



Disponible en ligne sur

ScienceDirect
www.sciencedirect.com

Elsevier Masson France

EM|consulte
www.em-consulte.com



Mise au point

Synchronisation respiratoire et radiothérapie mammaire



Respiratory synchronization and breast radiotherapy

A. Mège^{a,*}, A. Ziouèche-Mottet^b, V. Bodez^a, R. Garcia^a, A. Arnaud^a, G. de Rauglaudre^a,
N. Pourel^a, B. Chauvet^a

^a Département de radiothérapie et de radiophysique, institut Sainte-Catherine, 250, chemin de Baigne-Pieds, 84000 Avignon, France

^b Centre de radiothérapie Saint-Louis, Croix-Rouge française, rue Nicolas-Appert, 83000 Toulon, France

INFO ARTICLE

Mots clés :

Radiothérapie des cancers du sein
Modulation d'intensité
Mouvements thoraciques
Assurance qualité
Blocage inspiratoire profond
Épargne cardiaque

RÉSUMÉ

La radiothérapie adjuvante des cancers du sein améliore les taux de contrôle locorégional et de survie globale, mais le bénéfice des techniques d'irradiation de haute précision, comme la modulation d'intensité, peut être compromis par les mouvements respiratoires. Ces mouvements pendant les fractions peuvent entraîner un sous- ou un surdosage des volumes cibles, ou à exposer les organes à risque de proximité. Cet article résume les mouvements respiratoires, leurs effets sur l'imagerie, la dosimétrie et la délivrance de dose lors de la radiothérapie des cancers du sein. Nous proposons une mise au point sur les méthodes de synchronisation respiratoires disponibles en radiothérapie mammaire, pour minimiser l'impact des mouvements respiratoires et épargner les organes de proximité, comme le cœur et les poumons.

© 2016 Publié par Elsevier Masson SAS au nom de Société française de radiothérapie oncologique (SFRO).

ABSTRACT

Adjuvant radiation therapy following breast cancer surgery continues to improve locoregional control and overall survival. But the success of highly targeted-conformal radiotherapy such as intensity-modulated techniques, can be compromised by respiratory motion. The intrafraction motion can potentially result in significant under- or overdose, and also expose organs at risk. This article summarizes the respiratory motion and its effects on imaging, dose calculation and dose delivery by radiotherapy for breast cancer. We will review the methods of respiratory synchronization available for breast radiotherapy to minimize the respiratory impact and to spare organs such as heart and lung.

© 2016 Published by Elsevier Masson SAS on behalf of Société française de radiothérapie oncologique (SFRO).

Keywords:

Breast cancer radiotherapy
Intensity modulated radiotherapy
Respiratory motion
Quality assurance
Deep inspiration breath-hold techniques
Cardiac sparing

1. Introduction

Les techniques de haute précision, tout en maintenant le bénéfice apporté par la radiothérapie mammaire en termes de contrôle local et de survie globale, diminuent la morbidité à long terme [1–5]. Les mouvements respiratoires en cours d'irradiation génèrent une incertitude géométrique importante. En modifiant l'anatomie des différents volumes, les mouvements thoraciques ont un impact dosimétrique : sur- ou sous-dosage des volumes cibles, surexposition des organes à risque. Les conséquences cliniques à

long terme sont un risque accru de rechute ou de toxicité tardive [6]. Il est donc indispensable de tenir compte de ces mouvements pour garantir la qualité du traitement, en particulier avec les techniques de modulation d'intensité associées à des gradients de dose étroits, de plus en plus souvent utilisées en routine [7]. Les évolutions technologiques actuelles permettent d'intégrer la prise en compte de ces mouvements.

2. Impact anatomique des mouvements thoraciques en cours d'irradiation mammaire

L'incertitude géométrique en cours d'irradiation mammaire est principalement due aux mouvements thoraciques auxquels s'ajoutent les incertitudes de repositionnement de la patiente et du

* Auteur correspondant.

Adresse e-mail : a.mege@free.fr (A. Mège).

sein [8,9]. L'acquisition des volumes cibles se fait dans une position définie, à un instant donné du cycle respiratoire, ce qui peut entraîner un erreur systématique liée au mouvements des organes sains de proximité pulmonaires et cardiaques. En outre, l'interférence entre l'acquisition scanographique et le mouvement de l'organe peut entraîner une distorsion de l'image [10]. Cette distorsion est limitée si la vitesse d'acquisition scanographique est élevée [11]. Il a été montré qu'il n'y avait pas d'intérêt à réaliser une acquisition quadridimensionnelle en sénologie car la distorsion du volume cible est limitée lors d'une respiration calme, comparativement aux images bronchopulmonaires [12].

L'incertitude entre les fractions, qui correspond à un déplacement entre deux séances d'irradiation, est due le plus souvent à une erreur de repositionnement, en moyenne de 2 à 3 mm, de la patiente sur la table de traitement [13]. Elle peut être réduite grâce à des contrôles de qualité reposant sur l'imagerie de contrôle.

Les mouvements respiratoires au cours d'une séance entraînent eux une incertitude pendant les fractions sur la délivrance de dose quotidienne [9,14–16]. L'amplitude et les caractéristiques des mouvements entraînent une inhomogénéité dans la distribution de dose étudiée et préparée de façon statique. Les mouvements respiratoires humains relèvent d'un état non stationnaire et sont difficiles à modéliser [17]. La littérature évalue ces mouvements respiratoires dans l'axe antéropostérieur entre 0,8 mm et 10 mm [18–20]. En outre, l'inspiration augmente le diamètre antéropostérieur du thorax [21]. Avec une moyenne de déplacement de l'artère coronaire antérieure de 2,3 mm due à la contraction cardiaque et des amplitudes respiratoires mesurées jusqu'à 1 cm, le retentissement le plus important des mouvements pendant les fractions est lié à la respiration [22,23]. La prise en compte de la respiration est donc l'élément principal pour améliorer la reproductibilité de traitement.

3. Impact volumique et dosimétrique des mouvements thoraciques

3.1. Impact volumique des mouvements thoraciques

L'analyse des volumes, lorsque l'imagerie est faite sur un objet mouvant, montre des distorsions le long de l'axe de mouvement entraînant un raccourcissement ou un allongement des volumes. Sans marge adéquate, cette distorsion peut entraîner un sous-dosage de la cible ou une irradiation inutile de tissus sains si des marges adéquates au mouvement ne sont pas appliquées. Les cibles mouvantes oscillent de façon sinusoïdale selon une amplitude de 1 cm et une période de 4 s [10].

3.2. Impact dosimétrique des mouvements thoraciques

Ces mouvements rendent nécessaire la mise en place d'une marge supplémentaire autour du volume cible, afin de garantir son irradiation. Cette marge supplémentaire appelée marge interne et entrant dans la composition du volume cible interne, décrite dans les recommandations du rapport 62 de l'International Commission on radiation units and Measurements (ICRU), tient compte des mouvements entre et pendant les fractions [24]. Cette marge est responsable d'un surcroît d'irradiation des tissus sains avoisinants, dû au chevauchement des volumes cibles prévisionnels des organes à risque et des volumes cibles prévisionnels, ce qui limite les possibilités d'escalade de dose. En outre, en technique d'irradiation avec modulation d'intensité, l'impact de la respiration est plus important qu'en radiothérapie non modulée, car seule une portion du volume cible prévisionnel est traitée à un temps donné et cela peut induire, en intrafraction, une uniformité de la dose inacceptable. De même, la tendance à diminuer les marges autour des volumes cibles avec les techniques d'irradiation responsables de gradients

de dose étroits, peut induire, même avec un effet entre ou pendant les fractions limité, une modification importante de la distribution de la dose.

L'« effet interplay » mérite en particulier d'être évalué [8,9]. Cet effet est la résultante dosimétrique de l'interface entre le mouvement des faisceaux défini par l'ouverture du collimateur multilames et les mouvements du thorax pendant l'irradiation mammaire. Lorsqu'une section de faisceau d'irradiation n'est pas délivrée simultanément aux volumes cibles et à risque mobiles, la dose délivrée est potentiellement différente de la dose attendue avec des risques de sur- ou sous-dosage et induit une déformation partielle de la distribution de dose [7]. Cet effet interplay autour des volumes cibles a plus d'impact en modulation d'intensité et nécessite alors de renforcer les contrôles de qualité. La variation de dose secondaire à l'effet interplay dépend de la vitesse d'ouverture des lames relativement aux mouvements de la cible. Plusieurs simulations ont montré que l'effet interplay est diminué quand les faisceaux d'irradiation sont multipliés.

Le risque lié à ces mouvements respiratoires est de sous-doser le volume cible prévisionnel en manquant partiellement la cible, tout en majorant la dose aux organes à risque adjacents. Afin de limiter ces risques, deux solutions peuvent être envisagées, soit de mesurer l'appliance thoracique de la patiente et inclure cette valeur dans les marges des volumes traités [7], soit de synchroniser l'irradiation aux mouvements respiratoires. La première solution a comme inconvénient d'augmenter le volume irradié des tissus sains. La deuxième solution a le double avantage de mieux cibler le volume cible anatomoclinique et de réduire le volume de tissu sain irradié [25].

4. Techniques et avantages de la synchronisation respiratoire

Comment délivrer une dose hautement conformée et sculptée sur un volume cible arbitrairement immobile lors de la préparation dosimétrique ? Comment limiter les mouvements respiratoires, gérer le mouvement résiduel et calculer ses conséquences ?

4.1. Techniques de synchronisation respiratoire

La radiothérapie asservie à la respiration regroupe l'ensemble des techniques de radiothérapie synchronisant l'irradiation aux mouvements respiratoires. Ces techniques permettent de limiter la mobilité des volumes cibles et minimiser les effets des mouvements thoraciques sur la délivrance de la dose. Les premières études portant sur la radiothérapie asservie à la respiration ont été menées dans la pathologie tumorale bronchopulmonaire. Déjà, en 1999, Hanley et al. avaient observé une meilleure reproductibilité de la position du diaphragme en cas de blocage inspiratoire par comparaison à une respiration libre : avec une variation de position du diaphragme de 2,5 mm avec blocage respiratoire contre 26,4 mm sans [26]. Il existe deux grandes stratégies afin de pallier aux mouvements respiratoires : celle basée sur le blocage respiratoire durant l'irradiation et celle basée sur la synchronisation de l'irradiation avec les mouvements respiratoires par « gating » (Fig. 1) [14,27].

4.1.1. Blocage inspiratoire profond

Cette méthode consiste pour le patient à bloquer son inspiration, toujours à la même amplitude, durant le temps d'irradiation. Il respire dans un spiromètre et la mesure de l'air inspiré est retranscrite en une courbe respiratoire grâce à des appareillages spécifiques [26,28,29]. Le blocage respiratoire peut être libre (blocage volontaire de la respiration) ou imposé au moyen d'un ballonnet (blocage actif).

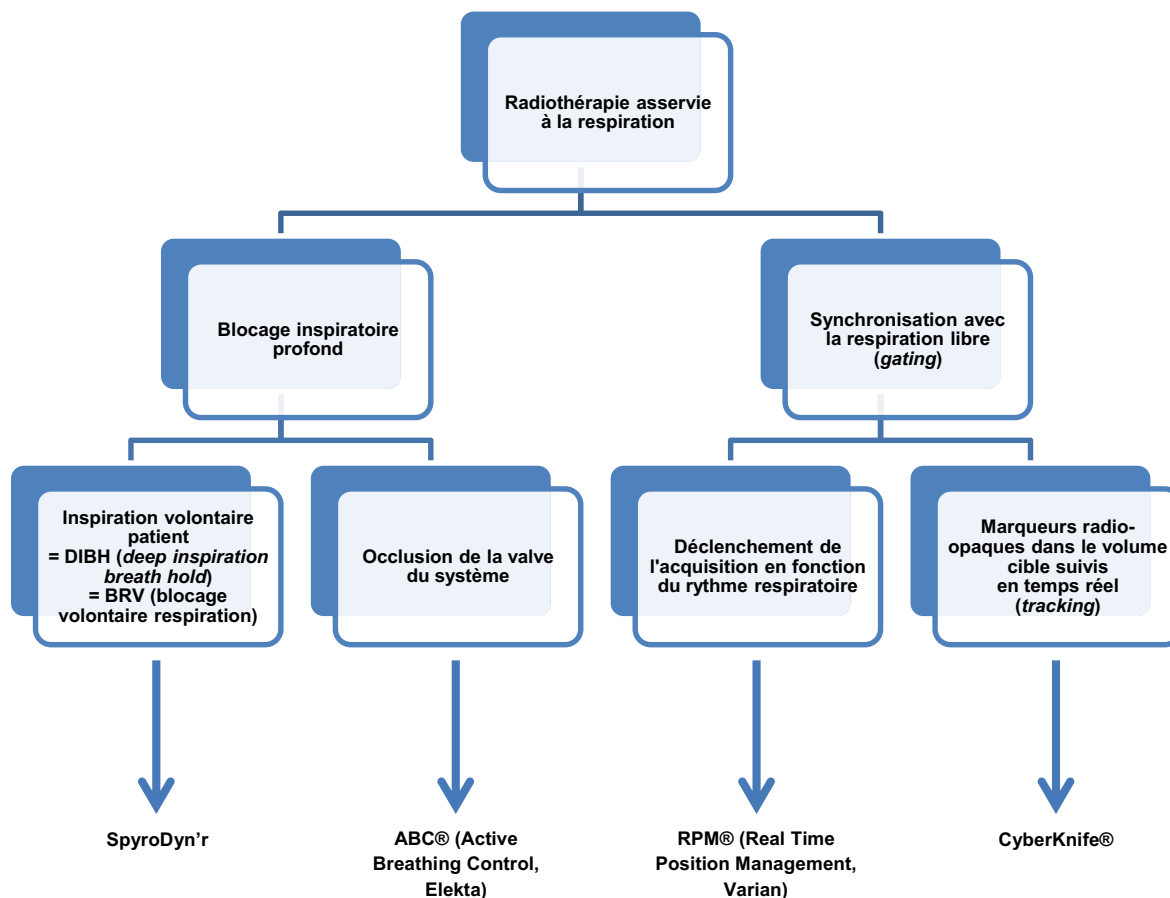


Fig. 1. Schéma de synthèse des techniques de radiothérapie asservie à la respiration.

4.1.1.1. *Blocage volontaire de la respiration.* Le système le plus utilisé en France, est le système SDX/DynR® (société Dyn'R, Muret, France) [30,31]. Le patient respire librement sans contrainte. Il visualise, grâce à des lunettes, la courbe respiratoire sinusoïdale de son volume pulmonaire (en ordonnées) en fonction du temps (en abscisses), ainsi que les instructions qui lui sont envoyées. Lorsqu'il est en apnée en inspiration profonde, l'irradiation se déclenche soit manuellement par les manipulateurs soit automatiquement si le système est connecté à l'appareil de traitement. En pathologie mammaire, pour chaque faisceau d'irradiation, deux à trois apnées d'une durée moyenne de 20 s sont nécessaires pour délivrer l'ensemble des unités moniteur (Fig. 2).

4.1.1.2. *Blocage actif de la respiration.* La méthode de blocage actif de la respiration, appelée Active Breathing Control ou système [ABC®], est commercialisée par Elekta. Son appareillage est composé également d'un spiromètre mais muni d'un ballonnet qui permet de bloquer la respiration du patient au niveau d'inspiration souhaité lors de l'irradiation [32,33].

4.1.2. Synchronisation avec la respiration libre (gating)

4.1.2.1. *Déclenchement de l'acquisition en fonction du cycle respiratoire.* Les cycles respiratoires du patient sont suivis en temps réel et l'irradiation ne se déclenche que pendant des intervalles de temps (gate) définis par le médecin [29,34,35]. Le premier détecteur externe développé en radiothérapie est le système Real Time Position Management (RPM®) commercialisé par Varian. Il est constitué d'un cube en plastique posé sur le patient entre l'abdomen et l'appendice xiphoïde, sur lequel des réflecteurs renvoient une lumière infrarouge à une caméra fixe. Ces lumières

émises sont analysées par un logiciel, qui en fonction d'une fenêtre (gate) prédéfinie commande le déclenchement ou l'arrêt de l'accélérateur. Le traitement est délivré en plusieurs fractions de quelques unités moniteur. Ce système était initialement conçu pour gérer la respiration libre au scanographe quadridimensionnel et au traitement (gating) et une modification du logiciel a permis de gérer l'apnée. D'autres systèmes externes, à base de caméras vidéo GateRT/VisionRT® et de laser Catalyst/C-Rad®, sont apparus,

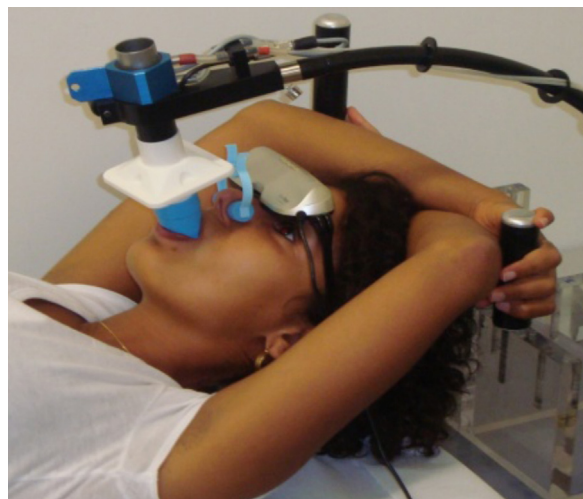


Fig. 2. Système de blocage volontaire de la respiration utilisé pour la radiothérapie des cancers du sein : spiromètre du système SDX/DynR®. Photographie reproduite avec accord du Dr A. Ziouèche.

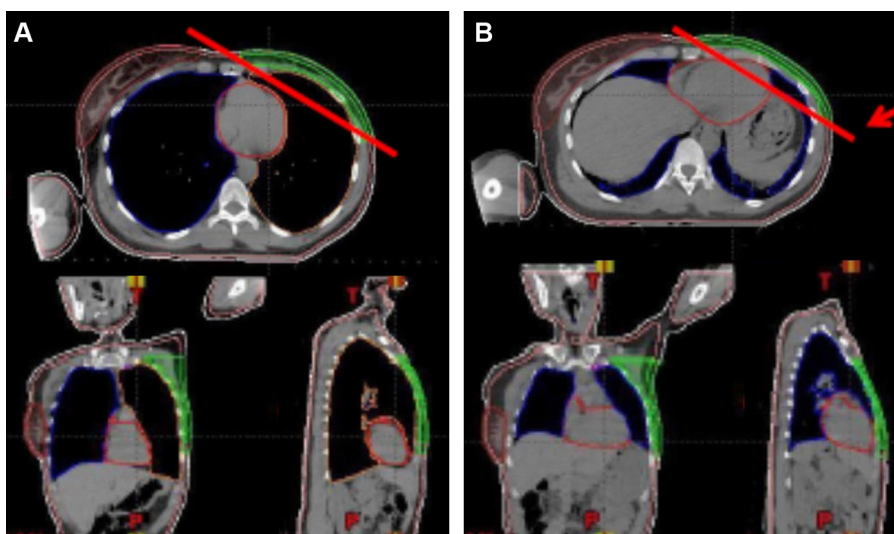


Fig. 3. Radiothérapie des cancers du sein : coupes scanographiques au même niveau de coupe transverse. A. Respiration bloquée en inspiration profonde. B. Respiration libre. Expansion pulmonaire et diminution du contact cardiaque. Mesure de la distance maximale au cœur (maximal heart distance [MHD]) entre la projection du bord postérieur du faisceau tangentiel (flèche) et la pointe du cœur exposée dans le faisceau tangentiel.

initialement conçus pour le repositionnement [35]. Le deuxième système, commercialisé par Siemens, utilise une ceinture fixée sur le patient qui détecte les mouvements de l'abdomen. L'information est numérisée via un logiciel qui contrôle le déclenchement du faisceau d'irradiation, en fonction, comme précédemment, de paramètres respiratoires définis.

4.1.2.2. Tracking–CyberKnife®. Des marqueurs radio-opaques sont implantés dans le volume cible et sont suivis en permanence par la tête d'irradiation de l'accélérateur (*tracking*). Cette technique ne semble pas avoir d'intérêt en radiothérapie mammaire avec irradiation des aires ganglionnaires. Elle pourrait avoir un intérêt en cas d'irradiation partielle du lit opératoire en conditions stéréotaxiques mais cette approche reste expérimentale.

4.2. Précision de la délivrance de dose sur les volumes cibles

4.2.1. Précision

Les études d'acquisition et de planification en conditions quadri-dimensionnelles ou comparaison en respiration libre ou bloquée, montrent que l'impact dosimétrique des mouvements respiratoires n'est pas significatif sur la couverture des volumes cibles mammaires, sauf en cas de traitement de la chaîne ganglionnaire mammaire interne [12,36]. Des études dosimétriques en blocage inspiratoire profond ont montré que la couverture des volumes cibles, soit 99 % des volumes cibles prévisionnels recevant 95 % de la dose prescrite, restait préservée malgré l'épargne cardiaque, ce qui n'est pas le cas si les lames du collimateur multilames sont simplement ajustées au volume cardiaque entraînant un sous-dosage des volumes cibles prévisionnels [37–39].

4.2.2. Reproductibilité

Avec des variations interfractions de 1 à 4 mm dans les trois dimensions de l'espace, les mesures de repositionnement en blocage respiratoire profond ont montré que cette technique est reproductible et stable [29,40–43]. Par ailleurs, en *gating*, l'avantage est de diminuer les efforts respiratoires du patient par rapport au blocage inspiratoire profond, ce qui pourrait améliorer la reproductibilité du traitement [29].

4.3. Épargne des organes à risque

4.3.1. Cœur

4.3.1.1. Déplacement cardiaque et de l'artère coronaire antérieure descendante. Sur les coupes scanographiques, les manœuvres d'inspiration profonde entraînent un déplacement inférieur du diaphragme et inféromédial du cœur, ainsi qu'une augmentation du diamètre antéropostérieur de la cage thoracique. L'inspiration permet alors de diminuer le contact cardiaque avec la paroi thoracique ainsi que la distance maximale au cœur, qui correspond à la distance entre la face antérieure du cœur et le bord postérieur du faisceau tangentiel d'irradiation mammaire (Fig. 3) [44,45]. Le blocage inspiratoire permet aussi la translation inférieure et médiane de l'artère coronaire descendante gauche et ce d'autant plus que le blocage inspiratoire s'effectue à 80 % de la capacité vitale : 11,6 mm en moyenne contre 0,76 mm à 20 % de la capacité vitale [46]. Les manœuvres d'inspiration profonde modifient ainsi la position du cœur et l'excluent des volumes irradiés [27,47].

4.3.1.2. Impact volumique et dosimétrique cardiaque. Différentes études ont comparé l'impact dosimétrique des manœuvres respiratoires en respiration libre, expiration forcée ou inspiration profonde. C'est l'inspiration profonde qui est la plus intéressante en termes d'épargne cardiaque [27,44]. Le blocage en inspiration profonde a permis une réduction significative du volume cardiaque exposé et de la dose moyenne au cœur lors de la radiothérapie mammaire, en sortant le volume cardiaque des faisceaux tangentiels [45,47–51].

De même, la dose à l'artère coronaire descendante antérieure gauche est significativement diminuée par le blocage inspiratoire profond, comparativement à la respiration libre ou à l'expiration forcée, indépendamment de la technique d'irradiation utilisée [52] (Tableau 1).

4.3.2. Poumons

4.3.2.1. Impact sur le déplacement pulmonaire. Sur les coupes scanographiques en inspiration bloquée, on observe une translation supérieure des seins, une expansion pulmonaire et une augmentation du diamètre antéropostérieur de la cage thoracique [45]. En outre, le traitement lors de l'apnée en inspiration profonde permet une diminution de l'incertitude géométrique liée au blocage des mouvements respiratoires.

Tableau 1

Études montrant l'épargne dosimétrique au cœur et à l'artère coronaire antérieure descendante par le blocage inspiratoire profond en radiothérapie mammaire.

Études	Dose moyenne au cœur (Gy)			Dose moyenne à l'artère coronaire antérieure descendante (Gy)		
	Respiration libre	Blocage inspiratoire profond	Réduction de la dose	Respiration libre	Blocage inspiratoire profond	Réduction de la dose
Korreman et al. [53]	4,5	2,5	2,0 (44 %)	26,3	16,0	10,3 (39 %)
Register et al. [54]	3,3	1,8	1,5 (45 %)	18,6	9,6	9,0 (48 %)
Rochet et al. [55]	6,9	3,9	3,0 (43 %)	31,7	21,9	9,8 (31 %)
Hjelstuen et al. [37]	6,3	3,1	3,2 (51 %)	23,0	10,9	12,1 (53 %)
Wang et al. [56]	3,2	1,3	1,9 (59 %)	20,0	5,9	14,1 (71 %)
Vikstrom et al. [38]	3,7	1,7	2,0 (54 %)	18,1	6,4	11,7 (65 %)
Borst et al. [43]	5,1	1,7	3,4 (67 %)	11,4	5,5	5,9 (52 %)

 $p < 0,01$.

4.3.2.2. *Impact volumique et dosimétrique pulmonaire.* Les études en inspiration bloquée ont montré une augmentation du volume absolu de poumon irradié. Cependant, le volume relatif et donc la fraction de poumon irradié, elle, est diminuée. La radiothérapie mammaire en inspiration profonde bloquée permet l'épargne pulmonaire en diminuant jusqu'à 80 % le volume de poumon homolatéral recevant 20 Gy [48,49,52,57].

5. Synchronisation respiratoire en pratique clinique

5.1. Sélection des patientes

Le nombre de radiothérapies mammaires délivrées étant élevé, il convient, au moins dans un premier temps, d'établir une sélection pertinente des patientes qui tireront un bénéfice dosimétrique significatif. Lors de la prescription de radiothérapie, il est possible d'identifier des situations à risque d'exposition des organes à risque : les antécédents médicochirurgicaux et facteurs de risque cardiovasculaires, la conformation thoracique, et en particulier sur des imageries diagnostiques, une position cardiaque jouxtant de façon étendue la paroi thoracique, l'irradiation du sein ou de la paroi thoracique gauches avec les chaînes ganglionnaires mammaires internes [6].

Lors de l'acquisition scanographique en position de traitement, la mesure de la distance maximale au cœur est utile et prédictive, si elle est supérieure à 20 mm dans le plan parasagittal d'une dosimétrie surexposant le cœur [58,59].

Une dosimétrie réalisée sur une acquisition scanographique en respiration libre peut donner des indications dosimétriques prédictives de complications cardiaques. Une équipe a proposé une préparation dosimétrique en blocage respiratoire lorsque le volume de cœur recevant 50 % de la dose prescrite était supérieur à 10 cm³ sur une première scanographie acquise en respiration libre [56]. Entre 30 et 40 % des patientes bénéficieraient alors de l'inspiration profonde.

5.2. Apprentissage

5.2.1. Équipes

L'accompagnement à la respiration (*coaching*) améliore la reproductibilité du contrôle de la respiration [60,61]. La formation continue et la délégation de cette tâche aux manipulateurs permettra de favoriser l'accompagnement des patients [62].

5.2.2. Patients : éducation thérapeutique

Avant la réalisation de sa scanographie de dosimétrie, la patiente, se familiarise avec la technique et le matériel au cours d'une séance de préparation de 30 à 60 min, idéalement dans un lieu dédié pour ne pas bloquer l'accès au scanographe. Elle est installée en position de traitement avec le système de contention adapté et respire librement afin de s'accoutumer au système. Après quelques cycles, elle bloque sa respiration en inspiration

profonde. La moyenne des volumes inspiratoires maximaux relevés permet de définir une plage de tolérance d'apnée, acceptable pour la patiente, comprise entre 60 % et 80 % de son volume inspiratoire maximal. Cette valeur permet en général de tenir une apnée d'environ 30 s sans trop d'effort ni de gêne. Cette plage de tolérance, apparaît à travers les lunettes de la patiente, sous la forme d'une bande verte. Plusieurs cycles d'entraînement sont ensuite réalisés afin de s'assurer que le niveau et la durée d'apnée est acceptable pour le patient. Un minimum de 20 s d'apnée semble nécessaire pour le bon déroulement du traitement. Après cette séance d'entraînement, la scanographie de dosimétrie peut être réalisée dans ces mêmes conditions en blocage inspiratoire.

5.3. Limites

5.3.1. Observance et reproductibilité

L'asservissement respiratoire en blocage inspiratoire profond nécessite une participation active et la compliance de la patiente. Mais cette technique s'avère relativement bien supportée et acceptée par 85 % à 97 % des patientes [47,48]. Le blocage actif avec le spiromètre ABC®/Elekta impose une contrainte supplémentaire à la patiente car le circuit de l'air respiré est obturé par une valve lorsque le niveau d'inspiration souhaité est atteint [63].

5.3.2. Contraintes médicoéconomiques

La synchronisation respiratoire nécessite un équipement spécifique couplé à l'accélérateur. Ce matériel a un coût qui n'est pas actuellement valorisé par la cotation des actes. Le temps de formation du personnel, le temps mobilisé lors de la séance d'apprentissage, lors de la préparation dosimétrique et au poste de traitement participent au coût supplémentaire [48]. Pour la seule durée de séance, la comparaison avec et sans gestion de l'apnée fait apparaître une augmentation de 3 à 5 min avec des équipes expérimentées [30,48,56]. Les discussions pour intégrer la synchronisation respiratoire dans la future forfaitisation du remboursement de la radiothérapie mammaire sont en cours.

6. Conclusion

Les mouvements thoraciques en radiothérapie mammaire, en modifiant la position et les volumes des organes cibles et à risque, ont un impact sur la qualité du traitement et ce d'autant plus que des techniques modulées à gradient de dose étroit sont utilisées. Les techniques de synchronisation respiratoire ont essentiellement un intérêt en blocage inspiratoire profond pour améliorer l'épargne cardiaque et pulmonaire. Cette technique est pertinente lorsque la dosimétrie préparée en respiration libre ne permet pas de respecter les contraintes sur les histogrammes dose-volume, notamment en cas d'irradiation latéralisée à gauche associée à l'irradiation de la chaîne mammaire interne, principale source du volume cardiaque exposé [6]. L'impact clinique de cette épargne dosimétrique des organes à risque par ces techniques devra être évaluée, en

dépistant la morbidité tardive, et en particulier cardiaque grâce au développement de plateformes « cœur-cancer » [64]. Mais le recours à la synchronisation respiratoire se justifie d'ores et déjà par l'application du principe réglementaire d'optimisation en radioprotection.

Déclaration de liens d'intérêts

Les auteurs déclarent ne pas avoir de liens d'intérêts.

Références

- [1] Harsolia A, Kestin L, Grills I, Wallace M, Jolly S, Jones C, et al. Intensity-modulated radiotherapy results in significant decrease in clinical toxicities compared with conventional wedge-based breast radiotherapy. *Int J Radiat Oncol Biol Phys* 2007;68:1375–80.
- [2] Kestin LL, Sharpe MB, Frazier RC, Vicini FA, Yan D, Matter RC, et al. Intensity modulation to improve dose uniformity with tangential breast radiotherapy: initial clinical experience. *Int J Radiat Oncol Biol Phys* 2000;48:1559–68.
- [3] Vicini FA, Sharpe M, Kestin L, Martinez A, Mitchell CK, Wallace MF, et al. Optimizing breast cancer treatment efficacy with intensity-modulated radiotherapy. *Int J Radiat Oncol Biol Phys* 2002;54:1336–44.
- [4] Early Breast Cancer Trialists' Collaborative G, Darby S, McGale P, Correa C, Taylor C, Arriagada R, et al. Effect of radiotherapy after breast-conserving surgery on 10-year recurrence and 15-year breast cancer death: meta-analysis of individual patient data for 10,801 women in 17 randomised trials. *Lancet* 2011;378:1707–16.
- [5] Darby SC, Ewertz M, Hall P. Ischemic heart disease after breast cancer radiotherapy. *N Engl J Med* 2013;368:2527.
- [6] Mège A, Ziouèche A, Pourel N, Chauvet B. Toxicité cardiaque de la radiothérapie. *Cancer Radiother* 2011;15:495–503.
- [7] Nicolini G, Clivio A, Cozzi L, Fogliata A, Vanetti E. On the impact of dose rate variation upon RapidArc implementation of volumetric modulated arc therapy. *Med Phys* 2011;38:264–71.
- [8] Bortfeld T, Jiang SB, Rietzel E. Effects of motion on the total dose distribution. *Semin Radiat Oncol* 2004;14:41–51.
- [9] Goitein M. Organ and tumor motion: an overview. *Semin Radiat Oncol* 2004;14:2–9.
- [10] Chen GT, Kung JH, Beaudette KP. Artifacts in computed tomography scanning of moving objects. *Semin Radiat Oncol* 2004;14:19–26.
- [11] van Herk M, Witte M, van der Geer J, Schneider C, Lebesque JV. Biologic and physical fractionation effects of random geometric errors. *Int J Radiat Oncol Biol Phys* 2003;57:1460–71.
- [12] Guo B, Li JB, Wang W, Xu M, Li YK, Liu TH. A comparison of dosimetric variance for external-beam partial breast irradiation using three-dimensional and four-dimensional computed tomography. *Onco Targets Ther* 2016;9:1857–63.
- [13] Jain P, Marchant T, Green M, Watkins G, Davies J, McCarthy C, et al. Inter-fraction motion and dosimetric consequences during breast intensity-modulated radiotherapy (IMRT). *Radiother Oncol* 2009;90:93–8.
- [14] Giraud P, Reboul F, Clippe S, Garcia R, Carrie C, Campana F, et al. [Respiration-gated radiotherapy: current techniques and potential benefits]. *Cancer Radiother* 2003;7:15s–25s.
- [15] Langen KM, Jones DT. Organ motion and its management. *Int J Radiat Oncol Biol Phys* 2001;50:265–78.
- [16] Saliou MG, Giraud P, Simon L, Fournier-Bidoz N, Fourquet A, Dendale R, et al. Irradiation du cancer du sein : incertitudes liées aux mouvements respiratoires et au repositionnement. *Cancer Radiother* 2005;9:414–21.
- [17] Shirato H, Seppenwoolde Y, Kitamura K, Onimura R, Shimizu S. Intrafractional tumor motion: lung and liver. *Semin Radiat Oncol* 2004;14:10–8.
- [18] Baroni G, Ferrigno G, Orecchia R, Pedotti A. Real-time opto-electronic verification of patient position in breast cancer radiotherapy. *Comput Aided Surg* 2000;5:296–306.
- [19] Michalski A, Atyeo J, Cox J, Rinks M. Inter- and intra-fraction motion during radiation therapy to the whole breast in the supine position: a systematic review. *J Med Imaging Radiat Oncol* 2012;56:499–509.
- [20] Rabinowitz I, Broomberg J, Goitein M, McCarthy C, Leong J. Accuracy of radiation field alignment in clinical practice. *Int J Radiat Oncol Biol Phys* 1985;11:1857–67.
- [21] Shirato H, Oita M, Fujita K, Shimizu S, Onimaru R, Uegaki S, et al. Three-dimensional conformal setup (3D-CSU) of patients using the coordinate system provided by three internal fiducial markers and two orthogonal diagnostic X-ray systems in the treatment room. *Int J Radiat Oncol Biol Phys* 2004;60:607–12.
- [22] Engelsman M, Damen EM, De Jaeger K, van Ingen KM, Mijnheer BJ. The effect of breathing and set-up errors on the cumulative dose to a lung tumor. *Radiother Oncol* 2001;60:95–105.
- [23] Wang X, Pan T, Pinnix C, Zhang SX, Salehpour M, Sun TL, et al. Cardiac motion during deep-inspiration breath-hold: implications for breast cancer radiotherapy. *Int J Radiat Oncol Biol Phys* 2012;82:708–14.
- [24] Purdy JA. Current ICRU definitions of volumes: limitations and future directions. *Semin Radiat Oncol* 2004;14:27–40.
- [25] Pradier O, Schmidberger H, Weiss E, Bouscayrol H, Daban A, Hess CF. Accuracy of alignment in breast irradiation: a retrospective analysis of clinical practice. *Br J Radiol* 1999;72:685–90.
- [26] Hanley J, Debois MM, Mah D, Mageras GS, Raben A, Rosenzweig K, et al. Deep inspiration breath-hold technique for lung tumors: the potential value of target immobilization and reduced lung density in dose escalation. *Int J Radiat Oncol Biol Phys* 1999;45:603–11.
- [27] Korreman SS, Pedersen AN, Notttrup T, Specht L, Nystrom H. Breathing adapted radiotherapy for breast cancer: comparison of free breathing gating with the breath-hold technique. *Radiother Oncol* 2005;76:311–8.
- [28] Damkjaer SM, Aznar MC, Pedersen AN, Vogelius IR, Bangsgaard JP, Josipovic M. Reduced lung dose and improved inspiration level reproducibility in visually guided DIBH compared to audio coached EIG radiotherapy for breast cancer patients. *Acta Oncol* 2013;52:1458–63.
- [29] Mageras GS, Yorke E. Deep inspiration breath hold and respiratory gating strategies for reducing organ motion in radiation treatment. *Semin Radiat Oncol* 2004;14:65–75.
- [30] Garcia R, Oozeer R, Le Thanh H, Chastel D, Doyen JC, Chauvet B, et al. Radiothérapie des cancers du poumon : le blocage en inspiration sous contrôle spirométrique. *Cancer Radiother* 2002;6:30–88.
- [31] Yang W, McKenzie EM, Burnison M, Shiao S, Mirhadi A, Hakimian B, et al. Clinical experience using a video-guided spirometry system for deep inhalation breath-hold radiotherapy of left-sided breast cancer. *J Appl Clin Med Phys* 2015;16:5218.
- [32] Wong JW, Sharpe MB, Jaffray DA, Kini VR, Robertson JM, Stromberg JS, et al. The use of active breathing control (ABC) to reduce margin for breathing motion. *Int J Radiat Oncol Biol Phys* 1999;44:911–9.
- [33] Wilson EM, Williams FJ, Lyn BE, Wong JW, Aird EG. Validation of active breathing control in patients with non-small-cell lung cancer to be treated with CHARTWEL. *Int J Radiat Oncol Biol Phys* 2003;57:864–74.
- [34] Dawson LA, Balter JM. Interventions to reduce organ motion effects in radiation delivery. *Semin Radiat Oncol* 2004;14:76–80.
- [35] Li G, Huang H, Wei J, Li DG, Chen Q, Gaebler CP, et al. Novel spirometry based on optical surface imaging. *Med Phys* 2015;42:1690–7.
- [36] Frazier RC, Vicini FA, Sharpe MB, Yan D, Fayad J, Baglan KL, et al. Impact of breathing motion on whole breast radiotherapy: a dosimetric analysis using active breathing control. *Int J Radiat Oncol Biol Phys* 2004;58:1041–7.
- [37] Hjelstuen MH, Mjaaland I, Vikstrom J, Dybvik KI. Radiation during deep inspiration allows loco-regional treatment of left breast and axillary-, supraclavicular- and internal mammary lymph nodes without compromising target coverage or dose restrictions to organs at risk. *Acta Oncol* 2012;51:333–44.
- [38] Vikstrom J, Hjelstuen MH, Mjaaland I, Dybvik KI. Cardiac and pulmonary dose reduction for tangentially irradiated breast cancer, utilizing deep inspiration breath-hold with audio-visual guidance, without compromising target coverage. *Acta Oncol* 2011;50:42–50.
- [39] Bartlett FR, Yarnold JR, Donovan EM, Evans PM, Locke I, Kirby AM. Multileaf collimation cardiac shielding in breast radiotherapy: cardiac doses are reduced, but at what cost? *Clin Oncol (R Coll Radiol)* 2013;25:690–6.
- [40] Betgen A, Alderliesten T, Sonke JJ, van Vliet-Vroegindewij C, Bartelink H, Remeijer P. Assessment of set-up variability during deep inspiration breath hold radiotherapy for breast cancer patients by 3D-surface imaging. *Radiother Oncol* 2013;106:225–30.
- [41] McIntosh A, Shoushtari AN, Benedict SH, Read PW, Wijesooriya K. Quantifying the reproducibility of heart position during treatment and corresponding delivered heart dose in voluntary deep inhalation breath hold for left breast cancer patients treated with external beam radiotherapy. *Int J Radiat Oncol Biol Phys* 2011;81:e569–76.
- [42] Moran JM, Balter JM, Ben-David MA, Marsh RB, Van Herk M, Pierce LJ. Short-term displacement and reproducibility of the breast and nodal targets under active breathing control. *Int J Radiat Oncol Biol Phys* 2007;68:541–6.
- [43] Borst GR, Sonke JJ, den Hollander S, Betgen A, Remeijer P, van Giersbergen A, et al. Clinical results of image-guided deep inspiration breath hold breast irradiation. *Int J Radiat Oncol Biol Phys* 2010;78:1345–51.
- [44] Chen MH, Chuang ML, Bornstein BA, Gelman R, Harris JR, Manning WJ. Impact of respiratory maneuvers on cardiac volume within left-breast radiation portals. *Circulation* 1997;96:3269–72.
- [45] Lu HM, Cash E, Chen MH, Chin L, Manning WJ, Harris J, et al. Reduction of cardiac volume in left-breast treatment fields by respiratory maneuvers: a CT study. *Int J Radiat Oncol Biol Phys* 2000;47:895–904.
- [46] Jaggi R, Moran JM, Kessler ML, Marsh RB, Balter JM, Pierce LJ. Respiratory motion of the heart and positional reproducibility under active breathing control. *Int J Radiat Oncol Biol Phys* 2007;68:253–8.
- [47] Remouchamps VM, Letts N, Vicini FA, Sharpe MB, Kestin LL, Chen PY, et al. Initial clinical experience with moderate deep-inspiration breath hold using an active breathing control device in the treatment of patients with left-sided breast cancer using external beam radiation therapy. *Int J Radiat Oncol Biol Phys* 2003;56:704–15.
- [48] Giraud P, Djadi-Prat J, Morvan E, Morelle M, Remmonay R, Pourel N, et al. Intérêts dosimétriques et cliniques de la radiothérapie asservie à la respiration des cancers du poumon et du sein : résultats du Stic 2003. *Cancer Radiother* 2012;16:272–81.
- [49] Ziouèche A, Mège A, Bodez V, de Rauglaudre G. OC-0481 Benefit of deep inspiration breath-hold in patients treated with radiotherapy for left-sided

- breast cancer [Abstract; ESTRO Oral communication no. 0481]. *Radiother Oncol* 2012;103:S193.
- [50] Remouchamps VM, Vicini FA, Sharpe MB, Kestin LL, Martinez AA, Wong JW. Significant reductions in heart and lung doses using deep inspiration breath hold with active breathing control and intensity-modulated radiation therapy for patients treated with locoregional breast irradiation. *Int J Radiat Oncol Biol Phys* 2003;55:392–406.
- [51] Sixel KE, Aznar MC, Ung YC. Deep inspiration breath hold to reduce irradiated heart volume in breast cancer patients. *Int J Radiat Oncol Biol Phys* 2001;49:199–204.
- [52] Pedersen AN, Korreman S, Nystrom H, Specht L. Breathing adapted radiotherapy of breast cancer: reduction of cardiac and pulmonary doses using voluntary inspiration breath-hold. *Radiother Oncol* 2004;72:53–60.
- [53] Korreman SS, Pedersen AN, Josipovic M, Aarup LR, Juhler-Nottrup T, Specht L, et al. Cardiac and pulmonary complication probabilities for breast cancer patients after routine end-inspiration gated radiotherapy. *Radiother Oncol* 2006;80:257–62.
- [54] Register S, Takita C, Reis I, Zhao W, Amestoy W, Wright J. Deep inspiration breath-hold technique for left-sided breast cancer: an analysis of predictors for organ-at-risk sparing. *Med Dosim* 2015;40:89–95.
- [55] Rochet N, Drake JJ, Harrington K, Wolfgang JA, Napolitano B, Sadek BT, et al. Deep inspiration breath-hold technique in left-sided breast cancer radiation therapy: evaluating cardiac contact distance as a predictor of cardiac exposure for patient selection. *Pract Radiat Oncol* 2015;5:e127–34.
- [56] Wang W, Purdie TG, Rahman M, Marshall A, Liu FF, Fyles A. Rapid automated treatment planning process to select breast cancer patients for active breathing control to achieve cardiac dose reduction. *Int J Radiat Oncol Biol Phys* 2012;82:386–93.
- [57] Pollock S, Keall R, Keall P. Breathing guidance in radiation oncology and radiotherapy: a systematic review of patient and healthy volunteer studies. *Med Phys* 2015;42:5490–509.
- [58] Cervino LI, Gupta S, Rose MA, Yashar C, Jiang SB. Using surface imaging and visual coaching to improve the reproducibility and stability of deep-inspiration breath hold for left-breast-cancer radiotherapy. *Phys Med Biol* 2009;54:6853–65.
- [59] Chauvet B, Lisbona A, Le Tallec P. Partage des tâches en radiothérapie : cadre réglementaire, mise en œuvre, et évolutions. *Cancer Radiother* 2013;17:363–9.
- [60] Bartlett FR, Colgan RM, Carr K, Donovan EM, McNair HA, Locke I, et al. The UK HeartSpare Study: randomised evaluation of voluntary deep-inspiratory breath-hold in women undergoing breast radiotherapy. *Radiother Oncol* 2013;108:242–7.
- [61] Debourdeau P, Meuleman C, Dufaitre G, Laroche JP, Slama B, Chebrek S, et al. Méthodes d'élaboration des recommandations pour la pratique clinique (RPC) et fonctionnement de la plate forme cœur vaisseaux cancer (PTF-CVC) dans l'inter3C Vaucluse pays d'Arles. *Bull Cancer* 2015;102:932–9.
- [62] Lee HY, Chang JS, Lee JJ, Park K, Kim YB, Suh CO, et al. The deep inspiration breath hold technique using Abches reduces cardiac dose in patients undergoing left-sided breast irradiation. *Radiat Oncol J* 2013;31:239–46.
- [63] Mast ME, van Kempen-Harteveld L, Heijnenbroek MW, Kalidien Y, Rozema H, Jansen WP, et al. Left-sided breast cancer radiotherapy with and without breath-hold: does IMRT reduce the cardiac dose even further? *Radiother Oncol* 2013;108:248–53.
- [64] Hayden AJ, Rains M, Tiver K. Deep inspiration breath hold technique reduces heart dose from radiotherapy for left-sided breast cancer. *J Med Imaging Radiat Oncol* 2012;56:464–72.