

EXPLORATION FONCTIONNELLE DE LA PHYSIOLOGIE CORONAIRE EN SALLE DE CARDIOLOGIE INTERVENTIONNELLE

WEERTS V (1), DAVIDSEN C (1), LEMPEUR M (1), MARÉCHAL P (1), MARTINEZ C (1), SALIHU A (2), DAVIN L (1), LANCELOTTI P (1, 3)

RÉSUMÉ : La cardiopathie ischémique, première manifestation clinique de la maladie cardiovasculaire athéromateuse, reste un enjeu majeur de santé publique. Si la coronarographie constitue la méthode de référence pour l'évaluation anatomique des lésions coronaires, elle présente des limites dans l'estimation de leur retentissement fonctionnel. Le recours à des techniques physiologiques invasives, telles que la «Fractional Flow Reserve» (FFR) ou ses équivalents au repos (iFR pour «Instantaneous Wave-Free Ratio», RFR pour «Resting Full-cycle Ratio»), permet une évaluation hémodynamique objective, notamment pour les lésions intermédiaires ou les atteintes pluritronculaires. Le développement d'outils dérivés de l'imagerie, comme le QFR ou le FFR_{CT}, ouvre la voie à une approche moins invasive, potentiellement intégrée en amont à un éventuel recours à une procédure de revascularisation. Cet article propose une revue pragmatique des méthodes disponibles, de leurs fondements physiologiques et de leur application en pratique interventionnelle.

MOTS-CLÉS : *Cardiopathie ischémique - Coronarographie - Physiologie coronaire - Évaluation fonctionnelle - Sténose coronaire*

FUNCTIONAL ASSESSMENT OF CORONARY ARTERY DISEASE IN THE INTERVENTIONAL CARDIOLOGY SUITE

SUMMARY : Ischemic heart disease, the main clinical expression of atherosclerotic cardiovascular disease, remains a leading global health challenge. While coronary angiography is the gold standard for anatomical assessment, it has limitations in determining the functional relevance of coronary lesions. Invasive physiological techniques - such as Fractional Flow Reserve (FFR) and its resting equivalents (iFR, RFR) - enable an objective hemodynamic evaluation, particularly useful in intermediate or multivessel diseases. Emerging imaging-derived tools, including QFR and FFR_{CT}, offer less invasive alternatives that may play an increasing role in the upstream decision-making process. This article provides a practical overview of the available modalities, their physiological rationale, and their integration into interventional practice.

KEYWORDS : *Ischemic cardiomyopathy - Coronarography - Coronary physiology - Functional assessment - Coronary stenosis*

INTRODUCTION

La coronarographie constitue la méthode de référence pour l'évaluation de l'anatomie coronarienne (1). Lors de sa réalisation, le cardiologue interventionnel est souvent confronté à deux situations problématiques : l'interprétation fonctionnelle de sténoses angiographiquement visibles, notamment en cas d'atteinte pluritronculaire, et l'absence de corrélation entre l'imagerie et les symptômes chez certains patients (2). Bien que les recommandations encouragent la recherche d'ischémie par des tests fonctionnels non invasifs avant toute revascularisation, ces examens restent insuffisamment réalisés et présentent parfois une sensibilité limitée. Par ailleurs, l'évaluation visuelle des lésions coronariennes par angiographie seule ne permet pas toujours de juger de leur sévérité fonctionnelle, en particulier pour les sténoses intermédiaires. Pour répondre à ces limites, plusieurs

techniques d'évaluation physiologique invasive ont été développées, qu'elles soient réalisées sous hyperhémie (FFR pour «Fractional Flow Reserve»), au repos (iFR pour «Instantaneous Wave-Free Ratio», RFR), ou dérivées d'outils d'imagerie (QFR, FFR_{CT}) (Tableau 1). Cet article présente les principes, modalités pratiques et données cliniques associés à ces différents outils, afin d'en guider l'intégration dans la pratique quotidienne.

PRINCIPES FONDAMENTAUX DE LA PHYSIOLOGIE CORONAIRE

Le cœur est l'organe ayant la plus forte consommation d'oxygène rapporté à sa masse tissulaire. Le réseau artériel coronaire est composé des artères coronaires épicaudiques et de sa microcirculation. Le débit coronaire est d'environ 70-80 mL/min/100 g de tissu au repos, mais peut dépasser les 300-400 mL/min/100 g de tissu à l'effort, représentant ainsi environ 5 % du débit cardiaque global (3). Le myocarde se contracte en systole, comprimant ainsi sa propre vascularisation; la perfusion s'effectue donc principalement en diastole, en fonction du gradient entre la pression artérielle diastolique et la pression télédiastolique du

(1) Service de Cardiologie, CHU Liège, Belgique.
(2) Service de Cardiologie interventionnelle, CHUV Lausanne, Suisse.
(3) GIGA Cardiovascular Sciences and Metabolism, CHU Liège, Belgique.

Tableau I. Stratégie d'utilisation des outils physiologiques coronariens

Outil	Type	Contexte clinique privilégié	Avantages pratiques	Seuil décisionnel
FFR	Invasif, avec hyperhémie	Lésions intermédiaires (50-70 %) Maladie pluritronculaire Décision pré-chirurgicale	Référence validée Données de haut niveau de preuve (DEFER, FAME)	$\leq 0,80$
iFR	Invasif, au repos	Contre-indication à l'adénosine NSTEMI stabilisé Cathé rapide ou multiples lésions à tester	Simple, rapide Pas de pharmacologie Non-infériorité démontrée	$\leq 0,89$
RFR	Invasif, au repos	Alternative à l'iFR Utilisé en routine selon équipement (Abbott®)	Pas d'hyperhémie Analyse sur tout le cycle cardiaque	$\leq 0,89$
QFR	Invasif, sans capteur	Lésion intermédiaire Deux angiographies orthogonales exploitables	Pas de fil intracoronaire Bonne corrélation FFR dans extrêmes	$< 0,75$ (évocateur) Zone grise: 0,75-0,85
FFR _{Angio}	Invasif, sans capteur	Lésion intermédiaire Trois angiographies exploitables	Pas de fil intracoronaire Bonne corrélation FFR	$\leq 0,80$: revasculariser $> 0,80$: non significatif
FFR _{CT}	Non invasif	Maladie stable Probabilité pré-test intermédiaire à élevée	Pas de coronarographie initiale Aide au tri en amont	$\leq 0,75$: revasculariser $> 0,80$: non significatif

Voir la signification des abréviations dans le texte.

ventricule gauche. En raison des pressions plus faibles dans le ventricule droit, un certain degré de perfusion systolique persiste au niveau de la coronaire droite, qui irrigue les cavités cardiaques droites.

Une des particularités du réseau coronaire est sa très forte extraction d'oxygène, estimée à 70-80 %, contre environ 25 % en moyenne pour les autres tissus. Lorsque la demande myocardique en oxygène augmente, le principal mécanisme d'adaptation est l'autorégulation du flux coronaire, qui repose sur une vasodilatation des artères coronaires. Ce processus permet d'augmenter le débit coronaire afin de maintenir un apport adéquat en oxygène. Cette vasodilatation est induite par l'hypoxie myocardique ou par l'activation du système sympathique, via la libération de médiateurs vasoactifs tels que l'adénosine ou le monoxyde d'azote (NO) (4).

Une sténose coronarienne devient cliniquement significative lorsqu'elle limite le débit sanguin au point de provoquer une ischémie et un angor. Dans les sténoses intermédiaires (réduction de 60-70 % du diamètre de la lumière coronaire), le débit coronaire reste suffisant au repos, mais devient inadéquat à l'effort. En cas de sténose sévère ($> 70-80$ %), le débit devient strictement pression-dépendant, et une ischémie myocardique peut survenir même au repos, malgré une vasodilatation coronaire maximale.

La compréhension approfondie de ces mécanismes physiopathologiques s'inscrit dans un continuum d'évolution de la prise en charge percutanée des pathologies coronariennes, en

favorisant une approche à la fois objective et personnalisée (5).

ÉVALUATION SOUS HYPERHÉMIE : FFR

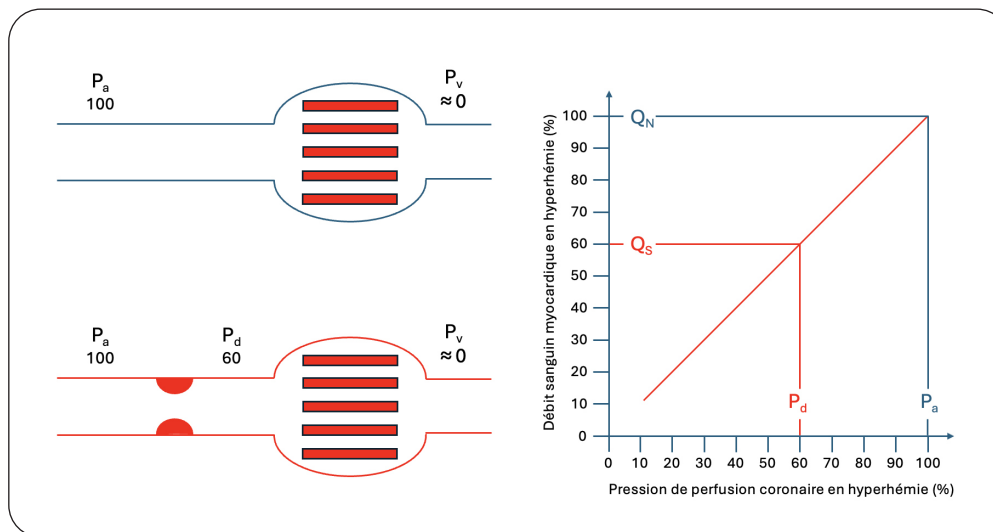
DÉFINITION

La réserve fractionnelle de flux coronaire («Fractional Flow Reserve», FFR) est une méthode invasive permettant d'évaluer la sévérité fonctionnelle d'une sténose coronaire. Elle repose sur le calcul du rapport de pression, en condition d'hyperhémie maximale, entre l'aval d'une sténose et un segment proximal supposé sain de la même artère (6). En situation d'hyperhémie, le flux coronaire est proportionnel à la pression, ce qui permet d'en déduire la sévérité de la sténose à partir des mesures de pression seules (Figure 1) (7).

EN PRATIQUE

En salle de coronarographie, un microfilament coronaire mesureur de pression (Pressure Wire Abbott®, Verrata ou Volcano Philips®) est positionné environ 30 mm en aval de la lésion coronarienne à évaluer (Figure 2). Ce microfilament est introduit au travers d'un cathéter appelé «guiding», lui-même inséré dans la circulation artérielle, le plus souvent par voie radiale. La procédure est réalisée sous héparinisation, en ciblant un temps de

Figure 1. Les grands principes du FFR et la relation linéaire entre débit et pression en état d'hyperhémie



P_a = pression systémique; P_d = pression distale (de la lésion); P_v = pression veineuse; Q_s = débit après la sténose; Q_N = débit systémique.

Figure 2. Coronarographie en vue crâniale (40°) face. Artère interventriculaire antérieure (IVA) sténosée et mise en place d'un microfilament FFR après la lésion



1 : Lésion sténosante de l'IVA qui va être étudiée; 2 : Extrémité distale du microfilament FFR qui est placé au-delà de la lésion.

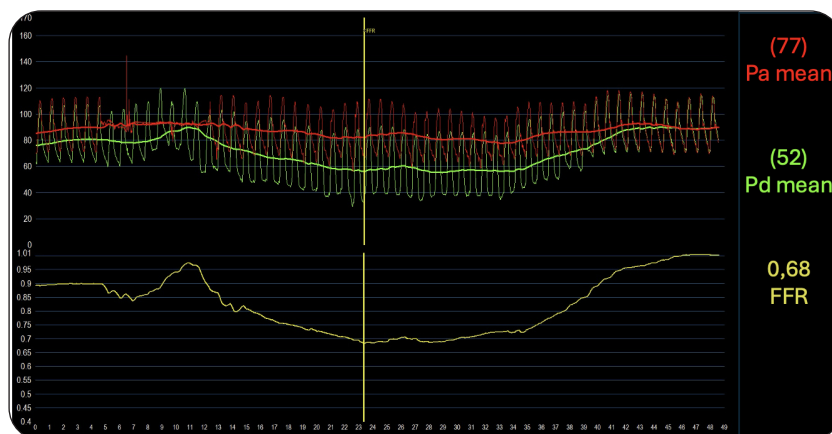
coagulation activé (TCA) de 250 ms. La pression artérielle de référence (P_a), correspondant à la pression aortique, est mesurée à l'extrémité du «guiding», habituellement positionné à l'ostium coronaire. Une dose de 300 μ g de monoxyde d'azote (NO) est injectée en intrac coronaire pour prévenir les phénomènes de spasme susceptibles d'altérer l'interprétation de la FFR. L'hyperhémie maximale est ensuite induite par l'injection intrac coronaire d'adénosine : 100 μ g pour la coronaire droite et 200 μ g pour la coronaire gauche (8). Cette hyperhémie se traduit

par une chute de la pression distale (P_d) en aval de la sténose. La FFR est définie par le rapport P_d/P_a , et la valeur la plus basse mesurée durant l'hyperhémie est retenue comme valeur de référence (Figure 3).

INTERPRÉTATION

Les Professeurs Pijls et De Bruyne, pionniers de la physiologie coronaire, ont initialement proposé une valeur seuil (cut-off) de 0,75 pour définir une sténose coronaire significative nécessitant

Figure 3. Courbes de pressions aortique (P_a) et intracoronaire distalement à la lésion (P_d). Condition d'hyperhémie avec visualisation d'une chute de la courbe P_d et calcul d'un FFR (P_d/P_a) à 0,68



une revascularisation. Leur première étude, publiée en 1996, a démontré qu'une angioplastie réalisée sur une lésion coronaire avec une FFR $< 0,75$ entraînait, chez tous les patients ($n = 21$), une réversibilité complète de l'ischémie préalablement mise en évidence par un test fonctionnel non invasif. À l'inverse, 21 des 24 patients ayant une FFR $\geq 0,75$ ne présentaient aucune ischémie détectable (9). En 2007 a été publiée la première étude randomisée sur 325 patients (étude DEFER) présentant un angor et une lésion coronarienne intermédiaire sans preuve d'ischémie (10). La cohorte a été répartie en deux groupes principaux : FFR $\geq 0,75$ ($n = 181$) et FFR $< 0,75$ ($n = 144$), ces derniers ayant bénéficié d'une angioplastie. Parmi les patients avec une FFR $\geq 0,75$, deux sous-groupes ont été constitués : l'un ayant reçu une angioplastie ($n = 90$), l'autre non ($n = 91$). L'étude a mis en évidence qu'il n'y avait aucun bénéfice clinique à 5 ans (survenue d'un infarctus, décès cardiovasculaire) à réaliser une angioplastie pour les lésions dont la FFR était $\geq 0,75$. Cependant, le groupe des 144 patients avec une FFR $< 0,75$ et traités par angioplastie présentait un pronostic cardiovasculaire moins favorable à 5 ans que les deux autres groupes avec un FFR $\geq 0,75$.

L'étude FAME 1 (11), publiée en 2009, est une large étude randomisée contrôlée incluant 1.005 patients ayant une maladie coronarienne modérée affectant plusieurs artères. La cohorte a été divisée en un groupe bénéficiant d'une angioplastie guidée par l'angiographie seule et l'autre groupe traité par angioplastie uniquement si la FFR était $\leq 0,80$. Les résultats ont montré une supériorité significative du groupe angioplastie guidée par FFR sur la réduction des

événements cardiovasculaires majeurs (MACE) à 1 an. À noter que les patients avec une FFR $> 0,80$ avaient aussi un excellent pronostic à 5 ans, avec moins d'1 % d'évènement cardiovasculaire par an.

L'étude FAME 1 a donc démontré un bénéfice clinique net, même avec une élévation du seuil de FFR. Elle suggère que les patients ayant une FFR entre 0,75 et 0,80 peuvent encore tirer avantage d'une angioplastie, et seraient parfois considérés à tort comme «faux négatifs» si l'on se basait uniquement sur l'ancien seuil de 0,75. Depuis lors, et dans les études ultérieures telles que FAME 2 (12) et FAME 3 (13), le seuil de positivité de la FFR justifiant une revascularisation a été fixé à $\leq 0,80$. Dans FAME 2, la FFR a démontré sa supériorité par rapport au traitement médical optimal chez des patients atteints de maladie coronarienne chronique avec au moins une sténose coronarienne $\leq 0,80$ (12).

ÉVALUATION AU REPOS (ÉTAT BASAL) : iFR ET RFR

L'INSTANTANEOUS WAVE-FREE RATIO (iFR)

L'Instantaneous wave-Free Ratio (iFR) est également une technique invasive d'étude de flux coronaire. Cette technique consiste à mesurer un rapport de pression (et donc indirectement de flux) entre l'aval d'une sténose coronarienne (P_d) et l'amont de la même artère (P_a), considérée saine. Comme pour la FFR, P_a correspond à la pression artérielle systémique. La différence principale avec la FFR est que l'iFR ne nécessite pas d'induction d'un état d'hyperhémie;

il peut être réalisé en condition basale. Le ratio P_d/P_a est mesuré pendant la diastole, phase du cycle cardiaque où les résistances vasculaires sont naturellement faibles (14). Cette période spécifique, située à distance de l'onde de pouls, est appelée «wave-free period» (Figure 4).

En pratique, l'iFR demande nettement moins de manipulation que la FFR, car aucun médicament n'est requis pour provoquer une hyperhémie. Les effets secondaires potentiels liés à l'adénosine ou à d'autres agents vasodilatateurs sont ainsi évités.

Les deux principales études ayant validé l'iFR sont DEFINE-FLAIR (15) et iFR Swedeheart (16). Ces deux essais randomisés contrôlés de grande ampleur (> 1.000 patients chacun) ont démontré la non-infériorité de l'iFR par rapport à la FFR pour la prédiction des MACE à 1 an. L'étude iFR Swedeheart a même inclus des patients présentant un syndrome coronaire aigu (SCA) (infarctus sans sus-décalage du segment ST ou angor instable) pour évaluer les lésions dites «non responsables» («non culprits»). Dans les deux études, le seuil de positivité utilisé est de 0,89. Toute lésion avec un iFR $\leq 0,89$ devait être revascularisée, au même titre qu'une lésion avec une FFR $\leq 0,80$.

LE RESTING FULL-CYCLE RATIO : RFR

Le Resting Full-cycle Ratio (RFR) est une troisième technique invasive d'évaluation du

flux coronaire, qui présente l'avantage, comme l'iFR, d'être réalisée en condition basale. Plus récente, cette méthode a été développée par la firme Abbott®. Elle a démontré sa non-infériorité par rapport à l'iFR (17) et à la FFR (18) en termes de cohérence des résultats du ratio P_d/P_a . À ce jour, aucune étude de grande envergure n'a encore été publiée avec des événements cliniques comme critère de jugement principal. La différence physiologique entre le RFR et l'iFR réside dans la période du cycle cardiaque au cours de laquelle le ratio P_d/P_a est mesuré (Figure 4). Contrairement à l'iFR, qui se limite à la diastole, le RFR calcule ce ratio sur l'ensemble du cycle cardiaque. Le seuil de positivité est identique à celui de l'iFR; toute lésion avec un RFR $\leq 0,89$ est considérée comme significative et devrait être revascularisée.

MÉTHODES ÉMERGENTES EN PHYSIOLOGIE CORONAIRE

Le caractère invasif demeure la principale limite des techniques FFR, iFR et RFR, qui requièrent une coronarographie et l'introduction intracoronaire d'un microfilament de mesure. Malgré un profil de sécurité favorable, un risque per-procédural subsiste, ce qui a conduit à rechercher des méthodes moins invasives.

Figure 4. RFR et iFR : Onde de pouls artérielle mesurée invasivement



P_d = pression mesurée avec le guide FFR en distalité de la lésion. iFR : le ratio P_d/P_a est mesuré en diastole, pendant la «wave-free period». RFR : le ratio P_d/P_a est mesuré durant l'entièreté du cycle cardiaque.

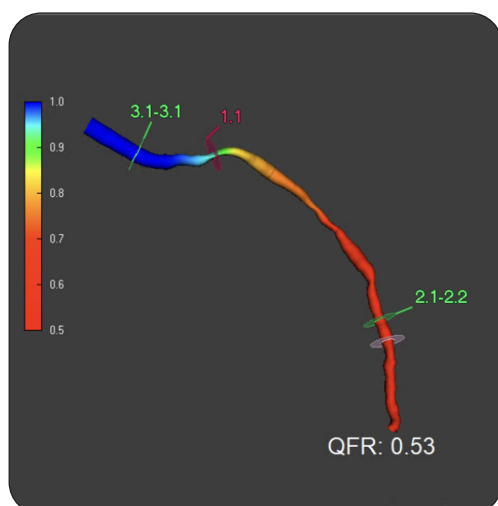
LE QUANTITATIVE FLOW RATIO (QFR) ET LE FRACTIONAL FLOW RESERVE ANGIO (FFR_{Angio})

Le Quantitative Flow Ratio (QFR) est une nouvelle méthode de mesure de flux coronaire basée sur une lecture informatique de type FFR à partir de reconstructions tridimensionnelles d'acquisitions angiographiques du réseau coronaire. Un QFR reste un geste invasif car il nécessite une coronarographie, mais n'implique pas l'insertion d'un microfilament capteur de pression en intrac coronaire. Il ne nécessite que l'injection de contraste lors des acquisitions, sans hyperhémie (Figure 5), comme l'a démontré la première étude pilote FAVOR, où le QFR a prouvé sa supériorité par rapport au jugement angiographique visuel des lésions coronaires. (19)

Le QFR présente une excellente corrélation avec la FFR, et les deux méthodes sont mêmes complémentaires. Un QFR < 0,75 serait corrélé avec une FFR ≤ 0,80, avec une sensibilité et une spécificité, respectivement, de 96 % et 84 %. Un QFR compris entre 0,75 et 0,85 pourrait justifier la réalisation d'une FFR pour affiner l'évaluation de la lésion (20). Le QFR pourrait ainsi éviter le recours à un microfilament de pression pour certaines lésions où l'angiographie seule ne permet pas d'en évaluer précisément la sévérité.

Néanmoins, dans une étude clinique randomisée récente appelée FAVOR III (21), le QFR n'a pas atteint les critères de non-infériorité pour les résultats cliniques, en comparaison à la FFR.

Figure 5. QFR (Quantitative Flow Ratio) d'une artère interventriculaire antérieure (IVA) avec une valeur à 0,53 témoignant de l'aspect hémodynamiquement significatif de la lésion



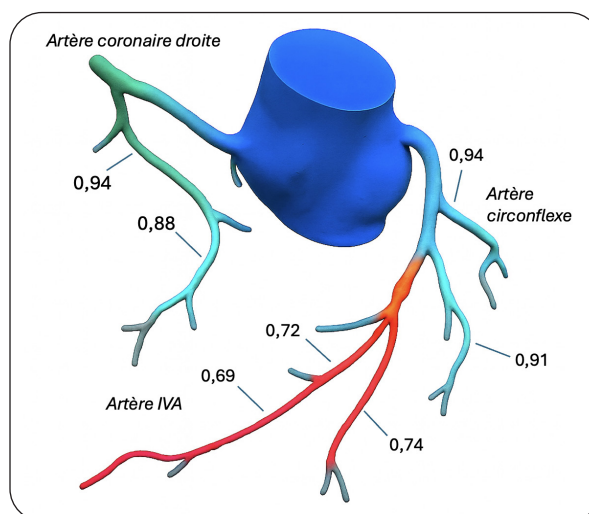
La FFR_{Angio} (CathWorks) est une autre méthode computationnelle d'évaluation du flux coronaire reposant exclusivement sur l'imagerie angiographique. L'étude FAST-FFR (22) a démontré une bonne corrélation et reproductibilité par rapport à la FFR invasive de référence. Des essais cliniques en cours, notamment l'étude ALL-RISE, visent à évaluer sa non-infériorité sur des critères cliniques robustes. Les résultats sont attendus dans un avenir proche.

LA RÉSERVE FRACTIONNELLE DE FLUX DÉRIVÉE DE LA TOMOGRAPHIE ASSISTÉE PAR ORDINATEUR (FFR_{CT})

La réserve fractionnelle de flux dérivée de la tomographie assistée par ordinateur (FFR_{CT}) est une nouvelle technique non invasive d'évaluation du flux. Elle permet de déterminer le caractère fonctionnel d'une sténose coronaire à partir d'images obtenues par coroscanner (Figure 6). La FFR_{CT} est ainsi la méthode la moins invasive, car elle ne nécessite pas de coronarographie.

Initialement, l'analyse des images était réalisée dans des centres spécialisés à l'aide de calculs de dynamique des fluides appliqués aux images scannographiques, ce qui impliquait l'envoi des données et un certain délai pour l'obtention des résultats. Cependant, les avancées en informatique ont permis le développement de nouveaux algorithmes. En particulier, des formes d'intelligence artificielle avec apprentissage automatique permettent, désormais, une interprétation fonctionnelle des images de

Figure 6. Reconstruction 3D d'un coronaroscanner avec étude informatique FFR_{CT}



Les couleurs bleues renseignent des segments coronariens sans lésion fonctionnellement significative alors que les couleurs rouges (< 0,75) correspondent à des rétrécissements significatifs.

coronaroscanner et la détermination d'une FFR_{CT} . Une lésion dont la FFR_{CT} est $\leq 0,75$ devrait faire l'objet d'une revascularisation, tandis qu'une lésion $> 0,80$ n'est généralement pas considérée responsable d'une ischémie (23). Il persiste toutefois une zone grise entre 0,75 et 0,80, dans laquelle environ 55 % des lésions donneraient une réduction du flux coronaire significative (24).

L'étude FORECAST a montré que la FFR_{CT} permettait de réduire significativement le recours à la coronarographie diagnostique. De plus, les coronarographies réalisées après une FFR_{CT} étaient moins souvent négatives et aboutissaient plus fréquemment à une revascularisation (25). La récente étude TARGET a comparé l'efficacité de la FFR_{CT} à celle d'une prise en charge habituelle basée sur des tests fonctionnels non invasifs (26). L'étude a inclus des patients ayant une probabilité pré-test modérée ou élevée de maladie coronarienne intermédiaire. Elle a démontré que la FFR_{CT} diminuait le nombre global de coronarographies, tous en augmentant celui des revascularisations, toutefois sans bénéfice clinique démontré à 1 an. La FFR_{CT} présente également un intérêt potentiel en termes de coût, avec une réduction des dépenses liées à la prise en charge de la maladie coronarienne stable.

La FFR_{CT} est donc un outil prometteur pour le cardiologue interventionnel et pourrait, à terme, supplanter la coronarographie diagnostique. Elle doit cependant encore faire ses preuves dans de grandes études randomisées incluant des critères cliniques.

APPLICATION PRATIQUE ET STRATÉGIE D'UTILISATION

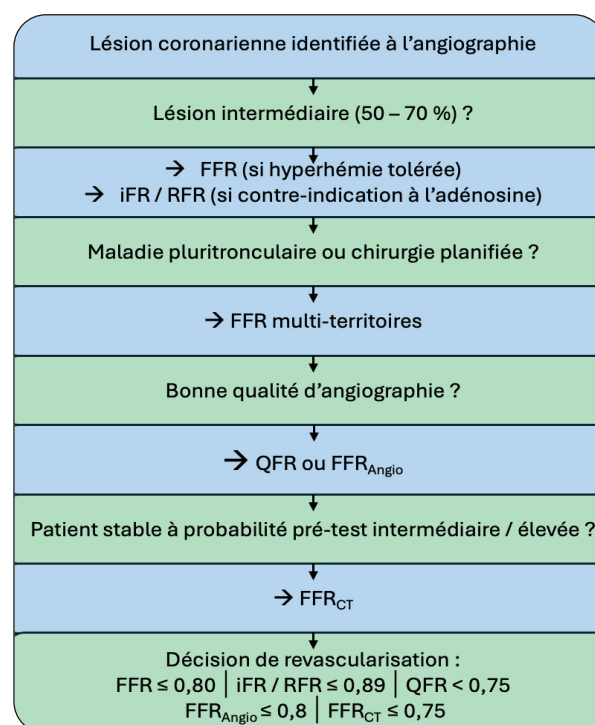
L'évaluation fonctionnelle des lésions coronariennes repose sur l'intégration raisonnée des indices physiologiques à la décision interventionnelle (Figure 7). En présence d'une sténose angiographiquement intermédiaire (50-70 %), la mesure d'un paramètre invasif (FFR , iFR ou RFR) est indiquée pour confirmer l'ischémie, conformément aux recommandations de la Société Européenne de Cardiologie (ESC, classe IA). La FFR , mesurée sous hyperhémie maximale induite, reste la technique de référence, notamment en cas de maladie pluritronculaire, en cas de lésion unique non testée, notamment avant une revascularisation étendue ou dans les stratégies de planification pré-chirurgicale, comme cela a été validé dans les études FAME 1 et 2.

Les indices non hyperhémiques (iFR , RFR), dont l' iFR qui a été validé dans les études DEFINE-FLAIR et iFR Swedeheart, offrent une évaluation équivalente à la FFR , tout en améliorant la tolérance et en réduisant le temps opératoire. Ils sont préférentiellement utilisés dans les contextes où l'administration d'adénosine est contre-indiquée ou non souhaitée, notamment chez les patients âgés, fragiles, ou en post-syndrome coronarien aigu différé.

Les méthodes de simulation computationnelle, comme le QFR ou la $\text{FFR}_{\text{Angio}}$, dérivées d'une modélisation tridimensionnelle des acquisitions angiographiques, représentent une alternative prometteuse pour éviter l'instrumentation intracoronaire. Le QFR peut être particulièrement utile lorsque les conditions d'imagerie sont optimales, avec de bonnes performances prédictives pour les valeurs extrêmes ($< 0,75$ ou $> 0,85$). Cependant, la dernière étude FAVOR III fait l'objet de nombreuses discussions, puisque la non-infériorité n'a pas été démontrée. De futures études sont attendues, particulièrement pour la $\text{FFR}_{\text{Angio}}$.

Enfin, la FFR_{CT} , entièrement non invasive, s'inscrit dans une approche d'amont,

Figure 7. Algorithme d'évaluation physiologique des lésions coronariennes



Ce schéma guide l'utilisation des techniques FFR , iFR , RFR , QFR , $\text{FFR}_{\text{Angio}}$ et FFR_{CT} selon les caractéristiques de la lésion, le contexte clinique et les outils disponibles (voir la signification des abréviations dans le texte).

notamment pour les patients stables à probabilité pré-test intermédiaire à élevée. Elle a montré sa capacité à améliorer la pertinence des indications de coronarographie (étude FORECAST) et à réduire le nombre d'examens inutiles, bien que l'impact sur les critères cliniques durs reste à confirmer (étude TARGET).

CONCLUSION

L'évaluation fonctionnelle des lésions coronariennes s'est imposée comme un complément indispensable à l'analyse anatomique en coronarographie, en particulier dans les cas de sténoses intermédiaires ou de maladie plurifonctionnelle. Les techniques invasives telles que la FFR, l'iFR et le RFR permettent d'affiner les décisions de revascularisation en s'appuyant sur des critères objectifs validés par de nombreuses études. Parallèlement, le développement de méthodes alternatives moins invasives, comme le QFR, la FFR_{Angio} ou la FFR_{CT}, ouvre de nouvelles perspectives, notamment dans l'optimisation du parcours diagnostique et la sélection des patients à adresser en salle de cathétérisme. Ces outils, de plus en plus précis et accessibles, contribuent à une approche plus personnalisée et raisonnée de la revascularisation coronaire. L'intégration pragmatique de ces technologies dans la pratique quotidienne constitue aujourd'hui une étape essentielle pour améliorer la qualité des décisions thérapeutiques et les résultats cliniques des patients.

BIBLIOGRAPHIE

- Gach O, Davin L, Lempereur M, et al. Coronarographie diagnostique. *Rev Med Liege* 2019;**74**(Suppl1):17-21.
- Maréchal P, Lempereur M, Gach O, Lancellotti P. Évaluation physiologique invasive de la maladie coronarienne. *Rev Med Liege* 2019;**74**(Suppl1):22-8.
- Ramanathan T, Skinner H. Coronary blood flow. *Continuing Education in Anaesthesia Critical Care Pain* 2005;**5**:61-4.
- Deussen A, Ohanyan V, Jannasch A, et al. Mechanisms of metabolic coronary flow regulation. *J Mol Cell Cardiol* 2012;**52**:794-801.
- Gach O, Davin L, Lempereur M, et al. Angioplastie coronaire transluminale percutanée : de la révolution à l'évolution. *Rev Med Liege* 2019;**74**(Suppl1):34-8.
- Pijls NH, Van Son J, Kirkeeide R, et al. Experimental basis of determining maximum coronary, myocardial, and collateral blood flow by pressure measurements for assessing functional stenosis severity before and after percutaneous transluminal coronary angioplasty. *Circulation* 1993;**87**:1354-67.
- De Bruyne B, Sarma J. Fractional flow reserve: a review: invasive imaging. *Heart* 2008;**94**:949-59.
- Adedji J, Toth GG, Johnson NP, et al. Intracoronary adenosine: dose-response relationship with hyperemia. *JACC Cardiovasc Interv* 2015;**8**:1422-30.
- Pijls N, De Bruyne B, Peels K, et al. Measurement of fractional flow reserve to assess the functional severity of coronary artery stenosis. *N Engl J Med* 1996;**334**:1703-8.
- Pijls NH, van Schaardenburgh P, Manoharan G, et al. Percutaneous coronary intervention of functionally nonsignificant stenosis: 5-year follow-up of the DEFER Study. *J Am Coll Cardiol* 2007;**49**:2105-11.
- Tonino PA, De Bruyne B, Pijls NH, et al. Fractional flow reserve versus angiography for guiding percutaneous coronary intervention. *N Engl J Med* 2009;**360**:213-24.
- De Bruyne B, Pijls NH, Kalesan B, et al. Fractional flow reserve-guided PCI versus medical therapy in stable coronary disease. *N Engl J Med* 2012;**367**:991-1001.
- Fearon WF, Zimmermann FM, De Bruyne B, et al. Fractional flow reserve-guided PCI as compared with coronary bypass surgery. *N Engl J Med* 2022;**386**:128-37.
- Sen S, Escaned J, Malik IS, et al. Development and validation of a new adenosine-independent index of stenosis severity from coronary wave-intensity analysis: results of the ADVISE (Adenosine Vasodilator Independent Stenosis Evaluation) study. *J Am Coll Cardiol* 2012;**59**:1392-402.
- Davies JE, Sen S, Dehbi HM, et al. Use of the instantaneous wave-free ratio or fractional flow reserve in PCI. *N Engl J Med* 2017;**376**:1824-34.
- Gotberg M, Christiansen EH, Gudmundsdottir IJ, Fractional flow reserve to guide PCI. *N Engl J Med* 2017;**376**:1813-23.
- Kumar G, Desai R, Gore A, et al. Real world validation of the nonhyperemic index of coronary artery stenosis severity-Resting full-cycle ratio-REVALIDATE. *Catheter Cardiovasc Interv* 2020;**96**:E53-E8.
- Malmberg S, Lauerma J, Karlstrom P, et al. Resting full-cycle ratio versus fractional flow reserve: A SWEDEHEART-Registry-Based comparison of two physiological indexes for assessing coronary stenosis severity. *J Interv Cardiol* 2023;**2023**:6461691.
- Tu S, Westra J, Yang J, et al. Diagnostic accuracy of fast computational approaches to derive fractional flow reserve from diagnostic coronary angiography: the International Multicenter FAVOR Pilot Study. *JACC Cardiovasc Interv* 2016;**9**:2024-35.
- Yazaki K, Otsuka M, Kataoka S, et al. Applicability of 3-dimensional quantitative coronary angiography-derived computed fractional flow reserve for intermediate coronary stenosis. *Circ J* 2017;**81**:988-92.
- Andersen BK, Sejr-Hansen M, Maillard L, et al. Quantitative flow ratio versus fractional flow reserve for coronary revascularisation guidance (FAVOR III Europe): a multicentre, randomised, non-inferiority trial. *Lancet* 2024;**404**:1835-46.
- Fearon WF, Achenbach S, Engstrom T, et al. Accuracy of fractional flow reserve derived from coronary angiography. *Circulation* 2019;**139**:477-84.
- Rajiah P, Cummings KW, Williamson E, Young PM. CT Fractional flow reserve: a practical guide to application, interpretation, and problem solving. *Radiographics* 2022;**42**:340-58.
- Norgaard BL, Hjørt J, Gaur S, et al. Clinical use of coronary CTA-derived FFR for decision-making in stable CAD. *JACC Cardiovasc Imaging* 2017;**10**:541-50.
- Curzen N, Nicholas Z, Stuart B, et al. Fractional flow reserve derived from computed tomography coronary angiography in the assessment and management of stable chest pain: the FORECAST randomized trial. *Eur Heart J* 2021;**42**:3844-52.
- Yang J, Shan D, Wang X, et al. On-Site computed tomography-derived fractional flow reserve to guide management of patients with stable coronary artery disease: the TARGET randomized trial. *Circulation* 2023;**147**:1369-81.

Les demandes de tirés à part doivent être adressées au
Pr Lancellotti P, service de cardiologie, CHU Liège, Belgique.
Email : plancellotti@chuliege.be