

■ Revues générales

Évaluation fonctionnelle de la maladie coronaire : revue des techniques disponibles

RÉSUMÉ : Il existe de très nombreuses publications sur l'exploration de la maladie coronaire par méthodes invasives et non invasives. Au sein d'une architecture décisionnelle parfois complexe, une notion fait largement consensus parmi les recommandations nationales et internationales : un geste de revascularisation est assorti d'un meilleur pronostic si la décision est fondée sur un critère fonctionnel et non pas seulement anatomique.

L'évaluation fonctionnelle de la maladie coronaire peut relever de la recherche d'une ischémie, par épreuve d'effort, scintigraphie myocardique, échographie d'effort, IRM de stress ou scanner de perfusion. Elle peut aussi reposer sur une estimation de la sévérité hémodynamique de la sténose elle-même, par FFR – devenu le critère de référence pour parler de sténose "significative" ou FFR-CT.

Deux nouveaux entrants vont sans doute apporter une contribution significative à la prise en charge de la maladie coronaire : le PET-Scanner et le QFR (*quantitative flow ratio*).



J.-M. FOULT

Hôpital américain de Paris, NEUILLY-SUR-SEINE.

De très nombreux travaux sont parus au cours des dernières décennies sur la manière d'évaluer la maladie coronaire. Les rôles respectifs des différents tests d'ischémie, du scanner coronaire et de la coronarographie ont été amplement discutés, mais une notion s'est progressivement imposée dans les recommandations internationales : un geste de revascularisation est plus efficace (s'accompagne d'un meilleur pronostic) s'il est décidé en tenant compte des résultats d'une information fonctionnelle plutôt qu'à la seule lecture d'une imagerie anatomique.

Schématiquement, il existe deux manières d'évaluer la sévérité fonctionnelle d'une sténose coronaire. Soit en recherchant une ischémie en aval de cette sténose, soit en analysant la sténose elle-même pour tenter d'apprécier son impact hémodynamique.

Initialement limité à l'épreuve d'effort, le catalogue raisonné des techniques de dépistage de l'ischémie myocardique s'est progressivement étoffé : scintigraphie myocardique, échographie de stress, IRM de stress, scanner de perfusion et bientôt PET-Scanner, le choix, désormais, est vaste.

S'agissant de l'appréciation du caractère "hémodynamique" d'une sténose, La FFR s'est imposée comme le critère de référence. Cette technique invasive pratiquée en cours de coronarographie est à l'origine de la FFR-CT – son pendant non invasif obtenu d'après des images de scanner –, la sévérité hémodynamique de la sténose étant alors calculée d'après un ensemble de paramètres notamment anatomiques. Enfin, nouvel entrant dans la rubrique, le QFR (*quantitative flow ratio*), réplique de la FFR-CT, mais appliquée aux images de coronarographie,

■ Revues générales

permet une appréciation de la sévérité fonctionnelle des sténoses en salle de coronarographie.

On résume, ici, les principales caractéristiques de ces différentes techniques, y compris du point de vue de leur disponibilité, de l'expertise qu'elles supposent et de la réalité économique dans laquelle elles s'inscrivent.

■ Le test d'effort

Le principe de l'épreuve d'effort est audacieux : il consiste à détecter une variation du signal électrique émis par un ensemble de cellules ischémiques chez un sujet en plein effort ! C'est donc bien la souffrance cellulaire elle-même qui est mise en évidence par le sous- (ou le sus) décalage du segment ST. À l'effort, la consommation d'oxygène du myocarde augmente. L'autorégulation permet à la circulation coronaire distale d'opérer une vasodilatation qui induit une augmentation du débit coronaire proportionnelle à l'accroissement de la demande métabolique. L'effort physique agit également sur les gros vaisseaux coronaires qui se dilatent d'environ 20 % lors d'un effort maximum, dès lors que l'endothélium des gros vaisseaux est sain. Si la fonction endothéliale est altérée, ce qui peut être le cas de certaines lésions athéromateuses, sténosantes ou non, l'effort induira au contraire une vasoconstriction, sorte de mini-spasme à l'effort.

Le débit coronaire est multiplié par un facteur 4 ou 5 chez un sujet normal. Cet accroissement est limité s'il existe une sténose proximale : dans ces conditions, l'augmentation de débit coronaire n'est pas suffisante pour répondre à l'accroissement de la demande métabolique, il y a ischémie.

L'épreuve d'effort est longtemps restée le seul examen non invasif pour approcher le diagnostic de maladie coronaire ; elle fut donc très largement pratiquée en pré-

sence de douleurs thoraciques suspectes à partir des années 1970, ce qui a permis de développer une large expérience de cette modalité à l'échelon national. Progressivement, le test d'effort s'est vu prescrit dans le cadre du dépistage chez des sujets plus jeunes et asymptomatiques, ayant donc une prévalence de maladie coronaire basse. Dans ces conditions, la sensibilité et la spécificité de l'examen sont très inférieures à ce qu'elles sont dans une population de sujets symptomatiques de plus de 60 ans. Avec l'avènement du scanner coronaire et du score calcique, le nombre de tests d'effort tend à diminuer en France.

■ La scintigraphie myocardique

En France, les techniques isotopiques prennent leur essor en cardiologie dans les années 1980, et c'est le test d'effort qui est le moyen utilisé pour créer une ischémie.

Pour tenir compte du fait que nombre de sujets ne sont pas en mesure de produire un effort "maximal", on a proposé de "remplacer" l'épreuve d'effort par une stimulation pharmacologique. Le Dipyridamole a été le premier agent utilisé : il induit une dilatation de la circulation coronaire distale, avec peu ou pas d'action sur les gros vaisseaux coronaires. Par la suite, de nombreuses équipes ont adopté le test "mixte" associant le Dipyridamole et l'effort, avec donc un effet à la fois sur la circulation coronaire proximale et distale.

Pour visualiser l'"ischémie", les techniques isotopiques font appel à l'utilisation de "traceurs", molécules qui sont captées par les cellules myocardiques au prorata du débit coronaire régional. Les photons émis par ces traceurs sont détectés par une caméra, mais la technologie dans son ensemble ne permet pas une réelle quantification du débit coronaire en valeur absolue : le système attribue une valeur de 100 % au territoire myocardique le mieux irrigué, et se cale sur

cette valeur pour les autres territoires. L'information obtenue ne porte donc pas – *stricto sensu* – sur l'ischémie, mais sur une "hypoperfusion relative" du myocarde. L'exemple – bien connu – est celui d'un sujet tritonculaire (ou présentant une sténose du tronc commun de l'artère coronaire gauche), dont l'épreuve d'effort est précocement positive avec un sous voire un sus-décalage du segment ST, alors que les images scintigraphiques sont "normales". En réalité, la perfusion myocardique est globalement diminuée, mais de manière homogène ; l'erreur est facilement rectifiée dès lors qu'on prend en compte les résultats du test d'effort, ainsi qu'une éventuelle chute de la fraction d'éjection à l'effort.

Une autre situation où l'absence de quantification du débit coronaire en valeur absolue pose problème est le domaine des CMNO, où la perfusion myocardique est souvent hétérogène en dehors de toute stimulation.

Malgré sa lourdeur et son caractère irradiant, la scintigraphie reste un examen de référence en raison de sa diffusion et de l'expérience accumulée sur plusieurs décennies au plan national.

■ L'échographie de stress

Que le stimulus soit pharmacologique (dobutamine) ou ergométrique (effort), le principe de l'écho de stress consiste à créer une ischémie par accroissement de la demande métabolique. S'agissant des techniques ultrasonores, ce n'est pas l'ischémie qui est visualisée directement, mais ses conséquences sur la contractilité segmentaire du ventricule gauche. Il faut souligner que l'anomalie de contraction est un phénomène retardé par rapport à l'altération de la perfusion myocardique, puisqu'il faut une réduction de plus de 50 % de la réserve coronaire pour voir apparaître une dysfonction régionale appréciable par les ultrasons. L'objet imagé étant la contractilité myocardique, toute altéra-

Réalités Cardiológicas,
en partenariat avec le **CNCF**,
vous invite à voir ou revoir
EN DIFFÉRÉ la webconférence

Que retenir de l'ESC 2024 ?



Modérateur : Dr François DIÉVART, Dunkerque

- Les grandes actualités de l'ESC
Dr François DIÉVART, Dunkerque
- Les actualités du congrès en HTA
Dr Marilucy LOPEZ-SUBLET, Bobigny
- Les actualités du congrès en lipidologie
Pr François SCHIELE, Besançon



<https://www.esc.realites-cardiologiques.com>

Inscription obligatoire – Webconférence réservée aux professionnels de santé.

Revue générale

tion pré-existante de la fonction vaguer l'examen, qu'il s'agisse d'une séquelle d'infarctus, d'un BBG ou d'une CMNO. Les performances de la technique sont augmentées par l'utilisation d'agents de contraste, qui autorisent la visualisation d'un éventuel défaut perfusionnel, mais alourdissent le protocole.

L'échographie de stress est une méthode non irradiante, dont le coût est inférieur aux autres techniques, et qui reste fortement opérateur-dépendante ; mais elle possède le grand avantage d'être très accessible, de nombreux cardiologues maîtrisant la technique et étant ainsi à même de réaliser les explorations de leurs patients [1].

L'IRM de stress

Comme l'échographie de stress, l'IRM de stress est une technique non irradiante qui possède une bonne résolution spatiale – meilleure que celle de la scintigraphie myocardique. C'est actuellement la seule imagerie capable de détecter une ischémie – ou une nécrose – limitée au sous-endocarde [2].

Le protocole consiste en l'administration intraveineuse d'un vasodilatateur coronaire distal (adénosine, régadénoson ou dipyridamole) suivie, au pic de l'hyperémie, d'une perfusion de Gadolinium qui se comporte comme un traceur de perfusion. La vasodilatation distale induit une forte élévation du débit coronaire dans les territoires sains, qui n'a pas lieu en aval d'une sténose proximale où le débit peut même chuter en valeur absolue (effet de "vol" coronaire). Il n'y a pas actuellement de diffusion significative des protocoles de quantification du débit coronaire en valeur absolue. L'IRM de stress permet donc de visualiser une hypoperfusion relative plus qu'une véritable ischémie. Par définition, elle n'explore pas la vasomotricité coronaire à l'effort.

L'IRM de stress est une technique dont les résultats sont bien corrélés à ceux de

la coronarographie et de la FFR, mais dont la diffusion est freinée d'une part par la nécessité d'une expertise médicale spécifique, et d'autre part par le fait que les examens du cœur sont longs et moins rentables que l'exploration des autres organes sur les équipements disponibles.

Le scanner de perfusion

Comme pour l'IRM de stress, le principe de détection de l'ischémie par scanner repose d'une part sur un test pharmacologique, et d'autre part sur la mise en évidence d'une différence d'atténuation entre myocarde sain et myocarde ischémique. Le stimulus vasodilatateur distal (adénosine, Dipyridamole, ou Regadenoson) crée une chute de pression en aval de la sténose qui induit un effet de "vol" au bénéfice des territoires normaux. Il existe donc une diminution du débit coronaire, relative ou en valeur absolue – en aval de la sténose –, et cette hypoperfusion induit une moindre atténuation des photons X émis par le tube du scanner (**fig. 1**). Il existe des valeurs seuils correspondant en principe à l'atténuation d'un territoire nécrosé, d'un territoire ischémique ou d'un territoire sain, mais elles ne sont pas standardisées à ce jour. Il est théori-

quement possible de quantifier le débit coronaire en valeur absolue en réalisant une acquisition dynamique sur une trentaine de secondes, les courbes temps-densité étant ensuite exploitées sur le modèle des compartiments utilisés en PET-CT [3].

En pratique, le scanner de perfusion n'est effectué en routine que par un nombre limité d'équipes, en raison de la lourdeur des protocoles, de l'absence de standardisation des résultats, d'une irradiation non négligeable, et de la nécessité d'un équipement haut de gamme. L'examen de la perfusion myocardique par scanner fait face à une absence de remboursement dans la plupart des pays.

Le PET-Scanner

Le PET-Cardio devrait faire son apparition en France à fin 2024 grâce à l'apparition d'un traceur de perfusion spécifique, le Rubidium 82. Il faut noter que la technique est utilisée dans la plupart des grandes nations depuis plus de dix ans. Le PET est une manière de "super-scintigraphie", le principe de l'examen étant en tous points comparable à celui d'une scintigraphie myocardique classique, avec la nuance que seul un test de provocation pharmacologique

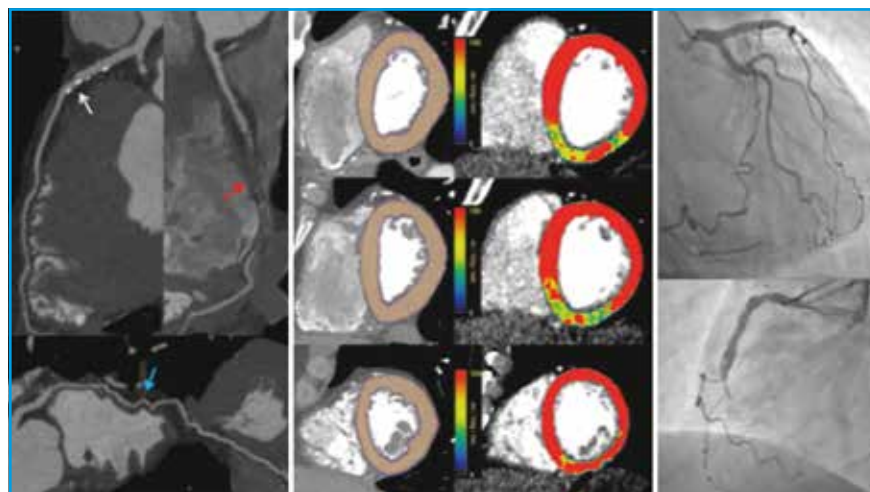


Fig. 1 : Images anatomiques (à gauche), fonctionnelles (au centre) et coronarographie (à droite).

POINTS FORTS

- De nombreuses techniques sont disponibles pour rechercher une ischémie myocardique.
- On peut également évaluer la sévérité fonctionnelle des sténoses au moyen de la FFR – devenue technique référence – et de la FFR-CT.
- Quelle que soit la méthode utilisée, un geste de revascularisation est assorti d'un meilleur pronostic si la décision est étayée par les résultats d'un test fonctionnel.
- Le PET-Scanner et le QFR sont deux techniques nouvelles qui vont contribuer à l'amélioration de la prise en charge de la maladie coronaire.

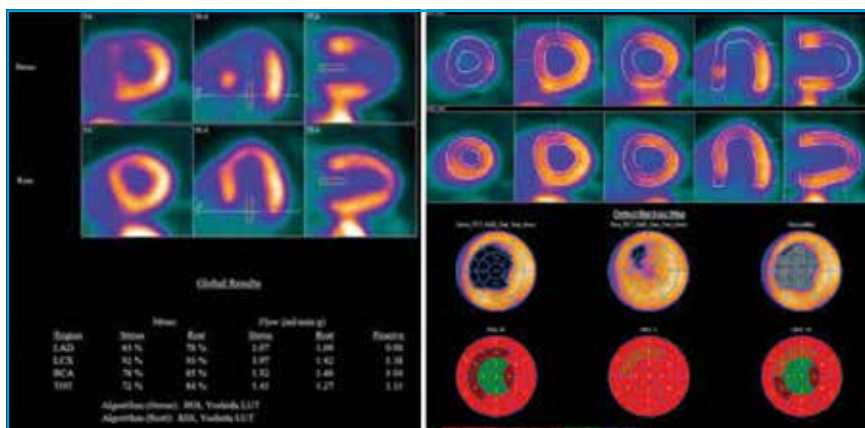


Fig. 2 : PET-Scanner. Imagerie de la perfusion myocardique et calcul de la réserve coronaire.

est utilisable, et que les performances de la technique, s'agissant du diagnostic de sténose "significative", sont considérées comme faisant référence. Une différence importante avec les autres techniques de détection de l'ischémie est la possibilité d'une quantification du débit et de la réserve coronaire en valeur absolue (fig. 2). Cette information chiffrée pourrait s'avérer essentielle pour décider d'une revascularisation, voire plus généralement pour situer le pronostic individuel [4].

■ La FFR

La FFR (*fractional flow reserve*) peut se décrire en trois rubriques : la FFR inva-

sive, mesurée lors d'une coronarographie, la FFR-CT, calculée d'après des images de scanner coronaire, et – dernier arrivant – le QFR (*quantitative flow ratio*) réplique de la FFR-CT, mais calculée sur des images de coronarographie.

1. La FFR invasive

La mesure est obtenue au moyen d'un guide de pression passé au travers d'une sténose. On recueille ainsi les pressions de part et d'autre de la sténose à l'état basal et après stimulation hyperémique, le plus souvent obtenue par injection d'Adénosine, puissant vasodilatateur coronaire distal. Dans un vaisseau coronaire normal, vasodilater la circulation distale ne crée pas

de gradient le long du gros vaisseau coronaire. Une sténose est considérée comme "significative" si le rapport pression distale/pression proximale chute en dessous de 0,8 lors du stimulus pharmacologique.

La mesure de la FFR nécessite une bonne expertise, car les causes d'erreur liées au positionnement du guide notamment ne sont pas rares [5].

De nombreuses études ont montré qu'une revascularisation guidée par la FFR génère une amélioration pronostique significative par rapport à une décision basée sur le seul aspect angiographique des sténoses.

La FFR invasive était très peu pratiquée en France, mais elle sera sans doute abandonnée avec le déremboursement des guides de pression et l'avènement du QFR.

2. La FFR-CT

Ce modèle non invasif de détermination de la FFR par scanner repose sur une adaptation de l'équation de Bernoulli. Les images scanographiques de la sténose sont quantifiées (longueur, diamètres tout au long de la sténose, angles d'entrée et de sortie, etc.), on estime le débit coronaire en faisant l'hypothèse qu'il est proportionnel à la masse myocardique, et la pression aortique est assimilée à la pression périphérique mesurée au brassard.

La FFR-CT est bien corrélée avec la FFR invasive, en sachant que la technique suppose des images scanographiques de qualité, ce qui élimine environ 20 % des examens.

L'algorithme de la société Heartflow est à notre connaissance le seul à avoir la validation FDA ; le modèle économique proposé est un paiement par patient – avoisinant les 1 000 \$ – qui n'a pas permis à cette solution de s'implanter en France [6].

■ Revues générales

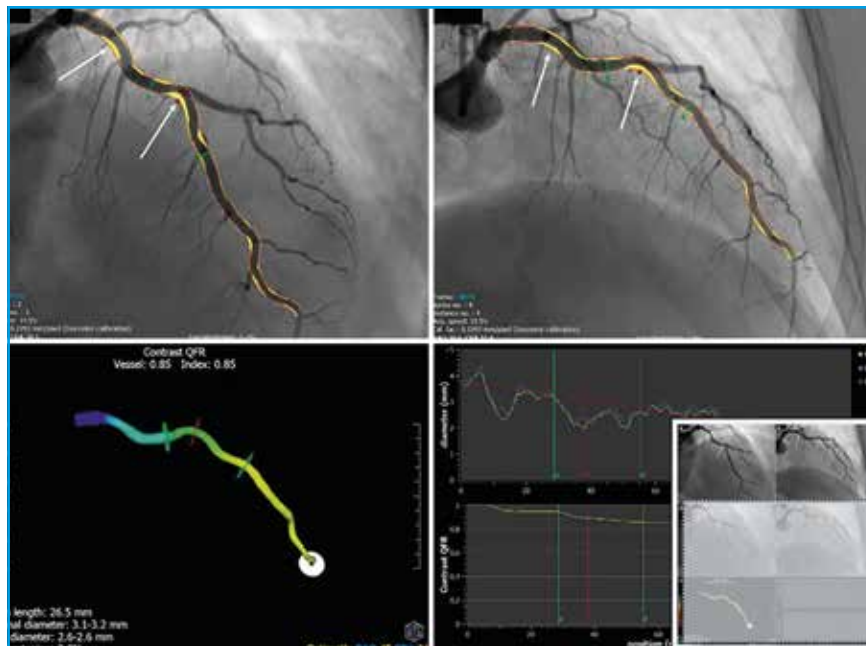


Fig. 3 : Calcul de la sévérité fonctionnelle des sténoses coronaires en cours de coronarographie (QFR).

3. Le QFR

D'apparition relativement récente, le QFR (*quantitative flow ratio*) permet une estimation de la sévérité physiologique d'une sténose en cours de coronarographie. Plusieurs sociétés présentent différentes solutions, par exemple QFR (Medis Medical Imaging System, Leiden, the Netherlands) ou FFRangio (Cathworks Ltd., Kfar Saba, Israel) (Kalidis et al). Ces algorithmes utilisent deux projections angiographiques ayant au moins 25° d'écart entre elles, quantifient les différentes dimensions de la sténose et estiment le débit par analyse séquentielle des images de flux (sur le mode TIMI), ou modélisent la sténose comme une résistance au sein d'un circuit électrique (*fig. 3*). Le QFR est bien corrélé à la FFR invasive et à la FFR-CT [7]. Plusieurs études montrent que les patients revascularisés en accord avec les résultats du QFR ont un meilleur pronostic qu'en se fondant sur le seul aspect angiographique des lésions.

Certains algorithmes proposent même une évaluation de la microcirculation

coronaire CMD (coronary microvascular dysfunction).

■ Conclusion

De nombreuses méthodes existent pour évaluer la sévérité fonctionnelle de la maladie coronaire. Certaines d'entre elles sont des tests d'ischémie, d'autres analysent la sévérité physiologique de la lésion elle-même. Plusieurs examens ont une implantation historique robuste dans notre pays (test d'effort, scintigraphie myocardique, écho de stress), d'autres se développent plus lentement (IRM de stress), d'autres enfin n'ont pas d'existence sur le terrain en raison d'une absence de remboursement (FFR, FFR-CT, scanner de perfusion). Deux nouveaux entrants pourraient apporter une contribution significative à la prise en charge de la maladie coronaire, un test d'ischémie non invasif, le PET-Scanner, et une mesure de la sévérité physiologique des sténoses réalisée en cours de coronarographie, le QFR (*quantitative flow ratio*).

BIBLIOGRAPHIE

1. IHEKWABA U, JOHNSON N, SOO CHOI JS *et al*. Long-term prognostic value of contemporary stress echocardiography in patients with suspected or known coronary artery disease: systematic review and meta-analysis. *Heart*, 2024;0:1-8.
2. PATEL AR, SALERNO M, KWONG RY *et al*. Stress cardiac magnetic resonance myocardial perfusion imaging: JACC review topic of the week. *J Am Coll Cardiol*, 2021;78:1655-1668.
3. Sliwicka O, Sechopoulos I, Baggiano A *et al*. Dynamic myocardial CT perfusion imaging-state of the art. *Eur Radiol*, 2023;33:5509-5525.
4. TOFTHOLM MH, HØJSTRUP S, TALLERUPHUUS U *et al*. 82-rubidium positron emission tomography determined myocardial flow reserve and outcomes following cardiac revascularisation - A multicentre registry study. *Int J Cardiol*, 2024; 405:131865.
5. SKALIDIS I, NOIRCLERC N, MEIER D *et al*. Head-to-head comparison of two angiography-derived fractional flow reserve techniques in patients with high-risk acute coronary syndrome: A multicenter prospective study. *Int J Cardiol*, 2024 ;399:131663.
6. HAN W, LIANG L, HAN T *et al*. Diagnostic performance of the quantitative flow ratio and CT-FFR for coronary lesion-specific ischemia. *Sci Rep*, 2024; 14:16969.
7. Kiyohara Y, Kishino Y, Ueyama HA *et al*. Comparison among various physiology and angiography-guided strategies for deferring percutaneous coronary intervention: A network meta-analysis. *Cardiovasc Revasc Med*, 2024;61:35-41.

L'auteur a déclaré ne pas avoir de liens d'intérêts concernant les données publiées dans cet article.