Le cathétérisme cardiaque droit – réalisation et règles de bonne pratique

Message clé

Le cathétérisme cardiaque droit est l'examen de référence pour affirmer le diagnostic d'hypertension pulmonaire (HTP), déterminer son caractère pré- ou post-capillaire, et il est un préalable indispensable à l'instauration d'une thérapeutique spécifique dans l'hypertension artérielle pulmonaire (HTAP). Il permet également de juger de la sévérité de l'HTP au diagnostic comme lors du suivi. Il requiert toutefois une méthodologie rigoureuse, indispensable pour obtenir des résultats fiables et limiter le risque de complications., et doit être réalisé préférentiellement dans des centres experts pratiquant régulièrement ce type d'explorations et suivant les patients souffrant d'HTP.

Introduction et définitions

En 1929, Werner Forssman, jeune médecin berlinois est le premier à montrer que l'on peut introduire un cathéter dans les cavités cardiaques droites à partir du bras, en réalisant cet examen sur lui-même. Il obtiendra avec André Cournand et Dickinson Richards le prix Nobel de médecine en 1956. Les premiers cathéters dits de Cournand, étaient des cathéters rigides, qui ont été progressivement remplacés par des cathéters souples « flottés » puis des cathéters à ballonnet ou cathéters de « *Swan et Ganz* » à partir des années 1970, permettant de réaliser des mesures de pression mais également de débit cardiaque par la technique de thermodilution.

Actuellement, même si l'usage du cathétérisme cardiaque droit est moins fréquent, notamment grâce au développement des techniques non invasives comme l'échographie cardiaque ou l'imagerie par résonnance magnétique, sa pratique reste fondamentale dans certaines situations cliniques et notamment le diagnostic d'HTP où il est l'examen de référence et un préalable indispensable à l'initiation d'une thérapeutique spécifique.

La définition de l'HTP est hémodynamique et la confirmation de son diagnostic repose sur la réalisation d'un cathétérisme cardiaque droit (1,2).

L'HTP pré-capillaire est définie par une élévation de la pression artérielle pulmonaire moyenne (PAPm) supérieure à 20 mmHg au repos, avec une pression artérielle pulmonaire d'occlusion (PAPO) inférieure ou égale à 15 mmHg et des résistances vasculaires pulmonaires (RVP) supérieures ou égales à 3 unités Wood (UW).

Le cathétérisme cardiaque droit est un examen indispensable pour la prise en charge des HTP et en particulier de l'HTAP. Il permet de diagnostiquer une HTP et de déterminer le carcatère pré ou post capillaire de celle-ci (Tableau 1). Plusieurs mesures sont réalisées au cours

de cet examen : pressions auriculaire et ventriculaire droites (POD et PVD), pression artérielle pulmonaire (PAP). La mesure de la pression artérielle pulmonaire d'occlusion (PAPO) permet d'estimer les pressions de remplissage gauche. Le débit cardiaque est également mesuré au cours de l'examen et l'index cardiaque est calculé selon la formule débit cardiaque rapporté à la surface corporelle.

Définitions	Caractéristiques	Groupe (d'après la classification de l'hypertension pulmonaire)
HTP pré-capillaire	PAPm > 20 mmHg + PAPO ≤ 15 mmHg + RVP ≥ 3 UW	- HTAP (groupe 1) - HTP due à une maladie respiratoire chronique / hypoxie (groupe 3) - HTP thromboembolique chronique (groupe 4) - HTP de mécanisme multifactoriel / non clair (groupe 5)
HTP post-capillaire	PAPm > 20 mmHg + PAPO > 15 mmHg + RVP < 3 UW	- HTP due aux cardiopathies gauches (groupe 2) - HTP de mécanisme multifactoriel / non clair (groupe 5)
HTP combinée (post et pré capillaire)	PAPm > 20 mmHg + PAPO > 15 mmHg + RVP ≥ 3 UW	- HTP due aux cardiopathies gauches (groupe 2) - HTP de mécanisme multifactoriel / non clair (groupe 5)

Tableau 1. Définitions hémodynamiques au repos de l'hypertension pulmonaire évaluée par le cathétérisme cardiaque droit, proposées lors du 6ème congrès mondial de l'hypertension pulmonaire (Nice 2018) (2).

Quelles sont les indications du cathétérisme cardiaque droit ?

- La principale indication pour la réalisation du cathétérisme cardiaque droit est la **suspicion d'une hypertension pulmonaire pré-capillaire.** L'examen permet de confirmer le **diagnostic** mais également de recueillir **des éléments pronostiques** (1,3). En effet, une POD élevée (supérieure à 14 mmHg), un index cardiaque inférieur à 2 l/min/m^2 et une diminution de la saturation en oxygène du sang veineux mêlé (svO_2) sont des critères de mauvais pronostic guidant la stratégie thérapeutique initiale. La valeur pronostique de la PAPm est moins pertinente car elle chute lorsque la défaillance cardiaque droite est marquée, en cas de stade avancé de la maladie.

- Il est également indiqué au cours du **suivi des patients**. Il est recommandé de réaliser un cathétérisme cardiaque droit lors du bilan initial d'HTAP, 3 à 4 mois après chaque modification thérapeutique mais également lors des dégradations cliniques (1,4).

- Les autres indications du cathétérisme cardiaque droit sont :
    - Les bilans d'hypoxémie inexpliquée, afin de pouvoir prouver et rechercher un éventuel shunt droite-gauche (cf infra) ;
    - Dans le cadre du bilan pré-greffe pulmonaire chez les patients atteints de bronchopneumopathie chronique obstructive (BPCO) ou de fibrose pulmonaire notamment. L'existence d'une HTP sévère (non expliquée par la maladie respiratoire sous-jacente) chez ces patients constitue un facteur de mauvais pronostic. Ces explorations, pour être interprétables, doivent impérativement être réalisés en état stable, c'est-à-dire à distance d'une exacerbation respiratoire;

Quelles sont les précautions et contre-indications du cathétérisme cardiaque droit ?

La principale précaution consiste à effectuer cet examen dans un **centre expert**, **centre de référence ou de compétence PulmoTension,** par une équipe habituée à la pratique du cathétérisme cardiaque droit et la prise en charge des patients souffrant d'HTAP.

Il n'existe pas de contre-indication absolue à la pratique du cathétérisme cardiaque droit.

Un contrôle de l'hémostase est systématique mais la grande majorité des centres experts pratique l'examen, sans interrompre le traitement anticoagulant. Un électrocardiogramme (ECG) est également réalisé avant l'examen, à la recherche d'un trouble du rythme ou de la conduction (bloc de branche complet) de même qu'un contrôle de la kaliémie à la recherche d'une éventuelle dyskaliémie, pouvant favoriser un trouble du rythme pendant l'examen, lors du passage de la sonde dans les cavités cardiaques droites.

Si possible, l'exploration doit être réalisée sous contrôle radioscopique, tout au moins chez les patients porteurs d'un pacemaker, d'un défibrillateur implantable ou d'un cathéter central à demeure.

Comment se déroule l'examen ?

1/ Installation du patient et mise en place de l'introducteur

L'examen est réalisé chez un patient non à jeun, en général non prémédiqué, en décubitus dorsal, jambes allongées. Un consentement est remis au patient avant l'examen.

Un monitorage ECG, tensionnel et de spO2 est mis en place.

Trois voies d'abord veineuses sont possibles : la veine jugulaire, la veine basilique (ou la veine céphalique) au pli du coude, et éventuellement la veine fémorale. La voie privilégiée est celle du bras, mais elle nécessite que la veine soit d'un calibre suffisant pour y introduire la sonde. La voie jugulaire a l'avantage de présenter le trajet le plus direct vers les cavités cardiaques droites du cœur. Enfin, la voie fémorale est plus rarement utilisée du fait

d'une progression du cathéter pouvant s'avérer plus difficile (y compris sous contrôle radioscopique) et doit être réservée aux cas d'obstruction des vaisseaux caves supérieurs. Le choix de la voie d'abord se fait donc selon l'anatomie du patient (calibre des veines) et ses préférences lorsque plusieurs voies d'abord sont possibles.

Lors de la ponction veineuse, le sujet doit être placé en position de Trendelenburg, qui permet d'un part, en augmentant le retour veineux de faire « gonfler » la veine, facilitant ainsi sa ponction, mais également de limiter le risque d'embolie gazeuse, toutefois peu probable chez les patients présentant une HTP et dont la pression veineuse centrale est habituellement élevée.

Après avoir désinfecté la zone de ponction et placé des champs stériles, une anesthésie locale est pratiquée puis la veine est ponctionnée afin de mettre en place un cathéter avec un introducteur, selon la technique de « Seldinger » (après la ponction de la veine, le guide métallique est mis en place dans le vaisseau et l'aiguille peut alors être retirée).

Afin d'effectuer les mesures de pression, on utilise une sonde à ballonnet, appelée sonde de *Swan Ganz*, de calibre 7 ou 7,5 F, qui comporte 3 à 4 lumières (Figure 1):

- Une lumière distale pour l'enregistrement des pressions, qui sera placée dans l'artère pulmonaire ;
- Une lumière proximale qui sera placée dans l'oreillette droite et par laquelle peut être injectée du sérum physiologique servant à mesurer le DC par la méthode de thermodilution (1ère thermistance) ;
- Une lumière raccordée à un ballonnet, à l'extrémité distale de la sonde, qui une fois gonflé dans une branche de l'artère pulmonaire, permet d'obtenir une mesure de la PAPO (reflet de la pression télédiastolique du ventricule gauche) par interruption temporaire de la circulation ;
- Une 2ème thermistance afin d'enregistrer les variations de température nécessaire à la mesure du débit cardiaque par thermodilution (cf infra), localisée 4 cm en amont du ballonnet
- Certains modèles de cathéter de Swan Ganz disposent d'une dernière lumière, très proximale, qui peut être utilisée pour la perfusion du patient ;

Le matériel nécessaire à la réalisation du cathétérisme cardiaque droit est présenté Figure 2. Avant utilisation, les différentes lumières sont purgées à l'aide de sérum physiologique et l'étanchéité du ballonnet vérifiée après gonflage à l'air à l'aide d'une seringue de 1,5 ml. Une gaine peut être éventuellement placée et sera déroulée le long de la sonde afin de la maintenir stérile, une fois en place.

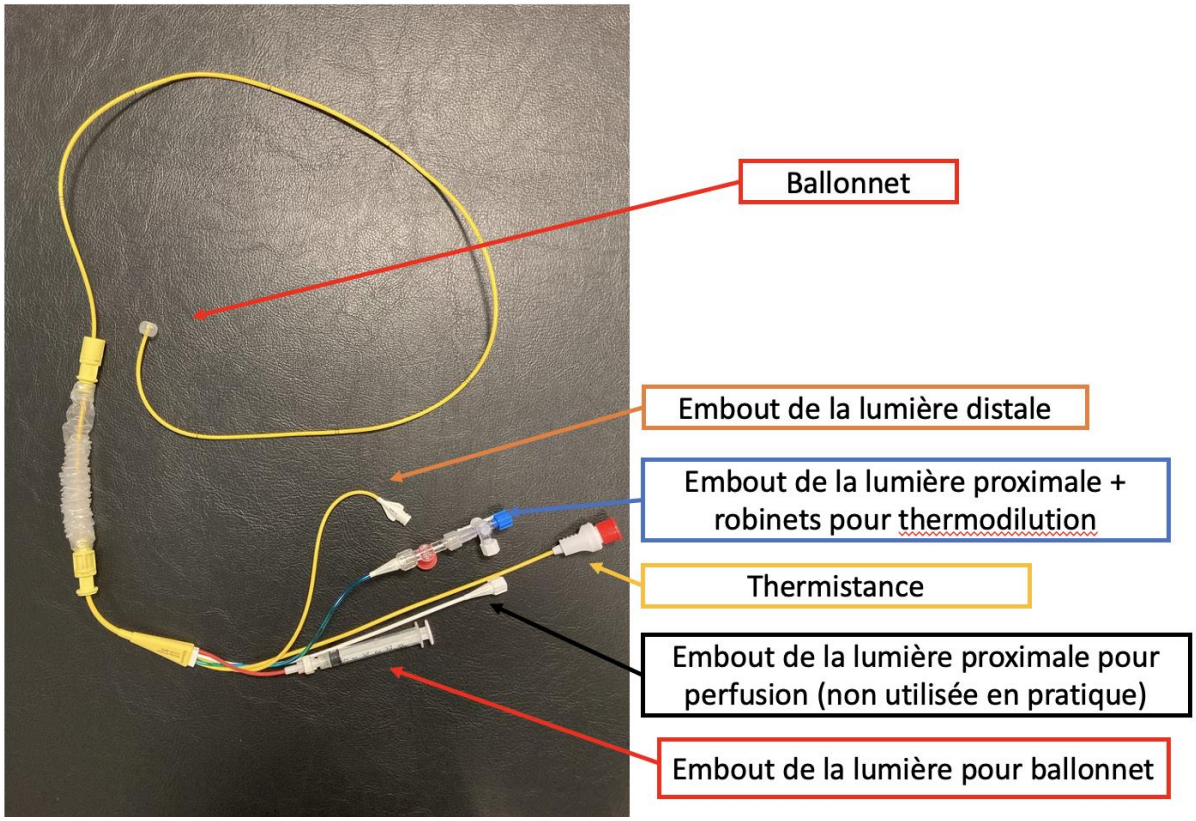


Figure 1. Cathéter de *Swan Ganz* à 4 lumières.

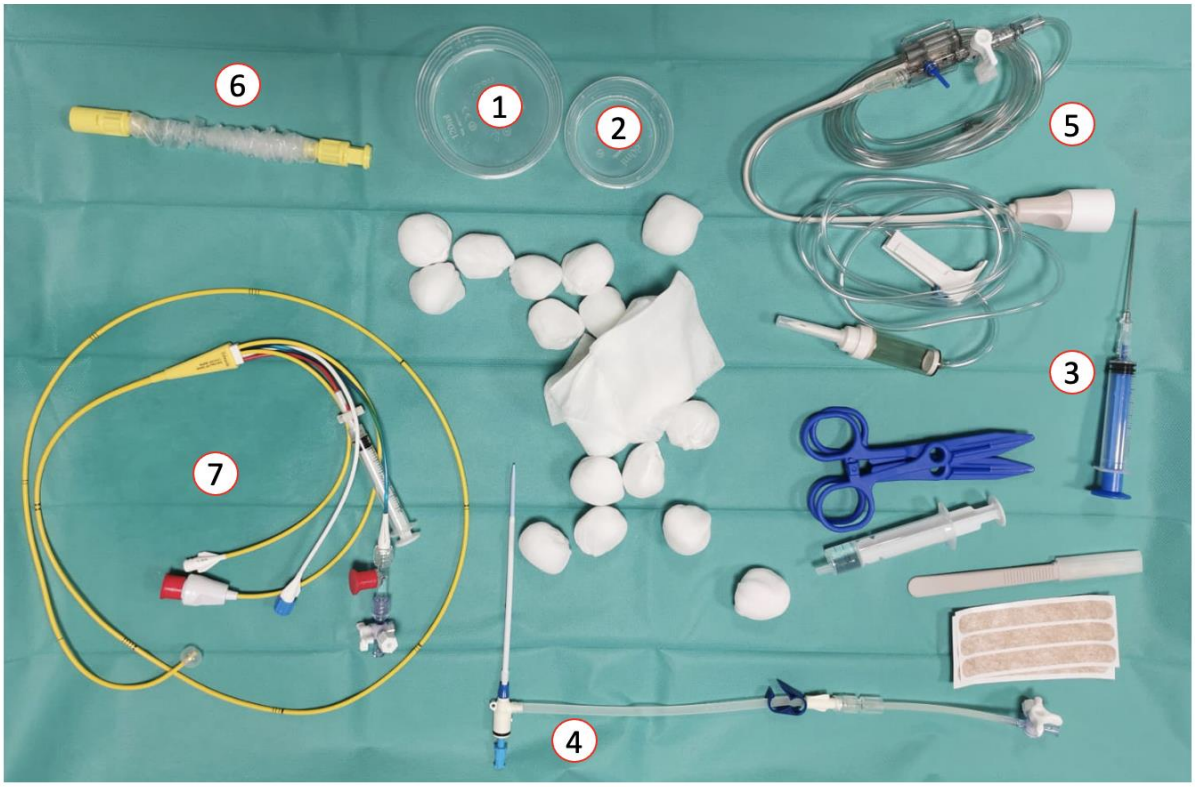


Figure 2. Matériel nécessaire pour la réalisation d'un cathétérisme cardiaque droit

1. Sérum physiologique
2. Xylocaine
3. Seringue et aiguille pour ponction veineuse
4. Introducteur
5. Capteur de pression externe relié à la sonde de *Swan Ganz*
6. Gaine de protection de la sonde de *Swan Ganz*
7. Sonde de *Swan Ganz*

2/ Introduction de la sonde et réalisation des mesures

Le cathéter de *Swan Ganz* est raccordé à un manomètre externe par une tubulure permettant la mesure des pressions, qui est lui-même relié à un moniteur sur lequel sont lus les tracés.

La valeur de la PAP est exprimée relativement à une valeur zéro correspondant à la pression atmosphérique (760 mmHg au niveau de la mer).

Le capteur externe doit être placé au même niveau que l'oreillette droite qui correspond au « zéro hydrostatique » afin d'éviter une erreur de mesure. En effet, la pression pourra être modifiée (augmentée ou diminuée) proportionnellement au poids de la colonne de liquide ayant pour hauteur la distance verticale entre le capteur et l'extrémité de la sonde. Par exemple, un capteur placé 10 cm trop bas surestimerait les pressions de 7 à 8 mmHg pouvant aboutir à un diagnostic erroné d'HTP (5). En pratique, chez un sujet couché, ce point se situe sur la ligne médio-axillaire, à mi-chemin entre l'avant du sternum et la surface du lit, au niveau du 4ème espace intercostal (Figure 3).

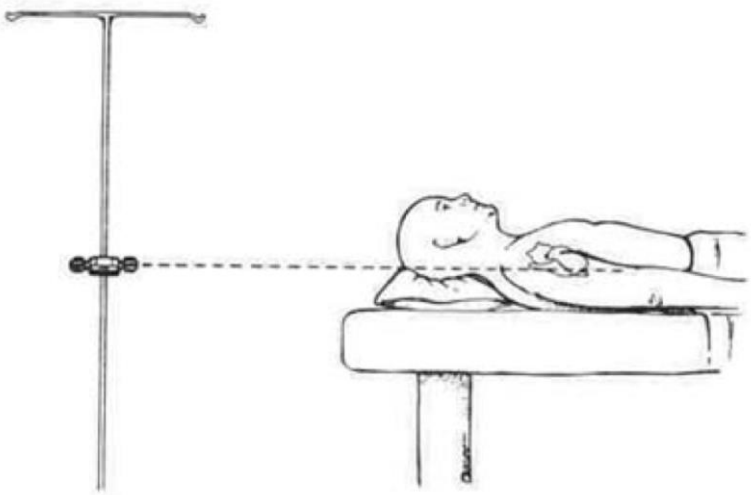


Figure 3. Position du capteur de pression en fonction du « zéro référence ».

La sonde de *Swan Ganz* est insérée au travers de l'introducteur ; la partie courbe et convexe de l'extrémité de celle-ci étant dirigée vers la droite du patient. Cette incurvation permettant une progression « naturelle » de la sonde dans les cavités cardiaques droites. La sonde mesure 110 cm. Elle est marquée tous les 10 cm par des repères représentés par des traits noirs.

Lorsque l'on passe par voie jugulaire interne droite, on atteint :

- L'oreillette droite en général après 25 cm de progression ;
- Le ventricule droit après 30 cm ;
- Une des branches de l'artère pulmonaire à environ 40 cm.

Au bout de 20 cm, on peut gonfler le ballonnet afin de favoriser la progression du cathéter qui est alors emmené par le flux sanguin. La progression de la sonde peut être suivie grâce à l'aspect morphologique des courbes de pression mais il est préférable et recommandé de s'aider de la radioscopie, notamment en cas de difficultés de progression (par exemple lorsque la sonde s'enroule dans le ventricule droit).
Le passage dans le ventricule droit peut être à l'origine d'extrasystoles ventriculaires, ce qui justifie de surveiller le tracé ECG lors de la montée de la sonde.

Plusieurs paramètres seront mesurés lors du cathétérisme cardiaque droit :

**par convention, les mesures de pression sont réalisées en fin d'expiration. En cas d'importantes variations respiratoires, comme c'est parfois le cas dans la BPCO, les atteintes pulmonaires interstitielles ou chez les patients obèses, on effectuera les mesures lors d'une apnée glotte ouverte, en fin d'expiration.*

a) Mesure de la pression dans l'oreillette droite (POD)

La POD est mesurée par voie proximale de la sonde, située dans l'oreillette ou grâce au capteur distal lors de l'introduction ou du retrait de la sonde (Figure 4). Elle est le reflet de la volémie.

On peut identifier les différentes ondes positives en se repérant sur le tracé ECG :

- L'onde a, qui correspond à la systole auriculaire (onde P de l'ECG) et qui est visible 80 à 100 ms après l'onde P, du fait de la dissociation électromécanique ;
- L'onde c, située après l'onde a, qui n'est pas toujours visible et qui correspond à la fermeture de la valve tricuspide ;
- L'onde v, qui correspond au remplissage passive de l'oreillette droite (diastole auriculaire) et qui est visible à la fin de l'onde T ou dans l'intervalle TP de l'ECG.

La valeur moyenne de la POD chez le sujet sain est généralement comprise entre 1 et 9 mmHg

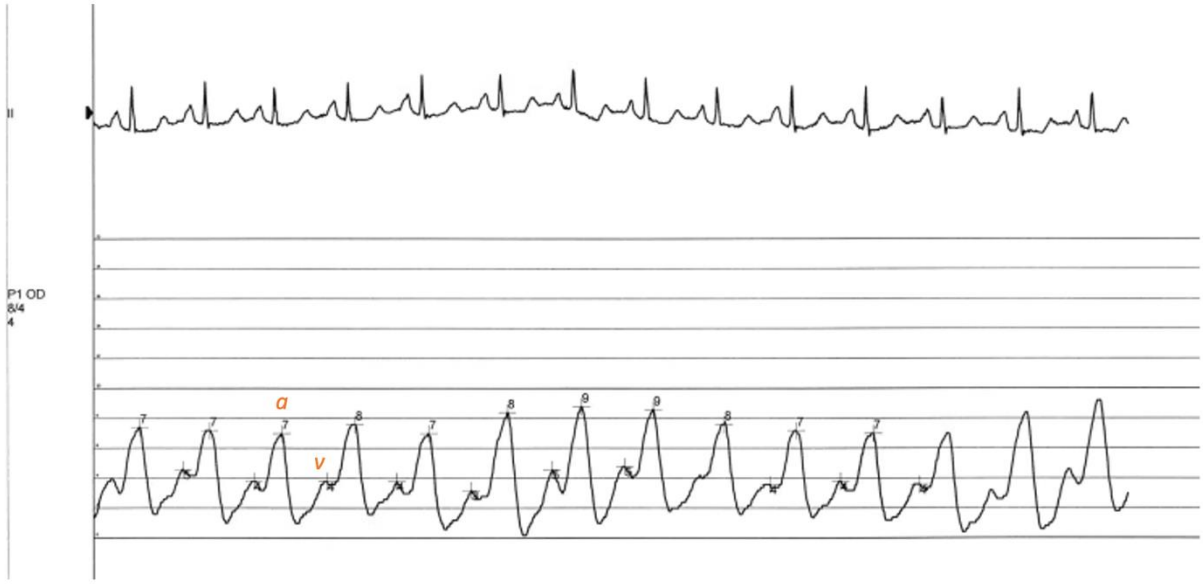


Figure 4. Exemple de tracé de POD chez un patient atteint d'HTAP.

b) Mesure de la pression ventriculaire droite (PVD)

Le tracé ventriculaire droit est facilement reconnaissable du fait de la présence d'un pic systolique (PVDs), qui en l'absence d'anomalie de la valve pulmonaire correspond également à la pression artérielle pulmonaire systolique (PAPs), et une pression diastolique (PVDd).
La systole ventriculaire est visible pendant l'intervalle QT de l'ECG et la diastole pendant intervalle TQ. On mesure également la pression télédiastolique du ventricule droit (PTDVD) qui est un bon indicateur des pressions de remplissage droites (Figure 5).

La PVDs est généralement comprise entre 15 et 25 mmHg alors que la PVDd est proche de 0 mmHg

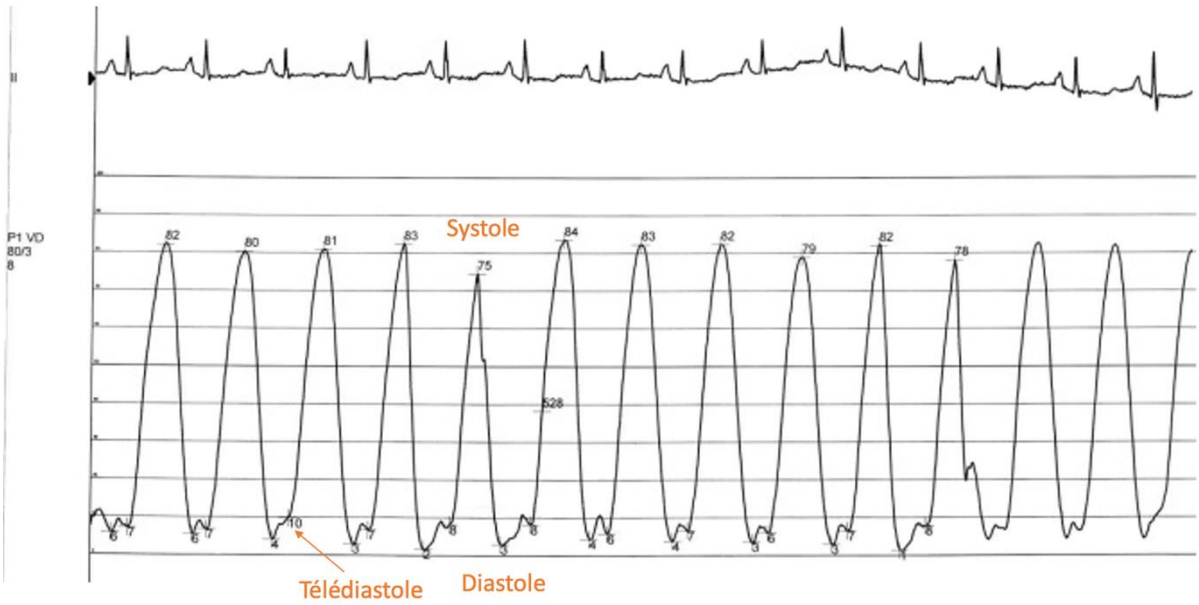


Figure 5. Exemple de tracé de PVD chez un patient atteint d'HTAP.

c) Mesure de la PAP

Elle correspond à la pression enregistrée dans l'artère pulmonaire ou dans ses branches. Le profil de la PAP comporte une ascension rapide depuis le début de l'éjection jusqu'à la valeur maximale qui correspond à la systole (PAPs) suivie d'une descente interrompue par une incisure correspondant à la fin d'éjection (et à la fermeture de la valve pulmonaire) appelée onde dicrote ; puis la pression décroît à nouveau progressivement jusqu'à la valeur minimale correspondant à la diastole (PAPd). En général, la systole est visible pendant l'intervalle QT de l'ECG et l'onde dicrote apparaît après l'onde T (Figure 6). La PAPm est moyennée par le moniteur sur plusieurs complexes.

On peut également la calculer à partir des valeurs de pressions systoliques et diastoliques selon la formule suivante : PAPm = (PAPs + 2 x PAPd)/ 3.

La valeur normale de la PAPm est de 14 ± 3 mmHg

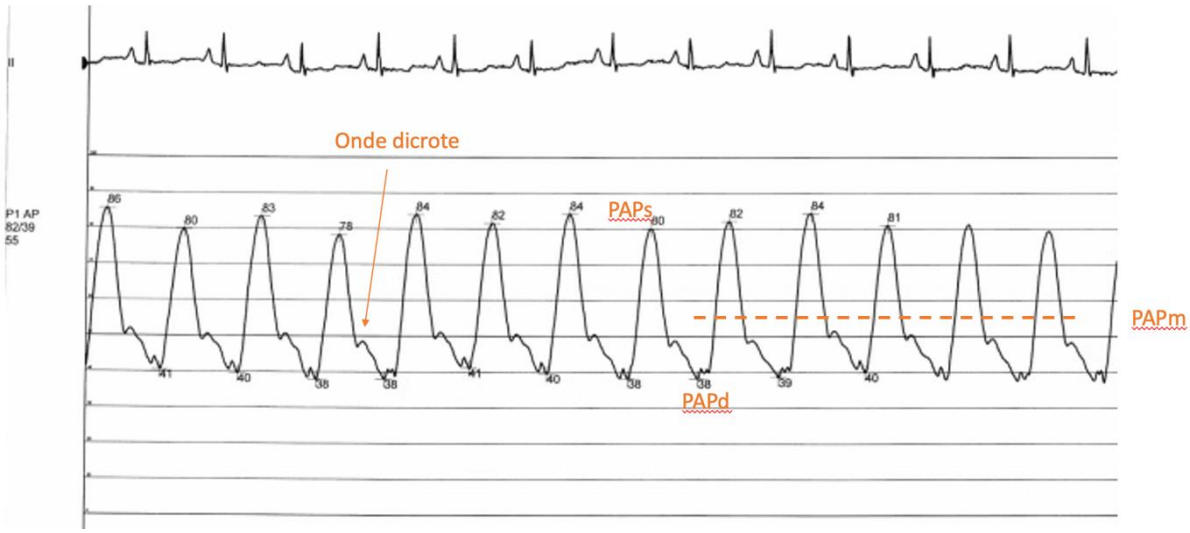


Figure 6. Exemple de tracé de PAP chez un patient atteint d'HTAP.

d) Mesure de la PAPO

Lorsque le cathéter est en place dans une branche de l'artère pulmonaire, le ballonnet va être gonflé afin d'interrompre le flux sanguin : la pression des veines pulmonaires, qui reflète la pression dans l'oreillette gauche est donc la pression télédiastolique du ventricule gauche est alors transmise de manière rétrograde jusqu'à l'extrémité de la sonde et correspond à la PAPO. Il est également possible d'obtenir la pression capillaire bloquée ou *pulmonary artery wedge pressure*, en bloquant le cathéter dans une artère de petit calibre. La PAPO, qui reflète la pression de l'oreillette gauche, présente les mêmes caractéristiques morphologiques que la POD, mais celles-ci ne sont pas toujours individualisables (Figures 7, 8 et 9).

On retrouve notamment :
-Une onde a qui reflète la systole auriculaire gauche située entre 200 et 240 ms après l'onde P de l'ECG ;
-une onde c, en rapport avec la fermeture des valves mitrales, rarement visible ;
-une onde v, habituellement plus importante que l'onde a, qui reflète le remplissage et l'oreillette gauche qui se situe après l'onde T de l'ECG.

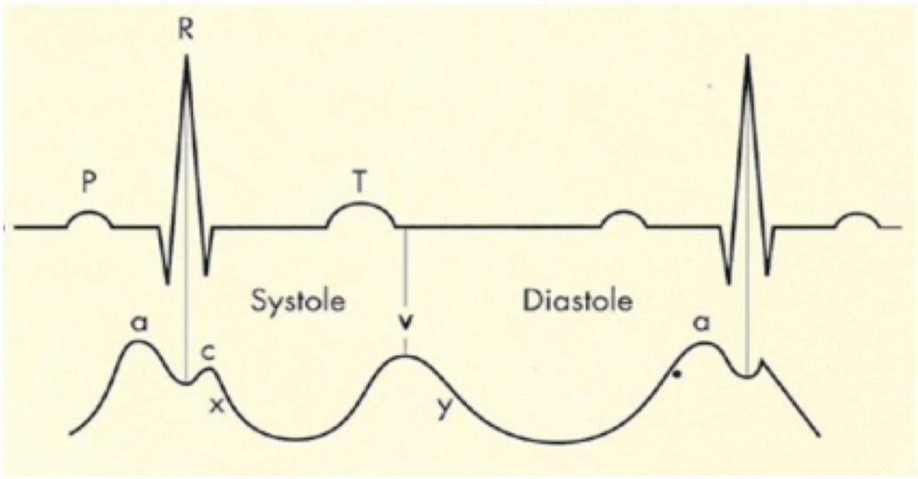


Figure 7 : ondes a, c et v

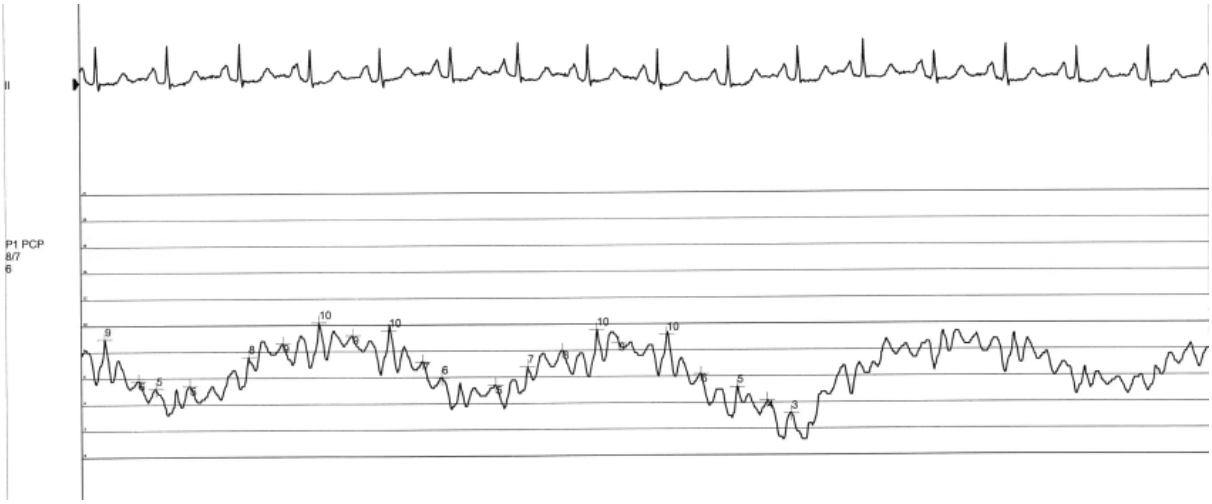


Figure 8. Exemple de tracé de PAPO (ici à 8 mmHg en fin d'expiration) avec visualisation des variations respiratoires.

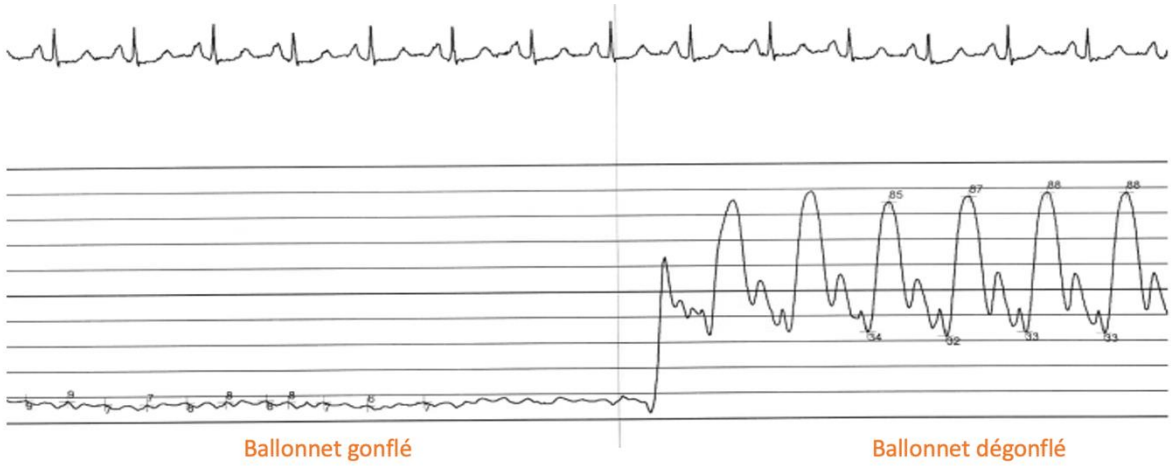


Figure 9. Exemple de tracé de PAPO (ballonnet gonflé) puis de PAP (ballonnet dégonflé) chez un patient atteint d'HTAP.

L'obtention d'une PAPO fiable n'est pas toujours aisée. Un tracé fiable nécessite que la sonde soit positionnée dans une zone III de West, ce qui est toutefois le plus souvent le cas lorsque l'examen est pratiqué chez un sujet en décubitus. Le tracé ne peut être interprété correctement en cas d'occlusion incomplète de l'artère (*underwege*) laissant encore passer le flux pulsatile, ou de gonflement excessif du ballonnet (*overwedge*), par ailleurs susceptible d'occasionner une rupture de l'artère pulmonaire. En cas de doute sur la validité du tracé de PAPO, un cathétérisme cardiaque gauche pour mesure de la PTDVG peut être proposé (2).

Si l'on constate d'importantes variations respiratoires du tracé, on prendra comme valeur de référence la PAPO mesurée en fin d'expiration, qui reflète au mieux la pression dans l'oreillette gauche (6).

Enfin, dans certains cas, il est intéressant de mesurer la PAPO lors d'un effort ou d'une épreuve de remplissage vasculaire au sérum physiologique afin de démasquer une éventuelle atteinte post-capillaire, par exemple une dysfonction diastolique du ventricule gauche (cf infra).

Des précautions doivent être prises lors du gonflement du ballonnet :
-Celui-ci doit être gonflé progressivement ;
-la sonde ne doit pas être retirée lorsque le ballonnet est gonflé.

Plusieurs critères permettent de s'assurer d'une validité du tracé de la PAPO :
- la valeur de la PAPO est obligatoirement inférieure à celle de la PAPd ;
- présence d'ondes a et v (pas toujours visible) ;
- lors de la réalisation du gaz du sang artériel en position occluse, la PaO_2 est plus élevée que dans le sang artériel (non réalisé en pratique).

e) Mesure du débit cardiaque

Le débit cardiaque et l'index cardiaque (débit cardiaque rapporté à la surface corporelle) sont des critères pronostiques importants dans l'HTAP. Ils doivent être mesurés lors de chaque exploration hémodynamique. Deux méthodes peuvent être utilisés : la thermodilution et la méthode de Fick.

La thermodilution est la méthode la plus couramment employée, car elle permet de réaliser des mesures répétées à intervalles réguliers. Elle consiste à injecter un volume connu de sérum refroidi (en général 10 ml), par la lumière proximale de la sonde, rapidement et toujours au même temps respiratoire. Les températures au niveau des capteurs proximaux et distaux sont alors mesurées et le débit cardiaque calculé en fonction de la courbe de dilution de l'indicateur thermique, à partir de l'équation de "Stewart-Halmiton".

3 mesures sont effectuées au minimum afin de s'assurer de la reproductibilité des résultats (Figure 10).

Cette méthode est la plus couramment employée mais elle comporte quelques limites :

- La mesure est peu fiable en cas de très bas débit cardiaque ou d'insuffisance tricuspide importante ;
- Le débit cardiaque peut être surestimé en cas de shunt droite-gauche, par perte de l'indicateur thermique ;
- Le débit cardiaque peut être sous-estimé dans les shunts gauche-droite par recirculation de ce même capteur.

Dans ces cas de figure, il est nécessaire de réaliser une mesure du DC par la méthode de Fick.

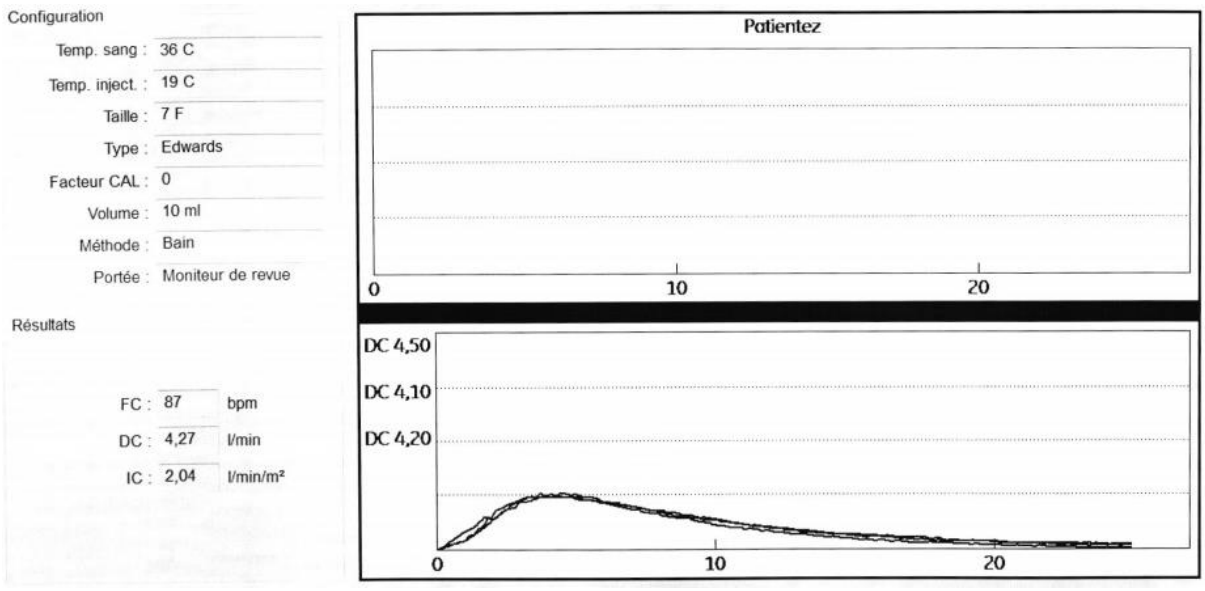


Figure 10. Exemple de mesure de DC par thermodilution chez un patient suivi pour une HTAP.

La méthode de Fick est la méthode de référence pour la mesure du DC, même si elle est moins couramment utilisée.

Elle est indiquée pour l'exploration des cardiopathies congénitales avec shunt intracardiaque : seule méthode fiable, et peut être couplée à la thermodilution dans l'exploration des autres formes d'HTAP.

Elle se base sur le principe de Fick, qui stipule que la quantité d'O_2 consommée ou VO_2 est égale est égale au produit du débit sanguin circulant à travers les poumons, multiplié par la différence artério-veineuse en O_2 : $DC=VO_2/(CaO_2-CvO2)$, avec :

- DC = débit cardiaque ;
- VO_2 = consommation en oxygène ;
- CaO_2 = concentration en oxygène du sang artériel, qui correspond à la somme de l'O_2 dissous (PaO_2 multipliée par un facteur qui exprime la solubilité de l'O_2 dans le sang) et de l'O_2 lié à l'hémoglobine (Hb) = PaO_2 x 0,0031 + Hb x SaO_2 x1,39* ;
- CvO_2 = concentration en oxygène du sang veineux mêlé = PvO_2 x 0,0031 + Hb x SvO_2 x 1,39*.

**1 gramme d'Hb est capable de fixer 1,39 ml de sang*

La VO_2 est mesurée pendant l'examen et les concentrations en oxygène du sang artériel et du sang veineux sont calculées à partir d'un prélèvement effectué dans une artère (radiale en général) et dans l'artère pulmonaire pour le sang veineux mêlé. Les prélèvements réalisés permettent d'obtenir les informations sur les gaz du sang artériel et la saturation en oxygène du sang veineux mêlé (SVO_2), qui est un important paramètre pronostique, habituellement abaissés lorsqu'il existe un bas DC (1).

Les valeurs hémodynamiques normales sont rapportées dans le Tableau 2.

Variable	Valeur moyenne
POD (mmHg)	5

PAPm (mmHg)	14 ± 3
PAPs (mmHg)	20,8 ± 4,4
PAPd (mmHg)	8,8 ± 3
PAPO (mmHg)	8 ± 2,9
DC (l/min)	7,3 ± 2,3
RVP (UW)	0,9 ± 0,4

Tableau 2. Valeurs hémodynamiques normales des principaux paramètres hémodynamiques pulmonaires chez un sujet en décubitus dorsal, au repos d'après Kovacs et al (7).

f) Mesure de la SvO_2 et autres prélèvements réalisés au cours du cathétérisme cardiaque droit

La mesure de la SvO_2 est systématique lors de la réalisation d'un cathétérisme cardiaque droit. Deux ml de sang sont prélevés au niveau de l'extrémité distale de la sonde de *Swan Ganz* à l'aide d'une seringue dédiée pour la mesure des gaz du sang. Ce prélèvement doit toujours s'effectuer lorsque le ballonnet est dégonflé. L'aspiration du sang dans la seringue doit être la plus douce possible afin d'éviter le retour de sang capillaire déjà oxygéné.
La SvO_2 est bien corrélée au débit cardiaque et il s'agit d'un important facteur pronostic dans l'HTAP (1).

Lors de la constatation d'un débit cardiaque élevé ou s'il existe une cardiopathie congénitale connue, des prélèvements étagés pourront être réalisés pour mesurer la saturation en oxygène du sang dans la veine cave supérieure, dans l'oreillette droite (haute et basse), dans le ventricule droit et dans l'artère pulmonaire proximale et distale. La constatation d'un enrichissement en oxygène permet d'affirmer l'existence d'un shunt gauche-droit et d'en préciser le niveau (dans l'oreillette droite en cas de communication interventriculaire, dans l'artère pulmonaire distale en cas de persistance du canal artériel par exemple). En cas de shunt droit-gauche, on peut calculer ce dernier.

Enfin, en cas de suspicion d'HTAP d'origine tumorale, un prélèvement de sang capillaire (aspiration forte de sang par l'extrémité distale de la sonde poussée le plus loin possible dans les artères pulmonaires) peut permettre la mise en évidence de cellule tumorale dans le culot de centrifugation.

g) Test de vasoréactivité

Lors du bilan initial d'une HTAP, un test de vasoréactivité pulmonaire en aigu doit être effectué afin d'identifier les patients susceptibles de répondre à un traitement au long cours par inhibiteurs calciques à forte dose (1). Ce test n'a d'intérêt que dans les HTAP idiopathiques, médicamenteuse ou liées aux anorexigènes (8). Ce test est habituellement effectué à l'aide de monoxyde d'azote (NO) inhalé même si les recommandations de l'ESC/ERS rapportent que ce test peut être réalisé avec de l'adénosine I.V. ou de la prostacycline I.V. Le NO a en effet l'avantage, outre sa demi-vie très courte, de ne pas entraîner d'effet vasodilatateur systémique. Il est donc très bien toléré.

Après confirmation de l'hypertension pulmonaire pré-capillaire et la mesure du débit cardiaque, un test au monoxyde d'azote (NO) peut être réalisé. Il est indiqué en cas d'HTAP idiopathique, héritable ou associée à la prise d'anorexigène. Ce test consiste à faire inhaler au patient du NO à l'aide d'un masque facial ou d'un embout buccal à une concentration de 10 à 20 ppm pendant une durée de 5 minutes. Les pressions sont enregistrées et une mesure du débit cardiaque en thermodilution est à nouveau effectuée sous NO. Ce test de vasoréactivité sera répété lors des explorations hémodynamiques ultérieures chez les patients initialement répondeurs, afin d'adapter le traitement par inhibiteurs calciques.

On considère que le test de vasoréactivité est positif, si on observe :
Une diminution de la PAPm d'au moins 10 mmHg
pour atteindre un niveau de PAPm < 40 mmHg
avec un débit cardiaque augmenté ou inchangé

f) Calcul des résistances vasculaires pulmonaires (RVP)

La PAPm détermine avec la PAPO, le gradient de pression motrice, appelé gradient transpulmonaire : PAPm-PAPO. A l'équilibre, l'application de la loi électrique d'Ohm indique que le gradient transpulmonaire est égal au produit de la RVP par le DC.
On obtient donc la formule suivante :
PAPm – PAPO = RVP x DC
PAPm = RVP x DC + PAPO
Selon cette formule, on peut alors aisément comprendre qu'une élévation de la pression artérielle pulmonaire peut être liée à une élévation des RVP, comme c'est le cas dans l'HTAP, à une élévation de la PAPO (comme c'est le cas dans les cardiopathies gauches) mais également à une élévation importante du débit cardiaque, qui peut se voir en cas d'anémie, d'hyperthyroïdie, d'hypertension portale ou dans certaines cardiopathies congénitales avec shunt gauche-droit.

Les résistances vasculaires pulmonaires sont exprimées en mmHg.min.l-1 ou unités Wood (UW). Les recommandations récentes favorisent l'expression des RVP en UW au détriment des unités internationales classiques (80 dyn.s.cm^{-5} = 1 UW).

RVP = (PAPm-PAPO) / DC

g) Intérêt d'une exploration hémodynamique à l'exercice

Actuellement, la définition d'HTP d'effort ne figure plus dans les recommandations internationales (1).
Néanmoins, dans certains cas, on réalisera des mesures hémodynamiques à l'exercice, qui permettront de :

- Mieux caractériser les propriétés résistives de la circulation pulmonaire ;
- Démasquer une atteinte vasculaire pulmonaire débutante dans une population à risque de développer une HTAP (sclérodermie) ;

- Préciser le mécanisme d'HTP légère ;
- Évaluer l'efficacité d'un traitement spécifique de l'HTAP (9).

Théoriquement, les pressions pulmonaires augmentent de manière très modeste pour un effort modéré : on estime que la PAPm monte d'environ 1 mmHg par l/mn de débit cardiaque. Ceci s'explique par un recrutement et une distensibilité du lit vasculaire pulmonaire. Ainsi, chez un sujet sain effectuant un exercice modéré à intense, la PAPm augmente peu et reste inférieure à 30 mmHg, pour un DC de 10 l/mn. Une augmentation importante des pressions pulmonaires lors de l'exercice peut ainsi permettre de suspecter une maladie vasculaire pulmonaire débutante, ou de démasquer une dysfonction cardiaque gauche en cas d'élévation marquée de la PAPO à l'exercice.

En pratique, un ergomètre est installé sur la table d'examen (Figure 11). Après réalisation des mesures hémodynamiques au repos, une charge est appliquée dans le pédalier. Le patient pédale contre des charges qui vont être augmentées progressivement toutes les 2 minutes (jusqu'à 120 Watts au maximum). Des mesures de PAPm, PAPO et DC sont réalisées à chaque palier. L'hypertension pulmonaire d'exercice pourrait être définie par une PAP normale au repos avec une élévation de la PAPm supérieure à 30 mmHg à l'effort associée à des résistances pulmonaires totales (RPT = PAPm/DC) supérieures à 3 UW (10).
A l'heure actuelle, il n'y a pas de consensus sur la valeur normale de PAPO à l'exercice ; celle-ci n'étant pas toujours simple à mesurer compte tenu d'importantes variations de pression intra-thoracique à l'effort. Différentes valeurs seuils de PAPO à l'exercice ont été proposées (20 à 25 mmHg selon les méthodes de mesure) mais celles-ci restent à confirmer (9). Afin de s'affranchir de cette mesure peu fiable à l'exercice, une définition de l'hypertension pulmonaire d'exercice reposant sur résistances pulmonaires totales a été proposée : PAP normale au repos avec une élévation de la PAPm supérieure à 30 mmHg à l'effort associée à des résistances pulmonaires totales (RPT = PAPm/DC) supérieures à 3 UW (10).



Figure 11. Salle de cathétérisme cardiaque droit du service de physiologie et explorations fonctionnelles du Nouvel hôpital civil (Hôpitaux universitaires de Strasbourg).

h) Test de remplissage

L'épreuve de remplissage (ou expansion volémique) est de plus en plus pratiquée pour démasquer une insuffisance cardiaque à FEVG préservée. Elle est indiquée lorsque la mesure de la PAPO est comprise entre 13 et 15 mmHg chez un sujet de plus de 50 ans et/ou s'il existe des facteurs de risque cardiovasculaires faisant suspecter une cardiopathie gauche (obésité, âge avancé, HTA, ACFA…). Elle pourra également être pratiquée chez les patients sclérodermiques pour démasquer une dysfonction cardiaque gauche associée.

En pratique, ce test consiste à perfuser rapidement, en 5 minutes, 500 ml de sérum physiologique (ou 7 ml/kg), par l'introducteur du cathéter. En cas de troubles de la compliance cardiaque gauche (ventricule et/ou oreillette) on observe une élévation importante de la PAPO, à plus de 20 ou 25 mm Hg, avec apparition fréquentes de grandes ondes « v » (Figure 12). En cas d'élévation de la PAPO supérieure à 18 mmHg, on considère que le test est positif (11).

Ce test permet ainsi d'éviter de classer abusivement en « HTAP » des patients présentant essentiellement une cardiopathie gauche.

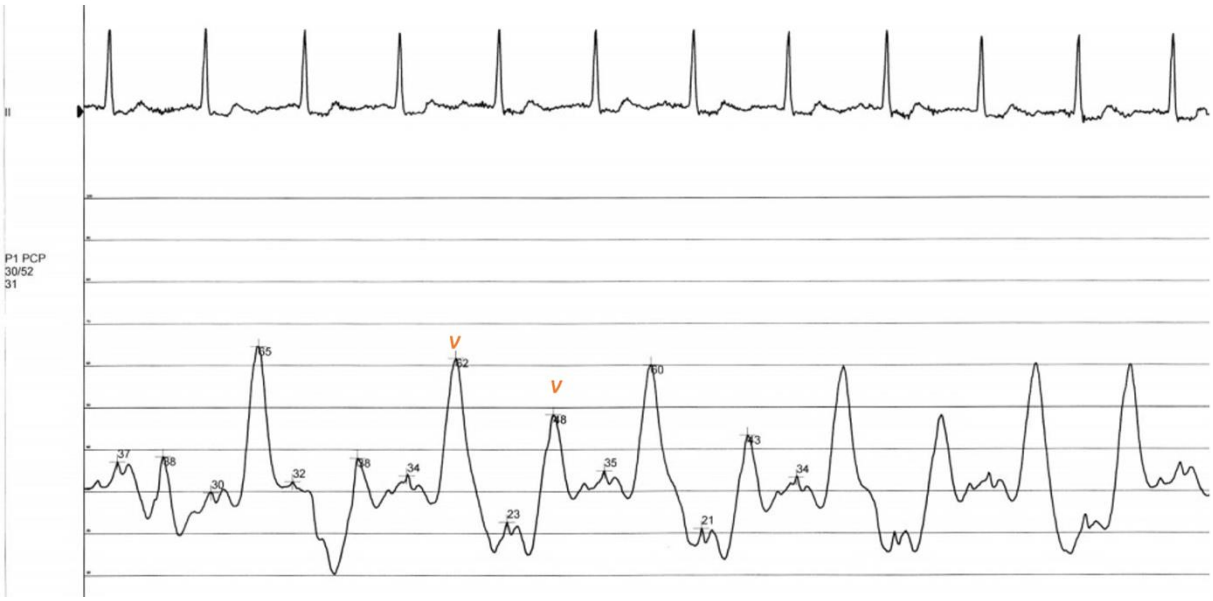


Figure 12. Exemple d'élévation de PAPO à 31 mmHg avec grandes ondes « v » sur la courbe, témoin d'une cardiopathie gauche.

i) Calcul de shunt

L'existence d'une hypoxémie et d'une hypocapnie peut témoigner d'un « effet shunt », ou plutôt de l'existence de régions à bas V/Q. Un shunt « vrai » est quant à lui défini par l'existence de rapports V/Q à 0. L'exemple type d'un shunt vrai est un shunt droit gauche lors d'une réouverture d'un foramen ovale perméable (FOP) ou lorsqu'il existe une fistule arterioveineuse pulmonaire. Alors que dans les anomalies mettant en cause les bas VA/Q (<1 mais >0), l'hypoxémie se corrige (ou plutôt atteint des valeurs « cibles ») lorsque la FiO_2 est égale à 1, l'hypoxémie reste importante lorsqu'il existe un shunt vrai (V/Q = 0). En pratique, lorsqu'on constate une PaO_2 > 500 mm Hg sous FiO_2 à 1, l'existence d'un shunt D-G est peu vraisemblable. On peut toutefois calculer plus précisément le shunt droit-gauche grâce à une analyse des gaz du sang prélevés au niveau artériel et du sang veineux mêlé (prélevé dans l'artère pulmonaire) au décours du cathétérisme cardiaque droit, le patient respirant sous une FiO2 de 1 à partir de l'équation suivante :

QS/QT = Débit du shunt/ débit cardiaque = (CcO2-CaO2)/(CcO2-CvO2)
CaO_2 = concentration en oxygène du sang artériel = (PaO_2 x 0,0031) + (Hb x SaO_2 x 1,39)
CvO_2 = concentration en oxygène du sang veineux mêlé = (PvO_2 x 0,0031) + (Hb x SvO_2 x 1,39)
CcO_2= concentration en oxygène du sang capillaire terminal : (PAO2x0,0031) +(Hbx1x1,39)

Avec
PAO_2= pression alvéolaire en O2 = PiO_2-$PACO_2$/R+($PACO_2$xFIO_2x (1-R)/R)
PiO_2= pression partielle en O_2 de l'air inspiré = (Patm – 47mmHg)X FiO_2
$PACO_2$ = pression alvéolaire en CO_2, assimilable à la $PaCO_2$
R= quotient respiratoire = (VCO_2/VO_2) =0,8
FiO_2 =concentration en oxygène de l'air inspiré = 0,21 en air ambiant = 1 sous O2 pur
Patm = pression atmosphérique.

Quelles sont les complications du cathétérisme cardiaque droit ?

La morbidité et la mortalité sont très faibles, d'environ 1,1% et 0,055% respectivement lorsque cet examen est pratiqué dans des centres experts habitué à l'exploration hémodynamique pulmonaire (12).

Parmi les incidents possibles les plus fréquents, on retrouve :

- Complications liées à l'anesthésie locale (exceptionnelles) ;
- Complications liées à la ponction veineuse : malaise vagal, ponction carotidienne « accidentelle », pneumothorax en cas de voie d'abord veineuse jugulaire. Les plus fréquentes sont les hématomes au point de ponction, habituellement sans gravité. Le traitement anticoagulant n'est habituellement pas interrompu pour l'examen, ce qui peut favoriser le saignement ;
- Complications liées au passage de la sonde ou au gonflement du ballonnet : troubles de conduction ou troubles du rythme (principalement lors du passage de la sonde dans le VD), enroulement de la sonde (rare). Exceptionnellement, des ruptures de l'artère pulmonaire lors du gonflement du ballonnet ont été rapportées mais il s'agissait en général de cas où le ballonnet était trop gonflé ou bien laissé en place trop longtemps gonflé.

Bibliographie

1. **Galie N, Humbert M, Vachiery J-L, Gibbs S, Lang I, Torbicki A, et al. 2015 ESC/ERS Guidelines for the diagnosis and treatment of pulmonary hypertension: The Joint Task Force for the Diagnosis and Treatment of Pulmonary Hypertension of the European Society of Cardiology (ESC) and the European Respiratory Society (ERS): Endorsed by: Association for European Paediatric and Congenital Cardiology (AEPC), International Society for Heart and Lung Transplantation (ISHLT). Eur Respir J. oct 2015;46(4):903-75.**

2. **Simonneau G, Montani D, Celermajer DS, Denton CP, Gatzoulis MA, Krowka M, et al. Haemodynamic definitions and updated clinical classification of pulmonary hypertension. Eur Respir J. janv 2019;53(1).**

3. **Chemla D, Castelain V, Hervé P, Lecarpentier Y, Brimioulle S. Haemodynamic evaluation of pulmonary hypertension. Eur Respir J. nov 2002;20(5):1314-31.**

4. **Weatherald J, Boucly A, Chemla D, Savale L, Peng M, Jevnikar M, et al. Prognostic Value of Follow-Up Hemodynamic Variables After Initial Management in Pulmonary Arterial Hypertension. Circulation. 13 févr 2018;137(7):693-704.**

5. **Kovacs G, Avian A, Pienn M, Naeije R, Olschewski H. Reading pulmonary vascular pressure tracings. How to handle the problems of zero leveling and respiratory swings. Am J Respir Crit Care Med. 1 août 2014;190(3):252-7.**

6. **Ryan JJ, Rich JD, Thiruvoipati T, Swamy R, Kim GH, Rich S. Current practice for determining pulmonary capillary wedge pressure predisposes to serious errors in the classification of patients with pulmonary hypertension. Am Heart J. avr 2012;163(4):589-94.**

7. **Kovacs G, Berghold A, Scheidl S, Olschewski H. Pulmonary arterial pressure during rest and exercise in healthy subjects: a systematic review. Eur Respir J. oct 2009;34(4):888-94.**

8. **Sitbon O, Humbert M, Jais X, Ioos V, Hamid AM, Provencher S, et al. Long-term response to calcium channel blockers in idiopathic pulmonary arterial hypertension. Circulation. 14 juin 2005;111(23):3105-11.**

9. **Kovacs G, Herve P, Barbera JA, Chaouat A, Chemla D, Condliffe R, et al. An official European Respiratory Society statement: pulmonary haemodynamics during exercise. Eur Respir J. nov 2017;50(5).**

10. **Herve P, Lau EM, Sitbon O, Savale L, Montani D, Godinas L, et al. Criteria for diagnosis of exercise pulmonary hypertension. Eur Respir J. sept 2015;46(3):728-37.**

11. **D'Alto M, Badesch D, Bossone E, Borlaug BA, Brittain E, Humbert M, et al. A Fluid Challenge Test for the Diagnosis of Occult Heart Failure. Chest. févr 2021;159(2):791-7.**

12. **Hoeper MM, Lee SH, Voswinckel R, Palazzini M, Jais X, Marinelli A, et al. Complications of right heart catheterization procedures in patients with pulmonary hypertension in experienced centers. J Am Coll Cardiol. 19 déc 2006;48(12):2546-52.**