



**HAL**  
open science

# Émergence et intérêt de la radiofréquence et des micro-ondes dans l'ablation tumorale en médecine vétérinaire

Orlane Célier

► **To cite this version:**

Orlane Célier. Émergence et intérêt de la radiofréquence et des micro-ondes dans l'ablation tumorale en médecine vétérinaire. Médecine vétérinaire et santé animale. 2023. dumas-04396830

**HAL Id: dumas-04396830**

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-04396830v1>

Submitted on 16 Jan 2024

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License

---

Année 2023

# ÉMERGENCE ET INTÉRÊT DE LA RADIOFRÉQUENCE ET DES MICRO-ONDES DANS L'ABLATION TUMORALE EN MÉDECINE VÉTÉRINAIRE

## THÈSE

pour obtenir le diplôme d'État de

### DOCTEUR VÉTÉRINAIRE

présentée et soutenue publiquement devant

la Faculté de Médecine de Créteil (UPEC)

le 17 octobre 2023

par

**Orlane CELIER**

sous la direction de

**Mathieu MANASSERO**

## JURY

<b>Présidente du jury :</b>	<b>Mme Véronique VIATEAU</b>	Professeur à l'EnvA
<b>Directeur de thèse :</b>	<b>M. Mathieu MANASSERO</b>	Professeur à l'EnvA
<b>Examineur :</b>	<b>M. Jérémy MORTIER</b>	Maître de Conférences à l'EnvA



Liste des enseignants intervenant dans l'encadrement des thèses de Doctorat vétérinaire

Version juillet 2023



Liste des Professeurs et Maîtres de conférences titulaires de l'HDR

M	Adjou	Karim	Professeur	DPASP
M	Audigé	Fabrice	Professeur	DEPEC
M	Bellier	Sylvain	Professeur	DSBP
M	Blaga	Radu	Professeur	DSBP
M	Blot	Stéphane	Professeur	DEPEC
M	Boulouis	Henri-Jean	Professeur émérite	DSBP
Mme	Chahory	Sabine	Professeur	DEPEC
M	Chateau	Henry	Professeur	DSBP
Mme	Chetboul	Valerie	Professeur	DEPEC
Mme	Crevier-Denoix	Nathalie	Professeur	DSBP
M	Degueurce	Christophe	Professeur	DSBP
M	Denoix	Jean-Marie	Professeur	DEPEC
M	Desquilbet	Loïc	Professeur	DSBP
Mme	Dufour	Barbara	Professeur émérite	DPASP
M	Eloit	Marc	Professeur	DSBP
M	Fayolle	Pascal	Professeur émérite	DEPEC
M	Federighi	Michel	Professeur	DPASP
M	Fontbonne	Alain	Professeur	DEPEC
Mme	Gilbert	Caroline	Professeur	DSBP
M	Grandjean	Dominique	Professeur	DEPEC
Mme	Grimard-Ballif	Bénédicte	Professeur	DPASP
Mme	Haddad-Hoang Xuan	Nadia	Professeur	DPASP
M	Jouvion	Gregory	Professeur	DSBP
M	Kohlhauer	Matthias	Professeur	DSBP
Mme	Le Poder	Sophie	Professeur	DSBP
Mme	Le Roux	Delphine	Maître de conférences HDR	DSBP
M	Manassero	Mathieu	Professeur	DEPEC
Mme	Maurey-Guénec	Christelle	Professeur	DEPEC
M	Millemann	Yves	Professeur	DPASP
Mme	Pilot-Storck	Fanny	Professeur	DSBP
M	Ponter	Andrew	Professeur	DPASP
Mme	Risco-Castillo	Véronica	Maître de conférences HDR	DSBP
Mme	Rivière	Julie	Maître de conférences HDR	DPASP
Mme	Robert	Céline	Professeur	DSBP
M	Tiret	Laurent	Professeur	DSBP
M	Tissier	Renaud	Professeur	DSBP
M	Verwaerde	Patrick	Professeur	DEPEC
Mme	Viateau	Véronique	Professeur	DEPEC

Liste des Maîtres de conférences et Ingénieurs de recherche DMV

M	Arné	Pascal	Maître de conférences	DPASP
Mme	Barassin	Isabelle	Maître de conférences	DPASP
Mme	Barbarino	Alix	Ingénieur de recherche (DMV)	DEPEC
Mme	Benckroun	Ghita	Maître de conférences	DEPEC
Mme	Bertoni	Lelia	Maître de conférences	DEPEC
M	Bolnot	Francois	Maître de conférences	DPASP
Mme	Canonne-Guibert	Morgane	Maître de conférences	DEPEC
Mme	Chevallier	Lucie	Maître de conférences	DSBP
Mme	Cochet-Faivre	Noëlle	Maître de conférences	DEPEC
Mme	Cordonnier-Lefort	Nathalie	Maître de conférences	DSBP
Mme	Coudry	Virginie	Ingénieur de recherche (DMV)	DEPEC
Mme	Crepeaux	Guillemette	Maître de conférences	DSBP
M	Crozet	Guillaume	Maître de conférences	DPASP
Mme	De Paula Reis	Alline	Maître de conférences	DPASP
M	Delsart	Maxime	Maître de conférences	DPASP
Mme	Denis	Marine	Ingénieur de recherche (DMV)	DPASP
M	Deshuillers	Pierre	Maître de conférences	DSBP
M	Gauthier	Michel	Maître de conférences associé	DPASP
Mme	Guérin	Virginie	Maître de conférences	DSBP
Mme	Guétin-Poirier	Valentine	Maître de conférences	DPASP
Mme	Jacquet	Sandrine	Ingénieur de recherche (DMV)	DEPEC
M	Kurtz	Maxime	Ingénieur de recherche (DMV)	DEPEC
Mme	Lagré	Anne-Claire	Maître de conférences	DSBP
Mme	Le Dudal	Marine	Ingénieur de recherche (DMV)	DSBP
Mme	Legrand	Chantal	Maître de conférences associé	DSBP
M	Mammeri	Mohamed	Maître de conférences	DSBP
Mme	Manguin	Estelle	Maître de conférences	DEPEC
Mme	Marignac	Genevieve	Maître de conférences	DSBP
Mme	Marotto	Stéphanie	Ingénieur de recherche (DMV)	DEPEC
Mme	Maurice	Emeline	Ingénieur de recherche (DMV)	DEPEC
Mme	Mespoules-Rivière	Céline	Ingénieur de recherche (DMV)	DEPEC
Mme	Mîmet	Narjès	Maître de conférences	DPASP
M	Mortier	Jérémy	Maître de conférences associé	DEPEC
M	Nudelmann	Nicolas	Maître de conférences	DEPEC
M	Pignon	Charly	Ingénieur de recherche (DMV)	DEPEC
M	Polack	Bruno	Maître de conférences	DSBP
Mme	Qué	Émilie	Ingénieur de recherche (DMV)	DEPEC
Mme	Ravary-Plumioën	Bérandère	Ingénieur de recherche (DMV)	DPASP
M	Reyes-Gomez	Edouard	Maître de conférences	DSBP
Mme	Rose	Hélène	Maître de conférences associé	DSBP
M	Tanquerel	Ludovic	Maître de conférences	DEPEC



# Remerciements

## **À M. Manassero Mathieu, Professeur à l'EnvA**

Pour m'avoir fait l'honneur de m'encadrer dans cette aventure intellectuelle passionnante. Pour votre patience inébranlable et votre soutien constant qui ont été des piliers essentiels dans ce parcours. Pour votre disponibilité, votre bienveillance et votre écoute. Vous avez ma plus profonde gratitude.

## **À Mme Viateau Véronique, Professeur à l'EnvA,**

Pour me faire l'honneur d'accepter la présidence de ce jury. Mes hommages respectueux.

## **À M. Mortier Jérémie, Maître de conférences à l'EnvA,**

Pour avoir accepté de prendre part à la correction de ce travail et à son aboutissement. Mes sincères remerciements.



# Table des matières

---

<b>Table des matières</b> .....	<b>1</b>
<b>Liste des figures</b> .....	<b>3</b>
<b>Liste des tableaux</b> .....	<b>5</b>
<b>Liste des abréviations</b> .....	<b>6</b>
<b>Introduction</b> .....	<b>7</b>
<b>1. Fonctionnement de la radiofréquence et des micro-ondes</b> .....	<b>9</b>
1.1. Effet de la chaleur sur les tissus.....	9
1.2. Principe de fonctionnement général des thermoablations.....	10
1.3. Principe de fonctionnement des radiofréquences .....	11
1.3.1. <i>Diminution des pertes thermiques</i> .....	12
1.3.2. <i>Augmentation de l'énergie déposée</i> .....	13
1.3.3. <i>Contre-indications générales à la radiofréquence</i> .....	15
1.4. Principe de fonctionnement des micro-ondes .....	15
1.5. Mise en place et suivi d'une procédure de thermoablation .....	18
1.6. Bilan et comparaison des deux techniques .....	19
<b>2. État des lieux de la radiofréquence et des micro-ondes en oncologie humaine</b> .....	<b>21</b>
2.1. Application des techniques : exemple du carcinome hépatocellulaire .....	21
2.1.1. <i>Indications, contre-indications et préparation du patient</i> .....	21
2.1.2. <i>Déroulement de la procédure et monitoring</i> .....	23
2.1.3. <i>Accidents, incidents et complications</i> .....	24
2.1.3.1. Complications vasculaires majeures .....	24
2.1.3.2. Complications hépatiques majeures .....	26
2.1.3.3. Complications extra-hépatiques majeures .....	27
2.1.3.4. Complications mineures .....	29
2.1.4. <i>Suivi post-interventionnel</i> .....	29
2.1.5. <i>Résultats</i> .....	31
2.2. Particularités des techniques en clinique en fonction de la localisation tumorale. ....	31
2.2.1. <i>Tissu hépatique : métastases</i> .....	31
2.2.2. <i>Tissu pulmonaire</i> .....	32
2.2.3. <i>Tissu rénal</i> .....	36
2.2.4. <i>Tissu mammaire</i> .....	38
2.2.5. <i>Tissu osseux</i> .....	40



2.2.6.	<i>Thyroïde</i> .....	43
<b>3.</b>	<b>État des lieux et perspectives de l'utilisation de la radiofréquence et des micro-ondes en oncologie vétérinaire</b> .....	<b>49</b>
3.1.	Un domaine inspiré de la médecine humaine. ....	49
3.2.	État des lieux de l'utilisation de la radiofréquence et des micro-ondes en médecine vétérinaire à ce jour .....	50
3.2.1.	<i>Utilisation sur des tumeurs hépatiques</i> .....	50
3.2.2.	<i>Utilisation sur des tumeurs pulmonaires</i> .....	53
3.2.3.	<i>Utilisation sur des tumeurs uro-génitales</i> .....	56
3.2.4.	<i>Utilisation sur des tumeurs osseuses</i> .....	58
3.2.5.	<i>Utilisation sur d'autres tumeurs</i> .....	60
3.2.6.	<i>Utilisation dans un contexte non tumoral</i> .....	63
3.3.	Discussion sur l'émergence et l'avenir dans le monde vétérinaire.....	65
3.3.1.	<i>Application pratique de la thermoablation en médecine vétérinaire</i> .....	65
3.3.2.	<i>Domaines d'application envisagés</i> .....	66
3.3.1.	<i>Bilan sur l'équipement nécessaire et disponible</i> .....	68
	<b>Conclusion</b> .....	<b>71</b>
	<b>Liste des références bibliographiques</b> .....	<b>72</b>
	<b>Annexe 1 : Description détaillée des cas décrit d'ablation tumorale en médecine vétérinaire</b> .....	<b>79</b>
	<b>Annexe 2 : Matériels de radiofréquence présent sur le marché en 2022 (Bourrel, 2021) .....</b>	<b>82</b>
	<b>Annexe 3 : Matériels de micro-ondes présent sur le marché en 2022 (Bourrel, 2021).....</b>	<b>83</b>

# Liste des figures

---

Figure 1 : Schéma du spectre électromagnétique avec la lumière visible mis en avant (Gartshore et al., 2021) .....	10
Figure 2 : Principe de l'ablation monopolaire par RF (Bastien et al., 2010).....	12
Figure 3 : équation simplifiée de nécrose ischémique (Ellis et al., 2004) .....	12
Figure 4 : Schéma des pertes thermiques engendrée par la présence d'un vaisseaux sanguin (Hong et Georgiades, 2010) .....	13
Figure 5 : Schéma de la zone d'ablation créée par une électrode, un groupe d'électrode et une électrode de refroidissement interne (Hong et Georgiades, 2010) .....	14
Figure 6 : Photographies de l'apparence d'une électrode parapluie et formation d'une zone d'ablation (Hong et Georgiades, 2010 ; Kinoshita, 2016).....	14
Figure 7 : Schéma de l'hystérésis diélectrique (Ward et al., 2013).....	16
Figure 8 : Comparaison de la zone d'ablation obtenue avec (droite) et sans (gauche) mécanisme de refroidissement interne de l'antenne de MO (Lubner et al., 2010).....	17
Figure 9 : Augmentation de la taille de la zone d'ablation obtenue par ajout d'antennes de MO pour des puissances délivrés égales (Lubner et al., 2010) .....	17
Figure 10 : Illustration du phénomène de vaporisation pendant une procédure et aspect immédiat d'une zone d'ablation (Bréhier et al., 2021) .....	19
Figure 11 : Illustration des complications vasculaires observables (Bréhier et al., 2021).....	25
Figure 12 : Illustration d'une thrombose post thermoablation (Bréhier et al., 2021) .....	25
Figure 13 : Illustration d'un abcès post thermoablation (Bréhier et al., 2021).....	26
Figure 14 : Illustration d'un biliome (Bréhier et al., 2021).....	27
Figure 15 : Illustration perforation intestinale (Bréhier et al., 2021) .....	28
Figure 16 : Illustration ensemencement tumorale (Bréhier et al., 2021) .....	29
Figure 17 : Illustration aspect normale zone d'ablation (Bréhier et al., 2021) .....	30
Figure 18 : Illustration des trois principaux modèles de progression tumorale locale (Bréhier et al., 2021).....	30
Figure 19 : Exemples de zones d'ablations créer par deux systèmes de RF .....	33

Figure 20 : Illustration de l'utilisation du pneumo médiastin en RF (Jaffro et Collot, 2019) .....	35
Figure 21 : Simple hématome post-ablation chez un patient présentant une hématurie persistante (Lum et al., 2019) .....	37
Figure 22 : Prise en charge d'un carcinome canalaire invasif par RF (Leylek et al., 2013) .....	40
Figure 23 : Exemples de différentes techniques de guidage pour la prise en charge d'une tumeur osseuse (David et al., 2017) .....	41
Figure 24 : Ablation par RF et cimentoplastie antalgique d'une localisation de myélome multiple de l'aile iliaque. (Moser et al., 2008).....	42
Figure 25 : Schéma de la technique « moving-shot » par voie trans-isthmique (Sharara, 2021) ...	45
Figure 26 : Visualisation d'un CHC par laparoscopie avant (A) et après (B) ablation par MO (Oramas et al., 2019) .....	51
Figure 27 : Scanner avec produit de contraste en coupe frontale et transverse 3 mois après ablation d'un CHC par MO (Oramas et al., 2019).....	52
Figure 28 : Photographie d'une zone de nécrose ischémique autour d'une antenne de MO inséré par laparotomie sur une métastase d'hémangiosarcome (Yang et al., 2017).....	53
Figure 29 : Photographie per-opératoire d'une ablation d'une métastase pulmonaire d'ostéosarcome par MO sous thoracoscopie (Mazzaccari et al., 2017).....	54
Figure 30 : Scanner en coupe transverse avant (A) et après (B) ablation d'une métastase pulmonaire d'ostéosarcome par MO (Dornbusch et al., 2020) .....	55
Figure 31 : Photographie per-opératoire avant (A) et après (B) ablation par MO d'un carcinome prostatique (Vail et al., 2019) .....	57
Figure 32 : Planification et réalisation d'une approche pour l'ablation d'un ostéosarcome par MO (Salyer et al., 2020).....	59
Figure 33 : Photographies de l'évolution de l'aspect d'une tumeur mammaire ulcérée après ablation par MO (Kawamura et al., 2023).....	62
Figure 34 : Photographie d'une ablation d'un ovaire par MO par guidage vidéo au cours d'une laparoscopie (Verpaalen et al., 2020) .....	64

# Liste des tableaux

---

Tableau 1 : Bilan des paramètres d'application utilisés en pratiques lors de thermoablation .....	20
Tableau 2 : Bilan examens complémentaires nécessaires avant une procédure de thermoablation par RF ou MO sur un CHC (Chen et al., 2016 ; Liang et al., 2015) .....	23
Tableau 3 : Tableau récapitulatif des procédures de RF et de MO pour chaque localisation tumorale .....	48
Tableau 4 : Bilan des informations sur les procédures d'ablations réalisées sur le foie .....	53
Tableau 5 : Bilan des informations sur les procédures d'ablations réalisées sur le poumon.....	56
Tableau 6 : Bilan des informations sur les procédures d'ablations réalisés sur la sphère uro-génitale .....	57
Tableau 7 : Bilan des informations sur les procédures d'ablations réalisées sur l'os .....	60
Tableau 8 : Bilan des informations sur les procédures d'ablations réalisées sur la parathyroïde...	61
Tableau 9 : Bilan des informations sur les procédures d'ablations réalisées sur le tissu mammaire .....	63
Tableau 10 : Bilan des informations sur les procédures d'ablations réalisées sur un chémodectome .....	63
Tableau 11 : Bilan des informations sur les procédures d'ablations réalisées sur le foie .....	64
Tableau 12 : Tableau récapitulatif des procédures utilisées en en médecine vétérinaire et leur intérêt .....	69

# Liste des abréviations

---

AG : Anesthésie générale

CBH : Claude Bernard Horner

CCR : Carcinome à cellules rénales

CHC : Carcinome hépatocellulaire

ECG : Électrocardiogramme

IH : Insuffisance hépatique

IR : Insuffisance rénale

MO : Micro-ondes

ND : Nom déposé

PA : Pression artérielle

RF : Radiofréquences

W : Watts

# Introduction

---

Le domaine de l'oncologie en médecine vétérinaire connaît une évolution constante au fil des années. Elle est à la fois le reflet des progrès réalisés en oncologie humaine ainsi que des découvertes spécifiques en médecine vétérinaire. Cette évolution est notamment permise par l'amélioration des techniques diagnostiques (radiographie, échographie, tomodensitométrie et IRM) ainsi que leur accessibilité.

L'ablation tumorale en oncologie interventionnelle est définie comme l'application directe et locale de thérapies à base de composés chimiques ou d'énergie pour détruire une tumeur. Lorsque la procédure implique l'utilisation d'une source d'énergie, la nomenclature distingue la thermoablation et l'ablation non-thermique. (Ahmed *et al.*, 2014)

Le but d'une thermoablation est d'entraîner la destruction d'une tumeur locale à partir de modification thermique de l'environnement. Ces modifications peuvent être une augmentation de la température, comme observée lors d'application de radiofréquences, de micro-ondes, de lasers interstitiels ou bien par diminution de la température locale par cryoablation. (Ahmed *et al.*, 2014) Cette thèse se limitera à l'étude de la thermoablation par radiofréquences et micro-ondes appliquées au domaine de l'oncologie interventionnelle. Ces techniques, couramment utilisées chez l'Homme depuis une trentaine d'année, ont récemment été décrites en médecine vétérinaire et semblent connaître actuellement un véritable engouement.

L'objectif de cette thèse est d'analyser l'intérêt et l'émergence de l'utilisation de la radiofréquence et des micro-ondes dans l'ablation de tumeurs en médecine vétérinaire. Dans une première partie, nous étudierons le fonctionnement intrinsèque des deux procédures, leurs différences et avantages respectifs. Nous réaliserons ensuite un état des lieux de leurs utilisations en médecine humaine en examinant les différents types de tumeurs qui peuvent être traitées avec ces techniques, leurs intérêts et leurs limites. Dans un dernier temps, nous explorerons les perspectives d'utilisation des radiofréquences et des micro-ondes en médecine vétérinaire en examinant notamment la littérature actuelle.



# 1. Fonctionnement de la radiofréquence et des micro-ondes

---

Dans cette partie, notre objectif sera de détailler les principes de fonctionnement inhérents aux techniques de thermoablation par radiofréquence (RF) et par micro-ondes (MO). Nous aborderons la gamme variée des dispositifs existant, leurs variations, et nous analyserons les avantages et inconvénients de ces deux traitements à travers une comparaison approfondie.

Historiquement, les premières applications d'un dispositif utilisant un courant à haute fréquence ont vu le jour vers la fin du 19<sup>e</sup> siècle grâce aux recherches de Jacques d'Arsonval et de Tesla. Ces dispositifs, permettant la transformation du courant électrique délivré en une source de chaleur locale au contact des tissus, étaient alors employés pour la réalisation de l'hémostase. Au fil du temps, ces dispositifs ont évolué avec l'incorporation de plaques de retour, favorisant ainsi une meilleure dispersion des ondes en profondeur. Ce processus a été nommé électrocoagulation. C'est dans les années 1980 que les recherches menées par McGahan ont été cruciales pour introduire la RF comme méthode d'ablation tumorale. Les MO ont fait leur apparition plusieurs années après. (Dubiel *et al.*, 2010 ; Vogl *et al.*, 2008)

## 1.1. Effet de la chaleur sur les tissus

Lorsqu'une chaleur est appliquée à un tissu biologique des modifications aux échelles cellulaires et tissulaires se produisent. Les résultats inhérents à l'application de cette source de chaleur sont bien évidemment dépendant de la température, mais aussi de plusieurs autres paramètres tel que la durée d'exposition, le type de tissu et sa circulation sanguine, la prise de traitements systémiques ainsi que la vulnérabilité propre aux cellules.

De manière générale, il est retenu que l'hyperthermie est définie comme une augmentation de la température supérieure à 41°C au sein d'un tissu. À cette température, il est possible d'observer une inflammation du tissu et la formation d'un œdème.

L'augmentation de la température entraîne progressivement une interruption de l'activité enzymatique qui peut potentiellement entraîner une mort cellulaire par défaut d'apport en oxygène selon le temps d'exposition. Aux alentours de 60 à 70°C, les protéines cytoplasmiques commencent à se dénaturer, les enzymes coagulent, et si la température atteint environ 100°C, la membrane cellulaire se rompt. Enfin, pour des températures supérieures à 110°C, des phénomènes de vaporisation (transition d'un état solide/liquide à un état de gaz/vapeur) ou bien de carbonisation (conversion de solide en carbone) sont observés.

Les mécanismes cellulaires décrits sont liés à un processus connu sous le nom de nécrose ischémique, également appelée nécrose de coagulation, qui est responsable d'une mort cellulaire irréversible. En raison de la spécificité des effets thermiques sur les cellules, la nécrose ischémique se produit après environ 60 minutes d'exposition à une température de 46 °C. Le temps d'exposition



diminue de manière exponentielle avec l'augmentation de la température puisque 5 minutes sont nécessaires entre 50 et 55°C et la nécrose est instantané à partir de 60°C.

C'est ce processus qui est exploité lors de la thermoablation par RF ou par MO, cela permet de provoquer uniquement la mort des cellules ayant subi des dommages thermiques significatifs sur une durée suffisante. (Chen *et al.*, 2016 ; Dubiel *et al.*, 2010 ; Vogl *et al.*, 2008)

## 1.2. Principe de fonctionnement général des thermoablations

Le principe fondamental de la thermoablation par RF ou par MO s'appuie sur l'application d'ondes électromagnétiques sur des cellules afin de générer de la chaleur et ainsi entrainer une nécrose de coagulation. Chaque longueur d'onde ne pénètre pas de manière identique dans un même tissu, ainsi le mécanisme intrinsèque pour générer de la chaleur varie entre les RF et les MO (Figure 1).

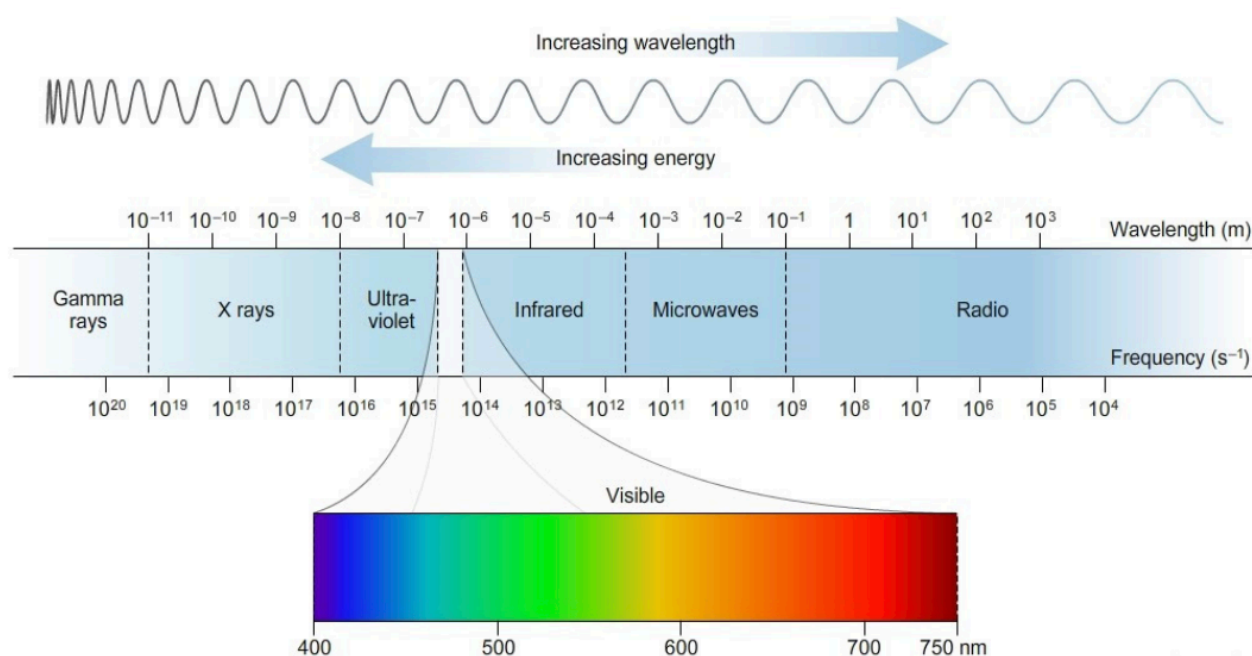


Figure 1 : Schéma du spectre électromagnétique avec la lumière visible mis en avant (Gartshore et al., 2021)

Les RF correspondent aux fréquences les plus basses (droite), ce qui correspond à des longueurs d'ondes hautes et une énergie basse.

La température recherchée est typiquement entre 50 et 100°C pendant 5 à 6 minutes. L'augmentation de la température doit être suffisante pour provoquer la nécrose ischémique de toute la tumeur ainsi que de 0,5 à 1 cm de tissu sain péri-lésionnel, afin de constituer des marges de sécurité, d'autant plus importante dans le domaine de l'oncologie. Pour cela, un applicateur, semblable à une aiguille, est inséré au cœur de la tumeur, seul l'embout actif de l'applicateur est non isolé et délivre des ondes. Il existe plusieurs longueurs d'embouts actifs sur les applicateurs, le choix de la longueur est souvent défini par le diamètre de la tumeur. Le positionnement de l'embout se fera de sorte que le centre de l'embout actif se retrouve exactement au centre de la tumeur. Ainsi, uniquement les cellules tumorales et les cellules comprises dans les marges seront détruites, le reste du tissu sain périphérique est conservé, cette zone est appelée la zone d'ablation. Par

exemple, pour une tumeur de 2 cm de diamètre, un point à environ 2,5 cm du centre de la tumeur devra être exposé à une température minimale de 50°C pendant un temps minimal de 5 minutes pour que l'ablation soit considérée comme complète avec des marges de 0,5 cm. (Ahmed *et al.*, 2014)

### 1.3. Principe de fonctionnement des radiofréquences

Les RF correspondent à des fréquences électromagnétiques entre 10 kHz à 2,59 GHz (figure 1). La plupart des systèmes actuellement disponibles fonctionnent à des fréquences entre 375 et 500 kHz. (Vogl *et al.*, 2008)

Un système de RF est constitué de 4 éléments : un générateur à RF, des câbles électriques, un applicateur (appelé électrode) et une électrode de retour, ce qui permet de créer un circuit électrique fermé. Le mécanisme de délivrance de chaleur des RF est connu sous le nom d'« agitation ionique ». Les RF délivrent un courant électrique, ce qui forme un flot de haute énergie électrique alternative autour de la pointe active de l'électrode. Les molécules d'eau et les ions présents dans le tissu cherchent à s'orienter dans le sens de ce flux. Du fait du caractère alternatif du courant, les mouvements créés provoquent des frottements, responsables d'une production de chaleur intense. Ce mécanisme est circonscrit à quelques millimètres autour de l'électrode car l'énergie se dissipe rapidement. Le reste de la zone d'ablation est formé par dissipation de la chaleur par conductivité thermique ou bien par des effets de convection. (Chen *et al.*, 2016 ; Ellis *et al.*, 2004 ; Koch *et al.*, 2017)

Les dispositifs de RF pour l'ablation tumorale dérivent des dispositifs d'électrochirurgie tels que le bistouri électrique. Leurs mécanismes de fonctionnement est donc identique et transforment le patient en une résistance au sein d'un circuit électrique fermé. La différence entre les deux dispositifs est avant tout conceptuelle puisque le bistouri électrique utilise les RF pour entraîner la nécrose ischémique instantanée sur un point fixe tandis que l'ablation par RF va utiliser cette zone de nécrose comme source d'énergie thermique pour créer une plus grande zone de nécrose. Les intervalles de puissances varient tout de même légèrement puisque le bistouri électrique fonctionne entre 30 et 80 Watts (W), tandis que l'intervalle pour l'ablation par RF se situe entre 20 et 200 W. En pratique, les puissances utilisées se situe le plus souvent entre 20 et 100 W pour des temps d'applications entre 10 à 30 minutes. (Dubiel *et al.*, 2010 ; Vaillant *et al.*, 2008)

Tout comme le bistouri électrique, les générateurs de RF pour l'ablation tumorale peuvent fonctionner sur plusieurs modes : (Bourrel, 2021 ; Ellis *et al.*, 2004 ; Koch *et al.*, 2017)

- Monopolaire : c'est le système le plus communément utilisé en RF. La cathode correspond à l'électrode active placée au sein de la tumeur et l'anode correspond à des plaques de retour, souvent positionnées sur les cuisses du patient (Figure 2).
- Bipolaire : l'anode est une seconde électrode. Celle-ci peut se situer sur un applicateur différent, ou bien être fixée sur le même embout non-isolé que la cathode.
- Multipolaire : plusieurs applicateurs (> 2) sont placés à moins de 1,5 cm d'écart, le courant circule librement entre chacune, générant une coagulation ischémique uniforme et circulaire.

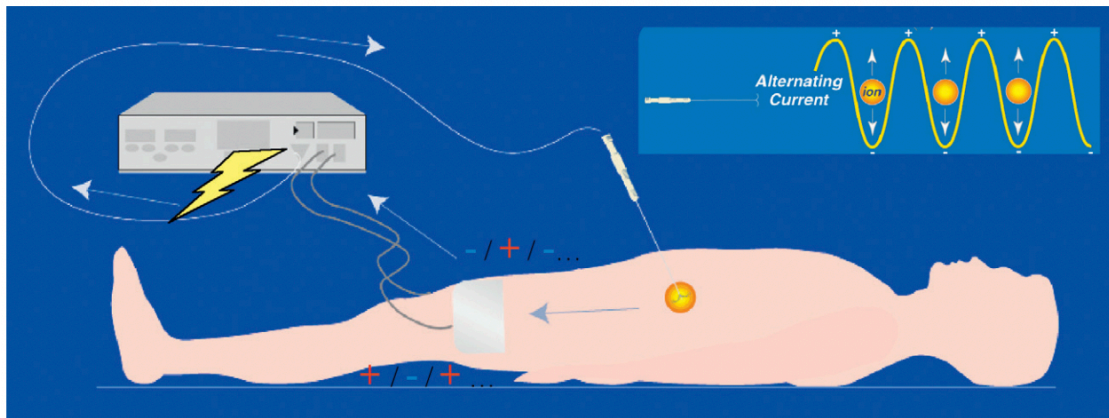


Figure 2 : Principe de l'ablation monopolaire par RF (Bastien et al., 2010)

Le patient est un circuit fermé entre deux électrodes. L'application d'un courant alternatif entraîne une agitation ionique.

Comme évoqué précédemment, la chaleur présente au sein de la zone d'ablation est essentiellement produite par conduction thermique. Afin de comprendre l'évolution du tissu au cours de l'ablation, Goldberg et al a décrit l'équation suivante, relative au développement de lésions thermiques :

$$\text{Nécrose ischémique} = (\text{énergie déposée} \times \text{interaction du tissu local}) - \text{pertes thermiques}$$

Figure 3 : équation simplifiée de nécrose ischémique (Ellis et al., 2004)

Les interactions au sein du tissu local sont définies par l'organe cible et le type de tumeur. Par exemple, les os, la graisse et les cicatrices ont une résistance bien supérieure aux muscles, à la peau et au sang, de ce fait la température d'ablation va être supérieure cependant la taille de la zone d'ablation sera diminuée. (Dubiel et al., 2010)

Ainsi, les recherches qui ont entouré l'amélioration de la taille de la zone d'ablation se sont concentrées sur le fait d'augmenter le dépôt d'énergie et de diminuer les pertes thermiques (Figure 3).

### 1.3.1. Diminution des pertes thermiques

La première cause de pertes thermique au sein du tissu lors d'une ablation tumorale par RF est la perfusion sanguine qui déplace la chaleur produite par convection. Ainsi, la présence de vaisseaux sanguins de gros calibre (> 3-4mm de diamètre) peuvent interagir négativement et fonctionner comme un robinet à chaleur. Cette perte de chaleur sera responsable d'une diminution de la température locale et une modification de la forme de la zone d'ablation (Figure 4) (Ahmed et al., 2014)

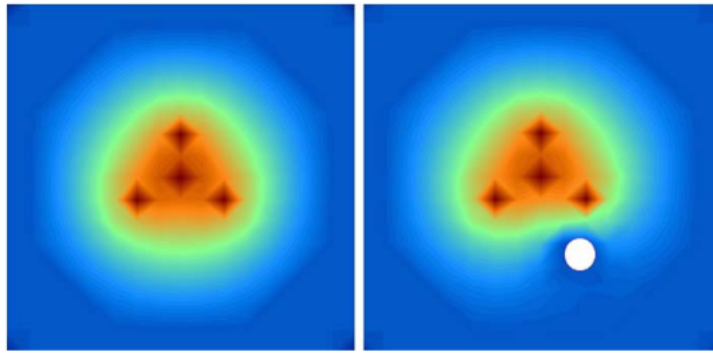


Figure 4 : Schéma des pertes thermiques engendrée par la présence d'un vaisseaux sanguin (Hong et Georgiades, 2010)

Le dégradé de couleur correspond à la température (rouge = chaud, bleu = froid), le cercle blanc représente un vaisseau sanguin de gros calibre, une diminution significative de la température est observée autour de ce dernier.

Pour diminuer l'impact de la circulation il est nécessaire dans un premier temps de mettre en évidence les vaisseaux importants par de l'imagerie et ainsi prévoir ceux pouvant interagir. Certaines modifications mécaniques et médicales ont été étudiées. Par exemple, il est possible de diminuer pharmacologiquement le débit sanguin, de réaliser une embolisation intra-artérielle ou bien d'entraîner une obstruction temporaire d'un vaisseau par clampage ou pose d'un ballon intravasculaire (exemple : manœuvre de Pringle lors d'occlusion vasculaire hépatique) (Ellis *et al.*, 2004)

### 1.3.2. Augmentation de l'énergie déposée

Les électrodes de RF sont usuellement d'un diamètre entre 14-18 G, elles se composent d'un embout actif non isolé en forme d'aiguille au bout d'une tige métallique bien isolée : avec une telle électrode, la zone d'ablation maximale est d'environ 3 cm (Figure 5). L'amélioration de la quantité d'énergie déposée au cours d'une ablation par RF passe par des modifications de l'électrode active. (Hong et Georgiades, 2010)

Les recherches entourant la RF ont montré que plusieurs électrodes peuvent être utilisée en « cluster ». Ainsi, plusieurs électrodes bipolaires sont insérés en simultanées à une distance de de moins de 1 cm et le courant est appliqué de manière alternative dans chacune des électrodes ce qui permet d'augmenter la zone d'ablation maximale à 5 cm (Figure 5).

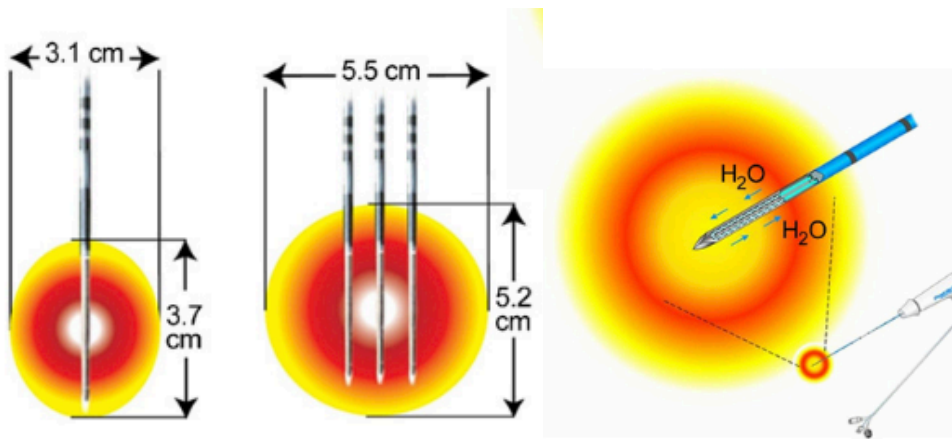


Figure 5 : Schéma de la zone d'ablation créée par une électrode, un groupe d'électrode et une électrode de refroidissement interne (Hong et Georgiades, 2010)

De cette observation sont également nées les électrodes parapluie déployant un nombre et une forme variable de baleines à la pointe de l'embout actif, correspondant chacune à une cathode et formant un cercle uniforme autour de l'anode également située au niveau de l'embout, permettant ainsi d'augmenter la surface de contact et donc le diamètre de la zone d'ablation (Figure 6). (Habert *et al.*, 2023 ; Hong et Georgiades, 2010 ; Vogl *et al.*, 2008)

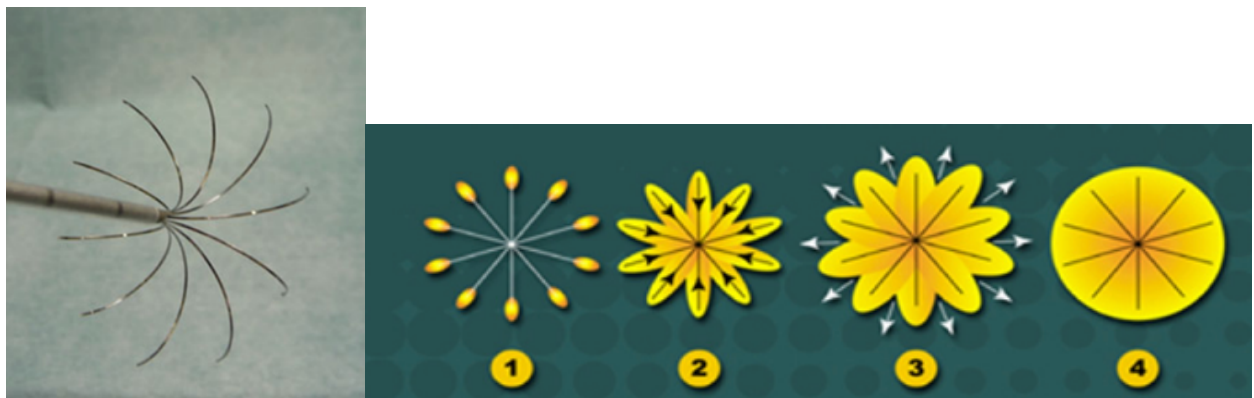


Figure 6 : Photographies de l'apparence d'une électrode parapluie et formation d'une zone d'ablation (Hong et Georgiades, 2010 ; Kinoshita, 2016)

(1) Formation de lésions thermiques sur l'embout des baleines, (2) développement des lésions le long des baleines vers l'embout de l'électrode, (3) développement extérieure et entre les baleines des lésions, (4) Zone d'ablation complète

L'une des limites à l'augmentation de l'énergie déposée est l'assèchement et la carbonisation du tissu lors d'une augmentation trop forte de la température. La conséquence de ce phénomène est l'augmentation majeure de l'impédance locale, qui devient alors un isolant et interrompt le circuit électrique. Tout d'abord, afin de limiter ce phénomène, l'augmentation de l'énergie déposée doit se faire graduellement. En effet, les protocoles d'application de RF nécessitant une puissance élevée (i.e. > 50 W), sont communément appliqués par augmentation progressive de la puissance de 10 en

10 sur quelques minutes. Cela permet aux températures de s'homogénéiser progressivement. Le refroidissement interne continu de la pointe de l'électrode avec une solution saline réfrigérée (ex : NaCl 0,9% à 0°C) permet également de limiter ce phénomène et d'augmenter la quantité d'énergie qu'il est possible de délivrer (Figure 5). (Ellis *et al.*, 2004 ; Hong et Georgiades, 2010)

Enfin, certaines études ont montré que l'injection d'une solution saline au sein de la zone d'ablation (ex : 6 mL de NaCl 36%) pouvait significativement augmenter la taille de la zone d'ablation. (Ahmed *et al.*, 2002). De ce fait sont nées des électrodes de perfusion : la présence d'une cavité au sein de l'électrode permet ainsi d'injecter progressivement une solution hypertonique au sein de la tumeur au cours de l'ablation. (Hong et Georgiades, 2010)

### **1.3.3. Contre-indications générales à la radiofréquence**

Il existe de multiples contre-indications à la RF, qui peuvent varier selon l'organe cible et seront étudié dans la deuxième partie. Il existe cependant des contre-indications générales à la RF :

- La grossesse : l'utilisation d'une électrode monopolaire implique le passage d'un courant électrique entre celle-ci et les plaques de retour situées sur les cuisses du patient. En conséquence, les experts ont présenté leurs inquiétudes quant à des lésions fœtales secondaires. Une attention particulière est portée à cette contre-indication lors d'ablation mammaire ou thyroïde car elles sont typiquement réalisées par électrode monopolaire.
- Le pacemaker : Les ondes électriques générées par la RF peuvent interférer avec le fonctionnement intrinsèque du pacemaker et donc représenter un risque de dysfonctionnement de ce dernier pour le patient

Ces deux risques sont théoriques, cependant, le principe de précaution se veut d'utiliser en priorité des électrodes bipolaire dans les deux situations. (Orloff *et al.*, 2022)

## **1.4. Principe de fonctionnement des micro-ondes**

Les MO correspondent à des fréquences électromagnétiques entre 300 MHz et 300 GHz (Figure 1). Les appareils actuellement disponibles fonctionnent à des fréquences de 915 MHz et 2,45 GHz. (Ahmed *et al.*, 2014)

Un système de MO est constitué de 3 éléments : un générateur à MO (magnétron), un système de distribution (câble flexible coaxial) et un ou plusieurs applicateurs (appelés antenne). Le mécanisme de délivrance de chaleur des MO est connu sous le nom « hystérésis diélectrique ». Les ondes MO transmises par l'antenne se propagent et forment un champ électromagnétique qui fait entrer en résonance les molécules possédant un moment dipolaire (principalement l'eau). Ce mécanisme a pour conséquence un mouvement rotatoire des molécules qui deviennent alors de petits dipôles électriques (Figure 7). Pour une fréquence de 915 MHz ou de 2,45 GHz, l'inversement des charges se fera environ 2 ou 5 milliards de fois par seconde respectivement. La rotation des molécules d'eau interagit avec les tissus environnants entraînant de la friction et un transfert d'une portion de leur énergie cinétique ce qui résulte en une distribution uniforme de chaleur. (Liang *et al.*, 2015 ; Ward *et al.*, 2013)

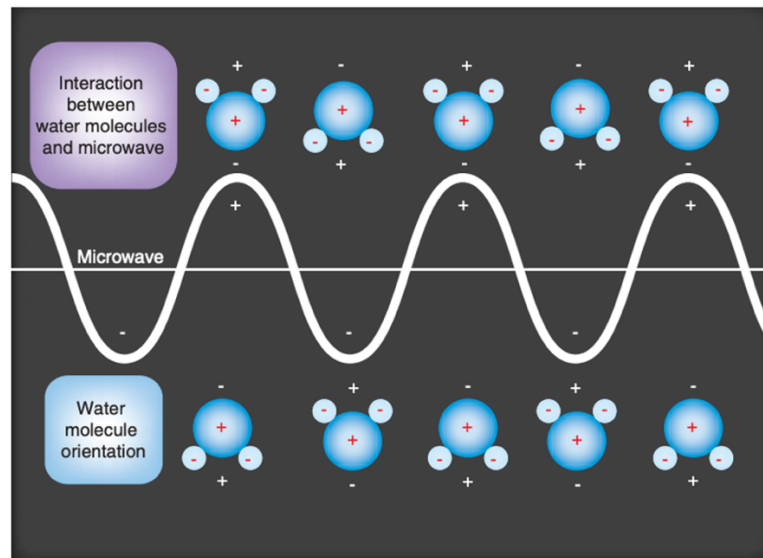


Figure 7 : *Schéma de l'hystérésis diélectrique* (Ward et al., 2013)

*Les ondes électromagnétiques des MO font entrer les molécules d'eau en résonance en faisant s'aligner les charges positives et négatives.*

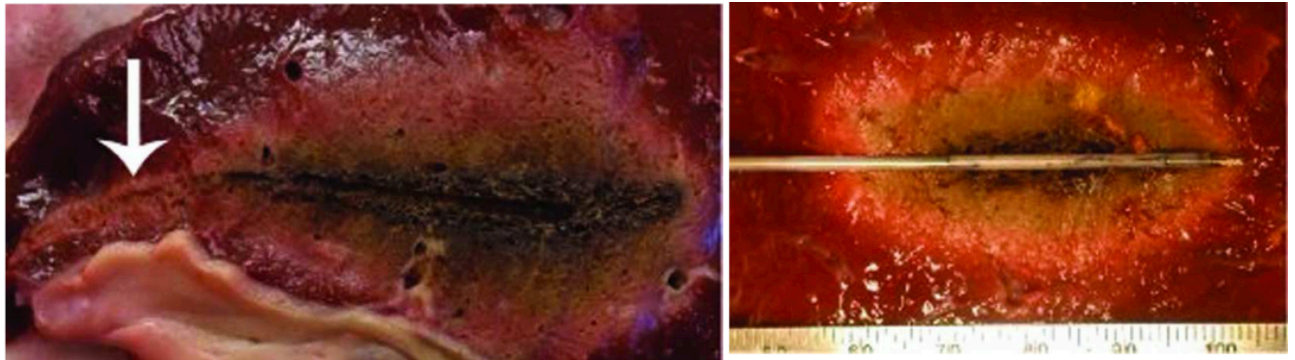
La chaleur au sein de la zone d'ablation au cours d'une ablation par MO est essentiellement produite par le mécanisme actif qu'est l'hystérésis diélectrique, la conduction thermique est plus limitée qu'en RF. De ce fait, l'équation simplifiée de nécrose ischémique (Figure 3) n'intervient pas dans la formation de la zone d'ablation par MO. Seule la permittivité relative du tissu détermine sa capacité à induire un « champ électromagnétique », la conductivité électrique et thermique ainsi que l'impédance du tissu importent peu. (Lubner et al., 2010)

L'augmentation du diamètre de la zone d'ablation passe donc avant tout par l'augmentation de l'énergie déposée au cours de la procédure. Les intervalles de puissances des dispositifs de MO varient entre 10 et 150 W. En pratique, les dispositifs recommandent le plus souvent une puissance entre 40 et 90 W pour des temps d'application entre 4 et 8 minutes. (Lubner et al., 2010 ; Ward et al., 2013)

Les câbles coaxiaux utilisés en MO sont de très bons propagateurs d'ondes électromagnétiques, cependant, plus le diamètre du câble diminue, plus des pertes de puissance et donc une production de chaleur sont observés. De ce fait, afin d'éviter une gêne ou des brûlures du manipulateur tout en augmentant l'énergie déposée au cours de la procédure, le diamètre des câbles est supérieur en MO qu'en RF, ce qui le rends plus encombrant et moins flexible. (Lubner et al., 2010)

L'antenne doit également répondre aux contraintes spécifiques des MO, son design est une balance entre efficacité de puissance, forme de la zone d'ablation et diamètre. La taille moyenne de la zone d'ablation produite avec une antenne « classique » monte jusqu'à 5,5 cm. Plusieurs designs d'antennes ont vu le jour au cours de la recherche sur les MO tel que l'antenne à étranglement ou à fente, en pratique, les antennes ont presque toujours une forme simple semblable à une aiguille. Tout comme le câble coaxial, la diminution du diamètre de l'antenne est responsable d'une production importante de chaleur, ce qui modifie la forme de la zone d'ablation. Afin de limiter ce phénomène, un refroidissement interne de l'antenne est nécessaire (Figure 8). Le refroidissement peut se faire par du liquide, similaire à la RF, ou bien par du gaz comprimé par utilisation de l'effet

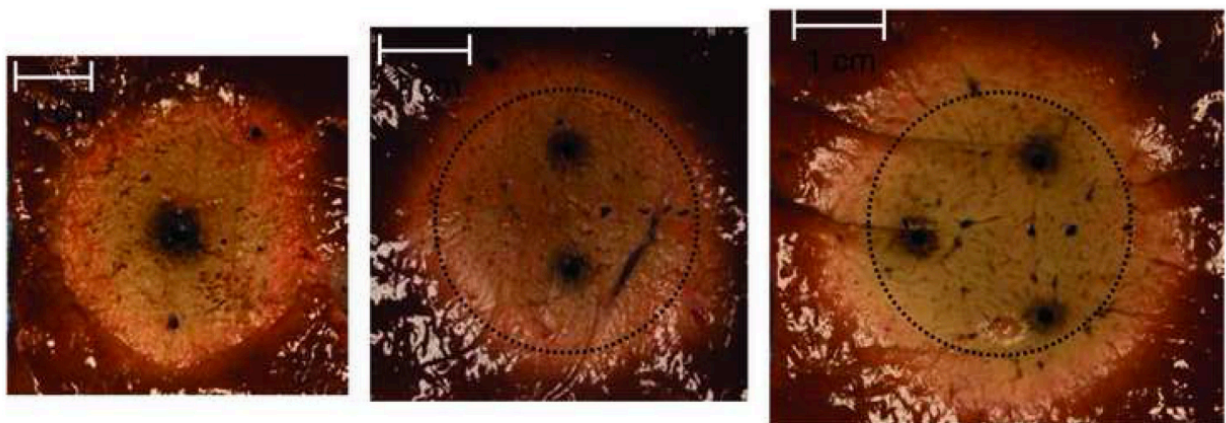
Joule Thompson. De ce fait, les antennes de MO ont un diamètre compris entre 12 et 17 G usuellement. (Dornbusch *et al.*, 2020 ; Liang *et al.*, 2015 ; Lubner *et al.*, 2010)



*Figure 8 : Comparaison de la zone d'ablation obtenue avec (droite) et sans (gauche) mécanisme de refroidissement interne de l'antenne de MO (Lubner *et al.*, 2010)*

*On observe de la photographie de gauche une forme de zone d'ablation en goutte d'eau, la flèche blanche correspond à la zone d'ablation créée par l'antenne non refroidie.*

Afin d'augmenter la taille de la zone d'ablation, il est possible d'appliquer plusieurs antennes à la fois, ces dernières vont alors fonctionner en synergie lorsqu'elles sont placées à proximité l'une de l'autre. Les champs électromagnétiques qui se recoupent vont alors fonctionner en phase comme une seule et même antenne, ce qui produit une augmentation de la température proportionnelle au carré du nombre d'antenne placées (Figure 9).



*Figure 9 : Augmentation de la taille de la zone d'ablation obtenue par ajout d'antennes de MO pour des puissances délivrés égales (Lubner *et al.*, 2010)*

*Les trois zones d'ablation ont été réalisés avec un générateur à fréquence 2,45 GHz, pour une puissance de 90 W (1 x 90W, 2 x 45 W, 3 x 30 W) pendant 5 minutes. Le cercle en pointillé sur les images de droite correspond au diamètre de la zone d'ablation à une seule antenne.*

Aucune contre-indication générale aux MO n'est décrite dans la littérature, du fait de son fonctionnement intrinsèque, le risque pour les femmes enceintes et les patients portant un pacemaker est minime.



## 1.5. Mise en place et suivi d'une procédure de thermoablation

Lors de la préparation d'une procédure de thermoablation, de nombreux facteurs sont à prendre en compte tels que l'organe cible, le type de tumeur, la taille et distribution de la tumeur, la proximité avec d'autres types de tissus, l'état clinique du patient, le dispositif utilisé et l'expérience de l'opérateur. (Culp et Griffin, 2019)

Une fois ces informations récoltées, il existe plusieurs approches possibles pour l'ablation tumorale :

- Percutanée : c'est l'approche la moins invasive, la prise en charge est rapide et le temps de récupération moins long.
- Coelioscopique : cette approche facilite le placement des applicateurs et l'accès à des zones complexes en percutanée.
- Chirurgie ouverte : Surtout pour les tumeurs abdominales, elle permet une meilleure exploration de la cavité pour la recherche de métastases et une protection des tissus à risques simplifiée. (Chen *et al.*, 2016)

Lors de la réalisation de procédures par voie percutanée, un guidage par imagerie est nécessaire. En général, les guidages se font par échographique, scanner ou bien IRM. L'échographie est le plus couramment utilisé pour sa simplicité et permet un suivi en temps réel de l'évolution de la zone d'ablation. Le scanner et l'IRM permettent une meilleure représentation de la cible et du chemin des applicateurs, cependant la présence du portique limite le positionnement de ces derniers et rend l'intervention plus longue. L'IRM offre l'avantage d'une surveillance thermique en temps réel mais la compatibilité avec la procédure est complexe et nécessite l'absence de composés métalliques. (Chen *et al.*, 2016 ; Guibal *et al.*, 2021)

A l'échographie, la réalisation de la procédure est responsable de la libération de bulles de gaz qui apparaissent hyperéchogènes à l'échographie et vont progressivement recouvrir la zone d'ablation souhaitée. Au scanner sans produit de contraste, la zone d'ablation apparaît hétérogène et hyperdense. Après injection du produit de contraste, la zone n'est pas réhaussée peu importe le guidage choisi. Un rehaussement périphérique uniforme et homogène est possible et correspond à une congestion et/ou à du tissu de granulation (Figure 10). (Bréhier *et al.*, 2021)

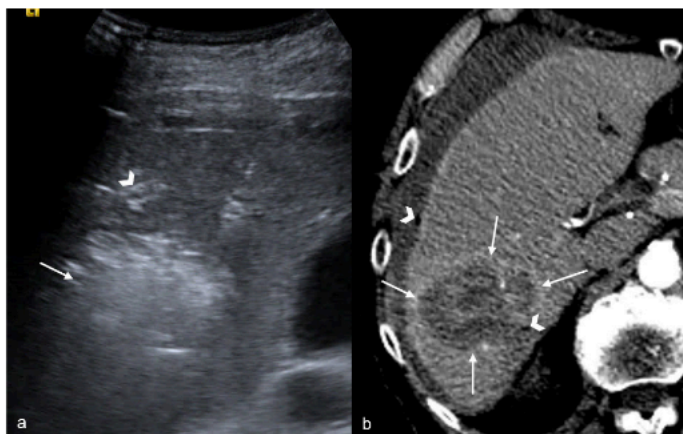


Figure 10 : Illustration du phénomène de vaporisation pendant une procédure et aspect immédiat d'une zone d'ablation (Bréhier et al., 2021)

Gauche : nuage hyperéchogène vu par échographie, Droite : anneau hyperintense autour de la zone d'ablation au scanner avec produit de contraste

En plus du contrôle par imagerie, il existe plusieurs systèmes permettant le contrôle de la procédure afin de s'assurer du développement de la zone d'ablation en plus du guidage échographique. En RF, certains appareils sont couplés à une mesure de l'impédance qui entraîne un arrêt automatique de la procédure lors de l'augmentation de cette mesure à l'abord de l'embout actif de l'électrode. Une augmentation de l'impédance correspond à une augmentation trop importante de la température entraînant une carbonisation du tissu. Pour les RF et les MO, le branchement de sondes thermocouples permet une mesure de température en temps réel sur un point précis de la zone d'ablation. La sonde peut également être placée aux abords des tissus à risque en protection supplémentaire. (Chen et al., 2016 ; Kinoshita, 2016 ; Liang et al., 2015)

A la suite d'une thermoablation, l'ensemble du tissu tumoral devient du tissu nécrotique puis enfin du tissu cicatriciel. Dès les 6 semaines après intervention, des remaniements hémorragiques peuvent être observés, la zone d'ablation étant avasculaire. Ensuite, dès les 3 à 4 mois une involution de la zone d'ablation doit avoir débuté, c'est-à-dire une diminution du diamètre global de la zone toujours avasculaire. Lorsque le tissu est correctement cicatrisé, l'involution s'arrête et la taille de la zone avasculaire doit rester stable au cours du temps. En cas d'échec ou de récurrence de la tumeur, c'est une augmentation de la taille de la masse qui sera observée, elle peut être dystrophique ou homogène, son aspect est similaire à la tumeur initiale et la zone est bien vascularisée. (Bréhier et al., 2021)

## 1.6. Bilan et comparaison des deux techniques

En comparant le mécanisme et le fonctionnement des deux méthodes d'ablation tumorale, les MO possèdent en théorie de multiples avantages comparés à la RF :

- 1) Les RF entraînent une zone de réchauffement actif de quelques millimètres autour de l'électrode, tandis qu'en MO, cette zone est de plus de 2 cm.
- 2) Les RF dépendent de l'impédance du tissu qui augmente lorsque les températures dépassent 100°C tandis que les MO dépendent de la permittivité tissulaire, qui ne change pas à des températures plus hautes (150°C)
- 3) Les RF dépendent de la conduction thermique, qui est limitée par la présence de gros vaisseaux, tandis que les MO y sont moins sensibles.

- 4) Les RF en mode monopolaire dépendent de la présence de plaques de retour qui dissipent l'énergie produite, tandis que les MO ne produisent de l'énergie que dans les zones circonscrites à l'antenne

Ces 4 observations ont pour conséquence des températures et des diamètres d'ablation supérieurs pour des temps d'application moins longs. De plus, les zones d'ablation sont plus homogènes et il n'existe pas de risques de brûlures sur les plaques de retour. (Hong et Georgiades, 2010 ; Vogl *et al.*, 2008 ; Ward *et al.*, 2013)

Cependant, il existe actuellement plusieurs avantages aux RF comparés aux MO :

- 1) La base de données littéraire est bien plus développée pour la RF que pour les MO, ce qui permet une meilleure connaissance de son fonctionnement, de ses limites et de ses risques.
- 2) Le diamètre des électrodes est plus faible en RF.
- 3) Le réchauffement étant plus large et plus rapide en MO, le contrôle de la température est plus difficile, ce qui représente un risque pour les tissus à risques proches de la zone d'ablation.
- 4) La limitation de l'effet robinet de chaleur des vaisseaux sanguin lors de l'application de MO les rend plus à risques de provoquer des thromboses comparées aux RF.

En conclusion, les techniques de thermoablation par RF ou par MO fonctionnent par formation d'une zone de nécrose ischémique par élévation ciblée de la température, bien que leurs mécanismes de production de chaleur diffèrent. La RF génère de la chaleur par agitation ionique grâce à des courants électriques alternatifs, tandis que les MO exploitent l'hystérésis diélectrique par application d'un champ électromagnétique. Ces distinctions confèrent à chaque méthode des avantages spécifiques. Les MO peuvent engendrer des zones de réchauffement plus larges, utiles pour couvrir de vastes zones tumorales, tandis que la RF profite d'une meilleure compréhension due à son adoption précoce. Les tailles des zones d'ablation varient significativement en fonction des paramètres et du matériel choisi.

	Radiofréquences	Micro-ondes
<b>Fréquences appliquées</b>	Entre 375 et 500 kHz	915 MHz ou 2,45 GHz
<b>Mécanisme de dépôt de chaleur</b>	Agitation ionique et conduction thermique	Hystérésis diélectrique (oscillation des molécules d'eau)
<b>Puissance de générateur</b>	20 à 100 W	40 à 90 W
<b>Taille maximale de la zone d'ablation obtenue avec un applicateur « classique »</b>	3 cm	5,5 cm
<b>Temps d'application</b>	10 à 30 minutes	4 à 8 minutes
<b>Calibre d'électrodes</b>	14 à 18 gauges	12 à 17 gauges
<b>Contrôles possibles</b>	Impédance, température	Température

*Tableau 1 : Bilan des paramètres d'application utilisés en pratiques lors de thermoablation*  
 Les informations données ci-dessous sont à titre indicatif mais peuvent varier en fonction des dispositifs présents sur le marché et du choix du praticien.

## 2. État des lieux de la radiofréquence et des micro-ondes en oncologie humaine

---

Cette partie a pour but de faire un état des lieux de l'utilisation de la RF et des MO en médecine humaine à ce jour. Ces techniques se développent depuis maintenant une trentaine d'années et ne cessent d'évoluer de par leurs indications et résultats. Le traitement par thermoablation du carcinome hépatique sera détaillé dans un premier temps comme procédure type compte tenu de son intérêt chez l'Homme, le traitement d'autres lésions sera décrit plus sommairement par la suite. Les thérapies combinées associant les thermoablations à d'autres types de prises en charges en oncologie ne seront pas abordées.

### 2.1. Application des techniques : exemple du carcinome hépatocellulaire

Chez l'Homme, le cancer hépatique est la 6<sup>ème</sup> néoplasie la plus diagnostiquée et la 3<sup>ème</sup> plus mortelle en 2020. Le carcinome hépatocellulaire (CHC) compte pour 75 à 85% des cancers hépatiques primaires. (Gao *et al.*, 2023 ; Guibal *et al.*, 2021)

Pendant de nombreuses années, l'hépatectomie et la transplantation étaient considérées comme le seul traitement curatif du CHC mais cela n'était possible que dans seulement 10 à 20 % des cas et à l'origine d'une morbidité et d'un cout sociétal important. Cependant, depuis quelques années, la prise en charge par thermoablation est devenue la prise en charge de première intention pour les CHC très précoces dans plusieurs consensus. (Chen *et al.*, 2016 ; Liang *et al.*, 2015)

#### 2.1.1. Indications, contre-indications et préparation du patient

Avant de décider de procéder à une thermoablation, il est important de réaliser une évaluation complète de l'historique clinique du patient. La prise en charge étant multidisciplinaire, la communication et la coordination des départements concernés (oncologie, chirurgie, imagerie...) sont essentielles. L'obtention d'un consentement éclairé du patient est nécessaire et doit s'accompagner d'une discussion sur la nature de la procédure, les risques, les avantages et inconvénients ainsi que les alternatives disponibles (Liang *et al.*, 2015).

Les indications pour la thermoablation du CHC dépendent avant tout de l'objectif du traitement. En effet, ce dernier peut être curatif, palliatif ou une supplémentation à un traitement adjuvant.

Les indications curatives pour l'ablation par RF ou par MO sont très similaires, la plus importante étant la prise en charge des patients non-candidats à la chirurgie (quantité trop faible de foie restant du fait de résections antérieure, tumeurs multinodulaires, zones anatomiques complexes, refus du patient). Le traitement est envisageable pour une masse unique de moins de 5 cm (3 cm de préférence) ou bien jusqu'à 3 nodules de 3 cm maximum. (Chen *et al.*, 2016 ; Liang *et al.*, 2015)

La visée palliative des ablations tumorales a pour but de contrôler la progression, diminuant la charge ainsi que la douleur tumorale. Les procédures de thermoablation peuvent également rendre le tissu tumoral plus sensible à des thérapies adjuvantes telles que la chimiothérapie ou la radiothérapie. (Liang *et al.*, 2015 ; Vogl *et al.*, 2017)

Les contre-indications aux RF et aux MO sont également similaires. Il existe des contre-indications absolues : (Chen *et al.*, 2016 ; Liang *et al.*, 2015)

- Mise en évidence d'une insuffisance hépatique (IH) grave et clinique : ascite ne répondant pas au traitement médical, encéphalopathie hépatique avec état comateux.
- Coagulopathie grave : temps de prothrombine supérieur à 30 secondes, activité de la prothrombine inférieure à 40% ou comptage plaquettaire inférieur à 30 000 cellules/L.
- Haute charge tumorale intra-hépatique (>70 % du volume totale hépatiques) ou haute charge tumorale extra-hépatique.
- Présence d'une inflammation localisée ou systémique, d'une insuffisance rénale/ pulmonaire/ cardiaque.

Il existe également des contre-indications relatives :

- Présence d'un risque pour les organes adjacents : tube digestif, diaphragme, vésicule biliaire, pancréas, hile hépatique qui, le cas échéant, nécessiteront la mise en place de mesures de protections (Guibal *et al.*, 2021)
- Présence d'un pacemaker pour la RF monopolaire

La préparation du patient à une thermoablation hépatique passe par un examen clinique complet, des analyses sanguines et de l'imagerie (Tableau 2). Une attention particulière sera portée aux traitements reçus par le patient, notamment aux traitements modulateurs de l'hémostase : les antiplaquettaires doivent être arrêtés une semaine avant intervention, les anticoagulants doivent également être arrêtés, si cela représente un risque trop important, les coumarines doivent à minima être remplacé par des héparines. La planification de la procédure par lecture des images obtenues en pré-opératoire permet de déterminer la mise en place des applicateurs, leurs trajets et leurs nombres, pour réaliser une zone d'ablation recouvrant toute la tumeur avec des marges de 0,5 à 1 cm. Ces choix impliquent une connaissance précise de l'emplacement anatomique de la tumeur, il faut ensuite prévoir un trajet qui évite au maximum les structures à risques (ex : vaisseaux sanguins de gros calibres), il est conseillé de toujours traverser du parenchyme sain avant d'insérer l'applicateur dans la tumeur afin de limiter les risques de métastases. Certains dispositifs ou logiciels de modélisation 3D permettent d'aider à prévoir le passage des applicateurs (Figure 32). (Chen *et al.*, 2016 ; Liang *et al.*, 2015)

Analyses biologiques	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Hémogramme complet avec taux d'hémoglobine, comptage plaquettaire et leucocytes</li> <li>• Temps de coagulation de moins de 48h</li> <li>• Paramètre de la fonction hépatique et rénale</li> <li>• Marqueurs tumoraux (ex : <math>\alpha</math>-fétoprotéines)</li> <li>• Sérologie hépatite B et C dans les zones endémiques</li> </ul>
Imagerie	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Radiographies thoraciques</li> <li>• Échographie et scanner ou IRM</li> </ul>

Tableau 2 : Bilan examens complémentaires nécessaires avant une procédure de thermoablation par RF ou MO sur un CHC (Chen et al., 2016 ; Liang et al., 2015)

### 2.1.2. Déroulement de la procédure et monitoring

Un jeûne de 8 heures est réalisé avant la procédure.

Pour les prises en charges percutanées, une sédation avec anesthésie locale peut suffire, mais le passage à un abord par laparoscopie et laparotomie nécessite une anesthésie générale (AG) avec un monitoring classique (ECG, PA, oxymétrie pulsée). La pose d'une voie veineuse est nécessaire.

Lorsque le patient est installé et le trajet de(s) l'applicateur(s) déterminé(s), une incision cutanée est réalisée pour son (leur) insertion. Si nécessaire, les tissus fragiles sont protégés par hydrodissection (administration de 500 à 1000 ml de Glucose 5%), dissection au ballon, insufflation au ballon ou refroidissement avec un liquide glacé. Si la vésicule biliaire est à risque, une cholécystectomie peut être envisagée. (Chen et al., 2016 ; Guibal et al., 2021)

Lorsqu'une seule ablation est suffisante pour couvrir la totalité de la tumeur, le centre de l'embout actif de l'applicateur est placé au centre de la tumeur, ce qui revient à placer la pointe de l'applicateur au plus profond de la tumeur, puis le courant est mis en place. Dans le cas où plusieurs ablations successives sont nécessaires en longueur, l'applicateur est positionné au plus profond de la tumeur et est progressivement retiré en réalisant des zones d'ablations successives, permettant de garder la visibilité des zones atteintes à l'échographie. Enfin, si le diamètre de la tumeur est largement supérieur au diamètre d'ablation d'un applicateur, plusieurs techniques sont possibles. En RF, il est préférable de réaliser l'application de plusieurs cycles chevauchés par repositionnement successif de l'applicateur. Cette méthode a pour inconvénient de nécessiter au minimum 8 ablations pour obtenir une surface sphérique, rendant le processus long et fastidieux. En MO, plusieurs applicateurs insérés en même temps et fonctionnant en synergie seront favorables. (Guibal et al., 2021)

L'imagerie per-opératoire dépend du matériel disponible, de la compatibilité du dispositif utilisé et de l'expertise du clinicien. L'échographie est le guidage le plus couramment utilisé mais est cependant peu fiable pour la détection de petits nodules de CHC. L'utilisation d'un produit de contraste échographique (LEVOVIST ND) disponible en Asie et en Europe facilite grandement le suivi per-opératoire et permet de mettre en évidence des reliquats tumoraux au cours de la procédure. Il existe des systèmes multimodaux de fusions d'images en RF permettant d'afficher côte à côte les images instantanées échographiques avec une reconstitution parallèle par les images de scanner

ou IRM. La disponibilité de ses systèmes est cependant limitée. (Chen *et al.*, 2016 ; Guibal *et al.*, 2021)

Lorsqu'un contrôle par une sonde thermocouple veut être ajouté au cours de la procédure, cette dernière est placée dans les marges saines voulues de la tumeur et la procédure est considérée comme terminée quand la température atteinte est de 54°C durant au moins 3 min. (Chen *et al.*, 2016 ; Kinoshita, 2016 ; Liang *et al.*, 2015)

Après la procédure, le patient est mis au repos strict pendant 4 à 6h avec surveillance des signes vitaux. Une surveillance pendant 2 à 3 jours est parfois nécessaire avant un retour au domicile si la douleur est supportable et si la température corporelle est inférieure à 38°C.(Liang *et al.*, 2015)

### **2.1.3. Accidents, incidents et complications**

Tandis que l'utilisation des RF est à ce jour très largement étudiée et leur sécurité acceptée, les MO sont comparativement moins documentés. La littérature tend cependant à montrer qu'il n'existe pas de différence significative du taux de mortalité (entre 0 et 0,36% dans les études). De plus, l'incidence et le type de complications sont similaires pour les deux procédures (Bertot *et al.*, 2011 ; Ding *et al.*, 2013 ; Izzo *et al.*, 2019). Le taux de complications totales est compris entre 0 et 12 % selon les études. (Wu *et al.*, 2012)

Les complications des procédures de RF et de MO peuvent être réparties en 3 catégories : complications vasculaires, complications hépatiques, complications extra-hépatiques. Les complications peuvent également être classées par grades :

- Complications mineures :
  - Grade A : Ne nécessite pas de traitement supplémentaire et n'influence pas les résultats.
  - Grade B : Nécessite un traitement léger et une observation supplémentaire de 12 h mais n'influence pas les résultats.
- Complications majeures :
  - Grade C : Nécessite un traitement et une hospitalisation de moins de 48h.
  - Grade D : Nécessite un traitement intensif et une augmentation du niveau de soins avec une hospitalisation généralement supérieure à 48h.
  - Grade E : Séquelles à long terme
  - Grade F : Mort.

#### **2.1.3.1. Complications vasculaires majeures**

- Hémopéritoine.

Les saignements sont des complications mineures fréquentes des thermoablations (Figure 11), mais peuvent parfois, même si cela est rare, devenir majeures. La cause primaire est souvent mécanique et causée par la rupture d'un vaisseau majeur lors du passage de l'applicateur. D'autres causes sont une coagulopathie sous-jacente, une rupture d'une tumeur superficielle ou une rupture d'un pseudo-anévrisme. Les saignements apparaissent généralement dans les premières heures

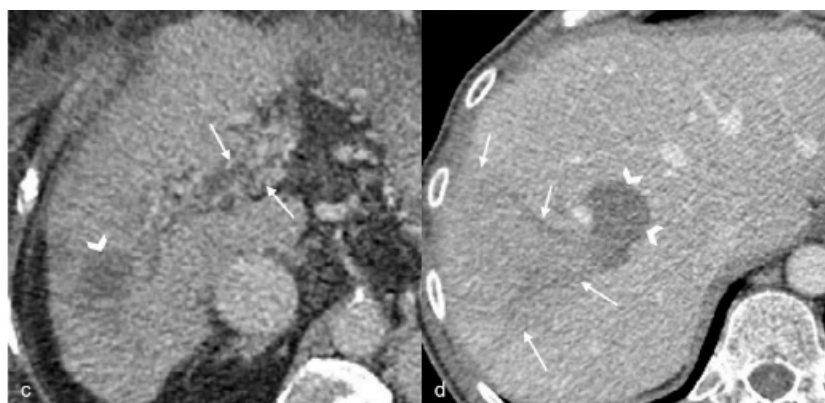
du traitement mais peuvent aussi, plus rarement, être secondaires et apparaître dans les deux semaines suivant la prise en charge. Une prise en charge conservatrice sera réalisée en première intention (fluidothérapie, thrombine, transfusion sanguine). En cas d'échec thérapeutique, une embolisation trans-artérielle ou une laparotomie avec hémostase élective seront à envisager. (Bréhier *et al.*, 2021 ; Liang *et al.*, 2015 ; Wu *et al.*, 2012)



*Figure 11 : Illustration des complications vasculaires observables (Bréhier *et al.*, 2021)  
Coupe axiale de scanner en temps artériel confirmant le bon positionnement de l'applicateur mais montrant un hématome (flèches) et un saignement actif (pointe de flèche).*

- Thrombose de la veine porte ou d'une veine hépatique.

La prise en charge des tumeurs hépatiques centrales est plus à risque de provoquer des thromboses veineuses (Figure 12), elles peuvent survenir dans les jours qui suivent la procédure. Les causes favorisantes sont une forte température proche des vaisseaux importants ou une baisse du débit portal du fait d'une cirrhose. Le cas échéant, une thérapie fibrinolytique pourra être envisagée avec une haute dose d'urokinases. (Bréhier *et al.*, 2021 ; Chen *et al.*, 2016)



*Figure 12 : Illustration d'une thrombose post thermoablation (Bréhier *et al.*, 2021)  
Coupes axiales de scanner en temps portal. Gauche : Thrombose chronique avec cavernome portal (flèche) et zone d'ablation hypodense (pointe de flèche) 2 ans après procédure. Droite : Thrombose de la veine hépatique droite proche de la zone d'ablation (pointes de flèches) et thrombose des veines en amont et zone hypodense de parenchyme congestionné.*



### 2.1.3.2. Complications hépatiques majeures

- Insuffisance hépatique

Cette complication est rare mais peut-être fatale. Elle résulte souvent d'un fonctionnement hépatique diminué avant la procédure ou de complications majeures tel que les hémorragies ou infections. Tout signe de décompensation hépatique persistant doit être exploré et pris en charge immédiatement. (Liang *et al.*, 2015 ; Wu *et al.*, 2012)

- Abscès hépatique

Si non pris en charge, un abcès hépatique peut provoquer un sepsis, un choc septique, ou même être fatal (Figure 13). Les causes favorisantes sont une contamination bactérienne et le diabète. Le signe clinique majeur étant une hyperthermie, il peut être confondu avec l'une des complications mineures, le syndrome post-ablation. Le cas échéant, une antibiothérapie large spectre doit être initiée en attendant les résultats des prélèvements microbiologiques. Un drainage cathéter échoguidé pourra être envisagé. La prévention de ce type de complication peut passer par l'utilisation d'antibiotiques large spectre avant intervention, la décision est propre au clinicien et peut être discutée. (Le Bayon, 2011 ; Liang *et al.*, 2015)

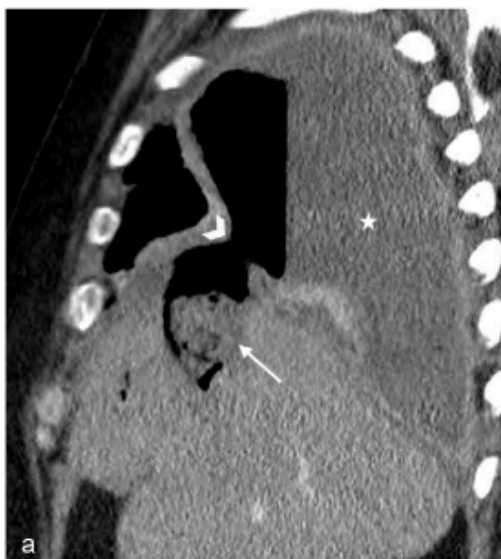


Figure 13 : *Illustration d'un abcès post thermoablation* (Bréhier *et al.*, 2021)

*Reconstruction sagittale tomographique en phase portale 5 semaines après la procédure montrant des bulles de gaz au sein de la zone d'ablation (flèche) en faveur d'un abcès en plus de la vision d'une brèche diaphragmatique (tête de flèche), un rehaussement épais de la plèvre droite et un épanchement pleural abondant est observé (étoile).*

- Lésions des canaux biliaires

Il existe plusieurs lésions possibles des canaux biliaires : les sténoses, les cholangites, les biliomes (Figure 14) ou les fistules biliaires. Leurs prévalences augmentent lors d'une intervention proche du hile hépatique et peuvent être une conséquence mécanique ou thermique de l'intervention. Les précautions afin d'éviter l'occurrence de ces complications sont l'augmentation du temps et la diminution de la puissance de la procédure. Lors d'obstructions majeures, un drainage

hépatique percutané sera envisagé. En cas de sténose d'un canal majeur, un stent biliaire sera envisagé. (Liang *et al.*, 2015)

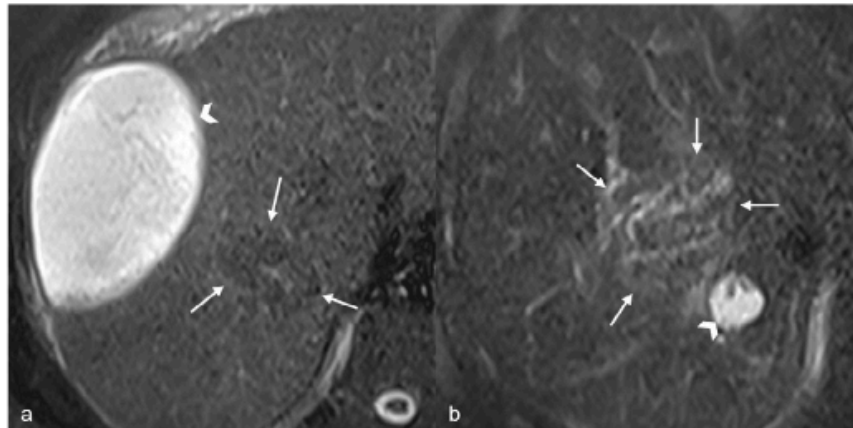


Figure 14 : *Illustration d'un biliome* (Bréhier *et al.*, 2021)

Images axiales en T2 Fat SAT de biliomes situés dans la zone de péri-ablation (droite) et à distance de la zone d'ablation (gauche).

- Lésions de la vésicule biliaire

Une inflammation de la vésicule biliaire est commune après traitement des CHC par thermoablation. Les perforations sont rares mais peuvent-être favorisées par des adhésions à la suite d'une chirurgie antécédente. La prévention des complications passe par une hydrodissection de la vésicule biliaire. En cas de cholécystite majeure ou d'œdème important de la paroi, une cholécystectomie sera envisagée. (Liang *et al.*, 2015)

### **2.1.3.3. Complications extra-hépatiques majeures**

- Perforation intestinale

Les tumeurs adjacentes au tube digestif sont plus à risque, cette complication entraîne une péritonite, s'accompagnant parfois d'un sepsis ou d'un choc septique et peut être fatal (Figure 15). De même que pour la vésicule biliaire, la présence d'adhérences provoquées par une laparotomie antérieure est un facteur de risque. Le gros intestin est le plus touché du fait de sa localisation et de sa paroi plus fine. L'ascite artificielle est un point clé de prévention de cette complication lors de la réalisation de procédures à risque. Le cas échéant, une prise en charge chirurgicale par entérotomie ou entérectomie est nécessaire. (Liang *et al.*, 2015)

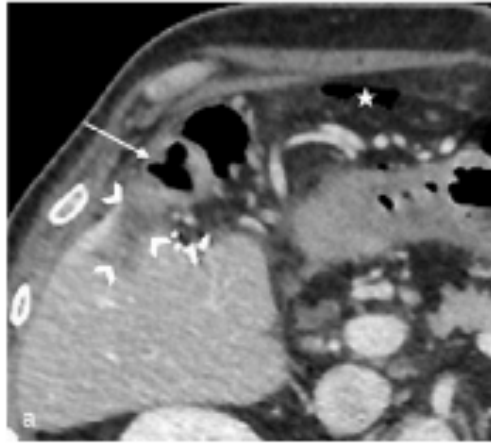


Figure 15 : *Illustration perforation intestinale* (Bréhier et al., 2021)

Coupe axial tomodensitométrique en phase portale en faveur d'une perforation du côlon par un épaissement pariétal du côlon à l'angle droit (flèche), adjacent à la zone d'ablation (pointes de flèches), des amas graisseux adjacents, un épaissement péritonéal, un pneumopéritoine (étoile).

- Complication thoraco-diaphragmatique

Lors de localisations tumorales proches du diaphragme, il est possible d'observer un épanchement pleural, un pneumothorax, un hémithorax, de l'emphysème ou bien une hernie diaphragmatique. Ils peuvent être la conséquence de lésions thermiques ou mécaniques si l'abord nécessite un passage transdiaphragmatique. En cas d'absence de réponse au traitement conservateur, une embolisation artérielle ou une thoracotomie seront envisagées. (Liang *et al.*, 2015)

- Ensemencement tumoral

Du fait de la pénétration de la sonde au sein de la tumeur, il existe un risque d'ensemencement tumoral le long du trajet de cette dernière lors de son retrait (Figure 16). Le risque augmente pour les tumeurs proches de la surface hépatique. Les causes favorisantes sont une ablation tumorale incomplète, de nombreuses biopsies ou ponctions, un retrait de l'électrode trop rapide, un statut immunodéprimé du patient. Les précautions à prendre pour réduire la prévalence sont le passage des applicateurs au travers d'un parenchyme hépatique sain, en cas de placement de l'applicateur trop profond, une ablation doit être réalisée avec son recul. Lors du retrait de l'applicateur de la capsule hépatique, le refroidissement interne est arrêté et une puissance minimale doit être conservée. (Liang *et al.*, 2015)

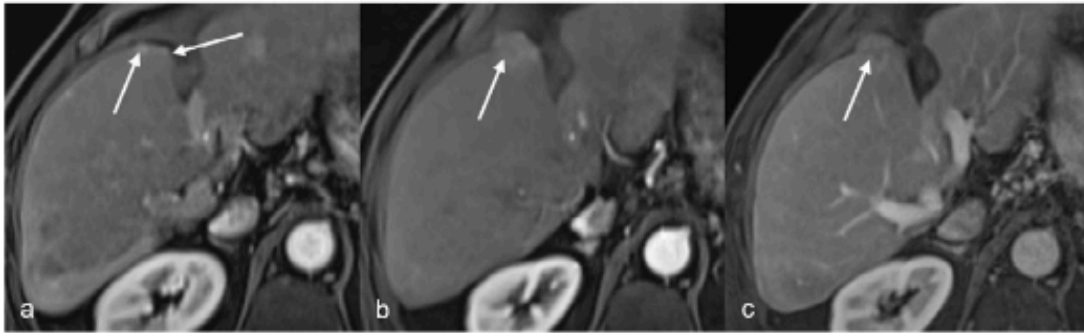


Figure 16 : *Illustration ensemencement tumorale* (Bréhier et al., 2021)  
 Ensemencement tumoral après MWA pour de multiples nodules de CHC.

- Brulures cutanées

Le risque de brûlure cutanée est plus important pour des localisations proches de la paroi abdominale et augmente d'autant plus lors de l'utilisation avec une électrode sans refroidissement interne ou en augmentant la puissance délivrée. L'incision cutanée et la pose de poches de glace proche du point de ponction peuvent être nécessaires.

D'autres complications majeures graves mais rares sont l'infarctissement hépatique, une hémoglobinurie, une myoglobulinémie, des complications cardiaques et un réflexe vagal. (Liang *et al.*, 2015)

#### 2.1.3.4. Complications mineures

- Douleur

Une douleur post procédure de thermoablation est décrite chez 60 à 80% des patients. La plupart du temps elle est légère à modérée et disparaît au bout d'une semaine. Entre 10 à 20 % des patients nécessitent la mise en place d'une analgésie post-opératoire. (Liang *et al.*, 2015)

- Syndrome post-ablation

Ce syndrome correspond à un ensemble de symptômes transitoires complexes s'accompagnant d'un inconfort et d'une hyperthermie. Dans la majorité des cas, le symptôme disparaît en 2 à 7 jours mais perdure parfois pendant 2 à 3 semaines pour les grosses tumeurs. (Liang *et al.*, 2015)

#### 2.1.4. Suivi post-interventionnel

Les consensus actuels sur le suivi post-interventionnel recommandent un suivi par de l'imagerie avec produit de contraste immédiat (partie 1.2.1.2.), un second contrôle dans les 6 semaines suivant la procédure, puis tous les 3 à 4 mois pendant les 5 années suivantes. Il est nécessaire de toujours comparer les images obtenues avec les images initiales avant et après ablation, de mesurer l'involution de la zone d'ablation et de rechercher des complications (partie 1.2.1.3.) (Bréhier *et al.*, 2021 ; Le Bayon, 2011)

Jusqu'à 6 mois après intervention, les remaniements hémorragiques expliquent la visualisation en IRM d'hypersignaux en T1 nécessitant l'utilisation d'images soustraites. La zone d'ablation n'est pas renforcée et le tissu de granulation péri-ablation peut encore être visible. Le trajet des applicateurs correspond à une ligne hypodense au scanner ou hyperintense en T2 (Figure 17)

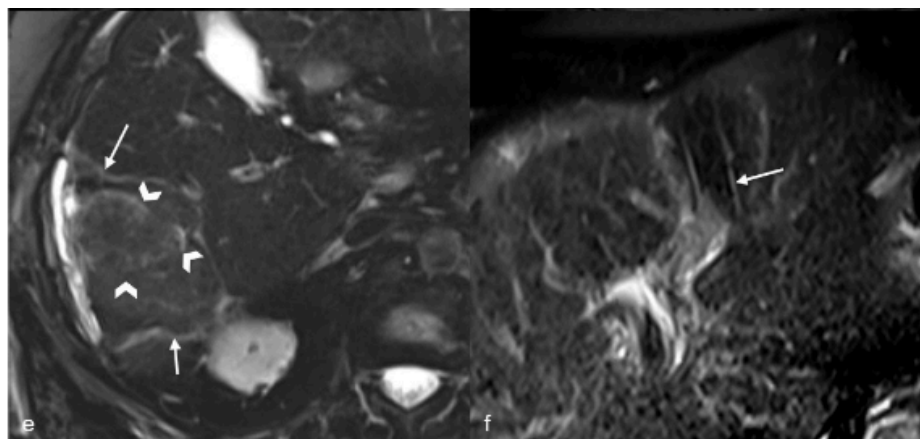


Figure 17 : Illustration aspect normale zone d'ablation (Bréhier et al., 2021)

Images axiales T2 Fat Sat de zone d'ablations de CHC. A gauche : zone d'ablation hypointense avec tissu de granulation hyperintense (flèches) et fantôme du nodule traité (pointes de flèches). A droite : Deux lignes hyperintenses dans la zone d'ablation, correspondant au trajet de l'applicateur (flèche)

Au cours des contrôles suivants, une rétraction de la capsule hépatique peut être observée, à l'examen d'IRM, le signal de la zone d'ablation devient proche de celui du parenchyme hépatique sain.

Une progression de la maladie correspond à (Figure 18) :

- Des résidus de tumeur correspondant à des lésions excentriques irrégulières avec un aspect similaire à la lésion initiale.
- Une récurrence locale de la tumeur s'exprimant par l'apparition d'un foyer proche de la zone d'ablation après au moins un contrôle satisfaisant. Le meilleur contrôle est l'IRM, montrant des formes nodulaires, annulaires ou expansives.
- L'implantation nodulaire le long du passage de l'applicateur.

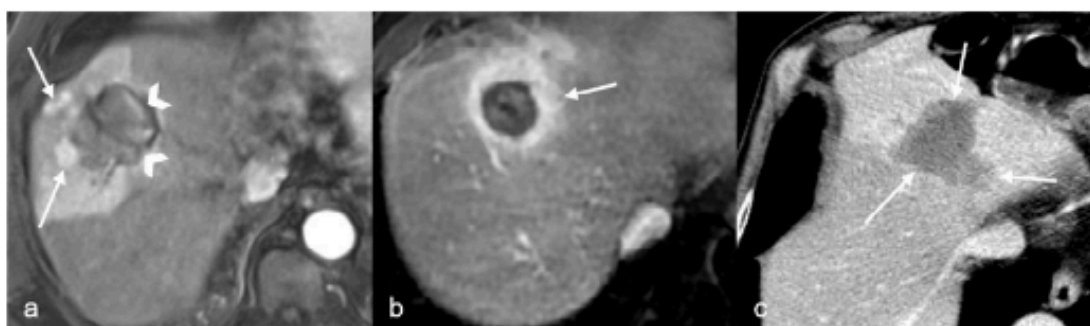


Figure 18 : Illustration des trois principaux modèles de progression tumorale locale (Bréhier et al., 2021)  
(a) Nodulaire (b) Annulaire (c) Expansif (Bréhier et al., 2021)

### **2.1.5. Résultats**

Les données disponibles entourant la prise en charge du CHC par RF sont bien plus importantes que celle disponibles pour les MO du fait de son apparition comparativement plus ancienne dans les méthodes d'ablation tumorale. La plupart des études comparant les deux procédés ne mettent pas en évidence de différence d'efficacité entre les deux (Tan *et al.*, 2019). Une étude met cependant en évidence une diminution du taux de récurrence locale lors de la prise en charge de tumeurs de gros volume par MO en comparaison à la RF. (Facciorusso *et al.*, 2016)

Les études actuelles s'intéressent à la comparaison entre résection chirurgicale et la RF dans la prise en charge de CHC petits et uniques et montrent des taux d'efficacité et de survie comparable. Du fait de la prise en charge moins invasive et de la morbidité significativement inférieure, la thermoablation apparaît donc comme une approche de choix. (Vogel *et al.*, 2018)

Actuellement, la RF et les résections répétées sont considérées comme les meilleurs choix dans la prise en charge des CHC récurrents post-hépatomie. Une étude comparant les résultats obtenus pour la RF et les résections répétées, a mis en évidence à 5 ans des taux de survie globale (55,6% versus 38,1% respectivement) et des taux de survie sans progression (14,6 versus 19,2% respectivement) comparables. Les taux de complications étaient cependant significativement supérieurs lors de résections récurrentes. (Gao *et al.*, 2023)

## **2.2. Particularités des techniques en clinique en fonction de la localisation tumorale.**

Le domaine de l'ablation tumorale est en expansion constante. Indépendamment de la prise en charge des CHC précédemment décrite, il existe un grand nombre de localisations dans lesquelles la RF et les MO sont utilisées, les plus communes étant le foie (hors lésion de CHC), les poumons et les reins. D'autres localisations en cours de développement sont abordées ici telles que le sein, les os, la thyroïde. Enfin, certaines nouvelles localisations émergent mais ne seront pas abordées ci-dessous telles que la prostate, le pancréas, les surrénales et l'utérus.

### **2.2.1. Tissu hépatique : métastases**

Les métastases hépatiques les plus étudiées dans le domaine de la RF à ce jour sont celles du cancer colorectal, dont 55% possèdent des métastases hépatiques. Une seconde néoplasie possédant des métastases hépatiques communes sont les cancers du sein, ainsi que les cancers pancréatiques et les cancers ovariens. La résection est actuellement la prise en charge de première intention avec un taux de survie à 5 ans de 31 à 60%, cependant, seulement 20 % des patients sont éligibles à cette prise en charge. (Odet *et al.*, 2023)

Les modalités de prise en charge sont similaires à celles du CHC. En termes de technique d'utilisation, une marge de 1 cm sera préférée, d'autant plus pour les métastases kystiques.

- Résultats

Pour les MO, la littérature rapporte des taux de survie à 1, 3, et 5 ans de 40-98%, 40-78% et 20-55% respectivement. Le temps de survie médian varie entre 20 et 55 mois selon les études avec des récives locales entre 2 et 25 %. (Finotti *et al.*, 2022)

Une étude comparative des deux méthodes d'ablation n'a pas mis en évidence de différence significative de la médiane de survie, de l'efficacité ou du taux de récurrence. Une augmentation significative du taux de complication biliaires lors de l'utilisation de MO (57,1%) comparée à la RF (3,2%) lors de prises en charge péri-biliaires a été mis en évidence. (Finotti *et al.*, 2022)

Autrefois situé entre 31 et 60%, le taux de récurrence après une prise en charge par thermoablation se situe maintenant entre 4 et 48%. Les taux de survie globale sont similaires à ceux observés par prise en charge chirurgicale lors du traitement de lésions de moins de 3 cm. Le taux de complications est significativement moins important. (Odet *et al.*, 2023)

De plus, la prise en charge par thermoablation permet de préserver une partie importante du parenchyme hépatique sain, permettant la réalisation d'ablations répétées. (Odet *et al.*, 2023)

### **2.2.2. Tissu pulmonaire**

Le cancer du poumon est le cancer le plus diagnostiqué et le plus mortel dans les pays occidentaux. La chirurgie reste le traitement de choix, mais actuellement, la radiothérapie externe est considérée comme le traitement de première intention pour les personnes inopérables. (Mellot *et al.*, 2011 ; Vogl *et al.*, 2017) L'épargne du parenchyme pulmonaire au cours des thermoablation permet des ablations successives sans risque pour la fonction respiratoire. (Palussière *et al.*, 2017)

- Indications

Un traitement curatif par ablation tumorale est envisageable pour les tumeurs primaires de diamètre inférieur à 3 cm, sans nodules ou métastases secondaires, chez des patients non-candidats/refusant la chirurgie ou possédant une lésion unique récurrente d'un traitement par thermoablation antécédent. Il est également envisageable pour les métastases pulmonaires dont la tumeur primaire est efficacement prise en charge si le nombre de masses est inférieur ou égal à 3, réparties unilatéralement et faisant toutes moins de 3 cm ou pour une masse unique de moins de 5 cm. (Ye *et al.*, 2015) Une prise en charge palliative est envisageable afin de diminuer la charge tumorale et améliorer la qualité de vie pour des tumeurs de plus de 5 cm de large. (Ye *et al.*, 2015)

- Contre-indications

La seule contre-indication absolue à l'utilisation des thermoablations est une coagulopathie ne répondant pas aux traitements médicaux. Les contre-indications relatives sont la présence d'un pacemaker et l'altération de la fonction respiratoire. Il est également contre-indiqué de réaliser une thermoablation sur des masses à moins de 1 cm des grosses bronches, de la trachée ou de l'œsophage. (Jaffro et Collot, 2019 ; Mellot *et al.*, 2011)

- Préparation du patient

Les examens complémentaires nécessaires sont un hémogramme, une analyse urinaire, les temps de coagulation, l'évaluation de la fonction hépatique et rénale, la glycémie, les marqueurs tumoraux, un ECG, une échocardiographie et un examen de la fonction pulmonaire. (Ye *et al.*, 2015) L'imagerie pour préparer la procédure est un scanner ou une IRM.

- Déroulement de la procédure

Une sédation peut être suffisante pour la réalisation de la procédure puisque les interventions à distance de la plèvre sont peu douloureuses. L'AG présente plusieurs avantages tels que la diminution de la toux et la capacité de l'anesthésiste à induire une apnée de plus longue durée. Le guidage au cours de la procédure est le plus communément réalisé au scanner du fait de la mauvaise pénétration des ondes par échographie (Figure 19). L'applicateur doit être inséré en crânial de la côte, loin des vaisseaux de gros calibre, en évitant de traverser une scissure lobaire. (Vogl *et al.*, 2017 ; Ye *et al.*, 2015)

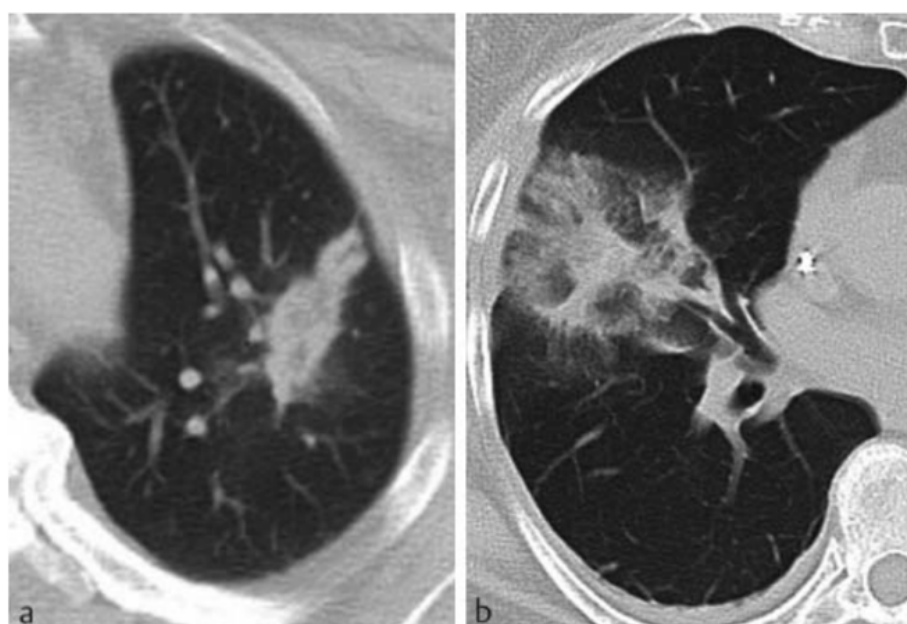


Figure 19 : Exemples de zones d'ablations créées par deux systèmes de RF  
A gauche : 915 MHz. A droite : 2450 MHz.

Après la procédure, une surveillance de 24 à 48 heures en hospitalisation est nécessaire. (Mellot *et al.*, 2011)

- Complications

L'apparition de complications peut être relativement fréquente (entre 10 à 30%) mais celles-ci sont bien tolérées par le patient. (Jaffro et Collot, 2019) Le risque de complication augmente avec une zone d'ablation large, un poumon emphysémateux et des antécédents de radiothérapie ou chimiothérapie. (Jaffro et Collot, 2019)

Le pneumothorax est la complication la plus fréquente avec une incidence variable de 10 à 60 % selon les études et seulement 10% d'entre eux nécessitent un drainage. (Jaffro et Collot, 2019) Les pneumothorax sont plus susceptibles de se produire lorsque le nombre de lésions augmente, si plusieurs trajets de sonde sont réalisés ou si celles-ci se trouvent dans un lobe pulmonaire inférieur.



A l'inverse, la présence d'adhérences causées par une intervention chirurgicale thoracique préalable permet de diminuer le risque de pneumothorax. Dans de rares cas, une fistule broncho-pleurale est possible et nécessite la mise en place d'un drainage prolongé ainsi qu'une embolie gazeuse, elle peut être responsable d'un pneumothorax retard. Un facteur favorisant est l'utilisation d'une ventilation avec pressions positives au cours de la procédure. Un pneumothorax ou un pneumomédiastin peuvent également être volontairement provoqués par le manipulateur afin de diminuer les frottements de la respiration et limiter les risques aux tissus à risque (Figure 20). (Mellot *et al.*, 2011 ; Palussière *et al.*, 2023)

L'épanchement pleural est également fréquent avec une incidence entre 1 et 60%, il est souvent limité et circonscrit, ne nécessitant un drainage que dans 1 à 7% des cas. Les facteurs favorisant l'apparition d'un épanchement pleural sont l'ablation de lésions larges, proches de la plèvre et un temps prolongé. (Ye *et al.*, 2015)

Des saignements peuvent apparaître dans 3 à 8 % des cas au cours de l'ablation et peuvent rarement être responsables d'une hémoptysie auto-résolutive dans la plupart des cas. (Ye *et al.*, 2015)

L'excitation du nerf vague présent dans la plèvre pariétale peut entraîner un ralentissement du rythme cardiaque, voire provoquer un arrêt cardiaque. Le cas échéant, l'ablation est suspendue, une anesthésie locale complète est réalisée ainsi qu'une réanimation cardio-pulmonaire si nécessaire. (Ye *et al.*, 2015) De même, une lésion du nerf phrénique en région paramédiastinale peut entraîner une paralysie du diaphragme.

Les infections du site d'ablation avec apparition d'un abcès pulmonaire sont possibles, avec une incidence de 1 à 6%. Une antibiothérapie prophylactique peut être mise en place. Les facteurs favorisant sont un diabète sucré, une tumeur supérieure à 4 cm ou une faible immunité. En cas d'hyperthermie (>38,5°) plus de 5 jours après ablation, une infection doit être suspectée. (Mellot *et al.*, 2011 ; Ye *et al.*, 2015)

La douleur et le syndrome post-ablation sont deux complications également présentes dans l'ablation tumorale pulmonaire. Des cas de douleur intense et prolongée ont été rapportés, la cause étant une fracture costale ou une névralgie. (Palussière *et al.*, 2017)

D'autres complications rares sont l'anévrisme artériel pulmonaire et l'embolie aérienne systémique. (Mellot *et al.*, 2011)

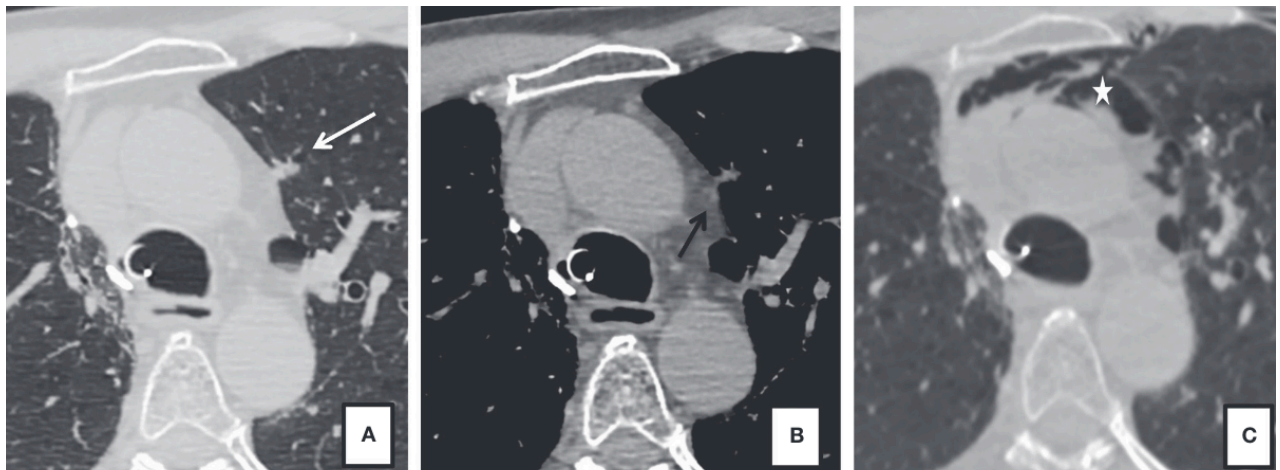


Figure 20 : *Illustration de l'utilisation du pneumo médiastin en RF (Jaffro et Collot, 2019)*  
*RF pulmonaire d'une lésion secondaire d'un adénocarcinome colo-rectal chez un patient à l'antécédent de lobectomie supérieure droite. a,b : examen scanner non injecté en fenêtre parenchymateuse (a) et fenêtre médiastinale (b) montrant une lésion cible infra-centimétrique lobaire supérieure gauche paramédiastinale (flèche blanche), au contact du nerf phrénique (flèche noire). Réalisation d'un pneumo médiastin (étoile) pour isoler le nerf phrénique et éviter la paralysie diaphragmatique.*

- Suivi

La surveillance après la procédure est réalisée par scanner avec produit de contraste et/ou un TEP scanner pour chercher un rehaussement ou un hypermétabolisme focal. La présence d'une lésion nodulaire proche ou dans la zone d'ablation au-delà de 6 mois de traitement sera considérée comme une récurrence locale (Jaffro et Collot, 2019)

- Résultats

- Carcinome bronchique non à petite cellules

Les études portés à ce jour ont montré des résultats comparables de la prise en charge par thermoablation et par radiothérapie stéréotaxique avec des survie globale respectives à 1, 2, 3 et 5 ans de 85,4 % *versus* 86,3 %, 65,2 % *versus* 64,5 %, 47,8 % *versus* 45,9 % et 24,6 % *versus* 26%. (Jaffro et Collot, 2019)

L'avantage théorique des MO dans la prise en charge de masses de plus gros volumes ne semble pas être reflété dans les résultats d'analyses avec des taux de récurrences à 1 an significativement supérieurs pour les masses de plus de 3 cm (31% *versus* 17%). L'ablation par MO semble cependant engendrer moins de douleurs après la procédure comparée à la RF. (Jaffro et Collot, 2019)

- Métastases pulmonaires

Les résultats actuels lors de prise en charge chirurgicale des métastases pulmonaires de cancer colorectaux rapportent un taux de survie globale de 32,4 % à 5 ans et de 45% si les métastases sont isolées. (Palussière *et al.*, 2017)

Pour la RF, les études rapportent une survie globale à 1, 3 et 5 ans respectivement de 84 à 95 %, de 35 à 72 % et de 20 à 54 % avec une progression locale après ablation entre 9 et 21 % selon les études. (Palussière *et al.*, 2017)

Des études ont montré des taux de survie globale comparables entre la RF et la chirurgie (respectivement 46 et 56 % à 3 ans) mais semblent contenir un nombre important de biais. (Palussière *et al.*, 2017)

Les taux de survie lors d'associations entre la RF et la chimiothérapie étaient significativement supérieurs à la chimiothérapie seule (87,5% *versus* 33,3%). (Palussière *et al.*, 2017)

### 2.2.3. Tissu rénal

Les cancers rénaux représentent 3,5 % des tumeurs malignes. Le carcinome à cellules rénales (CCR) est le 3<sup>ème</sup> cancer le plus commun du tractus urinaire et le plus meurtrier des néoplasies génito-urinaires. La prise en charge de première intention reste la résection du fait du bon pronostic et de la médiane de survie à 5 ans de 95%. (Liang *et al.*, 2015)

- Indications

La thermoablation rénale concerne les patients non-candidats à la résection du fait de l'âge, de comorbidités, d'une fonction rénale diminuée ou d'un rein unique à la suite d'une néphrectomie antécédente. La procédure est à envisager sur des masses uniques de moins de 4 cm (moins de 3 cm préférentiellement) sans invasion du bassinet ou du calice rénal non attenant au tube digestif ou à l'uretère. L'absence de thrombus de la veine rénale ou de métastase extrarénales est nécessaire. (Liang *et al.*, 2015) Des indications ponctuelles peuvent être discutées telles que la prise en charge de lésions kystiques, de tumeurs bénignes, de tumeurs de plus de 4 cm, tumeurs sinusales, multiples (> 3) ou récidivantes après résection. (Bensalah *et al.*, 2018)

- Contre-indications

Les contre-indications pour une procédure rénale sont similaires à celles du CHC et incluent les conditions suivantes : insuffisance rénale (IR) avancée, coagulopathie grave ou augmentation de la fibrinolyse, ischémie cardiaque ou anomalies du myocarde, insuffisance pulmonaire sévère, inflammation ou infection sévère, malformation vasculaire rénale telle qu'un anévrisme de l'artère rénale, insuffisance cardiaque ou hépatique cliniquement significative, métastases extrarénales non limitées, et une espérance de vie inférieure à 6 à 12 mois. (Liang *et al.*, 2015)

- Préparation du patient

Les examens complémentaires de laboratoire et d'imagerie nécessaire sont similaires à ceux réalisés pour le CHC.

- Déroulement de la procédure

Il est recommandé de réaliser la procédure sous AG, mais elle peut également être sous sédation avec anesthésie locale et/ou un bloc paravertébral. (Bensalah *et al.*, 2018) Le guidage est communément réalisé par échographie et scanner. Le déroulement est similaire à celui exposé pour l'ablation de CHC, l'insertion de l'applicateur est réalisée le plus souvent en rétropéritonéale, mais peut être fait au travers de l'abdomen. (Liang *et al.*, 2015) Il est conseillé de mettre en place une sonde urinaire afin de mesurer la diurèse et de détecter toute hématurie. (Park *et al.*, 2021)

- Complications

Le taux de complications majeurs peut varier entre 0 et 13% selon les études.

La prévention des complications passe par l'hydrodissection des structures à risque (tube digestif) si la distance structure-zone d'ablation est inférieure à 0,5 cm. (Park *et al.*, 2021) Les principales complications sont l'abcès, l'hématome (Figure 21), la radiculopathie lombaire, l'infarctus du myocarde, l'épanchement pleural, l'insuffisance rénale, le pneumothorax, les brûlures cutanée, le rétrécissement du système collecteur ou de l'uretère, la fistule urinaire ou colique, la perforation involontaire d'un viscère creux et la réaction vagale. (Liang *et al.*, 2015)

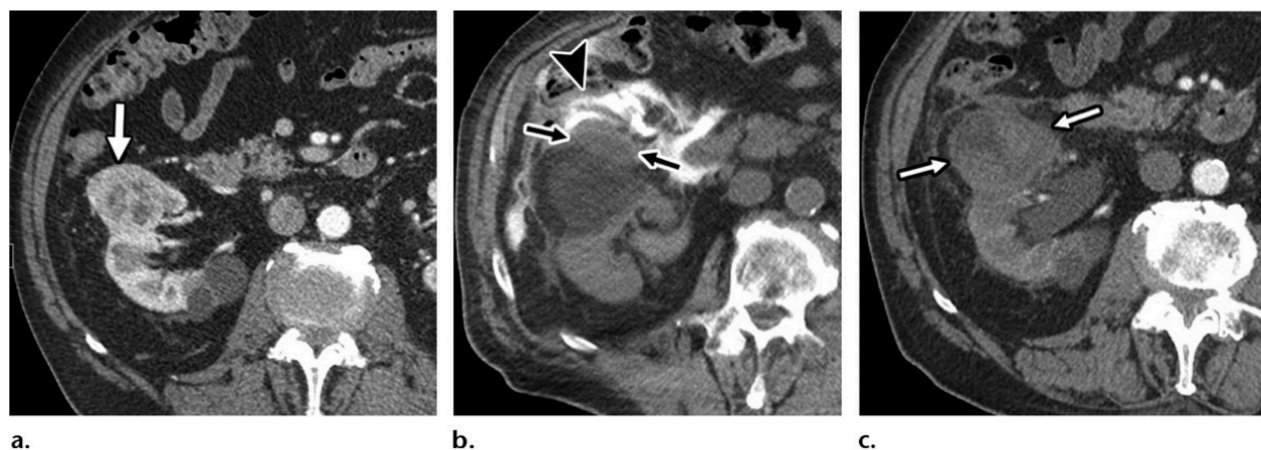


Figure 21 : Simple hématome post-ablation chez un patient présentant une hématurie persistante (Lum *et al.*, 2019)

(a) Coupe axiale de scanner en fenêtre cortico-médullaire avant ablation montrant une tumeur exophytique dans la zone antérieure du pôle inférieur du rein droit (flèche). (b) Coupe axiale de scanner sans produit de contraste immédiatement après ablation montrant un petit hématome dans les marges antérieures de la zone d'ablation (flèches). Du fluide mélangé à du produit de contraste ionisé est noté et correspond à l'hydrodissection pour protéger le colon ascendant (tête de flèche). (c) Coupe axiale de scanner en fenêtre cortico-médullaire débutante montrant une expansion de l'hématome vu précédemment dans la zone d'ablation (flèche) (Lum *et al.*, 2019)

- Suivi

Le suivi après la procédure peut être réalisé par échographie, scanner ou IRM à des fréquences similaires à la prise en charge du CHC.

- Résultats

Le contrôle local lors d'ablation par RF est d'environ 91 à 100 % dans la prise en charge de CCR T1a avec des taux de survie globaux entre 72 et 97% selon les études. (Park *et al.*, 2021)

Une étude rétrospective n'a pas montré de différence significative entre le taux de survie par néphrectomie partielle et par RF, cependant la littérature actuelle montre également des taux de récurrence locales semblant légèrement supérieurs lors de thermoablations. (Bensalah *et al.*, 2018)

La force statistique entourant les MO ne permet pas de conclure actuellement sur leurs sécurité et efficacité à long terme, cependant les premiers résultats semblent comparables à la RF et à la néphrectomie partielle. (Park *et al.*, 2021)

#### **2.2.4. Tissu mammaire**

Le cancer du sein est le type de cancer le plus fréquemment diagnostiqué chez les femmes à l'échelle mondiale. Grâce aux avancées dans la recherche et l'imagerie médicale, la détection précoce s'est améliorée, et près de la moitié des tumeurs sont désormais détectées avec une taille inférieure à 2 cm. Le taux de survie à 5 ans est actuellement de 98 à 99 %. Il est cependant à noter que les prises en charges actuelles, et notamment le possible surtraitement des tumeurs mammaires, est de plus en plus soumis à discussion. (Kinoshita, 2016)

- Indications

Un traitement curatif du cancer du sein par thermoablation est essentiellement proposé aux patientes âgées dont les comorbidités empêchent la chirurgie. Il peut être envisagé si la chirurgie est jugée comme une approche trop invasive, si la tumeur est un second cancer, si c'est une récurrence après une chirurgie antérieure ou si un traitement conservatif est souhaité. Ce traitement peut être envisagé pour les masses de petites tailles (stade T0/T1 ou T2 < à 3 cm, et de préférence < 2cm) sans infiltration de la peau ou paroi thoracique (stade clinique N0). Un profil histologique et moléculaire doit être réalisé, la procédure est envisageable pour les carcinomes intra-canalaires invasif ou les carcinomes canalaire in situ. Un traitement palliatif est quant à lui envisagé pour les masses de gros volume (>4 cm). (Leylek *et al.*, 2013)

- Contre-indication

Il n'existe pas de contre-indications absolues, seulement des relatives. Elles sont similaires à celles vues précédemment (sepsis, coagulopathie, pacemaker...). Une attention particulière doit être portée sur une potentielle grossesse. (Kinoshita, 2016)

- Préparation du patient

L'imagerie utilisée pour préparer la procédure est une mammographie et une échographie. Si nécessaire un scanner ou une IRM peuvent être utilisés pour rechercher des métastases.

- Déroulement de la procédure

La procédure peut être réalisée sous sédation modérée et après injection sous cutanée de lidocaïne. Le guidage de la procédure est communément réalisé par échographie. Le guidage par IRM est intéressant mais connaît les mêmes difficultés que vues précédemment. En RF, une sonde simple à refroidissement interne est recommandée du fait que le déploiement de baleines est

complexe au sein du tissu mammaire. De plus, la composition grasseuse et vasculaire du tissu est très variable d'un individu à l'autre, pouvant jouer sur l'impédance et la conductivité tissulaire. Il est donc nécessaire de commencer la procédure à des puissance faibles et augmenter progressivement. (Leylek *et al.*, 2013) Un repos strict est nécessaire pendant 4 à 5 heures après la procédure, et une hospitalisation de 24 heure est parfois recommandée. (Kinoshita, 2016)

- Complications

Le taux de complication est situé entre 3 et 10% et ne montre pas de différence significative entre les MO et la RF. (Kinoshita, 2016)

Les brûlures cutanées sont la complication la plus fréquente avec une incidence entre 7 et 33 %, avec une incidence de brûlures graves entre 4 et 5 %. (Leylek *et al.*, 2013) La prévention des brûlures passe par une hydrodissection (20 à 40 ml de glucose 5 %) de la zone à risque et le placement de sonde thermocouples afin de suivre la température. Des poches de glaces sont appliquées sur la zone d'ablation pendant et après la procédure.

D'autres complications rares sont l'abcès mammaire, le pneumothorax (mauvais placement de l'applicateur) et une mastite granulomateuse chronique. (Kinoshita, 2016 ; Leylek *et al.*, 2013)

- Suivi

Des contrôles échographiques sont réalisés tous les 3 mois puis tous les 6 mois pendant 5 ans. Un contrôle IRM est conseillé tous les 6 mois pendant 3 ans puis tous les 12 mois pendant 5 ans (Figure 22). (Kinoshita, 2016)

- Résultats

Les études actuelles ne permettent pas de conclure à une différence significative entre l'utilisation de la RF et des MO avec un succès technique respectifs de 96 *versus* 93% et une efficacité respective de 82 *versus* 90 %. (Mauri *et al.*, 2017)

Une étude portant sur la prise en charge des tumeurs de moins de 2 cm a montré une absence de différences significative entre la RF et les MO et une nécessité de réintervention d'environ 14%, ce qui est compris dans l'intervalle de reprise chirurgicale nécessaire lors de résection (entre 11 et 28%). (van de Voort *et al.*, 2021)

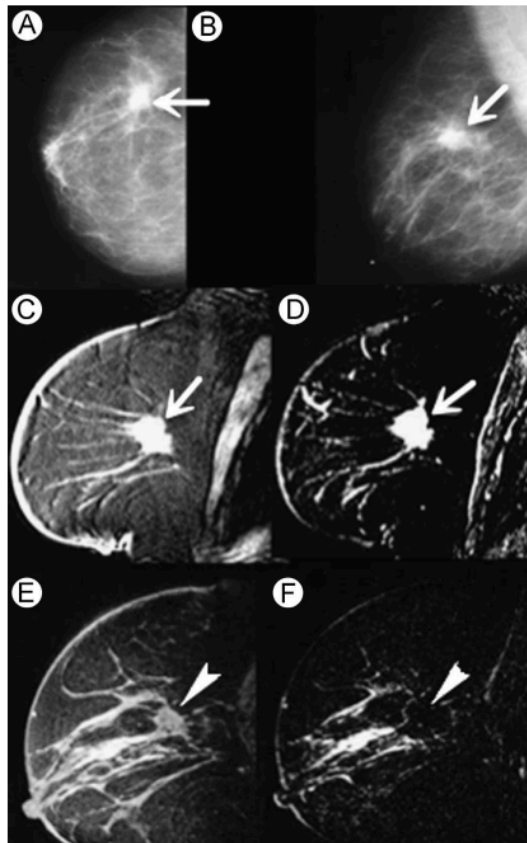


Figure 22 : Prise en charge d'un carcinome canalaire invasif par RF (Leylek et al., 2013)  
Mammographie A et B : avant intervention, et IRM C et D : immédiatement après intervention, E et F : 2 semaines après intervention d'un carcinome canalaire invasif (zone fléchée). L'absence de rehaussement 2 semaines après intervention confirme l'absence de résidu tumoral.

### 2.2.5. Tissu osseux

La néoplasie osseuse bénigne la plus commune en humaine est l'ostéome ostéoïde. Les os sont le troisième site de métastases les plus fréquentes après les poumons et le foie. Le cancer peut être originaire du tissu mammaire, de la thyroïde ou des poumons. La prise en charge de tumeurs primaires osseuses par thermoablation n'est actuellement pas décrite dans la littérature se référant à la médecine humaine.

Actuellement, la radiothérapie externe est le traitement de choix dans la prise en charge de la douleur de certaines tumeurs osseuses mais connaît certains inconvénients tels que le temps d'action retardé avant diminution (soulagement partiel pour 90% des patients et complet dans 54% des cas) et le taux de récurrence de la douleur supérieur à 50% en 1 an. (David *et al.*, 2017 ; Moser *et al.*, 2008)

- Indications

Le traitement curatif par thermoablation est envisageable pour certaines tumeurs bénignes tel que l'ostéome ostéoïde, l'ostéoblastome, le granulome éosinophilique, le chondroblastome et le kyste osseux anévrisimal. Pour les tumeurs malignes, le traitement est à envisager pour des masses de moins de 3 cm, à croissance lente chez des patients non-candidats à la chirurgie. Le traitement

des métastases osseuses est envisageable pour les maladies oligométastatiques avec 3 à 5 lésions de moins de 3 cm.

Un traitement palliatif est envisagé pour des patients dont la douleur est supérieure à 4/10 ou dont le risque de fracture est important et permet de limiter l'infiltration de tissus proximaux à risque. (David *et al.*, 2017)

L'ablation par RF est indiquée plus particulièrement pour les lésions ostéolytiques ou ostéolytiques-ostéoblastique avec un petit voire pas de composé extra-osseux. Les MO, moins affectés par l'impédance, la conductivité et la vascularisation, conviennent mieux aux lésions sclérotiques et kystiques. (Ryan *et al.*, 2022)

- Contre-indications

Les contre indications absolues sont les coagulopathies incorrigibles, les risques anesthésiques importants, un accès impossible, les patients immunodéprimés les infections osseuses ou les septicémies. (Moynagh *et al.*, 2018 ; Ryan *et al.*, 2022) Les contre-indications relatives sont des lésions larges, à proximité de structures à risque et des fractures instables ou une compression épidurale métastatique de la moelle épinière.

- Préparation du patient

L'imagerie pour préparer la procédure peut être un scanner avec produit de contraste, un PET scanner et/ou une IRM et ils peuvent être complémentaires. (Moynagh *et al.*, 2018)

- Déroulement de la procédure

La procédure doit être réalisée sous anesthésie générale car la nécrose du tissu osseux est très douloureuse. Le guidage peut être réalisé par fluoroscopie avec scanner à faisceau conique, par scanner ou par IRM, des combinaisons avec systèmes de navigations 3D ou fusion d'images sont disponibles (Figure 23). L'échographie peut également être utilisée si une portion ostéolytique proche de la surface est présente. (Ryan *et al.*, 2022)

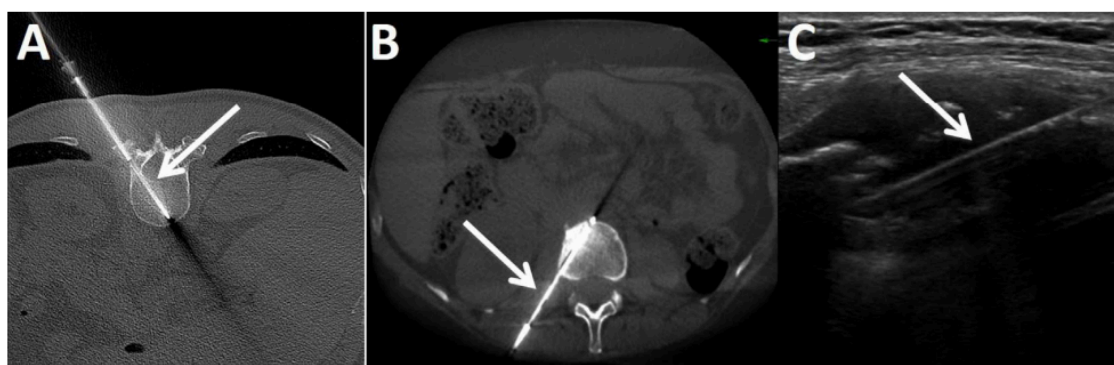


Figure 23 : Exemples de différentes techniques de guidage pour la prise en charge d'une tumeur osseuse  
(David *et al.*, 2017)

A : Scanner, B : IRM, C : échographie.



L'applicateur est inséré au travers d'un trocart de diamètre 11 ou 13G qui est ensuite reculé à 1 cm de la zone d'ablation. Les applicateurs communément utilisés sont à refroidissement interne, le déploiement des baleines est complexe au sein du tissu osseux. Dans la plupart des cas, une cimentoplastie est réalisée après ablation pour prévenir le risque de fracture secondaire (Figure 24) (David *et al.*, 2017 ; Ryan *et al.*, 2022) Les signes vitaux doivent être suivis pendant 2 heures après la procédure et une hospitalisation de 24 heures pour surveillance est nécessaire. Un traitement analgésique avec du paracétamol et des anti-inflammatoires peut être mis en place. (Ryan *et al.*, 2022)

- Complications

Les complications de la procédure sont liées à des lésions thermiques des structures fragiles avoisinantes. Les précautions à mettre en place sont l'insertion d'une sonde thermocouple afin de contrôler l'élévation de température, l'hydrodissection, l'insufflation de CO<sub>2</sub> ou l'interposition d'un ballon pour la protection des zones sensibles. (David *et al.*, 2017) Les complications majeures sont rares avec une incidence de 2,3 % en RF, la plus commune étant les fractures (1,8%). (Ryan *et al.*, 2022) D'autres complications rares sont les infections, les brûlures cutanées, les neuropathies sensorielles ou moteurs, l'arthrose et l'hématome. (Ryan *et al.*, 2022)

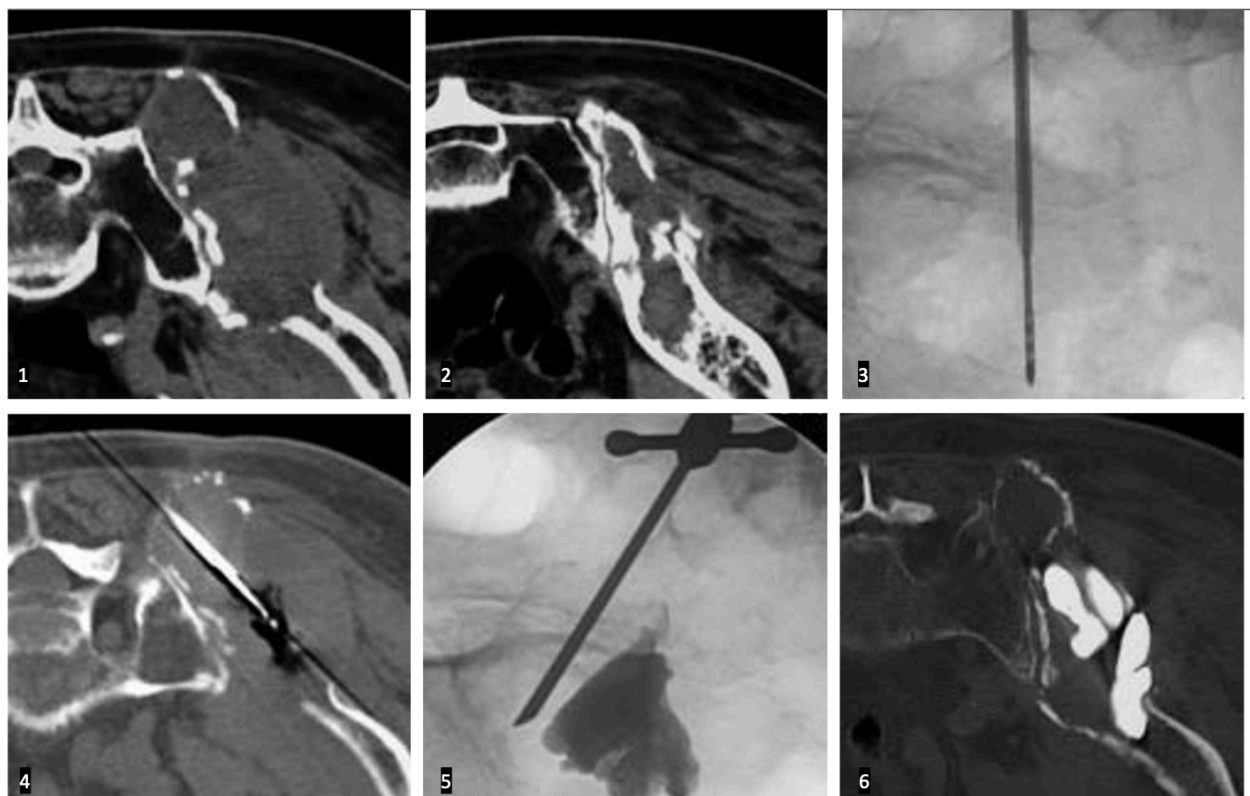


Figure 24 : Ablation par RF et cimentoplastie antalgique d'une localisation de myélome multiple de l'aile iliaque. (Moser *et al.*, 2008)

(1 et 2) Scanner de repérage montrant la lésion lytique de l'aile iliaque et la fracture pathologique. (3 et 4) Scanner et fluoroscopie de la mise en place de l'électrode de RF par le trocart de vertébroplastie et coagulation. (5) Avancée du trocart et injection du ciment visualisé par fluoroscopie. (6) Scanner de contrôle.

- Suivi

Le suivi peut être réalisé par des scanners, l'IRM sera préférée lors d'interventions à visée curative. Les images sont réalisées immédiatement, à 4h, 1 jour et 1 semaines afin de suivre l'apparition de potentielles complications. Le contrôle de l'évolution est fait à 1, 3, 6 et 12 mois puis tous les 6 mois. (Ryan *et al.*, 2022)

- Résultats

Pour la prise en charge de tumeurs bénignes d'ostéomes ostéoïdes, le taux de réussite est de 91,9 à 96,9 % pour la RF avec des résultats comparable pour les MO. (Ryan *et al.*, 2022)

La prise en charge curative des lésions malignes connaît un taux de survie à 1 an d'environ 67% pour les maladies oligométastatiques lors d'utilisation de la RF, il n'existe actuellement pas de résultats comparatifs pour les MO. (Ryan *et al.*, 2022)

Dans la prise en charge palliative la littérature montre une réduction significative de la douleur de 3 points dans 40% des cas après une semaine et dans 55% après 3 semaines en RF et une diminution moyenne de 5,3 points sur 10 à 1 mois lors d'utilisation des MO. (Ryan *et al.*, 2022 ; Vieillard *et al.*, 2008)

## 2.2.6. Thyroïde

Les thermoablations sont des techniques utilisées et reconnues comme sécuritaire dans la prise en charge des nodules thyroïdiens bénins et les cancers thyroïdiens récurrents. Les recherches actuelles s'intéressent à la RF dans l'ablation de micro-carcinomes primaires thyroïdiens.

- Indications

Un traitement par thermoablation des nodules thyroïdiens bénin est envisageable lorsque le patient refuse la prise en charge chirurgicale ou souhaite une prise en charge mini-invasive d'un nodule sécrétant causant une hyperthyroïdie, entraînant une gêne physique et/ou esthétique, récurrent après une première prise en charge chirurgicale ou dont la taille a significativement augmenté. L'aspect échographique et les résultats d'anatomopathologie doivent être en faveur d'un nodule thyroïdien et le patient ne doit pas avoir été exposé à de la radiothérapie au cours de l'enfance. Le traitement curatif est envisageable pour moins de 3 lésions de moins de 1,5 à 2 cm. Un traitement palliatif est également envisageable. (Xu *et al.*, 2020)

La prise en charge du micro-carcinome papillaire thyroïdien n'est jamais une première intention du fait du peu de preuve scientifique en faveur de son efficacité. Le traitement peut être envisagé pour les patients refusant la chirurgie, dont le sous type à haut-risque est non pathologique, dont le diamètre de la lésion est inférieur à 5 mm (ou 1 cm si éloigné de la capsule) à une distance de la capsule médiane postérieure de plus de 2 mm. La localisation ne doit pas être dans l'isthme, aucune métastase ni infiltration de la capsule ou des tissus environnants n'est présente. Aucune prédisposition aux cancers thyroïdiens ne doit être rapportée ni aucune exposition aux radiations cervicales au cours de l'enfance. (Xu *et al.*, 2020)

- Contre-indications

Les contre-indications absolues de la thermoablation sont la présence de métastases dans la région cervicale ou à distance, une augmentation progressive de la taille en peu de temps (>3mm en 6 mois), un dysfonctionnement des cordes vocales controlatérale à la lésion, une coagulopathie sévère et une insuffisance fonctionnelle d'un organe. Le traitement n'est pas envisageable sur les tumeurs à haut risque pathologie. (Xu *et al.*, 2020) Une attention particulière doit être portée sur une potentielle grossesse afin de prévoir l'utilisation d'une électrode bipolaire en RF. (Orloff *et al.*, 2022)

- Préparation du patient

Les examens complémentaires sont similaires à ceux vu pour le CHC, mais doivent être complétés par une exploration de la fonction thyroïdienne (hormones thyroïdiennes et parathyroïdiennes, calcitonine...). Une laryngoscopie doit être réalisée ainsi qu'une évaluation de la fonction vocale. L'échographie est l'examen d'imagerie le plus réalisé mais peut être complétée par un scanner ou une IRM.

- Déroulement de la procédure

La procédure peut être réalisée sous anesthésie locale ou générale selon le patient. (Xu *et al.*, 2020)

L'échographie est le guidage le plus utilisé au cours de la procédure mais peut s'avérer complexe du fait de la formation du nuage hyperéchogène et des marges profondes mal définies pour les nodules de gros diamètre. Plusieurs approches sont possibles pour faciliter le guidage tel que l'utilisation des techniques de fusion échographie/scanner et échographie/IRM (peu disponible) ou le système de suivi virtuelle de l'aiguille. (Park *et al.*, 2017)

L'ablation doit être réalisée par applications de deux méthodes concomitantes largement validées par la communauté scientifique et publiées en 2012 dans le journal coréen de radiologie : la voie trans-isthmique et la technique « moving-shot » (Figure 25).

La voie trans-isthmique est une approche d'insertion de l'applicateur au travers de l'isthme dans une direction médio-latérale pour traiter les nodules de la glande thyroïdienne droite ou gauche. Cette approche permet une bonne visualisation du nodule, de l'applicateur et du nerf laryngé récurrent. Elle permet également de limiter les fuites de fluides d'ablation au travers du parenchyme thyroïdien sain et de garder l'applicateur stable même lors de mouvements du patient.

La méthode habituelle d'ablation par RF avec un applicateur fixe n'est pas compatible avec le retrait de nodules thyroïdiens car ces derniers sont souvent ellipsoïdes et de nombreuses structures à risque entourent la zone d'ablation. La technique « moving-shot » a pour principe de n'utiliser que le réchauffement actif de quelques millimètres entourant l'embout actif de l'électrode et de réaliser de multiples ablations en commençant au plus profond pour garder la zone d'ablation visualisable. Cela permet de protéger la zone de « triangle de danger » avec les structures les plus à risque (Figure 25). (Park *et al.*, 2017)

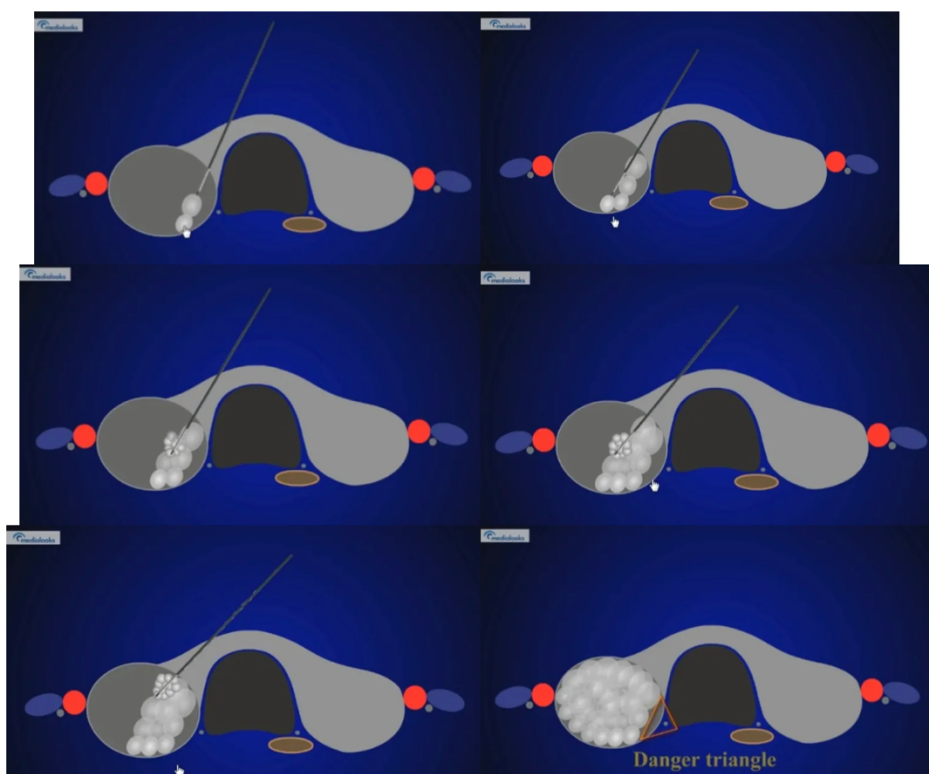


Figure 25 : Schéma de la technique « moving-shot » par voie trans-isthmique (Sharara, 2021)  
L'électrode est insérée au travers de l'isthme et de multiples ablations millimétriques successives sont réalisées sur toute la tumeur.

Les applicateurs, notamment les électrodes de RF, sont particulièrement petits et fins (5 à 10 mm d'embout actif de 18 ou 19G). Les électrodes de RF sont classiquement monopolaires mais des recherches sont en cours en Asie et en Europe pour étudier l'utilisation d'électrode bipolaire, permettant de s'affranchir du risque pour les femmes enceintes ou les patients avec un pacemaker. (Orloff *et al.*, 2022 ; Park *et al.*, 2017)

Des techniques supplémentaires sont nécessaires avant de commencer la procédure. L'injection de lidocaïne sur le site de ponction et dans la capsule thyroïdienne permet de diminuer la douleur du patient. La technique d'ablation vasculaire de l'artère afférente ou de la veine marginale permet de s'affranchir des pertes thermiques associés à la vascularisation. L'hydrodissection des structures doit être réalisée par injection constante de glucose 5% au cours de la procédure du fait des pertes rapides du liquide au travers des muscles du cou. (Park *et al.*, 2017) De la glace est appliquée sur le cou après la procédure, un repos strict est nécessaire pendant 30 à 60 minutes.

- Complications

La première complication est un changement vocal avec une incidence entre 1 et 8 % selon les études. Le changement peut être transitoire ou permanent. (Xu *et al.*, 2020)

La deuxième complication la plus fréquente est la rupture du nodule thyroïdien. Les signes cliniques apparaissent 2 à 4 semaines après la procédure avec un gonflement et de la douleur. Une gestion conservatrice est généralement suffisante.

L'hémorragie au cours de la procédure est de faible incidence mais peut parfois entraîner des difficultés respiratoires nécessitant une intervention chirurgicale de décompression.

La douleur est généralement tolérable, mais si elle devient trop importante, il convient de rechercher la cause. Si nécessaire au cours de la procédure, l'ablation peut être arrêtée, l'anesthésie peut être augmentée ou un bloc du plexus cervical peut être réalisé.

Des lésions du nerf laryngé récurrent peuvent entraîner une paralysie des cordes vocales du côté affecté, avec une récupération en 3 à 6 mois. En cas de lésion bilatérale, cela peut entraîner des problèmes nerveux et respiratoires, avec une obstruction haute sévère nécessitant une trachéotomie d'urgence ou une intubation.

L'hypothyroïdie est une complication très rare de la thermoablation avec seulement un cas rapporté à ce jour.

- Suivi

L'imagerie réalisée correspond à des échographies avec utilisation de produit de contraste, et l'utilisation éventuelle du doppler couleur pour évaluer la vascularisation. Un suivi régulier est recommandé à des intervalles similaires à ceux du CHC (3, 6 et 12 mois). Des contrôles de la fonction thyroïdienne et des marqueurs tumoraux spécifiques sont effectués. L'involution maximale du nodule est généralement observée vers les 12 mois suivant la procédure. (Xu *et al.*, 2020)

- Résultats

La prise en charge des nodules bénins par RF montre une réduction du volume moyen de 64,5 % à 6 mois, de 76,9% à 12 mois et de 92,2 % à 36 mois. Le taux de complication est significativement plus bas lors d'utilisation de thermoablation comparé à la chirurgie. Dans 5 à 24 % des cas, les nodules traités regrossissent dans les 3 à 5 ans suivant la procédure et peuvent nécessiter une nouvelle prise en charge. (Xu *et al.*, 2020)

La prise en charge de nodules bénins sécrétants par RF donne des résultats moins prédictibles que l'utilisation d'iode radioactif avec une amélioration clinique dans 24 à 72% des cas selon les études. Le taux de complications est moins important lors d'utilisation de RF. (Xu *et al.*, 2020)

Les recherches sont encore en cours pour l'exploration des tumeurs malignes thyroïdiennes avec une efficacité tout de même démontrée dans la prise en charge de tumeurs récurrentes/résiduelles après une chirurgie. (Xu *et al.*, 2020)

Il existe actuellement peu de données et de recul à long terme sur l'utilisation des MO avec cependant des premiers résultats qui semblent inférieurs à la RF et à la chirurgie. (Orloff *et al.*, 2022)

Pour conclure, les informations synthétisées dans cette section sont récapitulées dans le tableau 3 ci-dessous. L'examen approfondi de l'utilisation de la RF et des MO en médecine humaine met en évidence un large éventail d'applications potentielles, en particulier pour les patients non-candidats à la chirurgie. Grâce à leur capacité d'intervention percutanée, les techniques de thermoablation sont considérées comme mini-invasives et évitent souvent l'anesthésie générale.

Bien que les données actuelles ne permettent pas de conclure de manière définitive à une supériorité entre les MO et les RF dans le traitement des tumeurs, les avantages préalablement énoncés des MO pourraient placer cette technologie en avant dans les prises en charge à venir. Cependant, une exploration plus approfondie à travers des études supplémentaires est essentielle pour mieux cerner ces nuances et orientations

	Hépatique	Pulmonaire		Rénale	Mammaire	Osseux	Thyroïde
Indications curatives	Masse unique $\varnothing < 5$ cm 3 masses $\varnothing \leq 3$ cm	Tumeur primitive : $\varnothing \leq 3$ cm Absence de métastases	Métastases : $\varnothing \leq 3$ cm < 3 masses Unilatérales	Masse unique $\varnothing \leq 4$ cm	$\varnothing \leq 3$ cm Stade T0/T1 ou T2, N0	Tumeurs bénignes Malignes : $\varnothing \leq 3$ cm Métastases : 3 à 5 masses, $\varnothing \leq 3$ cm	Tumeurs bénignes : $\varnothing \leq 2$ cm, < 3 masses Malignes : unique, $\varnothing \leq 1$ cm
Indications palliatives	$\varnothing \geq 5$ cm	$\varnothing \geq 5$ cm		Rare, $\varnothing > 4$ cm, multiples (> 3)	$\varnothing > 4$ cm	Douleur > 4/10, risque de fracture	/
Contre-indications absolue	IH, coagulopathie grave, haute charge tumorale, Inflammation grave	Coagulopathie grave Distance < 1cm aux grosses bronches, trachées, œsophage		IR, coagulopathie grave, inflammation, métastases, espérance de vie < 12 mois	/	Coagulopathies graves, risques anesthésiques graves, accès impossible, sepsis	Métastases, $\uparrow > 3$ mm en 6 mois, lésions cordes vocales, coagulopathie grave.
Contre-indications relative	Tissu à risque adjacent	Pacemaker Fonction respiratoire altérée		/	Sepsis, coagulopathie grave, pacemaker, grossesse	Structures à risque à proximité	Grossesse
Examens complémentaire <b>spécifiques</b> de laboratoire	Sérologie hépatite B et C, marqueurs tumoraux	ECG Échocardiographie Examen de la fonction pulmonaire		/	/	/	Exploration fonction thyroïdienne, laryngoscopie.
Imagerie préparatoire	Échographie, Scanner ou IRM	Scanner ou IRM		Échographie, Scanner, IRM	Mammographie, échographie +/- scanner et IRM	Scanner +/- PET scanner +/- IRM	Échographie +/- scanner +/- IRM
Anesthésie	Sédation ou AG	Sédation ou AG		AG	Sédation	AG	Sédation ou AG
Guidage	Échographie ou scanner	Scanner		Échographie ou scanner	Échographie	Fluoroscopie +/- scanner +/- IRM	Échographie OU fusion d'images
Applicateurs	/	Insertion en crânial de la côte Ne traverse pas de scissure interlobaire		Insertion rétropéritonéale	/	Insertion par un trocart	Voie transisthmique et technique « Moving-shot »
Surveillance	Repos strict 4 à 6h, ambulatoire ou 2 à 3 jours d'hospitalisations	Hospitalisation 24 à 48 h		Repos strict 4 à 6h, ambulatoire ou 2 à 3 jours d'hospitalisations	Repos strict 4 à 5h, ambulatoire ou hospitalisation 24 h	Repos strict 2h et hospitalisation 24h	Repos strict 30 min à 1 h
Complications <b>spécifiques</b>	Thrombose IH, abcès hépatique, lésions biliaires Perforation intestinale	Pneumothorax Épanchement pleural		Radiculopathie lombaire Rétrécissement système collecteur Fistule urinaire/colique	Brûlures cutanées graves.	Fracture Neuropathies sensorielles ou moteurs Arthrose	Changement vocal Rupture de nodule Lésions du nerf laryngé récurrent
Suivi	Scanner avec produit de contraste +/- IRM	Scanner avec produit de contraste TEP scanner		Échographie, scanner, IRM	Échographie et IRM	Scanner +/- IRM	Échographie

Tableau 3 : *Tableau récapitulatif des procédures de RF et de MO pour chaque localisation tumorale*

# 3. État des lieux et perspectives de l'utilisation de la radiofréquence et des micro-ondes en oncologie vétérinaire

---

L'ablation tumorale par RF ou par MO demeure relativement peu explorée en médecine vétérinaire, en comparaison avec leur utilisation en médecine humaine. Néanmoins, leur approche peu invasive en fait une piste prometteuse et justifie le développement de leur utilisation au sein de la pratique vétérinaire. Dans cette partie, nous allons discuter des articles publiés à ce jour en médecine vétérinaire afin d'établir les intérêts potentiels de ce domaine émergent.

## 3.1. Un domaine inspiré de la médecine humaine.

Comme évoqué précédemment, la thermoablation a fait son émergence en médecine humaine durant les années 90, engendrant une expansion significative du domaine de l'oncologie interventionnelle et améliorant ainsi les approches diagnostiques et thérapeutiques. En 2001, la RF a été appliquée pour la première fois dans la prise en charge de l'hyperparathyroïdie du chien (Pollard *et al.*, 2001). Les recherches sont alors restées limitées à ce domaine pendant plusieurs années, jusqu'en 2017, où les thermoablations par RF et par MO ont provoqué un réel engouement au sein de la communauté vétérinaire. Pour comparaison, avant 2017, 4 articles à visée purement vétérinaire avaient été publiés quand, depuis 2017, 16 articles afférents au monde vétérinaire ont été publiés.

L'une des observations que l'on peut faire sur l'apparition plus tardive de la thermoablation au sein de la pratique vétérinaire est qu'en 2017, les MO avaient déjà fait l'œuvre de nombreuses recherches en médecine humaine et leurs intérêts potentiels comparés à la RF avaient été exposés dans différents articles. Ce sont les avantages présentés dans la partie 1, c'est-à-dire notamment une température intra-tumorale et le volume d'ablation supérieure pour des temps d'application moins longs. Même si les résultats comparatifs des procédures présentés dans la partie 2 ne semblent pas montrer de supériorité en termes de temps de survie ou taux de récurrences, la diminution du temps anesthésique dans la prise en charge des animaux parfois peu stables est un intérêt non négligeable. De plus, les plaques de retour nécessaires à l'utilisation de la RF monopolaire sont plus à risque de créer des brûlures cutanées en médecine vétérinaire du fait du pelage des animaux et de la plus grande difficulté à appliquer l'électrode de retour. De ce fait, la littérature actuelle en médecine vétérinaire se concentre très largement autour de l'application de MO dans l'ablation de tumeurs plutôt que l'application de RF.

En plus de définir une base d'application au monde vétérinaire, la recherche humaine est parfois basée sur des modèles animaux. Il est possible de trouver des études expérimentales menées sur des modèles animaux canins, bovins et/ou porcins. Ces études permettent tout d'abord



de mieux comprendre les mécanismes biologiques, les effets thermiques et les réponses tissulaires liés à la thermoablation. Certaines des études menées à ce jour en médecine humaine se sont basées sur des modèles canins, permettant ainsi d'avoir des premiers résultats transposables à la médecine vétérinaire dans un contexte clinique. L'étude de Ahmed en 2004 par exemple, explore l'influence de l'environnement tissulaire sur la nécrose ischémique par RF de sarcomes implantés artificiellement en sous-cutané, pulmonaire et rénal sur des chiens. Cette étude a permis de montrer l'importance des paramètres de l'environnement qui font varier la taille de la zone d'ablation tels que la circulation sanguine mais aussi la conductivité du tissu. (Ahmed *et al.*, 2004) De même, l'étude de Ahmed et al. en 2002 explore l'influence de l'injection d'une solution saline au sein d'une tumeur avant ablation par RF sur le diamètre de nécrose. Il a ainsi été montré qu'une augmentation significative de la température d'ablation était observée après injection d'environ 6 ml d'une solution à 36% de NaCl permettant ainsi une augmentation du diamètre de la zone d'ablation. (Ahmed *et al.*, 2002)

De plus, les résultats obtenus dans les études à visée humaine peuvent tout de même servir de référence dans la planification et l'exécution des procédures et permettent parfois de déterminer la faisabilité de ces méthodes sur les animaux. Ainsi, l'étude de Ahmed et al de 2002 nous permet de savoir que le protocole de RF à une fréquence de 500 kHz appliqué pendant 5 minutes pour des températures au bout d'une électrode de 22 gauge de 90 °C entraîne des diamètres moyens de zone de coagulation de 13 ; 7,3 et 10,1 mm de diamètre pour le poumon, le rein et en sous-cutané respectivement.

## **3.2. État des lieux de l'utilisation de la radiofréquence et des micro-ondes en médecine vétérinaire à ce jour**

La littérature actuelle dans le domaine des animaux de compagnie se concentre essentiellement sur l'application de la thermoablation sur des chiens puisqu'une seule étude porte sur des chats. Certaines études ont exploré l'application de ces méthodes sur les chevaux mais ne seront pas évoquées ci-dessous. L'ensemble des cas cliniques évoqués ci-dessous sont détaillés dans l'annexe 1.

### **3.2.1. Utilisation sur des tumeurs hépatiques**

Les tumeurs hépatiques primaires sont rares, avec une incidence canine de 1,5 % et féline entre 1 et 2,9 %. Les métastases hépatiques sont 2,5 fois plus communes que les tumeurs primaires chez le chien mais plus rares chez le chat. La tumeur hépatique primitive la plus fréquente est le carcinome hépatocellulaire (CHC), il en existe 3 types morphologiques : massif, nodulaire et diffus. (Vail *et al.*, 2019)

Le pronostic des chiens ayant un CHC massif et pris en charge pas lobectomie est bon avec un taux de récurrence entre 0 et 13% et une médiane de survie entre 1460 et 1836 jours. A l'inverse, le pronostic lors de CHC nodulaire ou diffus est sombre du fait de l'implication de plusieurs lobes hépatiques, rendant la chirurgie impossible. (Vail *et al.*, 2019) Dans ces cas-là, les traitements secondaires actuels sont la radiothérapie, la chimio-embolisation ou la chimiothérapie. Cependant, les CHC semblent intrinsèquement résistants à l'effet cytotoxique de ces approches, ce qui justifie l'intérêt potentiel de la prise en charge par thermoablation. (Locatelli *et al.*, 2022)

L'hémangiosarcome est l'un des types de métastase hépatique couramment retrouvé en pratique vétérinaire. Le pronostic est sombre, par exemple, pour un hémangiosarcome splénique, la médiane de survie est entre 19 et 86 jours en l'absence de traitement et monte à 5 mois en associant une chirurgie et de la chimiothérapie. (Vail *et al.*, 2019)

Les résultats de l'étude à visée humaine, menée par Qiu-jie *et al.* en 2011 sur des chiens, ont révélé que la plage de température optimale pour l'ablation par MO d'une masse à proximité du tube digestif se situait entre 55 et 65°C. Cette plage de température a permis de générer une réponse inflammatoire dans la zone du foie, tout en engendrant seulement une inflammation mineure de la muqueuse du tube digestif. (Qiu-Jie *et al.*, 2011)

La littérature actuelle répertorie 11 cas d'ablation par MO sur des chiens, 7 sur des CHC et 4 sur des métastases. Les procédures ont été réalisées de manière percutanée, par coelioscopie ou par laparotomie (Locatelli *et al.*, 2022 ; Oramas *et al.*, 2019 ; Yang *et al.*, 2017)

Du fait du peu de cas réalisés à ce jour, il n'existe aucun consensus sur les modalités d'une procédure de thermoablation en médecine vétérinaire. L'intérêt potentiel d'une approche par coelioscopie ou laparotomie est une meilleure visualisation de la tumeur (figure 26) et permet ainsi de s'affranchir du guidage par imagerie, dont l'accès est plus limité en médecine vétérinaire. Lorsque la procédure est réalisée par laparoscopie, l'étude de Oramas en 2019 propose une approche permettant l'abord de tous les lobes hépatiques. L'animal doit être positionné en décubitus dorsal dans une auge en V associée à un Trendelenburg inversé de 15° avec une rotation latérale de 45° pour les lobes latéraux si nécessaire. (Oramas *et al.*, 2019)

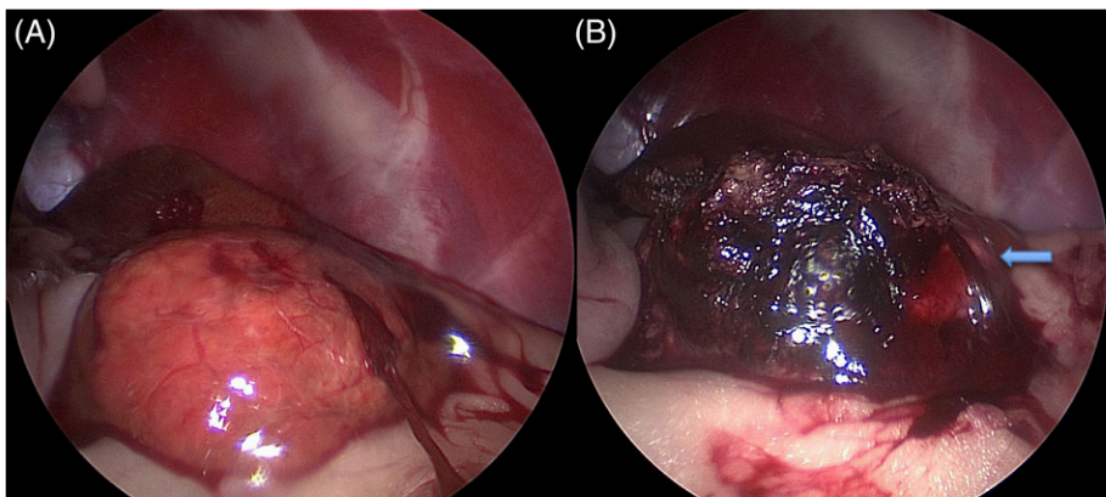


Figure 26 : Visualisation d'un CHC par laparoscopie avant (A) et après (B) ablation par MO (Oramas *et al.*, 2019)

*La flèche bleue correspond à une suspicion de zone d'ablation incomplète.*

Parmi les 7 cas de CHC pris en charge par MO, 12 ablations ont été réalisées sur des masses de 0,5 à 14 cm de diamètre. Le type de CHC n'est pas mentionné, deux des cas possèdent plusieurs nodules tumoraux (Annexe 1, Y1 et Y4), l'hypothèse d'un type nodulaire peut-être avancé.

Les protocoles variaient avec des puissances d'application entre 30 et 65 W pour des temps d'application entre 1,5 et 3,5 minutes, dépendant de la taille de la masse (Tableau 4). Les antennes utilisées étaient toutes d'un diamètre de 17G (Tableau 4). Aucun incident n'a été observé au cours des procédures, l'unique saignement spontané rapporté lors de l'insertion de l'antenne dans la masse s'est arrêté au cours de l'application des MO. Une réaction inflammatoire type stéatite est rapportée sur un cas 7 jours après intervention (Annexe 1, L4), nécessitant une hospitalisation de 24 heures.

Un seul cas rapporte une ablation incomplète observée par une persistance de tissu tumoral vascularisé au scanner (Annexe 1, O1). Une progression de la maladie 3 mois après intervention est mise en évidence (figure 26 et 27) mais cela n'a pas affecté la qualité de vie du chien, toujours vivant 20 mois après intervention avec une diminution des paramètres hépatiques associés. Un seul décès est rapporté par mort spontanée 133 jours suivant la procédure mais aucune causalité entre les deux ne peut être affirmée. La médiane de suivi pour le reste des cas est de 465 [240,25 ; 641,75] jours. (Locatelli *et al.*, 2022 ; Oramas *et al.*, 2019 ; Yang *et al.*, 2017)

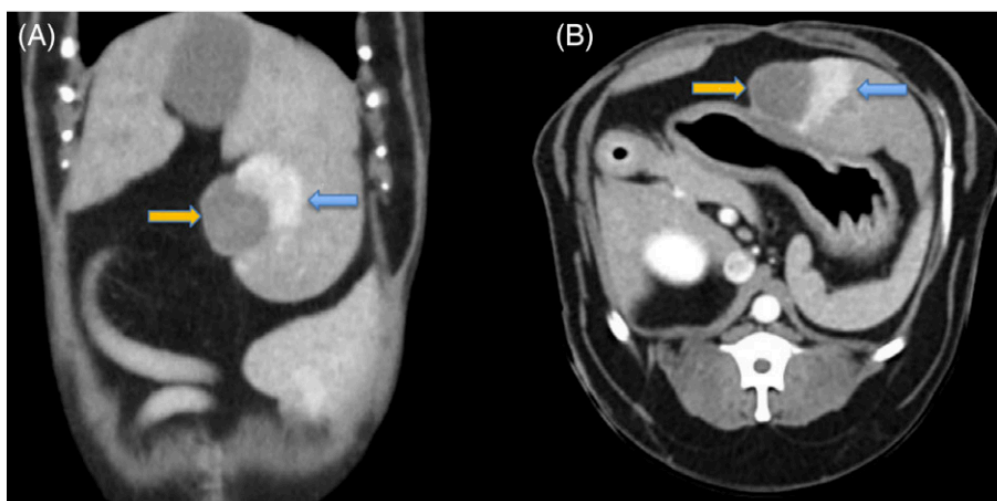


Figure 27 : Scanner avec produit de contraste en coupe frontale et transverse 3 mois après ablation d'un CHC par MO (Oramas *et al.*, 2019)

*La flèche orange correspond à la zone d'ablation tandis que la flèche bleue correspond à une zone de progression du CHC.*

Parmi les 4 cas d'ablation par MO sur des métastases hépatiques, 3 correspondaient à un hémangiosarcome et le 4<sup>ème</sup> à un adénocarcinome des glandes apocrines. Au total, 17 nodules de 0,5 à 2,5 cm de diamètre ont subi une thermoablation. Les puissances appliquées variaient entre 45 et 65 W pendant 2 à 4 minutes avec des sondes de 17G (Tableau 4). Aucun incident, ni aucune complication ne sont rapportés. Les cas d'hémangiosarcomes sont décédés 7 jours, 45 jours et 3 mois après intervention avec une amélioration significative de la qualité de vie pour chacun des cas. En plus de la diminution de la charge tumorale sur les hémangiosarcomes, la nécrose ischémique permet de réaliser l'hémostase des masses hémorragiques (Figure 28, annexe 1, Y3). Lorsqu'un suivi par imagerie a pu être réalisé (Annexe 1, Y1, Y3) une progression de la maladie est mise en

évidence avec apparitions de nouvelles métastases dans tous les cas. (Oramas *et al.*, 2019 ; Yang *et al.*, 2017)

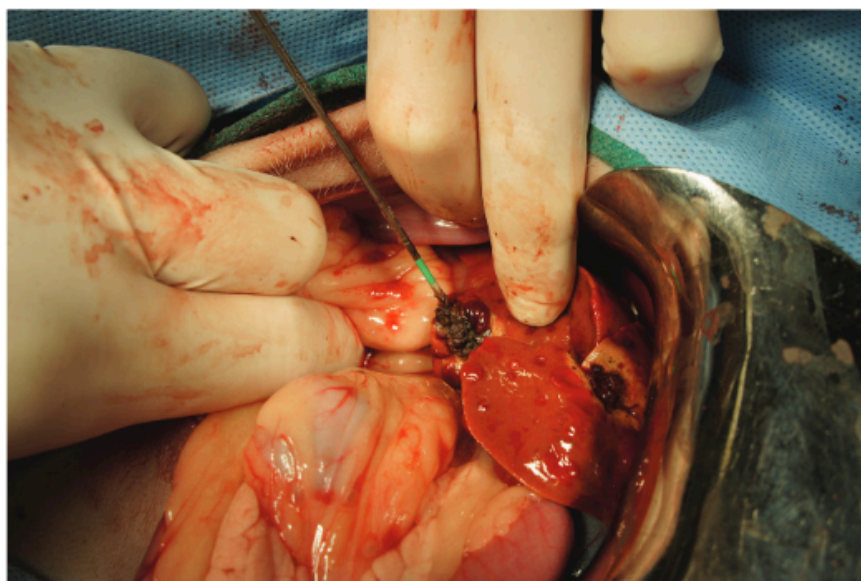


Figure 28 : Photographie d'une zone de nécrose ischémique autour d'une antenne de MO inséré par laparotomie sur une métastase d'hémangiosarcome (Yang *et al.*, 2017)

Article	Procédure	Modèle /fabricant	Type d'électrode	Temps d'application	Réglages	Méthode d'arrêt
(Locatelli <i>et al.</i> , 2022)	MO	TATO ND (Biomédical SRL)	17G	120 à 180 s	30-35 W	Zone « gazeuse à l'échographie »
(Oramas <i>et al.</i> , 2019)	MO	Certus 140 ND (NeuWave Medical)	17G	3 à 4 minutes	65 W	Non informé
(Yang <i>et al.</i> , 2017)	MO	Non informé	17G, 15 cm triaxiale	1,5 à 3 minutes	40-65 W	Sonde thermocouple : T° > 110-130° C

Tableau 4 : Bilan des informations sur les procédures d'ablations réalisées sur le foie

### 3.2.2. Utilisation sur des tumeurs pulmonaires

Les néoplasies pulmonaires primaires sont relativement rares chez le chien et le chat avec une incidence chez le chien de moins de 1%. Chez le chien, les tumeurs primaires sont à 85% des carcinomes broncho-alvéolaires. Chez le chat, l'adénocarcinome est la tumeur primaire la plus commune avec une prévalence de 60 à 70%. (Vail *et al.*, 2019)

Le traitement de choix est la chirurgie de lobectomie lorsque celle-ci est envisageable. La chimiothérapie est la prise en charge standard en humaine mais son efficacité est peu rapportée en médecine vétérinaire. (Vail *et al.*, 2019)

La littérature actuelle rapporte uniquement 3 cas vétérinaires de thermoablation par MO sur des tumeurs pulmonaires chez le chien. Ce sont toutes des métastases d'ostéosarcome prises en charge précédemment par amputation du membre affecté. (Dornbusch *et al.*, 2020 ; Mazzaccari *et al.*, 2017)

Les 3 ablations par MO ont été réalisées sur des masses de 2,5 ; 2,4 et 6 cm de diamètre par guidage vidéo sous thoracoscopie (Figure 29), échographique et scanner respectivement. Les protocoles utilisés variaient d'une puissance de 45 W à 90 W pendant un temps de 1,5 à 10 minutes, dépendant des indications données par le fabricant et la taille de la masse (Tableau 5). Les diamètres des antennes ne sont pas indiqués (Tableau 5) Les deux procédures percutanées rapportent l'apparition d'un pneumothorax avec l'un des deux nécessitant une thoracocentèse avec retrait de 600 ml d'air (Figure 30).

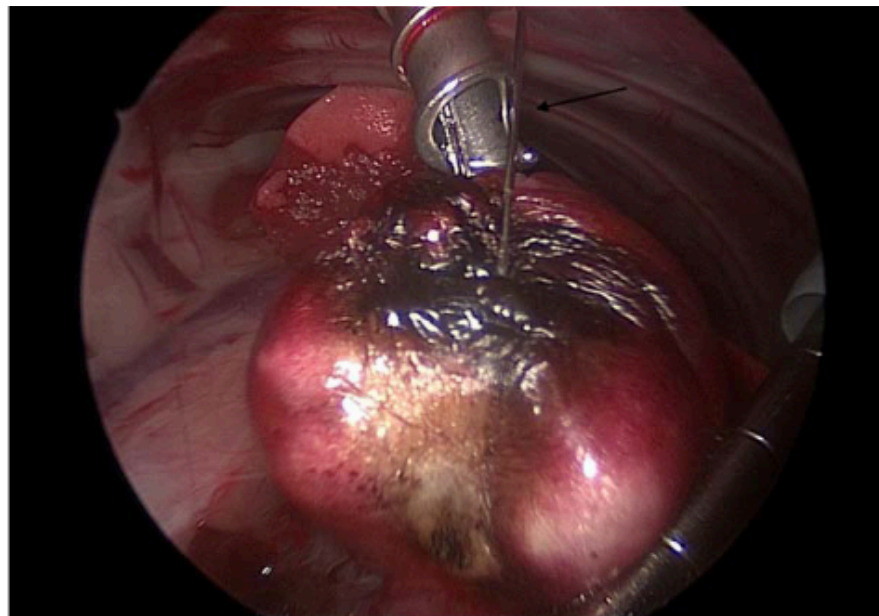


Figure 29 : Photographie per-opératoire d'une ablation d'une métastase pulmonaire d'ostéosarcome par MO sous thoracoscopie (Mazzaccari *et al.*, 2017)

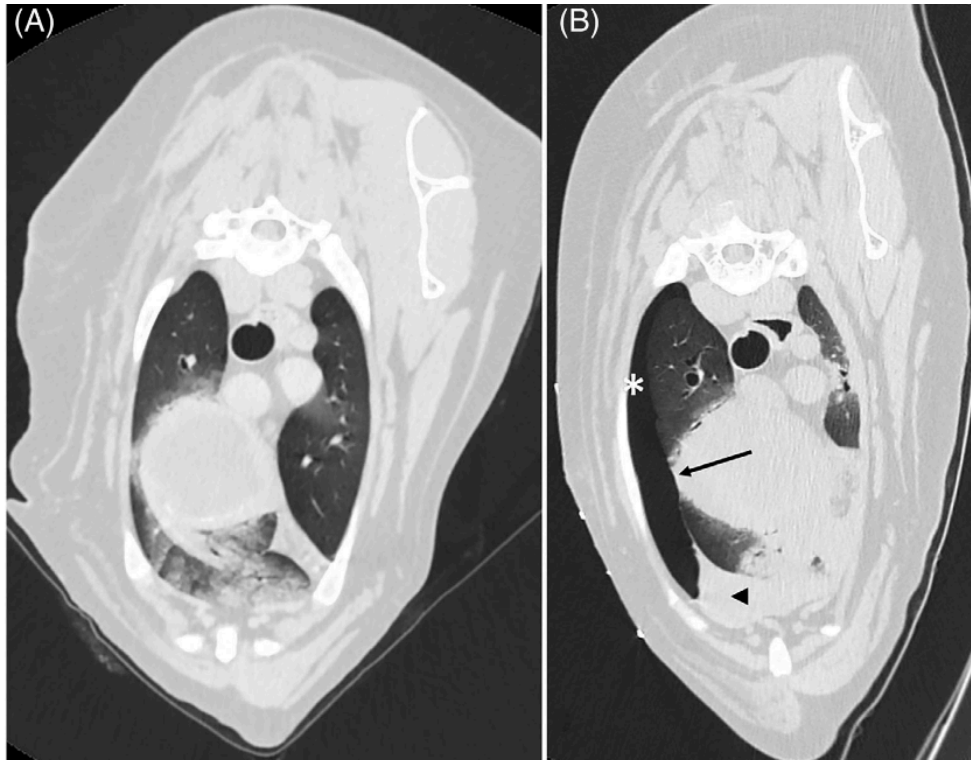


Figure 30 : Scanner en coupe transverse avant (A) et après (B) ablation d'une métastase pulmonaire d'ostéosarcome par MO (Dornbusch et al., 2020)

Image B : présence d'un liquide d'épanchement (pointe de flèche) compatible avec une légère hémorragie, la métastase pulmonaire est directement adjacente à la plèvre (flèche) et a du gaz libre dans l'espace pleural (astérisque) compatible avec un pneumothorax.

Aucune complication à moyen ou long terme n'est rapportée. Les temps de survie après ablation étaient respectivement de 136, 82 et 19 jours. Dans le premier cas, aucune imagerie post-procédure n'a été réalisée, la réussite de l'ablation et la progression de la maladie n'ont donc pas pu être mesurées. Dans le deuxième cas, une amélioration clinique est notée pendant 3 à 4 semaines avant dégradation, le scanner de contrôle 49 jours après la procédure a mis en évidence de nombreuses métastases pulmonaires et deux métastases osseuses. Dans le troisième cas, le contrôle radiographique à 15 a montré une augmentation de la taille de la masse pulmonaire traitée, une euthanasie a été décidée à 19 jours à la suite d'une paraparésie aigue. (Dornbusch *et al.*, 2020 ; Mazzaccari *et al.*, 2017)

Article	Procédure	Modèle /fabriquant	Type d'électrode	Temps d'application	Réglages	Méthode d'arrêt
(Dornbusch <i>et al.</i> , 2020)	MO	Emprint ND (Medtronic)	Refroidissement interne. Taille non informée	1,30 à 10 minutes	50 et 100 W	Protocole déterminé à partir de la notice du fabriquant
(Mazzaccari <i>et al.</i> , 2017)	MO	Certus 140 ND (NeuWave Medical)	Non informé	2 à 3 minutes	45 à 65 W	Visualisation de degré de carbonisation observée au sein de la tumeur

Tableau 5 : Bilan des informations sur les procédures d'ablations réalisées sur le poumon

### 3.2.3. Utilisation sur des tumeurs uro-génitales

Les deux organes étudiés actuellement pour un traitement par thermoablation au niveau de la sphère uro-génitale sont le rein et la prostate.

Les tumeurs rénales du chien les plus communes incluent le carcinome à cellules rénales, l'adénocarcinome, le carcinome urothélial invasif et le cystadénocarcinome papillaire. Chez le chat, en dehors du lymphome rénal, les tumeurs sont rares. La prise en charge de première intention est la néphrectomie unilatérale sauf pour le lymphome, pris en charge par chimiothérapie mais dont les résultats sont encore mal documentés. (Vail *et al.*, 2019)

Les tumeurs prostatiques sont relativement rares chez le chien avec une prévalence entre 0,2 et 0,6%. L'incidence des carcinomes prostatiques est faible mais n'empêche pas le chien d'être utilisé comme modèle de recherche dans les études humaines. Les options thérapeutiques actuelles comprennent la chirurgie de prostatectomie, la résection transurétrale électro-chirurgicale, la radiothérapie et la prise en charge médicale. (Vail *et al.*, 2019)

La littérature actuelle rapporte deux études de l'utilisation de thermoablations sur la sphère uro-génitale. L'une a été présentée par Culp en conférence en 2017 et décrit un cas de carcinome rénal et un cas de carcinome prostatique chez des chiens, seul le résumé de conférence est retrouvé, les informations sur ces deux cas sont donc minimales. La deuxième, également réalisée par Culp en 2021, rapporte deux cas de masses rénales, un carcinome et une d'origine non déterminée. (Culp *et al.*, 2021, 2017)

Dans l'étude de Culp *et al.* en 2017, le carcinome rénal de 1,4 cm de diamètre a été pris en charge par MO sous guidage échographique tandis que le carcinome prostatique de 1 cm de diamètre a été pris en charge par RF pendant une laparotomie à l'aide d'un guidage échographique (Figure 31). Les deux ablations ont été une réussite sans aucun incident ou complication et les deux chiens étaient en vie lors de la présentation orale de l'article, sans signe de récurrence. (24 et 1 mois après ablation respectivement). (Culp *et al.*, 2017)

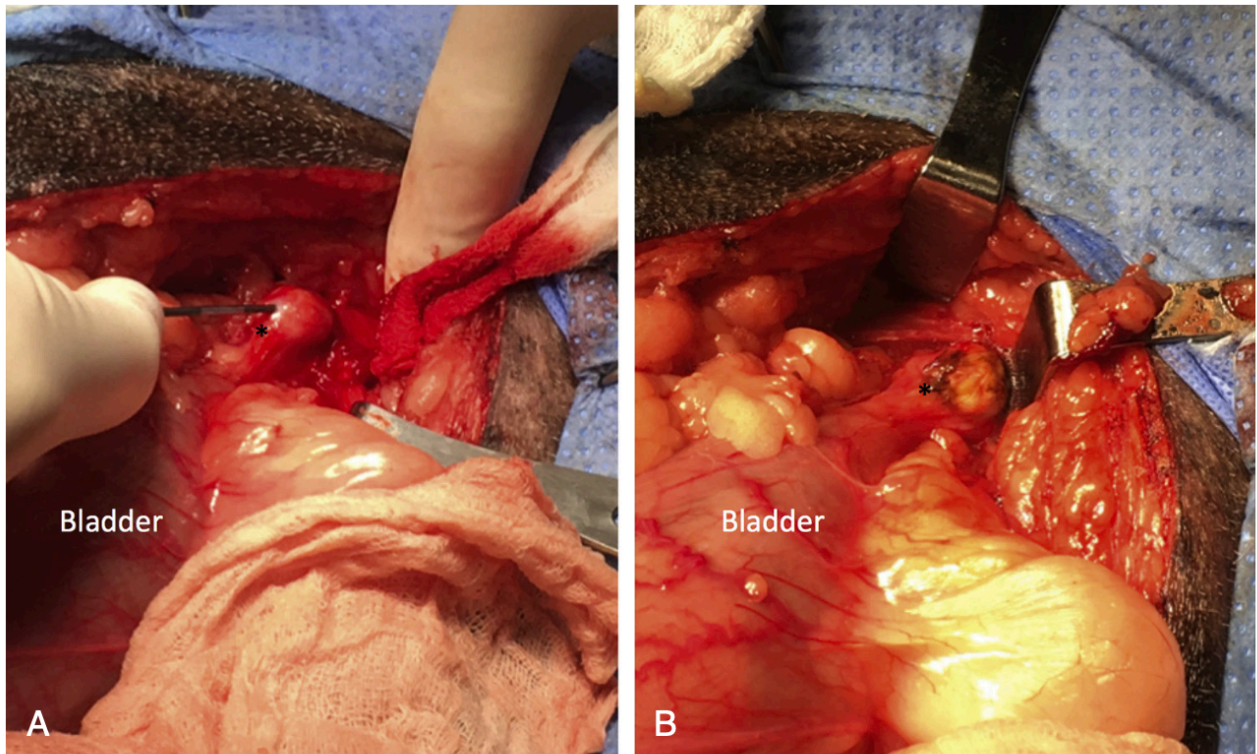


Figure 31 : Photographie per-opératoire avant (A) et après (B) ablation par MO d'un carcinome prostatique (Vail et al., 2019)

L'astérisque est situé sur le carcinome prostatique, un changement de la couleur du tissu délimite la zone d'ablation.

Dans l'étude de Culp et al en 2021, deux masses rénales ont été prises en charge par MO avec un guidage échographique et un contrôle scanner du placement de l'antenne. Les protocoles utilisés avaient une puissance de 45 W pendant 3 minutes pour le premier chien, et 3 zones d'ablation avec des puissances de 45,75 et 65 W pendant 3 minutes chacun pour le second chien (Tableau 6). Aucune complication n'est rapportée et les contrôles ont montré une ablation complète sans récurrence à 2 ans et à 3 mois respectivement.

Article	Procédure	Modèle /fabricant	Type d'électrode	Temps d'application	Réglages	Méthode d'arrêt
(Culp et al., 2021)	MO	Emprint ND (Medtronic)	Emprint ND (Medtronic) avec refroidissement interne	3 minutes	45 à 75 W	Visualisation des bulles de gaz à l'échographie et contrôle de la zone par scanner ensuite
(Culp et al., 2017)	MO et RF	Non informé	Non informé	Non informé	Non informé	Non informé

Tableau 6 : Bilan des informations sur les procédures d'ablations réalisées sur la sphère uro-génitale



### 3.2.4. Utilisation sur des tumeurs osseuses

L'ostéosarcome est la tumeur primaire la plus commune chez le chien avec une prévalence de 85%. La prise en charge standard consiste en une amputation du membre atteint lorsque cela est envisageable. L'option non chirurgicale est la radiothérapie, mais une prise en charge multimodale reste nécessaire afin de contrôler les métastases. Les autres tumeurs osseuses malignes possibles du chien sont le chondrosarcome, l'hémangiosarcome, le fibrosarcome, le chondrosarcome multi-lobulaire et les métastases osseuses. Les tumeurs primaires osseuses du chat sont rares. (Vail *et al.*, 2019)

L'établissement d'un traitement conservateur du membre en cas d'ostéosarcome est un réel enjeu vétérinaire, justifiant l'exploration de traitements autres que l'amputation. La littérature actuelle rapporte 3 études expérimentales précurseuses de la mise en place d'un protocole codifié d'ablation d'un ostéosarcome par thermoablation, aucun cas clinique n'est actuellement rapporté dans la littérature. (Finck *et al.*, 2017b ; Kalamaras *et al.*, 2020 ; Salyer *et al.*, 2020)

L'étude de Kalamaras *et al.* en 2020 a révélé que l'application de l'ablation par MO n'affectait pas les propriétés de flexion d'un os sain. Afin d'insérer l'antenne de MO, un tunnel a été créé à l'aide d'une broche Steinmann de 2 mm, à une profondeur de 6 cm sur la face dorsale de l'épiphyse distale. L'équipement utilisé était le système d'ablation Emprint ND. Le protocole d'ablation utilisait une puissance de 75W pendant 90 secondes sur 6 cm médiaux de 16 radius récupérés sur 8 cadavres (Tableau 7), les charges maximales et les déplacements étaient comparés à ceux des radius sains. Bien que cette étude ne porte que sur des os sains, les résultats sont encourageants quant à l'utilisation potentielle de l'ablation par MO comme option de traitement des ostéosarcomes des membres, sans augmenter le risque de fractures spontanées par la suite, contrairement à la radiothérapie. (Kalamaras *et al.*, 2020)

L'étude de Finck *et al.* présentée en conférence en 2017 a porté sur 11 fémurs, 11 tibias et 3 os ayant un ostéosarcome confirmé de chiens récupérés sur des cadavres. Le but était de développer un protocole pour l'ablation d'ostéosarcome par MO. Trois protocoles ont été explorés avec des puissances de 80, 80 et 120 pour des temps d'application respectifs de 30, 50 et 50 secondes (Tableau 7). Afin de pénétrer l'os et insérer l'antenne de MO, le cortex était percé perpendiculairement (os sains) ou obliquement (ostéosarcomes) au grand axe, un trocart de 14G a été introduit puis une antenne de 15G a été placée. La taille des zones d'ablation n'a pas pu être statistiquement comparée du fait d'une interaction à trois voies entre le type d'os, la localisation et le protocole d'ablation utilisé. Il a été montré que la taille des zones d'ablation était légèrement supérieure lorsqu'un ostéosarcome était présent comparé aux os sains. Ainsi, un protocole optimal n'a pu être mis en évidence, cependant, l'ablation d'un ostéosarcome s'est montrée réalisable par MO. (Finck *et al.*, 2017b)

L'étude de Salyer *et al.* en 2020 a porté sur six chiens atteints d'ostéosarcome du radius distal traités par ablation par MO puis amputés 48 heures plus tard pour une analyse histologique. La planification de la procédure a été réalisée à l'aide d'un logiciel de modélisation 3D intégré à l'équipement de Emprint ND utilisé (Figure 32). L'os est approché par la face dorsale ou médiale selon la modélisation précédente. Une broche Steinmann de 2 mm est insérée dans la zone distale de l'épiphyse en direction de la diaphyse proximale de la lésion et évitant le cartilage distal du radius. Le protocole d'ablation utilisait une puissance de 30 W pour deux chiens et de 75 W pour quatre

chiens, avec plusieurs applications de 1,30 minutes pour un temps moyen total d'application de 6 minutes et 45 secondes (Tableau 7). Le positionnement de la sonde était vérifié par fluoroscopie et une sonde thermocouple a été utilisée pour mesurer la température à la surface os-tissu mou (en moyenne 49,5 °C) (Figure 32). Entre trois et huit zones d'ablation ont été réalisées lors des procédures, dépendant de la taille de l'ostéosarcome. Aucun incident ni complication n'ont été rapportés. L'analyse histologique après l'amputation a révélé des pourcentages d'ablation, correspondant au pourcentage de tissu nécrotique sur l'ensemble de la lésion primaire, variable entre 30 % et 90 % (médiane de 55 %). Bien que ces pourcentages n'aient pas atteint 100 %, il est difficile de déterminer s'ils auraient augmenté avec un délai entre l'ablation et l'amputation prolongé. Il a d'ailleurs été montré que l'utilisation des MO sur les os entraîne une réponse immunitaire avec un effet antitumoral. Cette étude a donc montré la faisabilité de l'ablation par MO sur des ostéosarcomes sans endommager les tissus mous environnants. (Salyer *et al.*, 2020)

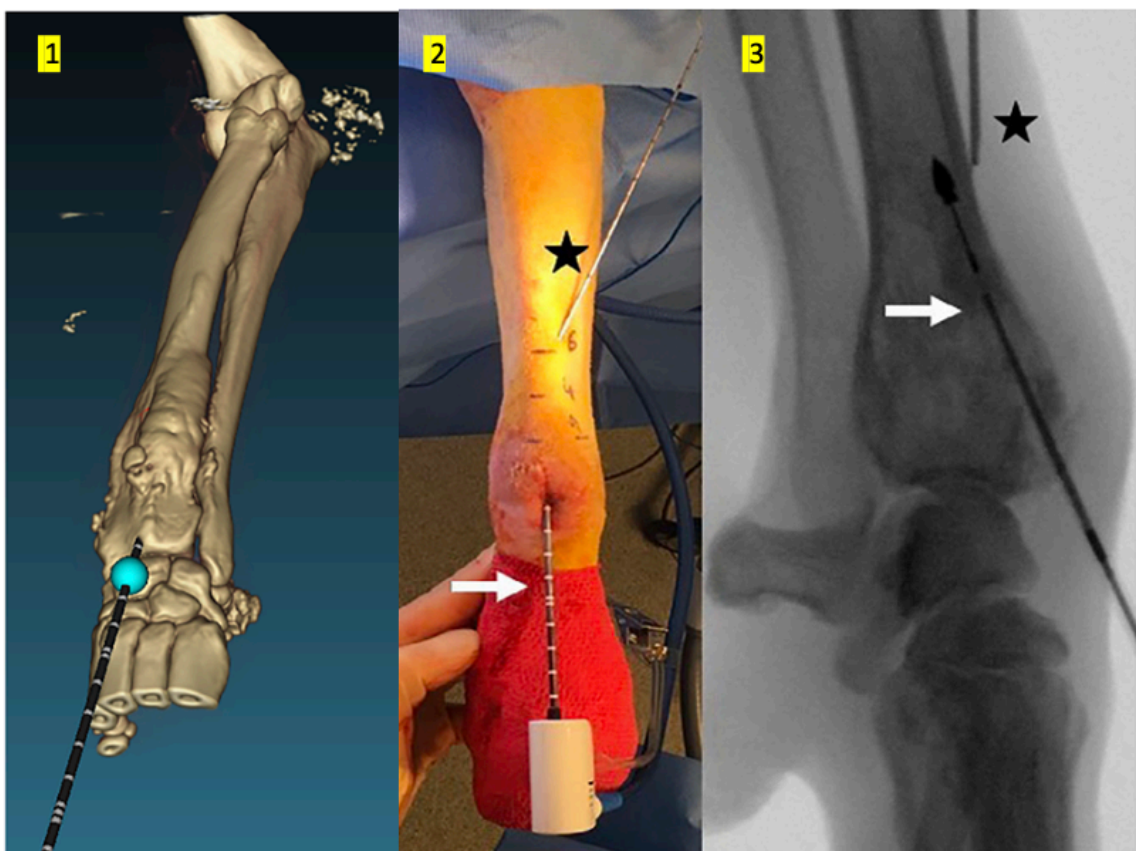


Figure 32 : Planification et réalisation d'une approche pour l'ablation d'un ostéosarcome par MO (Salyer *et al.*, 2020)

(1) Modélisation de l'approche par un logiciel de planification Emprint, (2) positionnement de l'antenne de MO (flèche) et de la sonde thermocouple (étoile) en peropératoire, (3) vérification du positionnement de la sonde par fluoroscopie.

Article	Procédure	Modèle/ fabriquant	Type d'électrode	Temps d'application	Réglages	Méthode d'arrêt
(Kalamaras <i>et al.</i> , 2020)	MO	Emprint ND (Medtronic)	Taille non informé	90 secondes	75W	Protocole prédéfini
(Salyer <i>et al.</i> , 2020)	MO	Emprint ND (Medtronic)	Emprint de 15 cm de long	Plusieurs applications de 1,30 minutes (total entre 4 et 21,6 minutes)	30 et 75W	Utilisation d'une sonde thermocouple pour contrôler température à l'interface os/ tissu mou
(Finck <i>et al.</i> , 2017b)	MO	Non informé	15G insérée dans un trocart de 14G	30 à 50 secondes	80 à 120 W	Protocole prédéfini

Tableau 7 : Bilan des informations sur les procédures d'ablations réalisées sur l'os

### 3.2.5. Utilisation sur d'autres tumeurs

- Tumeurs parathyroïdiennes :

Les tumeurs parathyroïdiennes sont peu communes chez le chien et rares chez le chat. Elles sont le plus souvent des adénomes sécréteurs qui entraînent une hypercalcémie par hyperparathyroïdie primaire. Dans 90% des cas, la tumeur est unique et la prise en charge la plus commune est une chirurgie d'excision de la glande concernée. (Vail *et al.*, 2019)

La faisabilité de l'ablation par RF dans un contexte d'hyperparathyroïdie primaire est établie depuis 2001 dans l'étude de Pollard *et al.*, réalisée sur 11 chiens. Depuis, plusieurs études sont retrouvées dans la littérature évaluant l'efficacité de ce traitement, ses risques et complications. Le protocole utilisé est similaire à la méthode décrite pour la thyroïde en humaine avec des temps d'application très courts pour limiter les séquelles aux tissus voisins. Un exemple de protocole utilisé est une puissance entre 10 et 20 W pour une durée entre 30 et 90 secondes jusqu'à apparition de bulles de gaz à l'échographie (Tableau 8). Le guidage est réalisé par échographie, permettant de placer l'électrode ainsi que d'évaluer l'avancée de la procédure avec l'apparition du nuage hyperéchogène décrit précédemment. (Pollard *et al.*, 2001)

Dans une étude rétrospective comparant les résultats de la parathyroïdectomie, de l'ablation par RF et de l'ablation par injection d'éthanol, aucune différence significative n'a été trouvée entre la chirurgie et la RF avec des pourcentages de contrôle de l'hypercalcémie de 94% et 90% pendant une médiane de 561 et 581 jours respectivement. Aucune différence significative n'a été trouvée entre l'ablation et l'éthanolisation. Cependant le faible nombre de cas dans le troisième groupe est considéré comme un biais important par les rédacteurs. (Rasor *et al.*, 2007) Les causes favorisant

l'échec du traitement par RF sont un nodule de grande taille (>0,35 m<sup>2</sup>) et une hypothyroïdie concomitante. De plus, les petits nodules (< 2-3 mm) ne sont pas de bons candidats à la RF du fait de la difficulté d'insertion de l'électrode. (Bucy *et al.*, 2017 ; Leal *et al.*, 2018)

La complication la plus fréquemment rapportée est l'hypocalcémie (nécessitant parfois une prise en charge médicale spécifique). Il convient cependant de noter qu'il ne s'agit pas d'une complication inhérente à la technique, mais à la prise en charge de l'hyperparathyroïdie primaire par ablation ou exérèse de la glande parathyroïde atteinte ; ainsi les taux d'hypocalcémie post traitement sont similaires entre la chirurgie et la RF. D'autres complications rapportées sont de la toux, un changement de l'aboïement, un syndrome de Claude Bernard Horner et une bronchopneumonie par fausse déglutition. Afin de prévenir les complications majeures, des précautions similaires à celles vues en humaine pour la thyroïde sont nécessaires (procédure unilatérale, examen clinique approfondi des cordes vocales etc..). (Leal *et al.*, 2018 ; Rasor *et al.*, 2007)

Article	Procédure	Modèle/fabriquant	Type d'électrode	Temps d'application	Réglages	Méthode d'arrêt
(Pollard <i>et al.</i> , 2001)	RF	Non informé	20 G	30 à 90 secondes	10 à 20 W	Visualisation de bulles de gaz à l'échographie

Tableau 8 : Bilan des informations sur les procédures d'ablations réalisées sur la parathyroïde

- Tumeurs thyroïdiennes

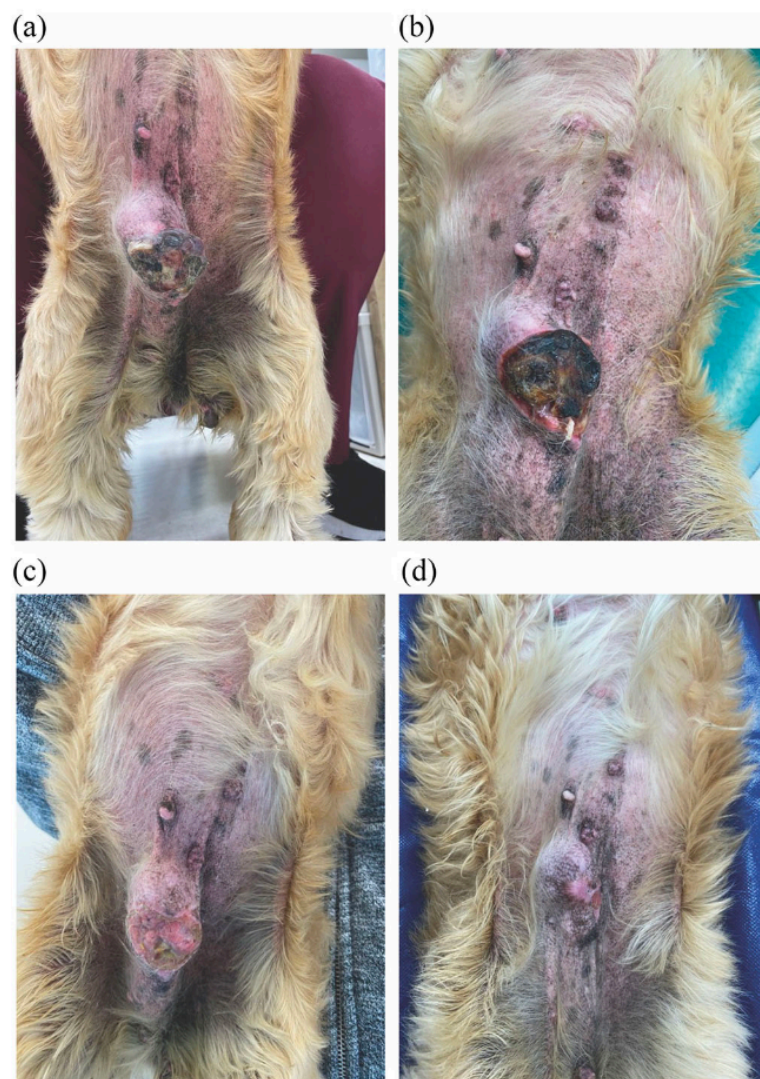
Une étude a porté sur la possibilité de traiter les nodules thyroïdiens de chats entraînant une hyperthyroïdie. Cependant les résultats étaient peu satisfaisants avec un contrôle uniquement transitoire de la maladie. Le protocole utilisé était de 10 W pendant les premières 1,30 minutes puis augmentation du voltage de 2 W toutes les 10 secondes jusqu'à apparition de bulles de gaz à l'échographie. Sur les 9 chats étudiés, tous ont connu une récurrence d'hyperthyroïdie en moyenne 4 mois après la procédure (maximum 18 mois). De plus des complications telles qu'un Claude Bernard Horner et une paralysie laryngée ont été rapportées. (Mallery *et al.*, 2003)

- Tumeurs mammaires

Les tumeurs mammaires sont la néoplasie la plus commune chez la chienne entière, représentant 50 à 70 % des tumeurs de la population. Les néoplasies bénignes mammaires du chien incluent notamment des adénomes. Les néoplasies malignes incluent une variété de carcinomes et de sarcomes parfois même mixtes. Le traitement de première intention est chirurgical avec le retrait de la chaîne mammaire, les traitements systémiques étant à ce jour peu étudiés. (Vail *et al.*, 2019)

Les études épidémiologiques sont moindres chez le chat, mais l'incidence globale semble inférieure chez le chat que le chien avec une large prédominance de carcinomes. (Vail *et al.*, 2019)

Contrairement à ce qui est décrit chez la femme, une indication curative pour la prise en charge de tumeurs mammaires par thermoablation semble peu envisageable du fait de la complexité de leur développement, de la topographie spécifique du tissu mammaire chez les carnivores domestiques, justifiant que la prise en charge chirurgicale nécessite une exérèse de la chaîne mammaire complète lors de lésion maligne. Certaines indications palliatives sont cependant envisageables, notamment la prise en charge de saignements d'une tumeur mammaire ulcérée. Les MO ont ainsi été utilisés dans une étude sous anesthésie locale, permettant une hémostase complète sur deux chiens dont les risques anesthésiques étaient trop élevés pour une chirurgie. L'équipement utilisé était celui de Emprint ND (Covidien). Le protocole utilisait une puissance de 40 W et était arrêté lorsque la couleur du tissu était grise, soit après 2 à 3,5 minutes (Tableau 9). Aucune complication n'est rapportée et la prise en charge a permis un contrôle satisfaisant de l'hémorragie pour les deux chiennes (Figure 33), dont une n'a connu aucun saignement dans les 6 mois qui ont suivi la procédure (Annexe 1, K2) (Kawamura *et al.*, 2023)



*Figure 33 : Photographies de l'évolution de l'aspect d'une tumeur mammaire ulcérée après ablation par MO (Kawamura et al., 2023)*

*(a) 2 jours, (b) 8 jours, (c) 16 jours, (d) 38 jours après ablation, une croûte à la surface de la zone d'ablation se forme rapidement, tombe et devient une cicatrice.*

Article	Procédure	Modèle/fabriquant	Type d'électrode	Temps d'application	Réglages	Méthode d'arrêt
(Kawamura <i>et al.</i> , 2023)	MO	Emprint ND (Covidien)	Taille non informé, refroidissement interne intégré	2 à 3,5 minutes	40 W	Visualisation de tissu gris à la surface de la masse

Tableau 9 : *Bilan des informations sur les procédures d'ablations réalisées sur le tissu mammaire*

- Tumeurs cardiaques : le chémodectome

En 2021, un article a étudié la possibilité de prendre en charge des chémodectomes par RF. Les chémodectomes représentent 8 à 28 % des tumeurs cardiaques primaires chez le chien. Elles sont bénignes mais peuvent entraîner une compression et/ou un épanchement péricardique. Les prises en charge actuelles sont souvent multimodales, la chirurgie étant particulièrement difficile, la chimiothérapie, la pose d'un stent et la radiothérapie ont été explorées. (Gómez Ochoa *et al.*, 2021 ; Vail *et al.*, 2019)

Dans cette étude, les chercheurs ont utilisé un guidage échographique, le protocole était adapté en fonction de la notice du dispositif avec un suivi d'impédance continu et un arrêt automatique pour un certain seuil d'impédance était appliqué. Les procédures ont duré entre 11 et 18 minutes mais les protocoles précis ne sont pas indiqués (Tableau 10). Les résultats de l'étude sont prometteurs avec une amélioration significative des signes cliniques associés dès une semaine après intervention (diminution de l'ascite). Aucune complication n'est rapportée, un chien a nécessité une seconde intervention 8 mois après la première du fait d'une compression de la veine cave caudale et d'une ascite. (Gómez Ochoa *et al.*, 2021)

Article	Procédure	Modèle/fabriquant	Type d'électrode	Temps d'application	Réglages	Méthode d'arrêt
(Gómez Ochoa <i>et al.</i> , 2021)	RF	RF 3000 ND (Boston scientific)	Electrode à baleine LeVein 3.0	Non informé	Non informé	Contrôle par impédance

Tableau 10 : *Bilan des informations sur les procédures d'ablations réalisées sur un chémodectome*

### 3.2.6. Utilisation dans un contexte non tumoral

Cette thèse se concentre principalement sur l'utilisation de la thermoablation pour le traitement de tumeurs, mais elle soulève également d'autres domaines d'application potentiels en raison du fonctionnement intrinsèque de ces techniques. Un exemple est la stérilisation des chiennes par thermoablation, explorée dans l'étude de Verpaalen en 2020, une étude pilote dans le

cadre de la prise en charge de tumeurs ovariennes chez la femme. La première partie de l'étude a établi un protocole d'ablation par MO optimal d'une puissance de 45 W pendant 90 secondes (Tableau 11) en utilisant 16 ovaires canins récupérés après ovariectomie, montrant ainsi que 45 W pour 60 secondes entraînait des tailles d'ablation trop faible. Dans la deuxième partie, une ablation par MO des ovaires de 9 chiennes a été réalisée par guidage coelioscopique (Figure 34), car le guidage échographique s'est avéré irréalisable après un premier essai. Les ovaires ont ensuite été retirés par une chirurgie de laparotomie puis analysés histologiquement, révélant une ablation complète pour 12 des 17 ovaires soumis à la thermoablation. Seules des complications mineures ont été rapportées, comprenant une légère lésion thermique de la paroi lors d'une ablation guidée par ultrasons et deux ecchymoses au niveau des sites d'insertion de la sonde de MO. (Verpaalen *et al.*, 2020)

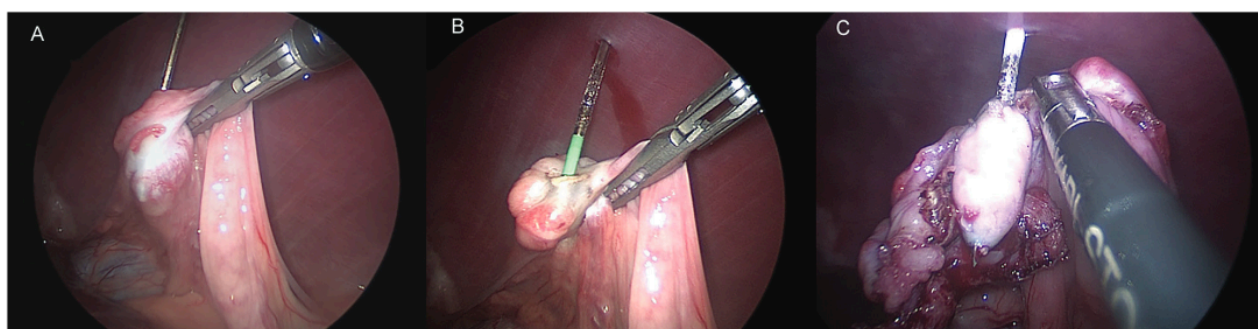


Figure 34 : Photographie d'une ablation d'un ovaire par MO par guidage vidéo au cours d'une laparoscopie (Verpaalen *et al.*, 2020)

(a) avant, (b) pendant, (c) après ablation, un forceps est utilisé afin de tenir l'ovaire par le ligament propre à distance des organes à risque et de la paroi abdominale.

Article	Procédure	Modèle/fabriquant	Type d'électrode	Temps d'application	Réglages	Méthode d'arrêt
(Verpaalen <i>et al.</i> , 2020)	MO	Certus 140 ND (NeuWave)	Certus PR15	90 secondes	45W	Protocole prédéfini

Tableau 11 : Bilan des informations sur les procédures d'ablations réalisées sur le foie

### **3.3. Discussion sur l'émergence et l'avenir dans le monde vétérinaire**

#### **3.3.1. Application pratique de la thermoablation en médecine vétérinaire**

Du fait du diagnostic souvent tardif des tumeurs solides en médecine vétérinaire, l'approche chirurgicale peut être parfois difficilement envisageable compte tenu de l'extension tumorale. La thermoablation offre donc une alternative potentiellement curative, la chimiothérapie et radiothérapie se limitant souvent à une diminution de la charge tumorale. (Culp, 2015)

Le déroulement global d'une procédure de thermoablation en médecine vétérinaire est proche de celle discutée en médecine humaine dans la partie 2. Un bilan préanesthésique est nécessaire à la préparation d'une procédure de thermoablation, il peut comprendre un hémogramme et un examen biochimique sanguin. Une radiographie thoracique doit à minima être réalisée comme bilan d'extension. L'exploration de la tumeur peut se faire par échographie, scanner ou IRM, avec les mêmes avantages qu'en médecine humaine. (Culp, 2015)

A la différence de la médecine humaine, l'animal doit obligatoirement être placé sous anesthésie générale, cela représente un désavantage comparé à la thermoablation chez l'homme puisque l'intervention ne permet pas de diminuer les risques anesthésiques. Lors de procédures de RF monopolaires, la plaque de retour doit être positionnée en contact direct avec la peau, après tonte des poils si nécessaire afin d'éviter les brûlures. (Culp, 2015)

Une des limites majeures de l'utilisation des thermoablations en médecine vétérinaire est la disponibilité limitée des méthodes de guidage avancées. Bien que l'échographie soit désormais présente dans la majorité des cliniques vétérinaires, l'accès au scanner et à l'IRM est encore restreint aux établissements de référence. De plus, l'application d'un guidage par imagerie nécessite l'accès à une salle d'imagerie interventionnelle, qui offre des conditions stériles appropriées pour effectuer ces procédures.

Comme évoqué précédemment, l'intérêt pour la thermoablation en médecine vétérinaire semble avant tout se concentrer sur l'utilisation des MO plutôt que la RF. En se concentrant uniquement sur un type de procédure, cela permet de regrouper plus rapidement les résultats obtenus et d'avancer plus rapidement dans l'élaboration de protocoles codifiés. De plus, en n'utilisant que les MO, le matériel nécessaire à toutes les indications de thermoablation est similaire, ce qui diminue les frais engendrés par les cliniques. Cependant, les travaux de recherche actuels en médecine humaine ne permettent pas encore de conclure définitivement à un réel avantage des MO sur le temps de survie ou sur le taux de récurrence. Il semble donc envisageable de continuer à étudier les MO plutôt que les RF en médecine vétérinaire car les MO répondent mieux aux attentes d'une anesthésie de courte durée. Il demeure cependant nécessaire de maintenir les deux méthodes d'intervention en tant que possibilités d'approche et de continuer à surveiller les avancées en médecine humaine avant de tirer des conclusions définitives quant à l'utilisation exclusive des MO.

La littérature actuelle est trop faible pour évaluer correctement les risques et complications d'une procédure de thermoablation en médecine vétérinaire, seule une extrapolation des résultats de médecine humaine vus précédemment est possible à ce jour. (Culp, 2015)



Un monitoring rapproché de la douleur et des organes périphériques à la zone d'ablation est nécessaire après la procédure. Une hospitalisation est souvent nécessaire pour réaliser une analgésie intraveineuse. (Culp, 2015)

### **3.3.2. Domaines d'application envisagés**

Nous n'avons pas actuellement assez de recul en médecine vétérinaire pour déterminer le bénéfice exact de la thermoablation en comparaison avec les autres méthodes de gestion des tumeurs. En effet, la grande majorité des études décrites à ce jour permettent avant tout de discuter de la faisabilité des procédures de thermoablation sur les différents tissus évoqués.

L'un des domaines les plus prometteurs de la thermoablation en médecine vétérinaire pourrait être la prise en charge des ostéosarcomes. En développant les techniques et l'expertise des vétérinaires dans ces procédures, les MO pourraient évoluer pour devenir non seulement un traitement curatif et conservateur des membres touchés, mais aussi permettre une gestion rapide et efficace des métastases pulmonaires. Cependant, l'avancement des recherches demeure complexe d'un point de vue éthique, car les données actuelles ne suffisent pas encore à préconiser cette approche plutôt que l'amputation. De plus, les résultats actuels en médecine humaine indiquent une efficacité curative pour les tumeurs primitives osseuses uniquement si leur diamètre est inférieur à 3 cm, tandis que dans l'étude de Salyer et al., la longueur médiane des ostéosarcomes était de 6,1 cm (intervalle de confiance : 5,4 - 6,5 cm). Par conséquent, l'utilisation des MO devrait actuellement être envisagée en dernier recours lorsque l'amputation est refusée par les propriétaires ou impossible pour l'animal (en raison d'une amputation antérieure, d'une arthrose grave, etc.). De plus, cette approche doit toujours être combinée à une thérapie multimodale, notamment la chimiothérapie. Lorsque des métastases pulmonaires apparaissent, la thermoablation peut être envisagée si une lobectomie pulmonaire n'est pas réalisable. Bien que les premiers résultats présentés ci-dessus semblent encourageants, les critères formels d'indication (nombre et taille maximale des masses) restent à déterminer. Il convient de noter que la gestion des métastases pulmonaires est l'une des procédures associées au plus grand nombre de complications signalées à ce jour, principalement sous la forme de pneumothorax. Par conséquent, les avantages d'une telle intervention doivent être soigneusement évalués en tenant compte de l'impact sur la qualité de vie de l'animal.

Il est à noter que la médecine humaine ne rapporte aucun cas d'utilisation de la thermoablation dans la prise en charge de l'ostéosarcome. Ainsi, le développement de la thermoablation en médecine vétérinaire pourrait permettre l'ouverture de nouvelles portes à la médecine. En effet, en cas de résultats satisfaisants dans la prise en charge chez le chien, il est envisageable que des études s'intéressent à l'approfondissement de la technique en médecine humaine.

Les premiers résultats concernant le traitement des tumeurs hépatiques démontrent un potentiel encourageant, caractérisé par une faible incidence de complications et une réduction significative de la masse tumorale. Comme vu ci-dessus, cette réduction peut engendrer une amélioration des symptômes cliniques et des paramètres sanguins, même en l'absence d'une élimination complète de la tumeur. Dans un contexte où les options de traitement non chirurgical sont actuellement restreintes, l'utilisation des MO semble constituer une approche judicieuse, particulièrement lorsque la chirurgie est refusée par les propriétaires ou considérée comme

présentant des risques excessifs pour l'animal. Toutefois, des études supplémentaires sont nécessaires pour standardiser les protocoles de thermoablation et quantifier les avantages thérapeutiques qu'elle peut apporter.

L'une des observations possibles sur les cas de métastases hépatiques d'hémangiosarcome et des masses mammaires ulcérées, est l'intérêt supplémentaire de la RF et des MO en termes d'hémostase. En effet, dans ces deux situations, les rapports de cas démontrent que les MO offrent un contrôle rapide et durable des saignements. De plus, comme mentionnés précédemment, les mécanismes de la RF et du bistouri électrique sont similaires, ce dernier étant déjà utilisé pour l'hémostase des vaisseaux de petit calibre en chirurgie. Par conséquent, l'un des avantages potentiels distincts des MO et de la RF pourrait résider dans leur capacité à assurer l'hémostase des vaisseaux de calibre supérieur à ce que le bistouri électrique peut traiter et surtout de pouvoir traiter plus en profondeur, au centre de la lésion. Cela ouvrirait la possibilité d'utiliser ces techniques dans d'autres contextes, tels que les traumatismes externes ou iatrogènes, où la maîtrise des saignements est cruciale.

Actuellement, les avantages de la RF semblent bien établis dans le traitement de nodules parathyroïdiens sécrétant et associés à une hyperparathyroïdie primaire chez le chien. L'utilisation des MO n'ont pas été explorés en médecine vétérinaire à ce jour, des articles sur le sujet sont trouvés en médecine humaine. L'utilisation des MO dans ce contexte pourrait donc être exploré en comparaison à la RF dans les années à venir. La diffusion plus large des techniques de RF et de MO au sein du domaine vétérinaire pourrait contribuer à rendre cette méthode de traitement plus accessible et à la proposer dans un plus grand nombre de centres. Cela offrirait une alternative viable à la chirurgie pour un plus large éventail de cas.

En ce qui concerne les autres tumeurs solides mentionnées précédemment (carcinome rénal, carcinome prostatique, chémodectome, etc.), les résultats de la thermoablation présentent des signes prometteurs, mais ils exigent encore de nombreuses explorations pour définir précisément leurs indications, évaluer leurs avantages par rapport à d'autres options de traitement possibles et anticiper les risques.

Une observation notable réside dans l'ampleur des spécialités vétérinaires qui pourraient être influencées par l'amélioration des procédures de RF et de MO. Ainsi, l'utilisation de ces techniques pourrait non seulement favoriser les progrès en oncologie, en imagerie médicale et en chirurgie, mais également apporter un soutien essentiel aux équipes spécialisées en reproduction, en médecine d'urgence et en médecine interne.

Cette thèse se focalise sur l'utilisation du champ électromagnétique dans l'ablation de tumeurs, il existe cependant d'autres utilisations en médecine humaine. Les interactions entre les MO et les bactéries sont un sujet activement recherché actuellement, en effet, si les MO sont utilisées pour réchauffer la nourriture, elles permettent également la diminution du nombre de micro-organismes en entraînant la mort des bactéries en infligeant des dégâts non réversibles à leur paroi. Ainsi, les MO peuvent être utilisées dans la stérilisation des équipements médicaux, ce qui pourrait représenter un intérêt économique, mais surtout environnemental.(Gartshore *et al.*, 2021)

### 3.3.1. Bilan sur l'équipement nécessaire et disponible

Afin de réaliser des ablations par MO ou/et par RF dans une clinique, il est nécessaire de s'équiper avec tout le matériel nécessaire. Ainsi, il faut un générateur, des applicateurs compatibles mais aussi s'assurer que l'environnement est compatible avec la réalisation d'une procédure avec guidage échographie/ scanner/ IRM dans des conditions stériles. De plus, il est important de se former à l'utilisation de l'équipement. Certains fabricants proposent des formations, certains rédacteurs des articles mentionnés se sont également rapprochés de médecins pratiquant couramment cette technique afin de se former à leurs coté.

Le choix de l'équipement peut s'avérer difficile. Dans les articles vétérinaires, les équipements de MO Emprint ND (Covidien) et Certus 140 (NeuWave Medical) semblent les plus utilisés dans les articles vétérinaires. De plus, certains des dispositifs sont compatibles avec les deux procédures, tel que Amica ND (Ablatech). Cela peut représenter un intérêt dans le choix du dispositif, permettant ainsi de réaliser les deux types de procédures dans un contexte où l'intérêt potentiel de l'une par rapport à l'autre n'est pas affirmé. Une thèse d'exercice en pharmacie de 2022 fait état des lieux des dispositifs de RF et de MO présents sur le marché. Il existait alors 8 et 7 fournisseurs respectivement en France (annexe 1 et 2). Pour la RF, la gamme de prix pour les générateurs varie approximativement entre 30 000 € et 40 000€ et les électrodes à l'unité varient entre 600 € et 900€. De plus, l'achat de sonde thermocouple coûte environ 250 €. Pour les MO, aucun prix de générateur n'est affiché et, le prix des antennes de MO varie approximativement entre 800 et 1800€. Pour comparaison, le prix d'une machine en radiothérapie varie approximativement entre 2 et 5 millions d'euros. (Bourrel, 2021)

L'un des facteurs faisant grandement augmenter le prix d'une ablation par RF ou par MO est que les applicateurs sont à usage unique (i.e. utilisation pour un seul patient). Une étude de Finck et al. en 2017 a cherché à déterminer si une antenne de MO pouvait être utilisée plusieurs fois. Entre chaque ablation, les antennes étaient plongées dans un détergent enzymatique et doucement nettoyées avec une brosse à dents puis stérilisées à froid (plasma par exemple décrit). Une diminution de l'intégrité fonctionnelle de l'antenne a été montrée après 5 à 6 cycles de traitement, avec stérilisation entre chaque cycle. Il a donc été conseillé d'utiliser les antennes pour un maximum de 3 traitements en prenant soin d'examiner attentivement l'antenne avant chaque traitement. Ainsi, pour un prix d'antenne de 800, cette information permet déjà une diminution du prix des consommables de près de 500 € par traitement. (Finck *et al.*, 2017a)

A ce jour, aucune étude n'a été réalisée sur la rentabilité des thérapie ablatives en médecine vétérinaire mais pourrait être envisagée du fait de l'émergence de ces techniques.

Pour conclure, les informations les articles présentés dans cette partie sont résumées dans le tableau 12 ci-dessous. La thermoablation semble connaître un réel engouement en médecine vétérinaire depuis quelques années de par son accessibilité et son large spectre d'utilisation. Étant donné leurs fonctionnements intrinsèques, les MO représentent un avantage comparé à la RF en diminuant le temps nécessaire à la procédure de thermoablation. Le développement de protocoles codifiés est nécessaire afin d'expander l'utilisation des MO et de la RF à un plus grand nombre de vétérinaire.

	Hépatique	Pulmonaire	Uro-génital	Osseux	Parathyroïde	Thyroïde	Mammaire	Chémodectomes	Ovaires
Procédure utilisée	MO	MO	MO	MO	RF	RF	MO	RF	MO
Nombre de cas/ études	CHC : 7 cas Métastases : 4 cas	3	Rénal : 3 Prostate : 1	3 études	5 études	1 étude	1 étude	1 étude	1 étude
Suivi des cas/ résultats d'étude	CHC : 1 mort, médiane de suivi 465 jours [240,25 ; 641,75] Métastases : 3 morts 1 perdu de vue. Médiane de survie 45 jours [26 ;69].	Métastase d'ostéosarcome : médiane de survie 82 jours [50,5 ; 109]	Rénal : 1 mort à 3 mois, suivi 24 sans anomalie Prostate : suivi 1 mois sans anomalie	Zone d'ablation supérieur sur en présence d'un ostéosarcome Ablation par MO n'augmente pas le risque de fracture sur os sain Possibilité d'une ablation par MO sans lésion des tissus environnant	Établissement de la faisabilité et réalisation d'un protocole Absence de différence significative de résultats avec la parathyroïdectomie	Résultats peu satisfaisants avec récurrence de la maladie en moyenne 4 mois après ablation	Absence de récurrence de saignements 6 mois après ablation	Diminution des signes cliniques associés chez 5 chiens	Ablation complète de 12 ovaires sur 17.
Complication(s)	1 Stéatite réactionnelle 7 jours après intervention 1 Hémorragie légère à l'insertion de l'applicateur 1 Déhiscence cutanée à 2 jours	1 pneumothorax léger 1 pneumothorax modéré	1 léger saignement subcapsulaire	Aucune complication	Hypocalcémie Toux Changement d'aboiement Syndrome CBH Bronchopneumonie	Syndrome CBH	Aucune complication	Aucune complication per-opératoire Une nécessité de reprise d'ablation 8 mois après intervention	Lésions thermiques de paroi Ecchymoses des sites d'insertion de sonde
Intérêt potentiel	Prise en charge des CHC nodulaires ou à risque opératoire élevé. Arrêt des saignements en cas de saignement d'hémangiosarcome	Prise en charge des métastases pulmonaires avec préservation du parenchyme sain	Prise en charge de masses rénales avec préservation du parenchyme rénal sain	Prise en charge des ostéosarcomes en préservant le membre atteint. Possibilité de prendre en charge des animaux non-candidats à la chirurgie	Intérêt déjà établi avec preuves d'efficacité et de sécurité	Peu d'intérêt comparé aux prises en charges actuelles	Gestion des masses mammaires hémorragique des femelles non-candidates à la chirurgie	Prise en charge des chémodectomes entraînant des signes cliniques important sans sternotomie	Possibilité de stérilisation par thermoablation Prise en charge potentiel des tumeurs ovariennes par thermoablation

Tableau 12 : Tableau récapitulatif des procédures utilisées en en médecine vétérinaire et leur intérêt



# Conclusion

---

Les techniques de thermoablation par radiofréquence ou micro-ondes semblent donc présenter des perspectives d'application intéressantes dans le domaine vétérinaire. Leur fonctionnement est très similaire et requièrent l'insertion précise d'un applicateur au cœur de la tumeur, engendrant la création d'ondes électromagnétiques qui, en retour, génèrent de la chaleur. Cette élévation ciblée de la température est responsable de la nécrose ischémique de la tumeur, ce qui permet la destruction de toutes les cellules tumorales et d'une marge de sécurité, tout en préservant le tissu sain environnant. Ces techniques peuvent être employées en chirurgie ouverte ou vidéo-assistée mais aussi par voie percutanée, guidées par diverses modalités d'imagerie comme l'échographie, le scanner ou l'IRM. Ces approches s'inscrivent ainsi dans le registre des procédures mini-invasives, représentant une solution parfois curative aux patients non-candidats à la chirurgie.

La pertinence de la prise en charge par radiofréquence et micro-ondes en médecine humaine se distingue donc par leur capacité à répondre aux besoins des patients inopérables. Les résultats encourageants obtenus jusqu'à ce jour soutiennent leur utilisation accrue, devenant même le premier choix de traitement pour les carcinomes hépatocellulaires de moins de 3 cm. Bien que les données concernant la radiofréquence soient plus abondantes que celles sur les micro-ondes, ces dernières semblent présenter plusieurs avantages, suggérant qu'elles pourraient bien façonner l'avenir de la thermoablation.

Ces découvertes ont influencé la médecine vétérinaire à se concentrer davantage sur les micro-ondes depuis 2017. Les premières investigations indiquent une réception favorable de la thermoablation pour la gestion des tumeurs vétérinaires, avec deux domaines en plein essor : la gestion des carcinomes hépatocellulaires et celle des ostéosarcomes et de leurs métastases.

Cependant, certaines limites entravent l'application de la thermoablation en médecine vétérinaire, notamment l'obligation d'intervenir sous anesthésie générale et les considérations financières. Malgré cela, ces procédures sont en pleine évolution, en particulier dans les centres de référence, permettant ainsi l'essor de nombreuses avancées dans des domaines variés tels que l'oncologie, l'imagerie, la chirurgie, mais aussi la médecine interne et la reproduction.

# Liste des références bibliographiques

---

AHMED, M., LIU, Z., AFZAL, K.S., *et al.* (2004) Radiofrequency ablation: effect of surrounding tissue composition on coagulation necrosis in a canine tumor model. *Radiology* vol. 230, n° 3, p. 761-767. [<https://doi.org/10.1148/radiol.2303021801>]

AHMED, M., LOBO, S.M., WEINSTEIN, J., *et al.* (2002) Improved coagulation with saline solution pretreatment during radiofrequency tumor ablation in a canine model. *Journal of Vascular and Interventional Radiology* vol. 13, n° 7, p. 717-724. [[https://doi.org/10.1016/s1051-0443\(07\)61850-8](https://doi.org/10.1016/s1051-0443(07)61850-8)]

AHMED, M., SOLBIATI, L., BRACE, C.L., *et al.* (2014) Image-guided tumor ablation: standardization of terminology and reporting criteria--a 10-year update. *Radiology* vol. 273, n° 1, p. 241-260. [<https://doi.org/10.1148/radiol.14132958>]

BASTIEN, L., DE KERVILER, É., DESGRANDCHAMPS, F. (2010) Le traitement des tumeurs du rein par radiofréquence. *Progrès en Urologie - FMC* vol. 20, n° 2, p. F49-F53. [<https://doi.org/10.1016/j.fpurol.2010.04.003>]

BENSALAH, K., ALBIGES, L., BERNHARD, J.-C., *et al.* (2018) Recommandations françaises du Comité de Cancérologie de l'AFU – Actualisation 2018–2020 : prise en charge du cancer du rein. *Progrès en Urologie* vol. 28, p. R5-R33. [<https://doi.org/10.1016/j.purol.2019.01.004>]

BERTOT, L.C., SATO, M., TATEISHI, R., *et al.* (2011) Mortality and complication rates of percutaneous ablative techniques for the treatment of liver tumors: a systematic review. *European Radiology* vol. 21, n° 12, p. 2584-2596. [<https://doi.org/10.1007/s00330-011-2222-3>]

BOURREL, C. (2021) Ablation thermique tumorale en radiologie interventionnelle : état des lieux et étude rétrospective sur le CHU de Toulouse 2019-2020. thèse d'exercice en pharmacie Université Toulouse III - Paul Sabatier.

BRÉHIER, G., BESNIER, L., DELAGNES, A., *et al.* (2021) Imaging after percutaneous thermal and non-thermal ablation of hepatic tumour: normal appearances, progression and complications. *The British Journal of Radiology* vol. 94, n° 1123, p. 20201327. [<https://doi.org/10.1259/bjr.20201327>]

BUCY, D., POLLARD, R., NELSON, R. (2017) Analysis of factors affecting outcome of ultrasound-guided radiofrequency heat ablation for treatment of primary hyperparathyroidism in dogs. *Veterinary Radiology & Ultrasound* vol. 58, n° 1, p. 83-89. [<https://doi.org/10.1111/vru.12451>]

CHEN, M., ZHANG, Y., LAU, W.Y. (2016) Radiofrequency Ablation for Small Hepatocellular Carcinoma. Dordrecht, Springer Netherlands. [<https://doi.org/10.1007/978-94-017-7258-7>]

CULP, W.T.N. (2015) Tumor Ablations – Soft Tissue and Skeletal. In Weiss C., Berent A., *Veterinary Image-Guided Interventions*. John Wiley & Sons, Ltd, p. 621-628. [<https://doi.org/10.1002/9781118910924.ch64>]

CULP, W.T.N., GRIFFIN, M.A. (2019) Veterinary Clinics: Tumor Ablation. *Veterinary Clinics of North America: Small Animal Practice, Cancer in Companion Animals* vol. 49, n° 5, p. 949-966.

[<https://doi.org/10.1016/j.cvsm.2019.04.007>]

CULP, W.T.N., JOHNSON, E.G., PALM, C.A., *et al.* (2021) Use of percutaneous microwave ablation in the treatment of retroperitoneal neoplasia in three dogs. *Journal of the American Veterinary Medical Association* vol. 259, n° 10, p. 1171-1177. [<https://doi.org/10.2460/javma.20.09.0505>]

CULP, W.T.N., JOHNSON, E.G., PALM, C.A., *et al.* (2017) Use of thermal ablation techniques in the treatment of canine urogenital neoplasia. *Proceedings of Veterinary Interventional Radiology and interventional Endoscopy Society Meeting (2nd annual)*.

DAVID, A., LIBERGE, R., LABBE, C., *et al.* (2017) Prise en charge thérapeutique des métastases osseuses en radiologie interventionnelle. *Médecine Nucléaire* vol. 41, n° 4, p. 273-279. [<https://doi.org/10.1016/j.mednuc.2017.06.002>]

DING, J., JING, X., LIU, J., *et al.* (2013) Complications of thermal ablation of hepatic tumours: comparison of radiofrequency and microwave ablative techniques. *Clinical Radiology* vol. 68, n° 6, p. 608-615. [<https://doi.org/10.1016/j.crad.2012.12.008>]

DORNBUSCH, J.A., WAVREILLE, V.A., DENT, B., *et al.* (2020) Percutaneous microwave ablation of solitary presumptive pulmonary metastases in two dogs with appendicular osteosarcoma. *Veterinary Surgery* vol. 49, n° 6, p. 1174-1182. [<https://doi.org/10.1111/vsu.13469>]

DUBIEL, B., SHIRES, P.K., KORVICK, D., *et al.* (2010) Electromagnetic energy sources in surgery. *Veterinary Surgery* vol. 39, n° 8, p. 909-924. [<https://doi.org/10.1111/j.1532-950X.2010.00740.x>]

ELLIS, L.M., CURLEY, S.A., TANABE, K.K. (2004) Radiofrequency ablation for cancer: current indications, techniques, and outcomes. New York, Springer.

FACCIORUSSO, A., DI MASO, M., MUSCATIELLO, N. (2016) Microwave ablation versus radiofrequency ablation for the treatment of hepatocellular carcinoma: A systematic review and meta-analysis. *International Journal of Hyperthermia* vol. 32, n° 3, p. 339-344. [<https://doi.org/10.3109/02656736.2015.1127434>]

FINCK, C.A., LINDEN, A.R. zur, SINGH, A., *et al.* (2017a) Effects of repeated use and reesterilization on structural and functional integrity of microwave ablation antennas. *American Journal of Veterinary Research* vol. 78, n° 4, p. 508-516. [<https://doi.org/10.2460/ajvr.78.4.508>]

FINCK, C.A., ZUR LINDEN, A., FOSTER, R.A., *et al.* (2017b) Protocol development for microwave ablation of long bones in normal dogs and preliminary results in pathological bones with osteosarcoma. *Proceedings of Veterinary Interventional Radiology and interventional Endoscopy Society Meeting (2nd annual)*.

FINOTTI, M., D'AMICO, F.E., ROMANO, M., *et al.* (2022) Colorectal Liver Metastases: A Literature Review of Viable Surgical Options with a Special Focus on Microwave Liver Thermal Ablation and Mini-Invasive Approach. *Journal of Personalized Medicine* vol. 13, n° 1, p. 33. [<https://doi.org/10.3390/jpm13010033>]

GAO, Y.-X., NING, Q.-Q., YANG, P.-X., *et al.* (2023) Recent advances in recurrent hepatocellular carcinoma therapy. *World Journal of Hepatology* vol. 15, n° 4, p. 460-476. [<https://doi.org/10.4254/wjh.v15.i4.460>]

GARTSHORE, A., KIDD, M., JOSHI, L.T. (2021) Applications of Microwave Energy in Medicine.



*Biosensors* vol. 11, n° 4, p. 96. [<https://doi.org/10.3390/bios11040096>]

GÓMEZ OCHOA, P., ALFÉREZ, M.D., DE BLAS, I., *et al.* (2021) Ultrasound-Guided Radiofrequency Ablation of Chemodectomas in Five Dogs. *Animals* vol. 11, n° 10, p. 2790. [<https://doi.org/10.3390/ani11102790>]

GUIBAL, A., SEILLER, I., KHEMISSA, F., *et al.* (2021) Recommandations opérationnelles en radiologie interventionnelle : destruction tumorale percutanée des tumeurs hépatiques. *Journal d'imagerie diagnostique et interventionnelle* vol. 4, n° 4, p. 231-237. [<https://doi.org/10.1016/j.jidi.2021.05.003>]

HABERT, P., PUECH, B., DI BISCEGLIE, M., *et al.* (2023) Principe physique, indications et résultats des ablations tumorales percutanées en radiologie interventionnelle thoracique : radiofréquence, cryoablation et micro-ondes. *Journal d'imagerie diagnostique et interventionnelle* vol. 6, n° 3, p. 167-176. [<https://doi.org/10.1016/j.jidi.2022.10.003>]

HONG, K., GEORGIADES, C. (2010) Radiofrequency ablation: mechanism of action and devices. *Journal of Vascular and Interventional Radiology* vol. 21, n° 8 Suppl, p. S179-186. [<https://doi.org/10.1016/j.jvir.2010.04.008>]

IZZO, F., GRANATA, V., GRASSI, R., *et al.* (2019) Radiofrequency Ablation and Microwave Ablation in Liver Tumors: An Update. *The Oncologist* vol. 24, n° 10, p. e990-e1005. [<https://doi.org/10.1634/theoncologist.2018-0337>]

JAFFRO, M., COLLOT, S. (2019) La radiologie interventionnelle en oncologie thoracique. *Revue des Maladies Respiratoires Actualités* vol. 11, n° 3, p. 408-417. [[https://doi.org/10.1016/S1877-1203\(19\)30110-7](https://doi.org/10.1016/S1877-1203(19)30110-7)]

KALAMARAS, A.B., WAVREILLE, V., JONES, S.C., *et al.* (2020) Impact of microwave ablation treatment on the biomechanical properties of the distal radius in the dog: A cadaveric study. *Veterinary Surgery* vol. 49, n° 7, p. 1388-1395. [<https://doi.org/10.1111/vsu.13481>]

KAWAMURA, Y., ITOU, H., KIDA, A., *et al.* (2023) Microwave ablation for the control of bleeding from disintegrated mammary tumours in two dogs. *Veterinary Medicine and Science* vol. 9, n° 3, p. 1062-1068. [<https://doi.org/10.1002/vms3.1089>]

KINOSHITA, T. (2016) Non-surgical Ablation Therapy for Early-stage Breast Cancer. Tokyo, Springer Japan. [<https://doi.org/10.1007/978-4-431-54463-0>]

KOCH, G., CAZZATO, R.L., CAUDRELIER, J., *et al.* (2017) Techniques d'ablation tumorale. *Progrès en Urologie, Rapport AFU 2017: Traitements ablatifs in situ en urologie* vol. 27, n° 15, p. 853-864. [<https://doi.org/10.1016/j.purol.2017.07.244>]

LE BAYON, A.-G. (2011) Ablation par radiofréquence. *In Imagerie digestive*. [[http://memoires.scd.univ-tours.fr/Medecine/Theses/2011\\_Medecine\\_LeBayonAnneGwen/web/html/index7f30.html?option=com\\_content&view=article&id=17:radiofrequence&catid=3:foie&Itemid=17](http://memoires.scd.univ-tours.fr/Medecine/Theses/2011_Medecine_LeBayonAnneGwen/web/html/index7f30.html?option=com_content&view=article&id=17:radiofrequence&catid=3:foie&Itemid=17)] (consulté le 19/07/2023).

LEAL, R.O., FRAU PASCUAL, L., HERNANDEZ, J. (2018) The Use of Percutaneous Ultrasound-Guided Radiofrequency Heat Ablation for Treatment of Primary Hyperparathyroidism in Eight Dogs: Outcome and

Complications. *Veterinary Sciences* vol. 5, n° 4, p. 91. [<https://doi.org/10.3390/vetsci5040091>]

LEYLEK, A.M., WHITMAN, G.J., VILAR, V.S., *et al.* (2013) Radiofrequency ablation for breast cancer. *Techniques in Vascular and Interventional Radiology* vol. 16, n° 4, p. 269-276. [<https://doi.org/10.1053/j.tvir.2013.08.009>]

LIANG, P., YU, X., YU, J. (2015) Microwave Ablation Treatment of Solid Tumors. Dordrecht, Springer Netherlands. [<https://doi.org/10.1007/978-94-017-9315-5>]

LOCATELLI, A., TREGGIARI, E., INNOCENTI, M., *et al.* (2022) Percutaneous ultrasound-guided microwave ablation for treatment of hepatocellular carcinomas in dogs: four cases (2019-2020). *The Journal of Small Animal Practice* vol. 63, n° 12, p. 897-903. [<https://doi.org/10.1111/jsap.13546>]

LUBNER, M.G., BRACE, C.L., HINSHAW, J.L., *et al.* (2010) Microwave tumor ablation: mechanism of action, clinical results, and devices. *Journal of Vascular and Interventional Radiology* vol. 21, n° 8 Suppl, p. S192-203. [<https://doi.org/10.1016/j.jvir.2010.04.007>]

LUM, M.A., SHAH, S.B., DURACK, J.C., *et al.* (2019) Imaging of Small Renal Masses before and after Thermal Ablation. *Radiographics* vol. 39, n° 7, p. 2134-2145. [<https://doi.org/10.1148/rg.2019190083>]

MALLERY, K.F., POLLARD, R.E., NELSON, R.W., *et al.* (2003) Percutaneous ultrasound-guided radiofrequency heat ablation for treatment of hyperthyroidism in cats. *Journal of the American Veterinary Medical Association* vol. 223, n° 11, p. 1602-1607. [<https://doi.org/10.2460/javma.2003.223.1602>]

MAURI, G., SCONFIENZA, L.M., PESCATORI, L.C., *et al.* (2017) Technical success, technique efficacy and complications of minimally-invasive imaging-guided percutaneous ablation procedures of breast cancer: A systematic review and meta-analysis. *European Radiology* vol. 27, n° 8, p. 3199-3210. [<https://doi.org/10.1007/s00330-016-4668-9>]

MAZZACCARI, K., BOSTON, S.E., TOSKICH, B.B., *et al.* (2017) Video-assisted microwave ablation for the treatment of a metastatic lung lesion in a dog with appendicular osteosarcoma and hypertrophic osteopathy. *Veterinary Surgery* vol. 46, n° 8, p. 1161-1165. [<https://doi.org/10.1111/vsu.12723>]

MELLOT, F., FRIARD, S., DOUBRE, H., *et al.* (2011) Le traitement par radiofréquence des tumeurs pulmonaires. *Revue de Pneumologie Clinique* vol. 67, n° 4, p. 238-243. [<https://doi.org/10.1016/j.pneumo.2011.04.003>]

MOSER, T., BUY, X., GOYAULT, G., *et al.* (2008) Ablation des tumeurs osseuses sous contrôle de l'imagerie: revue des techniques actuelles. *Journal de Radiologie* vol. 89, n° 4, p. 461-471. [[https://doi.org/10.1016/S0221-0363\(08\)71449-5](https://doi.org/10.1016/S0221-0363(08)71449-5)]

MOYNAGH, M.R., KURUP, A.N., CALLSTROM, M.R. (2018) Thermal Ablation of Bone Metastases. *Seminars in Interventional Radiology* vol. 35, n° 4, p. 299-308. [<https://doi.org/10.1055/s-0038-1673422>]

ODET, J., PELLEGRINELLI, J., VARBEDIAN, O., *et al.* (2023) Predictive Factors of Local Recurrence after Colorectal Cancer Liver Metastases Thermal Ablation. *Journal of Imaging* vol. 9, n° 3, p. 66. [<https://doi.org/10.3390/jimaging9030066>]

ORAMAS, A., CASE, J.B., TOSKICH, B.B., *et al.* (2019) Laparoscopic access to the liver and application of

laparoscopic microwave ablation in 2 dogs with liver neoplasia. *Veterinary Surgery* vol. 48, n° S1, p. O91-O98. [<https://doi.org/10.1111/vsu.13153>]

ORLOFF, L.A., NOEL, J.E., STACK, B.C., *et al.* (2022) Radiofrequency ablation and related ultrasound-guided ablation technologies for treatment of benign and malignant thyroid disease: An international multidisciplinary consensus statement of the American Head and Neck Society Endocrine Surgery Section with the Asia Pacific Society of Thyroid Surgery, Associazione Medici Endocrinologi, British Association of Endocrine and Thyroid Surgeons, European Thyroid Association, Italian Society of Endocrine Surgery Units, Korean Society of Thyroid Radiology, Latin American Thyroid Society, and Thyroid Nodules Therapies Association. *Head & Neck* vol. 44, n° 3, p. 633-660. [<https://doi.org/10.1002/hed.26960>]

PALUSSIÈRE, J., AURIOL, S., MERTENS, C., *et al.* (2023) Y a-t-il une place pour la thermoablation dans le traitement du cancer du sein ? Pour quelles patientes ? *Imagerie de la Femme* vol. 33, n° 2, p. 75-76. [<https://doi.org/10.1016/j.femme.2023.04.001>]

PALUSSIÈRE, J., CATENA, V., GAUBERT, J.-Y., *et al.* (2017) Thermo-ablation pulmonaire percutanée. *Bulletin du Cancer* vol. 104, n° 5, p. 417-422. [<https://doi.org/10.1016/j.bulcan.2017.03.010>]

PARK, B.K., SHEN, S.H., FUJIMORI, M., *et al.* (2021) Asian Conference on Tumor Ablation guidelines for renal cell carcinoma. *Investigative and Clinical Urology* vol. 62, n° 4, p. 378-388. [<https://doi.org/10.4111/icu.20210168>]

PARK, H.S., BAEK, J.H., PARK, A.W., *et al.* (2017) Thyroid Radiofrequency Ablation: Updates on Innovative Devices and Techniques. *Korean Journal of Radiology* vol. 18, n° 4, p. 615-623. [<https://doi.org/10.3348/kjr.2017.18.4.615>]

POLLARD, R.E., LONG, C.D., NELSON, R.W., *et al.* (2001) Percutaneous ultrasonographically guided radiofrequency heat ablation for treatment of primary hyperparathyroidism in dogs. *Journal of the American Veterinary Medical Association* vol. 218, n° 7, p. 1106-1110. [<https://doi.org/10.2460/javma.2001.218.1106>]

QIU-JIE, S., ZHI-YU, H., XIAO-XIA, N., *et al.* (2011) Feasible temperature of percutaneous microwave ablation of dog liver abutting the bowel. *International Journal of Hyperthermia* vol. 27, n° 2, p. 124-131. [<https://doi.org/10.3109/02656736.2010.508763>]

RASOR, L., POLLARD, R., FELDMAN, E.C. (2007) Retrospective evaluation of three treatment methods for primary hyperparathyroidism in dogs. *Journal of the American Animal Hospital Association* vol. 43, n° 2, p. 70-77. [<https://doi.org/10.5326/0430070>]

RYAN, A., BYRNE, C., PUSCEDDU, C., *et al.* (2022) CIRSE Standards of Practice on Thermal Ablation of Bone Tumours. *Cardiovascular and Interventional Radiology* vol. 45, n° 5, p. 591-605. [<https://doi.org/10.1007/s00270-022-03126-x>]

SALYER, S.A., WAVREILLE, V.A., FENGER, J.M., *et al.* (2020) Evaluation of microwave ablation for local treatment of dogs with distal radial osteosarcoma: A pilot study. *Veterinary Surgery* vol. 49, n° 7, p. 1396-1405. [<https://doi.org/10.1111/vsu.13491>]

TAN, W., DENG, Q., LIN, S., *et al.* (2019) Comparison of microwave ablation and radiofrequency ablation for hepatocellular carcinoma: a systematic review and meta-analysis. *International Journal of Hyperthermia*

vol. 36, n° 1, p. 264-272. [<https://doi.org/10.1080/02656736.2018.1562571>]

VAIL, D.M., THAMM, D.H., LIPTAK, J.M. (2020) *Withrow and MacEwen's Small Animal Clinical Oncology*, 6th edition. Edinburgh, Elsevier.

VAILLANT, C., SUPIOT, A., MACQUET, P., *et al.* (2008) L'état de l'art en électrochirurgie. *IRBM News* vol. 29, n° 1, p. 16-37. [[https://doi.org/10.1016/S1959-7568\(08\)73436-9](https://doi.org/10.1016/S1959-7568(08)73436-9)]

VAN DE VOORT, E.M.F., STRUIK, G.M., BIRNIE, E., *et al.* (2021) Thermal Ablation as an Alternative for Surgical Resection of Small ( $\leq 2$  cm) Breast Cancers: A Meta-Analysis. *Clinical Breast Cancer* vol. 21, n° 6, p. e715-e730. [<https://doi.org/10.1016/j.clbc.2021.03.004>]

VERPAALLEN, V.D., CASE, J.B., DARK, M.J., *et al.* (2020) Feasibility and efficacy of ultrasonographic and laparoscopic guidance for microwave ablation of clinically normal canine ovaries. *American Journal of Veterinary Research* vol. 81, n° 9, p. 747-754. [<https://doi.org/10.2460/ajvr.81.9.747>]

VIEILLARD, M.-H., CHASTANET, P., LARTIGAU, E., *et al.* (2008) Traitements locaux des métastases osseuses : vertébroplastie, cyphoplastie, radiofréquence, irradiation stéréotaxique. *Revue du Rhumatisme, Actualités en pathologie tumorale : 2e partie* vol. 75, n° 6, p. 523-529. [<https://doi.org/10.1016/j.rhum.2008.02.002>]

VOGEL, A., CERVANTES, A., CHAU, I., *et al.* (2018) Hepatocellular carcinoma: ESMO Clinical Practice Guidelines for diagnosis, treatment and follow-up. *Annals of Oncology* vol. 29, Suppl 4, p. iv238-iv255. [<https://doi.org/10.1093/annonc/mdy308>]

VOGL, T.J., HELMBERGER, T.K., MACK, M.G., *et al.* (2008) Percutaneous Tumor Ablation in Medical Radiology, Medical Radiology. Berlin, Springer. [<https://doi.org/10.1007/978-3-540-68250-9>]

VOGL, T.J., NOUR-ELDIN, N.-E.A., ALBRECHT, M.H., *et al.* (2017) Thermal Ablation of Lung Tumors: Focus on Microwave Ablation. *RöFo - Fortschritte auf dem Gebiet der Röntgenstrahlen und der bildgebenden Verfahren* vol. 189, n° 9, p. 828-843. [<https://doi.org/10.1055/s-0043-109010>]

WARD, R.C., HEALEY, T.T., DUPUY, D.E. (2013) Microwave ablation devices for interventional oncology. *Expert Review of Medical Devices* vol. 10, n° 2, p. 225-238. [<https://doi.org/10.1586/erd.12.77>]

WU, M.-C., TANG, Z.-Y., YE, S.-L., *et al.* (2012) Expert consensus on local ablation therapies for primary liver cancer. *Chinese Clinical Oncology* vol. 1, n° 1, p. 11-11. [<https://doi.org/10.3978/j.issn.2304-3865.2012.06.01>]

XU, D., GE, M., YANG, A., *et al.* (2020) Expert consensus workshop report: Guidelines for thermal ablation of thyroid tumors (2019 edition). *Journal of Cancer Research and Therapeutics* vol. 16, n° 5, p. 960-966. [[https://doi.org/10.4103/jcrt.JCRT\\_558\\_19](https://doi.org/10.4103/jcrt.JCRT_558_19)]

YANG, T., CASE, J.B., BOSTON, S., *et al.* (2017) Microwave ablation for treatment of hepatic neoplasia in five dogs. *Journal of the American Veterinary Medical Association* vol. 250, n° 1, p. 79-85. [<https://doi.org/10.2460/javma.250.1.79>]

YE, X., FAN, W., CHEN, J.-H., *et al.* (2015) Chinese expert consensus workshop report: Guidelines for thermal ablation of primary and metastatic lung tumors. *Thoracic Cancer* vol. 6, n° 1, p. 112-121.

[<https://doi.org/10.1111/1759-7714.12152>]

# Annexe 1 : Description détaillée des cas décrit d'ablation tumorale en médecine vétérinaire

Article cité	Cas / pathologie	Procédure/Matériel utilisé	Protocole d'ablation	Post-opératoire	Suivi	Complications	Temps de survie
(Locatelli et al., 2022)29/09/2023 13:07:00	L1 : CHC de 2,2 X 2,2 x 2,5 cm, lobulaire et cavitare, de division gauche. Chirurgie complexe du fait de la localisation et taille de l'animal (Chihuahua)	MO : Guidage échographique Sonde 17G TATO ND, (biomédical SRL) Arrêt de la procédure : observation de la zone assez large par échographie	30 à 35 W pendant 180 à 120 seconde sur 3 à 6 applications en fonction de la taille.  Temps total de procédure : 10 à 40 minutes	Échographie Nociception intense au cours de la procédure => ajout de fentanyl aux protocoles suivant.	221j : Zone hyperéchogène de 1,3 x 1,5 cm à l'échographie  649 j : masse de taille stable, absence de signes cliniques	Absence de complication	Non informé
	L2 : CHC de 1,4 cm au niveau latéral gauche.			Scanner	Mort spontanée à 133 jours, pas de signes de récurrence avant.	Absence de complication	133 j
	L3 : CHC de 6 x 5 x 4,6 cm au niveau du lobe caudal			Scanner	125 j : échographie montre zone hyperéchogène de 4,1 x 4,1  217 jours : absence d'anomalie clinique	Absence de complication	Non informé
	L4 : CHC de 6.5x11.7x14.1 cm au niveau du lobe médial gauche			Scanner	39 j : Scanner montre une masse cavitare de contenu nécrotique (analyse cytologique) de taille 5.8 x 7.6 x 10.3 cm, amélioration clinique, comportementale et biochimique.  134 jours : absence d'anomalie clinique	Inflammation/stéatite réactionnelle 7 jours après intervention.	Non informé
(Oramas et al., 2019)	O1 : CHC confirmée à l'histopathologie.	MO par coelioscopie : Sonde 17 G Certus 140 ND (NeuWave Medical)	65 W pendant 3 minutes  65 W pendant 4 minutes sur 2 applications	Sortie après 24 heures	3 mois : Scanner montre une masse de 2,5 x 2,7 x 1,9 cm  20 mois : absence d'anomalie clinique	Hémorragie légère, résolution spontanée lors de l'ablation	Non informé
	O2 : hémangiosarcome de la rate métastasée. Chirurgie de splénectomie puis auriclectomie et ablation de nodules hépatiques.			Sortie après 24 heures	Mort spontanée 7 jours après intervention. Absence totale d'anomalie clinique avant.	Absence de complication	7 jours
(Yang et al., 2017)	Y1 : Adénocarcinome des glandes apocrines métastasé à la rate et au foie.	MO par laparotomie : Sonde 17G, 15 cm triaxiale Certus 140 ND (NeuWave Medical)	40W pendant 1,5 à 3 minutes sur 8 applications en fonction de la taille  40 W pendant 1,5 à 3 minutes sur 5 applications	Non informé	5 mois : nombreuses métastases hépatiques au scanner.  Perte du cas ensuite.	Absence de complication	Non informé
	Y2 : CHC (masse de 7,4 x 7,8 x 7 cm ainsi qu'un nodule de 0,4 cm) et carcinome à cellules transitionnels de la			Suivi par chimiothérapie	1 mois : échographie sans anomalie  5 mois : absence de nodules hépatiques	Déhiscence des plaies cutanées à 2 jours	Non informé

	vessie. Chirurgie lobectomie hépatique du lobe moyen droit et carré, cystectomie partielle et ablation de 5 nodules hépatiques	Arrêt de la procédure : utilisation d'une sonde thermocouple avec température visée de 110 à 130°C.  Chemin de ponction cautérisé à plus de 70°C			12 mois : absence d'anomalie clinique  18 mois : légère hépatomégalie, absence de nodules  21 mois : infections urinaire intermittente, absence d'anomalie clinique liée au foie		
	Y3 : Hémangiosarcome splénique métastasé. Chirurgie de splénectomie et ablation de 6 nodules hépatique dont un hémorragique.		45 à 60 W pour 2 minutes sur 6 applications	Suivi d'une chimiothérapie	3 mois : un nodule rénal et de multiples nodules hépatiques  Mort de l'animal à 3 mois	Absence de complication	3 mois
	Y4 : Biopsies non conclusive en faveur d'un CHC avec une masse de 5,5 x 8,5 cm et multiples nodules. Chirurgie de lobectomie du lobe médiale droit, du lobe carré et de la partie latérale du lobe gauche, cholécystectomie et ablation de 2 nodules		65W pour 2 à 3 minutes sur 2 applications	Sortie deux jours après intervention	3 mois : absence d'anomalie à l'échographie.  10 mois : bon état général avec problèmes digestifs occasionnels	Absence de complication	Non informé
	Y5 : Hémangiosarcome métastasé. Chirurgie de lobectomie partielles des lobes latérales gauche, latéral droit, médial droit et ablation d'un nodule		65 W pour 3 minutes sur 1 applications	Sortie 2 jours après intervention	Euthanasie 45 jours après intervention du fait de l'inquiétude d'une mauvaise qualité de vie par la propriétaire.	Absence de complication	45 jours
(Dornbusch et al., 2020)	D1 : Métastase pulmonaire de 2,4 cm de diamètre d'ostéosarcome amputée 146 jours auparavant. Sous chimiothérapie carboplatine.	MO :  Guidage Échographique  Équipement Emprint ND (Covidien) avec refroidissement interne.	100 W pour 90 secondes.  Temps d'intervention : 1 heure	Sortie après 24 heures	3 semaines : amélioration clinique subjective  4 semaines : dégradation de l'état général, diagnostique de métastases osseuses sur épaule gauche et membre thoracique droit.  49 jours : Radiographies thoraciques montre de multiples masses thoraciques compatible avec des métastases et progression de la masse ayant reçu une ablation.	Léger pneumothorax sans nécessité d'intervention	82 jours : mort subite. Autopsie révèle une maladie métastatique sur 40 à 60 % des lobes pulmonaires, les os, les reins et le cerveau.
	D2 : Métastase pulmonaire de 5 x 5 x 6 cm d'ostéosarcome amputé 215 jours auparavant. Sous chimiothérapie carboplatine.	MO :  Guidage scanner Insertion d'une aiguille spinale 20G puis antenne.  Équipement Emprint ND (Medtronic) avec refroidissement interne.  Insertion modifiée une fois du fait de la proximité avec aorte	50 W pendant 10 ; 8,3 ; 2 ; 1,5 ; 1,5 minutes pour 5 applications  Temps d'intervention : 2 heures	Scanner : zone d'ablation de 5,9 x 5,9.  Sortie 2 jours après intervention	15 jours : Radiographies montrent une augmentation de la taille de la lésion pulmonaire.  19 jours : paraplégie d'apparition brutale.	Pneumothorax modéré, thoracocentèse retire 30 puis 600 mL d'air	19 jours : euthanasie

(Mazzaccari et al., 2017)	M1 : Métastase pulmonaire de 2 x 2,5 x 2,5 cm d'ostéosarcome amputé 197 jours auparavant associé à un syndrome de Cadiot-ball. Sous chimiothérapie carboplatine.	MO : Guidage vidéo par coelioscopie. Équipement Certus 140 ND (NeuWave Medical)	45 W pendant 3 minutes, 65W pendant 2 puis 3 minutes. Application de 12 mL de sang artériel frais appliqué sur zone d'ablation en prévention d'un pneumothorax.	Sortie après 24 heures	40 jours : bon état général, disparition des signes de syndrome paranéoplasique 69 jours : initiation d'une chimiothérapie à la doxorubicine. 116 jours : 4ème radiographie de contrôle sans modification de la taille de la lésion pulmonaire	Absence de complication	136 jours : arrêt cardio-respiratoire. Absence d'autopsie.
(Culp et al., 2017)	C1 : Carcinome rénal de 1,1 x 1,2 x 1,4 cm diagnostiqué à la cytologie	MO en percutané : Guidage échographique	Non informé	Non informé	24 mois : absence de récurrence	Absence de complication	Non informé
	C2 : Carcinome prostatique de 1 x 1 x 1,1 cm diagnostiqué par cytologie. Chirurgie de retrait de NL infiltré et ablation du nodule prostatique.	RF par laparotomie : Guidage échographique	Non informé	Non informé	1 mois : absence de récurrence	Absence de complication	Non informé
(Culp et al., 2021)	Cu1 : Nodule de 1,1 x 1,2 X 1,4 cm de ø, cytologie en faveur d'un carcinome. Antécédents de carcinome à cellules squameuses traité par chirurgie, chimiothérapie et radiation.	MO en percutané : Guidage par scanner et échographie Équipement Emprint ND (Medtronic), inséré à l'aide d'un cathéter et d'une combinaison gaine-dilatateur d'introduction. Générateur Becton, Dickinson and company	45W pendant 3 min afin d'obtenir une zone d'ablation de 2,5 cm de ø environ. Temps total : 92 minutes	Sortie le jour même.	8 contrôles en 2 ans. Le dernier contrôle montre une masse avasculaire de 0,9 cm de diamètre au niveau de la zone d'ablation.	Absence de complication	Non informé
	Cu 2 : Découverte fortuite d'une masse rénale de 2,2 x 2,5 x 2,5 cm non diagnostiqué		Hydrodissection (120 mL NaCl 0,9%) et aérodissection 30 mL du duodénum 45W ; 75W ; 60 W pour 3 minutes	Sortie 2 jours plus tard	3 mois : léthargie, échographie montre une masse avasculaire de taille légèrement diminuée, multiple nœuds lymphatiques hypertrophiés	Léger saignements subcapsulaires identifiés à l'échographe.	3 mois : euthanasie
(Kawamura et al., 2023)	K1 : Tumeur mammaire ulcérée hémorragique de 6 x 4 x 5 cm avec métastases pulmonaires	MO cutanée sous anesthésie locale Équipement Emprint ND (Medtronic) avec refroidissement interne	40 W pendant 2 à 3,5 min sur 3 ou 5 applications avec arrêt lorsque la couleur devient grise. Application de 40 W pendant 20 à 30 secondes sur le trajet d'insertion de la sonde.	Sortie après 24 heures	6 jours : Formation d'une croûte, diminution de la taille de la masse, absence de saignements 31 : Résection chirurgicale de la tumeur	Absence de complication	75 jours : insuffisance respiratoire provoqué par les métastases
	K2 : tumeur mammaire ulcérée hémorragique de 9 x 4 x 6 cm			Sortie après 24 heures	Jour 2 : formation d'une croûte Jour 8 : Diminution de la taille de la masse Jour 16 : Chute de la croûte Jour 38 : formation d'une cicatrice, absence d'odeur nauséabonde initiale 6 mois : Bon état général, absence de récurrence de saignement	Absence de complication	Non informé



# Annexe 2 : Matériels de radiofréquence présent sur le marché en 2022 (Bourrel, 2021)

Critères	MEDTRONIC		ABLATECH	BOSTON	ANGIODYNAMICS	VOMEDICA	OLYMPUS	STARMED	TERUMO
Nom du dispositif	OSTEOCOOL	COOL TIP	HS AMICA	RF 3000 LEVEEN/ SOLOIST	RF 1500X STARBUST / UNIBLATE	RF M-3004 / V-1000	CELON POWER	VIVA OCTOPUS / VIVA / STAR / ELRA / EUSRA	MESPPHERE
Polarité sonde	Bipolaire	Monopolaire	Monopolaire	Monopolaire	Monopolaire	Monopolaire/ Bipolaire/ mixte	Bipolaire/ multipolaire	Monopolaire/ Bipolaire	Monopolaire
Indications	Osseuse	Foie, rein, poumon, os	Foie, rein, poumon, thyroïde, os, fibrome utérin	Foie, rein, poumon, os	Foie, rein, poumon, os	Foie, rein, poumon, thyroïde, os, fibrome utérin, sein, adénomyose	Foie, rein, poumon, thyroïde, os, fibrome utérin, pancréas, adénome parathyroïdien, glandes surrénales	Foie, rein, poumon, thyroïde, os, fibrome utérin, sein, voies biliaires	Foie, rein, poumon, thyroïde, os, pancréas, prostate
Taille de tumeur maximale	2,9 cm	1 électrode : 3,1 x 3,7 cm 3 électrodes : 6,7 x 6,5 cm	4,1 x 3,3 cm	4 cm	7 cm	6,5 cm	9 cm	6 cm	4 cm
Durée d'ablation	6 à 15 min	6 à 25 min	10 à 30 min	10 à 30 min	5 à 15 min	12 min	2 à 36 min	2 à 30 min	40 min
Puissance maximale	Non informé	Non informé	200 W	200 W	250 W	Non informé	160 W	Non informé	150 W
Présence d'un refroidissement interne	Oui : eau stérile	Oui : NaCl	Oui : NaCl	Non	Oui : NaCl	Oui	Oui : NaCl	Oui	Oui : NaCl
Thermocouple	Externe uniquement	Externe uniquement	Externe et interne	Non	Interne uniquement	Interne uniquement	Non	Non	Externe et interne
Guidage compatible	Scanner, IRM	Échographie, scanner	Échographie, scanner	Échographie, scanner	Échographie, scanner, IRM	Échographie, scanner, IRM	Échographie, scanner, IRM	Échographie, scanner	Échographie, scanner
Électrodes compatibles	Droite : 17G, 0,7/1/2 cm actif, 2 max	Droite : 17G, 0,7 à 4 cm actif, 3 max	Droite : 17 ou 18G, 0,7 à 3,5 cm actif, 3 max	Droite : 16,5 G, 1 max Parapluie : 13 à 17 G, 8 à 14 baleines	Droite : 17G, 1 à 2,5 cm actif, 1 max Parapluie : 14 ou 17 G, 3 à 9 baleines	Droite : 18 ou 19G, 0,5 à 4 cm actif, 3 max	Droite : 15 ou 18G, 0,9 à 4 cm actif, 3 bipolaires max	Droite : 15, 17 ou 18G, 0,5 à 4 cm actif, 3 max	Droite : 16 à 19G, 0,5 à 3 cm actif, 1 max Parapluie : 15 ou 17 G, 8 baleines
Prix (€)	Générateur : non informé Sonde : 1600 € Introduceur : 257 € Thermocouple : 300€	Générateur : non informé Sonde : 710 € Thermocouple : 200€	Générateur : non informé Sonde : 690 €	Générateur : 28205€ Introduceur : 77€ Sonde : 640€ à 1000€	Générateur : non informé Sonde : 819€ à 834€	Générateur : 30000€	Générateur : 39300€ Sonde : 612€ à 972€	Générateur : 30700€ Sonde : 850€ à 1080€	Générateur : non informé Sonde : 800€

# Annexe 3 : Matériels de micro-ondes présent sur le marché en 2022 (Bourrel, 2021)

Critères	ANGIODYNAMICS	ABLATECH	TERUMO	MEDTRONIC	ETHICON	HDTECH	MEPY SYSTÈME
Nom du dispositif	SOLERO	HS AMICA	TATO	EMPRINT/THERMOSPHERE	CERTUS POWER	DOPHI M150E	ECO 200G
Indications	Foie, rein, poumon, os, sein	Foie, rein, poumon, os, thyroïde	Foie, rein, poumon, thyroïde, os, pancréas, prostate, sein	Foie, rein, poumon, os	Foie, rein, poumon	Foie, rein, poumon, thyroïde, os	Foie, rein, poumon, thyroïde, os, pancréas, prostate, sein, fibrome utérin, adénomyose, endométriose
Taille de tumeur maximale	50 mm	57 mm	70 mm	41 mm	40 mm	45 mm	55 mm
Durée d'ablation	2 à 6 min	3 à 15 min	2 à 15 min	45s à 10 min	5 à 10 min	3 à 15 min	5 à 15 min
Puissance maximale	140 W	140 W	60 W	100 W	140 W	150 W	100 W
Présence d'un refroidissement interne	NaCl	NaCl	Non	NaCl	CO2	NaCl	NaCl ou eau
Thermocouple	Interne uniquement	Externe et interne	Interne uniquement	Externe et interne	Interne uniquement	Externe et interne	Externe et interne
Guidage compatible	Échographie, scanner	Échographie, scanner	Échographie, scanner	Échographie, scanner, IRM	Échographie, scanner	Non informé	Échographie, scanner, IRM
Antennes compatibles	Calibre : 15 G 1 max Actif : Non informé	Calibre : 11, 14, 16, 17 et 18 G Simultané possible Actif : 1 à 3 cm	Calibre : 11, 14, 17 et 18 G 4 max Actif : Non informé	Calibre : 13 G 1 max Actif : Non informé	Calibre : 13, 15 et 17 G 3 max Actif : Non informé	Calibre : 15 G 2 max Actif : 2,6 et 3,1 cm	Calibre : 11, 14, 16 et 17 G 1 max Actif : Non informé
Prix (€)	Générateur : non informé Sonde : 890 €	Générateur : non informé Sonde : 990 à 1225€	Générateur : non informé Sonde : 1090 €	Générateur : non informé Sonde : 1250 €	Générateur : non informé Sonde : 1235 €	Générateur : non informé Sonde : 850 à 1800€	Générateur : non informé Sonde : 840 à 890 €

# ÉMERGENCE ET INTÉRÊT DE LA RADIOFRÉQUENCE ET DES MICRO-ONDES DANS L'ABLATION DE TUMEURS EN MÉDECINE VÉTÉRINAIRE

---

**AUTEUR : Orlane CELIER**

## **RÉSUMÉ :**

Le domaine de l'oncologie interventionnelle est en plein essor en médecine vétérinaire grâce aux avancées technologiques en imagerie et à la spécialisation de la pratique vétérinaire. La thermoablation est un exemple de thérapie qui se veut très attrayante de par sa large possibilité d'application et son coût relativement abordable comparé à d'autres thérapies telles que la radiothérapie. Dans ce contexte, il nous est paru important de faire état des lieux des connaissances que nous avons sur le sujet, c'est-à-dire son fonctionnement, mais également l'application qu'il en est fait en médecine humaine et les avancées réalisées en médecine vétérinaire à ce jour. Ce travail se limite à l'utilisation de la radiofréquence et des micro-ondes. L'objectif est donc de constituer une base de connaissance aux vétérinaires voulant ajouter la thermoablation à leur pratique. Le fonctionnement intrinsèque de l'ablation par radiofréquence et par micro-ondes est détaillé, permettant ainsi de comprendre le déroulement d'une procédure de thermoablation. De plus, est dressé un état des lieux de l'utilisation de ces deux procédés en médecine humaine, relatant ainsi les différentes indications, contre-indications et complications en fonction de l'organe touché. Enfin, une discussion est réalisée sur l'utilisation en médecine vétérinaire et son intérêt potentiel dans les années à venir.

## **MOTS CLÉS :**

RADIOFRÉQUENCE, MICRO-ONDES, ABLATION, TUMEUR THERMOABLATION, MÉDECINE VÉTÉRINAIRE, ONCOLOGIE, THÉRAPIE

## **JURY :**

Présidente : Pr Viateau Véronique  
Directeur de thèse : Pr Manassero Mathieu  
Examinateur : Dr Mortier Jérémy

# **EMERGENCE AND INTEREST OF RADIOFREQUENCY AND MICROWAVE IN TUMOR ABLATION IN VETERINARY MEDICINE**

---

**AUTHOR:** Orlane CELIER

## **SUMMARY:**

The field of interventional oncology is thriving in veterinary medicine, thanks to technological advancements in imaging and the specialization of veterinary practice. Thermoablation is an example of a therapy that is highly appealing due to its wide range of applications and relatively affordable cost compared to other therapies such as radiation therapy. In this context, it is important to provide an overview of our current knowledge on the subject, including its mechanism of action and its applications in human medicine, as well as the advancements made in veterinary medicine to date. This work focuses on the use of radiofrequency and microwaves. The objective is to create a knowledge base for veterinarians interested in incorporating thermoablation into their practice. The intrinsic workings of radiofrequency and microwave ablation are detailed, allowing for an understanding of the procedure's process. Additionally, an overview of the use of these two methods in human medicine is provided, including various indications, contraindications, and complications depending on the affected organ. Finally, a discussion is conducted on their potential use in veterinary medicine in the years to come.

## **KEYWORDS:**

RADIOFREQUENCY, MICROWAVE, TUMOR, ABLATION THERMOABLATION, VETERINARY MEDICINE, ONCOLOGY, THERAPY

## **JURY :**

Chairperson: Pr Viateau Véronique

Thesis Director: Pr Manassero Mathieu

Reviewer: Dr Mortier Jérémy