce scanner se fait dans le service de radiothérapie. C'est durant cette période que sont fabriqués certains matériels de contention (masque en plastique thermoformée (figure 2), coque sous vide...) afin que le patient ait toujours la même position lors du traitement. Afin de retrouver la position choisi lors du traitement des marques sont placées soit sur le masque soit sur le corps du patient (tatouages effaçables ou indélébiles).

- **La délinéation:** consiste à délimiter sur les images scanner, grâce à un programme spécial, les zones tumorales (tumeur, sites suspects, sites à risque d'extension...) et les organes sains à risque de proximité.

- **La dosimétrie** (figure 5): consiste à choisir la balistique du traitement pour irradier au mieux la tumeur tout en protégeant les organes sains de proximité (type de rayonnements, énergie, nombre de faisceaux, angulation des faisceaux...)et utilise des programmes informatiques sophistiqués pour calculer la dose délivrée dans la tumeur et dans les organes sains de proximité. La protection des organes à risque se fait soit par l'interposition entre le patient et la machine de plombs coulé à la forme désirée, soit grâce à un collimateur multilames dont les lames s'adaptent à la zone désirée (figure 4).

- **La mise place:** consiste à positionner le patient comme lors de la simulation grâce aux repères. Cette position sera contrôlée tous les jours et permet aussi de contrôler que la balistique choisie est compatible avec le patient et le matériel choisi. Un contrôle de la zone irradiée est effectué grâce à des clichés radiologiques ou par à une imagerie portale (le rayonnement diffusé, après avoir traversé le patient, est récupéré pour faire une image). Ce contrôle est effectué au moins hebdomadairement durant le traitement. Une **surveillance médicale** clinique hebdomadaire est également assurée pendant l'irradiation pour apprécier les réactions du traitement et permettre de les atténuer par différentes médications.

- Le traitement consiste à délivrer une irradiation grâce à un **accélérateur linéaire** (figure 1). Ils produisent des électrons d'énergie comprise entre 6 et 25 MeV (Méga-électron-Volts) qui sont libérés par un canon à électrons et accélérés par un champ de haute fréquence produit par un magnétron ou un klystron. L'interposition dans le faisceau d'une cible en tungstène conduit à la production de photons X d'énergie maximale variant de 4 à 25 MV (MégaVolts). Les électrons sont particulièrement adaptés pour traiter des tumeurs superficielles surtout si elles sont en regard d'organes critiques (cœur, moelle épinière...) mais ils ont l'inconvénient de donner une dose à la peau plus importante que les photons. L'énergie des photons X est choisie en fonction de la profondeur de la tumeur. Tous les faisceaux de traitement sont traités chaque jour. Le bras de l'accélérateur (syn. tête, statif, gantry) va donc tourner plusieurs fois pour atteindre les angles d'irradiation désirés. Le temps pour délivrer 2 Gy est d'environ une minute, le temps d'irradiation quotidien est de l'ordre de 10 minutes (comprenant la mise en place, les contrôles et dépend du nombre de faisceaux donc du nombre de rotations du bras).

LA CURIETHERAPIE OU BRACHYTHERAPIE (FIGURE 6)

Le **principe** de la curiethérapie est de délivrer une dose très élevée au contact d'une source radioactive, la diminution de la dose se faisant très rapidement avec la distance selon la loi de l'inverse du carré de la distance ($1/d^2$), l'**objectif** est donc de délivrer localement une dose élevée dans un volume adapté à la tumeur.

Elle utilise des sources scellées d'iridium 192 ou de césium 137 suffisamment miniaturisée pour autoriser le chargement différé. Les sources sont soit mises dans un organe (sein, plancher de bouche, base de langue...), il s'agit de la **curiethérapie interstitielle**, soit placée dans une cavité grâce à un moule ou un guide (vagin, utérus, oesophage...), il s'agit alors de **plésiocuriethérapie**. Des tubes sont placés sous anesthésie générale dans la zone à irradier. ces tubes permettent le déplacements par pas d'une source unique qui parcourt chaque tube mise en place à partir d'un **projecteur de sources**. Une dosimétrie prévisionnelle est calculée avant de brancher les tubes au projecteur de sources. La source peut être de deux types, de **bas débit de dose**, délivrant 0,4 à 2 Gy/h ou de **haut débit de dose** (> 12 Gy/h). Dans le premier cas, il s'agit d'une irradiation continue qui dure de 2 à 5 jours selon la dose délivrée. Elle nécessite une hospitalisation dans une chambre munie de protection. Les visites y sont limitées et réglementées. Dans le deuxième cas, le traitement est rapide (quelques minutes) et fractionné. Il est ambulatoire. La curiethérapie à haut débit de dose est réservée aux patients pour lesquels une hospitalisation allongée n'est pas

souhaitable (patiente âgée, irradiation vaginale), ou pour lesquels une tolérance des tubes de façon prolongée n'est pas possible (curiethérapie de bronche ou de l'œsophage).

Depuis quelques années s'est développée la **curiethérapie de prostate** qui consiste à mettre des grains d'iode 125 radioactif dans la prostate. Contrairement aux autres curiethérapies, les grains restent en place délivrant la dose de façon continue, localisée, sur une période de plusieurs semaines, une dose supérieure à 140 Gy. Des précautions sont nécessaires pour éviter l'irradiation des proches en contact avec le patient ou une dissémination des grains par voie naturelle.

Les effets de l'irradiation

Les effets de l'irradiation peuvent être séparés entre réaction précoces et réactions tardives. Les réactions précoces se développent dans les 3 mois après le début de l'irradiation et sont réversibles. Ils sont le fait des tissus à renouvellement rapide (moelle hématopoïétique, muqueuse...). Les effets tardifs apparaissent après 3 mois, ils sont le plus souvent irréversibles et sont le fait des tissus à renouvellement lent (tissus cérébral, conjonctif...). **Les effets de l'irradiation ne se développent que dans les zones irradiées.** Les effets précoces n'apparaissent que rarement dans les premiers jours. En effet, deux mécanismes expliquent l'apparition relativement retardée des effets précoces: la mort retardée des cellules des tissus tumoraux fait que l'œdème réactionnel physiologique ne se développe qu'au terme de quelques jours (irradiation cérébrale), d'autre part, dans les tissus sains, le contingent de cellules le plus radiosensible est celui des cellules souches. Il faut donc un délai d'élimination naturelle des cellules différenciées pour observer leur manque dû à la destruction des cellules souches (15-21 jours pour l'apparition d'une mucite, 4 semaines pour une alopécie). Les risques de complications à long terme, donc les complications tardives dépendent principalement de la dose par fraction et du volume irradié. Afin de ne pas développer de telles complication, les doses dans certains organes critiques ne doivent pas être dépassées: 70 Gy pour la peau, 45 pour la moelle épinière, 55 Gy pour le tronc cérébrale, 15 Gy pour le rein, 20 Gy dans le poumon (moins de 30% du poumon doit recevoir cette dose), de 30 à 50 Gy pour l'intestin grêle, 40 Gy pour le cœur. A partir de 35-40 Gy une diminution chronique de la salive est observée. Cependant, certains organes sont particulièrement sensibles, une ménopause radique (parfois à visée thérapeutique) est observée après 12 Gy, une cataracte (principalement postérieure) peut apparaître après 2 Gy. Afin de protéger les organes, outre les plombs coulés et les collimateurs multilames, une nouvelle forme d'irradiation avec modulation d'intensité qui permet de moduler la dose en fonction de l'organe irradié ou l'utilisation de radioprotecteurs permettent de limiter certaines conséquences de l'irradiation.

Techniques d'irradiation externe particulières

- Irradiation corporelle totale (Total Body Irradiation)

Elle est destinée à préparer l'organisme à une allogreffe de moelle osseuse pour traiter certaines formes d'hémopathies malignes. Une dose 10 Gy est délivrée en 1 fraction avec une protection des poumons à 8 Gy. Un mode fractionné a aussi été développé jusqu'à 6 fractions.

- Irradiation cutanée totale

Elle utilise des électrons de 4 MeV pour traiter l'ensemble du revêtement cutané dans le cadre d'un mycosis fungoïde et quelques lymphomes cutanés. Une dose de 30 Gy est délivrée en 1é fractions sur 6 semaines

- Radiothérapie peropératoire

Consiste à irradier une tumeur profonde (rectale, pancréatique...) par électrons au cours d'une intervention chirurgicale, après avoir éloigné les organes critiques (rein, tubes digestif, ovaires...). L'irradiation est faite à dose unique. Le malade est sous anesthésie générale et est transporté endormi de la salle d'intervention à la salle d'irradiation. Cette technique qui implique une organisation importante.

- Radiothérapie en conditions stéréotaxiques par mini faisceaux

Cette technique utilise de multiples faisceaux convergeant vers une cible pour traiter les malformations artério-veineuses ou des métastases cérébrales par une dose unique. La mise en place du patient est millimétrique et nécessite l'utilisation d'un cadre de fixation qui permet une immobilisation parfaite. Cette radiothérapie est entreprise soit par accélérateur muni d'un dispositif spécial, soit par un appareil de radiothérapie dédié à cette technique d'irradiation («gamma knife»). Cette technique est aussi appeler radiochirurgie. Du fait de son efficacité prouvée dans les traitements intracrâniens, cette technique se développe pour irradier hors le cerveau de petites cibles à hautes doses en une fraction.

- Hadronthérapie

Ce terme englobe l'irradiation par neutrons, par protons et ions. L'objectif est d'utiliser des particules qui ont soit des caractéristiques balistiques particulières (ions et protons) soit une efficacité biologique très supérieure à celle des photons (neutrons et ions). Les caractéristiques correspondent à une capacité de délivrer la dose en fin de parcours (pic de Bragg) permettant d'augmenter la dose dans les tumeurs tout en protégeant les organes critiques. Les capacités biologiques sont d'augmenter la sensibilité des cellules hypoxiques à l'irradiation. Des cyclotrons permettent l'émission de particules lourdes. Au total 3 appareils sont en place en France, deux permettant une irradiation par protons (Nice et Orsay) et un par neutrons (Orléans). Un centre d'ions est en projet dans la région lyonnaise. Les protons sont intéressantes pour traiter certaines tumeurs oculaires ou des tumeurs de l'axe spinal ou de la base du crâne et les tumeurs de l'enfant. Les neutrons sont utilisés principalement dans le traitement de tumeurs des glandes salivaires et des sarcomes des tissus mous.

La chimioradiothérapie

Consiste à délivrer une chimiothérapie concomitamment à la radiothérapie. Les sels de platine sont les plus utilisés. Elle permet d'augmenter les taux de contrôle local et les taux de survie dans les cancers des voies aérodigestives supérieures, broncho-pulmonaires avancées, du canal anal, du col utérin...

La radiothérapie conformationnelle avec modulation d'intensité

Cette technique représente une des dernière évolution et progrès de la radiothérapie externe. Ces progrès sont parallèles à ceux de l'imagerie et de l'informatique. A partir de contraintes de dose à délivrer dans les tissus tumoraux ou suspects et des doses à ne pas dépasser dans les organes critiques, le programme calcul les facteurs de la meilleure irradiation (angle des faisceaux, collimation et les pondération de chaque temps de faisceaux. Les lames du collimateur multilames s'interpose de façon judicieuse et adaptée afin de moduler la dose dans la tumeur.

Quelques notions de pratiques et utiles:

- Rendement en profondeur (figure 2): afin, de disposer de l'énergie la plus adaptée pour chaque tumeur, les radiothérapeutes disposent de courbe de rendement en profondeur des faisceaux utilisés. La dose déposée dépend de l'énergie et de la profondeur de l'organe. La dose décroît avec l'épaisseur et la densité des tissus traversés. Deux notions sont importantes pour les photons, la profondeur de la dose maximale et la profondeur où est délivrée 50% de la dose.

Ainsi pour des photons de 10 à 15 MV, la profondeur de la dose maximale est de 2 à 3 cm et la profondeur où est délivrée 50% de la dose est de 15 à 20 cm.

Pour les électrons de 6 à 25 MeV, 80% de la dose sont délivrés à x cm de profondeur tel que $x \text{ (cm)} = \text{Energie (MeV)} / 3$ et 10% de la dose sont délivrés à y cm tel que $y \text{ (cm)} = \text{Energie (MeV)} / 2$.

- les volumes spécifiques de la radiothérapie: afin d'utiliser un langage commun, les radiothérapeutes ont adopté une terminologie spécifique. Ainsi le GTV (Gros Tumor volume) correspond au volume tumoral macroscopique qui est la tumeur visible ou supposée visible sur une imagerie adaptée (scanner et ou IRM). Le CTV (Clinical Target Volume) est le volume anatomo-clinique qui englobe le précédent et intègre les régions où la tumeur peut microscopiquement s'étendre ou se disséminer. Le PTV (Planning Target Volume) intègre les incertitudes de mise en place (mouvement du patient, mouvement d'organes...) ou les incertitudes mécaniques des appareils (table, bras isocentrique...). Dans un traitement, le PTV doit être au moins enveloppé par l'isodose 95% de la dose prescrite.

- les isodoses sont des courbes qui délimitent des surfaces ou des volumes qui reçoivent au moins une dose donnée. Elles sont à la base de la dosimétrie.

- les histogrammes dose-volume: il s'agit de courbes déduites des calculs de la dosimétrie qui présente la dose par unité de volume d'un organe ou d'un tissu qui a été délinéé. Il permet ainsi d'adapter la dose en fonctions de certaines contraintes. Ainsi, moins de 30% des poumons doivent recevoir 20 Gy et moins de 20% doivent recevoir 30 Gy. Pour

le foie, moins de 60% doivent recevoir 30 Gy. Pour l'œil moins de 50% doivent recevoir 30 Gy et moins de 30% doivent recevoir 50 Gy.

A partir de ces données et de certains paramètres, peuvent être calculés les TCP et les NTCP. Les TCP (Tumor Control probability) correspondent à la probabilité de contrôle local. Classiquement, les chances de contrôle local sont d'autant plus grandes que plus de 90% ou 95% du volume tumoral est inclus dans l'isodose 95%.

Les NTCP (normal tissu complication probability). Correspondent à la probabilité de complication dans les tissus sains. Classiquement, la dose maximale acceptable est celle pour la quelle le taux de complication (quelle que soit sa gravité) est inférieure à 5% à 5 ans. Pour la moelle la dose est de 45 Gy, pour le tronc cérébral 55-60 Gy, pour le chiasma de 58-60 Gy, de 30 Gy pour un rein en totalité...

Le risque de complication dépend de la dose délivrée, du volume et du type d'organe. Deux types d'organes ont été décrits les organes en ligne ou les organes en parallèle. Les organes en lignes sont principalement la moelle épinière et le tube digestif. L'altération d'une partie de ceux-ci peut entraîner la destruction de l'ensemble (myélite radique, nécrose du grêle...). Les organes en parallèle sont principalement les reins et les poumons. Pour chaque organe, seul l'irradiation de la totalité de l'organe entraîne l'altération définitive de l'organe. En effet composé d'unités fonctionnelles, néphron ou alvéole, seul l'atteinte d'un certains nombre d'entre eux conduit au dysfonctionnement de l'ensemble de l'organe.

Figure 1 : accélérateur linéaire. Le patient est couché sur la table qui peut tourner selon et statif de l'accélérateur (bras, ou gantry) tourne pour atteindre l'angulation désiré pour délivrer l'irradiation.



Figure 2 : rendement en profondeur de photons de différentes énergies (A), la profondeur de 50% de la dose augmente avec l'énergie et d'électrons de 12 et 18 MeV (B), la profondeur de la 50% est beaucoup plus faible que pour les photons.

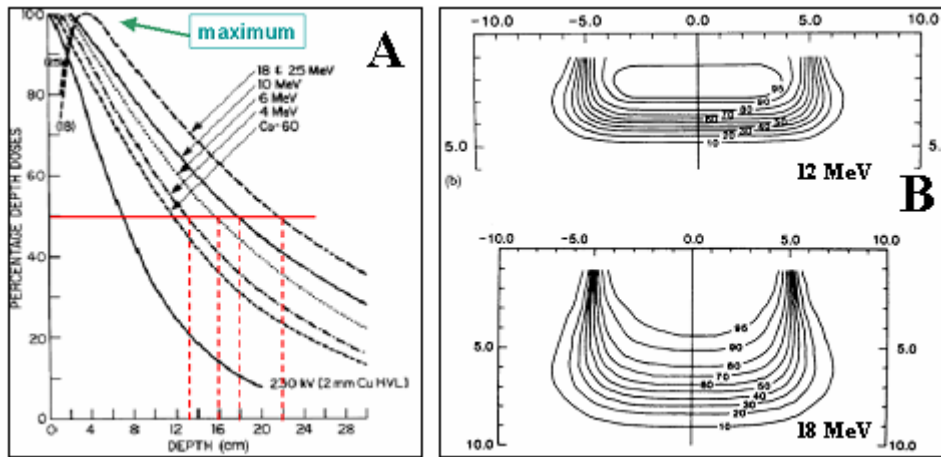


Figure 3: masque de contention. En plastique thermoformé, ces masques sont fabriqués spécifiquement pour les patients à partir d'un gabarit plongé dans une eau à 37° où il s'assouplit. Appliqué sur le visage du patient, il se durcit en conservant la forme du patient. Des marques permettent le centrage quotidien à partir de lasers situés dans la salle.



Figure 4A: protection en cerrobend, alliage contenant du plomb (Pb), cadmium (Cd), bismuth (Bi), Indium (In), et étain (Sn) qui est interposé entre le patient et la machine et qui est dessiné et coulé à la forme désiré selon les délinéations, 4B : collimateur multilames, le mouvement de lames installées dans la tête de l'accélérateur linéaire permet de conformer le faisceau à la forme voulu.



Figure 5A : vision en 3 D d'une irradiation de prostate. Il s'agit d'une vue à partir des pieds, on voit les têtes fémorales, la vessie, le rectum et la prostate. Les différents faisceaux sont visualisés. 5B : isodoses qui entourent les différents organes. Les valeurs sont en cGy. 5C : histogrammes dose-volume de différents structures ou organes.

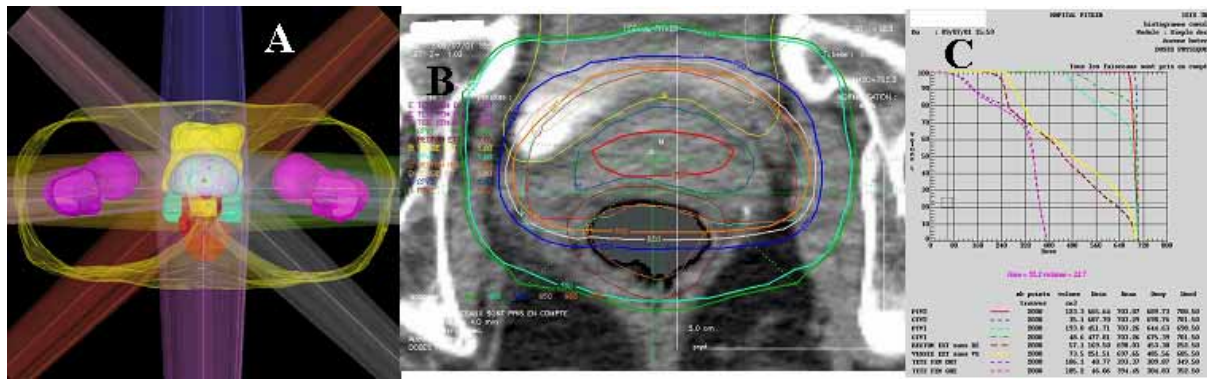


Figure 6A: curiethérapie : implantation de fil de curiethérapie ORL au niveau de la base da langue, les extrémités des gaines sont visibles. Dans les gaines passent les fils radioactifs 6B : radiographie de profil qui montre les fils (dans ce cas fictif = non radioactifs) dans la base de langue. Ces fils seront remplacés par les fils radioactifs quand la dosimétrie (6C) est faite et permet de donner le temps de traitement. 6D : projecteur de source : la source radioactive est dans un compartiment dont elle peut sortir par différents orifices seulement s'ils sont branchés à des gaines dans lesquelles la source va effectuer des déplacements précisément déterminés par l'implantation et la dosimétrie.

