



ARTICLE ORIGINAL / RESEARCH ARTICLE

Influence de l'épaisseur de coupe et de la reconstruction itérative sur l'évaluation du score coronaire calcique

Influence of slice thickness and iterative reconstruction on coronary artery calcium score

N^oCHO-MOTTOH Marie-Paule Bernadette^{1,2*}, MANDRY Damien¹, SCADI Soukaina¹

¹: Institut Lorrain du Cœur et des Vaisseaux, CHU de NANCY, Vandoeuvre les Nancy, France

²: Institut de Cardiologie d'Abidjan, Côte-d'Ivoire

Mots-clés :

Score coronaire calcique, rétroprojection filtrée, reconstruction itérative, intelligence artificielle, rapport signal sur bruit.

Keywords:

Coronary calcium score, filtered back projection, iterative reconstruction, artificial intelligence, signal to noise ratio.

*Auteur

correspondant

Dr N^oCHO-MOTTOH Marie-Paule Bernadette
Institut du cœur et des vaisseaux Louis Mathieu,
CHU de Brabois,
1 Rue du Morvan, 54500 Vandoeuvre-lès-Nancy, France
Email: nchomottoh@yahoo.fr
Tel: 00 33621671143

Reçu le : 22.08.2021

Accepté le : 20.11.2022

RÉSUMÉ

Introduction et objectif: Le score coronaire calcique représente un biomarqueur capable de prédire avec un niveau de preuve élevé le risque cardiovasculaire. L'objectif de l'étude était d'évaluer la reproductibilité du score coronaire calcique avec différents incréments de reconstruction itérative et d'épaisseur de coupe par rapport à la méthode de référence d'Agatston en rétroprojection filtrée.

Patients et méthodes : Les acquisitions ont été faites à l'aide d'un scanner à 256 détecteurs General Electric Healthcare. La mesure du score coronaire calcique reposait sur une acquisition avec synchronisation prospective en diastole (phase 75%). La tension du tube était de 120 kVp. Sept reconstructions ont été réalisées sans irradiation supplémentaire :

- Reconstruction en FBP à 3 mm (méthode de référence) et 2,5 mm pour l'épaisseur de coupe
- ASIR-V 30% à 3 mm et 2,5 mm pour l'épaisseur de coupe
- ASIR-V 50% à 3 mm et 2,5 mm pour l'épaisseur de coupe
- Deep Learning High à 3 mm pour l'épaisseur de coupe

Le score coronaire calcique, le volume et la masse calcique étaient notifiés. L'évaluation du rapport signal-bruit était faite par une région d'intérêt de 20 mm de diamètre dans l'aorte ascendante au niveau du tronc commun coronaire.

Résultats : quarante-trois patients ont été rétrospectivement inclus. Le rapport signal sur bruit était statistiquement plus élevé pour les reconstructions itératives et en intelligence artificielle par rapport à la méthode de référence. Aucune différence significative n'a été retrouvée pour la comparaison du score calcique, du volume et de la masse calciques selon le type de reconstruction et l'épaisseur de coupe.

Conclusion : Cette étude met en exergue la fiabilité de la reconstruction itérative dans l'évaluation du score coronaire calcique, autorisant ainsi son utilisation en pratique clinique de routine. L'amélioration du rapport signal sur bruit de cette méthode de reconstruction itérative pourrait être très intéressante pour les patients ayant des calcifications extensives aortiques et de l'anneau mitral. En effet, la réduction de l'artéfact de blooming de ces calcifications aortiques et mitral pourrait aider à la discrimination des calcifications ostiales coronaires.

ABSTRACT

Introduction and objective: Coronary calcium score represents a biomarker able to predict cardiovascular risk with a high level of evidence. The objective of the study was to assess the

reproducibility of coronary calcium score with different increments of iterative reconstruction and slice thickness compared to the reference Agatston method in filtered back projection.

Patients and methods: Acquisitions were made with a 256-detector General Electric Healthcare scanner. Measurement of the coronary calcium score was based on acquisition with prospective synchronisation in diastole (phase 75%). Tube voltage was 120 kVp.

Seven reconstructions were performed without additional irradiation:

- FBP reconstruction at 3 mm (reference method) and 2.5 mm for slice thickness
- ASIR-V 30% at 3 mm and 2.5 mm slice thickness
- ASIR-V 50% at 3 mm and 2.5 mm slice thickness
- Deep Learning High at 3 mm slice thickness

Coronary calcium score, volume and mass were reported. Signal-to-noise ratio was assessed by a 20 mm diameter region of interest in the ascending aorta at the left main coronary artery.

Results: Forty-three patients were retrospectively included. Signal-to-noise ratio was statistically higher for iterative and artificial intelligence reconstructions compared to the reference method. No significant difference was found for the comparison of coronary calcium score, volume and mass according to the type of reconstruction and slice thickness.

Conclusion: This study highlights the reliability of iterative reconstruction in the assessment of coronary calcium score, allowing its use in routine clinical practice. Improvement of signal-to-noise ratio of this iterative reconstruction method could be very useful for patients with extensive aortic and mitral annulus calcifications. Indeed, reduction of the blooming artefact of these aortic and mitral calcifications could help in the discrimination of coronary ostial calcifications.

1. Introduction

Les maladies cardiovasculaires représentent la première cause de mortalité dans la plupart des pays industrialisés. En France, elles sont responsables de 142 000 décès par an [1]. L'enjeu principal de ces pathologies repose sur la prévention des coronaropathies par l'évaluation de biomarqueurs permettant de définir le risque cardiovasculaire des patients. Le score coronaire calcique (SCC) représente un biomarqueur capable de prédire avec un niveau de preuve élevé le risque cardiovasculaire. La méthode de mesure du SCC est traditionnellement réalisée en rétroprojection filtrée (FBP) selon le protocole d'Agatston avec une épaisseur de coupe de 3 mm et une tension du tube de 120 kVp [2]. Cette méthode présente néanmoins quelques limites: relative sensibilité au bruit, tension du tube non négligeable. Pour pallier ces limites, la première stratégie efficace a été de réduire la tension du tube [3, 4]. Cependant, les changements de tension des tubes ont eu un effet immédiat sur l'atténuation des tissus, ce qui affectait fortement la précision de la quantification du SCC [5].

La deuxième stratégie a été de diminuer les épaisseurs de coupe. Celle-ci a permis de réduire les artefacts de volume partiel et la surestimation des plaques calcifiées. Cependant, cette diminution de l'épaisseur de coupe rendait le SCC plus sensible au bruit. van der Werf et al. ont rapporté qu'un bruit d'image élevé augmentait le score des artères coronaires [6].

Enfin, la troisième stratégie reposait sur l'application de la reconstruction itérative (RI) [7] sur la mesure précise du SCC. Ces méthodes ont permis d'obtenir une relative augmentation significative du rapport signal/bruit.

L'objectif de notre étude était d'évaluer la reproductibilité du SCC avec différents niveaux de RI et d'épaisseur de coupe en comparaison avec la méthode de référence d'Agatston.

2. Matériels et Méthodes

Cette étude s'est déroulée à l'institut Louis Mathieu du cœur et des vaisseaux du CHU de Brabois à Nancy (France).

2.1 Critères d'inclusion et de non inclusion

Les sujets inclus rétrospectivement étaient des patients ayant une indication de scanner cardiaque pour une ischémie coronaire, une pathologie valvulaire ou un bilan de remplacement valvulaire aortique percutané.

Les critères de non inclusion étaient : SCC nul, anomalies anatomiques des coronaires (anomalie de naissance ou de trajet), pontages aorto-coronaires, stents coronaires, défibrillateurs et pacemakers et les artefacts de mouvements avec un bruit important.

2.2 Acquisition des données

Les acquisitions ont été faites à l'aide d'un scanner à 256 détecteurs REVOLUTION de General Electric Healthcare (GE). Le protocole d'acquisition était le protocole de référence décrit par Agatston. La mesure du SCC reposait sur une acquisition avec synchronisation prospective en diastole (phase 75%) et sans injection de produit de contraste. La tension du tube était de 120 kVp. L'acquisition a nécessité une seule apnée de 3 à 5 secondes, avec des coupes axiales épaisses de 2,5 mm d'épaisseur.

Le champ de vue ou *field of view* (FOV) était de 25 cm, centré sur le cœur en hauteur et dans le plan axial afin d'améliorer la résolution spatiale avec au minimum une matrice de 512×512. Le champ d'acquisition était celui de l'exploration de l'arbre coronaire avec un paramétrage du début de la boîte d'acquisition au niveau des ostias coronaires et de la fin de la boîte d'acquisition à la sortie du ventricule gauche. La DLP (dose length product) était mentionnée.

2.3 Technique de reconstruction

Sept reconstructions ont été réalisées sans irradiation supplémentaire :

- Reconstruction en FBP à 3 mm (méthode de référence) et 2,5 mm pour l'épaisseur de coupe
- Adaptive statistical iterative reconstruction-V (ASIR-V) 30% à 3 mm et 2,5 mm pour l'épaisseur de coupe
- ASIR-V 50% à 3 mm et 2,5 mm pour l'épaisseur de coupe
- Deep Learning High (DLH) à 3 mm pour l'épaisseur de coupe

L'ASIR-V et le DLH représentent respectivement les acronymes de la méthode de reconstruction itérative et de la reconstruction en intelligence artificielle de GE.

2.4 Post-traitement des images

Le post-traitement des images a été réalisé à l'aide du software Carestream de Philipps.

La segmentation du calcium a été réalisée manuellement en appliquant une ROI (region of interest) pour chaque calcification. Une couleur différente était attribuée à chaque coronaire (**figure 1 et tableau II**).

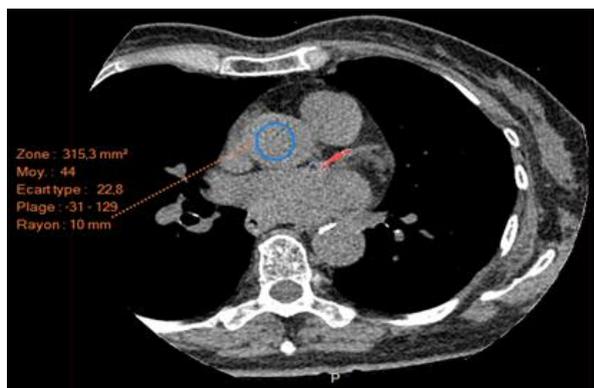


Figure 1: Exemple de mesure du signal et du bruit faite par une région d'intérêt de 20 mm de diamètre dans l'aorte ascendante au niveau du tronc commun coronaire. Mesures réalisées en semi-automatique des calcifications coronaires représentées en bleu pour le tronc commun et en rouge pour l'artère interventriculaire antérieure

Tableau II : Caractéristiques cliniques des patients et indications du score coronaire calcique

Caractéristiques	n (%) ou médiane [intervalle interquartile]
Age (années)	61 [48,0 ; 70,0]
Sexe (masculin)	29 (67,4)
Indice de masse corporelle (kg/m ²)	25 [22,7 ; 29,8]
Hypertension artérielle	16 (37,2)
Diabète	9 (29,9)
Dyslipidémie	9 (29,9)
Tabagisme	8 (18,6)
Indications de réalisation du score coronaire calcique	
Recherche de cardiopathie ischémique	39 (90,7)
Endocardite infectieuse	2 (4,7)
Recherche anomalie coronaire	1 (2,3)
Nodule péri-coronaire	1 (2,3)

Le SCC a été ensuite calculé par le logiciel qui appliquait les différents cofacteurs de pondération en fonction des niveaux d'atténuation [8]. D'autres paramètres comme le volume et la masse calciques étaient notifiés (**tableau I**). Cette mesure de SCC était répétée pour chacune des 7 reconstructions. Le SCC a été classé en 5 catégories pour chacune des reconstructions : 0, 1-10, 11-100, 101-400 et supérieur à 400 unités Agatston.

L'évaluation du rapport signal-bruit était faite par une ROI de 20 mm de diamètre dans l'aorte ascendante au niveau du tronc commun coronaire. Le signal correspond à la moyenne des valeurs d'atténuation et le bruit à la déviation standard (**figure 1**). Tous deux étaient exprimés en unités hounsfield (UH).

2.5 Analyse statistique

L'analyse statistique a été réalisée à l'aide du logiciel R version 4.0.3. Les variables quantitatives sont exprimées en médianes avec l'intervalle interquartile et les variables catégorielles en pourcentage. Le test de Shapiro Wilk a été utilisé pour étudier la normalité des données. Les comparaisons inter méthodes ont été faites par le test non paramétrique Wilcoxon rank sum test. Les tests ont été ajustés pour les comparaisons multiples selon la correction de Bonferroni-Holm. Le seuil de significativité (p) est fixé à 5%.

Tableau I : Calcul du score coronaire calcique selon Agatston

	Artères coronaires	Score d'Agatston	Volume de calcium (mm ³)	Masse de calcium (mg)
	Tronc commun	41.3	31	6.4
	Artère interventriculaire antérieure	616.7	525.7	98
	Artère circonflexe	5.4	16.1	1.9
	Artère coronaire droite	81.3	136.5	17.5
	Artère interventriculaire postérieure	0	0	0
	Autres	0	0	0
	Total	744.7	709.3	123.8

3. Résultats

Du 2 janvier au 15 Avril 2021, 103 scanners de patients ont été analysés et 43 ont été retenus. Les causes d'exclusion des 60 scanners étaient : SCC nul (55,8%), défaut de reconstruction ou reconstruction incomplète (11,9%), pacemaker et défibrillateur (11,9%), pontage aorto-coronaire (10,2%), stent coronaire (8,5%) et bruit (1,7%).

3.1 Caractéristiques cliniques des patients

Le tableau II montre une proportion majoritaire du genre masculin. Le facteur de risque le plus souvent rencontré était l'hypertension artérielle et les indications du scanner cardiaque étaient largement dominées par la recherche de cardiopathie ischémique.

3.2 Comparaison du rapport signal sur bruit en fonction des différentes reconstructions

Les reconstructions ont été réalisées avec une irradiation unique de 120 kVp. La DLP était relativement faible : 25,7 [25,2 ; 27,2] milligrays×centimètres.

Le rapport signal sur bruit était statistiquement plus élevé dans les reconstructions itératives et en intelligence artificielle par rapport à la méthode de référence (**tableau III**). On note une amélioration des artéfacts de blooming au niveau des calcifications aortiques permettant de mieux discriminer les calcifications coronaires à proximité des ostias (**figure 2**).

Tableau III : Comparaison du rapport signal sur bruit, des scores, masse et volume calciques en fonction des différentes reconstructions

	FBP/3	FBP/2	ASIR 30/3	ASIR 30/2	ASIR 50/3	ASIR 50/2	DLH/3
Signal	43,1 [41,1;47,5]	43,1 [42,3;47,2]	43,2 [42,1;47,2]	43,2 [42,2;49,3]	43,8 [42,3;48,6]	43,5 [42,1;48,5]	44,1 [42,3;48,9]
Bruit	29,1 [24,2;39,3]	31 [29,1;34,1]	25 [21,3;29,3]	26 [24,1 ;30,2]	22 [19,1 ;26,2]	23 [21,1;26,4]	14 [12,3;16,1]
RSB	1,4 [1,3; 1,6]	1,4 [1,2; 1,7]	1,7 [1,5 ;2,1]*	1,7 [1,5;1,8]*	2,0 [1,7 ; 2,4]*	1,9 [1,6 ;2,1]*	3,2 [2,8 ; 3,7]*

FBP/3 : rétroprojection filtrée avec 3 mm d'épaisseur de coupe

FBP/2 : rétroprojection filtrée avec 2,5 mm d'épaisseur de coupe

ASIR 30/3 : reconstruction itérative à 30% avec 3 mm d'épaisseur de coupe

ASIR 30/2 : reconstruction itérative à 30% avec 2,5 mm d'épaisseur de coupe

ASIR 50/3 : reconstruction itérative à 50% avec 3 mm d'épaisseur de coupe

ASIR 50/2 : reconstruction itérative à 50% avec 2,5 mm d'épaisseur de coupe

DLH/3 : intelligence artificielle 3 mm d'épaisseur de coupe

RSB : rapport signal sur bruit, FBP : rétroprojection filtrée, ASIR : Adaptive statistical iterative reconstruction-V, DLH : Deep Learning High, SCC: score coronaire calcique

* $p < 0,05$ pour les comparaisons avec la méthode de référence FBP/3
Le signal et le bruit sont exprimés en Unités Hounsfield

3.3 Comparaison du score coronaire calcique, du volume et de la masse calcique en fonction des différentes reconstructions et épaisseur de coupe

Aucune différence significative n'a été retrouvée pour la comparaison du score calcique, du volume et de la masse calcique selon le type de reconstruction et l'épaisseur de coupe (p non significatif pour toutes les comparaisons) (**figure 3**). Il n'y avait pas de reclassification du SCC quel que soit l'incrément de l'ASIR-V et l'épaisseur de coupe.

Pour chacune des reconstructions on retrouvait la répartition suivante :

- 1-10 : 12 patients (27%)
- 11-100 : 11 patients (25%)
- 101-400 : 10 patients (23%)
- Supérieur à 400 : 11 patients (25%)

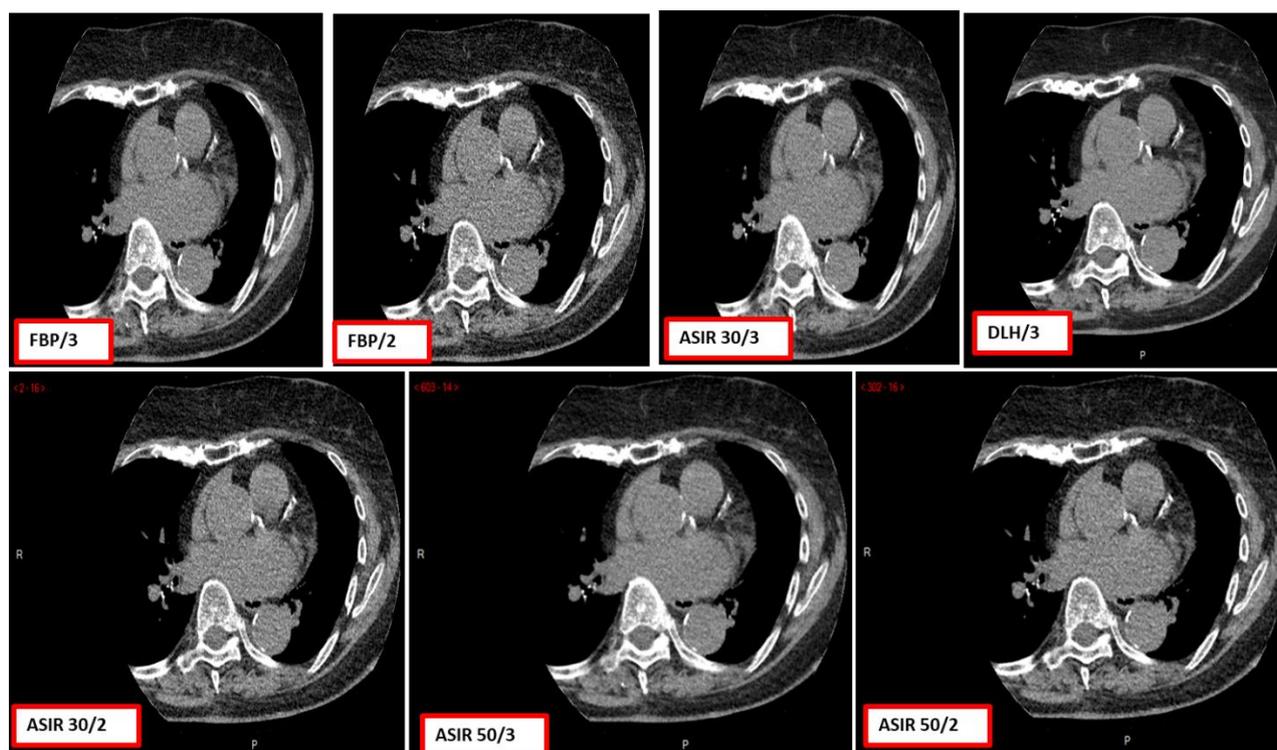


Figure 2 : Illustration des calcifications coronaires selon les différentes reconstructions

On note une réduction du bruit sur les reconstructions itératives (ASIR) et en intelligence artificielle (DLH).

FBP/3 : rétroprojection filtrée avec 3 mm d'épaisseur de coupe

FBP/2 : rétroprojection filtrée avec 2,5 mm d'épaisseur de coupe

ASIR 30/3 : reconstruction itérative à 30% avec 3 mm d'épaisseur de coupe

ASIR 30/2 : reconstruction itérative à 30% avec 2,5 mm d'épaisseur de coupe

ASIR 50/3 : reconstruction itérative à 50% avec 3 mm d'épaisseur de coupe

ASIR 50/2 : reconstruction itérative à 50% avec 2,5 mm d'épaisseur de coupe

DLH/3 : intelligence artificielle 3 mm d'épaisseur de coupe

ASIR: Adaptive statistical iterative reconstruction-V, DLH: Deep Learning High

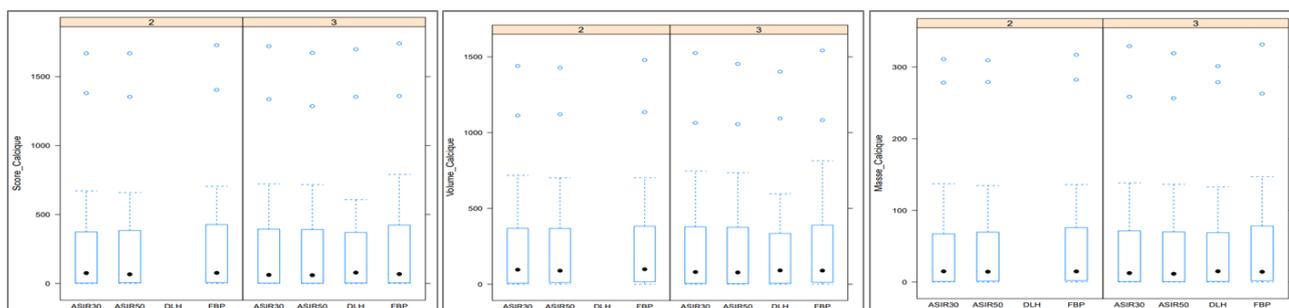


Figure 3 : Comparaison des scores, volume et masse calciques des différentes reconstructions.

FBP : rétroprojection filtrée

ASIR 30 : reconstruction itérative à 30%

ASIR 50 : reconstruction itérative à 50%

DLH : intelligence artificielle

ASIR: Adaptive statistical iterative reconstruction-V, DLH: Deep Learning High

La première colonne nommée 2 représente les épaisseurs de coupes à 2,5 mm et la deuxième colonne

Nommée 3 représente les épaisseurs de coupes de 3 mm.

Il n'y avait aucune différence significative concernant les scores calciques pour chaque type de reconstructions. Il en était de même pour les volumes et masses calciques.

4. Discussion

Les principaux résultats de cette étude sont les suivants :

- La reconstruction itérative améliore significativement le rapport signal sur bruit
- Le score coronaire calcique est reproductible dans les 2 méthodes (reconstruction itérative et rétroprojection filtrée) quel que soit l'épaisseur de coupe utilisée (2,5 et 3 mm).

Pendant plusieurs décennies, la rétroprojection filtrée a représenté la méthode de reconstruction de référence pour déterminer les profils d'atténuation des objets scannés. La rétroprojection filtrée repose sur :

- le prétraitement des mesures d'atténuation par un filtre (choisi en partie par l'utilisateur),
- une opération de « rétroprojection » de chacune des mesures filtrées sur les voxels traversés, et un cumul de chacune de ces rétroprojections pour reconstituer l'image finale.

C'est une méthode très intéressante du fait de sa simplicité et sa capacité de calculs extrêmement rapides mais elle reste très limitée par le bruit. C'est cette limite qui a poussé les constructeurs à développer des algorithmes de RI et d'intelligence artificielle.

Le principe général de la RI est le suivant:

- une première coupe scanner est reconstruite, par exemple par rétroprojection filtrée (comme d'habitude);
- puis :

- Étapes a : cette coupe scanner est reprojétée pour simuler les mesures qui seraient faites en « refaisant passer un scanner » virtuel à l'objet correspondant à la coupe qui vient d'être reconstruite,
- Étapes b : ces valeurs simulées sont comparées aux mesures réelles faites par le scanner,
- Étapes c : tant que les mesures réelles et les valeurs simulées sont « trop » différentes, on essaie de corriger la reconstruction en calculant une nouvelle coupe « améliorée»;
- ainsi, les étapes a, b, c sont répétées un certain nombre de fois, jusqu'à l'obtention d'un résultat que les critères d'évaluation de l'algorithme utilisé jugeront « satisfaisant » [9].

Les algorithmes de RI ont un effet sur l'amplitude du bruit et la texture de l'image qui est souvent décrite comme trop lissée, voire « plastique ». Le but du développement des techniques basées sur l'intelligence artificielle est de s'affranchir de cette limite. Ces méthodes de Deep Learning en intelligence artificielle ont été développées à partir d'un réseau de neurone artificiel, qui a incorporé l'ensemble des connaissances humaines concernant les systèmes d'acquisition, les modèles de scanner, les modélisations de bruit, les méthodes d'analyse automatique [10,11].

En 2012, une étude menée sur 50 patients avait montré une diminution linéaire du SCC en fonction du taux de RI de 20% à 100% (avec des incréments de 20%). Il y avait cependant une absence de différence significative

entre la méthode FBP et l'ASIR 20%. Les auteurs préconisaient une utilisation prudente des algorithmes de RI du fait du risque de sous-estimation du SCC [12].

Nos résultats sont concordants avec ceux d'une étude expérimentale plus récente réalisée sur fantôme. Les auteurs avaient comparé les algorithmes de reconstruction itérative des 4 principaux constructeurs : GE, Siemens, Philips et Toshiba et avaient conclu à une excellente reproductibilité du SCC mesuré en FBP et en RI sauf pour le scanner de Siemens. Cette variabilité du SCC pour le scanner Siemens selon les 2 méthodes a été essentiellement expliquée par l'importance de la densité des calcifications :

- lorsque la calcification est dense et que l'on s'attend à un SCC élevé, la RI donne des valeurs de score calcique et de volume plus faibles que pour la reconstruction FBP ; ceci peut s'expliquer par la capacité de la RI à détecter des calcifications de plus petite taille en raison de la diminution du bruit.
- Par contre, si la calcification est moins dense et que l'on s'attend à un SCC faible, la RI détecte plus de calcifications que la FBP, ce qui rend les scores totaux d'Agatston ou de volume obtenus par la RI plus élevés que ceux de la reconstruction FBP.

La variabilité du SCC en RI et FBP repose également sur l'efficacité avec laquelle la RI peut mesurer des scores plus faibles en raison de la réduction d'artefacts de blooming par rapport à la reconstruction FBP [13].

La reproductibilité du SCC en RI et FBP sur les scanners GE a été prouvée sur le plan expérimental mais également sur des études réalisées sur des patients. En effet, sur une série de 89 patients, Caruso et al. ont démontré que l'implémentation de pourcentages ASIR supérieurs à 50 % surpassait le protocole standard FBP en termes de rapport signal sur bruit et donc de qualité d'image, atteignant une signification statistique à des niveaux $\geq 70\%$. L'application d'une RI ASIR 70% n'entraînait pas de différences significatives du SCC par rapport au protocole standard en reconstruction FBP. Cette constatation particulièrement pertinente pour la fiabilité du SCC est d'une importance capitale, car il s'agit d'un puissant prédicteur indépendant de coronaropathie. Ces résultats, concordants avec ceux de notre étude pourrait avoir un impact clinique, permettant la mise en œuvre de l'ASIR dans l'analyse du SCC [14].

La bibliographie sur l'effet de l'épaisseur de coupe sur la reproductibilité du SCC demeure très pauvre, la majorité des acquisitions des études citées dans ce travail ayant été réalisée à 3 mm comme le protocole de référence d'Agatston. Il faut préciser qu'une réduction trop importante de l'épaisseur de coupe s'accompagnerait d'une diminution du signal et du rapport signal sur bruit

ainsi qu'une augmentation du temps d'analyse du SCC. Dans notre étude, des épaisseurs de coupe à 2,5 et 3 mm pour chaque implémentation d'ASIR ne modifiaient pas significativement le SCC par rapport la méthode de référence.

Ce travail comporte des limites :

- le nombre limité de patients inclus du fait d'une proportion très importante, durant la période d'étude de patients ayant un SCC nul et n'autorisant pas de comparaison des différentes méthodes de RI par rapport à la FBP
- son caractère monocentrique et limité à un seul constructeur (GE)

5. Conclusion

Cette étude met en exergue la fiabilité de la reconstruction itérative dans l'évaluation du SCC, autorisant ainsi son utilisation en pratique clinique de routine. L'amélioration du rapport signal sur bruit de cette méthode de reconstruction itérative pourrait être très intéressante pour les patients ayant des calcifications extensives aortiques et de l'anneau mitral. En effet, la réduction de l'artéfact de blooming de ces calcifications aortiques et mitrales pourrait aider à la discrimination des calcifications ostiales coronaires.

Une réduction de la dose de rayonnement pourrait être obtenue en RI par la diminution du courant du tube mais son impact sur la reproductibilité du SCC reste à prouver.

Conflit d'intérêt

Les auteurs déclarent n'avoir aucun conflit d'intérêt.

6. Références

1. Jacob S, Ferrieres J. Epidémiologie de la maladie coronaire et prévention des maladies cardiovasculaires. *Soins* 2015 ;60 (793) : 1-64
2. Agatston AS, Janowitz WR, Hildner FJ, Zusmer NR, Viamonte M Jr, Detrano R. Quantification of coronary artery calcium using ultrafast computed tomography. *J Am Coll Cardiol*. 1990 Mar 15;15(4):827-32.
3. Baron KB, Choi AD, Chen MY. Low Radiation Dose Calcium Scoring: Evidence and Techniques. *Curr Cardiovasc Imaging Rep* 2016; 9:12.
4. Marwan M, Mettin C, Pflederer T, Seltmann M, Schuhbäck A, Muschiol G, et al. Very low-dose coronary artery calcium scanning with high-pitch spiral acquisition mode: comparison between 120-kV and 100-kV tube voltage protocols. *J Cardiovasc Comput Tomogr* 2013; 7:32-38.
5. Kamani CH, Huang W, Lutz J, Giannopoulos AA, Patriki D, Von Felten E, et al. Impact of Adaptive Statistical Iterative Reconstruction-V on Coronary Artery Calcium Scores Obtained From Low-Tube-Voltage Computed Tomography - A Patient Study. *Acad Radiol* 2020 Nov 10;S1076-6332(20)30613-9. doi:

- 10.1016/j.acra.2020.10.025. Epub ahead of print. PMID: 33187851.
6. Van Der Werf NR, Willemink MJ, Willems TP, Greuter MJW, Leiner T. Influence of dose reduction and iterative reconstruction on CT calcium scores: a multi-manufacturer dynamic phantom study. *Int J Cardiovasc Imaging*. 2017;33:899–914.
 7. Van Osch JA, Mouden M, Van Dalen JA, Timmer JR, Reiffers S, Knollema S, et al. Influence of iterative image reconstruction on CT-based calcium score measurements. *Int J Cardiovasc Imaging*. 2014 Jun;30(5):961-7. doi: 10.1007/s10554-014-0409-9. Epub 2014 Mar 28. PMID: 24676668.
 8. Otton JM, Lønborg JT, Boshell D, Feneley M, Hayen A, Sammel N, Sesel K, Bester L, Mccrohon J. A method for coronary artery calcium scoring using contrast-enhanced computed tomography. *J Cardiovasc Comput Tomogr*. 2012 Jan-Feb;6(1):37-44.
 9. Bricault I. La reconstruction itérative en scanner : pourquoi ? Comment ça marche ? *Journal d'imagerie diagnostique et interventionnelle* 2018 ; 1 :76-80
 10. Greffier J, Hamard A, Pereira F, Barrau C, Pasquier H, Beregi JP, et al. Image quality and dose reduction opportunity of deep learning image reconstruction algorithm for CT: a phantom study. *Eur Radiol*. 2020 Jul;30(7):3951-59.
 11. Hsieh J, Liu E, Nett B, Tang J, Thibault JB, Sahney S. A new era of image reconstruction: TrueFidelity™. Technical white paper on deep learning image reconstruction. *GE Healthcare*. 2019.
 12. Gebhard C, Fiechter M, Fuchs TA, Ghadri JR, Herzog BA, Kuhn F, et al. Coronary artery calcium scoring: Influence of adaptive statistical iterative reconstruction using 64-MDCT. *Int J Cardiol* 2013; 167:2932–2937.
 13. Choi KS, Lee W, Jung JH, Park EA. Reproducibility of calcium scoring of the coronary arteries: comparison between different vendors and iterative reconstructions. *Acta Radiol Open*. 2020 Apr 28;9(4):2058460120922147. doi: 10.1177/2058460120922147.
 14. Caruso D, De Santis D, Biondi T, Panvini N, Zerunian M, Rivosecchi F, et al. Half-dose Coronary Artery Calcium Scoring: Impact of Iterative Reconstruction. *J Thorac Imaging*. 2019 Jan;34(1):18-25.