



HAL
open science

Évaluation de l'aération pulmonaire par la tomographie par impédance électrique en per et post-opératoire de chirurgie thoracique et association avec les complications pulmonaires

Maximilien Scherer

► To cite this version:

Maximilien Scherer. Évaluation de l'aération pulmonaire par la tomographie par impédance électrique en per et post-opératoire de chirurgie thoracique et association avec les complications pulmonaires. Médecine humaine et pathologie. 2020. dumas-03634997

HAL Id: dumas-03634997

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-03634997v1>

Submitted on 17 May 2022

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

AVERTISSEMENT

Cette thèse d'exercice est le fruit d'un travail approuvé par le jury de soutenance et réalisé dans le but d'obtenir le diplôme d'État de docteur en médecine. Ce document est mis à disposition de l'ensemble de la communauté universitaire élargie.

Il est soumis à la propriété intellectuelle de l'auteur. Ceci implique une obligation de citation et de référencement lors de l'utilisation de ce document.

D'autre part, toute contrefaçon, plagiat, reproduction illicite encourt toute poursuite pénale.

Code de la Propriété Intellectuelle. Articles L 122.4

Code de la Propriété Intellectuelle. Articles L 335.2 - L 335.10

UNIVERSITÉ DE PARIS

Faculté de Santé

UFR de Médecine

Année 2020

N° 124

THÈSE POUR LE DIPLÔME D'ÉTAT DE DOCTEUR EN MÉDECINE

Présentée et soutenue publiquement le : 08 octobre 2020

Par

Maximilien SCHERER

Evaluation de l'aération pulmonaire par la tomographie par impédance électrique en per et post-opératoire de chirurgie thoracique et association avec les complications pulmonaires

Dirigée par M. le Docteur Marc Garnier

JURY

M. le Professeur Christophe Quesnel

Président

M. le Professeur Jalal Assouad

Membre du jury

M. le Professeur Jean-Michel Constantin

Membre du jury

M. le Docteur Marc Garnier

Directeur

REMERCIEMENTS

Au président du jury.

Monsieur le Professeur Christophe Quesnel.

Je vous remercie de me faire l'honneur de présider mon jury de thèse. C'est dans votre service et avec vous que s'est dessiné ce projet de recherche. Je vous remercie vivement de l'accompagnement que vous m'avez apporté dans la concrétisation de ce travail et de la confiance que vous m'avez témoignée en m'accueillant au sein de votre équipe.

Au directeur de thèse.

Monsieur le Docteur Marc Garnier.

C'est toi qui m'as intégré à ce projet passionnant, c'est par ton enseignement riche et patient que j'ai pu me l'approprier, et c'est grâce à la rigueur de ton accompagnement et de tes corrections qu'il a pu prendre la forme de ce travail. Je te remercie de la confiance que tu me portes en me proposant de le poursuivre.

Aux membres du jury.

Monsieur le Professeur Jalal Assouad.

Je vous remercie de me faire l'honneur d'apporter votre regard sur ce travail s'intéressant directement au devenir de patients pris en charge conjointement au sein de votre service et de celui d'anesthésie réanimation, et qui n'a été possible que grâce à l'entière collaboration de l'ensemble de votre équipe.

Monsieur le Professeur Jean-Michel Constantin.

Je vous remercie de me faire l'honneur de juger ce travail. Vos travaux sur le recrutement alvéolaire et votre expérience de la tomographie par impédance électrique en ont été une grande source d'inspiration. J'espère que cette étude aura su éveiller votre intérêt.

A ma famille,

Mes parents, et leur indéfectible soutien depuis toujours. Tous mes accomplissements sont aussi les vôtres. Ma grand-mère, indispensable cocon de tendresse. Mylène et Claudio, qui sont famille depuis longtemps déjà. Mon petit frère, avec qui je ne me lasserai jamais de jouer. Mes oncles et tantes, que j'aimerais voir bien plus souvent. Mes cousins, qui ont longtemps été ce que j'avais de plus proche d'un frère ou d'une sœur, et restent aussi importants maintenant que j'en ai un. Et ceux qui ne sont plus là, que j'aurais aimé pouvoir garder plus longtemps.

A Alice, et ton soutien sans faille sur cette dernière ligne droite. Il y a des soirées qu'il ne fallait surtout pas rater.

A mes amis,

Simon, qui a été le premier, et que je compte garder encore longtemps. Victor, voisin immédiatement devenu ami. Les messins, ma deuxième famille. Le noyau dur, probablement indestructible. Mes amis de médecine, je n'imagine pas ces années sans vous. On a quand même bien rigolé. Et tous ceux d'ailleurs, que j'ai la chance de pouvoir appeler amis.

A ceux qui ont su marquer mon parcours, de la première année à l'internat, vous avez partagé votre passion, vos connaissances et vos qualités humaines. Si c'est par l'exemple qu'on se construit, merci d'avoir été le bon.

TABLE DES MATIERES

LISTE DES TABLEAUX ET FIGURES	6
LISTE DES ABREVIATIONS	8
INTRODUCTION	9
1. LES COMPLICATIONS ASSOCIEES A LA CHIRURGIE DE RESECTION PULMONAIRE	9
1.1 Épidémiologie.....	9
1.2 Complications pulmonaires post-opératoires	11
1.2.1 Définition	11
1.2.2 Physiopathologie	12
1.2.3 Facteurs de risque.....	13
2. CONSEQUENCES EN TERMES DE PRISE EN CHARGE	13
2.1 Anticiper les complications respiratoires	13
2.2 Cibler les interventions thérapeutiques.....	15
2.2.1 Le scanner thoracique.....	16
2.2.2 L'échographie pulmonaire	17
2.2.3 La tomographie par impédance électrique	18
3. LA TOMOGRAPHIE PAR IMPEDANCE ELECTRIQUE	19
3.1 Historique et principe biophysique.....	19
3.2 Utilisation en réanimation	22
3.3 Utilisation en anesthésie	23
4. OBJECTIFS DE L'ETUDE	24
METHODES	25
1. TYPE D'ETUDE.....	25
2. ASPECTS ETHIQUES ET REGLEMENTAIRES.....	25
3. PARTICIPANTS A L'ETUDE	25
4. DEROULEMENT DE L'ETUDE.....	26
4.1 Dispositif médical utilisé et étude de faisabilité	26
4.1.1 Dispositif médical utilisé.....	26
4.1.2 Étude de faisabilité	28
4.2 Étude clinique	29
4.2.1 Modalités de recueil des données.....	29
4.2.2 Modalités d'interprétation des données.....	30
4.2.3 Modalités de comparaison des données	32
4.2.4 Diagnostic d'une complication.....	33
5. CRITERES DE JUGEMENT.....	34
6. ANALYSE STATISTIQUE.....	34

RESULTATS	35
1. FAISABILITE.....	35
2. POPULATION ETUDIEE	36
3. INCIDENCE DE COMPLICATIONS POST-OPERATOIRES	39
4. CRITERE DE JUGEMENT PRINCIPAL : Δ TIV.....	40
5. CRITERES DE JUGEMENT SECONDAIRES	41
5.1 Valeur de TIV à un temps donné.....	41
5.1.1 TIV globale	41
5.1.2 TIV relative à chaque poumon	42
5.2 Valeur d'IR à un temps donné.....	43
5.3 Δ IR.....	44
5.4 Analyse en groupes à Δ IR inférieur ou supérieur à la médiane.....	45
DISCUSSION	47
1. SYNTHESE ET INTERPRETATION DES RESULTATS	47
1.1 Synthèse des résultats principaux	47
1.2 Justification du critère de jugement principal.....	47
1.3 Interprétation des résultats de l'étude.....	48
1.3.1 Evolution de l'aération pulmonaire au cours du temps	48
1.3.2 Mesures per-opératoires	49
2. GAINS POTENTIELS LIES A L'UTILISATION DE L'EIT EN PRATIQUE COURANTE	50
3. FORCES DE L'ETUDE	52
4. LIMITES DE L'ETUDE.....	52
4.1 Limites méthodologiques	52
4.2 Limites liées aux paramètres évalués	53
5. PERSPECTIVES FUTURES	54
CONCLUSION	56
BIBLIOGRAPHIE	57
ANNEXES	65
RESUME	70

LISTE DES TABLEAUX ET FIGURES

Figure 1 : répartition des complications post-opératoires de lobectomie pulmonaire	10
Figure 2 : évolution des complications post-opératoires de chirurgie thoracique au cours du temps	11
Figure 3 : A. Coupes scannographiques thoraciques montrant une perte d'aération des bases pulmonaires après l'induction d'une anesthésie générale. B. Représentation graphique des densités de l'ensemble des voxels composant le parenchyme pulmonaire	17
Figure 4 : corrélation entre image scannographique et image obtenue par échographie pulmonaire d'une condensation alvéolaire	18
Figure 5 : analyse des sols selon le profil de résistivité électrique.....	19
Figure 6 : positionnement de la ceinture d'électrodes du Pulmovista® 500	20
Figure 7 : exemple de reconstruction de l'image finale à partir de 4 profils d'impédance.....	21
Figure 8 : représentation graphique de la variation d'impédance au cours du temps	22
Figure 9 : moniteur d'EIT Pulmovista® 500 et positionnement de la ceinture d'électrodes... ..	27
Figure 10 : écran de surveillance du Pulmovista® 500.....	28
Figure 11 : séparation de la coupe thoracique en quatre quadrants (ROI) numérotés.	30
Figure 12 : représentation graphique du concept d'IR.....	32
Figure 13 : exemple de recueil de variation d'impédance en ventilation spontanée, avec présence d'un drain thoracique droit.....	35
Figure 14 : diagramme de flux de l'étude.	36
Figure 15 : comparaison des ΔTIV entre les groupes compliqués et non compliqués aux différents temps étudiés.....	41
Figure 16 : incidence de complications pulmonaires post-opératoires chez les patients avec ΔIR entre T3 et T1 inférieur ou égal à la médiane et supérieur à la médiane.	46

Tableau 1 : incidence des complications post-opératoires de chirurgie thoracique dans la littérature.	9
Tableau 2 : caractéristiques des patients inclus.....	38
Tableau 3 : détail des complications post-opératoires.	39
Tableau 4 : comparaison de l'évolution du changement d'impédance (ΔTIV) de chaque poumon du pré au post-opératoire entre les deux groupes.....	40
Tableau 5 : comparaison de la variation d'impédance (TIV) totale entre les deux groupes à chaque temps.	42
Tableau 6 : comparaison de la variation d'impédance (TIV) relative à chaque poumon entre les deux groupes à chaque temps.	43
Tableau 7 : comparaison la position du barycentre de ventilation (IR) entre les groupes à chaque temps.	44
Tableau 8 : comparaison de l'évolution du barycentre de ventilation (ΔIR) du pré au post-opératoire entre les deux groupes.....	45
Tableau 9 : association entre un déplacement de l'IR (ΔIR) inférieur ou supérieur à la médiane et survenue d'une CPP.....	46

LISTE DES ABREVIATIONS

ASA	American society of anesthesiologists
BPCO	broncho pneumopathie chronique obstructive
CoV	center of ventilation
CPAP	continuous positive airway pressure
CPNPC	cancer pulmonaire non à petite cellule
CPP	complication pulmonaire post-opératoire
CRF	capacité résiduelle fonctionnelle
CV	capacité vitale
DLCO	diffusion alvéolaire du monoxyde de carbone
DRA	détresse respiratoire aigue
EIT	electrical impedance tomography
GI	global inhomogeneity index
IC	intervalle de confiance
IR	impedance ratio
ITV	intratidal gas distribution
OR	odds ratio
PEP	pression expiratoire positive
RR	risque relatif
RVD	regional ventilation delay
SSPI	salle de surveillance post-interventionnelle
USC	unité de soins continus
VEMS	volume expiratoire maximal par seconde
VNI	ventilation non invasive
VO2	consommation d'oxygène

INTRODUCTION

1. LES COMPLICATIONS ASSOCIEES A LA CHIRURGIE DE RESECTION PULMONAIRE

1.1 Épidémiologie

La chirurgie thoracique avec résection pulmonaire expose les patients à de fréquentes et potentiellement graves complications. Aux premiers rangs de celles-ci se trouvent les complications pulmonaires (pneumonie post-opératoire, atélectasie nécessitant une intervention thérapeutique, syndrome de détresse respiratoire aiguë), les complications cardiovasculaires (fibrillation atriale, thrombose veineuse profonde et embolie pulmonaire, ischémie myocardique, insuffisance cardiaque post-opératoire), les complications chirurgicales (paralysie récurrentielle, fistule broncho-pleurale, fuites aériques prolongées, hémothorax) et les complications infectieuses (sepsis, empyème pleural, infection de cicatrice, etc.). La mortalité péri-opératoire de ce type de chirurgie se situe entre 2 et 6% selon les séries (1–3) et est dépendante, entre autres, de l'expertise et du volume d'activité du centre médico-chirurgical (4,5). L'incidence des complications post-opératoires varie elle aussi selon les études et se situe classiquement entre 15 et 50%. Cette variabilité inter-série s'explique par des définitions variables des complications post-opératoires, des types de chirurgie différents, ainsi que par des populations incluses dans ces séries hétérogènes (3,6–10).

Tableau 1 : incidence des complications post-opératoires de chirurgie thoracique dans la littérature.

Auteurs	Année	Type d'étude	Pourcentage de complications post opératoires
Uramoto <i>et al.</i>	2001	Prospective, 89 patients, CPNPC	41,2%
Stéphan <i>et al.</i>	2000	Méta-analyse, 260 patients	13 à 28%
Licker <i>et al.</i>	2006	Méta-analyse, 1239 patients	15,2 à 18,7%
Nakagawa <i>et al.</i>	2001	Rétrospective, 288 patients	32,3%
Bernard <i>et al.</i>	2001	Rétrospective, 639 patients, pneumectomie	43,2%

Dans le cas de la lobectomie pour cancer pulmonaire, les bases de données françaises (groupe EPITHOR) indiquent une incidence de complication post-opératoire de l'ordre de 34%, dominées par les complications pulmonaires (14,6% des patients), devant celles d'origine chirurgicale (13,8%), et largement devant les complications infectieuses et cardiovasculaires (4,1% et 5,5% respectivement ; **Figure 1**) (2). Ces complications pulmonaires sont principalement des atélectasies nécessitant une intervention thérapeutique et des pneumonies post-opératoires (11,12). Elles entraînent une majoration de la durée et du coût du séjour hospitalier, ainsi que de la mortalité péri-opératoire (3,13).

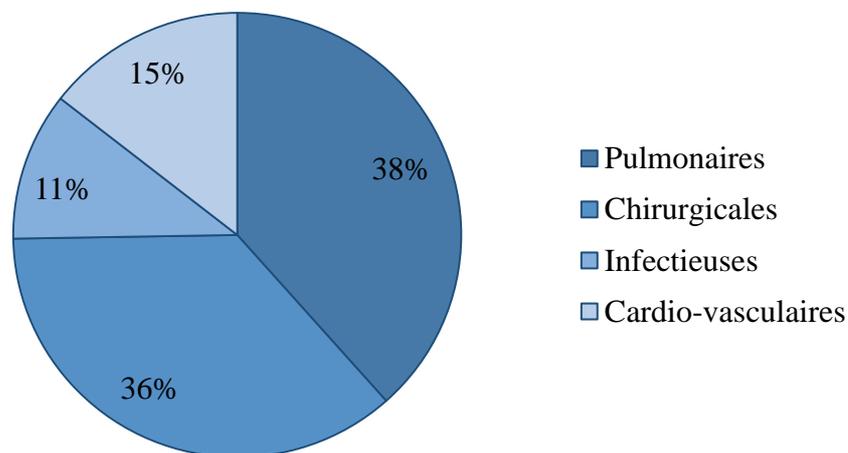


Figure 1 : répartition des complications post-opératoires de lobectomie pulmonaire, *d'après* (2).

Si avec l'évolution des techniques chirurgicales, l'amélioration de la sélection, de la préparation et de la prise en charge péri-opératoire des patients, l'incidence globale des complications a largement diminué au cours des trente dernières années, celle des complications pulmonaires reste globalement stable et au premier plan des préoccupations après une chirurgie de résection pulmonaire (14) (**Figure 2**).

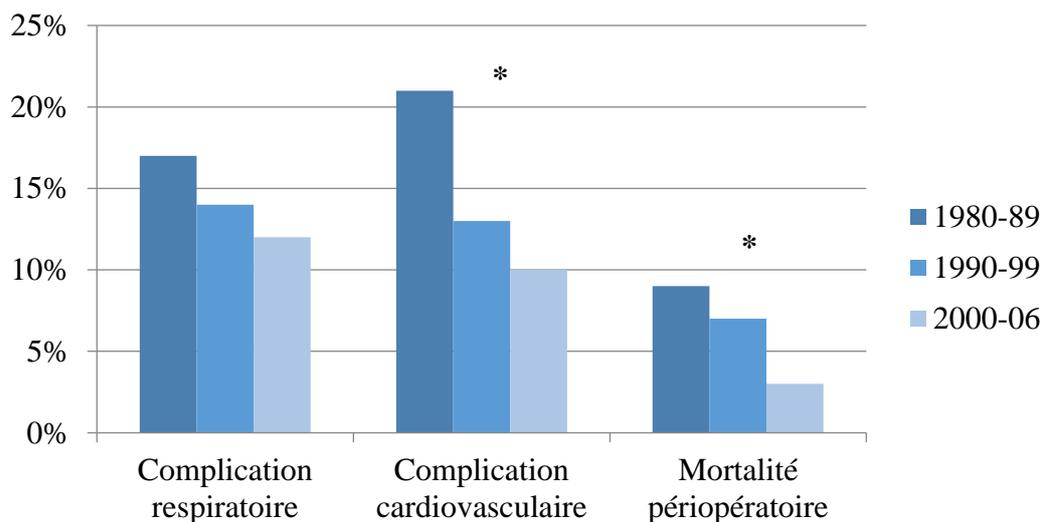


Figure 2 : évolution des complications post-opératoires de chirurgie thoracique au cours du temps, d'après (14). Une étoile indique une évolution significative au cours du temps.

1.2 Complications pulmonaires post-opératoires

1.2.1 Définition

La littérature propose un éventail hétérogène de définitions des complications pulmonaires post-opératoires (CPP). Si toutes les approches sont basées sur un retentissement anormal de la chirurgie sur la fonction pulmonaire, certains auteurs s'attachent à une définition clinique, d'autres à des critères principalement radiologiques, quand pour d'autres encore la complication se définit par des critères thérapeutiques : nécessité d'un traitement supplémentaire par rapport à la pratique habituelle (15). Ces différentes définitions amènent à inclure ou exclure certaines entités cliniques et peuvent modifier de manière importante la façon d'interpréter les résultats des études considérées.

Abbott *et al.* ont récemment proposé une définition la plus consensuelle possible des complications pulmonaires post-opératoires, basée sur un mécanisme physiopathologique commun, incluant l'atélectasie, la pneumonie et la détresse respiratoire, qui nécessitent une intervention thérapeutique (15). C'est cette définition qui sera utilisée dans le reste de ce manuscrit.

1.2.2 Physiopathologie

Les complications respiratoires post-opératoires de chirurgie thoracique résultent de la conjonction des effets délétères de l'anesthésie et de la chirurgie sur la fonction pulmonaire. Ces effets comprennent une diminution de la capacité vitale (CV) et donc un syndrome restrictif ; une diminution de la capacité résiduelle fonctionnelle (CRF) liée à un collapsus alvéolaire ; une dysfonction diaphragmatique.

L'anesthésie générale du patient en décubitus entraîne un affaissement du thorax vers le bas et un déplacement céphalique du diaphragme (16). Ces deux phénomènes entraînent une diminution rapide de la CRF pouvant atteindre jusqu'à 30%, qui lorsqu'elle passe en-dessous du volume de fermeture des petites bronches provoque un collapsus alvéolaire, à l'origine de la formation d'atélectasies (17). La ventilation unipulmonaire rajoute le risque de lésions par volo et baro-traumatisme, ainsi que d'inévitables lésions d'ischémie-reperfusion de sévérité corrélée à la durée d'exclusion (18).

La chirurgie entraîne une diminution de la CV par deux mécanismes : 1) la douleur post-opératoire, entraînant une gêne à l'ampliation thoracique, et 2) la dysfonction diaphragmatique. Cette dernière semble être principalement causée par le délabrement musculaire pariétal mais aussi par une inhibition réflexe de la conduction phrénique suite à la manipulation viscérale (19). Ces deux mécanismes sont cependant intriqués, la douleur ayant été mise en évidence comme une des causes de la dysfonction diaphragmatique (20). Cette dysfonction persiste classiquement au moins jusqu'au troisième jour post-opératoire, même en l'absence de retentissement radio-clinique identifié (21).

Cette perte d'aération pulmonaire, associée aux manipulations chirurgicales du poumon et aux micro-inhalations per et post-opératoires (12) fait le lit des complications pulmonaires telles que l'atélectasie et la pneumonie post-opératoires.

1.2.3 Facteurs de risque

De nombreuses études se sont attachées à identifier les facteurs de risque associés aux CPP, qui peuvent être divisés en deux groupes : les facteurs de risque liés au patient, et ceux liés à la chirurgie. Aux premiers rangs des facteurs liés au patient se trouvent le score ASA, le tabagisme actif, le VEMS prédit post-opératoire, la DLCO, la VO₂ max, le test de marche de 6 minutes ; et au premier rang des facteurs liés à la chirurgie, le type et la durée de chirurgie ainsi que la durée de ventilation per-opératoire (6,22–25). Ces facteurs de risque, parfois regroupés en scores (26), sont très majoritairement utilisés pour peser la balance bénéfice-risques de la chirurgie et conclure à l'opérabilité ou non du patient, et pour l'informer de la manière la plus loyale possible sur ses risques péri-opératoires.

2. CONSEQUENCES EN TERMES DE PRISE EN CHARGE

2.1 Anticiper les complications respiratoires

Les atélectasies et pneumonies post-opératoires entraînent un risque de 30 à 50% de développer une détresse respiratoire nécessitant le recours à la ventilation mécanique (27), elle-même associée à un risque de mortalité de 30% à 70% selon les études (28,29). La pneumonie est également indépendamment associée à un risque de surmortalité (28), et pneumonie et atélectasie sont indépendamment associées à une augmentation de la durée (3) et du coût (13,30) du séjour. Réduire la perte d'aération pulmonaire, dans l'optique de diminuer la survenue des complications post-opératoires est donc un objectif fondamental de la prise en charge per et post-opératoire des patients de chirurgie thoracique.

Certains facteurs de risque, tel que la douleur, le tabagisme actif ou la dénutrition sont évitables, et ont fait l'objet d'interventions ciblées dans le cadre de programmes de réhabilitation pré et post-opératoire (31), participant à la baisse de la morbi-mortalité de la chirurgie de résection pulmonaire au cours des vingt dernières années. D'autres, tels que la ventilation unipulmonaire et la manipulation chirurgicale du poumon, directement à l'origine de la perte d'aération, ne le sont pas complètement. Des interventions thérapeutiques visant à optimiser la ventilation alvéolaire au niveau du poumon mal aéré sont donc nécessaires.

La kinésithérapie respiratoire, incluant les exercices de spirométrie incitative, et s'inscrivant dans des programmes de réhabilitation multimodaux, a montré son intérêt dans cette indication. Son bénéfice est réaffirmé dans une méta-analyse récente (32). De même, l'efficacité des stratégies de ventilation protectrice au bloc opératoire n'est plus à démontrer (33). Il persiste néanmoins dans la série française de Thomas *et al.* 15% environ de complications pulmonaires (2), malgré la généralisation de la kinésithérapie post-opératoire. D'autres techniques améliorant l'aération pulmonaire sont donc nécessaires.

L'utilisation d'une PEP extrinsèque et l'application de manœuvres de recrutement alvéolaire régulières en per-opératoire ont montré leur efficacité dans des populations de patients de chirurgie thoracique dans la prévention des CPP (33–37). En revanche, en post-opératoire, l'application d'une pression positive à un niveau de pression (CPAP) visant à lever le collapsus alvéolaire, ou à deux niveaux de pression (VNI) visant à lever le collapsus ainsi qu'à compenser la dysfonction diaphragmatique ont montré des résultats divergents en terme d'efficacité. La majorité des études ont inclus de petits effectifs de patients et rapportent des résultats négatifs sur la survenue de CPP (38–42). Le groupe Cochrane a réalisé en 2015, puis mis à jour en 2019, une méta-analyse incluant 8 des 9 études randomisées existantes à ce sujet (43). Cette analyse quantitative de la littérature met en évidence que l'utilisation de la VNI préventive en post-opératoire de chirurgie de résection pulmonaire n'est efficace ni sur la survenue de complications pulmonaires (5 études, RR 1.03; 95%IC 0.72-1.47), ni sur le taux de ré-intubation (3 études, RR 0.55; 95%IC 0.25-1.20), ni sur la durée de séjour hospitalière (4 études, -0.12 jours; 95%IC -6.15-5.90), ni sur la mortalité (5 études, RR 0.60; 95%IC 0.24-1.53). Des résultats similaires sont obtenus en considérant l'utilisation de la CPAP en post-opératoire (43). Une étude ultérieure à la publication des travaux du groupe Cochrane est cependant discordante : Palleschi *et al.* montrent en effet un bénéfice de la CPAP pour la réduction des complications post-opératoires de lobectomie. Il s'agit toutefois d'une réduction d'incidence du critère de jugement composite, pour lequel l'analyse en sous-groupes ne montre de différence que sur la survenue de fuites aériques prolongées ou d'évènements cardiovasculaires, mais pas sur la survenue de CPP (44).

En revanche, la VNI est efficace pour diminuer le recours à la ré-intubation en cas de survenue d'une complication respiratoire telle que l'atélectasie (45), l'hypoxémie ou la détresse respiratoire. Ainsi, Auriant *et al.* ont démontré que la VNI administrée par un masque facial en cas de survenue de DRA en post-opératoire de résection pulmonaire diminuait le

taux de ré-intubations (21% vs. 50%, $p=0,035$), et de mortalité (12,5% vs. 37,5%, $p=0,045$) en comparaison au traitement par oxygène seul (46). Ces données ont été confirmées dans une étude prospective non randomisée de plus grand effectif ayant suivi 690 patients à risque de complications respiratoires post-opératoires de chirurgie thoracique, dont 113 ont développé une DRA post-opératoire, et pour lesquels la VNI a permis d'éviter la ré-intubation dans 85% des cas (47).

Ces résultats différents en cas d'utilisation de la VNI en préventif ou en curatif sont au moins partiellement expliqués par la différence de population considérée. En effet, l'administration de séances de pression positive à une population non sélectionnée de patients opérés du poumon ne montre pas de bénéfice car ces patients se subdivisent probablement en sous-groupes. D'une part, ceux qui ne présentent pas ou peu de perte d'aération pulmonaire et qui ne bénéficient probablement pas de la technique et d'autre part, ceux qui présentent une perte d'aération pulmonaire relativement conséquente, qui sont les plus à risque de CPP, qui en bénéficieraient probablement davantage.

2.2 Cibler les interventions thérapeutiques

Il est donc probable que l'utilisation des techniques de pression positive en post-opératoire de chirurgie thoracique doit être évaluée après sélection des patients les plus susceptibles d'en bénéficier. Cette stratégie de sélection des patients est par ailleurs renforcée par les limites en termes de moyens matériels et humains à la généralisation à tous les patients de ces techniques relativement complexes et nécessitant un matériel adapté mais surtout une présence médicale et paramédicale accrue. Deux approches sont alors possibles : sélectionner les patients sur la base d'un score de risque clinique pré-opératoire, possiblement similaire ou proche de ceux utilisés pour prédire l'opérabilité, ou les sélectionner sur un facteur de risque physiopathologique majeur de CPP, la perte d'aération pulmonaire post-opératoire. En effet, la survenue d'une atélectasie, d'une pneumonie ou d'une détresse respiratoire est un phénomène évolutif, pour lequel la perte d'aération qui en fait le lit est probablement détectable avant tout retentissement clinique significatif.

Peu d'études existent en rapport avec la première approche. Elle ne semble en tout cas pas montrer son efficacité dans un sous-groupe de patients particulièrement à risque dans une étude randomisée de grand effectif ayant inclus des patients BPCO opérés de résection pulmonaire majeure, dans laquelle il n'existait pas d'effet préventif de la VNI sur la survenue de complications respiratoires post-opératoires (360 patients, 31,5% dans le groupe VNI vs. 30,7% dans le groupe contrôle, $p=0,93$), de survenue d'une détresse respiratoire aiguë (18,8% vs. 24,5%, $p=0,20$), de ré-intubations (5,5% vs. 7,2%, $p=0,53$), ou de mortalité (2,2% vs. 5%, $p=0,16$) (48).

La deuxième approche conduit à poser la question de l'outil d'évaluation précoce et répétée de l'aération pulmonaire du patient, c'est-à-dire du potentiel dérecrutement alvéolaire post-opératoire persistant et de son association avec les complications pulmonaires post-opératoires. Plusieurs techniques sont alors envisageables. A ce jour sont validés dans la littérature pour évaluer le recrutement alvéolaire (en dehors des patients de chirurgie thoracique) le scanner thoracique (considéré comme la méthode de référence), l'échographie pleuro-pulmonaire et la tomographie par impédance électrique (49–51).

2.2.1 Le scanner thoracique

Depuis ses premières utilisations dans cette indication au milieu des années 1980, le scanner thoracique est considéré comme la méthode de référence pour l'évaluation de l'aération pulmonaire (52). Cette technique combine une estimation visuelle rapide sur les images reconstruites, ainsi qu'un calcul fin de la composition aérique, tissulaire ou hydrique de chaque unité spatiale scannographique, appelée voxel. La densité de chaque voxel, exprimée en unités Hounsfield et reflétant le degré d'absorption des rayons ionisants, reflète sa composition. La somme des densités de tous les voxels composant le parenchyme pulmonaire reflète alors son niveau d'aération globale. Le même raisonnement est applicable sur de plus petites zones d'intérêt (53) (**Figure 3**).

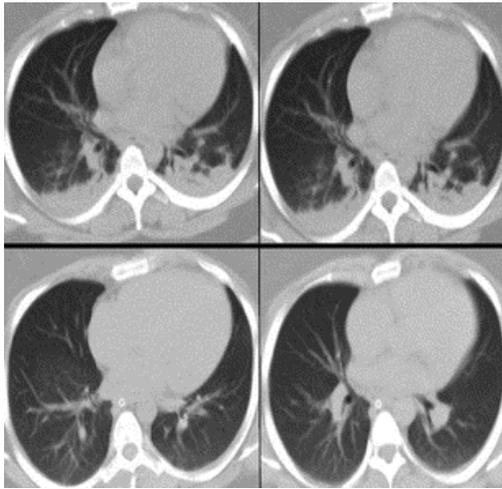
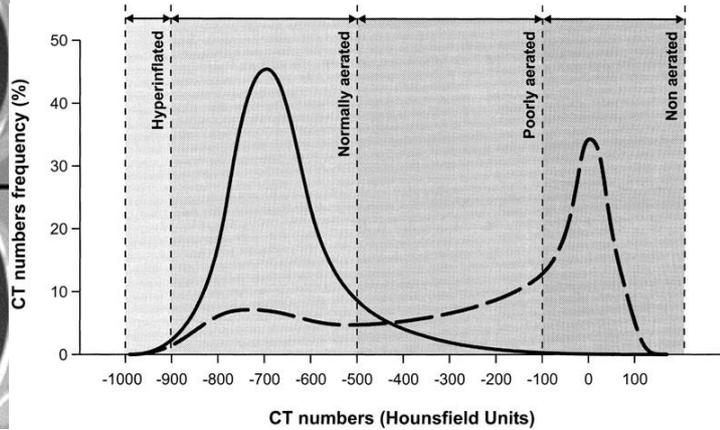
A.**B.**

Figure 3 : **A.** Coupes scannographiques thoraciques montrant une perte d'aération des bases pulmonaires après l'induction d'une anesthésie générale, *d'après* (54). En bas en ventilation spontanée, en haut après induction anesthésique. **B.** Représentation graphique des densités de l'ensemble des voxels composant le parenchyme pulmonaire, *d'après* (52). La courbe pointillée montre un parenchyme mal aéré.

Le scanner thoracique a largement contribué à la personnalisation de la prise en charge des syndromes de détresse respiratoire aiguë en réanimation et permet de distinguer les patients à risque d'hyperinflation de ceux pouvant bénéficier des manœuvres de recrutement alvéolaire (55). S'il s'agit également de la technique de référence dans les études péri-opératoires, notamment pour évaluer les bénéfices de la ventilation protectrice, cette technique n'est pas utilisable en pratique courante pour de larges volumes de patients en post-opératoire de chirurgie lourde en raison de la disponibilité de l'outil, de la nécessité d'y déplacer le malade, de son caractère irradiant et de son coût.

2.2.2 L'échographie pulmonaire

L'échographie pulmonaire ne présente pas les désavantages du scanner cités ci-dessus et pourrait être utilisée pour évaluer le dérecrutement post-opératoire. Cet examen est en effet réalisable au lit du patient, non irradiant, et peut être répété autant de fois que nécessaire. Son utilisation a été validée en réanimation pour évaluer l'aération pulmonaire (**Figure 4**) et guider le recrutement alvéolaire comparativement au scanner (56,57) et semble pertinente en post-opératoire de chirurgie lourde non thoracique pour diagnostiquer les consolidations alvéolaires (58).

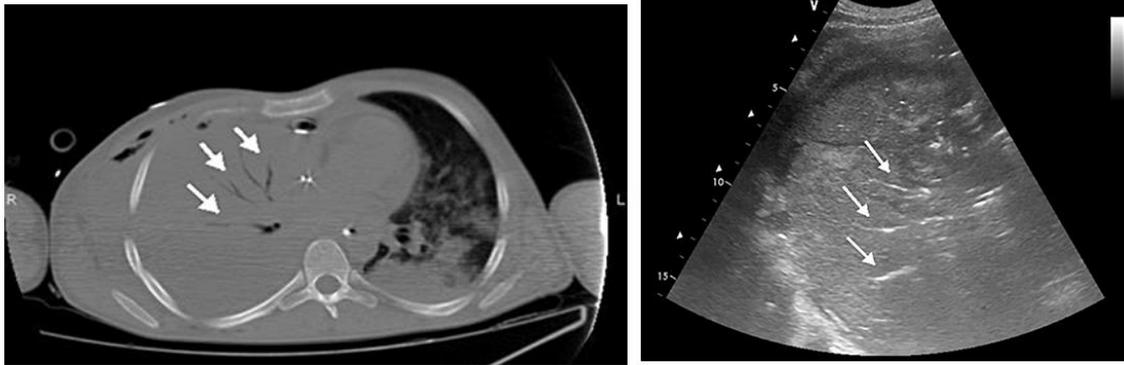


Figure 4 : corrélation entre image scannographique (à gauche) et image obtenue par échographie pulmonaire (à droite). Dans les deux cas, visualisation d’une condensation alvéolaire avec bronchogramme aérique (*flèches blanches*). D’après (59).

L’utilisation de l’échographie en post-opératoire de chirurgie thoracique se révèle en revanche potentiellement complexe en raison de la qualité des images obtenues sur le poumon opéré du fait de la présence des drains thoraciques, d’un fréquent emphysème sous-cutané post-opératoire et d’un bullage post-opératoire. Ces réserves, combinées à l’absence de possibilité d’un monitoring continu du patient, constituent des limites à son utilisation en post-opératoire de chirurgie thoracique.

2.2.3 La tomographie par impédance électrique

Une autre technique d’imagerie, la tomographie par impédance électrique (EIT), basée sur la diffusion de courants électriques de faible intensité au travers d’un tissu biologique, connaît un essor rapide dans le domaine de la lésion pulmonaire aiguë et de la ventilation artificielle. Cette technique permet une évaluation en temps réel, reproductible, non irradiante et réalisable au lit du patient de l’aération pulmonaire.

3. LA TOMOGRAPHIE PAR IMPEDANCE ELECTRIQUE

3.1 Historique et principe biophysique

La première utilisation de la tomographie par impédance électrique (EIT) date des années 1930, appliquée dans le domaine de l'analyse des sols, basée sur le principe de résistivité électrique par émission-détection de courants continus en profondeur (**Figure 5**).

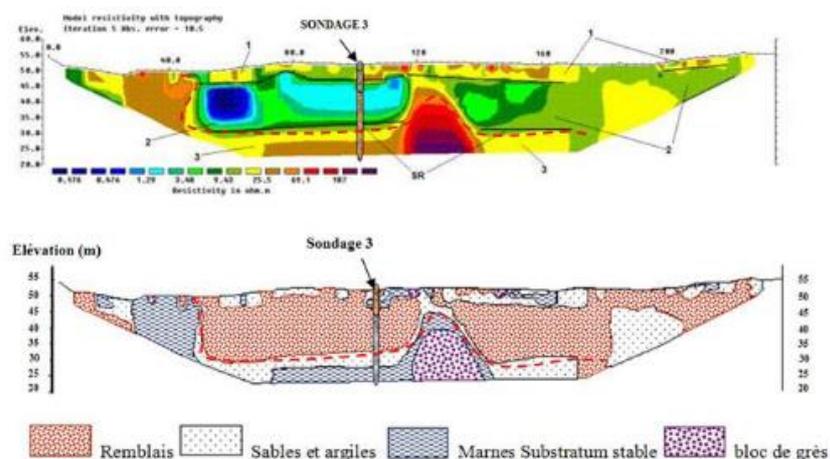


Figure 5 : analyse des sols selon le profil de résistivité électrique différent de chaque strate géologique. *D'après (60)*.

Sa première utilisation en médecine date du début des années 1980. Du fait de sa résolution spatiale initialement limitée, de la complexité de l'interprétation des données ainsi que de la difficulté technique d'utilisation, l'EIT est longtemps restée au stade d'expérimentation animale ou sur volontaires humains sains, jusqu'aux années 2000 où les progrès techniques et technologiques ont favorisé son utilisation en situation clinique. Un vif intérêt de la communauté médicale, notamment en soins critiques, a alors conduit à une émergence rapide et continue de travaux de recherche et de nouvelles applications possibles de l'EIT.

Le principe de fonctionnement est le même que pour celui de l'analyse des sols, mais utilise un courant alternatif, et s'intéresse donc à la mesure de l'impédance (ici bio-impédance), du système. L'impédance des tissus biologiques varie selon leur teneur en ions libres. Le poumon aéré conduisant environ 5 fois moins le courant que le reste des tissus (ayant donc une plus forte impédance), est particulièrement adapté à l'évaluation par la technique d'EIT. La reconstruction du contenu intra-thoracique en fonction de la bio-impédance de chaque structure suit le même principe que pour la tomographie par densité. Une ceinture de 16 électrodes est positionnée autour du thorax, puis une paire d'électrodes émet un courant alternatif d'intensité connue et les 13 paires d'électrodes restantes mesurent la tension de surface résultante après passage au sein des tissus. Ce processus est répété 15 autres fois en décalant d'un cran la paire d'électrodes émettrices à chaque mesure (**Figure 6**).

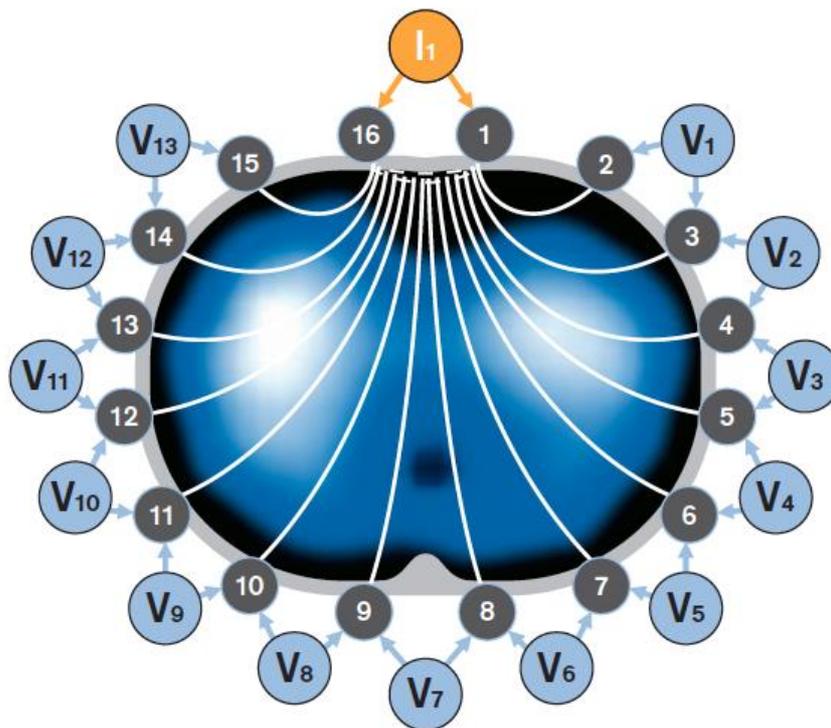


Figure 6 : positionnement des 16 électrodes autour du thorax. Le courant I sera ensuite émis entre les électrodes 1 et 2 et réceptionné par les électrodes 3 à 16, et ainsi de suite tout autour de la ceinture. *D'après (61).*

L'impédance régionale est calculée à partir de l'intensité connue du courant et de la mesure de la tension en surface selon la loi d'Ohm : $U = Z.I$. Les tensions mesurées en surface seront les plus élevées soit à proximité des électrodes émettrices, soit en aval d'une zone d'augmentation régionale d'impédance, comme le poumon aéré, se traduisant par une image blanche ou bleue en représentation visuelle. Les zones à faible tension de surface, traduisant le passage par un tissu de faible impédance, sont représentées en noir. Une seule série de mesure, soit une seule image représentant un profil d'impédance thoracique, ne reflète que le « point de vue » depuis une seule paire d'électrodes. Un tour complet d'électrodes (16 séries de mesure) permet en revanche d'obtenir 208 mesures de tension, soit 16 images, ensuite superposées pour reconstruire une coupe transversale reflétant la réalité de la bio-impédance intra-thoracique (**Figure 7**).

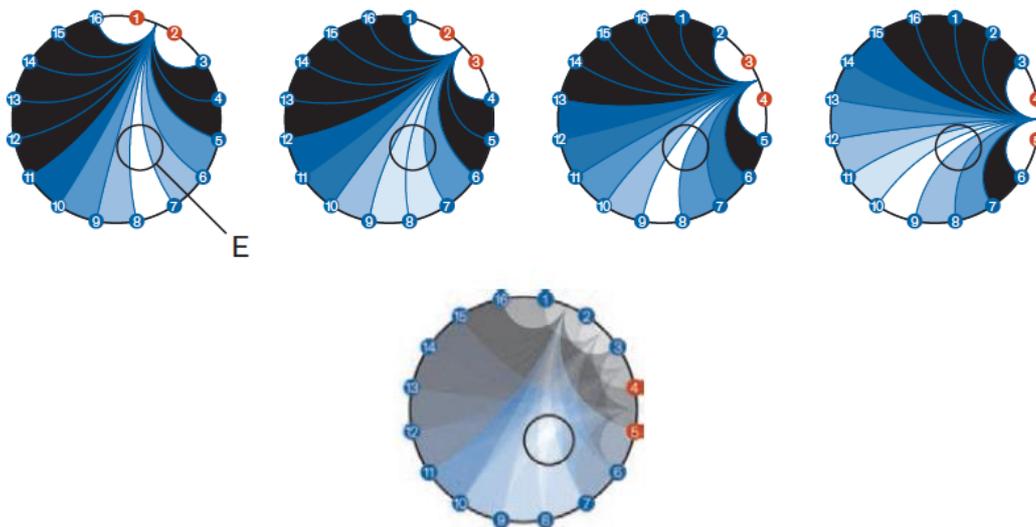


Figure 7 : exemple de reconstruction de l'image finale à partir de 4 profils d'impédance correspondant à 4 paires d'électrodes émettrices. E : zone d'augmentation régionale d'impédance. Dans la pratique la reconstruction se fait avec 16 profils superposés. *D'après (61).*

L'intérêt majeur de l'EIT est sa capacité à fournir des informations en temps réel par mesure dynamique de la variation d'impédance intra-thoracique (acquisition de jusqu'à 50 images par seconde). Chez l'être humain sain, l'inspiration profonde amplifie la bio-impédance régionale pulmonaire d'environ 300% (62). Par comparaison l'activité cardiaque et la perfusion pulmonaire ne la font varier que d'environ 3% (63). Il est ainsi possible de visualiser la variation d'impédance au sein de chaque cycle respiratoire, entre deux cycles consécutifs, ou entre deux mêmes temps du cycle respiratoire à plusieurs minutes d'intervalle (**Figure 8**). Ces informations sont cruciales dans la mesure où les variations d'impédance liées à la ventilation ont été corrélées de manière fiable et reproductible aux volumes courant d'une part (64,65), et au volume pulmonaire de fin d'expiration d'autre part (66).

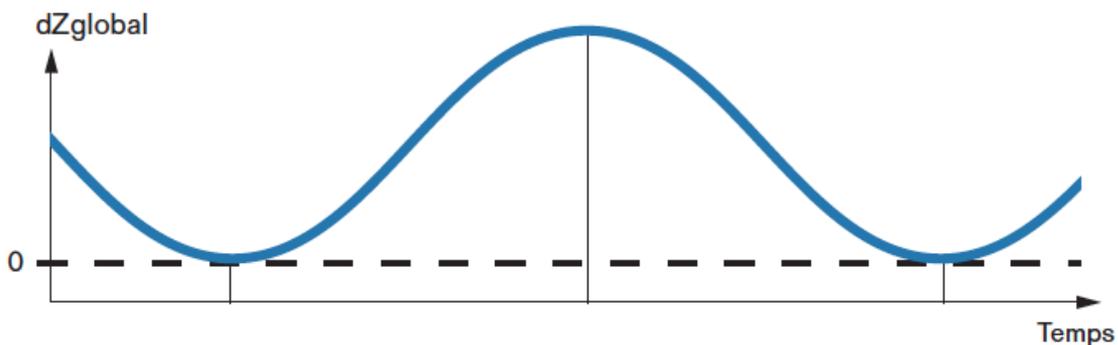


Figure 8 : représentation graphique de la variation d'impédance au cours du temps (dZ), ici un cycle respiratoire, corrélée à la variation de volume pulmonaire. *D'après (61).*

3.2 Utilisation en réanimation

Les premières utilisations de l'EIT en anesthésie-réanimation, et la majorité des travaux de recherche par la suite, ont eu lieu en soins critiques. La technique a été utilisée pour évaluer le dérecrutement pulmonaire liée au SDRA (67), à l'épanchement pleural (68), ou aux aspirations endotrachéales (69). Par la suite, l'EIT a montré son efficacité pour guider le titrage de la PEP, améliorer le recrutement alvéolaire en situation de SDRA et individualiser la prise en charge en détectant les patients à risque ou déjà en situation d'hyperinflation thoracique (70–72). Des données récentes suggèrent également la possibilité pour la technique de prédire la réponse au recrutement dans le SDRA, par détermination du profil focal ou non de l'atteinte pulmonaire (73,74).

3.3 Utilisation en anesthésie

L'utilisation de l'EIT en per et post-opératoire reste à ce jour rare. La technique a été utilisée pour monitorer les effets pulmonaires de l'anesthésie et du pneumopéritoine en chirurgie abdominale (75) ainsi que pour guider l'optimisation de la PEP par évaluation de la distribution de la ventilation en per-opératoire de chirurgie abdominale (76). Karsten *et al.* ont utilisé le concept de rapport d'impédance (IR), correspondant à la contribution relative du poumon dépendant à la ventilation totale, et dont l'évolution sous anesthésie générale au cours d'une chirurgie abdominale est bien corrélée à la perte d'aération pulmonaire due au collapsus des bases (77). Chun *et al.* ont récemment confirmé ces résultats et démontré la pertinence de l'IR pour monitorer l'effet en terme de recrutement alvéolaire de l'application d'une PEP per-opératoire en chirurgie gynécologique robotique (78). Cet indice avait également montré sa fiabilité dans le monitoring du recrutement alvéolaire au cours du SDRA (79).

Très peu d'études en revanche ont évalué l'intérêt de l'EIT pour mesurer la perte d'aération pulmonaire chez les patients de chirurgie thoracique. Un *case-report* d'utilisation de l'EIT en pré et post-opératoire de lobectomie chez un enfant de 6 ans rapporte une bonne corrélation avec la radiographie thoracique (80). Une série de 5 cas d'utilisation en per-opératoire de transplantation unipulmonaire a rapporté une meilleure distribution du volume courant dans le poumon greffé que dans le poumon malade restant (81). Enfin, une série de 10 patients opérés de résection pulmonaire évalués par EIT a mis en évidence une distribution inhomogène du volume courant sur le poumon ventilé au cours de la ventilation unipulmonaire (82). A ce jour, aucune étude n'a suivi une cohorte de grand effectif ni n'a évalué l'EIT comme outil de mesure du dérecrutement alvéolaire durant la période per puis post-opératoire chez les patients de chirurgie thoracique.

4. OBJECTIFS DE L'ETUDE

L'objectif principal de cette étude est d'évaluer la perte d'aération pulmonaire per et post-opératoire spécifique aux patients de chirurgie thoracique opérés sous ventilation unipulmonaire à l'aide de la tomographie par impédance électrique, et de rechercher une association entre cette perte d'aération et la survenue de complications pulmonaires post-opératoires.

L'objectif secondaire de cette étude est de confirmer la faisabilité du monitoring pré, per et post-opératoire de l'EIT sur une large cohorte de patients de chirurgie thoracique.

METHODES

1. TYPE D'ETUDE

Il s'agit d'une étude prospective observationnelle monocentrique réalisée dans le service d'anesthésie-réanimation et l'unité de soins continus post-opératoires de l'hôpital Tenon (APHP.6 Sorbonne Université, DMU DREAM, Hôpital Tenon, Paris, France).

2. ASPECTS ETHIQUES ET REGLEMENTAIRES

Tous les patients ont reçu une information orale et écrite expliquant l'objet de l'étude et la possibilité de s'opposer à l'utilisation de leurs données (Annexe A).

Le protocole a reçu un avis favorable du Comité de Protection des Personnes Sud Est V (N° ID RCB 2018-A02419-46 - Annexe B).

Le recueil de données a été réalisé après anonymisation des patients et a fait l'objet d'une déclaration à la Commission Nationale de l'Informatique et des Libertés, CNIL 2205847v0 (Annexe C).

3. PARTICIPANTS A L'ETUDE

La population concernée par l'étude était les patients opérés de résection pulmonaire sous ventilation per-opératoire uni-pulmonaire.

Les critères d'inclusion étaient :

- tout patient majeur ;
- opéré d'une résection pulmonaire par vidéo-thoracoscopie et/ou thoracotomie, nécessitant une ventilation uni-pulmonaire ;
- ne s'étant pas opposé à sa participation à cette étude non-interventionnelle.

Les critères de non inclusion étaient :

- patient mineur ;
- patient sous tutelle ou curatelle ;
- patient opéré de chirurgie thoracique sans résection pulmonaire ;
- patient opéré de résection pulmonaire sans ventilation uni-pulmonaire ;
- patient opéré de résection pulmonaire en ambulatoire ;
- refus de participation à l'étude.

Les critères d'exclusion étaient :

- aucun enregistrement EIT finalement analysable ou exploitable ;
- patient porteur d'un dispositif implantable type pacemaker, défibrillateur, ou stimulateur intracérébral profond (contre-indication de la technique en raison du risque d'interférence électrique).

4. DEROULEMENT DE L'ETUDE

L'utilisation de l'EIT pour évaluer les volumes pulmonaires en post-opératoire de chirurgie thoracique n'a à ce jour jamais été évaluée. Notre étude a donc comporté deux étapes :

- une première étape de validation de la faisabilité de la mesure et de l'interprétation des résultats dans cette population particulière sur une cohorte de 10 patients.
- une deuxième étape correspondant à l'étude clinique évaluant la perte d'aération post-opératoire et sa corrélation avec les complications pulmonaires.

4.1 Dispositif médical utilisé et étude de faisabilité

4.1.1 Dispositif médical utilisé

Les mesures de tomographie par impédance électrique ont été réalisées à l'aide de l'appareil Pulmovista® 500, commercialisé par la société Dräger (Lübeck, Allemagne). Il s'agit d'un dispositif médical avec marquage CE, déjà commercialisé et utilisé en pratique clinique dans de nombreux centres. Aucune complication locale ou générale en rapport avec l'utilisation de cette technique non-irradiante n'a à ce jour été rapportée. La ceinture de 16 électrodes était

positionnée entre le 4^{ème} et le 5^{ème} espace intercostal au niveau de la ligne médio-claviculaire, en accord avec les données de la littérature (83) (**Figure 9**). Son impact sur la peau lors d'un appui prolongé est comparable à celui d'un drap (61). Le moniteur permettant le paramétrage de l'enregistrement et l'acquisition des données est mobile et s'apparente à une interface de ventilateur (**Figure 9**).



Figure 9 : moniteur d'EIT Pulmovista[®] 500 (à gauche) et positionnement de la ceinture d'électrodes (à droite). *D'après (61).*

Les enregistrements de la ventilation pulmonaire (i.e. des variations d'impédance) à l'aide du Pulmovista[®] 500 peuvent être effectués en continu pour une durée maximale de 2h, subdivisible en tranches paramétrables de 30 secondes à 10 minutes. Des repères temporels légendés peuvent être ajoutés au cours de l'enregistrement. L'intégralité des données est ensuite visualisable sur l'appareil ou sur ordinateur par transfert USB. Le fichier ainsi obtenu sur ordinateur comporte à la fois les données chiffrées cycle par cycle ainsi que leur représentation graphique. Dans notre étude, chaque enregistrement a été référencé par la saisie du numéro d'anonymisation du patient.

La variation d'impédance intra-thoracique en fonction des cycles respiratoires est visualisable en temps réel sur l'écran de surveillance par une image dynamique correspondant à une coupe transversale du thorax et par une représentation graphique des variations d'impédance à chaque cycle. La coupe thoracique peut être divisée en régions d'intérêt, permettant de visualiser la représentation graphique de la variation d'impédance régionale.

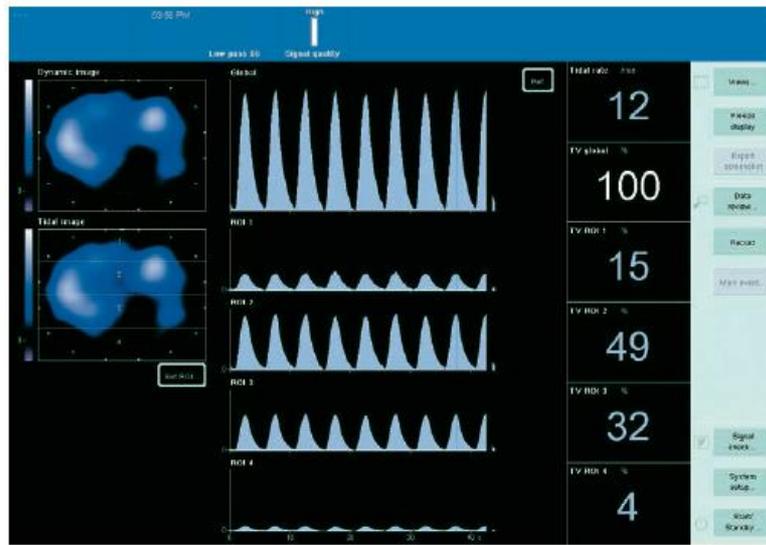


Figure 10 : écran de surveillance du Pulmovista® 500. La représentation visuelle (à gauche de l'écran) affecte une couleur bleue ou blanche aux zones à forte variation d'impédance, et noire aux zones à faible variation d'impédance. La représentation graphique (au milieu de l'écran) décrit les variations d'impédance en ordonnées par rapport au temps en abscisse, sur l'ensemble du thorax et dans les quatre régions d'intérêt prédéfinies par l'utilisateur. *D'après (61).*

4.1.2 Étude de faisabilité

Cette étape avait pour but de confirmer l'utilisation fiable et reproductible de la technique d'EIT dans un contexte post-opératoire de chirurgie thoracique. Les critères retenus pour en juger étaient la bonne position de la ceinture d'électrodes sans porter atteinte aux dispositifs de drainage thoracique ou aux éléments de soins (tels que pansements), l'obtention d'un signal de variation d'impédance de qualité et l'interprétabilité de ce dernier.

4.2 Étude clinique

4.2.1 Modalités de recueil des données

Après confirmation de la faisabilité des mesures sur les 10 premiers patients (Cf. **Résultats**, §1), l'étude clinique proprement dite a débuté. Les conduites habituelles de l'anesthésie et de la chirurgie n'ont pas été modifiées par la participation à l'étude. L'ensemble des techniques anesthésiques (techniques d'analgésie locorégionale, choix des médicaments d'anesthésie générale, choix de la technique d'intubation et réglages du ventilateur pendant la période per-opératoire, etc.) et chirurgicales (localisation de l'incision thoracique, geste réalisé, nombre et localisation des drains thoraciques, etc.) mises en œuvre ont été laissées à la discrétion de l'équipe médico-chirurgicale en charge du patient selon les protocoles locaux déjà en vigueur. Tous les patients opérés de résection pulmonaire non ambulatoire sont pris en charge en post-opératoire dans l'unité de soins continus chirurgicaux (USC) dans la pratique habituelle. Le recueil de données a été réalisé par un médecin investigateur ne participant pas à la prise en charge du patient.

Les mesures de variation d'impédance ont été réalisées à 6 temps distincts au cours de la prise en charge du patient :

- T0, correspondant au patient éveillé en ventilation spontanée et en décubitus dorsal sur la table d'opération ;
- T1, correspondant au patient sous anesthésie générale en ventilation contrôlée bi-pulmonaire après contrôle de la bonne position de la sonde d'intubation, auscultation pulmonaire et réglage du ventilateur ;
- T2, correspondant au patient sous anesthésie générale en ventilation contrôlée uni-pulmonaire du poumon non opéré, après vérification de la bonne exclusion pulmonaire par fibroscopie bronchique selon le protocole en vigueur, et avant toute mobilisation ou geste chirurgical ;
- T3, correspondant au patient sous anesthésie générale en ventilation contrôlée bi-pulmonaire après la fin du geste chirurgical et après reventilation du poumon opéré sous contrôle de la vue ;
- T4, correspondant au patient éveillé en salle de surveillance post-interventionnelle (SSPI) une heure après son extubation ;
- T5, correspondant au patient éveillé en USC le lendemain de son intervention.

La ceinture d'électrodes était retirée entre les mesures T2 et T3 et entre les mesures T4 et T5.

4.2.2 Modalités d'interprétation des données

Pour chaque patient et à chaque temps un enregistrement de 60 secondes était réalisé, soit une moyenne de 12 à 20 cycles respiratoires. Les données étaient exportées sur clef USB pour analyse à l'aide du logiciel « Drager EIT Data Analysis Tool 6.1 ». La coupe thoracique était divisée en quatre quadrants de surface égale, présentant chacun une variation d'impédance régionale, constituant une part de la variation d'impédance totale (**Figure 12**). La somme des 4 variations d'impédances régionales correspondait à la variation d'impédance totale.

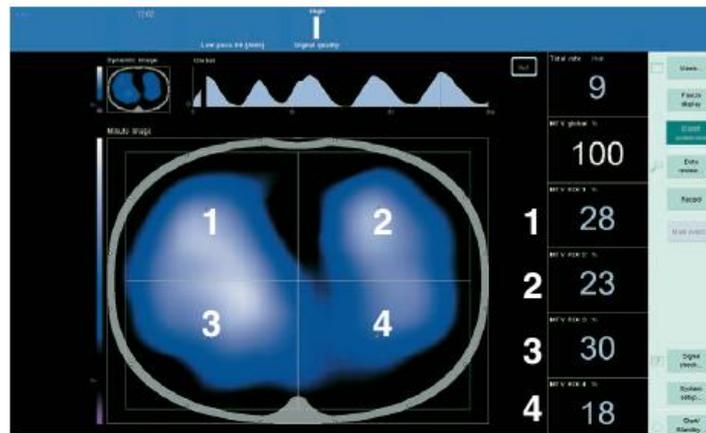


Figure 11 : séparation de la coupe thoracique en quatre quadrants (ROI) numérotés de 1 à 4, et contribution de chacun à la variation d'impédance globale exprimée en %. Les ROI 1 et 3 correspondent schématiquement au poumon droit, et les ROI 2 et 4 au poumon gauche.

Pour chaque patient et à chaque temps étaient ensuite mesurées :

- la variation d'impédance (Tidal Impedance Variation, TIV) globale au cours du cycle respiratoire ;
- la TIV dans chaque ROI ;
- l'impédance ratio (IR) de la contribution du poumon opéré sur la totalité de la variation d'impédance (soit des ROI 1 et 3 sur la totalité si poumon droit opéré ou des ROI 2 et 4 sur la totalité si poumon gauche opéré).

Ces mesures ont été réalisées en accord avec les données de la littérature (77,84) selon les formules suivantes :

$$TIV = Impedance_{max} - Impedance_{min}$$

$$IR = \frac{TIV_{ROI}}{TIV_{global}}$$

La TIV correspond au volume courant généré au cours du cycle respiratoire correspondant. Une TIV qui diminue reflète un volume courant diminué, soit par réduction de l'ampliation thoracique, soit par réduction des zones pulmonaires aérées (autrement dit par augmentation des zones pulmonaires collabées), et indique dans les deux cas une perte d'aération pulmonaire. Un delta de TIV (ΔTIV) peut être calculé entre deux temps pour un même patient. Une valeur négative indique alors une diminution de la variation d'impédance, et donc du volume courant, au cours du temps.

L'IR est le barycentre de la ventilation apportée par chaque poumon, soit d'une certaine manière le « centre de gravité » de la contribution de chaque poumon à la ventilation totale. Un IR à 0,5 correspondrait ainsi à une ventilation parfaitement symétrique, avec des volumes parfaitement équivalents entre les deux poumons. Dans notre étude, tous les IR ont été calculés en considérant la contribution du poumon opéré divisée par celle du poumon non opéré. Ainsi un IR < 0,5 indique une contribution du poumon opéré de moins de la moitié à la ventilation totale, soit un centre de gravité de la ventilation déplacé vers le poumon non opéré. Un delta d'IR (ΔIR) peut être calculé entre deux temps pour un même patient. Une valeur négative indique alors une diminution de la contribution du poumon opéré à la ventilation globale entre les deux temps.

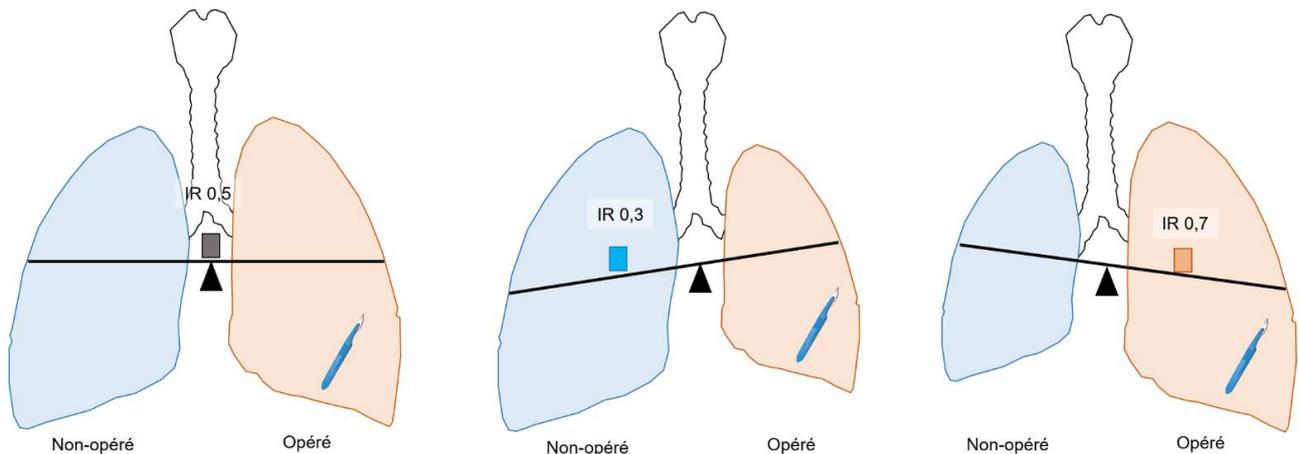


Figure 12 : représentation graphique du concept d'IR.

4.2.3 Modalités de comparaison des données

Les valeurs de TIV correspondant au poumon opéré et au poumon non opéré ont été comparées entre les groupes de patients compliqués et non compliqués à chaque temps : T0, T1, T2, T3, T4 et T5. Les ΔTIV de chaque patient entre le pré et le post-opératoire ont été calculés en considérant les temps en ventilation contrôlée entre eux et les temps en ventilation spontanée entre eux, soit une évolution de la TIV entre T1 et T3 ($\Delta TIV T3-T1$), entre T0 et T4 ($\Delta TIV T4-T0$) et entre T0 et T5 ($\Delta TIV T5-T0$). Les valeurs de ΔTIV obtenues ont ensuite été comparées entre les groupes de patients compliqués et non compliqués.

Les valeurs d'IR, soit les positions du barycentre de ventilation, ont été comparées à chaque temps entre les deux groupes. Les ΔIR de chaque patient entre le pré et le post-opératoire ont été calculés selon les mêmes modalités que précédemment ($\Delta IR T3-T1$, $\Delta IR T4-T0$, $\Delta IR T5-T0$), puis comparés entre les groupes compliqués et non compliqués.

Dans l'objectif de rechercher une association entre ΔIR et survenue de complications pulmonaires post-opératoires et en l'absence de valeur déjà publiée pouvant servir de référence de delta d'IR entre le pré et le post-opératoire de chirurgie thoracique, la cohorte a été séparée autour de la valeur médiane de ΔIR de l'ensemble de la cohorte entre T1 et T3, T0

et T4 et T0 et T5. L'incidence de CPP a ensuite été comparée entre les groupes $\Delta IR < \text{et} >$ à la médiane.

4.2.4 Diagnostic d'une complication

Tous les patients étaient pris en charge en USC en post-opératoire et bénéficiaient d'un ensemble de mesures de réhabilitation selon un protocole pré-établi, et comprenant : prévention de la douleur par analgésie locorégionale et antalgie per os, kinésithérapie respiratoire quotidienne systématique, objectif de mise au fauteuil, déambulation et reprise de l'alimentation avant la 24^{ème} heure post-opératoire.

Le diagnostic d'une atélectasie était basé sur des critères cliniques - dyspnée, désaturation, asymétrie de l'ampliation thoracique, diminution unilatérale du murmure vésiculaire - et radiologiques : opacité rétractile, attraction du médiastin et de la coupole diaphragmatique, pincement intercostal du côté atteint à la radiographie de thorax. Pour être considérée comme une CPP, une atélectasie devait entraîner un geste thérapeutique (augmentation de plus de 2 L/min du débit d'oxygène nasal, réalisation d'une fibroscopie bronchique de désobstruction, introduction de VNI, etc.). Le diagnostic d'une pneumonie était basé sur des critères cliniques - dyspnée, désaturation, fièvre avec température $> 38,3^{\circ}\text{C}$, foyer de crépitants, syndrome inflammatoire biologique - ; des critères radiologiques - opacité radiographique ou condensation scannographique - et des critères microbiologiques : culture positive de prélèvement respiratoire au seuil de significativité, soit 10^6 UFC/ml pour les expectorations, 10^5 UFC/ml pour les aspirations bronchiques et 10^4 UFC/ml pour les lavages broncho-alvéolaires. L'insuffisance respiratoire aiguë était définie par des critères essentiellement cliniques de dyspnée, polypnée, signes de lutte, troubles de conscience avec cause respiratoire compatible. La démarche diagnostique était à la discrétion du clinicien en charge du patient.

5. CRITERES DE JUGEMENT

L'hypothèse principale de l'étude était que l'EIT permettrait de mettre en évidence une perte absolue d'aération pulmonaire unilatérale plus importante chez certains patients, estimée par les TIV et les Δ TIV, et que cette perte d'aération serait associée à la survenue de complications pulmonaires post-opératoires.

L'hypothèse secondaire de l'étude était que ces résultats seraient renforcés par la visualisation d'un barycentre de ventilation davantage asymétrique entre le poumon opéré et le poumon non opéré, estimé par les IR et les Δ IR, et que cette asymétrie de ventilation serait associée à la survenue de complications pulmonaires post-opératoires.

Le critère de jugement principal était les valeurs de Δ TIV T3-T1, T4-T0 et T5-T0 chez les patients compliqués et non compliqués.

Les critères de jugement secondaires étaient :

- la valeur de TIV à T0, T1, T2, T3, T4 et T5 ;
- la valeur d'IR à T0, T1, T3, T4 et T5 ;
- le Δ IR T3-T1, T4-T0 et T5-T0 ;

6. ANALYSE STATISTIQUE

Les variables continues ont été exprimées en "médiane [écart interquartile]". Les variables catégorielles ont été exprimées en "nombre absolu (pourcentage)".

Les comparaisons entre les caractéristiques des patients et les valeurs d'EIT entre les groupes avec et sans complications pulmonaires post-opératoires ont été effectuées en utilisant un test de Wilcoxon-Mann-Whitney pour les variables quantitatives ou un test du χ^2 pour les variables qualitatives.

Les comparaisons d'incidence de complications pulmonaires post-opératoires entre les différents groupes (Δ IR supérieur ou inférieur à la médiane, IR supérieur ou inférieur à 0,5) ont été effectuées en utilisant un test du χ^2 ou un test exact de Fischer.

RESULTATS

1. FAISABILITE

La compliance des patients en pré et post-opératoire au port de la ceinture flexible au niveau thoracique était excellente. L'existence de cinq tailles différentes a permis une bonne adaptation à la morphologie de chaque patient. Le positionnement de la ceinture n'était pas gêné par les pansements ou cicatrices du fait de la possibilité de déplacer une électrode d'un ou deux centimètres dans le plan transversal sans gêner la qualité de mesure. Les orifices de sortie des drains thoraciques empêchaient rarement la bonne position d'une électrode. Dans les quelques cas où l'une d'elles était impossible à placer, le Pulmovista® 500 était capable grâce à la présence d'une électrode de référence en position abdominale d'ignorer l'électrode défectueuse dans la réalisation des mesures, sans affecter la qualité des données recueillies (61). Les courbes de variation d'impédance obtenues présentaient une morphologie attendue et interprétable (**Figure 13**).

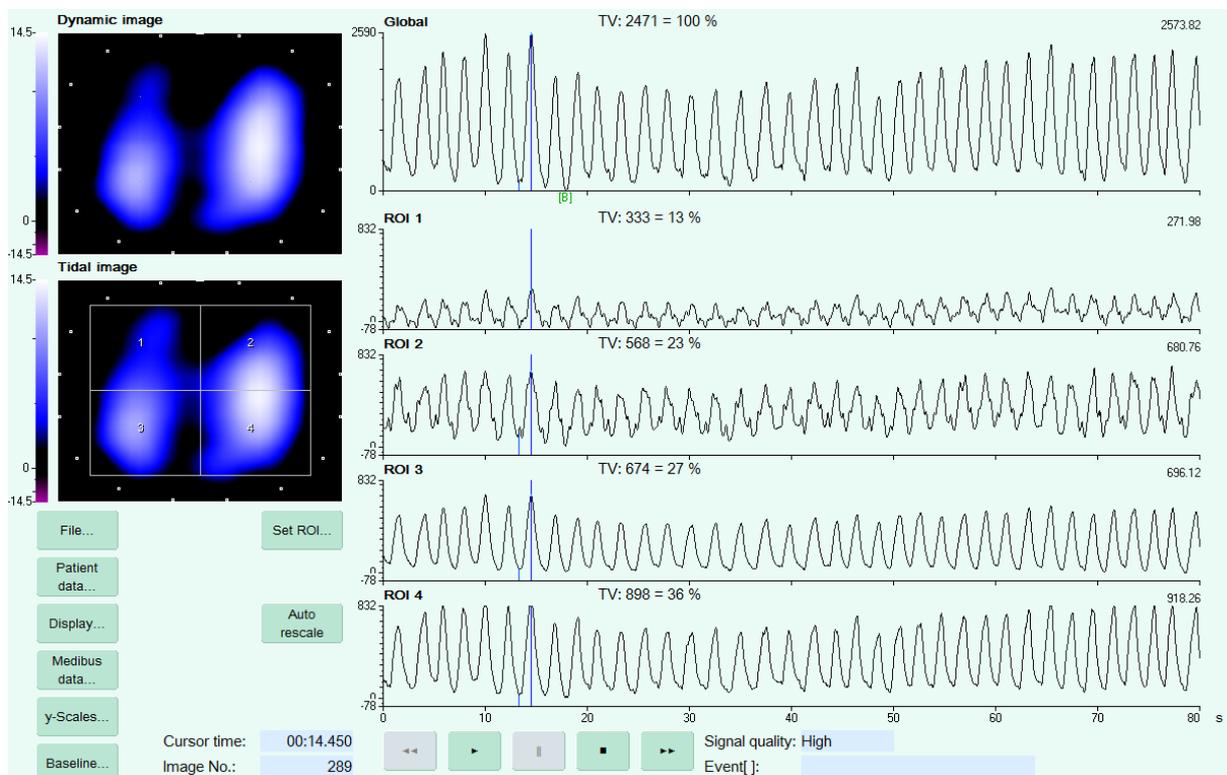


Figure 13 : exemple de recueil de variation d'impédance sur 36 cycles respiratoires du patient n° 2, en ventilation spontanée, avec présence d'un drain thoracique droit.

2. POPULATION ETUDIEE

Une fois la faisabilité de l'étude démontrée, la phase observationnelle a débuté en avril 2018. Entre avril et septembre 2018 un total de 133 patients ont été évalués pour éligibilité. Parmi ceux-ci, 122 patients étaient incluables, dont 41 ont été finalement inclus dans l'étude. Les non-inclusions ont été dues soit à un moniteur déjà en cours d'utilisation (11 cas) soit à l'absence de personnel formé à la technique au moment de la chirurgie (70 cas). Parmi les 41 patients inclus, 2 ont bénéficié d'une pneumectomie, rendant l'analyse spatiale de la distribution de ventilation non pertinente. 39 patients ont donc été analysés (**Figure 14**).

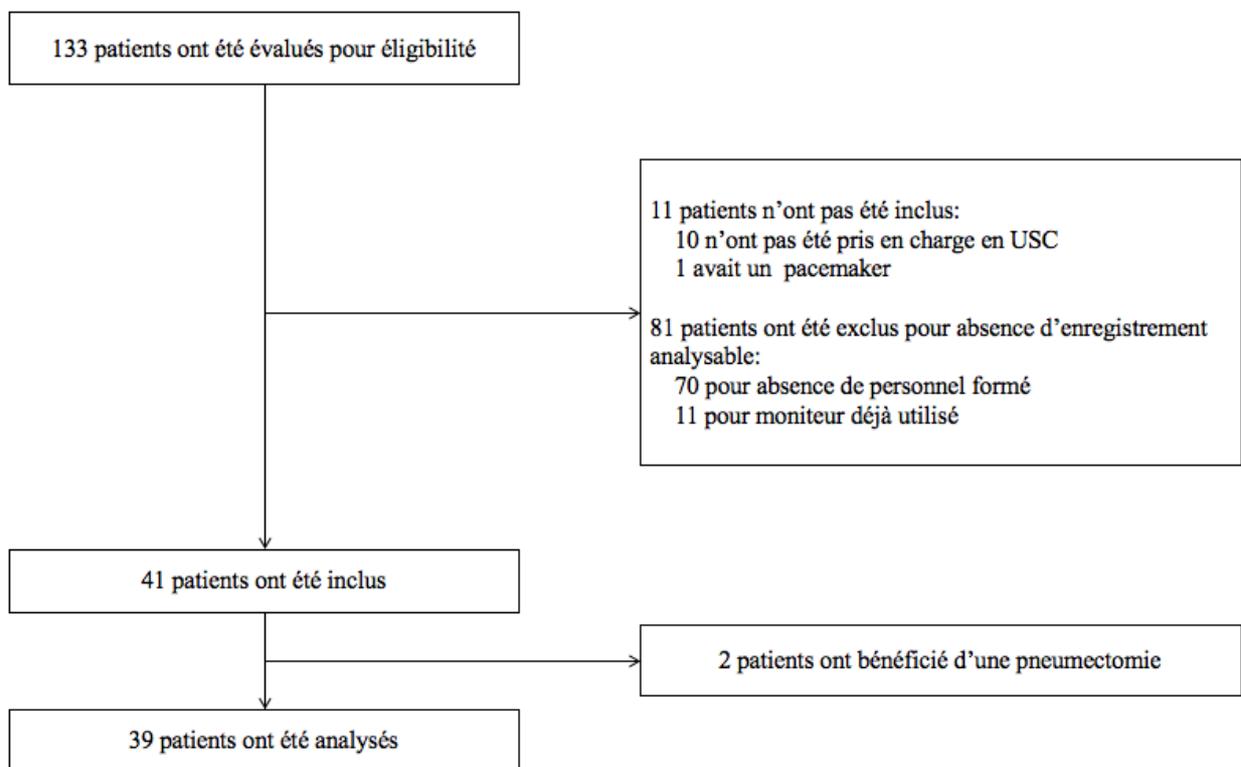


Figure 14 : diagramme de flux de l'étude.

Les caractéristiques des patients inclus sont détaillées dans le **Tableau 2**. Deux groupes ont été distingués : les patients ayant présenté une ou plusieurs complications pulmonaires (définis comme groupe « compliqué » ci-après), et ceux n'ayant pas développé de complication au niveau pulmonaire (définis comme groupe « non compliqués » ci-après).

Les deux groupes étaient comparables en terme de caractéristiques démographiques, de score ASA, d'incidence de tabagisme non sevré et de VEMS pré-opératoire. Il n'y avait pas de différence entre les groupes sur le type de chirurgie ni la voie d'abord employée. Les patients du groupe compliqué étaient ventilés avec une fraction inspirée d'oxygène (FiO_2) significativement plus élevée en ventilation bipulmonaire comme en ventilation unipulmonaire per-opératoire, et nécessitait plus souvent un recours à la CPAP sur le poumon exclu ainsi que l'utilisation d'almitrine en per-opératoire. Les autres caractéristiques anesthésiques per-opératoires (durées de ventilation totale et unipulmonaire, volumes courants en ventilation bi et unipulmonaire, PEP et volume d'expansion volémique) n'étaient pas différentes entre les groupes. Les deux groupes ont bénéficié dans la même proportion d'une technique d'analgésie locorégionale et des mesures de réhabilitation accélérée, et ont autant eu recours à la morphine en traitement de complément à l'ALR en post-opératoire. La durée de séjour en USC et la durée de séjour totale étaient significativement supérieures dans le groupe compliqué.

Tableau 2 : caractéristiques des patients inclus.

Caractéristiques	Patients			P
	Total (N=39)	Complicés (N=8)	Non compliqués (N=31)	
Caractéristiques patient				
Age, médiane [EI], ans	64 [58,5-72]	67,5 [60,25-75,25]	64 [58-71,5]	0,30
Sexe M/F	24/15	4/4	20/11	0,45
IMC, médiane [EI]	25 [22-29]	28 [23-34]	24 [22-29]	0,24
Score ASA 1/2/3, n	1 / 31 / 7	0 / 7 / 1	1 / 24 / 6	0,51
Tabagisme actif, n (%)	11 (28)	2 (25)	9 (29)	0,86
VEMS (L), médiane [EI]	2,38 [2,05-2,88]	2,19 [1,9-2,54]	2,42 [2,14-3,03]	0,16
Caractéristiques chirurgicales				
Poumon opéré droit / gauche, n	24 / 15	5 / 3	19 / 12	0,95
Lobectomie / autre*, n(%)	35(90) / 4(10)	8(100) / 0(0)	27(87) / 4(13)	0,28
Vidéoarthroscopie, n(%)	16(41) / 23(59)	2(25) / 6(75)	14(45) / 17(55)	0,31
Caractéristiques anesthésiques				
Durée totale de ventilation (min), médiane [EI]	210 [175-285]	217,5 [175-240]	200 [175-300]	0,83
Vt bipulmonaire (mL/kg), médiane [EI]	6,6 [6-6,9]	7,1 [6,6-7,4]	6,4 [6-6,8]	0,81
PEP bipulmonaire (cmH ₂ O), médiane [EI]	6 [5-6]	5,5 [4,5-6,25]	6 [5-6]	0,64
FiO ₂ bipulmonaire moy (%), médiane [EI]	80 [65-90]	90 [80-100]	70 [60-85]	0,01
Durée de ventilation unipulmonaire (min), médiane [EI]	170 [135-230]	160 [142,5-210]	180 [135-230]	0,71
Vt unipulmonaire (mL/kg), médiane [EI]	5,6 [5,1-6]	5,8 [5,1-6,4]	5,4 [5,1-5,7]	0,28
PEP unipulmonaire (cmH ₂ O), médiane [EI]	6 [5-6]	5,5 [4,5-6,25]	6 [5-6]	0,51
FiO ₂ unipulmonaire moy (%), médiane [EI]	90 [80-100]	100 [90-100]	85 [70-95]	0,01
CPAP sur poumon exclu, n (%)	6 (15)	4 (50)	2 (6)	0,002
Utilisation d'almitrine, n (%)	7 (18)	4 (50)	3 (10)	0,008
Remplissage vasculaire (mL), médiane [EI]	700 [500-800]	600 [450-800]	750 [500-850]	0,39
Post-opératoire				
Analgésie locorégionale, n (%)	38 (97)	8 (100)	30 (97)	0,60
Consommation de morphiniques, n (%)	21 (54)	4 (50)	17 (55)	0,90
Nombre de mesures de RAC 0/1/2/3, n	2 / 2 / 5 / 30	0 / 0 / 2 / 6	2 / 2 / 3 / 24	0,53
Durée de séjour en USC (jours), médiane [EI]	3 [3-4,5]	7 [5,5-8]	3 [3-4]	0,002
Durée de séjour à l'hôpital (jours), médiane [EI]	8 [6-12]	12 [8-14,75]	7 [5,5-9,5]	0,01

Vt : volume courant

* : 3 segmentectomies, 1 wedge

3. INCIDENCE DE COMPLICATIONS POST-OPERATOIRES

L'ensemble des complications post-opératoires sont rapportées dans le **Tableau 3**. Onze complications respiratoires sont survenues chez 8 patients, soit 20% de l'effectif : 6 cas d'atélectasie, 4 cas de pneumonie et 1 cas d'insuffisance respiratoire aiguë. Des complications chirurgicales, cardiovasculaires et infectieuses sont survenues chez 5 patients (13% de l'effectif), 3 patients (8%) et 2 patients (5%) respectivement. L'incidence globale de complications post-opératoires était de 36%.

Tableau 3 : détail des complications post-opératoires.

Complications	Nombre de patients (%)
<i>Pulmonaires</i>	8 (20)
Atélectasie	6 (15)
Pneumonie	4 (10)
Insuffisance respiratoire aiguë	1 (2)
<i>Chirurgicales</i>	5 (13)
Bullage persistant	4 (10)
Pneumothorax	3 (8)
Fistule bronchique	0 (0)
Hémothorax	0 (0)
<i>Cardiovasculaires</i>	3 (8)
Troubles du rythme	3 (8)
Syndrome coronaire aigu	0 (0)
<i>Infectieuses</i>	2 (5)
Empyème	2 (5)
Sepsis	0 (0)
<i>Toutes complications</i>	14 (36)

4. CRITERE DE JUGEMENT PRINCIPAL : ΔTIV

Une valeur de ΔTIV T3-T1, T4-T0 et T5-T0 a pu être recueillie chez 20, 23 et 23 patients respectivement. Les ΔTIV entre les temps pré et post-opératoires du poumon opéré et du poumon non opéré ont été comparées entre les groupes de patients compliqués et non compliqués. Les résultats sont rapportés dans le **Tableau 4** et représentés graphiquement dans la **Figure 15**.

La TIV du poumon opéré diminuait significativement plus dans le groupe des patients compliqués entre T1 et T3, c'est à dire entre quelques minutes avant l'incision et quelques minutes après la fermeture, avec une diminution médiane de -1106 [-1470;-877] contre -221 [-633;36] chez les patients non compliqués ($p < 0.01$). Le ΔTIV entre T1 et T3 du poumon controlatéral était globalement équivalent dans les deux groupes (82 [10;245] chez les patients compliqués vs. -0,43 [-399;882] chez les non compliqués – $p = 0,73$).

Il n'y avait pas de différence significative de ΔTIV entre les deux groupes aux autres temps que ce soit pour le poumon opéré ou le poumon non opéré.

Tableau 4 : comparaison de l'évolution de la variation d'impédance (ΔTIV) de chaque poumon du pré au post-opératoire entre les deux groupes.

	Patients			p
	Total	Compliqués	Non compliqués	
<i>ΔTIV, médiane [EI]</i>				
T3-T1 opéré	-389 [-895;-111]	-1106 [-1470;-877]	-221 [-633;36]	<0,01
T3-T1 non opéré	46 [-289;853]	82 [10;245]	-0,43 [-399;882]	0,73
T4-T0 opéré	-1034 [-1822;-41]	-1619 [-2125;-1114]	-1023 [-1574;140]	0,25
T4-T0 non opéré	-292 [-1147;52]	-703 [-1383;0,5]	-254 [-1147;53]	0,78
T5-T0 opéré	-1175 [-1821;4]	-952 [-1910;36]	-875 [-1768;-65]	0,97
T5-T0 non opéré	-166 [-779;613]	-474 [-798;-224]	-21 [-680;649]	0,43

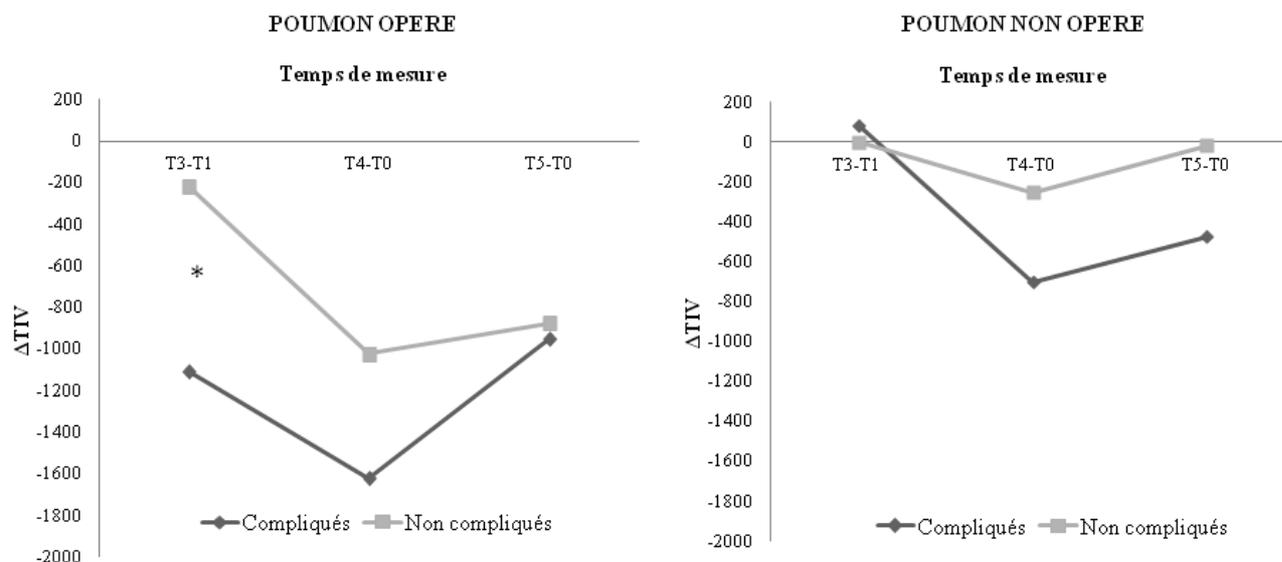


Figure 15 : comparaison des Δ TIV (médianes) entre les groupes compliqués et non compliqués aux différents temps étudiés. Une étoile indique une différence statistiquement significative.

5. CRITERES DE JUGEMENT SECONDAIRES

5.1 Valeur de TIV à un temps donné

5.1.1 TIV globale

Une valeur de TIV à T0, T1, T2, T3, T4 et T5 a pu être recueillie chez 38, 35, 35, 24, 24 et 23 patients respectivement. Les valeurs absolues de TIV globale (contribution combinée des deux poumons) ont été comparées entre les groupes de patients compliqués et non compliqués. Les résultats sont rapportés dans le **Tableau 5**.

Il existait une tendance à une TIV totale plus élevée dans le groupe des patients compliqués à T1, c'est à dire en ventilation bipulmonaire quelques minutes avant l'incision, avec une médiane à 3576 [3182;4841] contre 2895 [1635;3522] chez les patients non compliqués ($p=0.12$). Il n'y avait pas de différence significative entre les deux groupes aux autres temps.

Tableau 5 : comparaison de la variation d'impédance (TIV) totale entre les deux groupes à chaque temps.

	Patients			P
	Total	Complicés	Non complicés	
<i>TIV, médiane [EI]</i>				
T0	3878 [2810;6088]	4093 [3357;4905]	3750 [2810;6554]	0.87
T1	3005 [1826;3909]	3576 [3182;4841]	2895 [1635;3522]	0.12
T2	1582 [1053;2182]	1416 [1059;1993]	1725 [1090;2182]	0.92
T3	3209 [2523;4403]	2945 [2455;3975]	3387 [2594;4341]	0.75
T4	2495 [1961;3238]	2048 [1791;2647]	2569 [2143;3238]	0.62
T5	3577 [3131;4263]	3306 [2506;4484]	3676 [3174;4171]	0.56

5.1.2 TIV relative à chaque poumon

Une valeur de TIV à T0, T1, T2, T3, T4 et T5 a pu être recueillie chez 38, 35, 35, 24, 24 et 23 patients respectivement. Les valeurs absolues de TIV du poumon opéré et du poumon non opéré ont été comparées entre les groupes de patients compliqués et non compliqués. Les résultats sont rapportés dans le **Tableau 6**.

La TIV du poumon opéré était significativement plus élevée dans le groupe des patients compliqués à T1 avec une médiane à 2067 [1730;2917] contre 1316 [841;1821] chez les patients non compliqués ($p=0,02$). Cette différence ne se retrouve pas sur le poumon non opéré au même temps. La TIV du poumon non opéré était significativement plus basse dans le groupe des patients compliqués à T5, c'est à dire en USC à J1, avec une médiane à 1428 [1075;1787] contre 2148 [1900;2511] chez les patients non compliqués ($p=0,04$). Cette différence ne se retrouve pas sur le poumon opéré au même temps.

Il n'y avait pas de différence significative entre les deux groupes aux autres temps en termes de valeur médiane de TIV qu'il s'agisse du poumon opéré comme du poumon non opéré.

Tableau 6 : comparaison de la variation d'impédance (TIV) relative à chaque poumon entre les deux groupes à chaque temps.

	Total	Patients		P
		Complicqués	Non complicqués	
<i>TIV, médiane [EI]</i>				
T0 opéré	1870 [1272;3117]	2194 [1585;2953]	1815 [1272;3117]	0,73
T0 non opéré	2009 [1254;2962]	1792 [1645;2030]	2248 [1143;3337]	0,31
T1 opéré	1370 [1050;1926]	2067 [1730;2917]	1316 [841;1821]	0,02
T1 non opéré	1376 [853;2017]	1728 [1271;2917]	1249 [771;2072]	0,62
T2 non opéré	1345 [981;2053]	1582 [1096;2167]	1338 [919;2040]	0,40
T3 opéré	1169 [1132;1369]	1221 [1078;1586]	1162 [879;1347]	0,49
T3 non opéré	1987 [1362;2871]	1953 [1543;2444]	2039 [1376;2881]	0,80
T4 opéré	1079 [771;1559]	970 [872;1108]	1141 [670;1623]	0,79
T4 non opéré	1283 [867;1833]	997 [806;1570]	1283 [869;1899]	0,62
T5 opéré	1583 [1000;1964]	1964 [1865;2348]	1231 [985;1752]	0,16
T5 non opéré	2048 [1696;2502]	1428 [1075;1787]	2148 [1900;2511]	0,04

5.2 Valeur d'IR à un temps donné

Une valeur d'IR à T0, T1, T3, T4 et T5 a pu être recueillie chez 38, 35, 24, 24 et 23 patients respectivement. L'IR était 0,52 [0,41;0,56], 0,50 [0,38;0,61], 0,41 [0,27;0,52], 0,44 [0,33;0,58] et 0,43 [0,34;0,55] à T0, T1, T3, T4 et T5 respectivement. Pour rappel, une valeur inférieure à 0,5 indique une contribution relativement plus importante du poumon non-opéré par rapport au poumon opéré. Ces résultats sont rapportés dans le **Tableau 7**.

L'IR était significativement plus faible au temps T5 (i.e. part du poumon non-opéré plus importante à la ventilation le lendemain de la chirurgie) chez les patients du groupe non-complicqué que chez les patients du groupe complicqué (0,40 [0,32;0,47] vs. 0,58 [0,55;0,61] – p<0,01). Il n'y avait pas de différence significative entre les 2 groupes sur les valeurs d'IR à T0, T1, T3 et T4.

Tableau 7 : comparaison la position du barycentre de ventilation (IR) entre les groupes à chaque temps.

	Patients			P
	Total	Complicés	Non complicés	
<i>IR, médiane [EI]</i>				
T0	0,52 [0,41;0,56]	0,53 [0,49;0,58]	0,52 [0,39;0,56]	0,41
T1	0,50 [0,38;0,61]	0,57 [0,52;0,63]	0,47 [0,36;0,60]	0,31
T3	0,40 [0,26;0,52]	0,39 [0,35;0,44]	0,43 [0,24;0,59]	0,71
T4	0,43 [0,32;0,58]	0,50 [0,36;0,61]	0,43 [0,32;0,56]	0,72
T5	0,42 [0,33;0,55]	0,57 [0,54;0,61]	0,39 [0,32;0,46]	<0,01

5.3 Δ IR

Une valeur de Δ IR entre T1 et T3, T0 et T4 et T0 et T5 a pu être recueillie chez 19, 23 et 22 patients respectivement. Entre T1 et T3, le Δ IR était -0,13 [-0,26;-0,01]. Entre T0 et T4, le Δ IR était -0,06 [-0,21;0,11]. Enfin, entre T0 et T5, le Δ IR était -0,10 [-0,21;0,02]. Pour rappel, une valeur négative indique une diminution relative de la part du poumon opéré à la ventilation globale (ou une augmentation relative de la part du poumon non-opéré à la ventilation globale) entre les deux temps. Ces résultats sont rapportés dans le **Tableau 8**.

Il existait une tendance à un Δ IR entre T3 et T1 moins négatif (i.e. une moindre diminution de la part du poumon opéré à la ventilation en fin de la chirurgie après reprise de la ventilation bi-pulmonaire par rapport à avant l'incision) chez les patients non compliqués par rapport au patients compliqués (-0,08 [-0,21;0,02] vs. -0,24 [-0,28;-0,14] – p=0,08). A l'inverse, il existait une tendance à un Δ IR entre T5 et T0 plus négatif (i.e. une moindre diminution de la part du poumon non-opéré à la ventilation le lendemain de la chirurgie par rapport à la ventilation spontanée avant l'anesthésie) chez les patients non compliqués par rapport au patients compliqués (-0,12 [-0,23;0,00] vs. -0,01 [-0,11;0,17] – p=0,12).

Tableau 8 : comparaison de l'évolution du barycentre de ventilation (Δ IR) du pré au post-opératoire entre les deux groupes.

	Total	Patients		P
		Complicqués	Non complicqués	
<i>ΔIR, médiane [EI]</i>				
T3-T1	-0,12 [-0,25;-0,01]	-0,24 [-0,27;-0,14]	-0,08 [-0,20;0,02]	0,08
T4-T0	-0,06 [-0,21;0,11]	-0,10 [-0,24;0,06]	-0,06 [-0,18;0,12]	0,51
T5-T0	-0,10 [-0,20;0,02]	-0,01 [-0,10;0,16]	-0,12 [-0,23;0,004]	0,12

5.4 Analyse en groupes à Δ IR inférieur ou supérieur à la médiane

En l'absence de valeur de référence connue de déplacement de l'IR (Δ IR) en per et post-opératoire de chirurgie thoracique (valeur pouvant être considérée comme « normale » après cette chirurgie), les patients ont été séparés en deux groupes : déplacement de l'IR inférieur et supérieur à la médiane observée dans la cohorte. La valeur médiane du Δ IR étant une valeur négative pour les 3 Δ IR (T3-T1, T4-T0 et T5-T0), les patients avec un Δ IR inférieur à la médiane avaient un déplacement de l'IR (en valeur absolue) plus important que les patients avec un Δ IR supérieur à la médiane ; déplacement du centre de ventilation vers le poumon non opéré puisque valeur négative. Les résultats en termes de complications pulmonaires post-opératoires (CPP) dans les groupes « Δ IR inférieur à la médiane » et « Δ IR supérieur à la médiane » sont rapportés dans le **Tableau 9**.

Il existait significativement plus de CPP dans le groupe « Δ IR inférieur à la médiane » entre T1 et T3 (5/9, 56% vs. 0/9, 0% – p=0,01). Autrement dit, la moitié de patients ayant les valeurs de Δ IR entre T1 et T3 les plus négatives (i.e. diminution plus marquée de la part du poumon opéré dans la ventilation globale à la fin de la chirurgie après reprise de la ventilation bi-pulmonaire par rapport à avant l'incision) ont présenté plus de CPP que les autres. Il n'y avait pas de différence significative entre les groupes aux autres temps (**Tableau 9** et **Figure 16**).

Tableau 9 : association entre un déplacement de l'IR (Δ IR) inférieur ou supérieur à la médiane et survenue d'une CPP.

	T3-T1		p	T4-T0		p	T5-T0		p
	Δ IR \leq M	Δ IR >M		Δ IR \leq M	Δ IR >M		Δ IR \leq M	Δ IR >M	
	(N=10)	(N=9)		(N=12)	(N=11)		(N=11)	(N=11)	
Complicqué	5	0	0,01	2	2	0,9	2	3	0,6
Non complicqué	4	9		10	9		9	8	

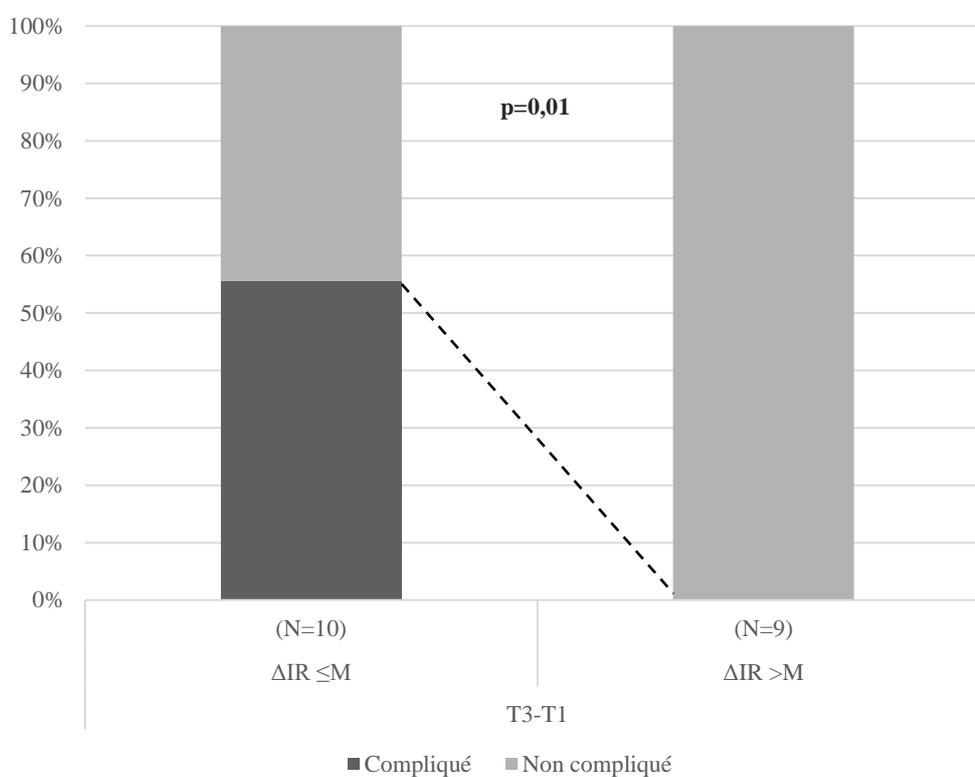


Figure 16 : incidence de complications pulmonaires post-opératoires chez les patients avec Δ IR entre T3 et T1 inférieur ou égal à la médiane et supérieur à la médiane.

DISCUSSION

1. SYNTHÈSE ET INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS

1.1 Synthèse des résultats principaux

Nos principaux résultats peuvent être résumés de la façon suivante : 1) l'EIT est un outil de mesure facilement utilisable et accepté par les patients opérés de chirurgie thoracique ; 2) entre le début et la fin de la chirurgie, la TIV du poumon opéré diminue significativement plus et le ΔIR tend à être plus négatif chez les patients qui vont présenter une CPP que chez les non compliqués ; 3) à J1 post-opératoire, la TIV du poumon non opéré diminue significativement plus et l'IR est significativement plus élevé chez les patients qui vont présenter une CPP que chez les non compliqués.

1.2 Justification du critère de jugement principal

Cette étude utilise deux paramètres d'impédance thoracique simples et validés dans la littérature : la variation d'impédance reflétant le volume courant, et le rapport d'impédance représentant la distribution spatiale dans le plan transversal de la ventilation, soit la contribution relative de chaque poumon. Le ΔTIV a été choisi comme critère de jugement principal, pour deux raisons : 1) la TIV représente la donnée brute première à partir de laquelle sont calculés la plupart des autres paramètres d'EIT utilisés pour évaluer la distribution de la ventilation ; en ce sens sa variation apporte une information brute de l'évolution de l'aération pulmonaire ; 2) un delta représente l'évolution de la ventilation d'un même poumon chez un même patient et s'affranchit ainsi des biais potentiels d'erreur de positionnement de la référence, pouvant influencer la valeur absolue d'une TIV mais pas le delta entre deux mesures.

1.3 Interprétation des résultats de l'étude

1.3.1 Evolution de l'aération pulmonaire au cours du temps

L'analyse des ΔTIV montre que chez les patients qui vont se compliquer en post-opératoire, le poumon opéré perd plus d'aération entre le début et la fin de la chirurgie que chez les patients qui ne vont pas se compliquer. Ceci est confirmé par l'approche du centre de ventilation, qui montre un ΔIR plus négatif chez les patients qui vont se compliquer, c'est-à-dire un déplacement du centre de ventilation vers le poumon non-opéré entre le début et la fin de la chirurgie ; ou autrement dit une diminution de la participation du poumon opéré à la ventilation globale à la fin de la chirurgie par rapport à avant l'incision. Ceci suggère que la perte d'aération du poumon opéré, ou plutôt une moins bonne ré-aération du poumon opéré après la période de ventilation uni-pulmonaire, pourrait être un facteur de risque de développer une complication respiratoire post-opératoire. Cette hypothèse est appuyée par la constatation d'une plus grande incidence de CPP chez la moitié des patients avec le déplacement du centre de ventilation le plus marqué vers le poumon non opéré en fin d'intervention (ΔIR T3-T1 les plus négatif, inférieurs à la médiane) par rapport à l'autre moitié des patients avec un moindre déplacement du centre de ventilation. Ce résultat est cohérent avec le fait que les atélectasies développées en per-opératoire peuvent persister jusqu'au minimum la 24^e heure post-opératoire, et ce même en chirurgie non thoracique (85).

Le second résultat de notre étude est que l'IR à T5 est significativement plus élevé chez les patients qui vont présenter une CPP que chez les patients ne présentant pas de CPP. Autrement dit, le centre de ventilation à la 24^e heure post-opératoire est déplacé vers le poumon opéré chez les patients qui vont présenter une CPP par rapport aux patients sans complication. Ce résultat est confirmé par la tendance à un ΔIR entre le pré-opératoire et la 24^e heure post-opératoire moins négatif chez les patient qui vont présenter une CPP, traduisant un recentrage du centre de ventilation vers le poumon opéré à la 24^e heure post-opératoire chez ces patients. Ce résultat peut être obtenu de 2 façons : 1) soit par une augmentation de la participation du poumon opéré à la ventilation globale (i.e. un gain d'aération du poumon opéré « attirant » le centre de ventilation vers le poumon opéré), 2) soit par une diminution de la ventilation du poumon non opéré à la ventilation globale (i.e. une perte d'aération du poumon non opéré, « repoussant » le centre de ventilation vers le poumon opéré). L'analyse des TIV du poumon opéré et non opéré permet de trancher entre ces deux

hypothèses. En effet, la TIV du poumon non opéré est significativement plus basse à T5 chez les patients qui vont présenter une CPP que chez les patients qui ne vont pas se compliquer. Ceci suggère alors qu'une perte d'aération du poumon non opéré à la 24^e heure post-opératoire est un facteur de risque de développer une complication pulmonaire.

En combinant et résumant ces 2 résultats, notre étude suggère qu'une moindre ré-aération du poumon opéré mise en évidence par l'EIT en fin d'intervention (Δ TIV T3-T1 du poumon opéré et Δ IR T3-T1 tous deux négatifs) est un premier facteur de risque de complications pulmonaires post-opératoires ; et qu'une perte secondaire d'aération du poumon non opéré durant les premières 24 heures post-opératoire (IR à T5 >0,5 avec TIV à T5 du poumon non opéré en diminution) renforce ce risque de développer une complication.

1.3.2 Mesures per-opératoires

La mesure de TIV en ventilation bipulmonaire quelques minutes avant l'incision, correspondant au temps T1, révèle une variation d'impédance significativement plus élevée au niveau du poumon opéré chez les patients qui présenteront une complication pulmonaire. L'IR à T1 montre une tendance à être plus positionné du côté opéré chez les patients compliqués que chez ceux qui auront une évolution simple, mais cette différence n'atteint pas la significativité. La TIV globale à T1 en revanche est significativement supérieure dans le groupes des patients développant ultérieurement une CPP. Il semble donc que ces patients soient ventilés avec un plus grand volume en bipulmonaire que les patients non compliqués, que cette différence de volume courant se répercute préférentiellement sur le poumon opéré en raison d'une répartition modérément déséquilibrée de la ventilation, et qu'elle puisse être à l'origine de lésions pulmonaires de surdistension.

On constate également en per-opératoire une utilisation de FiO₂ plus élevées et un recours plus fréquent à la CPAP et à l'almitrine chez les patients qui présenteront une complication pulmonaire post-opératoire. Ces trois éléments témoignent de la survenue d'une désaturation per-opératoire ou en tout cas de la nécessité d'introduire des mesures thérapeutiques pour la prévenir. Si la cause de cette désaturation peut être diverse (pathologie pulmonaire hypoxémiante pré-existante, pathologie cardiovasculaire à l'origine d'anomalies marquées du rapport ventilation-perfusion, chirurgie difficile avec compression extrinsèque, atélectasie sur

le poumon ventilé, etc.), il semble qu'un patient supportant mal la ventilation unipulmonaire et présentant une désaturation peropératoire ait plus de risques de développer une CPP. Une des hypothèses pour expliquer cette association est que la désaturation per-opératoire et la complication pulmonaire post-opératoire sont toutes deux favorisées par un même terrain (notamment de morbidité respiratoire sous-jacente) et/ou par la survenue d'un même événement per-opératoire, notamment de troubles de ventilation.

2. GAINS POTENTIELS LIES A L'UTILISATION DE L'EIT EN PRATIQUE COURANTE

La population de cette étude est très majoritairement constituée par des patients bénéficiant d'une intervention chirurgicale de type lobectomie. Cette intervention représente 50% de toutes les chirurgies pulmonaires confondues (3) et 80% des résections pour cancer du poumon (2). En plus d'être la population majoritaire parmi les patients opérés de résection pulmonaire pour cancer, les patients bénéficiant d'une lobectomie pulmonaire sont les plus délicats à orienter en post-opératoire. En effet, la grande majorité des patients bénéficiant d'une résection mineure de type wedge aura une évolution simple et ne nécessitera ni prise en charge en soins critiques ni mesures de réhabilitation intensive. A l'inverse, les patients pneumectomisés sont tous à très haut risque de complication et la prise en charge post-opératoire associant réhabilitation intensive et surveillance rapprochée ne se discute pas. La lobectomie en revanche représente une population plus hétérogène de patients, développant une CPP dans 15% des cas en moyenne (2). Au sein de cette population, il est donc probable que des patients puissent bénéficier plus que d'autres d'une réhabilitation intensive et d'une surveillance rapprochée. A ce jour, les politiques de service sont très souvent différentes et contraintes par les ressources matérielles et en personnel. Dans notre centre, nous avons développé une unité de surveillance continue accueillant tous les patients lobectomisés. Cette expérience confirme qu'une proportion de patients évolue rapidement favorablement et ont des durées de séjour dans cette unité de l'ordre de 72h tandis que d'autres vont présenter une évolution plus compliquée et nécessiter des soins plus lourds et plus prolongés.

Si les facteurs de risque pré-opératoire décrits précédemment (tabagisme préopératoire actif, score ASA, etc.) sont associés à la survenue de complications post-opératoires, ils restent très imparfaits pour prédire l'évolution des opérés. De même, des évènements per-opératoires semblent impacter la survenue de CPP comme la durée de ventilation unipulmonaire ou le recours à une FiO₂ plus élevée, à une CPAP sur le poumon exclu ou à l'utilisation d'almitrine. Ces facteurs non modifiables en post-opératoire peuvent traduire des anomalies d'aération pulmonaire (du poumon non opéré notamment) déjà présentes en per-opératoire. Ainsi, suivre l'évolution précoce de l'aération pulmonaire dès les premières heures post-opératoires pour identifier les patients à risque de complications dans les jours suivants pourrait permettre d'intensifier la prise en charge des patients de ce sous-groupe, tandis que les patients évoluant favorablement pourraient plus rapidement être ré-orientés vers un circuit chirurgical plus conventionnel. A ce titre, disposer d'un outil diagnostique fiable, facilement accessible, simple, peu coûteux et bien accepté est un objectif important pour la prise en charge des patients opérés du thorax. Notre étude suggère que l'EIT puisse être cet outil prédictif, permettant de détecter une perte d'aération avant que celle-ci n'ait de retentissement clinique. L'EIT permettrait donc une classification des patients selon leur risque de CPP, permettant de personnaliser la prise en charge en post-opératoire de chirurgie de résection pulmonaire.

Enfin, notre étude est en accord avec les données précédemment publiées rapportant une augmentation très significative de la durée de séjour en USC (médiane de 7 jours contre 3) comme à l'hôpital (médiane de 12 jours contre 7) chez les patients présentant une complication pulmonaire post-opératoire. Cette durée de séjour supplémentaire, ainsi que les interventions thérapeutiques nécessaires à la prise en charge de la CPP, sont associées à une majoration du coût du séjour hospitalier estimée autour de 11.000\$ par complication et par patient dans une étude rétrospective américaine (30). Si son efficacité à prédire la survenue de CPP et à orienter la prise en charge des patients venait à se confirmer, il est envisageable que l'EIT puisse participer à la réduction de la durée et du coût du séjour hospitalier chez ces patients.

3. FORCES DE L'ETUDE

Il s'agit de la première étude s'intéressant à l'utilisation de la tomographie par impédance électrique pour l'évaluation de l'aération pulmonaire en per et post-opératoire de chirurgie thoracique. Peu d'études se sont à l'heure actuelle penchées sur l'utilisation de l'EIT en dehors de la réanimation. La question posée est celle de la prédiction des complications pulmonaires post-opératoires, qui représentent une cause importante et persistante de morbi-mortalité, tout particulièrement en chirurgie thoracique.

Cette étude fait preuve de concept. L'utilisation de la technique d'EIT est possible en chirurgie thoracique malgré la présence de drains et de cicatrices au niveau thoracique. L'acquisition de données n'en est que très peu compliquée, et ces dernières sont interprétables. Les résultats obtenus sont concordants avec les données de la littérature, ainsi une perte d'aération visualisée par une diminution de la variation d'impédance est systématiquement constatée après induction de l'anesthésie générale et en post-opératoire. De même, les valeurs absolues de TIV recueillies sont du même ordre de grandeur que celles obtenues dans les études de validation et de reproductibilité de la mesure (65). Les résultats obtenus, même lorsque non significatifs, sont concordants entre eux et tendent tous chez les patients qui vont présenter une CPP vers une plus mauvaise ré-aération du poumon opéré en post-opératoire précoce et/ou une plus grande perte d'aération du poumon non opéré un peu plus à distance.

4. LIMITES DE L'ETUDE

4.1 Limites méthodologiques

La principale limite de notre étude est l'effectif relativement faible inclus, ayant contribué à un manque de puissance pour l'analyse d'un certain nombre de paramètres. En effet, bien que parmi les plus conséquents dans l'utilisation de l'EIT en péri-opératoire, la taille de notre échantillon est modeste, d'autant plus que des données ponctuellement manquantes à un des temps d'enregistrement ont empêché de calculer tous les deltas entre chaque point chez tous les patients. De plus, bien que l'incidence de complications respiratoires dans notre étude soit superposable avec celle rapportée dans la littérature (2), la taille de l'échantillon devient

encore plus modeste si on considère le sous-groupe des patients qui ont présenté une ou des complications pulmonaires post-opératoires, obligeant à interpréter les résultats avec précaution. La principale raison à cette taille d'échantillon inclus et à l'existence de données manquantes est qu'il s'agissait de la première utilisation de la technique d'EIT dans notre centre, à laquelle seul un petit nombre de cliniciens a pu être formé avant le début des inclusions. En effet, l'absence de personnel formé au moment de la prise en charge a constitué le principal motif de non inclusion de patients incluables, représentant 50% de l'effectif évalués pour éligibilité. De même, les mesures post-opératoires ont parfois dû être réalisées par un intervenant peu rodé à la technique, notamment lors des week-ends, aboutissant à des enregistrements parfois non exploitables.

4.2 Limites liées aux paramètres évalués

Les paramètres choisis dans notre étude (TIV et IR) font partie des paramètres les plus accessibles et les plus simples à comprendre qu'offre la tomographie par impédance électrique. L'objectif de cette première étude sur cette technique dans notre centre n'était pas d'évaluer la pertinence de mesures ou de paramètres dérivés plus complexes. Cependant, TIV et IR fournissent des informations sur la ventilation à l'échelle d'un poumon et ne permettent pas d'analyser plus finement la ventilation à l'échelle intra-pulmonaire. Il est ainsi envisageable que d'autres paramètres dérivés de l'EIT puissent détecter encore plus précocement la perte d'aération pulmonaire, et distinguer encore plus efficacement les patients les plus à risque de complications au sein de l'ensemble de la cohorte des opérés de résection pulmonaire.

Parmi ces paramètres complémentaires, trois pourraient être pertinents en post-opératoire de chirurgie thoracique (84,86). Le centre de ventilation (CoV) se rapproche de l'IR mais est calculé à partir de la division de la ventilation régionale en 64 zones d'intérêt et est pondéré par les variations de distribution ventilatoire dans le plan dorso-ventral. Il permet une évaluation plus précise de la contribution relative de chaque poumon à la ventilation, notamment en éliminant du calcul les pixels n'ayant aucune participation à la variation d'impédance. Le *global inhomogeneity index* (GI) représente la dispersion dans la distribution du volume courant, c'est-à-dire le degré global d'hétérogénéité spatiale de la ventilation. Pour l'obtenir, la somme des calculs de différence de variation d'impédance entre chaque pixel et la

valeur médiane de variation d'impédance de tous les pixels est normalisée sur la somme des valeurs de variation d'impédance. Le résultat obtenu reflète le degré d'homogénéité de la ventilation, ainsi plus le GI est faible moins le poumon présente de zones de surdistension ou d'atélectasie (mais sans distinguer l'une de l'autre). Le *regional ventilation delay* (RVD) est une mesure dynamique dans le temps reflétant le retard à la distribution de l'air inspiré dans certaines régions du poumon, correspondant à des zones d'atélectasie. Il est calculé comme l'écart-type des mesures du temps nécessaire pour chaque pixel à atteindre 40% de sa valeur maximale de changement d'impédance. Plus le RVD est faible et plus la distribution temporelle de la ventilation est homogène.

Ces deux derniers paramètres (GI et RVD) pourraient être pertinents pour évaluer la perte d'aération en post-opératoire de chirurgie thoracique. Ils n'ont cependant été utilisés à l'heure actuelle qu'en ventilation contrôlée au cours de manœuvres de recrutement par incrémentation de PEP, et leur applicabilité au contexte particulier du péri-opératoire n'est pas démontrée.

5. PERSPECTIVES FUTURES

Notre étude apporte des résultats préliminaires intéressants mais souffre d'un manque de puissance lié à la taille de l'échantillon analysé. Il est donc nécessaire de poursuivre les inclusions après formation d'un nombre suffisant d'intervenants à la technique. Ceci permettrait d'obtenir un taux d'inclusion autour de 80%, d'éviter les exclusions de l'analyse pour enregistrement de mauvaise qualité et d'aboutir en peu de temps à une cohorte suffisante pour confirmer et enrichir les résultats ici obtenus. Il sera pertinent de réaliser dans le même temps les mesures du CoV, du GI et du RVD pour étudier leur éventuelle plus-value pour la prédiction de complications pulmonaires post-opératoires. Il conviendra aussi de définir des valeurs-seuils performantes sur un effectif plus large pour permettre une utilisation en pratique courante et stratifier les patients durant la période post-opératoire précoce sur leur niveau de risque de complications respiratoires.

L'étape suivant la validation des paramètres utilisables et de leur valeur-seuil pour prédire la survenue de CPP sera d'étudier l'éventuel bénéfice de mesures intensives et ciblées de réhabilitation post-opératoire dans le sous-groupe de patients ainsi identifiés comme le plus "à risque". Cette prise en charge intensive pourrait être calquée sur les protocoles proposés dans

les études randomisées, incluant notamment la mise en place de VNI préventive (43). Une différence entre les groupes en termes de CPP permettrait alors de directement relier l'utilisation de l'EIT à une diminution de la morbidité post-opératoire.

Ces perspectives de recherche sont d'autant plus encouragées par le développement rapide des performances biophysiques et des algorithmes de reconstruction de l'EIT (87), permettant une visualisation de plus en plus précise de la distribution de la ventilation pulmonaire en temps réel.

CONCLUSION

Les complications pulmonaires post-opératoires restent un enjeu crucial de la prise en charge des patients opérés de chirurgie thoracique avec résection pulmonaire. Malgré les progrès des techniques chirurgicales et de la prise en charge anesthésique, elles restent au premier rang des complications post-opératoires, sont pourvoyeuses d'une morbi-mortalité élevée et nécessitent des interventions thérapeutiques souvent complexes. Le recours à des mesures préventives telle que la ventilation non invasive est inefficace en cas d'application systématique à une population non sélectionnée de patients. Un outil fiable - et réalisable au lit du patient - de dépistage précoce des patients les plus à risque est nécessaire. La tomographie par impédance électrique permet de visualiser l'aération pulmonaire en temps réel. Nous avons montré que l'évolution de certains paramètres simples d'EIT, utilisables en routine, est associée à la survenue de complication pulmonaire. L'utilisation de l'EIT en post-opératoire de chirurgie thoracique pourrait donc permettre de cibler les patients les plus à risque chez qui l'intensification des mesures de recrutement alvéolaire pourrait être la plus bénéfique. D'autres études sont nécessaires pour confirmer les résultats préliminaires obtenus dans notre étude et pour démontrer l'impact positif de l'utilisation de la tomographie par impédance électrique sur le devenir post-opératoire.

BIBLIOGRAPHIE

1. Bernard A, Rivera C, Pages PB, Falcoz PE, Vicaut E, Dahan M. Risk model of in-hospital mortality after pulmonary resection for cancer: a national database of the French Society of Thoracic and Cardiovascular Surgery (Epithor). *J Thorac Cardiovasc Surg.* févr 2011;141(2):449-58.
2. Thomas PA, Berbis J, Falcoz P-E, Le Pimpec-Barthes F, Bernard A, Jougon J, et al. National perioperative outcomes of pulmonary lobectomy for cancer: the influence of nutritional status. *Eur J Cardio-Thorac Surg Off J Eur Assoc Cardio-Thorac Surg.* avr 2014;45(4):652-9; discussion 659.
3. Stéphan F, Boucheseiche S, Hollande J, Flahault A, Cheffi A, Bazelly B, et al. Pulmonary complications following lung resection: a comprehensive analysis of incidence and possible risk factors. *Chest.* nov 2000;118(5):1263-70.
4. Falcoz P-E, Puyraveau M, Rivera C, Bernard A, Massard G, Mauny F, et al. The impact of hospital and surgeon volume on the 30-day mortality of lung cancer surgery: A nation-based reappraisal. *J Thorac Cardiovasc Surg.* sept 2014;148(3):841-8; discussion 848.
5. Bach PB, Cramer LD, Schrag D, Downey RJ, Gelfand SE, Begg CB. The influence of hospital volume on survival after resection for lung cancer. *N Engl J Med.* 19 juill 2001;345(3):181-8.
6. Uramoto H, Nakanishi R, Fujino Y, Imoto H, Takenoyama M, Yoshimatsu T, et al. Prediction of pulmonary complications after a lobectomy in patients with non-small cell lung cancer. *Thorax.* janv 2001;56(1):59-61.
7. Licker MJ, Widikker I, Robert J, Frey J-G, Spiliopoulos A, Ellenberger C, et al. Operative mortality and respiratory complications after lung resection for cancer: impact of chronic obstructive pulmonary disease and time trends. *Ann Thorac Surg.* mai 2006;81(5):1830-7.
8. Licker M, de Perrot M, Höhn L, Tschopp JM, Robert J, Frey JG, et al. Perioperative mortality and major cardio-pulmonary complications after lung surgery for non-small cell carcinoma. *Eur J Cardio-Thorac Surg Off J Eur Assoc Cardio-Thorac Surg.* mars 1999;15(3):314-9.
9. Nakagawa M, Tanaka H, Tsukuma H, Kishi Y. Relationship between the duration of the preoperative smoke-free period and the incidence of postoperative pulmonary complications after pulmonary surgery. *Chest.* sept 2001;120(3):705-10.
10. Bernard A, Deschamps C, Allen MS, Miller DL, Trastek VF, Jenkins GD, et al. Pneumonectomy for malignant disease: Factors affecting early morbidity and mortality. *J Thorac Cardiovasc Surg.* 1 juin 2001;121(6):1076-82.

11. Rotman JA, Plodkowski AJ, Hayes SA, de Groot PM, Shepard J-AO, Munden RF, et al. Postoperative complications after thoracic surgery for lung cancer. *Clin Imaging.* oct 2015;39(5):735-49.
12. Sok M, Dragas AZ, Erzen J, Jerman J. Sources of pathogens causing pleuropulmonary infections after lung cancer resection. *Eur J Cardio-Thorac Surg Off J Eur Assoc Cardio-Thorac Surg.* juill 2002;22(1):23-7; discussion 27-29.
13. Jawitz OK, Boffa DJ, Detterbeck FC, Wang Z, Kim AW. Estimating the Annual Incremental Cost of Several Complications Following Pulmonary Lobectomy. *Semin Thorac Cardiovasc Surg.* Summer 2016;28(2):531-40.
14. Ferguson MK, Vigneswaran WT. Changes in patient presentation and outcomes for major lung resection over three decades. *Eur J Cardio-Thorac Surg Off J Eur Assoc Cardio-Thorac Surg.* mars 2008;33(3):497-501.
15. Abbott TEF, Fowler AJ, Pelosi P, Abreu MG de, Møller AM, Canet J, et al. A systematic review and consensus definitions for standardised end-points in perioperative medicine: pulmonary complications. *Br J Anaesth.* 1 mai 2018;120(5):1066-79.
16. Hedenstierna G, Strandberg A, Brismar B, Lundquist H, Tokics L. What causes the lowered FRC during anaesthesia? *Clin Physiol Oxf Engl.* 1985;5 Suppl 3:133-41.
17. Brismar B, Hedenstierna G, Lundquist H, Strandberg A, Svensson L, Tokics L. Pulmonary densities during anesthesia with muscular relaxation--a proposal of atelectasis. *Anesthesiology.* avr 1985;62(4):422-8.
18. Lohser J, Slinger P. Lung Injury After One-Lung Ventilation: A Review of the Pathophysiologic Mechanisms Affecting the Ventilated and the Collapsed Lung. *Anesth Analg.* août 2015;121(2):302-18.
19. Warner DO. Preventing postoperative pulmonary complications: the role of the anesthesiologist. *Anesthesiology.* mai 2000;92(5):1467-72.
20. Vassilakopoulos T, Mastora Z, Katsaounou P, Doukas G, Klimopoulos S, Roussos C, et al. Contribution of pain to inspiratory muscle dysfunction after upper abdominal surgery: A randomized controlled trial. *Am J Respir Crit Care Med.* avr 2000;161(4 Pt 1):1372-5.
21. Daniel M, Huynh T m., Martin J, Ferraris A, Guessous K, Zlotnik D, et al. Diaphragmatic Dysfunction Following Thoracic Surgery: An Echographic Assessment. In: C109 RESPIRATORY MUSCLE DYSFUNCTION: MECHANISM AND ASSESSMENT [Internet]. American Thoracic Society; 2019 [cité 9 août 2020]. p. A5789-A5789. (American Thoracic Society International Conference Abstracts). Disponible sur: https://www.atsjournals.org/doi/abs/10.1164/ajrccm-conference.2019.199.1_MeetingAbstracts.A5789
22. Oswald NK, Halle-Smith J, Mehdi R, Nightingale P, Naidu B, Turner AM. Predicting Postoperative Lung Function Following Lung Cancer Resection: A Systematic Review and Meta-analysis. *EClinicalMedicine.* 10 sept 2019;15:7-13.

23. Dales RE, Dionne G, Leech JA, Lunau M, Schweitzer I. Preoperative prediction of pulmonary complications following thoracic surgery. *Chest*. juill 1993;104(1):155-9.
24. Pate P, Tenholder MF, Griffin JP, Eastridge CE, Weiman DS. Preoperative assessment of the high-risk patient for lung resection. *Ann Thorac Surg*. mai 1996;61(5):1494-500.
25. Solway S, Brooks D, Lacasse Y, Thomas S. A qualitative systematic overview of the measurement properties of functional walk tests used in the cardiorespiratory domain. *Chest*. janv 2001;119(1):256-70.
26. Pipanmekaporn T, Bunchungmongkol N, Punjasawadwong Y, Lapisatepun W, Tantraworasin A, Saokaew S. A risk score for predicting respiratory complications after thoracic surgery. *Asian Cardiovasc Thorac Ann*. mai 2019;27(4):278-87.
27. Brooks-Brunn JA. Postoperative atelectasis and pneumonia: risk factors. *Am J Crit Care Off Publ Am Assoc Crit-Care Nurses*. sept 1995;4(5):340-9; quiz 350-1.
28. Patel RL, Townsend ER, Fountain SW. Elective pneumonectomy: factors associated with morbidity and operative mortality. *Ann Thorac Surg*. juill 1992;54(1):84-8.
29. Wada H, Nakamura T, Nakamoto K, Maeda M, Watanabe Y. Thirty-day operative mortality for thoracotomy in lung cancer. *J Thorac Cardiovasc Surg*. 1 janv 1998;115(1):70-3.
30. Handy JR, Denniston K, Grunkemeier GL, Wu YX. What is the inpatient cost of hospital complications or death after lobectomy or pneumonectomy? *Ann Thorac Surg*. janv 2011;91(1):234-8.
31. Réhabilitation améliorée après lobectomie pulmonaire - La SFAR [Internet]. Société Française d'Anesthésie et de Réanimation. 2019 [cité 29 août 2020]. Disponible sur: <https://sfar.org/rehabilitation-amelioree-apres-lobectomie-pulmonaire/>
32. Kendall F, Abreu P, Pinho P, Oliveira J, Bastos P. The role of physiotherapy in patients undergoing pulmonary surgery for lung cancer. A literature review. *Rev Port Pneumol*. déc 2017;23(6):343-51.
33. Park S-H. Perioperative lung-protective ventilation strategy reduces postoperative pulmonary complications in patients undergoing thoracic and major abdominal surgery. *Korean J Anesthesiol*. févr 2016;69(1):3-7.
34. Licker M, Diaper J, Villiger Y, Spiliopoulos A, Licker V, Robert J, et al. Impact of intraoperative lung-protective interventions in patients undergoing lung cancer surgery. *Crit Care*. 24 mars 2009;13(2):R41.
35. Marret E, Cinotti R, Berard L, Piriou V, Jobard J, Barrucand B, et al. Protective ventilation during anaesthesia reduces major postoperative complications after lung cancer surgery: A double-blind randomised controlled trial. *Eur J Anaesthesiol*. oct 2018;35(10):727-35.

36. Blank RS, Colquhoun DA, Durieux ME, Kozower BD, McMurry TL, Bender SP, et al. Management of One-lung Ventilation: Impact of Tidal Volume on Complications after Thoracic Surgery. *Anesthesiology*. 2016;124(6):1286-95.
37. Futier E, Marret E, Jaber S. Perioperative positive pressure ventilation: an integrated approach to improve pulmonary care. *Anesthesiology*. août 2014;121(2):400-8.
38. Danner BC, Koerber W, Emmert A, Olgemoeller U, Doerge H, Quintel M, et al. Non-Invasive Pressure Support Ventilation in Major Lung Resection for High Risk Patients: Does It Matter? *Open J Thorac Surg*. 28 sept 2012;2(3):63-71.
39. Perrin C, Jullien V, Vénissac N, Berthier F, Padovani B, Guillot F, et al. Prophylactic use of noninvasive ventilation in patients undergoing lung resectional surgery. *Respir Med*. juill 2007;101(7):1572-8.
40. Barbagallo M, Ortu A, Spadini E, Salvadori A, Ampollini L, Internullo E, et al. Prophylactic use of helmet CPAP after pulmonary lobectomy: a prospective randomized controlled study. *Respir Care*. sept 2012;57(9):1418-24.
41. Garutti I, Puente-Maestu L, Laso J, Sevilla R, Ferrando A, Frias I, et al. Comparison of gas exchange after lung resection with a Boussignac CPAP or Venturi mask. *Br J Anaesth*. mai 2014;112(5):929-35.
42. Ludwig C, Angenendt S, Martins R, Mayer V, Stoelben E. Intermittent positive-pressure breathing after lung surgery. *Asian Cardiovasc Thorac Ann*. févr 2011;19(1):10-3.
43. Torres MF, Porfírio GJ, Carvalho AP, Riera R. Non-invasive positive pressure ventilation for prevention of complications after pulmonary resection in lung cancer patients. *Cochrane Database Syst Rev*. 06 2019;3:CD010355.
44. Pallechi A, Privitera E, Lazzeri M, Mariani S, Rosso L, Tosi D, et al. Prophylactic continuous positive airway pressure after pulmonary lobectomy: a randomized controlled trial. *J Thorac Dis*. mai 2018;10(5):2829-36.
45. Freynet A, Falcoz P-E. Does non-invasive ventilation associated with chest physiotherapy improve outcome after lung resection? *Interact Cardiovasc Thorac Surg*. déc 2008;7(6):1152-4.
46. Auriant I, Jallot A, Hervé P, Cerrina J, Le Roy Ladurie F, Fournier JL, et al. Noninvasive ventilation reduces mortality in acute respiratory failure following lung resection. *Am J Respir Crit Care Med*. 1 oct 2001;164(7):1231-5.
47. Lefebvre A, Lorut C, Alifano M, Dermine H, Roche N, Gauzit R, et al. Noninvasive ventilation for acute respiratory failure after lung resection: an observational study. *Intensive Care Med*. avr 2009;35(4):663-70.
48. Lorut C, Lefebvre A, Planquette B, Quinquis L, Clavier H, Santelmo N, et al. Early postoperative prophylactic noninvasive ventilation after major lung resection in COPD patients: a randomized controlled trial. *Intensive Care Med*. févr 2014;40(2):220-7.

49. Chiumello D, Froio S, Bouhemad B, Camporota L, Coppola S. Clinical review: Lung imaging in acute respiratory distress syndrome patients--an update. *Crit Care Lond Engl.* 18 nov 2013;17(6):243.
50. Luecke T, Corradi F, Pelosi P. Lung imaging for titration of mechanical ventilation. *Curr Opin Anaesthesiol.* avr 2012;25(2):131-40.
51. Constantin J-M, Perbet S, Delmas J, Futier E. Electrical impedance tomography: so close to touching the holy grail. *Crit Care Lond Engl.* 8 juill 2014;18(4):164.
52. Gattinoni L, Caironi P, Pelosi P, Goodman LR. What has computed tomography taught us about the acute respiratory distress syndrome? *Am J Respir Crit Care Med.* 1 nov 2001;164(9):1701-11.
53. Gattinoni L, Pelosi P, Pesenti A, Brazzi L, Vitale G, Moretto A, et al. CT scan in ARDS: clinical and physiopathological insights. *Acta Anaesthesiol Scand Suppl.* 1991;95:87-94; discussion 94-96.
54. Reinius H, Jonsson L, Gustafsson S, Sundbom M, Duvernoy O, Pelosi P, et al. Prevention of Atelectasis in Morbidly Obese Patients during General Anesthesia and Paralysis A Computerized Tomography Study. *Anesthesiol J Am Soc Anesthesiol.* 1 nov 2009;111(5):979-87.
55. Constantin J-M, Grasso S, Chanques G, Aufferet S, Futier E, Sebbane M, et al. Lung morphology predicts response to recruitment maneuver in patients with acute respiratory distress syndrome. *Crit Care Med.* avr 2010;38(4):1108-17.
56. Chiumello D, Mongodi S, Algieri I, Vergani GL, Orlando A, Via G, et al. Assessment of Lung Aeration and Recruitment by CT Scan and Ultrasound in Acute Respiratory Distress Syndrome Patients. *Crit Care Med.* 2018;46(11):1761-8.
57. Bouhemad B, Brisson H, Le-Guen M, Arbelot C, Lu Q, Rouby J-J. Bedside ultrasound assessment of positive end-expiratory pressure-induced lung recruitment. *Am J Respir Crit Care Med.* 1 févr 2011;183(3):341-7.
58. Papinko M. L'échographie pleuropulmonaire au lit du patient en Salle de Surveillance Post Interventionnelle permet-elle de prédire les complications pulmonaires post opératoires. 13 avr 2018;35.
59. Stefanidis K, Dimopoulos S, Nanas S. Basic principles and current applications of lung ultrasonography in the intensive care unit. *Respirol Carlton Vic.* févr 2011;16(2):249-56.
60. Bouaziz N, Melbouci B. Apport de la tomographie électrique à l'étude des glissements de terrains en Grande Kabylie, Algérie. In 2015.
61. Teschner E, Imhoff M, Leonhardt S. Electrical Impedance Tomography: The realisation of regional ventilation monitoring. :152.

62. Faes TJ, van der Meij HA, de Munck JC, Heethaar RM. The electric resistivity of human tissues (100 Hz-10 MHz): a meta-analysis of review studies. *Physiol Meas.* nov 1999;20(4):R1-10.
63. Visser KR. Electric properties of flowing blood and impedance cardiography. *Ann Biomed Eng.* 1989;17(5):463-73.
64. Adler A, Amyot R, Guardo R, Bates JHT, Berthiaume Y. Monitoring changes in lung air and liquid volumes with electrical impedance tomography. *J Appl Physiol.* 1 nov 1997;83(5):1762-7.
65. Caruana LR, Barnett AG, Tronstad O, Paratz JD, Chang AT, Fraser JF. Global tidal variations, regional distribution of ventilation, and the regional onset of filling determined by electrical impedance tomography: reproducibility. *Anaesth Intensive Care.* 2017;45(2):235-43.
66. Hinz J, Hahn G, Neumann P, Sydow M, Mohrenweiser P, Hellige G, et al. End-expiratory lung impedance change enables bedside monitoring of end-expiratory lung volume change. *Intensive Care Med.* janv 2003;29(1):37-43.
67. Lowhagen K, Lundin S, Stenqvist O. Regional intratidal gas distribution in acute lung injury and acute respiratory distress syndrome assessed by electric impedance tomography. *Minerva Anesthesiol.* 2010;76(12):1024-35.
68. Alves SHS, Amato MBP, Terra RM, Vargas FS, Caruso P. Lung reaeration and reventilation after aspiration of pleural effusions. A study using electrical impedance tomography. *Ann Am Thorac Soc.* févr 2014;11(2):186-91.
69. Corley A, Spooner AJ, Barnett AG, Caruana LR, Hammond NE, Fraser JF. End-expiratory lung volume recovers more slowly after closed endotracheal suctioning than after open suctioning: a randomized crossover study. *J Crit Care.* déc 2012;27(6):742.e1-7.
70. Zhao Z, Steinmann D, Frerichs I, Guttman J, Möller K. PEEP titration guided by ventilation homogeneity: a feasibility study using electrical impedance tomography. *Crit Care Lond Engl.* 2010;14(1):R8.
71. Blankman P, Hasan D, Erik G, Gommers D. Detection of « best » positive end-expiratory pressure derived from electrical impedance tomography parameters during a decremental positive end-expiratory pressure trial. *Crit Care Lond Engl.* 10 mai 2014;18(3):R95.
72. Godet T, Constantin J-M, Jaber S, Futier E. How to monitor a recruitment maneuver at the bedside. *Curr Opin Crit Care.* juin 2015;21(3):253-8.
73. Blanchard F, Picod A, Constantin J-M. Electrical impedance tomography: the solution for lung morphology assessment? *Ann Intensive Care.* 3 août 2020;10(1):102.
74. Franchineau G, Bréchet N, Hekimian G, Lebreton G, Bourcier S, Demondion P, et al. Prone positioning monitored by electrical impedance tomography in patients with severe

- acute respiratory distress syndrome on veno-venous ECMO. *Ann Intensive Care*. 3 févr 2020;10(1):12.
75. Karsten J, Luepschen H, Grossherr M, Bruch H-P, Leonhardt S, Gehring H, et al. Effect of PEEP on regional ventilation during laparoscopic surgery monitored by electrical impedance tomography. *Acta Anaesthesiol Scand*. août 2011;55(7):878-86.
 76. Blankman P, Shono A, Hermans BJM, Wesselius T, Hasan D, Gommers D. Detection of optimal PEEP for equal distribution of tidal volume by volumetric capnography and electrical impedance tomography during decreasing levels of PEEP in post cardiac-surgery patients. *Br J Anaesth*. juin 2016;116(6):862-9.
 77. Karsten J, Heinze H, Meier T. Impact of PEEP during laparoscopic surgery on early postoperative ventilation distribution visualized by electrical impedance tomography. *Minerva Anesthesiol*. févr 2014;80(2):158-66.
 78. Chun EH, Baik HJ, Moon H-S, Jeong K. Comparison of low and high positive end-expiratory pressure during low tidal volume ventilation in robotic gynaecological surgical patients using electrical impedance tomography: A randomised controlled trial. *Eur J Anaesthesiol*. sept 2019;36(9):641-8.
 79. Mauri T, Bellani G, Confalonieri A, Tagliabue P, Turella M, Coppadoro A, et al. Topographic distribution of tidal ventilation in acute respiratory distress syndrome: effects of positive end-expiratory pressure and pressure support. *Crit Care Med*. juill 2013;41(7):1664-73.
 80. Lehmann S, Tenbrock K, Schrading S, Pikkemaat R, Antink CH, Santos S, et al. Monitoring of lobectomy in cystic fibrosis with electrical impedance tomography - a new diagnostic tool. *Biomed Tech (Berl)*. déc 2014;59(6):545-8.
 81. Ramanathan K, Mohammed H, Hopkins P, Corley A, Caruana L, Dunster K, et al. Single-Lung Transplant Results in Position Dependent Changes in Regional Ventilation: An Observational Case Series Using Electrical Impedance Tomography. *Can Respir J*. 2016;2016:2471207.
 82. Pulletz S, Elke G, Zick G, Schädler D, Scholz J, Weiler N, et al. Performance of electrical impedance tomography in detecting regional tidal volumes during one-lung ventilation. *Acta Anaesthesiol Scand*. sept 2008;52(8):1131-9.
 83. Karsten J, Stueber T, Voigt N, Teschner E, Heinze H. Influence of different electrode belt positions on electrical impedance tomography imaging of regional ventilation: a prospective observational study. *Crit Care Lond Engl*. 8 janv 2016;20:3.
 84. Shono A, Kotani T. Clinical implication of monitoring regional ventilation using electrical impedance tomography. *J Intensive Care*. 18 janv 2019;7(1):4.
 85. Duggan M, Kavanagh BP. Pulmonary atelectasis: a pathogenic perioperative entity. *Anesthesiology*. avr 2005;102(4):838-54.

86. Putensen C, Hentze B, Muenster S, Muders T. Electrical Impedance Tomography for Cardio-Pulmonary Monitoring. *J Clin Med* [Internet]. 7 août 2019 [cité 25 août 2020];8(8). Disponible sur: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6722958/>
87. Gong B, Schullcke B, Krueger-Ziolek S, Moeller K. EIT reconstruction using higher order TV regularization. *IFAC-Pap.* 1 juill 2017;50(1):9943-7.

ANNEXES

Annexe A : notice d'information patient

Evaluation de l'aération pulmonaire pré, per et post-opératoire de chirurgie thoracique de résection pulmonaire effectuée sous ventilation uni-pulmonaire par la mesure de l'impédancemétrie thoracique (Etude LUNG-VISTA - v1.1 du 12/11/18)

Madame, Monsieur,

vous allez être hospitalisé(e) en vue d'une intervention chirurgicale par lobectomie pulmonaire sous anesthésie générale. Ce geste chirurgical d'ablation d'une partie de l'un de vos poumons est rendu nécessaire par la pathologie pulmonaire que vous présentez. Comme l'anesthésiste que vous allez rencontrer en consultation va vous l'expliquer en détail, cette chirurgie est réalisée sous anesthésie générale, durant laquelle votre respiration sera assurée grâce à un ventilateur. Pour réaliser la lobectomie, votre chirurgien aura besoin pendant l'intervention que votre poumon opéré ne soit pas ventilé. Durant cette phase de la chirurgie, votre respiration sera assurée grâce à la ventilation exclusive de votre poumon non opéré. C'est ce qu'on appelle la « ventilation uni-pulmonaire ».

Comme votre chirurgien, l'anesthésiste et l'infirmière de réhabilitation respiratoire vous en ont déjà ou vont vous en parler, un certain nombre de mesures pré, per et post-opératoires seront prises afin que votre chirurgie se passe au mieux et d'en réduire le risque de complications. Toutefois, la chirurgie dont vous allez bénéficier présente des risques de complications et notamment de complications cardio-respiratoires post-opératoires. Une des complications respiratoires les plus fréquentes après une intervention comme celle que vous allez avoir, est l'apparition durant la période post-opératoire d'un tassement de certaines zones pulmonaires que l'on appelle des « atélectasies ». La survenue d'atélectasies est liée à plusieurs facteurs dont la chirurgie, l'anesthésie générale, une moindre force des muscles respiratoires en post-opératoire, des douleurs thoraciques post-opératoires insuffisamment contrôlées ou encore la présence d'un épanchement post-opératoire de la plèvre. Plusieurs mesures seront prises pour diminuer ce risque, comme le drainage thoracique, la prescription de techniques et/ou de médicaments analgésiques, ou encore la kinésithérapie respiratoire. Toutefois, malgré ces mesures préventives environ 10 à 20% des patients présentent des atélectasies post-opératoires après une lobectomie, de taille variable et de retentissement variable. Dans la majorité des cas, l'atélectasie post-opératoire est sans conséquence et va se corriger dans les premiers jours après l'intervention avec la réhabilitation post-opératoire. Dans une minorité de cas, les atélectasies peuvent se compliquer d'hypoxémie (baisse de la quantité d'oxygène dans le sang), voire d'infection pulmonaire.

Il est donc important pour les médecins anesthésistes-réanimateurs qui s'occuperont de votre prise en charge péri-opératoire de disposer d'un moyen diagnostique permettant de détecter le plus rapidement possible la survenue d'atélectasies post-opératoires afin, le cas échéant, de renforcer votre surveillance et les mesures thérapeutiques comme la kinésithérapie respiratoire ou la ventilation non-invasive post-opératoire. A ce jour, aucun outil diagnostique ne permet de détecter précocement et de façon sensible la survenue d'atélectasies post-opératoires. L'examen de référence reste la radiographie de thorax, mais celle-ci n'est que très imparfaite, sa qualité diagnostique étant assez médiocre surtout dans le contexte post-opératoire et pour détecter des atélectasies de petites tailles.

Un nouvel outil non invasif de surveillance de l'aération pulmonaire est à présent disponible au bloc opératoire. Il s'agit de l'impédancemétrie thoracique. Cette technique repose sur l'utilisation d'un très faible courant électrique et de l'enregistrement des tensions qui en résultent dans la cage thoracique grâce à l'intermédiaire d'une ceinture portée au niveau du thorax. Cette ceinture flexible en silicone munie de 16 électrodes permet de surveiller la fonction pulmonaire du patient, sans aucune manœuvre invasive ou stressante, sans rayonnement ionisant (pas d'utilisation de rayons X), et au chevet du patient sans avoir à le transporter. Le courant électrique employé par cette technique est de très faible intensité et est absolument indolore. Aucune complication relative au port de la ceinture d'impédancemétrie thoracique n'a à ce jour été rapportée. Cet appareil est actuellement

distribué par la société Dräger® sous le nom de Pulmovista® et dispose de tous les marquages nécessaires à sa commercialisation.

Cette technique prometteuse n'a été que récemment proposée en routine clinique pour la surveillance des patients de réanimation ou de bloc opératoire. Ainsi, son intérêt pour le dépistage précoce des atélectasies post-opératoires en post-opératoire de lobectomie pulmonaire n'a pas encore été évalué. C'est à cette évaluation que nous vous proposons de participer. Si vous ne vous y opposez pas, l'équipe anesthésique qui s'occupera de vous au bloc opératoire et en salle de surveillance post-interventionnelle (SSPI) le jour de votre intervention, et celle qui s'occupera de vous en Unité de Soins Continus (USC) post-opératoires durant les premiers jours suivant votre chirurgie utilisera la technologie Pulmovista® pour surveiller votre aération pulmonaire et la survenue d'atélectasies post-opératoires.

Dans le cadre de l'évaluation clinique de l'intérêt de cette technique, des données cliniques vous concernant et des enregistrements de votre aération pulmonaire par la technique Pulmovista® seront collectés de façon anonyme. Aucune donnée avec votre identité ne sera enregistrée. Aucun acte invasif, ni prélèvement ou administration de médicament supplémentaire ne seront réalisés. Les soins qui vous seront prodigués seront les mêmes que ceux effectués habituellement par notre équipe médico-chirurgicale. La seule procédure qui sera rajoutée par cette recherche sera le port de la ceinture d'impédancemétrie thoracique avant et pendant l'induction de votre anesthésie générale, puis à la fin de la chirurgie pendant votre réveil et votre transfert en SSPI. Enfin, une dernière mesure de votre aération pulmonaire sera effectuée le lendemain de votre intervention chirurgicale au cours de votre hospitalisation en USC post-opératoires.

Ce projet de recherche non-interventionnel a reçu un avis favorable du Comité de Protection des Personnes Sud-Est V en date du 20/12/2018. Vous pouvez toutefois vous opposer à ce que vos données personnelles soient utilisées pour l'analyse des résultats de cette recherche, et ce à n'importe quel moment. Si vous vous opposez à cette recherche, il conviendra de le préciser au médecin investigateur principal ou au délégué à la protection des données sans aucune justification de votre part et sans encourir aucune responsabilité ni aucun préjudice de ce fait. En cas de refus, vous bénéficieriez de la même qualité de soins et de surveillance.

Si vous le désirez, vous pourrez être tenu informé des résultats globaux de cette recherche une fois celle-ci achevée. Conformément à la loi « informatique et liberté », vous gardez à tout moment un droit d'accès et de rectification des données vous concernant, sans encourir aucune responsabilité ni aucun préjudice de ce fait. Le stockage des données recueillies dans le cadre de cette étude a fait l'objet d'une déclaration à la Commission Nationale Informatique et Liberté (CNIL) selon la méthodologie de référence "recherche dans le domaine de la santé sans recueil du consentement » (MR03) sans transfert d'information hors de l'Union Européenne (numéro d'enregistrement 2205847v0). Le traitement des données sera fait dans le respect du règlement UE N° 679/2016 du parlement européen et de la loi du 20 juin 2018 relative à la protection des données personnelles. Ceci signifie que les données vous concernant ne pourront ni être cédées à un industriel, ni faire l'objet d'une exploitation commerciale ou ne pourront pas faire l'objet de recherches ultérieures à la présente recherche, quelles que soient les conditions décrites de confidentialité et de protection.

Pour tout arrêt de participation, les données recueillies précédemment à cet arrêt seront utilisées conformément à la réglementation sauf si vous vous y opposez expressément auprès du délégué à la protection des données (Dr Christophe Quesnel). Vous avez la possibilité à tout moment de demander dans le cadre de cette recherche, la destruction des données vous concernant auprès du délégué à la protection des données (

Le Docteur Marc Garnier, investigateur principal, reste à votre disposition pour répondre à vos questions. Vous pouvez le contacter à l'adresse suivante :

Docteur Marc Garnier - CHU Tenon - Département d'Anesthésie-Réanimation
4 rue de la Chine, 75020 Paris

Je soussigné(e) reconnaît avoir été informé du protocole de recherche LUNG-VISTA réalisé à l'hôpital Tenon, le/...../20.... par le Dr ; et ne pas m'opposer à ce que des données cliniques et des enregistrement de mon aération pulmonaire soient recueillies de façon anonyme dans le cadre de cette étude.

Signature

Annexe B : accord du Comité de Protection des Personnes.

**COMITE DE PROTECTION DES PERSONNES
Sud Est V**

Grenoble le, 20/12/2018

Président :
Dr Daniel ANGLADE

Vice-Président :
A-M. BENOIT-BALLANSAT

Secrétaire Général :
Dr Arnaud SEIGNEURIN

Secrétaire Général Adjoint :
Dr Dominique CHARLETY

Trésorière :
Mme S. CALVINO-GUNTHER

Site internet
<http://www.cppsudest5.fr>

Secrétariat :
cppsudest5@chu-grenoble.fr

F. LUCZAK
N. CESTARO
Tel : 04 78 76 51 77
Fax : 04 78 76 51 77
GSM : 06 50 85 79 26

Domiciliation :

CHU de Grenoble
Comité de Protection des
Personnes

Adresse postale :
CS 10217
38043 GRENOBLE Cedex 9

Adresse géographique :
R.C. Haut
Hall Vercors
Bd de la Chantourne
38700 LA TRONCHE

N° SIRET : 130 016 017 00019
N°APE : 8412Z

CHU Tenon - GH Paris Est
Monsieur le Dr Marc GARNIER
Département d'Anesthésie et Réanimation
4 rue de la Chine
75020 PARIS

81. Réf. CPP: 18-APHP-08

Ref Etude : LUNG-Vista
N° ID RCB : 2018-A02419-46
SNI CNRIPH : 18.09.05.56816

Documents fournis :
Protocole : Version 1.0 du 27/08/2018
Lettre d'information au patient : Version 1.0 du 27/08/18

Autres documents :
Courrier demande d'avis,
N° ID-RCB,
Résumé du protocole,
Fiche de recueil des données,
CV investigateur coordonnateur,
Liste des investigateurs,
Déclaration conformité MR03-CNIL,
Marquage CE appareil Pulmovista,
Notice d'utilisation appareil Pulmovista.

ET
Protocole long LUNG VISTA_v1.1 du 12/11/2018
Formulaire opposition patient LUNGVISTA_v1.0 du 12/11/2018
Notice information patient LUNGVISTA_v1.1 du 12/11/2018
Recueil EI

Promoteur : Hospices Civils de LYON
Investigateur Principal : Pr J. BACCHETTA - Hôpital Femme Mère Enfant - HCL - BRON
Type Recherche Biomédicale : TYPE 3

Objet : Avis favorable

Madame,

Le Président du Comité, a donné un avis FAVORABLE, en date du 11 Décembre 2018, pour le protocole, reçu le 11/10/2018, complété le 26/11/2018, intitulé :

Evaluation de l'aération pulmonaire en pré, per et postopératoire de chirurgie thoracique de résection pulmonaire effectuée sous ventilation unipulmonaire, par la mesure de l'impédancemétrie thoracique

après consultation des rapporteurs et examen par le Comité aux séances des 06/11/2018, et 11/12/2018.

Le promoteur est le CHU Tenon GH Paris Est - Département d'Anesthésie et Réanimation (chef de service Dr C. Quesnel) - 4 rue de la Chine – 75020 Paris

L'investigateur principal est le Dr Marc GARNIER - Département d'Anesthésie et Réanimation - Hôpital Tenon – 4 rue de la Chine – 75020 Paris
N° RPPS : 10100302065

Les investigateurs associés sont à l'Hôpital Tenon - Département d'Anesthésie et Réanimation – 4 rue de la Chine – 75020 Paris
Dr Medhi HAFIANI - N° RPPS : 10100521169
Dr Clémentine TACONET N° RPPS : 10100709467
Dr Jullien BUREY N° RPPS : 10101024304

Les personnes ayant délibéré sur le projet sont :

1er collège :

1 - Recherche biomédicale

Titulaires : Dr ANGLADE Daniel

Mme PARIS Adeline

Dr SEIGNEURIN Amaud

Suppléant : Mme NDONGO-THIAM Ndiémé

2 - Médecin généraliste :

Titulaire : Mme PARADIS Sabrina

3 – Pharmacien hospitalier

Titulaire : Mme CHARLETY Dominique

4 – Infirmier :

Titulaire : M. DUJARDIN Pierre-Philippe

Suppléant : Mme CALVINO GÜNTHER Sylvia

2ème collège :

5 - Personnes qualifiées "éthique"

Titulaire : M. BASSET Pierre

6 - Psychologue

Néant

7 – Travailleur social

Titulaire : Mme STEMFLE Sandrine

8 - Personnes qualifiées "juridique"

Titulaires : Mme BENOIT-BALLANSAT Anne-Marie

Mme DALL'AGLIO BRAMBILLA Géraldine

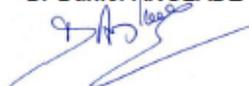
9 – Représentants d'association agréée de malades et d'usagers du système de santé

Titulaire : Mme DAYNES Pascale

Aucun membre délibérant du comité n'est affecté par un conflit d'intérêt

Je vous prie de croire, Madame, à l'expression de mes salutations distinguées.

Le Président
Dr Daniel ANGLADE



Annexe C : déclaration Commission Nationale de l'Informatique et des Libertés.



RÉCÉPISSÉ

DÉCLARATION DE CONFORMITÉ À UNE MÉTHODOLOGIE DE RÉFÉRENCE

Numéro de déclaration

2205847 v 0

du 28 août 2018

Monsieur GARNIER GARNIER
HOPITAL TENON - DÉPARTEMENT D'ANESTHÉSIE
ET RÉANIMATION
4 RUE DE LA CHINE
75020 PARIS

A LIRE IMPÉRATIVEMENT

La délivrance de ce récépissé atteste que vous avez transmis à la CNIL un dossier de déclaration formellement complet. Vous pouvez désormais mettre en oeuvre votre traitement de données à caractère personnel.

La CNIL peut à tout moment vérifier, par courrier, par la voie d'un contrôle sur place ou en ligne, que ce traitement respecte l'ensemble des dispositions de la loi du 6 janvier 1978 modifiée en 2004. Afin d'être conforme à la loi, vous êtes tenu de respecter tout au long de votre traitement les obligations prévues et notamment :

- 1) La définition et le respect de la finalité du traitement,
- 2) La pertinence des données traitées,
- 3) La conservation pendant une durée limitée des données,
- 4) La sécurité et la confidentialité des données,
- 5) Le respect des droits des intéressés : information sur leur droit d'accès, de rectification et d'opposition.

Pour plus de détails sur les obligations prévues par la loi « Informatique et libertés », consultez le site Internet de la CNIL : www.cnil.fr.

Organisme déclarant

Nom : Monsieur GARNIER Marc

Service :

Adresse : HOPITAL TENON - DÉPARTEMENT D'ANESTHÉSIE ET
RÉANIMATION 4 RUE DE LA CHINE

Code postal : 75020

Ville : PARIS

N° SIREN ou SIRET :

Code NAF ou APE :

gggggggggg
gggggggggg
ghhhhhhh

Traitement déclaré

Finalité : MR3 - Recherches dans le domaine de la santé sans recueil du consentement

Transferts d'informations hors de l'Union européenne : Non

Fait à Paris, le 28 août 2018
Par délégation de la commission

Isabelle FALQUE PIERROTIN
Présidente

EVALUATION DE L'AERATION PULMONAIRE PAR LA TOMOGRAPHIE PAR IMPEDANCE ELECTRIQUE EN PER ET POST-OPERATOIRE DE CHIRURGIE THORACIQUE ET ASSOCIATION AVEC LES COMPLICATIONS PULMONAIRES

Introduction. Les complications pulmonaires post-opératoires (CPP) de chirurgie thoracique sont sources de morbi-mortalité. Un outil prédictif de la survenue de CPP est nécessaire pour identifier les patients chez qui intensifier les mesures de ré-aération pulmonaire. La tomographie par impédance électrique (EIT) est une technique de visualisation de la ventilation régionale en temps réel au lit du patient. L'objectif de l'étude est d'examiner l'association entre les mesures per et post-opératoires d'EIT et la survenue de CPP.

Méthodes. Etude prospective observationnelle. Une mesure d'EIT était réalisée à 6 temps péri-opératoires, dont T1 et T3 (ventilation contrôlée pré-incision et post-fermeture), T4 et T5 (ventilation spontanée en SSPI et à J+1). Le critère de jugement principal était le delta de variation d'impédance (Δ TIV) entre T1 et T3, T0 et T4 et T0 et T5. Un critère de jugement secondaire était le rapport d'impédance (IR) à T5.

Résultats. 39 patients ont été inclus. Le Δ TIV T3-T1 du poumon opéré des patients présentant une CPP était inférieur à celui du groupe non compliqué (-1106 [-1470;-877] vs. -221 [-633;36], $p < 0,01$). De plus, l'IR à T5 était plus élevé (0,58 [0,55-0,61] vs. 0,40 [0,32-0,47], $p < 0,01$), traduisant une plus grande participation du poumon opéré à la ventilation totale chez les patients du groupe compliqué. Il n'y avait pas de différence entre les groupes en termes de Δ TIV T4-T0 et T5-T0.

Conclusion. Notre étude suggère que l'EIT permet de détecter précocement une perte d'aération post-opératoire, faisant le lit des CPP. Son utilisation pour stratifier la prise en charge post-opératoire des patients pourrait contribuer à réduire l'incidence de CPP.

Mots clés : tomographie par impédance électrique (EIT), chirurgie thoracique, complication pulmonaire post-opératoire, dérecrutement alvéolaire, médecine péri-opératoire.

EVALUATION OF PULMONARY AERATION BY ELECTRICAL IMPEDANCE TOMOGRAPHY (EIT) DURING AND AFTER THORACIC SURGERY AND ASSOCIATION WITH PULMONARY COMPLICATIONS

Introduction. Postoperative pulmonary complications (PPC) in thoracic surgery are associated with high morbi-mortality. A predictive tool for the occurrence of PPC is necessary to identify patients in whom pulmonary re-aeration measures should be intensified. Electrical Impedance Tomography (EIT) is a technique for visualizing regional ventilation in real time at the patient's bedside. The aim of the study is to investigate the association between per and postoperative EIT measurements and the occurrence of PPC.

Methods. Observational prospective study. An EIT measurement was performed at 6 perioperative time points, including T1 and T3 (controlled ventilation before the surgical incision and after wound closure), T4 and T5 (spontaneous breathing in recovery room and at day+1). The primary endpoint was the impedance variation delta (Δ TIV) between T1 and T3, T0 and T4 and T0 and T5. A secondary endpoint was the impedance ratio (IR) at T5.

Results. 39 patients were included. The Δ TIV T3-T1 of the operated lung of patients with CPP was lower than that of the uncomplicated group (-1106 [-1470;-877] vs. -221 [-633;36], $p < 0.01$). In addition, IR at T5 was higher (0.58 [0.55-0.61] vs. 0.40 [0.32-0.47], $p < 0.01$), reflecting a greater participation of the operated lung to total ventilation in the complicated group. There was no difference between the groups in terms of Δ TIV T4-T0 and T5-T0.

Conclusion. Our study suggests that EIT allows early detection of postoperative loss of lung aeration resulting in PPC. Its use to stratify the post-operative management of patients could help reducing the incidence of PPC.

Keywords : electrical impedance tomography (EIT), thoracic surgery, post-operative pulmonary complication, alveolar derecruitment, perioperative care.

Université Paris Descartes
Faculté de Médecine Paris Descartes
15, rue de l'Ecole de Médecine
75270 Paris cedex 06