

**UNIVERSITE HASSAN II
FACULTE DE MEDECINE ET DE PHARMACIE
DE CASABLANCA**

ANNEE : 2006

THESE N°38

**LA SCINTIGRAPHIE MYOCARDIQUE :
TECHNIQUE ET INDICATIONS**

THESE

PRESENTEE ET SOUTENUE PUBLIQUEMENT LE..... 2006

PAR

Mr. Monssif MENDOUBI

Né le 05 Mars 1980 à Casablanca

POUR L'OBTENTION DU DOCTORAT EN MEDECINE

MOTS CLES : SCINTIGRAPHIE – THALLIUM 201 – SESTAMIBI – TETROFOSMINE –
MALADIE CORONAIRE – GATED SPECT

JURY

Mr. A. BENNIS

Professeur de Cardiologie

} PRESIDENT

Mr. M. KEBBOU

Maître de Conférence Agrégé de Médecine Nucléaire

} RAPPORTEUR

Mme. M. ZAHRAOUI

Maître de Conférence Agrégée de Cardiologie

} JUGES

Mme. M. NOUREDDINE

Maître de Conférence Agrégée de Cardiologie

P L A N

I. INTRODUCTION.....	1
II. RAPPEL ANATOMIQUE ET PHYSIOLOGIQUE DU COEUR.....	2
1. Le myocarde.....	2
2. Les artères coronaires.....	2
a. L'artère coronaire gauche.....	2
b. L'artère coronaire droite.....	5
3. La perfusion myocardique.....	5
4. Notion de «réserve coronaire».....	5
5. Notion de viabilité myocardique.....	7
6. Métabolisme du myocarde.....	8
III. BASES PHYSIQUES DE LA SCINTIGRAPHIE.....	9
A. PRINCIPE GENERAL	9
B. LES TRACEURS RADIOACTIFS (RADIOPHARMACEUTIQUES).....	9
1. Définition.....	9
2. Différents types de radiopharmaceutiques	10
C. FORMATION DE L'IMAGE SCINTIGRAPHIQUE.....	11
D. DIFFERENTS MODES D'ACQUISITION D'IMAGES.....	11
1. Acquisition planaire.....	11
2. Tomographie d'émission monophotonique.....	12
3. Scintigraphie synchronisée à l'ECG.....	12
4. Tomographie d'émission de positons.....	13
a. Principe.....	13
b. Détection.....	14

E. ANALYSE QUANTITATIVE DES IMAGES SCINTIGRAPHIQUES.....	16
1. L'atténuation.....	17
2. La diffusion.....	18
3. Le mouvement.....	18
4. L'effet de volume partiel.....	18
IV. EXPLORATIONS ISOTOPIQUES EN CARDIOLOGIE.....	20
A. VENTRICULOGRAPHIE ISOTOPIQUE.....	20
1. Technique.....	20
a. Etude au premier passage.....	20
b. Etude à l'équilibre.....	21
c. Le traitement d'image.....	23
2. Indications.....	25
B. SCINTIGRAPHIE MYOCARDIQUE DE PERFUSION.....	25
1. Choix de la technique de stress.....	28
a. L'épreuve d'effort.....	28
b. Stress pharmacologique.....	29
2. Choix du radiopharmaceutique.....	31
a. Thallium 201.....	31
b. Produits technetiés.....	32
3. Réalisation pratique de l'examen.....	34
4. Acquisition des images.....	35
5. Protocoles d'examen.....	37
6. Interprétation et présentation des résultats.....	38
7. Artefacts.....	39
8. Valeur diagnostique.....	42
9. Indications.....	42

C. TOMOGRAPHIE D'EMISSION MONOPHOTONIQUE	
SYNCHRONISEE A L'ECG (GATED SPECT).....	44
1. Technique.....	44
2. Choix du radiotraceur.....	45
3. Validation du gated SPECT par d'autres méthodes.....	46
4. Valeur fonctionnelle du VG appréciée par le gated SPECT.....	48
5. Valeur ajoutée du gated SPECT.....	49
6. Détection de la viabilité myocardique.....	50
7. Valeur pronostique.....	53
D. TOMOGRAPHIE PAR EMISSION DE POSITONS (TEP).....	55
1. Principaux radiotraceurs en TEP.....	55
2. Réalisation pratique de l'examen.....	56
3. Comparaison entre TEP et TEMP.....	57
4. Etude de la viabilité myocardique.....	57
V. APPORT CLINIQUE DE LA SCINTIGRAPHIE MYOCARDIQUE DE PERFUSION.....	59
A. CARDIOPATHIES ISCHEMIQUES.....	59
1. Angine de poitrine.....	59
a. Valeur diagnostique de la scintigraphie myocardique.....	60
b. Apport diagnostic dans l'angor stable.....	61
c. Apport diagnostic chez les populations particulières.....	63
d. Valeur pronostique dans l'angor stable.....	65
e. Evaluation pronostique de la maladie coronaire.....	67
2. L'infarctus du myocarde (IDM).....	70
a. Diagnostic de l'infarctus myocardique aigu.....	71
b. Evaluation de la thrombolyse après IDM.....	74
c. Evaluation de la viabilité myocardique (Hibernation myocardique).75	
3. Evaluation des stratégies de revascularisation.....	79

a. Evaluation de l'infarctus et de la récupération myocardique péri-opératoires.....	79
b. Dépistage des resténoses après pontage.....	80
c. Détection des resténoses après angioplastie.....	80
d. Différenciation des douleurs récurrentes.....	81
B. MYOCARDITES AIGUËS.....	83
C. SCLERODERMIE SYSTEMIQUE.....	86
D. AUTRES.....	87
 VI. PLACE PARMI LES AUTRES MOYENS D'EXPLORATION NON INVASIVES.....	 90
A. VALEUR PREDICTIVE D'UN TEST DIAGNOSTIC.....	90
B. L'ECHOCARDIOGRAPHIE DE STRESS.....	92
C. L'IMAGERIE PAR RESONANCE MAGNETIQUE	94
D. TEP DE PERFUSION.....	96
 VII. PERSPECTIVES.....	 97
 VIII. CONCLUSION.....	 100

ABREVIATIONS

201Tl	: Thallium 201
99mTc	: Technétium 99m
E.E	: Epreuve d'Effort
FEVG	: Fraction d'Ejection Ventriculaire Gauche
FDG	: FluoroDeoxyGlucose
FMT	: fréquence maximale théorique
Gated SPECT	: Tomographie d'émission monophotonique synchronisée à l'ECG
IDM	: Infarctus du myocarde
MIBI	: Methoxy IsoButil Isonitrile
SM	: Scintigraphie myocardique
SPECT	: Single photon emission computed tomography
TEMP	: Tomographie d'émission monophotonique
TEP	: Tomographie d'Emission de Positons
VG	: Ventricule gauche
VTD	: Volume télendiastolique
VTS	: Volume télésystolique

I. INTRODUCTION

L'imagerie nucléaire, constitue actuellement dans les pays développés, un moyen performant pour l'exploration non invasive du cœur.

Son intérêt réside dans l'apport diagnostic en matière de maladie coronaire. Mais également, grâce au calcul des paramètres fonctionnels (Fraction d'éjection ventriculaire gauche FEVG, cinétique segmentaire) et l'évaluation pronostique (Perfusion et viabilité myocardique), elle constitue un élément important dans la prise en charge thérapeutique.

La scintigraphie myocardique de perfusion a connu un regain d'intérêt supplémentaire grâce à la synchronisation à l'électrocardiogramme (Gated SPECT)

La ventriculographie isotopique garde un intérêt limité au calcul de la FEVG au cours des chimiothérapies cardiotoxiques et dans le domaine de la rythmologie.

Les autres examens comme la scintigraphie à la MIBG et la tomographie d'émission de positons ont des indications très ciblées.

Dans ce travail, sont rapportés les différentes techniques d'exploration radio-isotopique du cœur, leur apport en pathologie cardio-vasculaire et leurs avantages et limites comparés aux autres techniques d'imagerie (échocardiographie, IRM...)

II. RAPPEL ANATOMIQUE ET PHYSIOLOGIQUE DU COEUR

1) Le myocarde [1] :

C'est un tissu essentiellement musculaire, épais, constituant la plus grande partie de la paroi des ventricules droit et gauche, et dont les fibres prennent leur insertion au niveau d'un appareil fibreux placé à la base des ventricules et composé de quatre anneaux fixés sur les orifices auriculo-ventriculaires.

Le myocarde a une forme grossièrement tronc-conique à base postéro-supérieure répondant au plan des orifices valvulaires et à pointe inféro-externe. Son épaisseur, qui est de 1 cm au niveau du myocarde gauche et du septum et de 0.5 cm au myocarde droit, explique que seule la paroi ventriculaire gauche sera habituellement visible en scintigraphie (figure 1)

2) Les artères coronaires [2] :

a. L'artère coronaire gauche

Elle naît au-dessus de la sigmoïde antéro-gauche (figure 2). Elle comporte une première partie ou tronc commun, de 1 à 3 cm, qui se divise en une interventriculaire antérieure (donnant les artères septales et une ou deux diagonales) et une circonflexe (donnant des collatérales descendantes pour la face postérieure du ventricule gauche, des collatérales ascendantes pour l'oreillette gauche, et une marginale pour la face antéro-latérale du ventricule gauche)

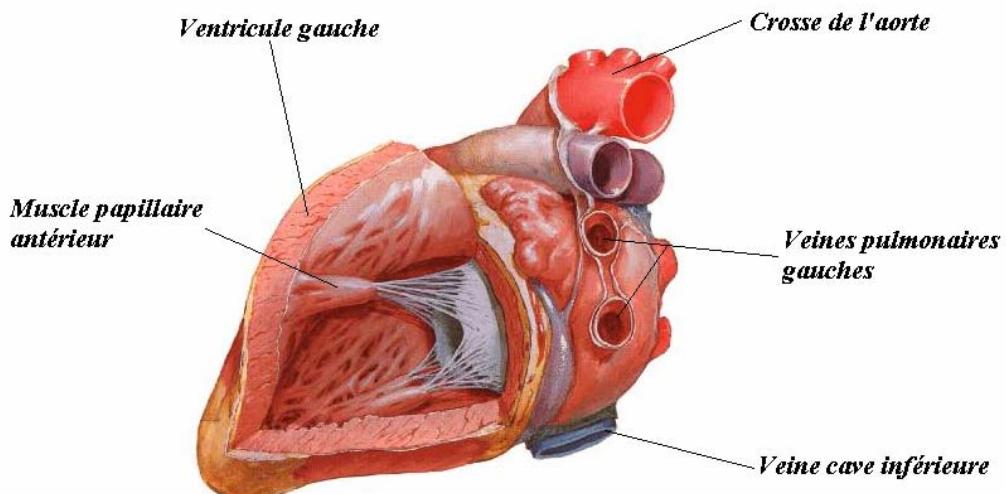


Figure 1 : Le myocarde a une forme grossièrement tronc-conique à base postéro-supérieure répondant au plan des orifices valvulaires et à pointe inféro-externe. Son épaisseur, qui est de 1 cm au niveau du myocarde gauche et du septum et de 0.5 cm au myocarde droit, explique que seule la paroi ventriculaire gauche sera habituellement visible en scintigraphie.

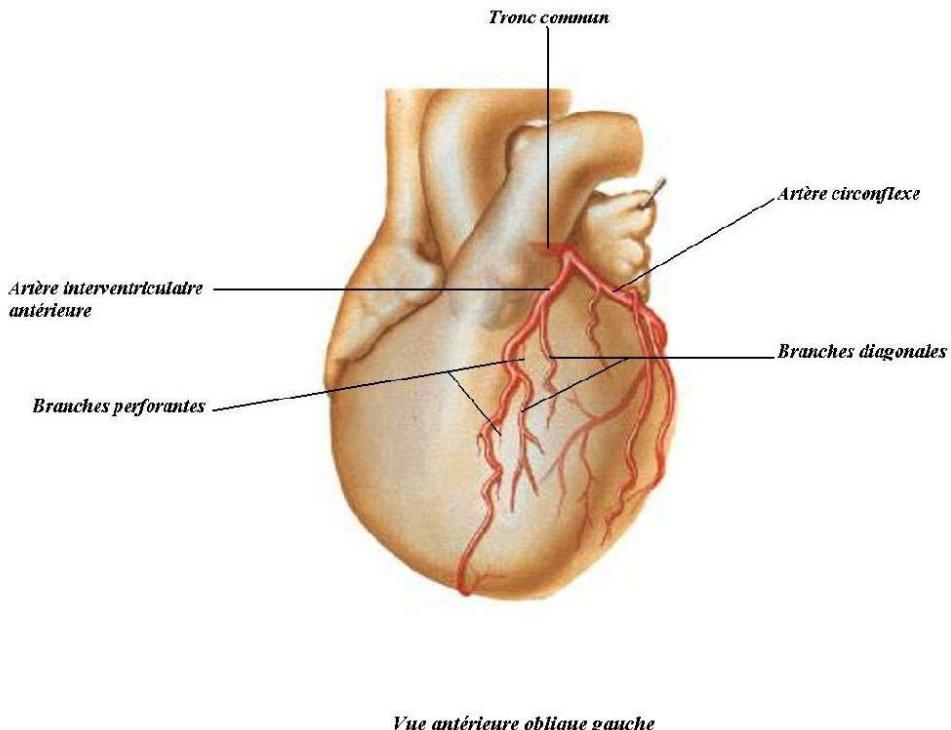


Figure 2 : l'artère coronaire gauche naît au-dessus de la sigmoïde antéro-gauche. Elle comporte une première partie ou tronc commun, de 1 à 3 cm, qui se divise en une interventriculaire antérieure et une circonflexe.

b. L'artère coronaire droite

Elle naît au-dessus de la sigmoïde antéro-droite. Elle contourne le cœur dans le sillon auriculo-ventriculaire droit et atteint la partie supérieure du sillon inter ventriculaire postérieur qu'elle emprunte : interventriculaire postérieure (Figure 3)

3) la perfusion myocardique

Pendant la diastole, la perfusion myocardique est au maximum. A l'effort, le débit coronarien augmente de 3 à 6 fois.

À l'état basal, la sténose d'une artère coronaire épicardique ne réduit le débit coronaire que pour une réduction relative d'environ 80 % de son diamètre. Tant que la sténose est inférieure à 75-80 %, la perfusion d'aval dans les conditions basales est maintenue, grâce à un phénomène d'adaptation du système artériolo-capillaire coronaire et sa capacité à maintenir un débit coronaire normal en diminuant ses résistances par vasodilatation. Pour des sténoses supérieures à 80 % et malgré une vasodilatation maximum, la résistance vasculaire augmente très rapidement et peut se traduire par une ischémie qui survient pour un effort minime, voire au repos [3].

4) Notion de «réserve coronaire»

À l'effort ou lors d'une épreuve de stress pharmacologique, l'augmentation du débit coronaire résulte d'une vasodilatation du lit vasculaire coronaire intra-myocardique. On définit ainsi la notion de « réserve coronaire » qui correspond au rapport entre le débit coronaire obtenu en réponse à une

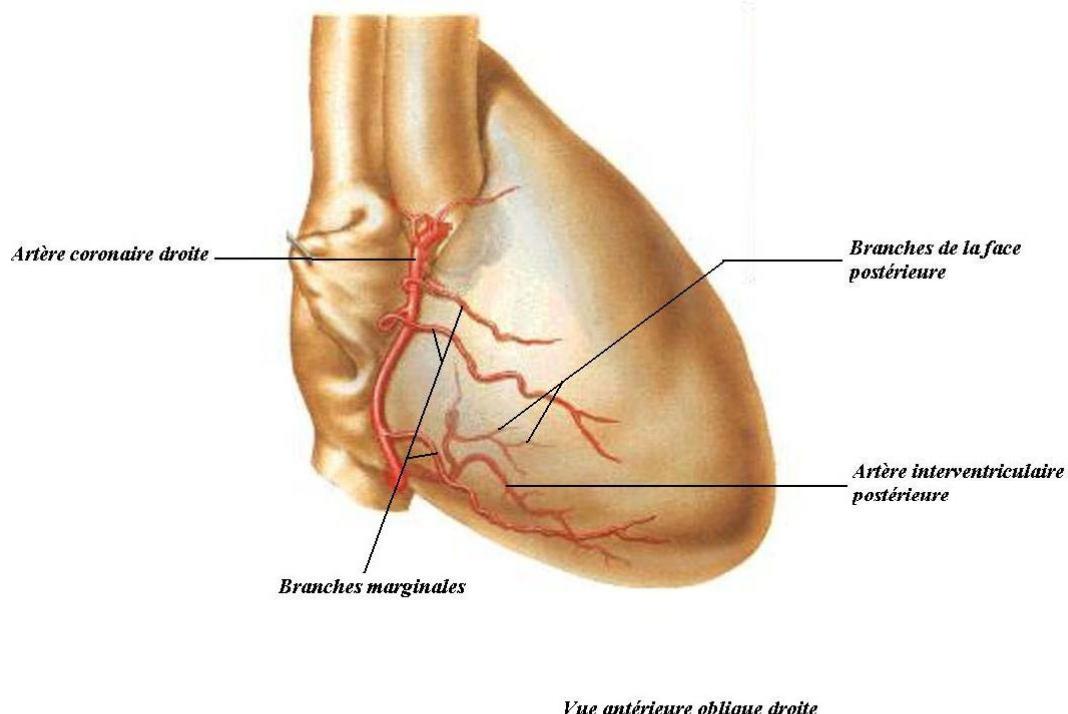


Figure 3 : l'artère coronaire droite naît au-dessus de la sigmoïde antéro-droite. Elle contourne le cœur dans le sillon auriculo-ventriculaire droit et atteint la partie supérieure du sillon inter ventriculaire postérieur qu'elle emprunte : interventriculaire postérieure.

vasodilatation maximum ou en réponse à un stimulus, et le débit coronaire de repos. Cet état d'hyperémie maximale permet de multiplier par 4 à 5 le flux coronaire basal dans des conditions normales.

Dans le cas d'une sténose coronaire, la réserve coronaire est altérée dès les sténoses de 30 à 40 %. Ainsi, accéder aux modifications de la réserve coronaire peut être un moyen pour estimer le retentissement fonctionnel d'une sténose [4]. C'est le principe de base des épreuves de stress pharmacologique pour étudier la perfusion. Le débit coronaire basal n'est abaissé que pour des sténoses au-delà de 80 %. La réserve coronaire est altérée dès 50 %.

5) Notion de viabilité myocardique[3]

Au cours de l'évolution des cardiopathies ischémiques, la lésion ischémique va progressivement se constituer et aboutir à une mosaïque de zones lésionnelles de gravité décroissante :

- Nécrose à prédominance sous-endocardique à extension transmurale plus ou moins importante évoluant progressivement vers la fibrose cicatricielle
- Ilots de myocarde hibernants, où persiste une viabilité cellulaire mais où l'ischémie chronique aboutit à une adaptation tissulaire se caractérisant par une dysfonction contractile.

Si différents concepts physiopathologiques sous-entendent cette évolution (hibernation, sidération aiguë ou chronique et notion de réseau collatéral), il est important de comprendre que la décision thérapeutique visant la revascularisation d'un territoire repose sur la possibilité de distinguer :

- Les territoires dysfonctionnels, mais dits « viables », car ils bénéficieront de la revascularisation en présentant une amélioration fonctionnelle après revascularisation.
- Des territoires dysfonctionnels, mais dits « non viables », correspondant aux régions nécrosées ou fibrosées qui ne présenteront pas d'amélioration malgré la revascularisation puisqu'il n'existe pas de cellules myocardiques intégrées susceptibles de bénéficier de la revascularisation.

Cette distinction est importante pour ne pas faire courir les risques d'une revascularisation à des patients ne pouvant en aucun cas en tirer un bénéfice.

6) Métabolisme du myocarde

La source énergétique du myocarde est l'ATP, issu principalement de la phosphorylation oxydative de l'ADP. Les substrats utilisés sont les acides gras, puis le glucose et le lactate, enfin les corps cétoniques et les acides aminés.

En cas d'ischémie, l'oxydation des acides gras devient impossible et l'utilisation anaérobique du glucose est accrue. Cette caractéristique métabolique est exploitée en tomographie à émission de positons pour visualiser le métabolisme du myocarde ischémique [5].

III. BASES PHYSIQUES DE LA SCINTIGRAPHIE

A. PRINCIPE GENERAL

Les explorations scintigraphiques sont basées sur le principe de l'imagerie par émission de photons. Elles consistent à visualiser une structure anatomique ou fonctionnelle de l'organisme en localisant la répartition spatiale et temporelle d'un traceur radioactif au moyen d'un détecteur externe appelé caméra à scintillation.

Deux types d'isotopes radioactifs peuvent être utilisés : les émetteurs γ dont les photons sont détectés par des caméras conventionnelles et les émetteurs β^+ dont les photons d'annihilations sont détectés par des caméras à positons.

B. LES TRACEURS RADIOACTIFS (RADIOPHARMACEUTIQUES)

1. Définition :

On appelle traceur toute substance qui, introduite dans l'organisme, est physiologiquement indiscernable de la substance étudiée mais détectable indépendamment de celle-ci. Pour être utilisables, les radiopharmaceutiques doivent répondre aux propriétés suivantes :

- Etre spécifiques d'un organe, d'une fonction ou d'une pathologie.
- Avoir une période (de quelques heures à quelques jours) et une énergie (50 à 600 KeV) adaptée aux systèmes d'imagerie.

- Ne pas être toxiques sur le plan biologique et radiotoxicologique
- Pouvoir être utilisés à de très faibles concentrations de manière à ne pas modifier le métabolisme de l'organe étudié.

2. Différents types de radiopharmaceutiques

On distingue les isotopes radioactifs non couplés à une molécule vectrice tels que le technétium 99m (99mTc), le thallium 201 (201Tl), et l'iode 123 et 131 (123I ; 131I). Tous ces isotopes sont des émetteurs γ et l'élément radioactif est directement capté par l'organe cible (captation du 201Tl par les cellules myocardiques)

Les isotopes radioactifs couplés à une molécule vectrice : Dans ce cas la spécificité vis à vis de l'organe est assurée par l'intermédiaire d'une molécule non radioactive, dite froide, qui peut être détectée après couplage avec l'un des isotopes précédents. C'est ainsi que le Methoxyl IsoButil Isonitrile (MIBI) et la tetrofosmine sont marqués au 99mTc dans la scintigraphie myocardique.

Le 99mTc est l'isotope γ le plus utilisé actuellement car il offre comme avantage de pouvoir être produit de façon extrêmement simple par n'importe quel service de médecine nucléaire.

Le 18F-FluoroDeoxyGlucose (18F-FDG) pour lequel l'isotope radioactif est un émetteur β^+ , est d'obtention difficile.

C. FORMATION DE L'IMAGE SCINTIGRAPHIQUE

La caméra à scintillation permet la localisation spatiale des photons émis par l'organe cible. Après administration, par voie intraveineuse, le traceur fixé au niveau du myocarde ou des globules rouges émet des photons dans toutes les directions.

Après interaction des photons avec un cristal d'iodure de sodium, un signal comportant l'énergie et la position du photon est généré au niveau des photomultiplicateurs qui tapissent la face postérieure du cristal, puis stocké au niveau de l'ordinateur, où l'information sera traitée pour reconstituer l'image de la distribution radioactive dans l'organisme.

Un collimateur permet de sélectionner les photons perpendiculaires au plan du détecteur

D. DIFFERENTS MODES D'ACQUISITION D'IMAGES :

1. Acquisition planaire :

Dans *l'acquisition planaire statique*, le détecteur est immobile, une seule image est acquise. Elle illustre la répartition du radiotracer lorsqu'il est fixé de façon relativement stable dans la structure étudiée.

Dans *l'acquisition planaire dynamique*, les détecteurs sont immobiles, plusieurs dizaines d'images sont successivement acquises, à raison de quelques secondes par image. Ces images permettent d'étudier la cinétique de distribution du radiotracer dans le temps.

2. Tomographie d'émission monophotonique (TEMP)

La tomoscintigraphie (SPECT : single photon emission computed tomography) est à la scintigraphie plane ce que la tomodensitométrie est à la radiographie conventionnelle. Elle évite les superpositions, ce qui s'avère particulièrement important dans l'exploration du myocarde, car sa forme ovoïde fait que les parois opposées apparaissent superposées sur les vues planes. [6]

Elle est utilisée pour l'acquisition de coupes, et permet ainsi de connaître la répartition de la radioactivité dans les trois dimensions de l'espace. La reconstruction des coupes tomographiques par rétro projection filtrée reste la méthode la plus utilisée. Elle a pour principal avantage la rapidité. L'utilisation conjointe de filtre correctement lissant ou contrastant permet d'avoir une bonne qualité d'image. La méthode ne permet toutefois pas l'élimination complète d'artéfacts de reconstruction qui peuvent parfois être gênants. Cette méthode peut servir de détermination initiale pour les méthodes itératives. [7]

3. Scintigraphie synchronisée à l'ECG

Des images planaires ou tomographiques peuvent être synchronisés à l'electrocardiogramme. Dans le cas de l'étude de la Fraction d'éjection du ventricule gauche (FEVG), chaque cycle est découpé en intervalles l'onde R de l'ECG déclenche l'acquisition durant le cycle cardiaque. Un minimum de 16 images par intervalle R-R est nécessaire pour une appréciation de la cinétique des parois et la mesure de la fraction d'éjection. Une somme de plusieurs centaines de cycles cardiaques (R-R) est également nécessaire pour créer une

image analysable. Dans le cas de la TEMP, le cycle cardiaque est divisé en intervalles (typiquement, 8 ou 16 intervalles de temps), les images sont alors acquises de telle sorte que pendant le premier intervalle du cycle cardiaque, les données sont stockées dans un jeu de projections, pendant le deuxième intervalle du cycle, elles sont stockées dans un second jeu de projection, et ainsi de suite pour tous les intervalles suivants. Ce tri est répété pendant un grand nombre de cycles cardiaques.

À la fin de l'acquisition, on dispose donc d'autant de jeux de projections que d'intervalles utilisés pour découper le cycle cardiaque (par exemple 8). Chaque jeu de projections est reconstruit par traitement tomographique, conduisant à autant de volumes reconstruits que de nombre d'intervalles. [8]

4. Tomographie d'émission de positons (TEP)

a. Principe

C'est une technique d'imagerie qui permet la détection de la distribution d'émetteurs β^+ dans un objet. Les émetteurs de positons ont un excès de charges positives dans leur noyau, et se désintègrent par transformation d'un proton en neutron. Cette transformation s'accompagne de l'émission d'un positon et d'un neutrino (ce qui respecte la loi de conservation de l'énergie cinétique). Le positon émis parcourt quelques millimètres dans la matière en abandonnant par interactions successives son énergie cinétique ; lorsqu'il est pratiquement au repos, il se produit avec un électron du milieu une réaction d'annihilation dans laquelle la masse des deux particules est transformée en leur équivalent énergétique, soit 1,022 Méga électron-volt (Mev) répartis en deux photons de

511 Kilo électron-volt (keV) (appelés photons d'annihilation) émis simultanément dans des directions opposées à 180°. Ces propriétés lui confèrent d'une part des avantages, mais expliquent d'autre part les difficultés que rencontre la diffusion de la méthode.

Les avantages sont, la possibilité de s'affranchir du collimateur (élément très pénalisant dans les chaînes de détection monophotonique), et d'avoir une atténuation dans les tissus qui ne dépend pas de la profondeur (permettant, au moins en théorie, une correction d'atténuation exacte). [9]

Les difficultés sont essentiellement la période physique courte : 112 min pour le Fluor 18, encore que celle-ci soit relativement longue par rapport à d'autres émetteurs de positons (20 min pour le carbone 11 et 2 min pour l'oxygène 15), et la nécessité d'un appareillage de détection particulier (Tableau 1)

b. Détection :

La distribution d'une molécule marquée par un émetteur de positons peut être étudiée en combinant la détection en coïncidence des photons d'annihilation et les principes de la tomographie d'émission. Ces deux approches sont combinées soit en utilisant des systèmes dédiés représentés par les caméras dites "TEP" (pour tomographie par émission de positons), soit des caméras de type Anger à double tête, adaptées pour la détection des photons en coïncidence et désignées sous le terme "CDET" pour "détection de coïncidence". [10]

Atome	Isotope	Demi-vie
Carbone	^{11}C	20.4 min
Azote	^{13}N	9.96 min
Oxygène	^{15}O	2.07 min
Fluor	^{18}F	109.8 min

Tableau I : Les principales caractéristiques des émetteurs de positons utilisés en TEP

Le principe commun est la localisation des événements de désintégration dans la source par la détection simultanée, en coïncidence, des deux photons d'annihilation émis à 180°. Cette détection est assurée dans les caméras dédiées par une couronne de détecteurs (Iodure de sodium NaI, ou Germanate de Bismuth BGo couplé à des photomultiplicateurs) indépendants ; sur les appareils les plus récents et les plus performants, les détecteurs sont agencés en une série d'anneaux complets couvrant une quinzaine de centimètres dans la direction axiale et produisant simultanément entre 35 et 63 coupes, ce qui permet des acquisitions corps entier.

Sur les systèmes "CDET", qui sont des caméras SPECT conventionnelles double tête modifiées, essentiellement avec des cristaux plus épais, un logiciel de localisation permet de prendre en compte la coïncidence des deux photons, dont l'impact est repéré dans chaque tête de détection par la même approche qu'en détection monophotonique. Ce système revient moins cher, mais ses performances sont moindres que celles d'une caméra dédiée, avec pour conséquence que pour obtenir une qualité d'images équivalente, il est nécessaire d'avoir un protocole d'acquisition plus lourd, avec notamment des temps d'acquisition beaucoup plus longs.

E. ANALYSE QUANTITATIVE DES IMAGES SCINTIGRAPHIQUES

En présence d'images TEMP ou TEP, l'approche adoptée habituellement consiste à interpréter visuellement les images, pour détecter des hypo ou des hyper fixations révélatrices d'une pathologie. Au-delà de cette interprétation

visuelle, il est souvent souhaitable de caractériser objectivement les anomalies de fixation détectées. Une telle caractérisation objective est en effet susceptible d'améliorer le diagnostic différentiel entre deux pathologies, le pronostic, la prise en charge thérapeutique et le suivi du patient. La caractérisation objective des anomalies de fixation détectées s'appuie sur une mesure de la fixation du traceur, mesure qui peut être soit relative (par exemple le rapport de la fixation dans la région suspecte et de la fixation dans une région normale) ou absolue (mesure de la concentration de radiotraceur dans la région suspecte). Ce processus de mesure est ce que l'on appelle dans la suite la quantification des images.[8]

Plusieurs facteurs peuvent interférer sur la quantification des images tels que : l'atténuation, la diffusion, le mouvement, et l'effet de volume partiel

1. L'atténuation

Elle est due à l'interaction des photons émis par le radiotracer avec les tissus traversés. En TEMP, près de 90 % des photons émis en profondeur sont atténués, ce qui cause des biais de quantification relative [8]. Pour y remédier, il est donc nécessaire de connaître la cartographie de densité des tissus, ou du moins les coefficients d'atténuation propres à chaque patient. En pratique, la tendance actuelle est d'équiper les gamma caméras d'un dispositif d'acquisition en transmission fiable tel que la tomodensitométrie permettant d'avoir une correction assez précise.

2. La diffusion

La diffusion par effet Compton se traduit par une perte d'énergie du photon, mais également par un changement de la trajectoire de ce dernier. Ce qui introduit des erreurs de localisation de l'activité présente dans l'organisme. Par exemple, en TEMP au ^{99m}Tc , environ 30 % des photons détectés ont subi au moins une diffusion Compton [8]. Pour corriger la diffusion, on limite la détection des photons à ceux dont l'énergie est comprise dans une fenêtre spectrométrique centrée sur l'énergie d'émission du marqueur ($\pm 20\%$). D'autres approches plus récentes, basées sur la combinaison TEMP/TDM sont à l'étude.

3. Le mouvement

Deux types de mouvement peuvent interférer sur les images TEMP. Les mouvements involontaires du patient pendant l'acquisition, qu'on peut éviter en réduisant la durée de l'examen grâce aux caméras multitêtes (2 ou 3 détecteurs). Et les mouvements physiologiques tels que les battements cardiaques ou la respiration. Leur correction passe par la synchronisation à l'ECG. Les techniques de synchronisation respiratoire sont du domaine de la recherche.

4. L'effet de volume partiel

Il résulte de la résolution spatiale limitée des systèmes d'imagerie, et des défauts de la numérisation des images. Il en découle que dans les pixels positionnés sur une structure donnée, on peut détecter de l'activité émanant

d'autres régions, et inversement on peut retrouver l'activité de cette structure dans les pixels voisins. Par conséquent, La sévérité des biais introduits par cet effet dépendra de la résolution spatiale, de la taille des pixels et de la taille des structures imagées. Les corrections de volume partiel sont encore du domaine de la recherche. Cependant, des compensations simples sont possibles (en particulier par la méthode des coefficients de recouvrement). Bien qu'approximatives, elles peuvent améliorer considérablement la justesse des mesures d'activité effectuées sur les images.

D'autres facteurs peuvent parasiter la quantification des images comme l'hétérogénéité de la résolution spatiale due essentiellement au collimateur, le temps mort du détecteur et les erreurs lors de la reconstruction tomographique.

En conclusion, les obstacles à la quantification des images sont nombreux, mais moyennant quelques corrections, il est possible de parvenir à des marges d'erreur acceptables. L'avènement des détecteurs bi-modaux TEMP/TDM et TEP/TDM pourrait jouer un rôle majeur dans l'avenir.

IV. EXPLORATIONS ISOTOPIQUES EN CARDIOLOGIE

A. VENTRICULOGRAPHIE ISOTOPIQUE :

Elle occupe une place de choix parmi les méthodes non invasives pour l'exploration de la fonction ventriculaire. C'est une méthode peu Opérateur dépendante donnant accès de façon simple et répétitive aux principaux paramètres ventriculaires tels que la fraction d'éjection et la cinétique pariétale régionale.

1. Technique

Les radio-traceurs le plus couramment utilisés sont l'albumine humaine ou les globules rouges marquées par ^{99m}Tc (Injection en intraveineux de 1 à 1,5 ml de chlorure stanneux, complétée 20' plus tard par une injection de 740 MBq de ^{99m}Tc), [11] formant ainsi un complexe radioactif se distribuant uniquement dans le secteur vasculaire. L'étude des variations temporelles de la radioactivité dans les cavités cardiaques à l'aide d'une gamma caméra permet d'obtenir des informations quantitatives et qualitatives sur les paramètres ventriculaires. L'acquisition des données peut se faire dans les secondes suivant l'injection (premier passage) ou à l'équilibre :

a. Etude au premier passage

Elle permet de visualiser l'embole radioactif lors de son premier passage dans le ventricule droit, puis dans le ventricule gauche. L'étude des ventricules en incidence antérieure et en oblique antérieure droite (OAD) permet une

meilleure séparation des oreillettes et des ventricules. De plus, la concentration du traceur dans les ventricules est élevée et le bruit de fond moindre. En pratique une durée de 25 msec par image est recommandée, et une durée totale de 30 sec est suffisante pour permettre la quantification et le suivi dans le temps de l'acheminement successif du radio-traceur dans les différents compartiments à étudier (veine sous Clavière, ventricule droit, artère pulmonaire, ventricule gauche) [5].

L'indication actuelle de cette méthode est la cardiopathie congénitale et en particulier la détection d'un shunt droite-gauche intra cardiaque et extra-cardiaque, dilatation des cavités, déformation des contours et sténose artérielle. En outre, l'étude dynamique de la courbe activité-temps permet le calcul du débit cardiaque.

b. Etude à l'équilibre :

Après administration par une veine périphérique, le radio-traceur est dilué de façon homogène dans le pool sanguin au bout de 5 minutes. Un mauvais marquage des globules rouges ou de l'albumine humaine est à l'origine d'une activité dans les glandes salivaires, la thyroïde, l'estomac. Il entraîne une augmentation du bruit de fond et une mauvaise délimitation des images en systole et en diastole. L'acquisition des images est réalisée en mode «frame» et en mode «liste» si le patient est en arythmie (Figure 4).

Dans le mode «synchronisé» ou «gated» l'incidence OAG 25° à 60° est adoptée, parfois avec une inclinaison caudale pour séparer au mieux les deux ventricules, pour l'étude de la FEVG et de la cinétique régionale.

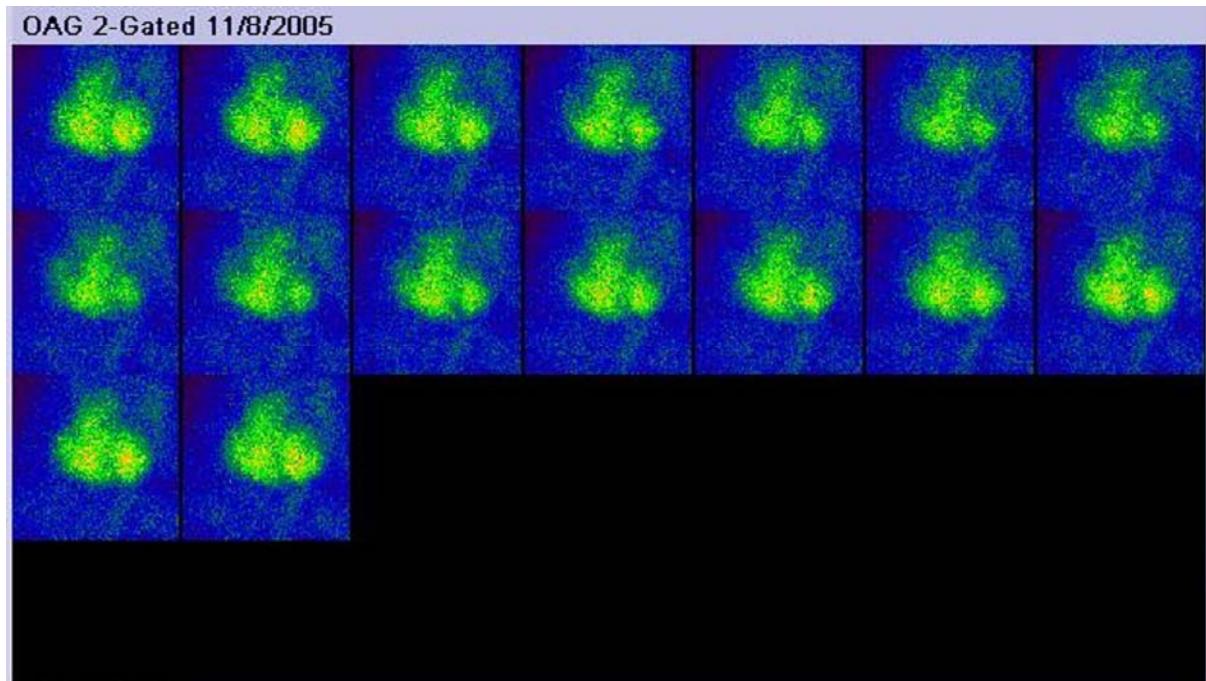


Figure 4 : Acquisition en mode «frame». Chaque cycle cardiaque est divisé en 16 intervalles et la sommation de l'activité correspondant à un même intervalle durant des centaines de cycles, permet d'obtenir une image pour chaque intervalle. La première image représente la télediastole

c. Le traitement d'image comporte plusieurs étapes:

La visualisation en mode cinématographique de la série d'images enregistrée pour vérifier la qualité du positionnement, du marquage et de la synchronisation à l'ECG. Ceci permet d'avoir une première idée subjective de la fonction.

Après soustraction du bruit de fond, la courbe d'évolution du volume ventriculaire au cours du cycle cardiaque est obtenue en traçant la courbe d'évolution activité-temps dans la région d'intérêt tracée sur les ventricules (Figure.5). C'est à partir de cette courbe que vont être calculés les principaux paramètres fonctionnels.

-Calcul de la fraction d'éjection :

$$\text{FEVG} = \frac{\text{activité diastolique} - \text{activité systolique}}{\text{Activité diastolique} - \text{Bruit de fond}}$$

La valeur normale de la Fraction d'Ejection Ventriculaire Gauche est habituellement supérieure à 55 % et la Fraction d'Ejection Ventriculaire Droite supérieure à 45 %. Ces valeurs sont aussi valides pour les nourrissons de plus d'un an [12]

L'analyse sectorielle du mouvement des parois ventriculaires en comparant les contours, manuellement ou automatiquement, en télésystole et en télédiastole permet l'étude de la contractilité myocardique et de la cinétique segmentaire. Mais une approche plus élaborée de l'évolution de la contractilité du myocarde repose sur l'analyse de Fourier qui permet de générer des

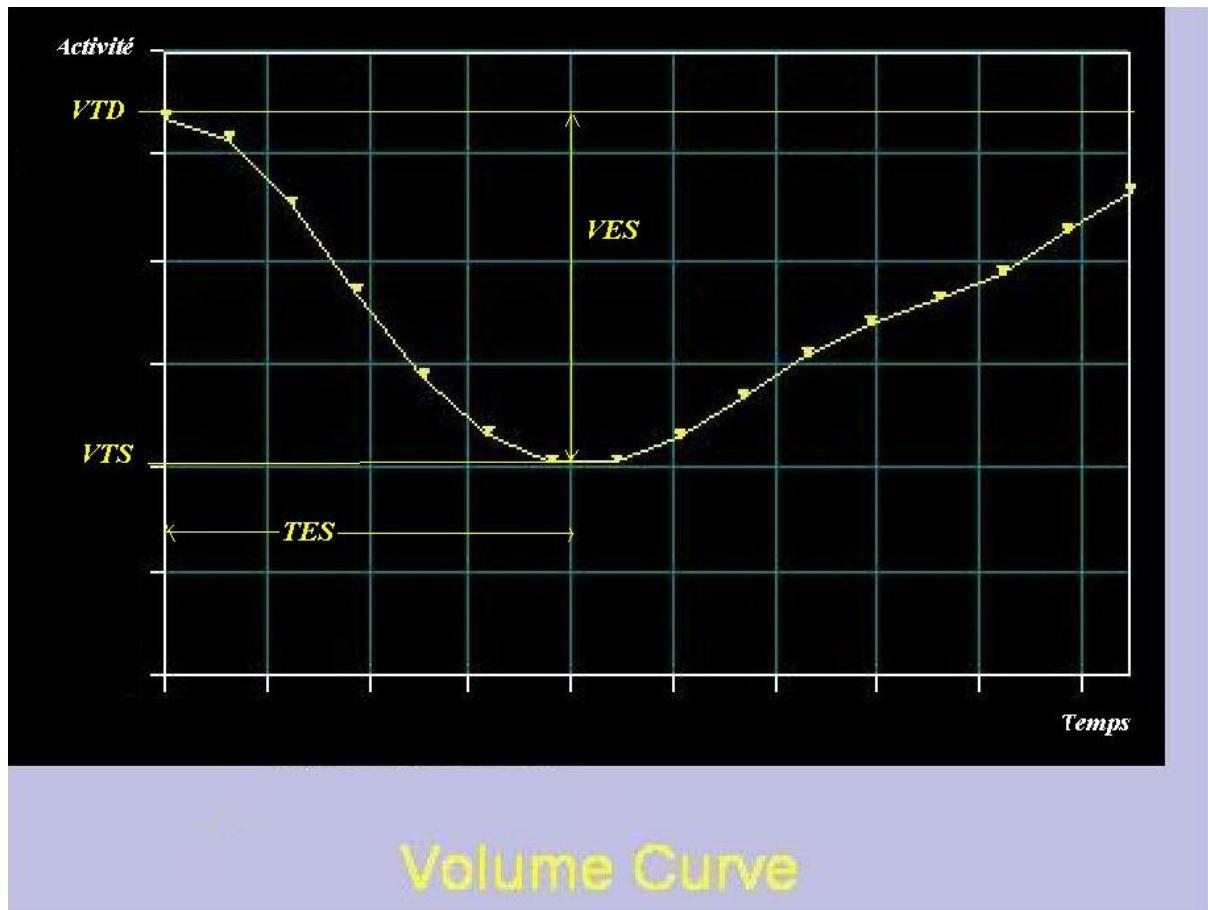


Figure 5 : Les principaux paramètres fonctionnels. Calculés à partir de la courbe d'évolution activité-temps. VTD, volume téldiestolique ; VTS, volume télésystolique ; VES, volume d'éjection systolique ; TES, temps d'éjection systolique

histogrammes d'amplitude et de phase, et les représente sous forme d'images paramétriques «images de phase et d'amplitude» (figure.6)

Dans certains centres, on calcule les volumes ventriculaires, en mesurant l'activité dans un échantillon de sang du patient prélevé dans une seringue de 5 ml et on le compare au taux de comptage mesuré au niveau ventriculaire. L'analyse fine des variations de la radioactivité par rapport au temps permet l'étude de la fonction diastolique du ventricule gauche. [13]

La ventriculographie isotopique à l'équilibre est réalisable au repos et à l'effort.

2. Indications

La ventriculographie isotopique peut être utilisée :

- Chez les patients sous chimiothérapie pour la détection des signes pré cliniques de la cardiotoxicité.
- Dans le cas des valvulopathies, pour estimer la fraction d'éjection,
- Dans la maladie coronaire pour l'évaluation et le suivi du traitement de l'infarctus du myocarde et de l'anévrysme ventriculaire gauche.
- Détermination de la fonction ventriculaire et suivi des patients atteints de cardiomyopathie ou myocardite.
- Dans les autres cas (insuffisance cardiaque, cardiomyopathies) pour le diagnostic et le suivi des patients.

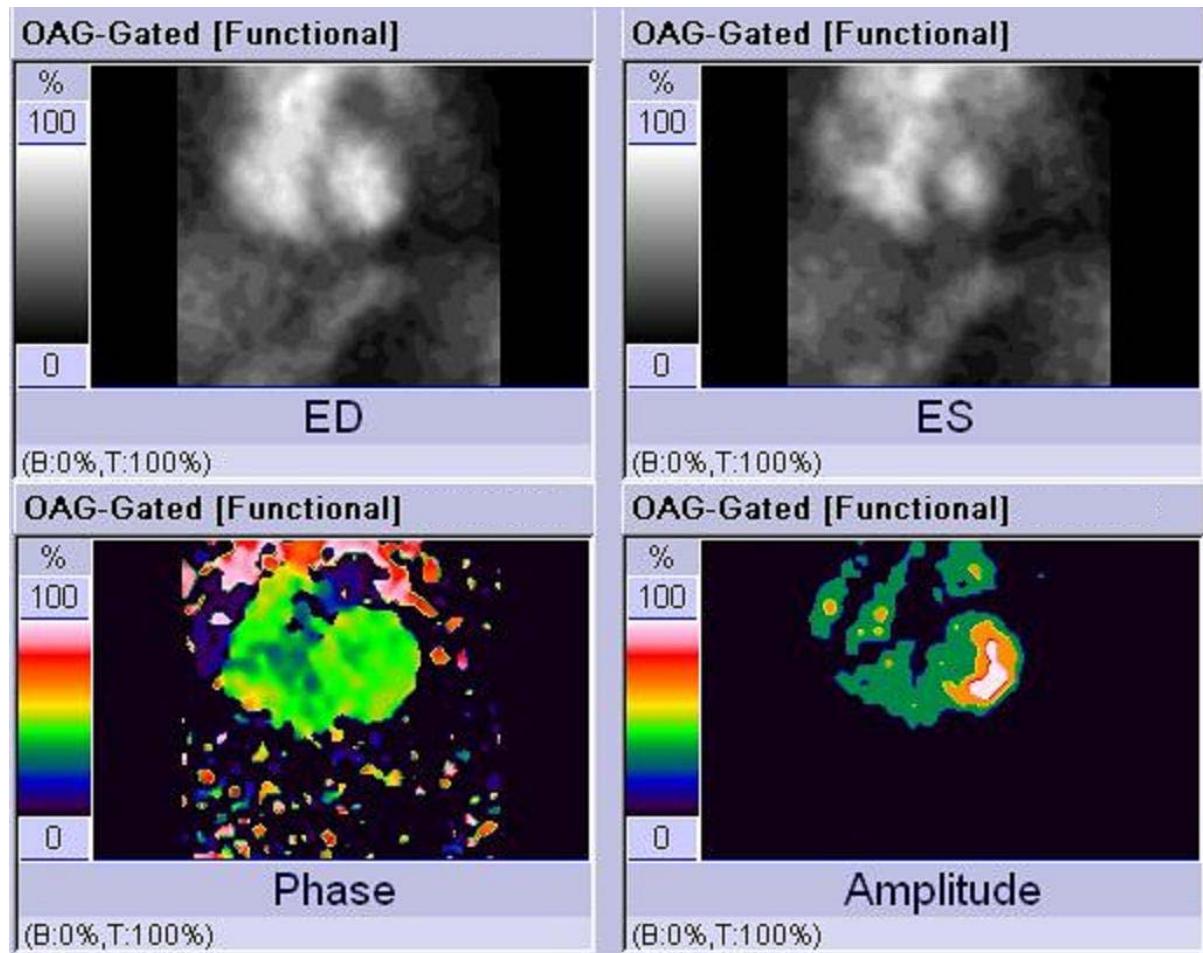


Figure 6 : Images paramétriques de Fourier. Les images de phase et d'amplitude permettent d'étudier la contractilité ventriculaire.

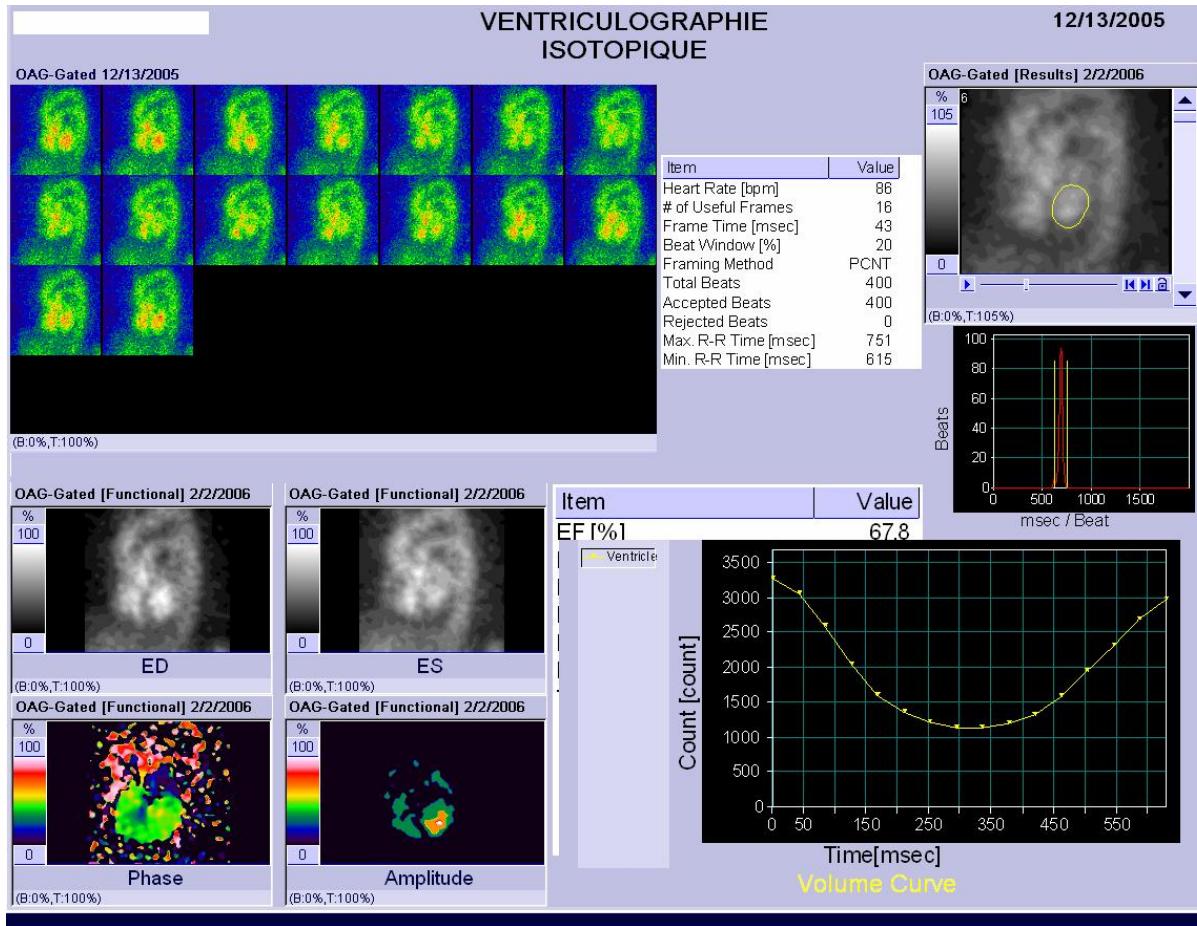


Figure 7 : Patient âgé de 69 ans, suivi pour cancer du cavum sous chimiothérapie. Ventriculographie réalisée à l'équilibre (OAG) après marquage *in vivo* des globules rouges par du ^{99m}Tc (24 mCi). FEVG normale évaluée à 67 %. En haut à droite, sélection de la zone à étudier. En bas à droite, courbe d'évolution activité-temps au niveau de la région sélectionnée. En haut à gauche visualisation en mode «frame» obtenu par la sommation de plusieurs cycles cardiaques divisés en 16 intervalles. En bas à gauche, images paramétriques de phase et d'amplitude permettant d'étudier la contractilité ventriculaire.

- Diagnostique de la dysplasie arythmogène du ventricule droit et diagnostic différentiel entre celui-ci et l'infarctus myocardique du ventricule droit.

B. SCINTIGRAPHIE MYOCARDIQUE DE PERFUSION

Le principe de l'examen consiste à administrer une molécule radioactive à tropisme cardiaque par voie intraveineuse au décours d'un test de stimulation afin d'apprécier le reflet de la perfusion du myocarde en situation de stress puis éventuellement au repos.

1. Choix de la technique de stress

a. L'épreuve d'effort :

La scintigraphie myocardique est couplée à une épreuve d'effort pour deux raisons : L'effort entraîne une augmentation des besoins en oxygène et permet de démasquer une ischémie latente d'où sensibilisation de l'examen. L'ECG d'effort apporte des éléments diagnostiques et permet d'évaluer les performances physiques du sujet.

L'Epreuve d'Effort (E.E) est réalisée sur tapis roulant ou sur un cycloergomètre en présence d'un cardiologue et elle est menée comme une E.E classique avec toutes les précautions nécessaires : Présence des moyens de réanimation (Défibrillateur, O2, matériel d'intubation...)

En dehors des critères habituels d'arrêt, l'effort est poursuivi jusqu'à la fréquence maximale théorique (FMT) ou l'épuisement. Le radiotraceur est alors

injecté à son acmé, et il est conseillé de continuer par un petit effort pendant quelques minutes [14].

b. Stress pharmacologique

Deux techniques sont possibles : La vasodilatation directe par dipyridamole ou adénosine, et la vasodilatation secondaire par l'augmentation des besoins en oxygène (Dobutamine).

- Le dipyridamole :

C'est un vasodilatateur puissant. L'épreuve peut être associée à une épreuve d'effort classique. La dose injectée est de 0.56 à 0.85 mg/kg pendant 5 minutes. Sa demi-vie est de 30 min. Le débit coronaire est multiplié par un facteur 4 ± 1.3 sous Dipyridamole. Le radiotraceur est injecté 4 à 5 minutes après l'injection du vasodilatateur.

En plus des contre-indications de l'épreuve d'effort, le dipyridamole et l'adénosine sont proscris en cas d'asthme (Tableau II). Les bases xanthiques sont des antagonistes du dipyridamole.

- L'adénosine :

Sa demi-vie plasmatique très courte (d'environ 2 secondes) nécessite son administration en perfusion continue à la dose de 140 µg/Kg/min pendant 6 minutes. A cette dose, on estime que le débit coronaire augmente d'un facteur 4.3 ± 1.6 en moyenne, la FC augmente de 10 à 14 battements/s et la pression artérielle diminue de 10 à 14 mmHg. Le radiotraceur est injecté 3 minutes après le début de la perfusion.

Contre-indications au test d'effort
Absolues : Infarctus myocardique récent (<4 jours) ; Angor instable à haut risque ; Troubles du rythme malins non contrôlés ; Insuffisance cardiaque non contrôlée ; Sténose aortique sévère symptomatique ; Péricardite ou myocardite aiguës ; Dissection aortique ; Embolie pulmonaire récente.
Relatives : Sténose du tronc commun connue ; Hypertension artérielle sévère (TAS >200 mm Hg ou TAD >110 mm Hg) ; Sténose valvulaire modérée ; Cardiomyopathie hypertrophique obstructive ; Troubles électrolytiques ; BAV de haut degré.
Contre-indications au dipyridamole
Hypotension artérielle systémique (TAS <90 mm Hg) ; Asthme traité ; Allergie connue au dipyridamole ; Hypertension pulmonaire sévère ; Bradycardie (<40/min) ; Bloc atrio-ventriculaire de haut degré (2e et 3e degrés) ; Allergie connue au dipyridamole ou à la théophylline.
Contre-indications à l'adénosine
Hypotension artérielle systémique (TAS <90 mm Hg) ; Asthme traité ; Allergie connue à l'adénosine
Contre-indications à la dobutamine
Cardiomyopathie obstructive sévère ; Allergie connue à la dobutamine

Tableau II : Principales contre-indications aux tests de provocation d'ischémie (adapté de [110]).

- Le test à la Dobutamine :

La Dobutamine est un sympathomimétique qui augmente les besoins en oxygène puisqu'il augmente la contractilité et la fréquence cardiaque. Sa demi-vie plasmatique est de 2 min. Une perfusion de 10-20-30-40 µg/ kg/ min est pratiquée par paliers de 3 minutes. Le radiotraceur est injecté lorsque la FC a atteint 85% de la FMT ou à la dose de 40 µg/kg/min et l'épreuve se poursuit pendant une minute à la fréquence maximale atteinte.

Certaines études ont montré que l'adjonction d'un effort léger à la scintigraphie myocardique au dipyridamole permettrait d'améliorer le rapport signal/bruit et d'avoir une image de bonne qualité [15].

2. Choix du radiopharmaceutique

a. Thallium 201 :

C'est un radio élément émetteur gamma de 80 Kev, d'une demi-vie de 73 heures. Le 201Tl est un cation analogue au K+, qui rentre dans la cellule par l'intermédiaire de la pompe NA+/K+/ATPase. Les cellules vivantes ayant un K+ intracellulaire élevé, donc la répartition du thallium traduit la viabilité cellulaire.

Sa fraction d'extraction myocardique est importante d'environ 87 % à l'état basal [16], et sa répartition proportionnelle au débit coronaire.

La redistribution du 201Tl, grâce à son mouvement permanent entre milieux intra- et extra-cellulaires, totale entre la deuxième et la quatrième heure, nous permet de réaliser l'examen à l'effort et au repos avec la même injection. .

Par conséquent, le thallium 201 est un bon traceur du débit et de la viabilité myocardique. On dit que c'est un traceur mixte de la perfusion et du métabolisme.

b. Produits technétiés

Les propriétés physiques du ^{99m}Tc sont plus avantageuses que celles du ^{201}Tl car le ^{99m}Tc a une demi-vie d'environ 6 heures diminuant la dose délivrée au patient avec des activités injectées allant de 10 à 20 mci contre 2 à 3 mci pour le thallium, en plus son énergie de 140 kev est adaptée aux caméras à scintillation (tableau 2)

En pratique 2 produits technétiés sont disponibles. Le ^{99m}Tc sestamibi (Cardiolite®) est un cation lipophile qui pénètre dans la cellule par diffusion passive et se concentre au niveau des mitochondries. Sa fraction d'extraction myocardique est d'environ 65,5% [12]. Et la tetrofosmine marquée au ^{99m}Tc (Myoview®) est un complexe cationique également lipophile qui pénètre dans la cellule par diffusion passive. Sa captation myocardique est rapide. Et sa fraction d'extraction myocardique est d'environ 54 % mais il a une plus forte fixation myocardique que le ^{99m}Tc MIBI.

Le ^{99m}Tc MIBI et la tetrofosmine sont des traceurs du débit coronaire. L'absence de redistribution de ces 2 produits, impose la réalisation de 2 injections différentes pour l'étude à l'effort et au repos.

TRACEURS	Demi-vie	Energie	Qualité d'image	Dosimétrie	Redistribution = viabilité
THALLIUM 201	73 h	80 KeV : Faible	Bonne	Importante (35 mSv)	Oui
MIBI ^{99m} Tc Tetrofosmine ^{99m} Tc	6 h	140 KeV: adéquate	Très bonne	Faible (9 mSv)	Non

Tableau III : Caractéristiques des principaux traceurs de perfusion myocardique

3. Réalisation pratique de l'examen

La seule contre indication à la réalisation de la scintigraphie myocardique est la grossesse, d'où l'intérêt de faire l'examen en première partie du cycle chez les femmes en âge de procréer. L'allaitement devra être interrompu au décours de l'examen (pendant 24h pour les radiotraceurs technétiens et définitivement pour le thallium-201) [17].

En pratique, certaines recommandations au patient permettent un déroulement optimal de l'examen :

- Un jeun depuis la veille au soir est souhaitable lors des acquisitions faites au repos par le thallium ou aucun test d'effort n'est pratiqué. Il est, par contre, déconseillé d'être à jeun quand une épreuve d'effort va être réalisée. Dans ce cas le patient ne devra prendre qu'un léger petit déjeuner le matin, afin d'éviter la surélévation du diaphragme gauche par l'estomac.
- Pour les tests au dipyridamole et à l'adénosine les patients ne doivent prendre ni thé, café, chocolat, banane ou cola au moins 12 heures avant le test. De même, les médications contenant des bases xanthiques doivent être arrêtées depuis au moins 4 jours.
- Pour les études réalisées à titre diagnostique, et en dehors de toute contre-indication, il est souhaitable de supprimer les dérivés nitrés et inhibiteurs calciques (= 24 h) et surtout les B-bloquants(= 48 h) . Par contre, sauf indication particulière, aucun arrêt de médication n'est nécessaire pour les examens effectués chez des patients coronariens connus.

- Le patient sera informé qu'il aura à mener l'épreuve d'effort au maximum de ses possibilités, et à rester strictement immobile lors des acquisitions.

4. Acquisition des images [13] :

La méthode utilisée pour l'étude de la perfusion et de la viabilité myocardique est le mode tomographique (SPECT). Le SPECT donne une vue du myocarde en 3D et permet, après la reconstruction, une amélioration du contraste des lésions et une suppression des superpositions des cavités ventriculaires. En outre, elle permet, à l'aide d'un ordinateur, de reconstruire des coupes selon n'importe quel axe, en particulier selon les 3 axes du cœur : petit axe (coronal), grand axe (sagittal) et 4 cavités (transversal). A partir de ces coupes, l'interprétation des images peut se faire de façon visuelle et également par l'utilisation de méthodes de quantification de la fixation.

La position adoptée habituellement est le décubitus dorsal avec le bras gauche au-dessus de la tête, et moins fréquemment le décubitus ventral (figure 8). Les images de la répartition du traceur sont obtenues à l'aide d'une gamma caméra à une ou deux têtes munie d'un collimateur basse énergie haute résolution.

Une rotation de la caméra sur 180° est généralement adoptée (de l'oblique antérieur droit -45° à l'oblique postérieur gauche 135°). Une orbite circulaire et centrée sur le cœur est recommandée[18]. Dans ces conditions, le détecteur est

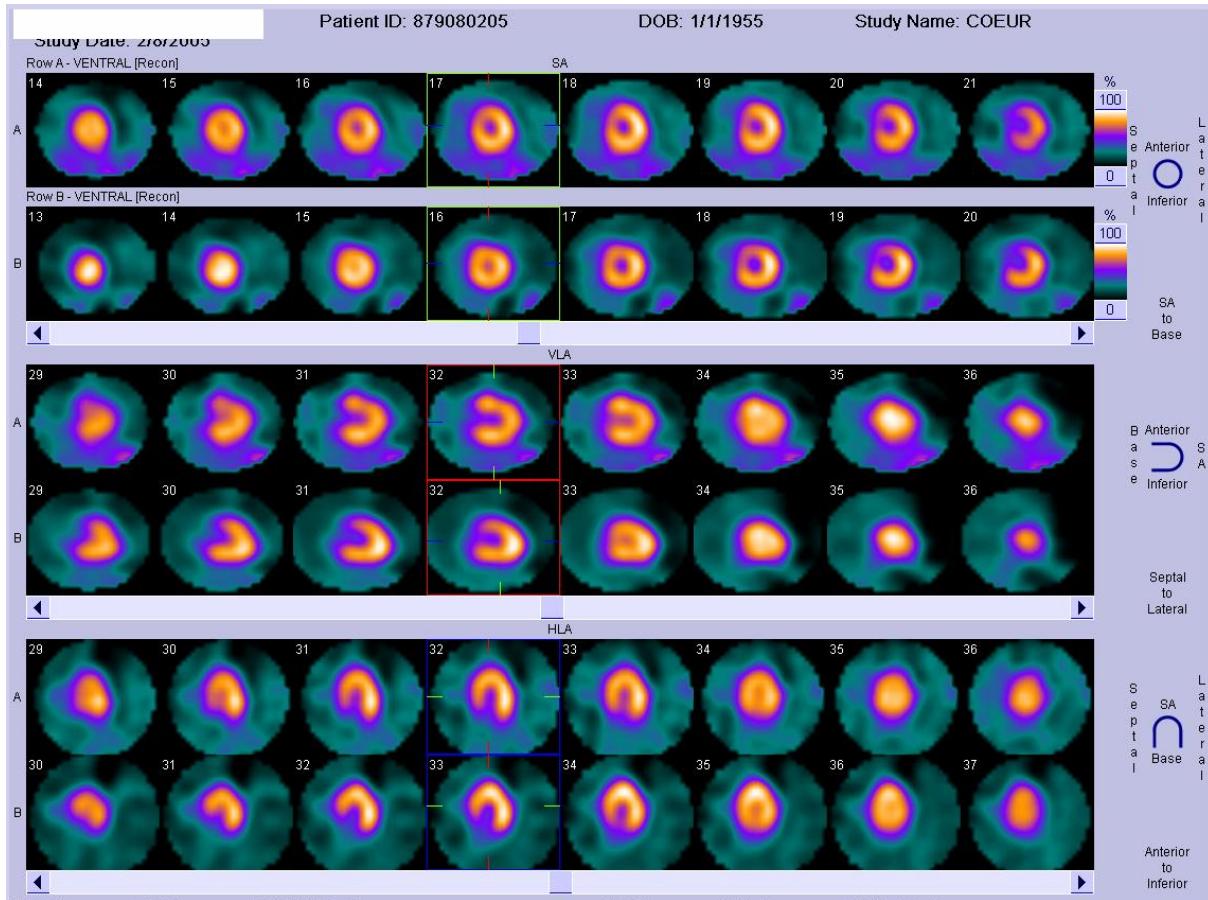


Figure 8 : Patient âgée de 50 ans, qui présente des précordialgies atypiques depuis 2 ans avec un examen cardiovasculaire normal. Tomoscintigraphie réalisée, par l'injection de 2.2 mCi de thallium 201, après épreuve d'effort maximale négative. L'acquisition a été faite en décubitus ventral. Absence d'anomalie scintigraphique significative

placé le plus près du cœur pendant le déplacement et par conséquent il y a moins d'atténuation et de diffusion du traceur.

La matrice d'acquisition est de 64 x 64 pixels, la taille du pixel de l'ordre de 5 à 7 mm donne une résolution suffisante pour l'interprétation des images. [17]

L'enregistrement se fait pas à pas ou en continu, le détecteur effectue des acquisitions statiques à différents angles présélectionnés. L'acquisition sur 180° est répartie en 32 images de 25 à 40 secondes chacune.

Dans l'acquisition synchronisée à l'ECG (gating), à chacun des 32 pas d'acquisition, 8 ou 16 images seront prises par cycle cardiaque et environ 60 cycles sommés sont nécessaires pour former une image interprétable.

L'utilisation du thallium permet de réaliser l'examen avec ses deux acquisitions (effort et repos) en une seule journée. Les scintigraphies au sestamibi ou à la tetrofosmine sont réalisables soit en 2 jours, soit le même jour à condition de réinjecter une activité suffisante, souvent le double de la première. [14]

5. Protocoles d'examen

Ils diffèrent selon le radiotraceur utilisé et l'indication de l'examen. En règle générale, on débute par une acquisition de stress qui étant normale dispense de faire l'acquisition au repos.

Pour le MIBI et la tetrofosmine, le patient doit prendre une collation riche en lipides, dans les 30 min entre l'injection et l'acquisition, afin d'éviter la concentration du traceur au niveau des voies biliaires. Il est aussi conseillé de prendre 100 à 300 ml d'eau froide pour diminuer l'activité sous-diaphragmatique. L'étude au stress et au repos peut se faire le même jour en espacant les 2 injections de 4 heures, mais l'idéal est de les réaliser en 2 jours pour éviter une éventuelle activité résiduelle.

Pour les protocoles réalisés au thallium, le patient doit éviter les repas copieux entre les 2 séries d'images, au risque de nuire à la qualité de la deuxième série. Le protocole classique comprend une acquisition de ré injection (1 mci) si les images de redistribution ne montrent pas de réversibilité. Le protocole simplifié utilisé en Europe, comporte une acquisition au stress et de ré injection au repos.

6. Interprétation et présentation des résultats

L'étude de la perfusion myocardique nécessite une comparaison entre les coupes tomographiques de l'effort et celles du repos. Les anomalies de perfusion sont caractérisées par leur localisation sur la paroi ventriculaire, leur sévérité, et l'éventuelle amélioration entre les images de stress et de repos (réversibilité). Pour les anomalies irréversibles on cherche la présence d'un niveau de fixation témoignant d'une viabilité résiduelle (ce seuil est d'environ 50 %) [15]

Cette analyse se fait selon les trois axes prédéfinis. Le myocarde est souvent divisé en 9 segments [12], répartis à raison de 2 segments pour chacune

des 4 parois (antérieure, postérieure, latérale, septale), et un segment représentant l'apex (Figure 9). D'autres modèles à 13, 16, 17 ou 20 segments peuvent être utilisés, mais il est préférable (selon les recommandations de l'american college of cardiology et de l'american heart association) d'utiliser le modèle à 17 segments afin d'uniformiser les modalités d'interprétation des différentes techniques d'imagerie cardiaque (échocardiographie, IRM) [17].

Schématiquement, une scintigraphie myocardique normale à l'effort témoigne d'une perfusion normale. Un défaut de fixation du traceur à l'effort disparaissant après ré injection au repos dans un territoire donné évoque une ischémie myocardique réversible. Et un défaut de fixation du traceur à l'effort persistant après ré injection au repos indique la présence d'une nécrose myocardique, une hibernation myocardique ou un artefact.

La viabilité myocardique est étudiée avec la tomographie au Thallium après redistribution tardive du traceur.

Le compte-rendu comporte, en plus de la description des anomalies, un rappel des facteurs de risque, les performances à l'exercice et les résultats de l'ECG. Ce qui permet de juger de la sévérité des lésions, du pronostic, et de l'attitude thérapeutique.

7. Artefacts

Il faut chercher les artefacts sur les images brutes, leur dépistage est impératif pour éliminer les faux positifs et les faux négatifs.

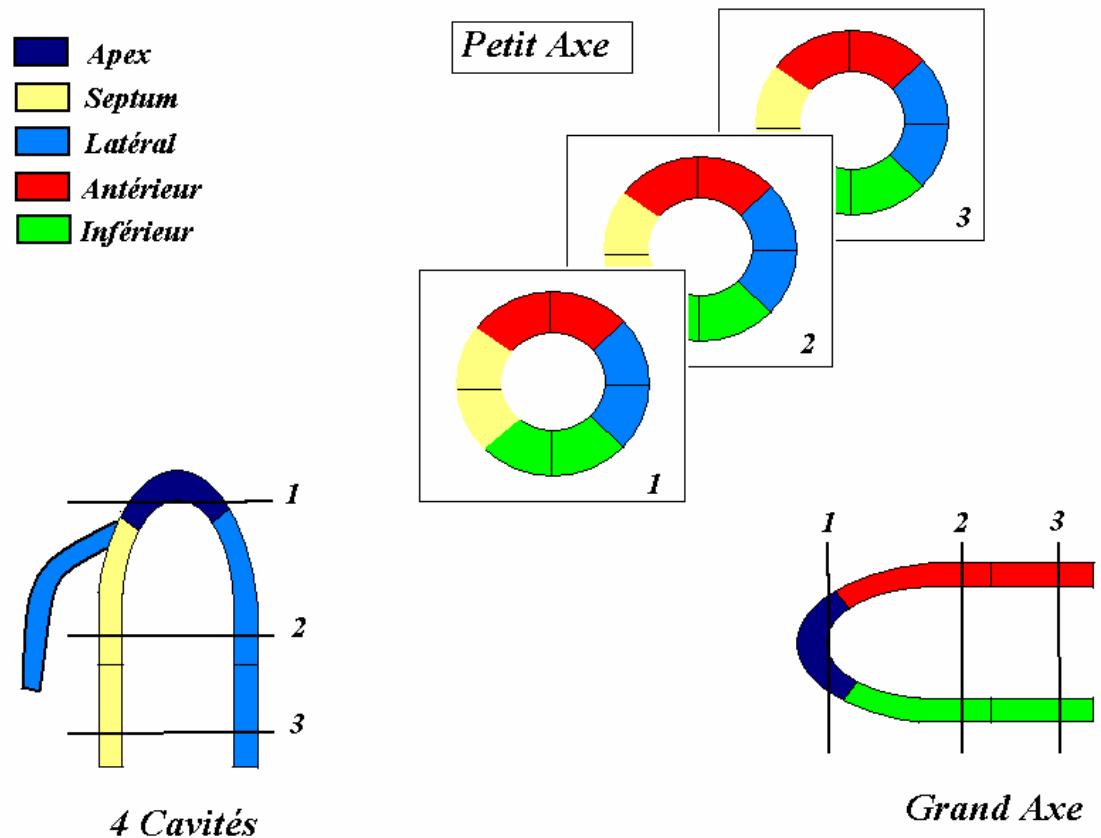


Figure 9 : illustration de la segmentation des parois myocardiques (adapté de [5])

Les artefacts le plus souvent rencontrés sont en rapport avec :

- Le mauvais réglage de l'appareillage : homogénéité, centre de rotation, réglage identique des 2 têtes
- Le déplacement du cœur vers le haut qui engendre une hypoactivité inférieure et septale
- Le mouvement du patient pendant l'acquisition
- Les artefacts d'atténuation de la paroi antéro-latérale chez la femme, de la paroi latérale chez l'obèse, et de la paroi inférieure par la superposition avec le diaphragme et le foie.
- Le bloc de branche gauche complet qui entraîne des hypofixations antérieure et septale. L'utilisation du dipyridamole permet d'en réduire l'importance. De même, en cas de rythme électro-entraîné permanent (pace maker) ou en présence de pré excitation paraseptale droite (syndrome de Wolf Parkinson White), les vasodilatateurs sont préférables à l'épreuve d'effort standard.
- Les faux négatifs sont dus à une épreuve d'effort sous-maximale ou aux lésions tritronculaires équilibrées, du fait de la réduction du flux sanguin dans tous les territoires vasculaires. [11]

8. Valeur diagnostique

L'interprétation d'une épreuve d'effort par scintigraphie myocardique doit porter à la fois sur l'aspect électrocardiographique observé pendant l'épreuve d'effort et les images scintigraphiques.

Le recours à la scintigraphie permet d'améliorer la sensibilité de l'épreuve d'effort (elle passe de 70 % à 90 %) [19]. De nombreuses études ont montré que la sensibilité était comparable entre sestamibi et thallium, par contre la spécificité était supérieure avec le sestamibi (93 % contre 80 %) [20].

Enfin, il faut noter que, la valeur prédictive positive et la valeur prédictive négative varient en fonction de la prévalence de la maladie au sein d'une population ou de la suspicion clinique chez un individu.

9. Indications

Dans le diagnostic de l'angor, surtout chez les patients ayant une probabilité intermédiaire de maladie coronarienne et dans l'infarctus myocardique aigu, essentiellement pour la détermination de l'étendue des séquelles.

Evaluation thérapeutique : après angioplastie coronaire ou après pontage aorto-coronaire, et appréciation de l'efficacité d'un traitement médicamenteux.

Appréciation du pronostic : grâce à l'étude de la viabilité myocardique après infarctus du myocarde par le thallium ou par tomographie synchronisée à l'ECG.

Les autres indications sont les cardiomyopathies ou les myocardites. En plus du diagnostic précoce de l'atteinte myocardique dans les maladies de système (Sclérodermies, sarcoïdose...)

C. TOMOGRAPHIE D'EMISSION MONOPHOTONIQUE SYNCHRONISEE A L'ECG (GATED SPECT)

Elle permet de réaliser une étude conjointe de la perfusion myocardique et de la fonction ventriculaire gauche, grâce à l'analyse de plusieurs paramètres tels que les volumes ventriculaires, la fraction d'éjection ventriculaire, l'épaississement et la cinétique pariétale. Elle procure ainsi un gain de temps considérable lors de l'évaluation et de la prise en charge du patient coronarien.

1. Technique

Plusieurs techniques ont permis d'exploiter les données 3D de la TEMP pour extraire l'information concernant la fonction du ventricule gauche (VG). La surface endocardique du VG et des plans valvulaires est estimée par la sommation des volumes des voxels en relation avec ces structures. La délimitation des surfaces endocardiques est réalisée par des méthodes basées sur le "seuillage" et des méthodes basées sur les gradients. La cinétique pariétale régionale du VG correspond à la distance parcourue par un point donné de l'endocarde entre la télediastole et la télésystole.

L'épaisseur du myocarde étant inférieure à la résolution spatiale, et à cause de l'effet de volume partiel, le signal obtenu est étendu sur une surface plus grande et la concentration radioactive apparaît faible. L'épaississement régional de la paroi est estimé par l'augmentation apparente des taux de comptage au niveau des parois entre la télediastole et la télésystole. La FEVG

est estimée par le rapport entre la différence des volumes télediastolique et télésystolique, sur le volume télediastolique

Le défaut de la plupart de ces méthodes est le caractère manuel de la détermination des limites des structures myocardiques et de ce fait sa dépendance de l'opérateur. Germano et coll.[21] du centre de cedars sinai, ont développé un algorithme totalement automatique (quantitative gated SPECT) pour la mesure quantitative de la fonction du VG et la visualisation de la cinétique segmentaire et l'épaississement de la paroi myocardique. Cet algorithme est basé sur l'intelligence artificielle combinée à la méthode de Gauss pour les profils de comptage normaux. L'évaluation de cette technique (QGS) pour le calcul de la FEVG a montré une bonne corrélation avec d'autres méthodes [22].

2. Choix du radiotraceur

En prenant en considération les statistiques de comptage plus élevés du ^{99m}Tc comparé au thallium, et sa distribution myocardique stable avec le temps, celui ci est utilisé pour l'étude fonctionnelle avec le gated SPECT, spécialement si une camera multitétes n'est pas disponible. Cependant, plusieurs études ont démontré une bonne corrélation entre la FEVG calculée par le gated SPECT au thallium et au ^{99m}Tc sestamibi [23]. Mais, la qualité des images avec le ^{99m}Tc est supérieure à celles obtenues au thallium, avec une variation inter observateurs pour la cinétique et l'épaississement de la paroi qui est moindre pour les produits technétiens [24]

3. Validation du gated SPECT par d'autres méthodes

Plusieurs études ont comparé l'information sur la fonction VG fournie par le gated SPECT et d'autres méthodes d'imagerie bien connues (IRM, angiographie de contraste, échocardiographie, ventriculographie synchronisée à l'ECG et étude au premier passage). Ces études ont rapporté une bonne voire une excellente corrélation entre ces méthodes et le gated SPECT (Tableau 3). Bavelaar-croon et coll. [25] ont trouvé un coefficient de corrélation de 0.85 pour la mesure de FEVG, par le gated SPECT comparé à l'IRM. Une plus grande moyenne des volumes de télodiastole et télésystole ont été mesurés pour l'IRM comparé au gated SPECT, mais les différences n'étaient pas significatives. Ce résultat est probablement dû à l'inclusion d'une partie du flux extracardiaque par l'IRM.

Atsma et coll. [26] ont trouvé une bonne corrélation (0.84) pour la FEVG entre gated SPECT et angiographie de contraste chez 74 patients. De plus, les auteurs ont trouvé un accord exacte des scores de cinéétique segmentaire sur une échelle de 4 points dans 89 % des segments. Par ailleurs, la plus grande valeur de la FEVG, et du volume télodiastolique trouvés à partir de l'angiographie de contraste comparée au gated SPECT, pourrait aussi être due à l'inclusion du flux extracardiaque par les modèles angiographiques standards

Bacher-stier [27] a trouvé une corrélation de 0.86 pour le calcul de la FEVG entre échocardiographie et le gated SPECT au 201Tl au repos. De plus avec l'usage de l'échocardiographie comme standard de référence, des

Technique	Nombre de patients	Corrélation de la FEVG	Corrélation du VTD	Corrélation du VTS	Corrélation de la cinétique pariétale
Echocardiographie [27]	79 IDM : 25	r = 0.86	-	-	Se : 88 à 100 % Sp : 82 à 98 %
Echocardiographie [28]	109 IDM : 22	r = 0.72	r = 0.87	r = 0.86	-
Angiographie de contraste [26]	74 IDM : 27	r = 0.94	-	-	$\kappa = 0.76$ Taux d'agrément 88.4 %
IRM [25]	21 IDM : 13	r = 0.85	r = 0.94	r = 0.95	-

VTD, volume téldiaastolique ; VTS, volume télésystolique ; FEVG, fraction d'éjection ventriculaire gauche ; κ , coefficient d'agrément ; r, Coefficient de corrélation.

Tableau III : Corrélation du gated SPECT par différents examens d'exploration non-invasifs (adapté de [25])

anomalies de la cinétique segmentaire de la paroi ont été identifiés par le gated SPECT avec une très grande sensibilité (88 à 100 %) et une grande spécificité (82 à 98 %)

Une autre étude [28] a conclu que le gated SPECT au 201Tl ou au 99mTc montre une bonne corrélation avec l'échocardiographie concernant le volume téldiestolique, le volume télésystolique et la FEVG (0.86)

4. Valeur fonctionnelle du VG appréciée par le gated SPECT

L'acquisition de l'image de perfusion myocardique par le gated SPECT au stress avec l'utilisation des produits technétiens débute 30 min au moins après stress, ce qui indique que l'information acquise représente le statut fonctionnel 30 min après stress. Chez les sujets sains la fonction VG 30 min après stress est similaire à la fonction au repos. Cependant, chez les malades coronariens il est possible que le dysfonctionnement du VG et la dilatation transitoire de la cavité qu'il peut entraîner, atteigne 45 min ou plus. Ce phénomène est dû à la sidération myocardique, qui est définie communément, comme une dysfonction contractile post-ischémique concomitante d'une perfusion normale et qui se résout spontanément. Donc, quand l'acquisition avec le gated SPECT est appliquée aux images de perfusion myocardique de stress (obtenues 30 à 45 min après stress) la fonction VG et les volumes VG peuvent ne pas représenter les vraies valeurs au repos. Il est conseillé d'obtenir les images du gated SPECT au repos, d'un autre côté si les 2 acquisitions (repos et stress) sont utilisées, la

différence entre les 2 FEVG peut aider à identifier les patients avec une sidération myocardique.

5. Valeur ajoutée du Gated SPECT

Dans les images de perfusion myocardique qui montrent un défaut de perfusion irréversible, un diagnostic précis n'est pas toujours possible. Ce phénomène peut apparaître chez les patients suspects de maladie coronarienne en l'absence d'IDM dans les antécédents. Chez qui il est souvent difficile de différencier entre un artefact d'atténuation et un défaut de perfusion du à un IDM antérieur. Dans cette situation le gated SPECT a une valeur ajoutée certaine, en montrant une conservation de l'épaississement pariétal, alors qu'une hypoperfusion régionale irréversible due à un IDM, laissera apparaître une absence d'épaississement de la paroi.

Chez les patients avec un IDM connu, et ainsi un défaut de perfusion permanent de la zone infarcie, le gated SPECT peut montrer l'absence de l'épaississement de la paroi, indiquant une éventuelle nécrose ou une hibernation myocardique. Et inversement, le gated SPECT peut montrer un épaississement conservé de la région infarcie, suggérant la viabilité myocardique. Par conséquent, ces patients peuvent être candidats à une revascularisation. [29]

Miles [30] a prouvé que sur 24 de 50 images de perfusion myocardique (48 %), le gated SPECT a permis de modifier le compte rendu final. Ceci étant le résultat et de l'amélioration des artefacts d'atténuation, et par la procuration

d'informations sur la viabilité myocardique. Ceci peut potentiellement permettre des économies de coût, en dispensant de la réalisation de coronographies superflues. L'auteur conseille l'utilisation du gated SPECT chez tous les patients candidats à une scintigraphie myocardique de perfusion.

Croon [29] a trouvé chez 19 (35 %) de 55 patients avec ATCD d'IDM, une conservation de l'épaississement de la paroi dans la zone de l'infarctus, avec des anomalies de perfusion irréversibles sévères, ce qui suggère une viabilité résiduelle. En plus, chez 20 patients sans IDM, la conservation de l'épaississement de la paroi a été trouvée chez 10 (50 %) des patients avec défaut de perfusion fixe sévère, ce qui suggère un artefact d'atténuation.

On en conclut que le gated SPECT à une valeur additionnelle certaine pour l'identification des artefacts d'atténuation et pour l'étude de la viabilité myocardique.

6. Détection de la viabilité myocardique

Plusieurs méthodes permettent de différencier les patients avec une viabilité myocardique des patients sans myocarde viable. Ces méthodes incluent :

- L'imagerie au ^{201}Tl par l'analyse de la perfusion myocardique et l'intégrité de la membrane cellulaire.
- L'échocardiographie à la dobutamine qui estime la réserve contractile myocardique

- La TEP au 18F-FDG pour estimer l'état métabolique du myocarde.

Yamashita et coll. [31] ont trouvé une bonne corrélation entre l'étude du métabolisme glucidique grâce à la TEP au 18F-FDG et l'épaississement régional de la paroi. Alors que d'autres études ont montré la concordance entre le gated SPECT et l'échocardiographie pour l'estimation des mouvements de la paroi.

Ces études indiquent que le gated SPECT à la possibilité de détecter les segments viables et peut ainsi être important pour la stratification des patients candidats à une revascularisation.

Stolfuss [32] a évalué le gated SPECT avec la tetrofosmine 99mTc pour la prédiction du recouvrement fonctionnel prouvé par l'IRM séquentielle chez 19 patients coronariens au stade de dysfonction VG sévère. L'auteur a conclu que l'estimation de l'épaississement myocardique obtenu par le gated SPECT peut améliorer la spécificité du 99mTc tetrofosmine pour la prédiction de la récupération fonctionnelle mais pas la sensibilité dans les zones de moindre flux. En plus l'estimation de la fonction globale, lors de l'acquisition des données synchronisées peut être utile pour améliorer la fiabilité de la TEMP au 99mTc tetrofosmine pour la prédiction de la récupération fonctionnelle après pontage coronarien.

Une autre étude [33] a montré que le gated SPECT avec une faible dose de dobutamine durant l'acquisition a une exactitude significative pour prédire la récupération fonctionnelle à long terme des segments dys ou akinétiques, après une revascularisation, qui était comparable aux résultats obtenus par l'échocardiographie de stress.

Gunning et coll. [34] ont évalué la capacité du gated SPECT à identifier le myocarde hibernant. L’hibernation est définie pour le gated SPECT comme une fixation du ^{99m}Tc tetrofosmine au repos supérieure à 55% de celle obtenue à la perfusion myocardique d’une zone normalement perfusée avec une hypo ou akinésie segmentaire concomitante. Il y a eu un désaccord entre le gated SPECT et l’IRM, principalement pour les segments avec une très faible fixation du traceur. Mais ceci n’est pas un handicap majeur à l’usage du gated SPECT, puisque les segments avec une fixation très réduite ont peu de chances de récupérer fonctionnellement. Les auteurs ont conclu que l’estimation combinée de la viabilité myocardique et de la fonction par le ^{99m}Tc tetrofosmine gated SPECT est faisable (Se 62 %, Sp 45 %) et permet l’établissement du myocarde hibernant avec une fiabilité similaire à la combinaison du SPECT simple et de l’IRM.

La combinaison de ces données peut mener à une stratégie future pour l’analyse de la viabilité résiduelle dans un défaut de perfusion irréversible. Tout d’abord, l’épaississement et la cinétique segmentaire de la paroi myocardique sont analysés sur le gated SPECT avec les produits marqués au ^{99m}Tc , ensuite s’il y a une conservation de l’épaississement pariétal dans un segment avec hypoperfusion irréversible, le patient peut être proposé à une revascularisation. S’il n’y a pas d’épaississement dans la zone hypoperfusée, une évaluation plus poussée est nécessaire pour déterminer si ce défaut est dû à une hibernation ou à une nécrose myocardique, ceci par l’usage de la TEP au ^{18}F -FDG ou l’échocardiographie avec dobutamine.

7. Valeur pronostique du gated SPECT

De nombreuses études ont montré la valeur pronostique de la Scintigraphie myocardique de perfusion, il a aussi été démontré que la FEVG au repos ou à l'exercice, est un déterminant majeur pour la survie à long terme des patients coronariens.

D'autres études ont montré une plus grande valeur pronostique du volume télésystolique VG. White [35] a démontré, chez 605 patients ayant eu une ventriculographie de contraste 1 à 2 mois après l'IDM, que la dilatation ventriculaire (volume télésystolique > 130 mL) prédisait la mortalité mieux qu'une FEVG inférieure à 40 % ou un volume télediastolique augmenté. Dans une étude récente,[36] 1680 patients ont été analysés par le gated SPECT et suivis pendant 569 +/- 106 jours. Les patients avec anomalies de perfusion sévère et un volume télésystolique (VTS) inférieur à 70 ml avaient des taux de mortalité cardiaque très bas (0.4 % par an), alors que les patients avec seulement un défaut de perfusion modéré et un volume télésystolique supérieur à 70 ml avaient une mortalité cardiaque relativement plus élevée (8.2 % annuel). Même les patients avec une fonction globale préservée (FEVG > 45 %) mais un VTS >70 ml avaient un taux de mortalité élevé (2.6 % contre 0.5 %, p= .02). Les patients avec FEVG < 45 % et des anomalies de perfusion modérées à sévères avaient des taux de mortalité élevés, alors que les patients avec FEVG >45% avaient une mortalité annuelle inférieure à 1 % sans tenir compte du degré d'anomalie de perfusion.

Les auteurs ont confirmé que le gated SPECT au ^{99m}Tc après stress chez les malades coronariens connus ou suspects procure une information pronostique supérieure à la perfusion seule.

Au total, le gated SPECT permet d'analyser la perfusion et la fonction du VG durant la même acquisition. La synchronisation procure un avantage à la TEMP au ^{99m}Tc sestamibi ou tetrofosmine, en caractérisant les anomalies de perfusion et en améliorant potentiellement la spécificité de l'examen. Le gated SPECT permet aussi la stratification du risque parce qu'il procure l'information sur la FEVG et le volume télésystolique, qui sont tous deux d'importants paramètres pronostiques et ont une valeur supérieure à la perfusion seule.

Le gated SPECT peut être utilisé pour la stratification des patients candidats à la revascularisation, car il permet l'analyse de l'épaississement résiduel de la paroi dans une région avec un défaut de perfusion fixe, ou une cinétique diminuée dans une région avec un défaut de perfusion modéré indiquant l'hibernation.

D. TOMOGRAPHIE PAR EMISSION DE POSITONS

La TEP permet l'étude de la perfusion, en utilisant des traceurs de perfusion adaptés tels que l'ammoniaque marqué à l'azote 13, le rubidium 82, et l'eau marquée à l'oxygène 15. Elle permet aussi l'étude du métabolisme glucidique du myocarde, qui renseigne sur la viabilité myocardique et par conséquent détermine les patients candidats à une revascularisation. Enfin, il est possible d'étudier la fonction ventriculaire en synchronisant les acquisitions à l'ECG.

1. Principaux radiotraceurs en TEP

Contrairement aux isotopes lourds utilisés en médecine nucléaire conventionnelle, les émetteurs de positons sont beaucoup plus légers et faciles à intégrer dans des molécules organiques. Par exemple, le carbone 11 permet pratiquement toutes les synthèses organiques, avec pour seule limitation la demi-vie très courte.

Le ¹⁸F-FluoroDésoxyGlucose (FDG) est un radioélément produit du cyclotron, émetteur β^+ de 511 kev, et qui a une demi-vie de 110 min. Sa captation et sa rétention cellulaires sont linéairement corrélées à celle du glucose. Le myocarde ischémique consomme plus de glucose que d'acides gras, donc l'accumulation cellulaire du FDG traduit fidèlement l'utilisation globale du glucose. En contre partie, son utilisation nécessite un contrôle strict de la glycémie. Le FDG est le traceur le plus favorable à l'utilisation clinique mais

son coût élevé limite son utilisation aux études de viabilité myocardique post-infarctus

Le ^{13}N -ammoniaque est un produit du cyclotron ayant une demi-vie de 10 min. Il est retenu au niveau des cellules myocardiques sous forme de glutamine. C'est un traceur de perfusion myocardique. L'étude peut se faire au repos puis après stress pharmacologique, en les espacant de 60 à 90 min seulement. Il permet de produire des images de haute qualité, avec un excellent contraste entre l'activité cardiaque et pulmonaire qui l'entoure.

2. Réalisation pratique de l'examen

Elle ne pose, dès lors que l'on dispose d'une caméra convenable et que le ^{18}F -FDG est disponible, aucune difficulté particulière : le déroulement de l'examen est très proche d'une gamma-scintigraphie conventionnelle. Les images sont réalisées 45 à 60 minutes après l'injection du FDG. L'injection doit être strictement intraveineuse, la grande sensibilité de la méthode expliquant l'importance des artefacts en cas d'extravasation du produit.

Les patients doivent être à jeun afin de limiter la fixation myocardique, et doivent être au repos musculaire depuis au moins 30 minutes avant l'injection pour éviter des fixations musculaires qui peuvent être intenses. Cette fixation musculaire s'observe notamment dans la région cervicale, et le repos doit être complet, même la lecture et la conversation étant déconseillés pendant la phase d'attente. Au besoin, une administration de benzodiazépines peut être utile, à la

fois comme anxiolytique et comme myorelaxant. Ce repos doit être maintenu de façon très stricte durant l'heure entre l'injection et la réalisation des images.

Une bonne hydratation est nécessaire pour réduire la concentration urinaire du traceur, ainsi qu'une miction la plus complète possible juste avant l'acquisition des images. Enfin, la qualité des images est altérée chez les diabétiques, du fait des anomalies du métabolisme du glucose.

Le temps d'acquisition des images est relativement long, même avec les appareils dédiés : il faut compter 50 à 70 minutes pour un corps entier selon la taille du patient.

3. Comparaison entre TEP et TEMP

Les principaux avantages de la tomographie d'émission de positons sont l'amélioration de la résolution spatiale (4 à 8mm contre 10 mm pour la TEMP) [12] et de la sensibilité. En plus, elle permet une meilleure correction de l'atténuation et la quantification absolue du traceur est plus disponible.

Les désavantages sont liés à la demi-vie courte des traceurs qui impose la rapidité du marquage et implique d'avoir un cyclotron sur place. Le coût excessif de l'examen et la claustrophobie sont un handicap au TEP.

4. Etude de la viabilité myocardique

La principale indication de la TEP en cardiologie est l'étude de la viabilité myocardique en vue d'une revascularisation, mais actuellement la tomographie

d'émission monophotonique au thallium permet de trancher dans la majorité des cas.

Le protocole utilisé comporte une étude au repos au ^{13}N -amoniaque, suivie d'une acquisition avec le même traceur après un stress pharmacologique. L'activité injectée est de 250 MBq pour chaque étape. Enfin, un examen au repos avec du ^{18}F -FDG (500MBq) est réalisé. Au total, la réalisation de l'examen nécessitera 2 heures. Dans certaines équipes on donne avant l'injection 50g de glucose sous forme de 100ml d'une solution glucosée à 50%.

L'interprétation des résultats est basée sur la définition du myocarde viable, qui se caractérise par une hyper fixation du ^{18}F -FDG associée à une hypoperfusion au ^{13}N -amoniaque. Inversement, les régions infarcies présentent une hypoperfusion avec une hypofixation du ^{18}F -FDG.

Les valeurs prédictives positives et négatives de la TEP se situent autour de 85 % [21]

Une étude ayant comparé la TEP et l'échocardiographie pour la prédiction du recouvrement de la fonction ventriculaire gauche après revascularisation chez 46 patients [38], a montré une meilleure sensibilité mais un faible spécificité pour la TEP.

V. APPOINT CLINIQUE DE LA SCINTIGRAPHIE MYOCARDIQUE DE PERFUSION

A. CARDIOPATHIES ISCHEMIQUES

1. Angine de poitrine

Le diagnostic d'angor est posé à l'interrogatoire, l'examen physique ne contribuant généralement pas au diagnostic. On l'évoque devant une douleur thoracique médiane, rétro sternale constrictive déclenchée par l'effort, disparaissant totalement après l'arrêt, les irradiations sont caractéristiques vers le bras gauche mais aussi la mâchoire. La douleur est de courte durée, souvent moins de 5 minutes, et est sensible à la trinitrine sub-linguale. Il faut rechercher les facteurs de risque cardiovasculaire : hypercholestérolémie, hypertension artérielle, tabagisme, diabète, héritérité coronarienne, obésité, stress, âge, sédentarité.

On distingue : L'angor stable où les crises surviennent dans des conditions stéréotypées, la fréquence et l'intensité des douleurs étant toujours les mêmes. Et l'angor instable qui comprend l'angor de novo (première crise d'angine de poitrine), l'angor de repos, et l'angor aggravé (la douleur survient pour des efforts moins intenses, elle est plus intense, plus prolongée et moins sensible à la trinitrine). Il est considéré comme une menace d'infarctus et nécessite l'hospitalisation du patient en milieu cardiologique spécialisé.

Le bilan para clinique de l'angor, notamment l'ECG et le dosage des enzymes cardiaques, est souvent normal. L'échocardiographie est utile pour

l'élimination de certains diagnostics différentiels comme la péricardite aiguë, la myocardite ou la dissection aortique.

L'ECG d'effort réalisé en période de stabilité, n'est pas utile au diagnostic lorsque le tableau clinique est typique, mais il peut apporter des éléments pronostiques qui permettent de classer les patients en 3 catégories [39] :

- Les patients considérés comme à bas risque (mortalité annuelle inférieure à 1 %) relevant du traitement médical seul.
- Les patients considérés comme à haut risque (mortalité supérieure à 3 %) doivent rapidement bénéficier d'une coronarographie afin d'évaluer les possibilités de revascularisation.
- Les patients considérés comme à risque intermédiaire (mortalité entre 1 % et 3 %) pourraient être évalués par la scintigraphie de perfusion ou l'échocardiographie de stress.

a. Valeur diagnostique de la scintigraphie myocardique

Contrairement à la coronarographie qui procure des informations sur l'état anatomique des coronaires, la scintigraphie myocardique de perfusion objective l'état physiologique du tissu myocardique qui fait intervenir, en plus de la sténose, les collatérales et les résistances artériolaires. Plusieurs méta-analyses ayant comparé la coronarographie, considérée comme technique diagnostique de référence, et la tomoscintigraphie myocardique au thallium lui ont attribué une sensibilité de 85 à 90 % et une spécificité de 70 à 90 %. [40] Une autre étude par scintigraphie planaire chez 3258 patients, avait trouvé une sensibilité de 84 % et

une spécificité de 87 % , alors qu'à la tomoscintigraphie (361 patients) elles passent respectivement à 96 % et 83 %. [41] (figure 10)

L'usage du dipyridamole ou de l'adénosine comme alternative à l'exercice, retrouve des résultats proches. Dans une étude réalisée chez 157 patients au CHU Ibn Sina de Rabat, la comparaison de la sensibilité et de la spécificité de la scintigraphie myocardique planaire au thallium couplée à l'épreuve d'effort ou au test au dipyridamole, retrouve une sensibilité comparable (94 %). Par contre, la spécificité pour le dipyridamole (86 %) est plus importante que pour l'épreuve d'effort (71 %).[42] Une méta-analyse de 1175 patients a trouvé une sensibilité de 87 % et une spécificité de 74 % pour le diagnostic de la maladie coronaire [43].

b. Apport diagnostic dans l'angor stable

Il est établi que la scintigraphie myocardique est supérieure à l'épreuve d'effort seule en matière de diagnostic positif de la maladie coronaire. Cette supériorité peut être expliquée par la cascade des évènements physiologiques lors de l'ischémie, qui fait que les troubles perfusionnels sont détectés bien avant les troubles fonctionnels ou les troubles électriques. En pratique dans plusieurs situations, l'épreuve d'effort est ininterprétable ou n'atteint pas le seuil maximal, d'où l'indication de la scintigraphie myocardique de perfusion en cas de :

- ECG d'effort ayant conclu à un risque intermédiaire

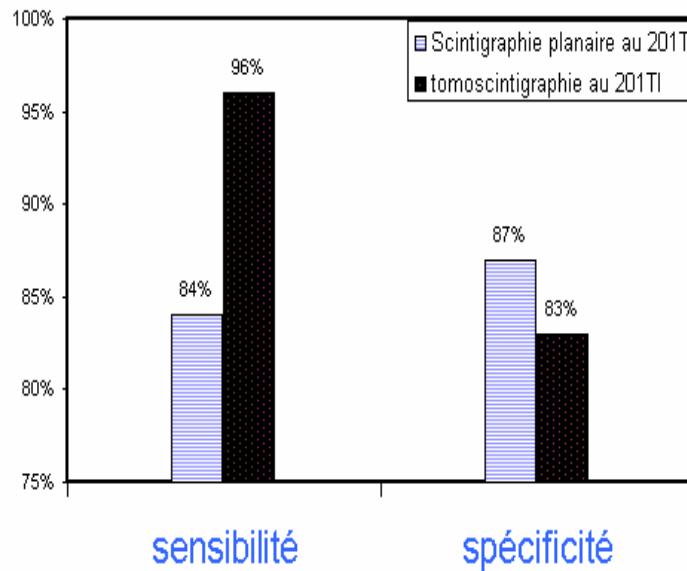


Figure 10 : comparaison de la sensibilité et de la spécificité obtenues par scintigraphie planaire au thallium et tomoscintigraphie au thallium (histogramme adapté de [12])

- Epreuve d'effort impossible ou insuffisante, comme chez les personnes âgées, arthritique et chez la femme.
- ECG ininterprétable, surtout en présence d'un bloc de branche gauche, un pace maker, ou une hypertrophie ventriculaire gauche
- Troubles du rythme lors du traitement par digitaliques ou de l'arythmie complète par fibrillation auriculaire.

La tomoscintigraphie de perfusion , grâce aux logiciels de quantification, permet aussi d'évaluer l'étendue des lésions. En effet, il existe une bonne corrélation entre le degré de sténose de l'artère coronaire et la sévérité de l'hypofixation chez les patients mono tronculaires. [44] D'autres signes indirects sont évocateurs de lésions étendues tels qu'une fixation pulmonaire élevée, une dilatation ventriculaire transitoire à l'effort (ischémie sous endocardique étendue), ou un haut niveau d'activité sur la paroi libre du ventricule droit reflétant une hypertension artérielle pulmonaire.

Le gated SPECT permet, en plus de l'étude de la perfusion, d'analyser la contractilité régionale et la FEVG.

c. Apport diagnostic chez les populations particulières

Chez les patients asymptomatiques. Même si la scintigraphie myocardique est très sensible et très spécifique, il est inconcevable de l'utiliser comme test de dépistage dans une population à faible prévalence car il entraînerait beaucoup de faux positifs (Théorème de Bayes). Dans une étude faite chez 845 sujets jeunes asymptomatiques avec électrocardiogramme d'effort douteux , on retrouve une

sensibilité de 45 % et une spécificité de 78 % de la scintigraphie myocardique par rapport à la coronarographie. La scintigraphie myocardique ne semble donc pas être une méthode de dépistage satisfaisante de la maladie coronaire des sujets asymptomatiques jeunes [45].

Chez les diabétiques, une étude récente montre que les performances de la scintigraphie sont identiques chez les diabétiques et les non diabétiques, hormis le cas de la détection des lésions proximales de l'interventriculaire antérieure (moindre sensibilité et meilleure spécificité). Ils retrouvent également des performances identiques pour l'épreuve d'effort et le dipyridamole [46]. Ces données nous confirment que les performances de la scintigraphie myocardique restent bonnes chez le diabétique, permettant son utilisation pour le diagnostic d'une éventuelle maladie coronaire.[47]

En cas de bloc de branche gauche complet une hypofixation antéroseptale est observée sur les scintigraphies d'effort sans qu'aucune atteinte coronaire n'y soit associée. L'utilisation de tests pharmacologiques (dipyridamole ou adénosine) [48, 49] semble plus adaptée pour le diagnostic de maladie coronarienne chez ces patients. Par contre, en cas de bloc de branche droit, ou de bloc incomplet de la branche gauche, aucune modification de la stratégie diagnostique n'est à prévoir.

Chez les candidats à une Chirurgie vasculaire périphérique la fréquence de l'atteinte coronaire varie entre 15 à 54 %. Dans une étude [50] réalisée entre 1991 et 2000, chez 275 patients ayant bénéficié d'une tomoscintigraphie myocardique au thallium-dipyridamole avant chirurgie artérielle périphérique, il

a été démontré que la valeur prédictive négative de la tomoscintigraphie est de 97 %. L'étude d'Ashton [51] chez 1487 hommes et de Wong [52] englobant 1442 patients, confirment que la tomoscintigraphie n'a d'intérêt que chez les patients de risque pré test intermédiaire.

d. Valeur pronostique dans l'angor stable

Un grand nombre d'études prospectives est disponible montrant la bonne valeur pronostique d'une scintigraphie myocardique au thallium. En effet, ces analyses ont trouvé un faible risque de survenue d'événements cardiaques (IDM, mort subite) chez les patients ayant une scintigraphie myocardique normale.

Une revue de littérature, regroupant 16 études, publiée par Brown [53] a montré que chez 3594 patients coronariens connus ou suspects, ayant eu une scintigraphie myocardique planaire normale au thallium et suivis pendant 29 mois, le taux annuel d'accidents coronariens trouvé est de 0.9 %, taux proche de celui de la population générale aux USA.[54]

Une étude française [55] portant sur 1926 patients ayant eu un tomoscintigraphie myocardique au thallium et revus 33 mois plus tard, a trouvé qu'une scintigraphie normale chez 715 patients est associée à un taux d'accidents cardiaques annuel de 0.5 %. Cette amélioration est due à une meilleure définition des surfaces hypoperfusées par la tomographie.

Hachamovitch [56] dans une étude prospective sur plus de 5000 patients, suivis en moyenne pendant 22 mois, a trouvé que le risque de survenue d'accident cardiaque grave augmentait avec l'apparition d'anomalies

scintigraphiques. Il en conclut que chez les patients considérés à faible risque après la scintigraphie au thallium à l'effort, il est inutile de faire la coronarographie.

L'étude de Hendel [57] a montré que la valeur pronostique des tests au dipyridamole est similaire à l'exercice chez les patients inaptes à l'effort, d'autres études ont prouvé la même chose pour l'adénosine et la dobutamine. [58, 59] Quant aux examens réalisés au ^{99m}Tc on retrouve les mêmes éléments pronostiques, hormis pour la fixation pulmonaire qui est normalement présente jusqu'à la 30ème minute [60]. Une méta-analyse [61] regroupant plus de 12000 patients a montré la bonne valeur pronostique de la tomoscintigraphie myocardique au ^{99m}Tc MIBI et a rapporté un taux d'événements graves annuel de 0.6 % en cas de scintigraphie normale contre un taux 12 fois supérieur en cas de scintigraphie anormale. Une étude multicentrique récente a montré la valeur pronostique d'une TEMP de stress au ^{99m}Tc tetrofosmine normale chez 4728 patients [62]. On en conclut que la TEMP garde une bonne valeur pronostique indépendamment du traceur utilisé.

De même, les études entreprises chez les patients hypertendus suspects de maladie coronaire [63] montrent que la scintigraphie myocardique garde une bonne valeur pronostique, malgré la possibilité de faux positifs liés en particulier à l'hypertrophie myocardique. La valeur prédictive négative à long terme (plus de 10 ans) d'une scintigraphie au thallium normale chez un patient ayant des douleurs thoracique reste forte [64].

e. Evaluation pronostique de la maladie coronaire

Les principaux déterminants pronostiques chez le patient coronarien sont la dysfonction ventriculaire évaluée par la FEVG basse et l'étendue des anomalies de la cinétique pariétale. L'étendue, la sévérité de l'ischémie et l'atteinte pluritronculaire à la coronarographie. Enfin, l'installation d'une arythmie.

La scintigraphie myocardique supplante l'ECG d'effort, grâce à sa capacité d'évaluation de la topographie et de l'extension de l'ischémie, et la possibilité d'étudier la viabilité myocardique (Figure 11). De même, il est possible de recueillir des informations sur la fonction VG par le gated SPECT.

Les 3 principaux aspects scintigraphiques de mauvais pronostic sont :

- *La fixation pulmonaire importante du thallium* après stress, qui reflète la pression élevée au niveau des capillaires pulmonaires au moment de l'injection du traceur. Elle témoigne d'une fonction ventriculaire abaissée au repos, avec dysfonction ventriculaire à l'effort, et elle est associée à une large zone d'ischémie [65]. Dans l'étude de Cox [66] sur 467 patients, dont 81 avaient une fixation pulmonaire importante et suivis pendant 4.8 ans, il a trouvé une augmentation des taux d'événements cardiaques graves chez 5 % des patients sans fixation pulmonaire avec scintigraphie normale, 25 % des patients sans fixation pulmonaire mais avec scintigraphie anormale, et enfin chez 54 % des patients avec fixation pulmonaire importante du thallium. Mais il a conclu que la valeur pronostique du thallium n'est significative qu'après un test d'effort ou un test mixte.

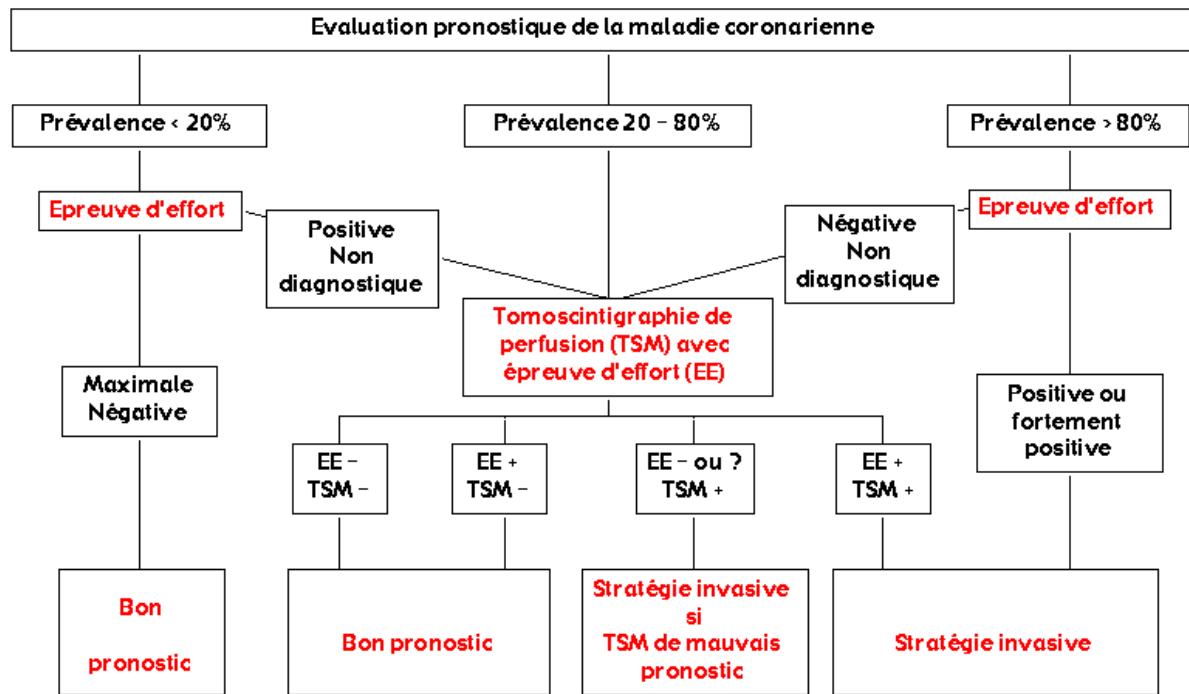


Figure 11 : Stratégie d'évaluation pronostique de la maladie coronaire (adapté selon [125])

■ *La dilatation ventriculaire transitoire* après l'effort reflète l'endommagement de la fonction VG. C'est un marqueur de mauvais pronostic, du à une ischémie sous endocardique étendue qui donne un aspect de dilatation ventriculaire [67]. Une étude effectuée sur 467 patients [68] ayant bénéficié d'une scintigraphie au technétium et au dipyridamole, et dont 28 % présentaient une dilatation transitoire ou permanente du VG, a montré que la survenue d'événement cardiaque grave était de 1.9 % chez les patients sans dilatation contre 25 % des patients avec dilatation du VG.

■ *L'étendue et la sévérité de l'ischémie réversible* permettent la détermination du pronostic chez la majorité des patients sans antécédent d'infarctus du myocarde. Ceci a été démontré par l'étude de Landenhein [69] qui a porté sur 1689 coronariens suspects sans antécédents d'infarctus myocardique, ayant eu une scintigraphie d'effort au thallium-201 et suivis pendant plus d'un an. L'étude prospective d'Iskandrian [70], qui a regroupé 316 coronariens suspects ayant bénéficié d'une tomoscintigraphie d'effort au thallium-201, a montré la supériorité pronostique de la tomoscintigraphie comparée à la clinique, l'ECG d'effort et la coronarographie. Le survie à 4 ans était de 95 % en cas de scintigraphie normale contre 75% en cas d'hypofixation touchant 15 % du myocarde ou plus. Ces études montrent qu'un défaut de perfusion minime est associé à une augmentation non significative du risque cardiaque. Machecourt [55] a établi que le risque d'événement cardiaque grave était proportionnel au nombre de zones hypoperfusées, variant de 0.24 % en cas de scintigraphie normale, 5 % pour 2 zones d'hypofixation et 17 % pour 4 zones d'hypofixation.

Ces études confirment que la taille du defect est l'élément pronostic le plus important, les territoires hypoperfusés seront estimés en pourcentages.

On stratifie le risque comme suit [39] :

- Patient à faible risque (mortalité annuelle inférieure à 1 %) : scintigraphie normale ou avec une atteinte de moins de 15 % du myocarde et absence de fixation pulmonaire du thallium ou de dilatation de la cavité cardiaque.
- Patient à risque intermédiaire : scintigraphie anormale, hypofixation touchant entre 15 et 30 % du myocarde ou 15 % associée à une fixation pulmonaire du traceur ou une dilatation ventriculaire gauche
- Patient à haut risque (mortalité annuelle supérieure à 3 %) : scintigraphie de stress anormale avec hypofixation supérieure à 30 % du myocarde ou hypofixation comprise entre 15 et 30 % associée à une fixation pulmonaire anormale ou une dilatation ventriculaire gauche.

2. L'infarctus du myocarde (IDM)

C'est une urgence cardiologique, son diagnostic est souvent possible grâce à l'anamnèse et l'ECG. Il se présente sous forme d'une douleur angineuse prolongée résistant à la trinitrine. Parfois la douleur est atypique, et peut être accompagnée de signes digestifs : Eructations, nausées, vomissements.

L'interrogatoire recherchera les antécédents d'angor, même si l'infarctus est inaugural dans 50 % des cas. On recherche aussi les facteurs de risque cardiovasculaire et d'éventuels signes cliniques de gravité.

L'ECG confirme le diagnostic en montrant un sus décalage persistant du segment ST ou une onde Q de nécrose, et permet de localiser la topographie de l'infarctus (DII, DIII, aVF : inférieur ; V1V2V3 : antéroseptal ; V1V2V3V4V5V6 : antérieur ; V5, V6, D1 et aVL :latéral). Les examens biologiques (CPK-MB, Troponine I et T), permettent de poser le diagnostic dans les formes trompeuses, et leur élévation a un intérêt pronostic.

La scintigraphie myocardique à l'effort et au repos effectuée au décours d'un syndrome coronaire aigu est indiquée pour le diagnostic (angor instable et infarctus du myocarde sans sus décalage de ST), la détermination de l'étendue de l'infarctus, la détection d'une éventuelle viabilité myocardique dans le territoire de la nécrose qui détermine l'intérêt d'une revascularisation, ou la détection d'autres territoires ischémiques, enfin elle permet la mesure de la FEVG (gated SPECT)

a. Diagnostic de l'infarctus myocardique aigu

Dans certaines situations cliniques le diagnostic d'infarctus myocardique est difficile par les techniques classiques (ECG et enzymes biologiques). Ceci intéresse les patients avec pacemakers ou bloc de branche gauche, les patients qui se présentent tardivement après l'IDM, ou après pontage aortocoronarien.

Il est utile dans ce cas de recourir à des traceurs présentant un tropisme pour le tissu myocardique nécrotique, les deux traceurs utilisés sont le pyrophosphate ^{99m}Tc et les anticorps antimyosine marqués à l'indium 111.

Le pyrophosphate ^{99m}Tc a été développé initialement pour l'exploration scintigraphique osseuse, mais il a été utilisé aussi pour la détection des myocytes nécrosés (figure 12). Son mécanisme repose sur l'identification des dépôts calciques qui se forment au niveau des myocytes infarcis. L'étude ne peut se faire que 48 heures après l'événement aigu afin de permettre le rétablissement du débit sanguin et l'accumulation du calcium au niveau de l'infarctus. En général, l'examen se normalise dans les 8 jours suivant l'infarctus suspecté, d'où la nécessité de faire le test entre 2 et 5 jours après les symptômes. L'acquisition des images se faisait en mode planaire (rarement en mode tomographique) 2 à 6 heures après l'injection. Les images normales montrent une fixation du traceur au niveau des structures osseuses du thorax sans activité en regard de la région myocardique. L'interprétation des images lors de l>IDM est basée sur l'analyse de la localisation et de l'intensité de la fixation au niveau du thorax, qui est graduée sur une échelle de 1 à 4 comparée à la fixation osseuse au niveau du sternum et du rachis [71]. Les difficultés d'interprétation sont rencontrées en cas de superposition des côtes ou du cartilage costale, dans ce cas la TEMP sera pratiquée.

La sensibilité et la spécificité du pyrophosphate ^{99m}Tc lors de l>IDM, varie considérablement dans la littérature. Les faux négatifs surviennent lors d'une acquisition trop précoce ou tardive, aussi lorsque la reperfusion est faible.

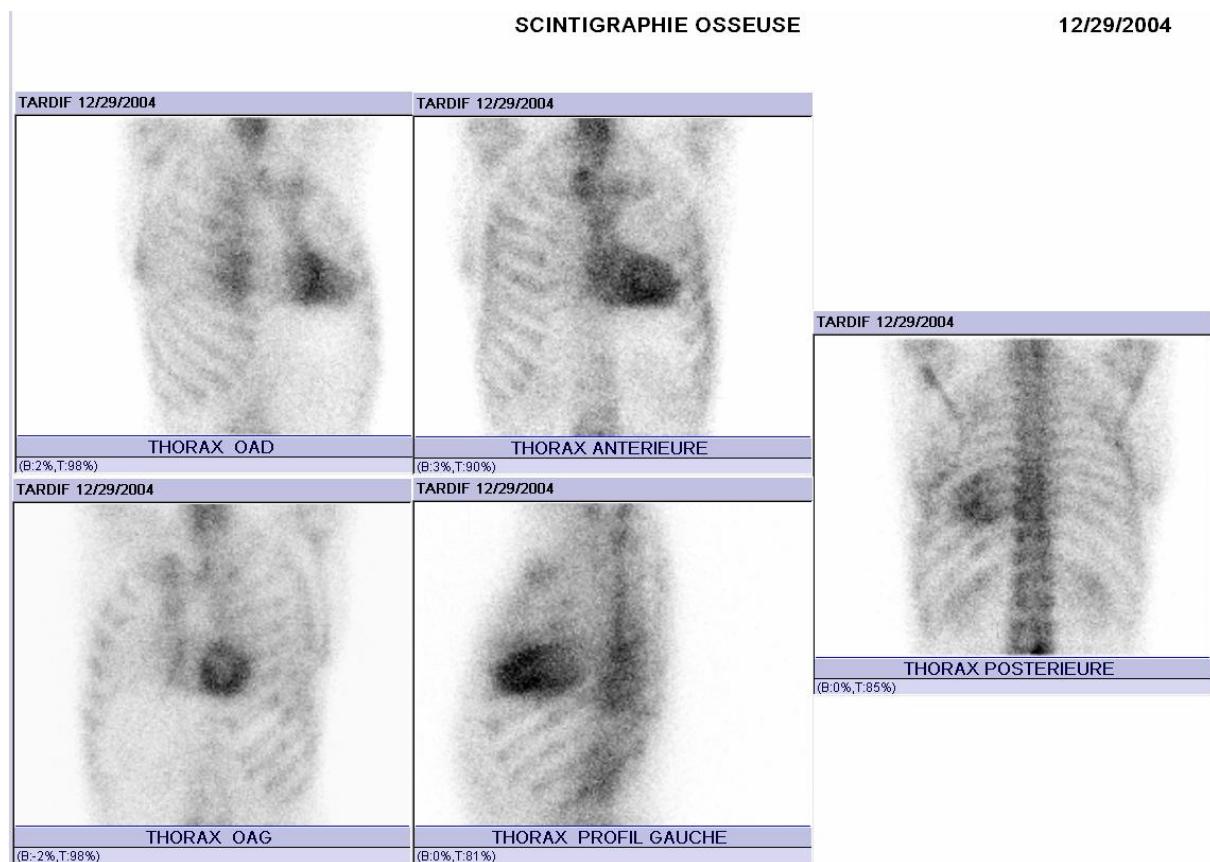


Figure 12 : Scintigraphie osseuse réalisée chez un patient présentant un néo de prostate avec suspicion de métastases osseuses. Acquisitions effectuées après injection de 15 mCi de diphosphonates marqués au ^{99m}Tc . On retrouve une hypercaptation myocardique du traceur, plus intense au niveau du ventricule gauche (mieux visible sur l'OAG) évoquant une cardiomyopathie.

La sensibilité pour les infarctus antérieurs étendus est supérieurs à 90 %, elle est plus faible pour les infarctus sous-endocardiques et inférieurs. La spécificité de la technique est de 60 à 80 %, et dépend de la présence ou l'absence de causes pouvant donner des faux positifs (angor instable, thrombolyse, anévrysme ventriculaire, myocardite, amylose, péricardite, valve calcifiée, antécédent d'IDM).

Les anticorps antimyosine marqués à l'indium 111 (voir chapitre des myocardites) ont une sensibilité supérieure à 90 % lors de l'infarctus avec onde Q. Pour les infarctus sans onde Q la sensibilité est de 78 à 84 %. Leur spécificité est supérieure au pyrophosphate (85-90 %) [12]. Mais le délai de 24 heures nécessaire entre l'injection et l'obtention des images place l'examen au-delà de la limite décisionnelle de la thrombolyse.

b. Evaluation de la thrombolyse après IDM

L'absence de redistribution du ^{99m}Tc sestamibi permet son utilisation pour l'étude des variations de perfusion associés à la thrombolyse, en pratiquant des examens au repos séquentiels avant et après thrombolyse. Il permet ainsi d'évaluer le sauvetage réalisé, en montrant la réduction de la taille de l'infarctus.

En effet, la taille de l'infarctus résiduel dépend de la précocité de la thrombolyse ainsi que de l'existence de collatérales. Plusieurs études ont démontré que les IDM antérieurs touchent des zones plus larges par rapport aux IDM inférieurs (53 % et 24 % respectivement), ce qui explique le meilleur bénéfice de la thrombolyse sur le territoire antérieur (le taux de sauvetage est de

16 %) [72, 73]. En plus, il a été démontré que la coronarographie surestimaît la surface à risque d'infarctus [74]. Aussi, cette technique peut être utilisée pour le diagnostic des IDM avec ECG non concluant, en montrant des surfaces myocardiques à risque qui devraient bénéficier d'une thrombolyse [75].

c. Evaluation de la viabilité myocardique (Hibernation myocardique)

La dysfonction ventriculaire après un IDM est liée à la perte de la contractilité du territoire lésé, néanmoins il persiste souvent du myocarde viable mais ischémique en bordure ou au sein de la lésion. L'hibernation myocardique doit être différenciée de la sidération, qui est un dysfonctionnement VG post ischémique avec une perfusion normale, en outre elle se résout spontanément contrairement à l'hibernation [76]

La physiopathologie de l'hibernation n'est pas claire, elle serait due selon certains auteurs à la répercussion d'un faible perfusion au repos sur la fonction contractile du myocarde [77] comme il est démontré par l'étude au repos lors de la TEP. D'autres auteurs soutiennent que l'hibernation est le résultat d'épisodes itératifs de sidération myocardique. [78] Sa prévalence réelle est difficile à déterminer. Iskandrian [79] l'estime entre 10 et 20 % des patients coronariens référés pour une coronarographie. Par contre, en prenant comme critère l'amélioration de la FEVG après pontage aortocoronarien, elle dépasse le tiers des cas de patients coronariens chroniques au stade de dysfonction VG [80]. Mais ces chiffres restent imprécis, compte tenu de la multitude de variables qui doivent être pris en considération.

Il est important de reconnaître le myocarde hibernant (figure 12) car sa revascularisation permet sa reprise fonctionnelle et l'amélioration de la fonction ventriculaire globale. Cette dernière étant intimement liée au pronostic du patient (figure 13), il est facile d'en déduire le bénéfice pronostic attendu de l'étude de l'hibernation myocardique, comme il a été démontré dans plusieurs études réalisées par tomographie d'émission de positons [81, 82]. Par ailleurs, Rahimtoola a montré que chez près de 10 % des candidats à la transplantation cardiaque avec de larges territoires de myocarde hibernant, on pourrait se contenter d'une revascularisation pour avoir une amélioration fonctionnelle satisfaisante [83].

La TEP, reconnue comme examen de référence pour l'étude de la viabilité myocardique, a permis de valider les techniques de la TEMP pour la détection du myocarde hibernant. Classiquement, le thallium 201 (étant un traceur mixte) est avantage sur les produits technétiens qui est un traceur de perfusion seule [84,85], même si certaines études montrent une efficacité égale par l'étude aux produits technétiens [85, 86,] avec une sensibilité entre 73 et 100 %, et une spécificité entre 55 et 86 %.

L'approche adoptée actuellement pour l'étude de l'hibernation myocardique est basée sur la détermination de deux paramètres :

- Les segments avec dysfonction ventriculaire sévère grâce à l'échocardiographie, l'imagerie par résonance magnétique, l'angiographie de contraste, ou le gated SPECT au 99mTc.

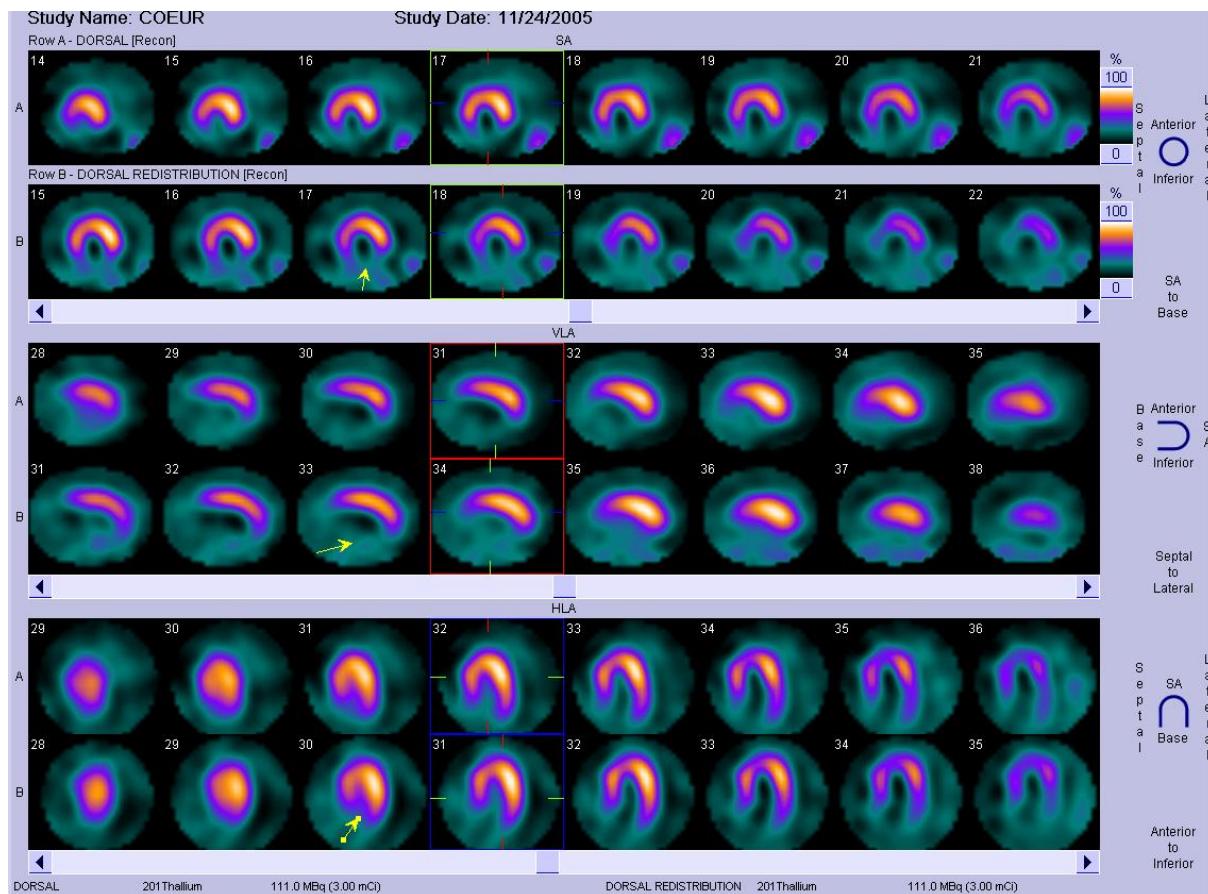


Figure 12 : Patient âgé de 55 ans , tabagique chronique et diabétique. IDM du myocarde inférieur compliqué d'un BAV régressif et choc cardiogénique. Présente des lésions tritronculaires avec occlusion de la coronaire droite et de l'interventriculaire antérieure. Une tomoscintigraphie au thallium201 (3 mCi) a été réalisée pour la recherche d'une viabilité myocardique. Acquisitions réalisés au repos à 15 min, 3h puis 18h. Les images précoces retrouvent une absence de captation au niveau de l'ensemble de la paroi inférieure et une hypocaptation au tiers inférieur de la paroi latérale et du septum. Les images tardives ne montraient aucune amélioration signant l'absence de viabilité myocardique du territoire inférieur.

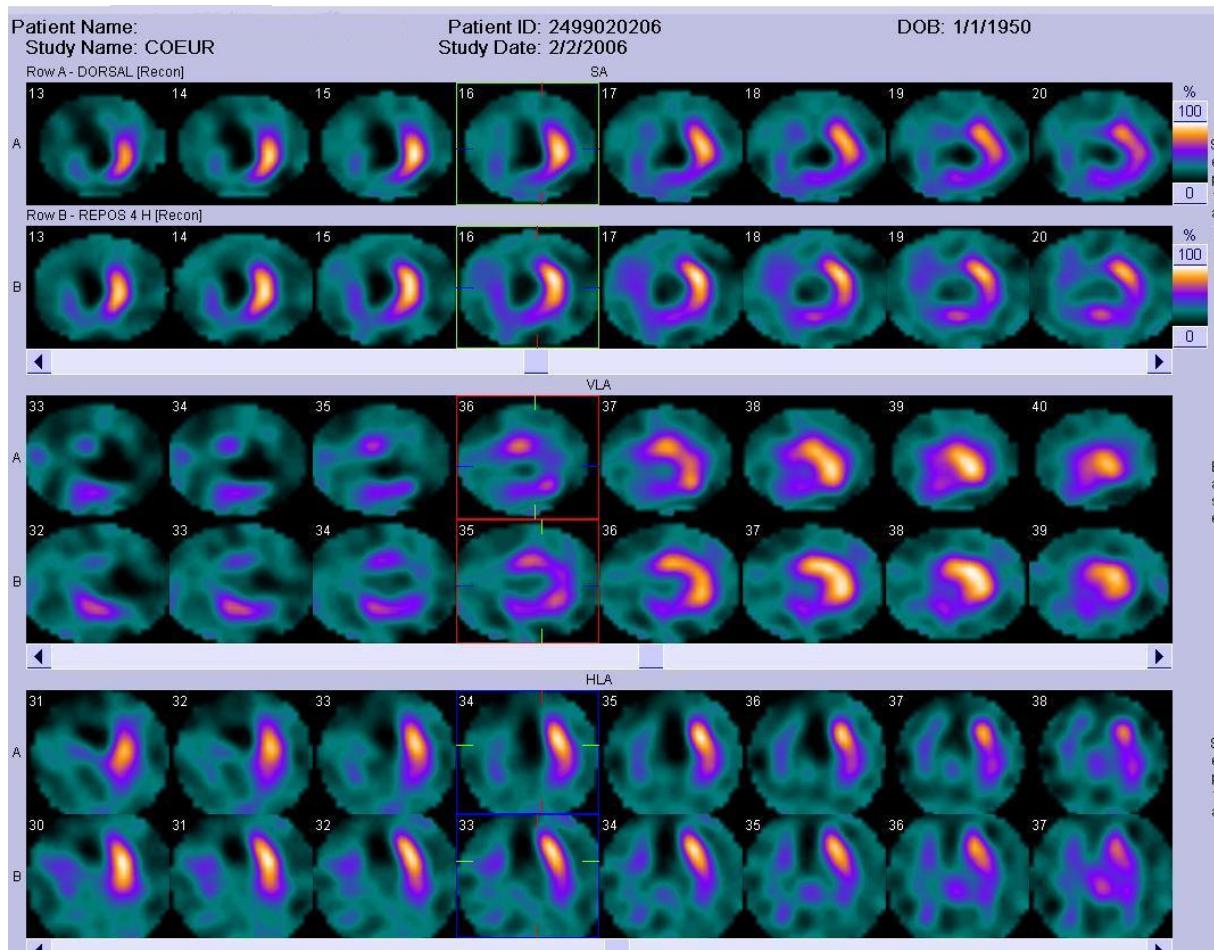


Figure 13 : Patient âgé de 54 ans, qui présente une myocardiopathie ischémique avec occlusion de l'IVA. La FEVG est estimée à 30 %. Une tomoscintigraphie au repos, après injection de 2.5 mCi, a été réalisée pour l'étude de la viabilité. Les images précoces retrouvent un ventricule gauche très dilaté avec amputation de l'apex dans les trois dimensions. Absence de captation au niveau de la paroi antérieure, septale et inférieure. Aspect en faveur d'un infarctus antéro-apical étendu sans signe de viabilité scintigraphiquement décelable

- La fixation du traceur dans des conditions optimales par la TEMP au 201Tl au repos. Seul le protocole avec ré-injection permet d'avoir des résultats proches de la TEP avec des valeurs prédictives positives et négatives de l'ordre de 85 % [87]. Certains auteurs préconisent l'administration de dérivés nitrés avant l'injection afin d'améliorer les performances de la technique [88]

Le délai nécessaire pour la récupération d'une bonne fonction ventriculaire après revascularisation varie selon les études. Chez les patients ayant un angor instable, l'amélioration de la fonction ventriculaire est immédiate, contrairement aux patients ayant une faible fonction ventriculaire après revascularisation qui peuvent récupérer après plusieurs mois [89].

3. Evaluation des stratégies de revascularisation

Après la revascularisation, la Scintigraphie myocardique est indiquée : pour évaluer la récupération myocardique et les dommages post opératoires; Le dépistage systématique d'une resténose après angioplastie ou pontage aortocoronarien ; et la différenciation des douleurs thoraciques récurrentes.

a. Evaluation de l'infarctus et de la récupération myocardique péri-opératoires.

Les pontages coronariens et l'angioplastie percutanée entraînent des infarctus dans 4 à 40 % des cas [90]. L'ECG et l'élévation des enzymes cardiaques n'étant pas spécifiques à cette période post-opératoire, le recours à la scintigraphie myocardique permet d'objectiver les nouveaux territoires infarcis en post-opératoire causés par l'intervention.

Plusieurs études ont montré que la Scintigraphie myocardique permet de juger l'amélioration de la perfusion et de la fonction du myocarde hibernant après pontage aortocoronarien, avec la disparition des défauts de la scintigraphie d'effort chez 90 % des patients [91].

b. Dépistage des resténoses après pontage

Le pontage aortocoronarien est une technique de revascularisation chirurgicale indiquée en cas d'angor non contrôlé par le traitement médical. La resténose des greffons peut survenir précocement à cause des thrombi, ou tardivement par la progression de la plaque d'athérome. L'ECG d'effort a une faible sensibilité (50 %) pour la détection des resténoses, à cause de l'utilisation de la digoxine et du bloc de branche gauche qui peut survenir après la chirurgie. Une étude réalisée chez 55 patients avant et après pontage aortocoronarien, donne à la scintigraphie au thallium une sensibilité et une spécificité de 80 % et 88 % respectivement, pour la détection des greffons sténosés [92].

c. Détection des resténoses après angioplastie

L'angioplastie transluminale est une technique non chirurgicale de reperméabilisation. Initialement indiquée pour les atteintes mono tronculaires, elle est maintenant utilisée lors de l'atteinte pluritronculaire et pour la reprise des sténoses de pontage aortocoronarien. La resténose survient après angioplastie dans 30 à 50% des cas, elle est plus fréquente entre 1 et 3 mois et presque inexiste après 6 mois. La scintigraphie myocardique présente plusieurs avantages sur l'ECG d'effort pour la détection des resténoses chez les

patients symptomatiques et asymptomatiques avec une sensibilité de 93 % et une spécificité supérieure à 80 %. [11] Néanmoins, il est conseillé de ne réaliser la scintigraphie d'effort qu'à partir du deuxième mois en cas de suspicion de resténose, car la scintigraphie pratiquée précocement peut montrer des défauts perfusionnels réversibles sans resténose coronarographique.

Pour certains auteurs [93] la réalisation d'une scintigraphie d'effort doit être systématique dans les 6 mois qui suivent l'angioplastie (figure 14), afin de détecter une éventuelle ischémie silencieuse. Une étude publiée en 2005, regroupant 370 patients ayant bénéficié d'une scintigraphie myocardique à l'effort 1 mois après angioplastie et suivis pendant une moyenne de 30 mois, a démontré que les défauts de perfusion réversibles retrouvés après l'intervention pouvaient prédire le risque de survenue d'événements cardiaques graves [94].

d. Différenciation des douleurs récurrentes

Plusieurs types de douleur subsistent après la chirurgie. On distingue la douleur due à la sternotomie, les névralgies, la péricardite post-opératoire, et l'anxiété. L'intérêt de la scintigraphie réside dans la différenciation entre ces douleurs et celle due à une atteinte ischémique récurrente. L'étude d'Iskandrian accorde la scintigraphie d'effort d'une sensibilité de 65 % et une spécificité de 100 % [95].

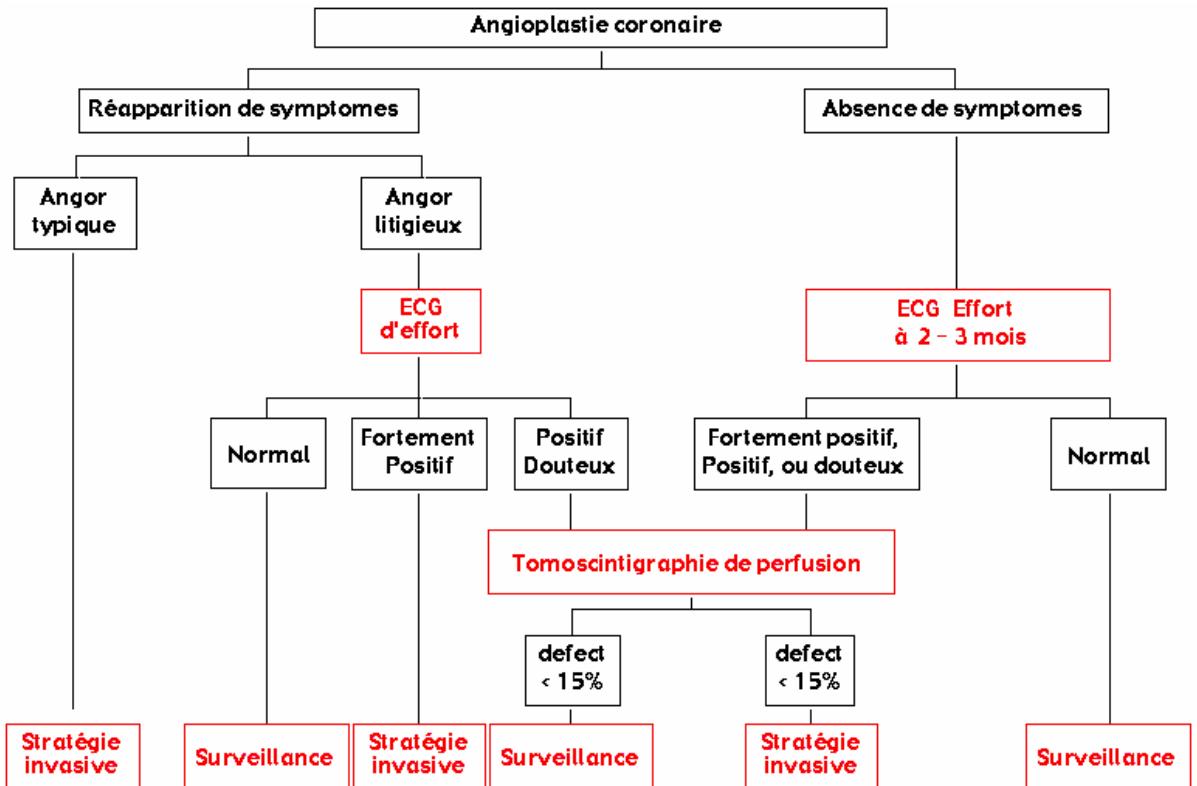


Figure 14 : Stratégie d'utilisation de la tomoscintigraphie de perfusion après angioplastie (adapté de [125])

B. MYOCARDITES AIGUËS

La myocardite est une atteinte inflammatoire du myocarde diffuse ou localisée. Son étiologie est infectieuse (souvent virale), auto-immune ou idiopathique. Le polymorphisme clinique de cette affection rend son diagnostic difficile.

Les signes biologiques sont peu spécifiques, on retrouve parfois une élévation modérée de la CPK, de sa fraction MB et de la troponine. Dans les formes virales, les signes inflammatoires sont en règle présents. La mise en évidence d'anticorps anti-myosine est fréquente dans ce contexte, mais le test est trop peu sensible et spécifique pour qu'il devienne systématique [96]. Dans près de 25 % des cas, l'inflammation peut devenir chronique et le cours clinique peut alors évoluer vers une insuffisance cardiaque globale sur cardiomyopathie dilatée.

La confirmation diagnostique repose sur la biopsie endomyocardique, qui met en évidence des lésions histologiques spécifiques à type de nécrose et d'infiltrats cellulaires. Mais la faible sensibilité de cette méthode, comparée aux risques inhérents au geste, limitent son utilisation. En pratique, le diagnostic se fait sur un faisceau d'arguments cliniques et para cliniques non spécifiques, mais dont l'association renforce la présomption clinique.

La scintigraphie myocardique aux anticorps anti-myosine marqués à l'Indium-111 s'est avérée être un moyen sensible pour le diagnostic non invasif de la myocardite. En effet, elle permet de mettre en évidence la nécrose myocytaire qui est l'élément capital du diagnostic.

L'anticorps antimyosine est produit selon la technique des hybridomes par immunisation de souris à la myosine humaine. Le fragment Fab est récupéré après digestion enzymatique, ensuite il est marqué à l'indium 111 qui est un émetteur gamma produit du cyclotron de demi-vie longue (67 heures). L'anticorps est ensuite relié au DTPA pour faciliter la liaison avec l'indium 111. Après injection intraveineuse l'anticorps se distribue rapidement dans le compartiment vasculaire, puis lentement se fixe sur les antigènes de la myosine des cellules myocardiques lésées. L'acquisition des images en mode planaire ou tomographique, se fait après 48 heures pour permettre la diminution du bruit de fond vasculaire.

En l'absence de nécrose, les images reflètent la bio distribution normale des anticorps au niveau du rein, du foie et de la rate. La nécrose caractérisée par une fixation anormale au niveau du cœur est analysée qualitativement et semi-quantitativement.

Plusieurs études ont montré l'intérêt de cette technique dans le cadre de l'infarctus du myocarde, du rejet de greffe, de la cardiotoxicité des anthracyclines, des cardiomyopathies au cours des maladies de système, et des myocardites [97]. La sensibilité de la technique était de 100 % et sa spécificité de 58 % par rapport à la biopsie endomyocardique dans étude réalisée chez 28 patients [98]. Une autre étude, effectuée chez 82 patients suspects de myocardite a trouvé une sensibilité de 83 %, une spécificité de 53 %, une valeur prédictive négative de 92 % [99]. Un travail portant sur 45 patients hospitalisés en soins intensifs pour suspicion d'IDM avec coronarographie normale, rapporte les résultats d'un examen associant scintigraphie aux anticorps anti-myosine et

thallium de repos réalisés chez tous les patients. Chez 2 patients, un defect aux deux examens suggérait un IDM. Chez 17 patients, il existait une fixation diffuse des anticorps antimyosine et dans 18 cas une fixation focale. Enfin, chez 8 patients, la scintigraphie était négative, mais ne permettait pas d'exclure formellement le diagnostic de myocardite [96]. Certains auteurs suggèrent que la faible spécificité accordée à la scintigraphie aux anticorps antimyosine soit due au fait que la biopsie endomyocardique, considérée comme examen de référence, a une faible sensibilité.

Du point de vue pratique, les limites de la technique sont : l'importante fixation au niveau du système réticulo-endothélial qui nuit à la qualité de l'image, le bruit de fond vasculaire qui empêche l'acquisition d'images précoces, et la faible disponibilité de l'indium-111. Le marquage au ^{99m}Tc et la modification de l'anticorps pourraient augmenter l'intérêt de la technique.

Au total, la scintigraphie aux anticorps antimyosine marqués à l'indium 111 malgré ces limites, reste une technique non invasive sensible et d'apport non négligeable pour le diagnostic des myocardites aiguës.

C. SCLERODERMIE SYSTEMIQUE [100]

L'atteinte cardiaque est anatomiquement très fréquente au cours des sclérodermies. Il s'agit essentiellement des myocardiopathies, dont le diagnostic est souvent tardif. L'utilisation de techniques isotopiques permet de rendre le diagnostic plus précoce en montrant des troubles de la fonction diastolique du ventricule gauche ou des défauts de perfusion. La pathogénie supposée de cette myocardiopathie fait intervenir l'ischémie myocardique en relation avec un vasospasme ou des lésions des artéries ou de la microcirculation coronaire. Le caractère primitif de l'atteinte cardiaque par le processus sclérodermique, ou son origine secondaire due aux lésions pulmonaires ou rénales sont également discutables.

La prévalence de l'atteinte myocardique est controversée. Follansbee [101] a rapporté une série de 1 258 sclérodermiques dont 163, qui avaient une atteinte rénale, ont été exclus de l'analyse. Parmi les 1 095 sujets restants, 129 (12 %) présentaient des signes de myocardiopathie (insuffisance cardiaque congestive, troubles du rythme auriculaires ou ventriculaires, dysfonction ventriculaire gauche en échographie ou en scintigraphie).

Les techniques isotopiques ont été utilisées dans le but de mettre en évidence une atteinte du myocarde avant même que des modifications morphologiques soient détectées en échographie. La base de ce concept est que la myocardiopathie sclérodermique serait d'origine ischémique et micro circulatoire. Ainsi, dans une étude portant sur 63 sujets avec sclérodermie limitée, 64 % des patients avaient une réponse myocardique de type ischémique

au froid en scintigraphie au thallium [102]. Toutefois, le même type de réponse est observé chez 57 % des sujets atteints de phénomène de Raynaud primitif. La taille des défauts de perfusion au thallium était associée à la survenue ultérieure d'évènements cardiovasculaires chez 48 sclérodermiques suivis pendant 10 ans [103]. La TEMP au thallium 201 à l'effort a montré des anomalies de la perfusion chez 80 % des sclérodermiques, ainsi qu'une altération de la fonction diastolique du ventricule gauche qui paraissait d'autant plus importante que le score cutané de Rodnan était élevé [104].

D. AUTRES

Sarcoïdose : Au cours de la sarcoïdose les manifestations cardiaques peuvent être secondaires à l'atteinte respiratoire sous forme de cœur pulmonaire chronique ou liées à des localisations cardiaques. La prévalence des localisations cardiaques rapportée à partir de malades autopsiés est variable (12 à 75 %), une faible proportion de ces patients ayant eu des signes cliniques en rapport avec cette localisation. La localisation cardiaque est cependant l'une des plus graves et elle est responsable d'environ 50 % des décès des sarcoïdiens. Les sites prédominants de l'atteinte myocardique sont la paroi libre du ventricule gauche, la partie basale du septum inter ventriculaire, le muscle papillaire.

Les manifestations cliniques sont rares. L'affection peut s'exprimer par des palpitations, des lipothymies, des pertes de connaissance brèves ou des douleurs thoraciques. Une insuffisance cardiaque congestive s'observe initialement chez moins de 5 % des patients mais concerne le tiers des malades décédés. Le risque de mort subite est important.

La scintigraphie myocardique au thallium ou au ^{99m}Tc sestamibi montre des hypofixations non spécifiques, régressives sous Dipyridamole et non aggravées par l'effort [105].

Amyloïdose cardiaque : la cardiomyopathie amyloïdosique, le plus souvent de type AL, est la forme la plus fréquente de cardiopathie restrictive, qui provoque une insuffisance cardiaque diastolique. Le diagnostic de certitude est histologique et repose sur la biopsie endomyocardique. L'association d'une HVG avec aspect granité et brillant à l'échographie et d'un microvoltage à L'ECG est hautement suggestive. Le pronostic est sévère et le décès survient le plus souvent par insuffisance cardiaque, trouble du rythme ventriculaire ou de conduction auriculo-ventriculaire. Le traitement étiologique est décevant et la transplantation cardiaque est contre-indiquée.

La scintigraphie myocardique [106] au pyrophosphate de technétium 99m se révèle positive chez 50 % des patients asymptomatiques souffrant d'amyloïdose familiale sans anomalie ECG ou échographique. Une autre étude [107] au pyrophosphate technétien montre une bonne corrélation avec les résultats de l'échocardiographie doppler, et a conclu que la scintigraphie peut présenter un appoint utile au diagnostic de l'amylose cardiaque, notamment lorsque l'échographie est d'interprétation difficile.

Au total, lors de l'amyloïdose cardiaque, la scintigraphie est surtout utile en combinaison avec l'échographie.

Drépanocytose de l'enfant : le cœur n'est pas l'organe de prédilection de l'atteinte drépanocytaire, néanmoins l'ischémie myocardique asymptomatique, due à l'atteinte micro circulatoire coronaire, n'est pas exceptionnelle chez ces patients. Elle expose au risque réel de myocardiopathie ischémique et de ses complications à l'âge adulte (IDM, insuffisance cardiaque). D'où l'intérêt d'un examen qui permet la détection précoce de l'ischémie chez ces enfants [108]. Devant la faible sensibilité de l'ECG d'effort et de l'échocardiographie pour l'exploration de la perfusion myocardique, la tomoscintigraphie s'est imposée comme examen sensible et spécifique pour la détection des anomalies de perfusion chez l'enfant.

La tomoscintigraphie myocardique a été validée dans la recherche de l'ischémie myocardique en pathologie coronaire acquise de l'enfant, notamment lors des études au décours de la correction artérielle des transpositions de gros vaisseaux. Sa sensibilité et sa spécificité sont estimées à 69 % et 78 % respectivement. Sa valeur prédictive positive et négative est autour de 74 % [109].

VI. PLACE PARMI LES AUTRES MOYENS D'EXPLORATION NON INVASIVES

A. VALEUR PREDICTIVE D'UN TEST DIAGNOSTIC [110]

La valeur prédictive d'un test diagnostic est directement liée à la sensibilité et à la spécificité du test ainsi qu'à la probabilité pré-test de l'existence de la maladie (théorème de Bayes). Plusieurs études ont démontré que l'âge, le sexe et le type de douleur sont des éléments anamnétiques simples mais dont la valeur prédictive de maladie coronarienne est très importante (probabilité pré-test). L'apport d'un test diagnostique est le plus grand chez les patients ayant une probabilité pré-test intermédiaire de maladie coronarienne. Chez un patient avec une probabilité pré-test de maladie coronarienne intermédiaire (50 %), l'apport du résultat du test d'effort est important puisqu'un test positif augmentera la probabilité à 83 % alors qu'un test négatif la diminuera à 36 %. Au contraire, chez un patient avec probabilité pré-test de maladie coronarienne élevée (90 %), l'apport du résultat du test d'effort est faible puisqu'en cas de test positif la probabilité augmentera à 98 %, un test négatif ne diminuera cette probabilité qu'à 83 %. Selon les recommandations de l'american heart association et de l'americain college of cardiology (l'ACC/AHA), un test diagnostic à la recherche d'une maladie coronarienne est reconnu comme indication de classe I uniquement chez les patients présentant une probabilité pré test intermédiaire. L'indication est seulement de classe IIb chez les patients avec probabilité pré-test faible ou élevée. L'évaluation de la probabilité pré-test de maladie coronarienne représente donc le premier temps

dans la démarche diagnostique en permettant de sélectionner le test le plus adapté et d'en interpréter au mieux les résultats (Figure 15).

B. L'ECHOCARDIOGRAPHIE DE STRESS

L'échocardiographie permet l'analyse des propriétés contractiles du myocarde ventriculaire gauche en imagerie bidimensionnelle au repos ou lors d'un test de provocation d'ischémie soit par une épreuve d'effort soit par un stress pharmacologique (dobutamine, dipyridamole). L'ischémie myocardique se traduit très précocement, avant les modifications électrocardiographiques et la douleur angineuse, par l'apparition d'anomalies de la cinétique des territoires hypoperfusés.

La réponse normale d'une paroi myocardique au test de provocation est une augmentation de la contraction et de l'épaississement pariétal systolique. L'ischémie se traduit par l'apparition d'une anomalie de la contraction segmentaire (hypokinésie ou akinésie) ou par l'aggravation d'une anomalie préexistante. L'échocardiographie de stress permet de mettre en évidence une ischémie myocardique, d'en préciser la topographie et l'étendue. Tout comme la scintigraphie myocardique synchronisée à l'ECG, elle permet d'évaluer la fonction ventriculaire et la viabilité myocardique. L'échocardiographie de stress a un rôle dans la stratification du risque de la maladie coronarienne. Le facteur limitant principal de l'échocardiographie de stress est le défaut d'échogénicité qui peut diminuer les performances diagnostiques ou rendre l'examen impossible chez 10 à 20 % des patients. Les indications de l'échocardiographie de stress en première intention sont les mêmes que pour la scintigraphie

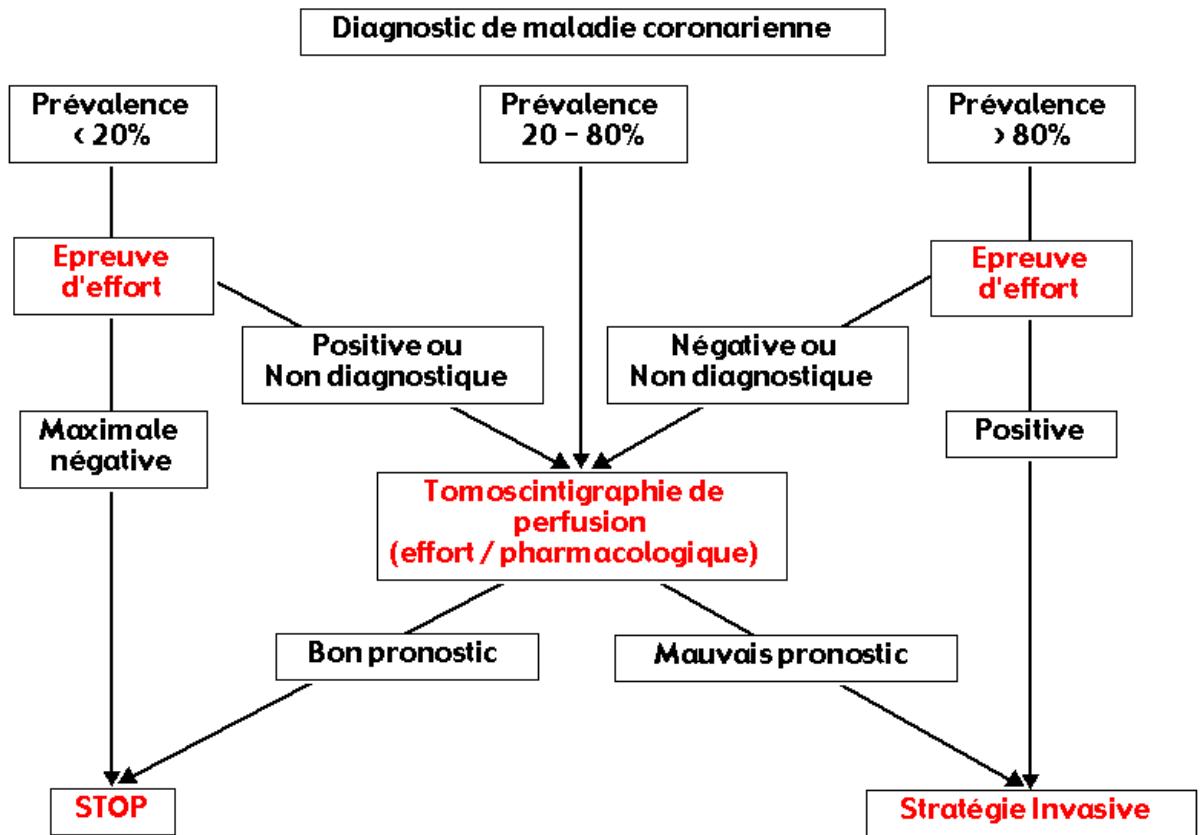


Figure 15 : Stratégie d'utilisation à visée diagnostique de la scintigraphie myocardique de perfusion (adapté de [125])

myocardique, à savoir en présence d'un électrocardiogramme ininterprétable ou lors d'incapacité d'effectuer un effort suffisant et selon certains auteurs chez les patients ayant subi une revascularisation myocardique par angioplastie percutanée ou pontage coronarien. L'échocardiographie de stress peut être réalisée en deuxième intention lorsque les résultats du test d'effort ne sont pas concluants ou lors d'un test d'effort positif chez un patient ayant déjà subi une revascularisation par angioplastie percutanée ou pontage coronarien afin de préciser la localisation de l'ischémie et d'évaluer la viabilité myocardique.

Les contre-indications de l'échocardiographie de stress sont liées à la méthode utilisée pour le test de provocation. La sensibilité et la spécificité de l'échocardiographie de stress varient dans la littérature respectivement entre 50 à 100 % et 80 à 95 %.

Plusieurs études ont comparé les performances respectives de l'échocardiographie de stress et de la scintigraphie myocardique pour le diagnostic de la maladie coronaire. L'étude de Marwick [111] a englobé 217 patients coronariens suspects ayant bénéficié d'une échocardiographie sous dobutamine et d'une scintigraphie myocardique au ^{99m}Tc sestamibi. Les résultats retrouvés montrent une meilleure sensibilité pour la scintigraphie myocardique (76 % vs 72 %) mais l'échocardiographie est plus spécifique (83 % vs 67 %).

Une autre étude ayant comparé l'échocardiographie sous dobutamine et la tomoscintigraphie myocardique de stress au thallium chez 120 patients coronariens [112], a trouvé une sensibilité comparable pour les 2 techniques (89

% pour la TEMP et 83 % pour l'écho) mais l'échographie reste plus spécifique (93 %) que la TEMP (85 %). D'autres études dans la littérature confortent ces résultats [113, 114].

En conclusion, la TEMP est légèrement plus sensible pour le diagnostic de la maladie coronaire, notamment pour les lésions coronariennes mono tronculaires [110], par contre la spécificité de l'échocardiographie de stress est plus élevée que celle de la scintigraphie myocardique. La limite principale de ces études est le manque d'information sur le nombre de patients exclus de l'échocardiographie de stress en raison d'un défaut d'échogénicité.

C. L'IMAGERIE PAR RESONANCE MAGNETIQUE

Les récents développements qu'a connu l'IRM cardiaque lui ont donné une plus grande importance dans l'imagerie de la cardiopathie ischémique. L'IRM en mode ciné permet l'analyse de la fonction ventriculaire gauche segmentaire et globale avec une bonne résolution spatiale et temporelle [115].

L'étude des cardiopathies ischémiques en IRM associée à l'utilisation d'un traceur ou agent de contraste (chélates de gadolinium) ou IRM de perfusion, peut être réalisée par deux approches complémentaires : la première vise à déterminer la perfusion tissulaire myocardique et repose sur l'étude de la perfusion au cours du premier passage du traceur après une injection en bolus ; la seconde, est réalisée plus tardivement après l'injection du traceur et repose sur des séquences spécifiques visant à mettre en évidence les territoires présentant

une anomalie de la cinétique d'élimination de l'agent de contraste ; c'est ce que l'on dénomme habituellement « imagerie du rehaussement tardif » [3]

Manning et coll. ont été les premiers à rapporter une étude clinique combinant l'utilisation de l'imagerie rapide avec injection par voie veineuse d'un complexe de gadolinium chez 12 patients porteurs d'une sténose coronaire significative [116]. Cette étude a démontré la possibilité grâce à l'IRM de perfusion de détecter les territoires hypoperfusés qui présentent un pic de rehaussement moins élevé et une ascension du signal moins rapide que le myocarde normalement perfusé. Par la suite, cette méthode a été validée pour le bilan de la maladie coronaire [117], en prenant comme méthode de référence la coronarographie (sensibilité entre 72 et 94 % et spécificité moyenne de 89 %). Lorsque la méthode de référence choisie est la tomoscintigraphie la sensibilité est alors de 84 % et sa spécificité plus élevée (93.5 %). Au vu de ces résultats, l'IRM est comparable voire supérieure à la TEMP pour le diagnostic de la maladie coronaire, mais il faudra attendre la réalisation d'études de grandes cohortes pour confirmer la valeur diagnostique de l'IRM de perfusion.

En plus, plusieurs études ont démontré la capacité de l'IRM du rehaussement tardif pour la mise en évidence d'infarctus de petite taille sous-endocardiques non détectés par la scintigraphie [118]. Dans ce sens, l'étude rétrospective de Wagner a comparé la capacité de l'IRM du rehaussement tardif et la TEMP au 201Tl au repos pour la détection des séquelles d'IDM. Les 2 techniques ont une performance égale pour la détection des IDM transmuraux, mais l'IRM (grâce à sa meilleure résolution spatiale) parvient aussi à détecter les infarctus de la région sous-endocardique [119].

D. TEP DE PERFUSION.

L'étude de Go [120] réalisée en 1990 chez 202 patients coronariens, a trouvé une meilleure sensibilité pour la TEP (93 %) comparée à la TEMP (76 %), la spécificité étant comparable (80 % pour la TEMP contre 78 % pour la TEP). Une autre étude [121] effectuée chez 81 patients a retrouvé une sensibilité et une spécificité de 84 % et 53 % respectivement pour la tomoscintigraphie. L'examen par TEP de perfusion au rubidium 82 chez les mêmes patients retrouve une sensibilité identique (84 %) mais la spécificité est nettement plus élevée (88 %).

La supériorité relative de la TEP est néanmoins insuffisante pour l'extension de son utilisation pour le diagnostic de la maladie coronaire, car elle présente plusieurs difficultés techniques et son coût très excessif.

VII. PERSPECTIVES

L'évaluation de l'importance des lésions coronaires chez les patients coronariens est difficile en pratique clinique. La tomoscintigraphie s'est imposée, dans les pays développés, comme une méthode de référence pour l'étude de l'effet hémodynamique des sténoses coronaires, et son intérêt dans la prise en charge des patients coronariens n'est plus à démontrer.

Malgré ses limites (résolution spatiale limitée, accessibilité, irradiation, coût relativement élevé) qui entravent son application en routine dans notre pays, elle présente de multiples possibilités de développement.

Les perspectives d'avenir de la tomoscintigraphie myocardique sont liées à la transition épidémiologique, l'amélioration de la qualité et de l'accès aux soins pour la population, ainsi que l'évolution des technologies.

Au Maroc, autrefois la majorité des décès étaient occasionnés par les maladies transmissibles et la population était jeune. Actuellement, la pyramide des âges a grandement varié et l'espérance de vie a augmenté. Les habitudes alimentaires de la population ont changé (plus de lipides et de sucres). Par conséquent la prévalence des maladies cardio-vasculaires a augmenté (20.4 % en 2001 selon les statistiques du ministère de la santé), et le nombre de décès annuel est élevé. Les maladies coronaires sont difficiles à traiter, et leur coût est excessif aussi bien pour le patient que pour le système sanitaire national.

De récentes études ont montré l'impact positif de la scintigraphie myocardique de perfusion sur le coût de la prise en charge des patients

coronariens. En effet, les stratégies fondées sur le recours précoce à la scintigraphie dans la gestion des patients, ont un meilleur rendement avec un coût relativement faible [122, 123]. En plus, l'utilisation de la technique en cas de syndrome coronaire aigu permet de réduire le nombre d'hospitalisations non nécessaires, et une scintigraphie normale dispense de la pratique d'une coronarographie superflue [124].

En outre, l'intégration de la scintigraphie myocardique dans la stratégie diagnostique non invasive, en tenant compte du contexte clinique (probabilité pré-test), permet une étude plus précise avec une sensibilité et une spécificité supérieures à la clinique ou à l'épreuve d'effort seule. Dans l'évaluation thérapeutique la scintigraphie garde une place de choix, notamment après angioplastie ou pontage aortocoronarien. En plus, l'aide à l'établissement du risque de survenue d'événements cardiaques graves au cours de l'année ou à long terme permet de guider la décision thérapeutique.

Néanmoins, le développement de la scintigraphie myocardique ne peut s'envisager que dans le cadre du développement des autres moyens diagnostiques et thérapeutiques en cardiologie.

Du point de vue technologique, la tomographie d'émission monophotonique synchronisée à l'ECG grâce à l'étude simultanée de la perfusion, de la fonction ventriculaire et de la viabilité permet une appréciation d'ensemble de l'état du cœur. L'amélioration des logiciels de quantification des images garantit une meilleure reproductibilité de la technique.

Enfin, les domaines de recherche pour le développement de la scintigraphie myocardique sont vastes, incluant l'amélioration des traceurs, de la qualité des détecteurs et la recherche de méthodes de correction de l'atténuation, de la diffusion et de l'effet de volume partiel plus précises.

VIII. CONCLUSION

La connaissance physiopathologique, le diagnostic et la prise en charge de la maladie coronaire ont profondément évolué au cours des deux dernières décennies. Les techniques d'exploration non invasives ont joué un rôle pivot dans ce développement.

La scintigraphie myocardique s'est révélée être un moyen non invasif performant pour l'exploration de la perfusion myocardique dans les différentes situations cliniques se rapportant à la maladie coronaire.

Son efficacité clinique a été prouvée, aussi bien dans le diagnostic des cas douteux et difficiles, que pour le suivi dans le post-infarctus et l'évaluation du profit escompté d'une revascularisation. Son apport pronostic considérable, lui permet de jouer un rôle important lors de la décision thérapeutique. En plus, la stratification des patients par cette méthode selon la gravité des lésions permet de cibler les populations qui devront bénéficier d'un geste invasif.

L'avènement de la tomographie monophotonique synchronisée à l'électrocardiogramme a permis, en plus de l'étude perfusionnelle, de recueillir l'information sur la fraction d'éjection ventriculaire gauche, la cinétique segmentaire et l'épaississement pariétal systolique, qui sont des éléments capitaux pour la prise en charge du patient coronarien.

Enfin, l'intégration de la scintigraphie myocardique dans la pratique cardiologique des pays en voie de développement (dont les ressources humaines

et matérielles sont limitées) pourrait contribuer à amortir le coût élevé de la prise en charge des maladies cardio-vasculaires.

RÉSUMÉ

La scintigraphie myocardique est un moyen d'exploration non-invasif dont les performances justifient son utilisation comme outil de décision en cardiologie. Ce travail a pour but de rappeler les procédés de la scintigraphie cardiaque, son apport dans différentes situations pathologiques, en particulier dans la maladie coronaire, et sa place parmi les autres techniques d'imagerie.

La scintigraphie myocardique d'émission monophotonique est réalisée après l'injection intraveineuse d'un radiotraceur au repos, après une épreuve d'effort ou un test pharmacologique. Ce qui permet de visualiser la distribution du flux sanguin au niveau du myocarde. Les traceurs utilisés habituellement sont le thallium 201, le sestamibi ^{99m}Tc et la tetrofosmine ^{99m}Tc . L'acquisition des images se fait en mode tomographique selon 3 coupes principales (petit axe, grand axe vertical, 4 cavités). L'interprétation des images se fait, après traitement informatique, qualitativement ou par des logiciels de quantification

La scintigraphie myocardique permet la détection précoce de l'ischémie avant les signes cliniques ou électriques, avec une sensibilité de 93 % et une spécificité de 80 %. Les patients ayant une sténose coronaire significative vont présenter un défaut de captation du radiotraceur en regard de l'artère concernée. Si le défaut de perfusion présent dans les acquisitions de stress est réversible au repos, il représente une ischémie. En cas de défaut de perfusion irréversible, il sera en faveur d'un infarctus ou dans certains cas de myocarde hibernant.

La synchronisation à l'ECG permet d'avoir l'information sur la perfusion myocardique, la fonction ventriculaire gauche globale et régionale, ainsi que sur la viabilité myocardique durant le même examen.

La tomographie d'émission de positons a une place de choix dans l'évaluation de la viabilité myocardique, grâce à l'étude du métabolisme glucidique cardiaque. L'échocardiographie permet l'exploration fonctionnelle du cœur, mais elle reste dépendante de l'opérateur. L'IRM de perfusion pourrait être amenée à jouer un rôle plus important, mais des études à grande échelle manquent pour justifier son intérêt.

La SM est indiquée dans le diagnostic de l'angor chez les patients avec une probabilité pré-test intermédiaire. Elle permet de stratifier les patients selon le risque de survenue d'événements cardiaques graves et identifie les patients nécessitant la pratique d'un geste invasif. Son apport dans l'établissement de la viabilité myocardique en postinfarctus est considérable. En outre, elle est utile pour l'évaluation thérapeutique des patients coronariens après angioplastie ou pontage aortocoronarien. Enfin, la SM peut être utilisée pour le diagnostic précoce de l'atteinte cardiaque dans les maladies de système.

SUMMARY

Myocardial scintigraphy is a non-invasive procedure for cardiologic investigation. The aim of this study is to recall the procedures and relevance of myocardial perfusion scintigraphy in different settings of coronary artery disease.

Myocardial perfusion imaging (MPI) is performed using an intravenously administered radiopharmaceutical to study the distribution of blood supply in the myocardium. It's realized at rest or after treadmill exercise or pharmacological stress. The most frequently used tracers are thallium-201, sestamibi Tc-99m and tetrofosmine Tc-99m. Tomographic display uses 3 planes (short axis, horizontal long axis, vertical long axis) and images can be analysed visually or quantitatively using software.

Myocardial perfusion imaging is a reliable tool for the diagnosis of coronary artery disease, with a high sensitivity 93 % and specificity 80 %. Patients with significant coronary artery stenosis will show a diminished radiopharmaceutical uptake in the area of decreased perfusion. If either the concentration area or severity of decreased tracer concentration is worse at stress than rest, it most likely represents ischemia. If the area underperfused remains unchanged, even after injection at rest, the defect represents scar or in some cases, hibernating myocardium.

Gating single photon emission computed tomography with ECG allows the analysis of left ventricular perfusion and function during the same acquisition.

Positron emission tomography evaluates myocardial viability with high accuracy. Echocardiography allows analysis of myocardial function, but it is operator dependant. Magnetic Resonance Imaging (MRI) of perfusion may play a greater role, expecting further studies.

Myocardial perfusion imaging is indicated for diagnosis of stable angina in patients with intermediate pretest likelihood of coronary artery disease. It permits the risk assessment and stratification of patients with known coronary artery disease. Also Magnetic Resonance Imaging helps to distinguish viable myocardium after myocardial infarction. This technique is useful in monitoring effect of coronary revascularization (angioplasty, bypass surgery) and medical therapy. At last, MPI may be used for accurate diagnosis of heart injury in systemic diseases.

ملخص

التصوير الومنصاني لعضلة القلب وسيلة غير باضعة فعالة لتشخيص الامراض القلبية. تهدف هذه الدراسة التذكير بطريقة التصوير الومنصاني لإرواء عضلة القلب وبيان أهميته في مختلف مراحل داء القلب الإكليلي.

يتمثل التصوير الومنصاني لعضلة القلب في حقن نظائر مشعة تمكننا من تتبع أثناء إرواء عضلة القلب. يجري التصوير في حالة الراحة أو مجهد عضلي أو اثر جهد مفتعل عن طريق الأدوية. آل نظائر آل مشعة المستعملة عادة هي التاليلوم 201، السيستاميبي أو التروفوسمين المعلمة بالتكتسيوم-99m. يتم التقاط الصور المقطعيّة حسب ثلاث محاور (المحور الصغير، المحور الأفقي الكبير، المحور العمودي الكبير). تحليل الصور يتم عبر النظر أو باستعمال برامج حاسوبية.

يمكن الفحص بـ التصوير الومنصاني من التشخيص المبكر و الدقيق لداء القلب الإكليلي قبل ظهور الأعراض السريرية و أعراض مخطط القلب الكهربائي، نسبة الحساسية تقدر ب 93 % و نسبة الخصوصية 80 %. لذا المرضى الذين يشتكون من تضيق حاد في الشريانين الإكليلية سنجد نقصا في قبط آل نظائر آل مشعة ناتج عن قصور تروية عضلة القلب. إذا تبيّن أنّ نقص القبط أكثر وخامة و اتساعاً أثناء المجهود العضلي فهذا يدل على وجود إفقار. أما إذا كان نقص القبط لا عكوسا، حتى بعد حقن النظائر عند الراحة، فهذا دليل على وجود ندبة أو في بعض الحالات "إشتاء عضلة القلب".

يمكن التقاط الصور المقطعيّة بالتزامن مع مخطط القلب الكهربائي من إظهار ثانٍ لإرواء ووظيفة عضلة القلب.

التصوير الومنصاني بواسطة البوزيترونات يمكن من تحديد عيوبية عضلة القلب. تخطيط صدى القلب يمكن من تحليل وظيفة عضلة القلب. تصوير الإرواء بالرنين المغناطيسي قد يلعب دوراً مهماً في المستقبل، في انتظار دراسات موسعة.

يستعمل التصوير الومنصاني لعضلة القلب في تشخيص الذبحة الصدرية، لذا المرضى ذووا الاحتمال المتوسط لـ صابة داء القلب الإكليلي. و تفيد هذه الوسيلة بمعلومات إنذارية للمرض المزمن

ل عضلة القلبية. أخيراً فهو يستعمل لتشخيص إصابات القلب في إطار الأمراض المجموعة.

BIBLIOGRAPHIE

[1] Bertrand A.

Atlas pratique de scintigraphie cardiaque. p : 11
Scheltema, St-Louis 1977

[2] Cabrol C, Vialle R, Guérin-Surville H.

Anatomie du cœur humain, PCEM2 - EIA cardiologie, 2002 – 2003
Université PARIS-VI, Faculté de Médecine Pitié-Salpêtrière

[3] Croisille P.

Cardiopathies ischémiques (perfusion myocardique et viabilité) :
techniques et résultats, J Radiol 2004;85:1811-1818

[4] Nitenberg A, Foulx JM.

Réserve coronaire : évaluation dynamique de la circulation coronaire.
Arch Mal Cœur Vaiss 1987;80:33-42.

**[5] Moretti JL, Rigo P, Bischoff-Delaloye, Taillefer R, Gaillat-Vigne,
Ron N., Kargher G.**

Imagerie nucléaire fonctionnelle. p :104 ;117
Masson, Paris 1991

[6] Maublant J.

Quelles sont les indications de la scintigraphie myocardique, Ann Cardiol Angéiol, 1995 ; 44 : 427-432

[7] Dubois F.

Reconstruction des images tomographiques par rétroprojection filtrée,
Rev ACOMEN 1998, 4, n°2 : 92-99

[8] Buvat I.

Imagerie fonctionnelle en médecine nucléaire : Richesse des explorations possibles, CHU Pitié-Salpêtrière, II.1 Imagerie cardiaque, p :3-5

[9] Vuillez Jean Philippe

Examen au FDG en TEP.Biophysique et Médecine Nucléaire, CHU et Faculté de Médecine de Grenoble.

[10] Bendriem B.

Les détecteurs de positon : caméra PET - caméra PET-SPECT. Rev ACOMEN 1998;4:34-40

[11] Zerbib E.

Explorations radio-isotopiques en cardiologie, Encycl Méd chir, Cardiologie, 11-006-G-10, 2001, 10p

[12] Pennell D.J, Prvulovich E.

Clinicians guide to nuclear medicine. Nuclear cardiology. Impact healthcare, UK, 1995.

[13] Sabbah A., Bassand J.P

Explorations isotopiques en cardiologie, CHU de Besançon, 2005,
www.besancon-cardio.org

[14] Hammami H., Benbrahim H., Mhiri A., Letaief B., Kraeim T., Ben Sliméne MF

La scintigraphie myocardique de perfusion
La Tunisie médicale ; 2003, 81, 368-376

[15] Hajji L, Aouad A, Alami M, Ghannam R, Ouraoui T, Sadeli S, Benjelloun H, Benomar M.

Intérêt de l'effort couplé au dipyridamole dans la scintigraphie myocardique. La Tunisie Médicale, 1997, 75, 782-787

[16] Weich HF., Strauss HW., Pitt B.

The extraction of 201Tl by the myocardium. Circulation 1977; 56:188-191

[17] Manrique A, Marie P.Y.

Recommandations pour la réalisation et l'interprétation de la tomoscintigraphie de perfusion myocardique, Arch Mal Cœur, 96, juin 2003:694-711

[18] DePuey GE, Garcia EV.

Updated imaging guidelines for nuclear cardiology procedures: Part 1. J Nucl Cardiol 2001; 8: 1-54

[19] Rubinstein M, Laurent E, Stegen M

Explorations cardiaques. Dans : Manuel pratique de médecine nucléaire, Deboek université, 2000:34-51

[20] Taillefer R, Lambert R, Dupras G et coll.

Clinical comparison between thallium 201 and Tc-99m-methoxy isobutyl isonitrile myocardial perfusion imaging for the detection of coronary artery disease. Eur J Nucl Med 1989; 15:280-286

[21] Germano G, Kiat H, Kavanagh PB et coll

Automatic quantification of ejection fraction from gated myocardial perfusion SPECT. J Nucl Med 1995; 36:2138-47

[22] Iskandrian AS, Germano G, Vandecker et coll.

Validation of left ventricular volume measurements by gated SPECT
99mTC-labeled sestamibi imaging. J Nucl Cardiol 1998; 5 :574-578

[23] Germano G, Erel J, Kiat H, et coll.

Quantitative LVEF and qualitative regional function from gated thallium-
201 perfusion SPECT. J Nucl Med 1997; 38 :749-54

[24] DePuey EG, Parmett S, Ghesani M, et coll.

Comparison of Tc-99m sestamibi and Tl-201 gated perfusion SPECT. J
Nucl Cardiol 1999; 6 :278-85

[25] Bavelaar-croon CDL, Pauwels KJ, van der wall EE.

Gated single photon emission computed tomographic myocardial
imaging: A new tool in clinical cardiology. Am Heart J 2001, 141, 3:383-
90.

[26] Atsma DE, Croon CDL, Dibbets-Schneider P.

Good agreement between left ventricular ejection fraction and wall
motion score in gated SPECT versus contrast angiography (abstract).
J Nucl Cardiol 1999; 6 : S57

[27] Bacher-Stier C, Muller S, Pachinger O.

Thallium 201 gated single photon emission tomography for the
assessment of left ventricular ejection fraction and regional wall motion
abnormalities in comparison with two-dimensional echocardiography. Eur
J Nucl Med 1999; 26 : 1533-40

[28] Cwajg E, Cwajg J, He ZX.

Gated myocardial perfusion tomography for the assessment of left
ventricular function and volumes : comparison with echocardiography. J
Nucl Med 1999; 40 : 1857-65.

[29] Croon CDL, Atsma DE, Van der wall EE.

The additional value of gated SPECT myocardial imaging in patients with
and without previous myocardial infarction (Abstract). Eur J Nucl Med
1999; 26 : 1082.

[30] Miles KA.

How does gated SPECT alter reporting of myocardial perfusion studies?
Nucl Med Commun 1997; 18 : 915-21

[31] Yamashita K, Tamaki N, Yonekura Y.

Regional wall thickening of left ventricle evaluated by gated positron emission tomography in relation to myocardial perfusion and glucose metabolism. J Nucl Med 1991; 32 : 679-85

[32] Stolfuss JC , Haas F, Matsunari I.

99mTc-tetrofosmin SPECT for prediction of functional recovery defined by MRI in patients with severe left ventricular dysfunction : additional value of gated SPECT. J Nucl Med 1999; 40 : 1824-31

[33] Lopez A, Guitian R, Ruiz-Salmeron R. et coll.

A new protocol of sestamibi gated tomography can predict functional recovery of a/dyskinetic myocardial segments after long term successful revascularization : comparison with dobutamine echocardiography (Abstract). Eur J Nucl Med 1999; 26 : 962

[34] Gunning MG, Anagnostopoulos C, Davies G.

Simultaneous assessment of myocardial viability and function for the detection of hibernating myocardium using ECG-gated 99mTC-tetrofosmin emission tomography : a comparison with 201Tl emission tomography combined with cine magnetic resonance imaging. Nucl Med Commun 1999; 20 : 209-14.

[35] White HD, Norris RM, Brown MA.

Left ventricular end-systolic volume as the major determinant of survival after recovery from myocardial infarction. Circulation 1987; 76 : 44-51.

[36] Sharir T, Germano G, Kavanagh PB.

Incremental prognostic value of post-stress left ventricular ejection fraction and volume by gated myocardial perfusion single photon emission computed tomography. Circulation 1999; 100 : 1035-42.

[37] Tillish JH, Brunken R, Marshall R

Reversibility of cardiac wall motion abnormalities predicted by positron emission tomography. N Engl J Med 1986, 314, 884-8

[38] Wiggers H, Toftegaard T, Egebald H, Botker HE.

Positron emission tomography and low-dose dobutamine echocardiography in the prediction of postrevascularization improvement in left ventricular function and exercise parameters. Am Heart J 2000 ;140 :928-36

[39] ANAES (Agence Nationale d'Accréditation et d'Evaluation en Santé).

Evaluation du pronostic de l'insuffisance coronaire stable et modalités de suivi en dehors du traitement. 2000, www.anaes.fr.

[40] Mahmalian J, Verani MS.

Exercice thallium-201 perfusion scintigraphy in the assessment of coronary artery disease. Am J Cardiol 1991, 67(suppl): 2D-11D

[41] Kotler TS, Diamond GA.

Exercice thallium-201 scintigraphy in the diagnosis and prognosis of coronary artery disease. Arch Intern Med 1990, 113: 684-702

[42] Aouad A, Hajji L, Alami M, Ghanam R, Saadaoui M, Sadeli M, Benjelloun H, Benomar M.

Scintigraphie myocardique de stress: comparaison entre l'effort et le dipyridamole. Maghreb Medical, 301, mars 1996, 17-22.

[43] Leppo JA.

Dipyridamole-thallium imaging: the lazy man's stress test. J Nucl Med 1989, 30: 281-7

[44] Matzer L, Kiat H, Van Train K

Quantitative severity of stress thallium-201 myocardial perfusion single-photon emission computed tomography defects in one-vessel coronary artery disease. Am J Cardiol 1993, 72: 273-9.

[45] Schwartz RS, Jackson WG, Celio N et coll.

Accuracy of exercise 201TI myocardial scintigraphy in asymptomatic young men. Circulation 1993, 87: 165-172

[46] Kang X., Berman DS., Lewin H., Miranda R., Erel J.

Comparative ability of myocardial perfusion single-photon emission computed tomography to detect coronary artery disease in patients with and without diabetes mellitus. Am Heart J 1999 ; 137(5) : 949-57

[47] OUHAYOUN E, ESQUERRE J.P

Intérêt de la scintigraphie myocardique chez le diabétique. Revue de l'ACOMEN, 1999, vol.5, n°4, 372-80

[48] O'keefe JH, Bateman TM, Silvestri R, Barnhart G.

Safety and diagnostic accuracy of adenosine thallium-201 scintigraphy in patients unable to exercise and those with left bundle branch block. Am Heart J 1992, 124: 614-621

[49] Pézard P, Hélias J, Victor J, Lejeune JJ, Dupuis JM, Geslin, P, Jallet P, Tadei A.

Scintigraphie myocardique au thallium 201 et bloc de branche gauche : intérêt comparé de l'épreuve d'effort et de l'épreuve au dipyridamole. Arch Mal Cœur 1993 ; 86 :1693-9

[50] Vaquette B, Clergues F, Kalangos A, Dorsaz P, Righetti A.

Valeur pronostique de la tomoscintigraphie myocardique au thallium-201 sensibilisée au dipyridamole avant chirurgie artérielle périphérique. Arch Mal Cœur 2003 ; 96 :281-7

[51] Ashton CM, Petersen NJ, Wray NP, Kiete CI,

The incidence of perioperative myocardial infarction in men undergoing noncardiac surgery. Ann Intern Med 1993, 118 504-510

[52] Wong T, Detsky AS.

Preoperative cardiac risk assessment for patients having peripheral vascular surgery. Ann Intern Med 1992, 116: 743-753

[53] BROWN KA

prognostic value of thallium myocardial perfusion imaging. Circulation 1991, 83: 363-381

[54] National centre for health statistics : vital statistics of the United States, 1979: vol II, Mortality, part A. Washington DC, US government printing office, 1994

[55] Machecourt J, Longere P, Fagret D, Vanzetto G, Wolf JE, Polidori C.

Prognostic value of thallium-201 single photon emission computed tomographic myocardial perfusion imaging according to extent of myocardial defect. Study of 1926 patients with follow-up at 33 months. J Am Coll Cardiol 1994; 23:1096-106

[56] Hachamovitch R, Berman DS, Shaw LJ, Kiat H, Cohen I, Cabico JA.

Incremental prognostic value of myocardial perfusion single photon emission computed tomography for the prediction of cardiac death : differential stratification for risk of cardiac death and myocardial infarction. Circulation 1998; 97 : 535-43

[57] Hendel RC, Latden JJ, Lepo JA.

Prognostic value of dipyridamole thallium scintigraphy for evaluation of ischaemic heart disease. J Am Coll Cardiol 1990; 15: 109-16

[58] Kamal AM, Fattah AA, Pancholy S et coll.

Prognostic value of adenosine single photon emission computed tomographic thallium imaging in medically treated patients with angiographic evidence of coronary artery disease. J Nucl Cardiol 1994; 1 : 254-261

[59] Elliott BM, Robison JH, Zellner JL, Hendrix GH.

Dobutamine Tl-201 imaging. Assessing cardiac risks associated with vascular surgery. Circulation 1991; 84(suppl III) : 54-60

[60] Saha M, Farrand TF, Brown KA.

Lung uptake of technetium-99m sestamibi: relation to clinical, exercise, hemodynamic and left ventricular function variables. J Nucl Cardiol 1994; 1:52-6.

[61] Iskander S, Iskandrian AE.

Risk assessment using single photon emission computed tomography technetium-99m sestamibi imaging. J Am Cardio 1998; 32: 57-62

[62] Shaw LJ, Hendel R, Borges-neto S.

Prognostic value of normal exercise and adenosine 99m-Tc tetrofosmin SPECT imaging : results from the multicenter registry of 4728 patients. J Nucl Cardiol 2003; 44 : 134-9

[63] Ambrosi P, Bruneau P, Faugére G, Habib G, Poggi L, Luccioni R, Bernard PJ.

Valeur pronostique de la scintigraphie myocardique au thallium 201 chez l'hypertendu suspect de maladie coronaire. Ann Cardiol Angéiol, 1993, 42 (9), 479-483

[64] Steinberg EH, Koss JH, Lee M, et coll.

Prognostic significance from 10-year follow-up of a qualitatively normal planar exercise thallium test in suspected coronary artery disease. Am J Cardiol 1993; 71:1270-3

[65] Boucher CA, Zir LM, Beller GA, Okada RD, McKusick KA, Strauss HW.

Increased lung uptake of thallium-201 during exercise myocardial imaging : clinical, hemodynamic and angiographic implications in patients with coronary artery disease. Am J Cardiol 1980; 46 :189-96

[66] Cox JL, Wright LM, Bums RJ.

Prognostic significance of increased thallium-201 lung uptake during dipyridamole myocardial scintigraphy : Comparison with exercise scintigraphy. Can J Cardiol 1995; 11:689-94

[67] Weiss AT, Berman DS, Lew AS, Nielsen J, Potkin B, Swann HJ.
Transient ischaemic dilatation of the left ventricle on stress thallium-201 scintigraphy : a marker of severe and extensive coronary artery disease. J Am Coll Cardiol 1987; 9 : 752-9

[68] McClellan JR, Travins ML, Herman SD, Baron JI, Golub RJ, Gallagher JJ.

Prognostic importance of scintigraphic left ventricular cavity dilatation during intravenous dipyridamole technetium-99m sestamibi myocardial tomographic imaging in predicting coronary events. Am J Cardiol 1997; 79 : 600-5

[69] Landenhein ML, Pollock BH, Rozanski A, et coll.

Extent and severity of myocardial hypoperfusion as predictors of prognosis in patients with suspected coronary artery disease. J Am Coll Cardiol 1986; 7: 464-71

[70] Iskandrian AS, Chae SC, Heo J, Stanberry CD, Wasserleben V, Cave V.

Independent and incremental prognostic value of single photon emission computed tomographic thallium imaging in coronary artery disease. Am J Cardiol 1993; 22: 665-70

[71] Parkey RW, Bonte FJ, Meyser SL et coll.

A new method for radionuclide imaging of acute myocardial infarction in humans. Circulation 1974; 50 : 540-6

[72] Gibbons RJ, Verani MS, Behrenbeck T et cool.

Feasibility of tomographic 99mTc-hexamethylpropylene-2-methoxyisocyanide imaging for the assessment of myocardial area at risk and the effect of treatment in acute myocardial infarction. Circulation 1989; 80 : 1277-86

[73] Christian TF, Gibbons RJ, Gersch BJ.

Effect of infarct location on myocardial salvage assessed by technetium-99m isocyanide. J Am Coll Cardiol 1991; 17:303-8

[74] Huber KC, Bresnahan JF, Pellikka PA, et coll.

Measurement of myocardium at risk by technetium-99m sestamibi : correlation with coronary angiography. J Am Coll Cardiol 1992; 19 : 67-83

[75] Christian TF, Clements IP, Gibbons RJ

Non-invasive identification of myocardium at risk in patients with acute myocardial infarction and nondiagnostic electrocardiograms with technetium-99m sestamibi. Circulation 1991 ; 83 : 1615-20

[76] Bolli R.

Myocardial stunning in man. Circulation 1992; 86 : 1671-91

[77] Conversano A, Herrero P, Geltman EM, et coll.

Differentiation of stunned from hibernating myocardium by positron emission tomography (abstract). Circulation 1992; 86 : 107

[78] Vanoverschelde JJ, Wijns W, Depre C, et coll.

Mechanisms of chronic regional postischemic dysfunction in humans. New insights from the study of non-infarcted collateral dependent myocardium. Circulation 1993; 87 : 1513-23.

[79] Iskandrian AS, Heo J, Stanberry C.

When is myocardial viability an important issue? J Nucl Med 1994; 35(suppl) : 4S-7S

[80] Dilsizian V, Bonow RO.

Current diagnostic techniques of assessing myocardial viability in patients with hibernating and stunned myocardium. Circulation 1993 ; 87 : 1-20.

[81] Eitzman D, Al-aouar Z, Kanter HL, et coll.

Clinical outcome of patients with advanced coronary artery disease after viability studies with positron emission tomography. J Am Coll Cardiol 1992; 20 : 559-65.

[82] Dicarli M, Davidson M, Little R, et coll.

Value of metabolic imaging with positron emission tomography for evaluating prognosis in patients with coronary artery disease and left ventricular dysfunction. Am J Cardiol 1994; 74 : 527-33.

[83] Rahimtoola SH.

The hibernating myocardium. Am Heart J 1989; 117 : 211-3

[84] Cuocolo A, Maurea S, Pace L, et coll.

Resting technetium-99m sestamibi cardiac imaging in chronic coronary artery disease : comparison with rest-redistribution thallium-201 scintigraphy. Eur J Nucl Med 1993; 20 : 1186-92

[85] Dilsizian V, Arrighi JA, Diodati JG.

Myocardial viability in patients with chronic coronary artery disease.
Comparison 99mTC-sestamibi with thallium reinjection and 18F-fluorodeoxyglucose. Circulation 1994; 89 : 578-87

[86] Udelson JE, Coleman PS, Metherall J, et coll.

Predicting recovery of severe regional ventricular dysfunction.
Comparison of resting scintigraphy with 201Tl and 99mTc-sestamibi.
Circulation 1994; 89 : 2252-61

[87] Bonow RO.

Assessment of myocardial viability in hibernating myocardium. In :
Murray IPC, ELL PJ., Nuclear medicine in clinical diagnosis and
treatment. Churchill livingstone 1998; 1453-62

[88] Oudiz RJ, Smith DE, Pollak AJ, Mena I, Shapiro SM, Gintzon LE, Narahara KA.

Nitrate-enhanced thallium 201 single-photon emission computed
tomography imaging in hibernating myocardium. Am Heart J 1999; 138 :
369-75

[89] Nienaber CA, Brunken RC, Sherman CT, et coll.

Metabolic and functional recovery of ischaemic human myocardium after
coronary angioplasty (abstract). J Am Coll Cardiol 1991; 18 : 966-78

[90] Hultgren NH, Shettigar UR, Pfeifer JF.

Acute myocardial infarction and ischaemic injury during surgery for
coronary artery disease. Am Heart J 1977; 94 : 146-53

[91] Kolibash AJ, Goodnow JS, Bush CA, Tetelman M.

Improvement of myocardial perfusion and left ventricular function after
coronary artery bypass grafting in patients with unstable angina.
Circulation 1979; 59 : 66-74.

[92] Pfisterer M, Emmeneger H, Schmitt HE, et coll

Accuracy of serial myocardial perfusion scintigraphy with thallium for
prediction of graft patency early and late after coronary artery bypass
surgery. A controlled prospective study. Circulation 1982; 66 : 1017-24

[93] Guyon P, Caussin C, Bourachot ML, et coll.

Surveillance cardiological des patients ayant bénéficié d'une
angioplastie : importance de la scintigraphie myocardique avec épreuve
d'effort. Méd Nucl 1997 ; 21 : 197-200

[94] Rajagopal V, Gurm HS, Brunken RC, Pothier CE, Bhatt DL, Lauer MS.

Prediction of death or myocardial infarction by exercise single photon emission computed tomography perfusion scintigraphy in patients who have had recent coronary artery stenting. Am Heart J 2005;149:534- 40.

[95] Iskandrian AS, Haaz W, Segal RL, Kane SA

Exercice thallium 201 scintigraphy in evaluating aortocoronary bypass surgery. Chest 1982; 80: 11-15.

[96] ROUDAUT R,

Les myocardites aiguës : un piège diagnostique. Le journal faxe du cardiologue, 2001

[97] Weinmann P, Le Guludec D, Kebbou M, Bouton S, Maroni JP, Namade M, Faraggi M, Moretti, JL.

Apports de la scintigraphie myocardique aux anticorps antimyosine dans le diagnostic des myocardites aiguës. Arch Mal Cœur 1993 ; 86 : 297-305.

[98] Yasuda T, palacaios I, Dec G, et coll.

Indium-111 monoclonal antimyosin antibody imaging in the diagnosis of acute myocarditis. Circulation 1987; 76: 306-11.

[99] Parkey RW, Bonte FJ, Meyser SL et coll.

A new method for radionuclide imaging of acute myocardial infarction in humans. Circulation 1974; 50 : 540-6

[100] Constans J., Skopinski S., Barcat D., Conri C.

Atteinte du cœur et des vaisseaux au cours des sclérodermies systémiques. Ann Méd Int, Vol 153 - N° 4 - juin 2002, p. 242 – 249.

[101] Follansbee WP, Zerbe TR, Medsger TA.

Cardiac and skeletal muscle disease in systemic sclerosis (scleroderma): a high-risk association. Curr Cardiol, 1993; 125: 194-203.

[102] Candell-Riera J, Armadans-Gil L, Simeon CP.

Comprehensive non-invasive assessment of cardiac involvement in limited systemic sclerosis. Arthritis Rheum, 1996; 39: 1138-45.

[103] Steen VD, Follansbee WP, Conte CG, Medsger TA Jr.

Thallium perfusion defects predict subsequent cardiac dysfunction in patients with systemic sclerosis. Arthritis Rheum, 1996; 39: 677-81.

[104] Nakajima K, Taki J, Kawano M, et coll.

Diastolic dysfunction in patients with systemic sclerosis detected by gated myocardial perfusion SPECT: an early sign of cardiac involvement. J Nucl Med, 2001; 42: 183-8.

[105] MASSOT C.

Sarcoïdose (mise au point) Ann. Med. Interne 2001, Vol 152 n°1 p 27-52.
Vol 152 n°2 p 89-133

[106] Hongo M, Hirayama J, Fujii T.

Early identification of amyloid heart disease by technetium-99-m-pyrophosphate scintigraphy: a study with familial amyloid polyneuropathy. Am Heart J 1987, 113: 654-662

[107] Fournier C, Grimon G, Rinaldi JP, Terral a, Boujon B, Adams A, Desgrez A, Blondeau M.

La scintigraphie myocardique au pyrophosphate technétié dans l'amylose. Corrélations avec l'échographie doppler cardiaque. Arch Mal Cœur 1993 ; 86 : 1009-15

[108] Acar P, Maunoury C, De Montalembert M, Dulac Y.

Anomalies de la perfusion myocardique dans la drépanocytose de l'enfant : étude par la tomoscintigraphie myocardique. Arch Mal Cœur 2003 ; 96 : 507-10

[109] Acar P, Maunoury M, Bonnet D, Sébahoun S, Bonhoeffer P, Hallaj I, Aggoun Y, Sidi d.

Intérêt de la tomoscintigraphie au décours de la correction artérielle des transpositions des gros vaisseaux. Arch Mal Coeur ; 94 : 452-6

[110] Zaza S, Rapp F, Sigwart U.

Maladie coronarienne: avantages et désavantages des différents tests fonctionnels. Curriculum, Schweiz Med Forum 2004; 4:1237–1243

[111] MARWICK T, D'HONDT AM, BAUDHUIN T, Willemart B, Wijns W, Detry JM

Optimal use of dobutamine stress for the detection and evaluation of coronary artery disease: Combination with echocardiography or scintigraphy, or both ? J Am Coll Cardiol 1995, 22: 159-167

[112] TAKEUCHI M, ARAKI M, NAKASHIMA Y.

Comparison of dobutamine stress echocardiography and stress thallium-201 single-photon emission computed tomography for detecting coronary artery disease (Abstract). J Am Soc Echocardiogr 1993, 6: 593-602

[113] GALANTI G, SCIAGRA R, COMEGLIO M.

Diagnostic accuracy of peak exercise echocardiography in coronary artery disease: Comparison with thallium-201 myocardial scintigraphy. Am Heart J 1991; 122: 1609-1616

[114] QUINONES MA, VERANI MS, HALCHIN RM.

Exercise echocardiography versus thallium-201 single photon emission computed tomography in evaluation of coronary artery disease. Circulation 1992; 85: 1026-1031

[115] Garot J.

Magnetic Resonance Imaging of acute myocardial ischaemia and infarction. Arch Mal Coeur 2003; 96 : 1213-8.

[116] Manning WJ, Atkinson DJ, Grossman W, Paulin S, Edelman RR.

First-pass nuclear magnetic resonance imaging studies using gadolinium-DTPA in patients with coronary artery disease. J Am Coll Cardiol 1991;18:959-65.

[117] Wilke NM, Jerosch-Herold M, Zenovich A, Stillman AE.

Magnetic resonance first-pass myocardial perfusion imaging: clinical validation and future applications. J Magn Reson Imaging 1999;10:676-85.

[118] Klein C, Nekolla SG, Bengel FM.

Assessment of myocardial viability with contrast-enhanced magnetic resonance imaging: comparison with positron emission tomography. Circulation 2002; 105:162-7.

[119] Wagner A, Mahrholdt H, Holly TA.

Contrast-enhanced MRI and routine single photon emission computed tomography (SPECT) perfusion imaging for detection of subendocardial myocardial infarcts: an imaging study. Lancet 2003; 361:374-9.

[120] GO RT, MARWICK TH, MACINTYRE WJ.

A prospective comparison of robidium82 PET and thallium-201 SPECT myocardial perfusion imaging utilizing a single dipyridamole stress in the diagnosis of coronary artery disease. J Nucl Med 1990, 31: 1899-1905

[121] STEWART RE, SCHWAIGER M, MOUNA E.

Comparison of robidium82 positron emission tomography and thallium-201 SPECT imaging for detection of coronary artery disease. Am J Cardiol 1991, 67: 1303-1310

[122] Shaw LJ, Hachamovitch R, Berman DS.

The economic consequences of available diagnostic and prognostic strategies for the evaluation of stable angina patients: an observational assessment of the value of precatheterization ischemia. Economics of Noninvasive Diagnosis (END) Multicenter Study. J Am Coll Cardiol 1999 ; 33 : 661-9.

[123] Underwood SR, Godman B, Salyani S, Ogle JR, Ell PJ.

Economics of myocardial perfusion imaging in Europe—the EMPIRE study. Eur Heart J 1999;20:157-66.

[124] Klocke FJ, Baird MG, Lorell BH, Bateman TM, Messer JV, Berman DS.

ACC/AHA/ASNC guidelines for the clinical use of cardiac radionuclide imaging—executive summary: a report of the American College of Cardiology/American Heart Association Task Force on Practice Guidelines (ACC/AHA/ASNC Committee to Revise the 1995 Guidelines for the Clinical Use of Cardiac Radionuclide Imaging). J Am Coll Cardiol 2003;42(7):1318-33.

[125] Machecourt J, Vanzetto G, Fagret D, Comet M.

Algorithmes d'Utilisation de la Médecine Nucléaire dans l'Evaluation des Cardiopathies Ischémiques. Service de Médecine nucléaire - CHU de Grenoble. www.sante.ujf-grenoble.fr/sante/cardionc/cat.

Figures 1, 2, 3 :

Dalley AF, Myers JM.

Interactive atlas of human anatomy.CD-ROM, Ciba-Geigy 1995.