

INTRODUCTION

La tomodensitométrie spectrale ou à double énergie est une technique d'imagerie avancée qui repose sur l'utilisation de deux niveaux d'énergie distincts pour offrir des avantages significatifs. Initialement proposée dans les années 1970, la méthode a connu un essor important et, depuis les années 2000, est utilisée dans divers champs d'application.⁹

En imagerie thoracique, les informations anatomiques et fonctionnelles, ainsi que la capacité à mieux caractériser les tissus ou matériaux, améliorent entre autres la détection des embolies pulmonaires, l'évaluation des déficits perfusionnels associés et la caractérisation de lésions.⁵

PRINCIPES TECHNIQUES

La TDM spectrale exploite les différences d'atténuation des tissus en fonction de l'énergie des photons. Ces variations d'atténuation constituent des caractéristiques mesurables propres à chaque matériau, permettant de les différencier de manière plus fiable.²

Ce type de scanner utilise typiquement un faisceau de 80-100 kV et un autre de 140-150 kV. Deux ensembles de données sont générés et peuvent être interprétés individuellement pour offrir un meilleur contraste entre différentes structures. Ces données peuvent également être traitées avec des algorithmes de reconstruction avancés, permettant une caractérisation quantitative des composants (calcium, eau, iode, etc.) d'une lésion ou la création de jeux d'images permettant l'isolation d'un ou plusieurs matériaux.⁶

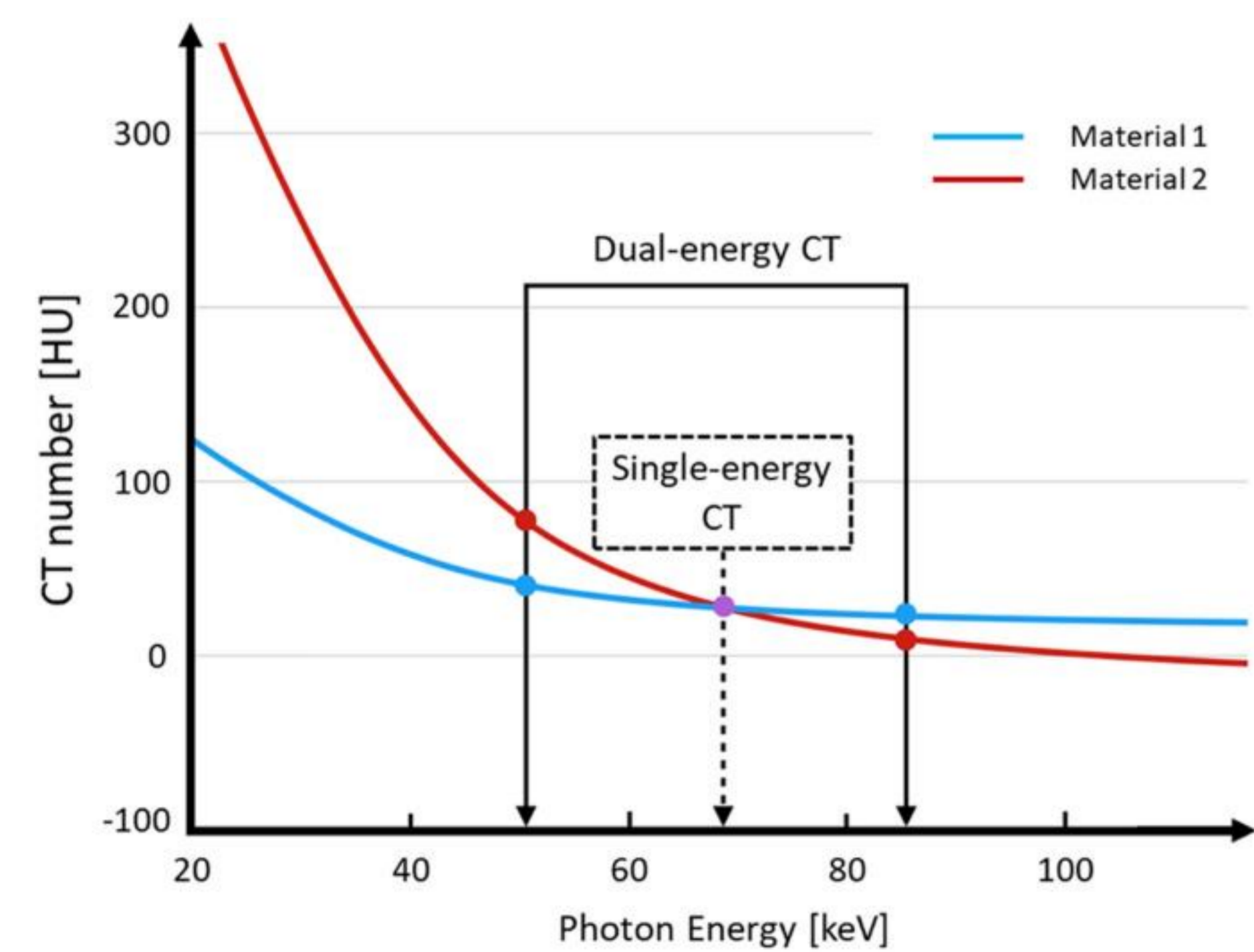


Figure 1⁸ – Schéma illustrant la différence d'atténuation de 2 matériaux selon le niveau d'énergie des rayons X

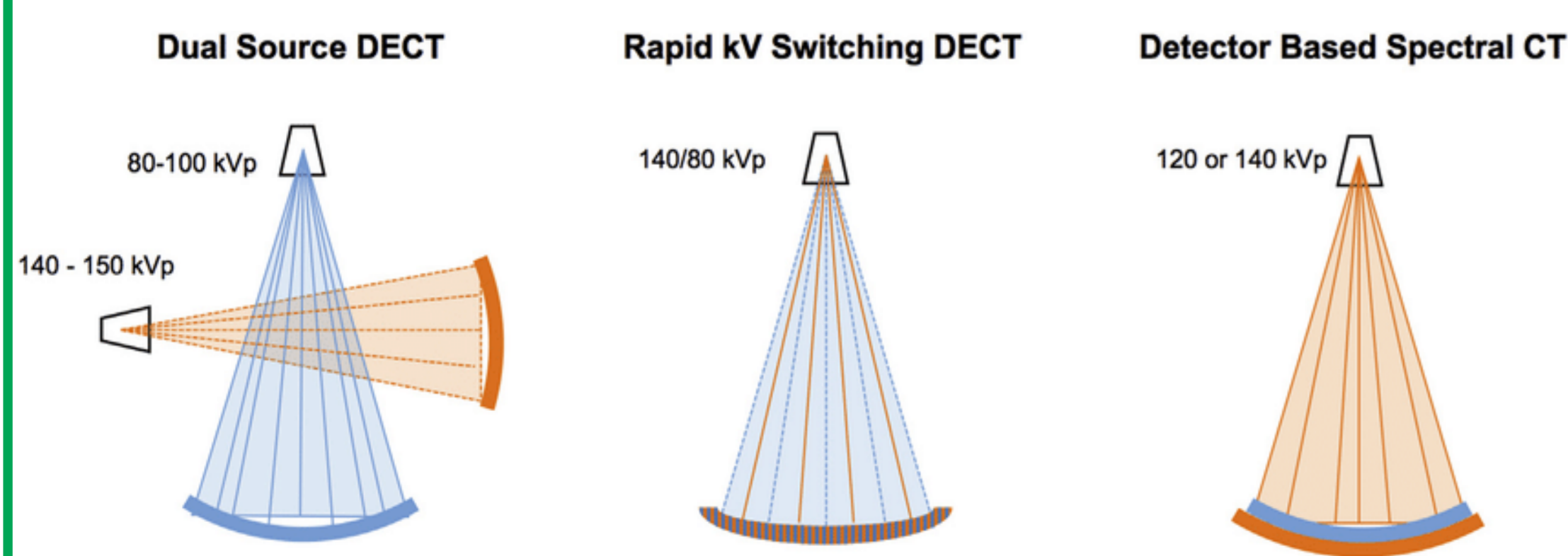


Figure 2¹² – Principales configurations d'appareils offrant des avantages et inconvénients différents

APPLICATIONS VASCULAIRES

• Embolies pulmonaires

Dans l'imagerie des embolies pulmonaires, la TDM spectrale permet d'exploiter les images acquises (ou virtuellement recréées) à bas niveau d'énergie, qui offrent intrinsèquement un meilleur contraste vasculaire lorsqu'un produit de contraste iodé est utilisé⁵ (Figure 3).

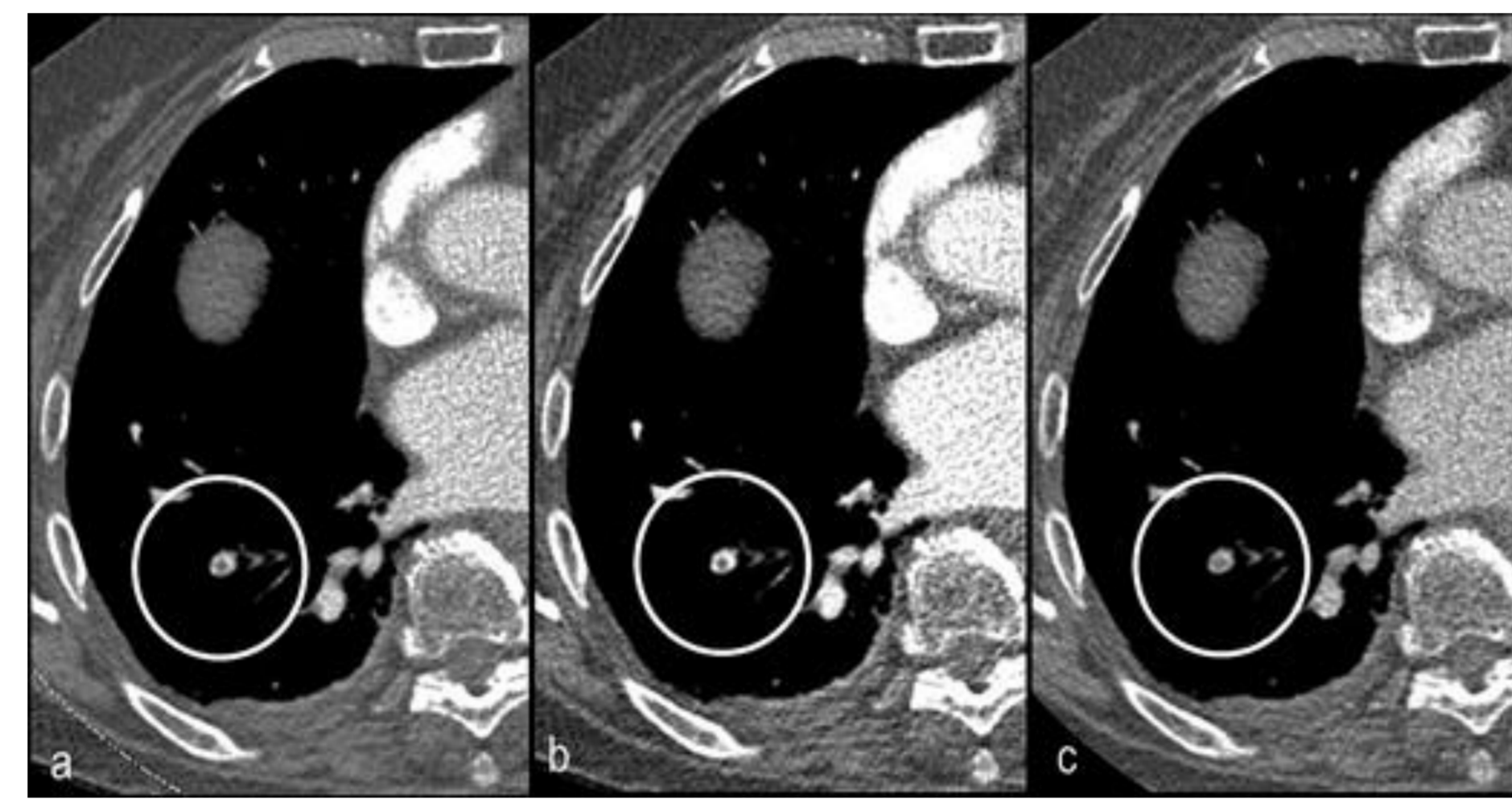


Figure 3⁵ – Jeux d'images : (a) mixte 100-140kV, (b) 100kV et (c) 140 kV démontrant la différence d'apparence d'une embolie pulmonaire sous-segmentaire

Il est également possible de dériver des cartes de perfusion du parenchyme pulmonaire (PBV) apportant plusieurs avantages (Figure 4) :

- D'une part, les déficits perfusionnels associés aux embolies pulmonaires sont mis en évidence par rapport à l'angioscan conventionnel, permettant une détection accrue des embolies, surtout lorsqu'elles sont distales.¹
- D'autre part, l'identification de ces foyers de déficit permet une meilleure évaluation des conséquences du fardeau embolique et pourrait éventuellement représenter un élément de stratification des risques liés à l'embolie pulmonaire.⁷

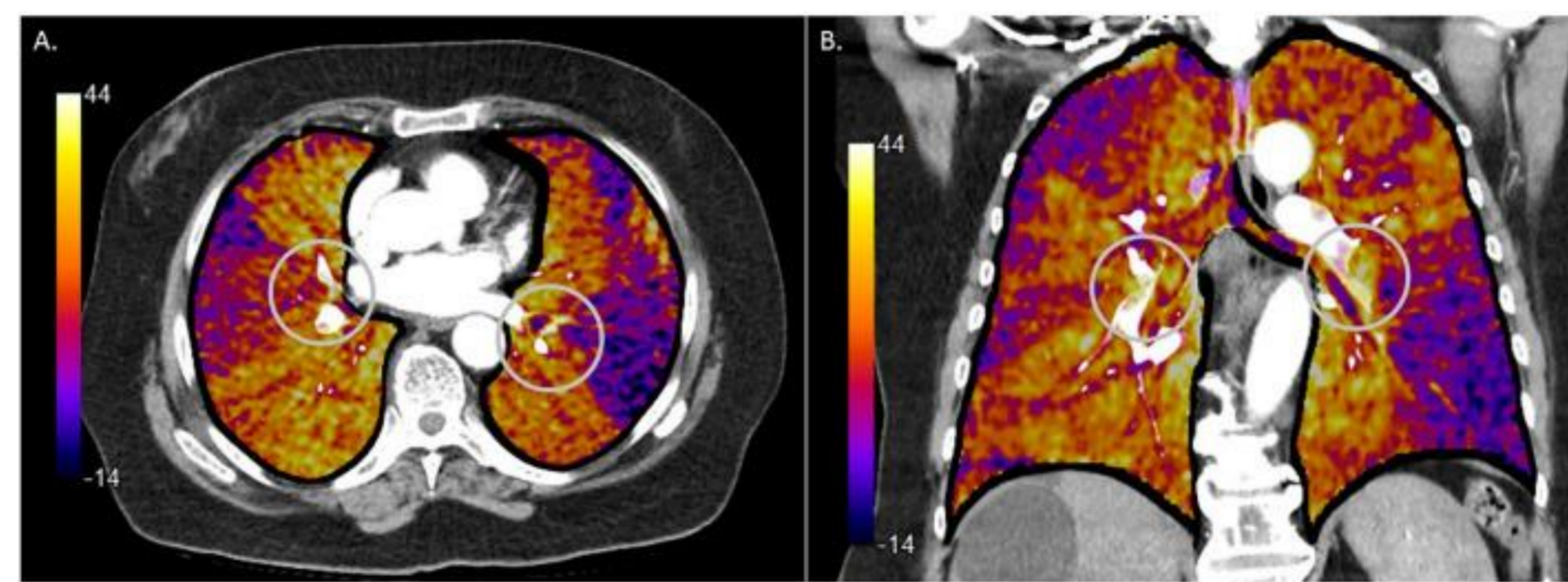


Figure 4¹ – Carte PBV démontrant des embolies pulmonaires et les déficits perfusionnels associés

• Hypertension pulmonaire thromboembolique chronique

Dans la même optique, en fournissant une évaluation fonctionnelle précise et qui se corrèle grandement à la scintigraphie V/Q, la TDM spectrale aide dans l'évaluation, la stratification et la planification de procédures chez des patients atteints d'hypertension pulmonaire thromboembolique chronique.⁷

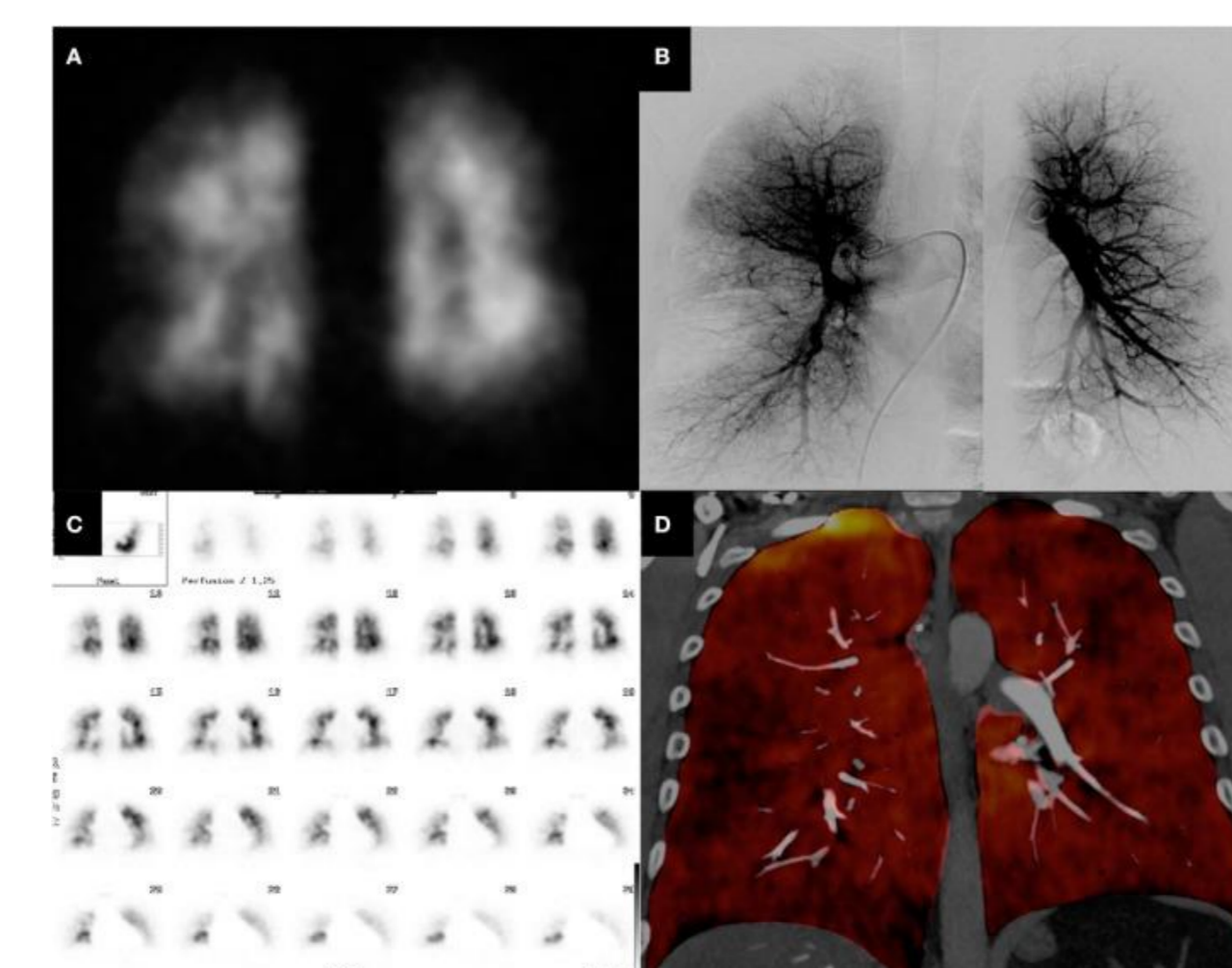


Figure 5⁷ – Corrélation entre différentes modalités d'imagerie évaluant la perfusion pulmonaire.

ÉTUDE DE VENTILATION

De manière similaire aux études de perfusion avec injection de produit de contraste iodé, la TDM spectrale permet l'utilisation de xénon inhalé pour générer des cartes de ventilation permettant d'évaluer la fonction ventilatoire. Bien que d'autres modalités d'imagerie offrent des capacités comparables, la TDM spectrale apporte l'avantage de combiner des informations fonctionnelles et anatomiques en une seule acquisition. À ce jour, cette méthode est principalement utilisée dans un cadre de recherche, mais elle montre un potentiel prometteur, notamment pour les pathologies pulmonaires obstructives.⁴

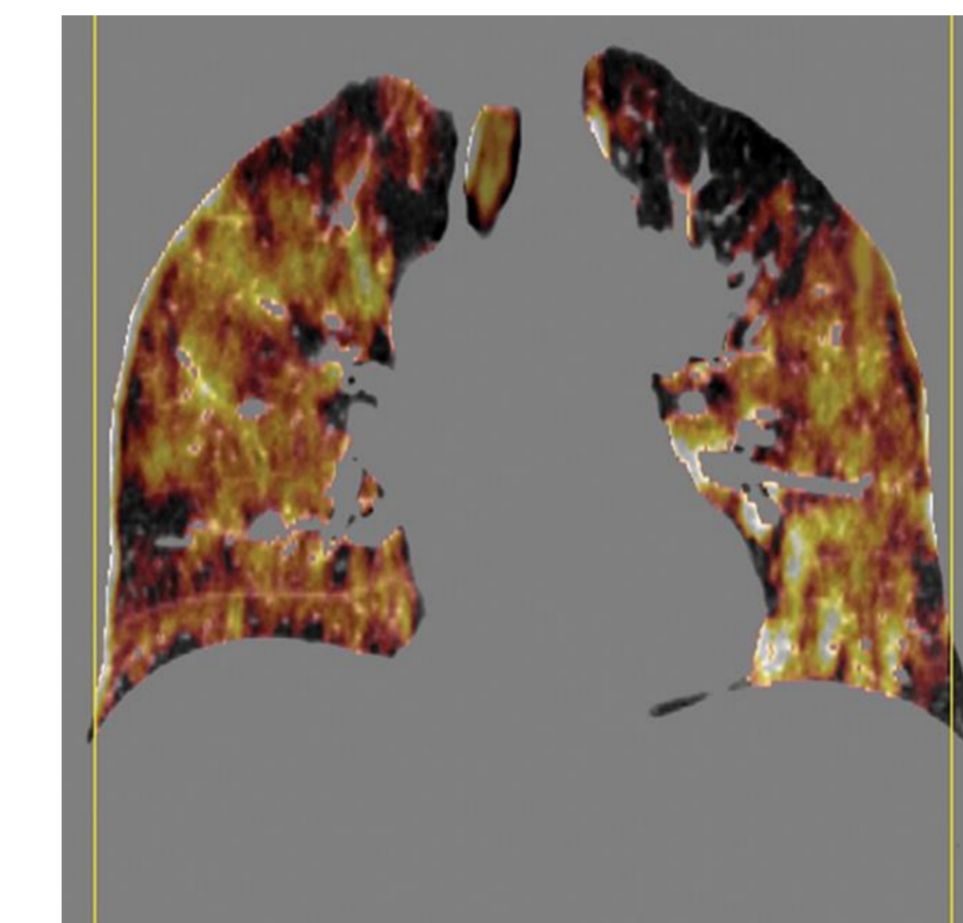


Figure 6⁴ – Carte de ventilation après inhalation de xénon

ÉVALUATION DE LÉSIONS

• Vascularisation et rehaussement

L'évaluation et le suivi des nodules pulmonaires représentent une indication fréquente en imagerie thoracique. La décomposition spécifique des matériaux, notamment de l'iode, offerte par la TDM spectrale permet une analyse plus objective du rehaussement des nodules et facilite la différenciation entre les étiologies bénignes et malignes¹¹. Les nodules malins présentent généralement une captation d'iode plus importante. De plus, la distribution de l'iode au sein d'une lésion peut fournir des indications sur son niveau de vascularisation et potentiellement sur l'expression de marqueurs angiogéniques tels que le VEGF, offrant ainsi une perspective sur l'agressivité tumorale.³

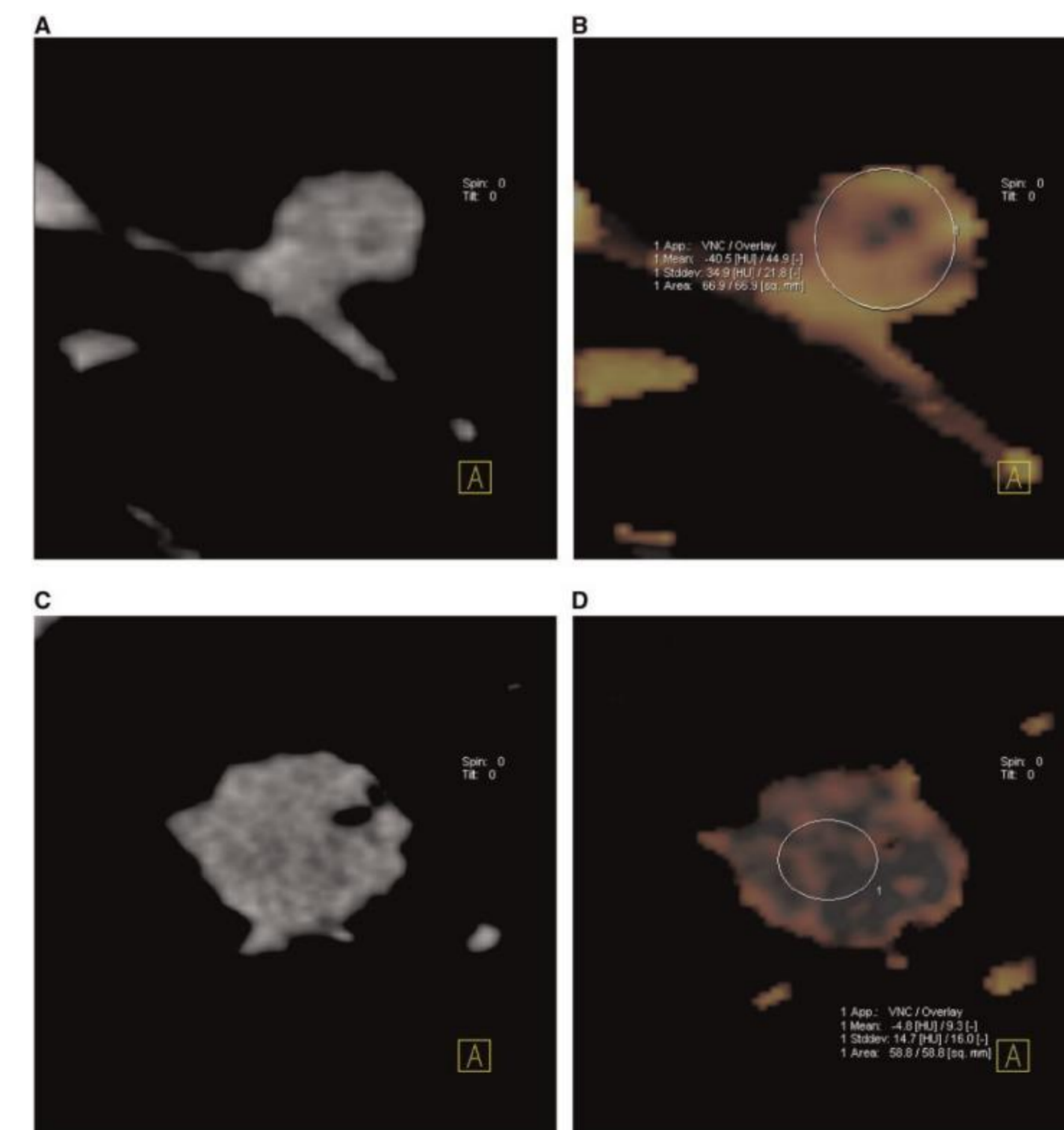


Figure 7³ – A et C : TDM C+ de nodules pulmonaires. B et D : TDM spectrale et carte de distribution d'iode démontrant des nodules rehaussants (B néoplasique et D inflammatoire)

LIMITATIONS

En fonction de la configuration technique, la TDM spectrale peut présenter différentes limitations.

La différence temporelle entre les ensembles de données acquis à deux niveaux d'énergie peut augmenter l'impact des artefacts cinétiques et altérer les courbes d'atténuation de manière artificielle⁶ (Figure 8).

L'augmentation du bruit d'image, particulièrement lors de l'acquisition à faible énergie, peut nuire à la qualité des images, nécessitant des ajustements de dose ou des filtres pour améliorer le signal.⁸ De plus, la différenciation des matériaux peut être sujette à des erreurs, surtout lorsque les densités des matériaux sont similaires, ce qui peut induire un degré de confusion et limiter la précision dans l'évaluation de lésions.²

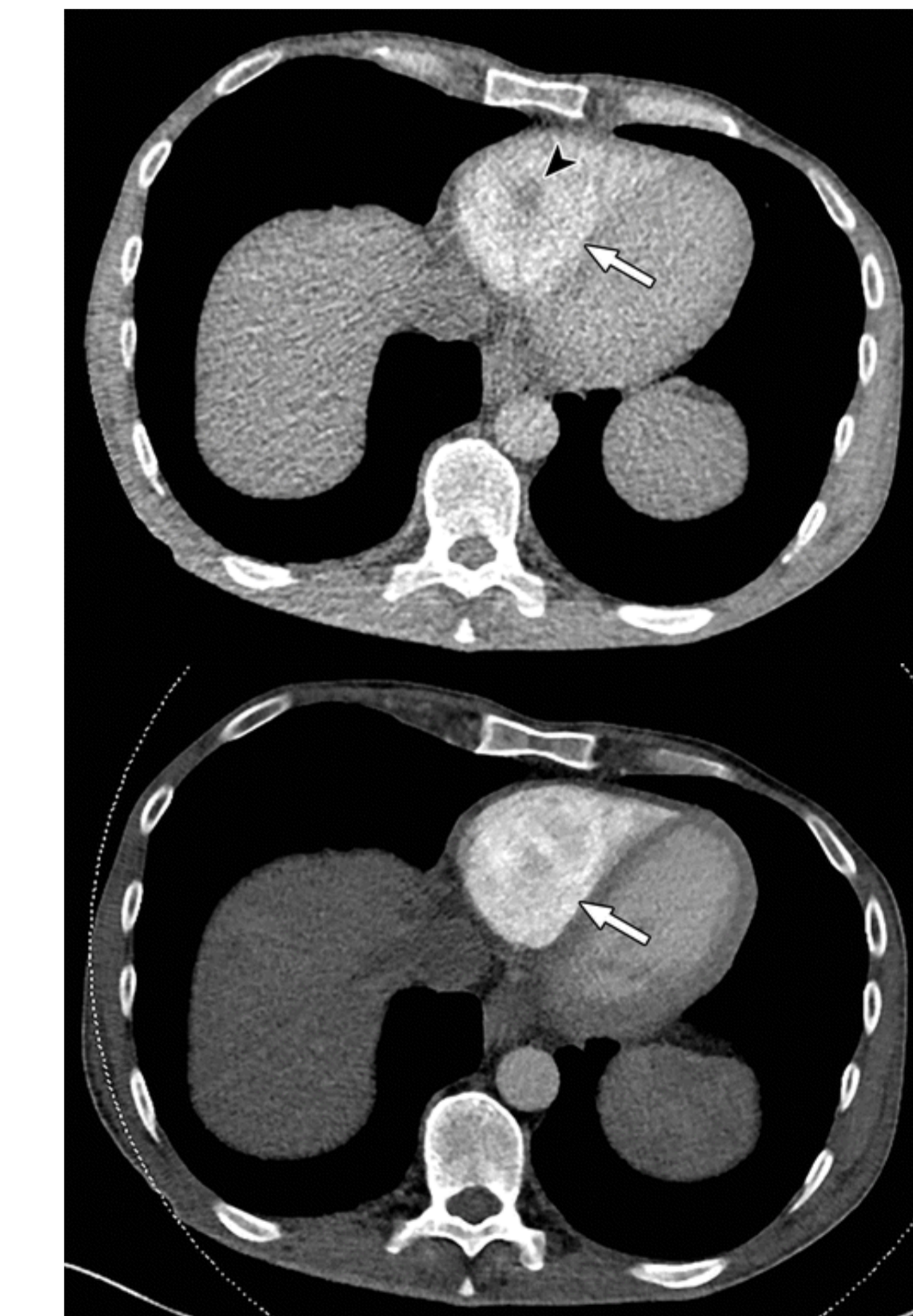


Figure 8⁶ – Temporal misregistration artefact. Différence dans l'apparence d'un thrombus sur 2 ensembles de données.

CONCLUSION

Malgré ces défis, la TDM spectrale continue de bénéficier de progrès constants, tant au niveau technologique qu'en matière de protocoles d'imagerie. Ces avancées ont permis d'optimiser la qualité des images, de réduire la dose de radiation ainsi que d'améliorer la robustesse des différents algorithmes de traitement de données. La TDM spectrale reste une avancée majeure en imagerie sectionnelle en offrant une analyse anatomique et fonctionnelle simultanée. Elle ouvre ainsi la voie à de nouveaux modèles d'évaluation, stratification et suivi de diverses pathologies, tout en favorisant une prise en charge plus personnalisée et précise des patients.

RÉFÉRENCES :

1. Dam LF van et al. Computed tomography pulmonary perfusion imaging and 3-months clinical outcomes after acute pulmonary embolism. *Thrombosis Research*. 1 mars 2021;199:32-4.
2. Fernández-Pérez GC et al. Dual-energy CT: Technical considerations and clinical applications. *Radiologia (English Edition)*. sept 2022;64(5):445-55.
3. Zhang LJ et al. Dual-energy CT imaging of thoracic malignancies. *Cancer Imaging*. 6 mars 2013;81.
4. Kong X et al. Xenon-Enhanced Dual-Energy CT Lung Ventilation Imaging: Techniques and Clinical Applications. *American Journal of Roentgenology*. févr 2014;202(2):309-17.
5. Vlahos I et al. Dual-energy CT in pulmonary vascular disease. *The British Journal of Radiology*. 22 sept 2021;95(1129):20210699.
6. Parakh A et al. Recognizing and Minimizing Artifacts at Dual-Energy CT. *RadioGraphics*. mars 2021;41(2):509-23.
7. Schüssler A et al. Evaluation of diagnostic accuracy of dual-energy computed tomography in patients with chronic thromboembolic pulmonary hypertension compared to V/Q-SPECT and pulmonary angiogram. *Frontiers in Medicine*. 22 juin 2023;10:1194272.
8. Tatsugami F et al. Dual-energy CT: minimal essentials for radiologists. *Jpn J Radiol*. 1 juin 2022;40(6):547-59.
9. Lu GM et al. Dual-energy CT: Techniques and clinical applications. *Cancer Imaging*. 2012;12:233-245.
10. Otrácki A et al. Dual-Energy CT: Spectrum of thoracic abnormalities. *RadioGraphics*. 2016;36(4):1268-1280.
11. Wu L et al. Spectral CT Analysis of Solitary Pulmonary Nodules for Differentiating Malignancy from Benignity: The Value of Iodine Concentration Spatial Distribution Difference. *BioMed Research International*. 2018;2018:2459896.
12. Grajo J et al. Dual-Energy CT of the Abdomen and Pelvis: Radiation Dose Considerations. *Journal of the American College of Radiology*. 1 sept 2017;15.