

Microcirculation coronaire : une approche mécanique du problème de re-sténose après pontage

Agnès Drochon, Jean-Philippe Verhoye, Bertrand de Latour, Marie Hagneré, Hervé Corbineau

▶ **To cite this version:**

Agnès Drochon, Jean-Philippe Verhoye, Bertrand de Latour, Marie Hagneré, Hervé Corbineau. Microcirculation coronaire : une approche mécanique du problème de re-sténose après pontage. 17e Congrès Français de Mécanique, Sep 2005, Troyes, France. hal-02072366

HAL Id: hal-02072366
https://hal.utc.fr/hal-02072366

Submitted on 2 May 2023

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

Microcirculation coronaire : une approche mécanique du problème de re-sténose après pontage

Agnès Drochon[1], Jean-Philippe Verhoye[2], Bertrand De Latour[2], Marie Hagneré[1], Hervé Corbineau[2]

[1] UMR CNRS 6600 « Biomécanique et Génie Biomédical » Université de Technologie de Compiègne 60200 Compiègne
[2]Service de Chirurgie Thoracique et Cardiovasculaire CHU Pontchaillou 35000 Rennes

Résumé :

L'objectif de cette étude est de caractériser, à partir de mesures de débits et de pression réalisées en per-opératoire, la fonctionnalité des réseaux collatéraux développés au cours du temps chez des patients coronariens tri-tronculaires (présentant une thrombose sur l'artère coronaire droite et des sténoses sur les 2 artères gauche). Un schéma biomécanique simple est proposé et discuté pour décrire cette situation clinique.

Abstract :

The aim of this study is to more precisely assess the collateral flow in patients with three-vessel disease and chronic occlusion of the right coronary artery. Data of pressure and flow rate acquired during surgical complete revascularization with the off-pump technique are analysed through a simple biomechanical model.

Mots clefs :

Microcirculation coronaire ; collatéralité ; réseaux de suppléance

1 Contexte

L'athérosclérose est la principale cause de maladies cardiovasculaires, provoquant des sténoses et des thromboses des artères coronaires. L'étude porte sur des patients dont l'artère coronaire droite est thrombosée (le réseau droit n'est donc plus alimenté par cette artère) et où les deux artères coronaires gauches sont sténosées (obstruction partielle) (un rappel sur l'anatomie des artères coronaires est présenté Figure 1). A l'heure actuelle, pour de tels cas cliniques, il est préconisé la pose de trois pontages. Mais ce triple pontage demeure une opération chirurgicale lourde pour le chirurgien et surtout pour les patients; et d'autre part, il a été observé que le pont droit (servant à shunter la thrombose) finit par être obstrué à son tour quelques années après l'intervention chirurgicale. En effet, chez les patients présentant une collatéralité (réseau microcirculatoire de suppléance) efficace entre les réseaux gauche et droit, une situation de compétition de flux peut apparaître après la pose du pont droit, entraînant un phénomène de resténose. D'où l'idée de ne pas recourir à ce pontage droit à condition d'être sûr du bon fonctionnement du réseau collatéral. Or ceci est difficile à établir avec certitude en pré-opératoire. Les moyens non invasifs disponibles pour évaluer la fonctionnalité réelle de la collatéralité sont les images angiographiques (coronarographie) et la fonction d'éjection ventriculaire gauche (FEVG) qui est liée à une irrigation suffisante du tissu myocardique. Mais ces estimations ne sont pas suffisantes pour prendre le risque de ne pas faire le troisième pontage : par exemple, beaucoup de vaisseaux collatéraux ont un diamètre inférieur à la limite de résolution de l'angiographie (100μm).

En revanche, des mesures de débit et de pressions ont été réalisées sur ces patients tri-tronculaires (sténoses ou thrombose sur 3 artères coronaires) au cours d'opérations à cœur battant [1, 2]. L'objectif de cette étude est d'évaluer, sur la base de ces données hydrodynamiques, le recrutement ainsi que la fonctionnalité de la collatéralité coronarienne entre les réseaux gauche et droit du cœur, dans le but d'établir des corrélations avec les données angiographiques ou l'indice FEVG des mêmes patients [2].

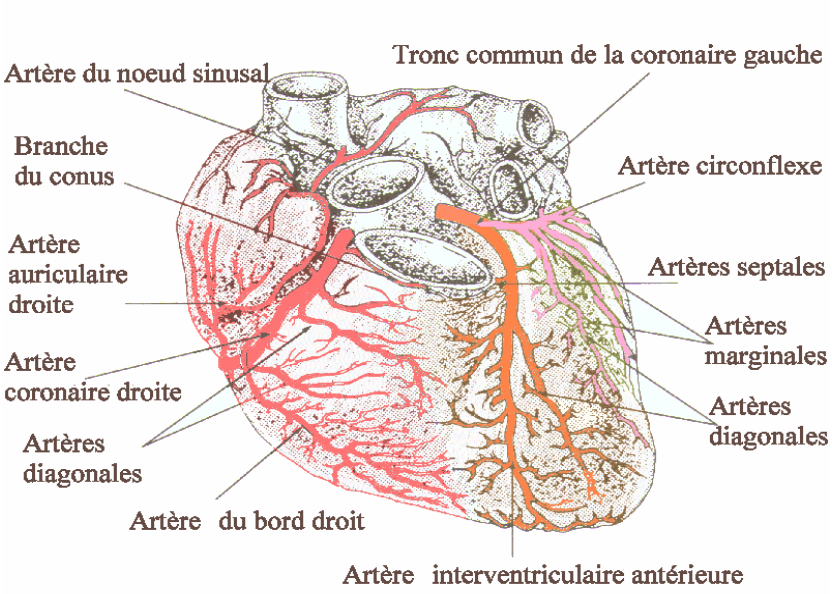


FIG. 1 – Anatomie des artères coronaires humaines. L'artère coronaire gauche se divise en deux : l'artère interventriculaire antérieure (Iva) et l'artère circonflexe (Cx). Du côté droit, l'artère principale est l'interventriculaire postérieure (Ivp). Dans les cas pathologiques, le recrutement de vaisseaux existants et la croissance de nouveaux microvaisseaux entre le territoire bien vascularisé et le territoire ischémique, par le biais de leur différence de pression, vont permettre de créer le réseau collatéral. La géométrie de ce réseau est donc difficile à caractériser et c'est une inconnue du problème.

2 Données acquises lors de la procédure chirurgicale

Lors de l'intervention chirurgicale, le pont sur la coronaire droite est posé en premier (Figure 2). Les artères gauches (Iva et Cx) étant alors non pontées, on procède à deux séries de mesures :

- pont droit clampé (ce qui revient à la situation pathologique) : mesure de la pression aortique P_{ao}, de la pression veineuse centrale P_{vc}, et de la pression en aval de la thrombose, P_w.

- pont droit déclampé : mesure de P_{ao}, P_{vc}, et du débit dans le pont droit, $Q_{pt\ Ivp}$

Les artères du réseau gauche sont ensuite pontées, et on procède de nouveau à deux séries de mesures :

- pont droit clampé : mesure de P_{ao}, P_{vc}, P_w et des débits dans les ponts Iva et Cx, $Q_{pt\ Iva}$, $Q_{pt\ Cx}$

- pont droit déclampé : mesure de P_{ao} et P_{vc} et des débits dans les 3 ponts, $Q_{pt\ Iva}$, $Q_{pt\ Cx}$, $Q_{pt\ Ivp}$

Les pressions sont acquises au moyen de micromanomètres situés en bout de sonde (capteurs Baxter, Californie, USA) et implantés par catéthérisation. La mesure des débits est effectuée grâce à un débitmètre ultrasonique Butterfly (Médistim) qui vient manchonner le greffon artériel ou veineux. Les valeurs sont intégrées sur un cycle cardiaque et les mesures sont effectuées loin des zones où des turbulences pourraient apparaître (sténoses, bifurcations).

Neuf patients ont été inclus dans l'étude à ce jour. Les valeurs moyennes ± écart-type obtenues pour les grandeurs mesurées sont présentées dans le Tableau 1.

3 L'indice utilisé en pratique médicale

Les débits circulant dans les artères et vaisseaux coronaires étant difficiles à mesurer, l'indice le plus utilisé en pratique médicale pour évaluer l'efficacité de la collatéralité est l'indice FCBF « Fractional Collateral Blood Flow », proposé par Pijls et al. [3], et basé sur les mesures de pression. Il est défini comme :

$$FCBF = \frac{P_w - P_{vc}}{P_{ao} - P_{vc}} \qquad (1)$$

Cet indice vise à décrire la fraction de débit acheminé par le réseau collatéral par rapport au débit normal et a été mis au point en raisonnant sur des pathologies dans lesquelles une seule artère est sténosée ou thrombosée. Il est usuellement admis qu'un indice inférieur à la valeur 0.3 est le reflet d'une faible collatéralité. Au contraire, une FCBF supérieure à 0.3 est un argument en faveur de la fonctionnalité de la collatéralité coronarienne.

Dans le cas de notre étude, FCBF ne peut être calculé que lorsque le pont droit est clampé, car il est directement lié à la valeur de la pression résiduelle en aval de la thrombose, P_w. Il ne varie pas (Tableau 1) selon que les ponts gauches soient en charge ou non, ce qui signifierait que la revascularisation des artères du côté gauche ne change pas le débit collatéral irriguant le côté droit. Cette conclusion justifie donc la nécessité du pont sur la coronaire droite. D'un autre côté, les valeurs obtenues pour FCBF indiquent une bonne efficacité du réseau collatéral chez les patients étudiés et ceci explique le risque de compétition de flux et de resténose qui peut survenir après la pose des trois ponts. D'où la nécessité de décrire plus en détail l'hydrodynamique de ces réseaux pour comprendre cette contradiction.

4 Schéma mécanique simplifié

En se basant sur le modèle très simplifié présenté Figure 2, il est possible d'expliciter la relation entre l'indice FCBF et les débits collatéraux arrivant vers l'Ivp.

4.1 Situation pathologique (aucun pont en charge)

Dans la situation pathologique, aucun pont ne fonctionne. Les équations décrivant l'hydrodynamique de ce réseau sont les suivantes :

$$\begin{cases} P_{ao} - P_{vc} = R_{sténoseIva} Q_{Iva} + R_{cap1}(Q_{Iva} - Q_{coll1}) \\ P_{ao} - P_{vc} = R_{sténoseIva} Q_{Iva} + R_{coll1} Q_{coll1} + R_{cap3}(Q_{coll1} + Q_{coll2}) \\ P_{ao} - P_{vc} = R_{sténose\,Cx} Q_{Cx} + R_{coll2} Q_{coll2} + R_{cap3}(Q_{coll1} + Q_{coll2}) \\ P_{ao} - P_{vc} = R_{sténoseCx} Q_{Cx} + R_{cap2}(Q_{Cx} - Q_{coll2}) \\ P_w - P_{vc} = R_{cap3}(Q_{coll1} + Q_{coll2}) \end{cases} \qquad (2)$$

Le bilan est de 5 équations pour 11 inconnues ($R_{sténoseIva}$, Q_{Iva}, R_{cap1}, R_{coll1}, Q_{coll1}, $R_{sténoseCx}$, Q_{Cx}, R_{coll2}, Q_{coll2}, R_{cap2}, R_{cap3}), ce qui ne permet pas de résoudre ce système et de déterminer les grandeurs recherchées, à savoir les débits collatéraux Q_{coll1} et Q_{coll2}. Il apparaît que la relation entre l'indice FCBF et les débits collatéraux n'est pas une relation de proportionnalité directe :

$$FCBF = \frac{R_{cap3}(Q_{coll1} + Q_{coll2})}{R_{sténoseIva} Q_{Iva} + R_{coll1} Q_{coll1} + R_{cap3}(Q_{coll1} + Q_{coll2})} \qquad (3)$$

Ce qui rend compliquée l'interprétation de l'indice FCBF en terme de fonctionnalité de la collatéralité avant la mise en charge des ponts.

	Iva et Cx non pontées, pont droit clampé	Iva et Cx non pontées pont droit déclampé	Iva et Cx pontées pont droit clampé	Iva et Cx pontées pont droit déclampé
Pao (mmHg)	79.8 ± 8.8	78.8 ± 8.2	72.8 ± 12.7	75.4 ± 9.7
Pvc (mmHg)	8.8 ± 4.7	8.9 ± 5.1	7.9 ± 4.7	9.1 ± 5.8
Pw (mmHg)	40.6 ± 7.4	-	37.3 ± 6.3	-
QptIvp (ml/min)	-	37.6 ± 20.2	-	49.0 ± 18.8
QptIva (ml/min)	-	-	27.0 ± 13.8	25.0 ± 15.0
QptCx (ml/min)	-	-	26.0 ± 16.1	20.4 ± 12.9
FCBF	0.45 ± 0.13	-	0.46 ± 0.1	-

TAB. 1 – Valeurs moyennes (± écart-type) des pressions et des débits relevées au cours des interventions chirurgicales sur 9 patients.

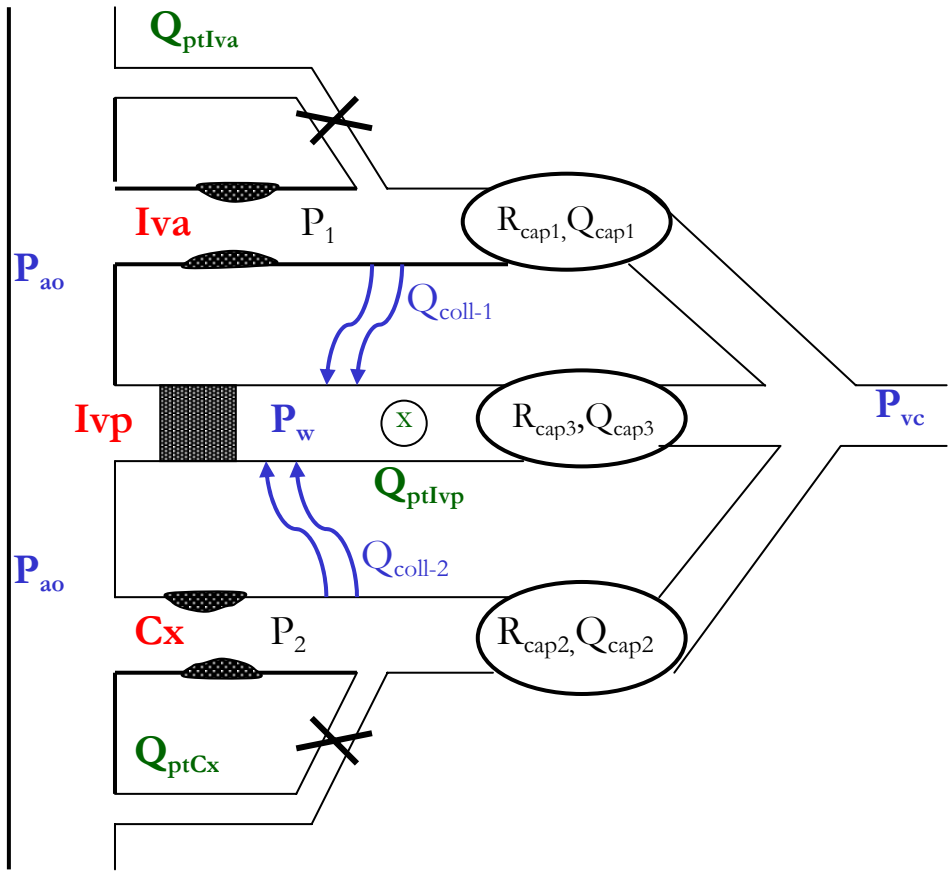


FIG. 2 – Schéma simplifié du réseau étudié. Les ponts Cx et Iva sont réalisés avec les artères mammaires droite et gauche. Les croix sur ces ponts représentent la situation où ils ne sont pas mis en place. Le pont sur la coronaire droite est réalisé avec la veine saphène (il est représenté ici en vue de dessus et peut être clampé). Les résistances hydrauliques des sténoses, des réseaux collatéraux ou des réseaux capillaires terminant chaque branche sont désignées respectivement par $R_{sténose}$, R_{coll} ou R_{cap}.

4.2 Artères Iva et Cx pontées, pont droit clampé

Les ponts gauches alimentent directement les artères Iva et Cx en aval des sténoses avec les débits Q_{ptIva} et Q_{ptCx}. Dans une première approximation, on néglige les pertes de charge dans les ponts et on considère que les pressions P_1 et P_2, en aval des sténoses sont sensiblement égales à P_{ao}. L'erreur commise en faisant cette approximation peut être évaluée en calculant la résistance hydraulique d'un pont. Avec une viscosité du sang de 4mPa.s, une longueur de vaisseau de 10 cm et un diamètre de 4mm (données correspondant à l'artère mammaire utilisée), la formule de Poiseuille conduit à une valeur de 6.37 10^7 Pa.s/m^3. Le débit dans les ponts gauches (cf Tableau1) étant de l'ordre de 25ml/min (soit 0.42 10^{-6} m^3/s), on obtient une perte de charge dans les ponts de 26.5 Pa, qui est donc négligeable devant la pression aortique, P_{ao} (de l'ordre de l'ordre de 75 mmHg, c'est-à-dire 10000 Pa). Les équations du § 4.1 deviennent :

$$\begin{cases} P_{ao} - P_{vc} = R_{cap1}(Q_{ptIva} - Q_{coll1}) \\ P_{ao} - P_{vc} = R_{coll1}Q_{coll1} + R_{cap3}(Q_{coll1} + Q_{coll2}) \\ P_{ao} - P_{vc} = R_{coll2}Q_{coll2} + R_{cap3}(Q_{coll1} + Q_{coll2}) \\ P_{ao} - P_{vc} = R_{cap2}(Q_{pt\,Cx} - Q_{coll2}) \\ P_{w} - P_{vc} = R_{cap3}(Q_{coll1} + Q_{coll2}) \end{cases} \qquad (4)$$

Le bilan est de 5 équations pour 7 inconnues (R_{cap1}, R_{coll1}, Q_{coll1}, R_{coll2}, Q_{coll2}, R_{cap2}, R_{cap3}), ce qui ne permet toujours pas de résoudre complètement ce système. L'indice FCBF s'écrit maintenant :

$$FCBF = \frac{R_{cap3}(Q_{coll1} + Q_{coll2})}{R_{coll1}Q_{coll1} + R_{cap3}(Q_{coll1}+Q_{coll2})} \qquad (5)$$

Cette expression peut être comparée à celle du § 4.1 si les résistances hydrauliques des réseaux capillaires, R_{cap}, et collatéraux, R_{coll}, ne changent pas avant et après la mise en charge des ponts côté gauche. Cette hypothèse n'est pas forcément vérifiée, à cause de la vasodilatation des vaisseaux ou du recrutement d'autres microvaisseaux. Il se peut aussi que la revascularisation côté gauche serve principalement à irriguer le territoire coronaire gauche, c'est-à-dire à augmenter les débits Q_{cap1} et Q_{cap2}, et n'influence que faiblement les flux collatéraux. Enfin, dans cette situation, la différence de pression aux bornes du réseau collatéral est P_{ao}-P_w, et on préférerait proposer comme indicateur d'une bonne collatéralité l'indice 1-FCBF, qui s'exprime comme le rapport (P_{ao}-P_w)/(P_{ao}-P_{vc}).

4.3 Artères Iva et Cx non pontées, pont droit déclampé

En négligeant la perte de charge dans le pont, on a dans ce cas la pression P_{ao} en aval de la thrombose du côté Ivp. Comme les pressions P_1 et P_2 sont inférieures à P_{ao} à cause des sténoses sur l'Iva et la Cx, la collatéralité ne fonctionne plus du réseau gauche vers le réseau droit. En première approximation, on peut considérer que le débit alimentant l'Ivp est celui du pont droit, Q_{ptIvp}, et écrire :

$$P_{ao} - P_{vc} = R_{cap3}Q_{ptIvp} \qquad (6)$$

Avec les données du Tableau 1, la valeur approchée de la résistance hydraulique des capillaires du territoire droit obtenue est : R_{cap3} = 1.86 mmHg.min.ml^{-1} (soit 1.49 10^{10} Pa.s/m^3).

4.4 Artères Iva et Cx pontées, pont droit déclampé

Si on considère comme précédemment qu'à l'embouchure de chacun des ponts on a la pression P_{ao}, il n'existe plus de différence de pression entre les territoires gauche et droit, donc pas de flux collatéraux. La différence de pression P_{ao}-P_{vc} s'écrit alors :

$$P_{ao} - P_{vc} = R_{cap1} Q_{ptIva} = R_{cap2} Q_{ptCx} = R_{cap3} Q_{ptIvp} \qquad (7)$$

Ce qui donne les estimations suivantes pour les résistances hydrauliques :

R_{cap1} = 2.65 mmHg.min.ml^{-1} ; R_{cap2} = 3.25 mmHg.min.ml^{-1} ; R_{cap3} = 1.35 mmHg.min.ml^{-1}.

La valeur obtenue pour R_{cap3} est sensiblement différente de celle obtenue au §4.3, ce qui tend à montrer que la résistance hydraulique des réseaux capillaires varie avec le régime d'irrigation des territoires. Une autre vérification de cette hypothèse peut être effectuée en testant la cohérence de ces valeurs de résistance hydraulique avec les valeurs de pression et débit mesurées pour la situation 4.2. En reportant dans les équations (4), on obtient, avec la première et la quatrième équation : Q_{coll1} = 2.5ml/min, Q_{coll2} = 6.0 ml/min ; et d'autre part, avec la dernière équation : $Q_{coll1}+Q_{coll2}$ = 21.8 ml/min. Ceci confirme que l'hypothèse de résistances hydrauliques R_{cap} ou R_{coll} constantes n'est pas correcte. Cependant, l'ordre de grandeur du débit apporté vers le réseau droit par les collatérales (10-20 ml/min) est en accord avec les mesures de Rockstroh et Brown [4]. En étudiant le développement d'une pathologie coronarienne sur 10 ans et, parallèlement, le développement du réseau collatéral, ils trouvent une augmentation du débit collatéral de 20 à 43 ml/min.

5 Conclusion

L'analyse effectuée avec le schéma mécanique simple proposé ici ne permet pas de justifier une modification des pratiques chirurgicales en vigueur pour le type de patients étudiés, à savoir le triple pontage. Pour améliorer l'interprétation de l'indice FCBF en terme de flux collatéraux et la compréhension du phénomène de re-sténose au cours du temps après ces triples pontages, il serait utile de connaître les débits et pressions (en aval des sténoses) dans le réseau natif gauche (mais ceux-ci sont difficiles à mesurer lors de la coronarographie), de mieux caractériser la géométrie du réseau collatéral [4,5], sa résistance hydraulique et le couplage entre ces différentes données (de façon à prendre en compte le fait que la résistance hydraulique du réseau collatéral et des réseaux capillaires varie en fonction des pressions aux bornes du réseau et des débits qui y circulent).

Références

[1] J. Ph. Verhoye. Evaluation clinique per-opératoire de la collatéralité coronarienne. DEA Génie Biomédical UTC. 2001

[2] J. Ph. Verhoye, B. de Latour, A. Drochon, H. Corbineau. Collateral flow reserve and right coronary occlusion : evaluation during off-pump revascularization. *Interactive Cardiovascular and Thoracic Surgery*. Sous presse (on line), 2005.

[3] N.H. Pijls, G.J. Bech, M.I. El Gamal, H.J. Bonnier, B. De Bruyne, B. Van Gelder, H.R. Michels, J.J. Koolen. Quantification of recruitable coronary collateral blood flow in conscious humans and its potential to predict future ischemic events. *Journal of the American College of Cardiology*, 25(7):1522-28, 1995.

[4] J. Rockstroh, B.G. Brown. Coronary collateral size, flow capacity, and growth. Estimates from the angiogram in patients with obstructive coronary disease. *Circulation*, 105:168-173, 2002.

[5] G.S. Werner, M.Ferrari, S. Heinke, F. Kuethe, R. Surber, B.M. Richartz, H.F. Figulla. Angiographic assessment of collateral connections in comparison with invasively determined collateral function in chronic coronary occlusions. *Circulation*, 107:1972-1977, 2003.