

## Échocardiographie - Doppler

S. Lafitte, M. Lafitte, P. Réant, R. Roudaut

C.H.U. de Bordeaux ~ Hôpital Cardiologique du Haut Lévêque Pessac ~ France

### Fonction Diastolique

#### Généralités

L'étude de la fonction diastolique du ventricule gauche s'est longtemps limitée à une approche clinique et hémodynamique invasive.

De nos jours, le développement de moyens d'investigation non invasifs, comme la ventriculographie isotopique et l'échographie-Doppler suscite un regain d'actualité.

L'intérêt de telles explorations se porte en particulier sur l'étude de l'insuffisance cardiaque à fonction systolique conservée qui représente environ 30% des tableaux de décompensation cardiaque.

L'étude de la fonction diastolique présente également un intérêt certain dans la prise en charge des patients porteurs de myocardopathie afin de guider le traitement et est également un facteur pronostique.

#### Sommaire

Nous débuterons ce cours par un rappel sur la physiopathologie de la fonction diastolique et quelques définitions.

Puis, nous aborderons les différentes caractéristiques du flux de remplissage ventriculaire en Doppler, avec notamment les 3 profils hémodynamiques décrits par Appleton en Doppler transmitral et les modifications du flux veineux pulmonaire.

Nous décrirons également les avantages des nouveaux paramètres écho-Doppler d'étude de la fonction diastolique comme le DTI à l'anneau et la vitesse de propagation en TM couleur qui permettent une approche de plus en plus fiable des pressions de remplissage.

Enfin, nous donnerons quelques exemples de valeur pronostique des paramètres de fonction diastolique.

#### Physiopathologie

Sur un plan physiologique, le cycle cardiaque se divise en deux phases : la systole et la diastole. Ces deux phases sont définies différemment suivant l'angle sous lequel elles sont appréhendées.

Pour le clinicien, la systole débute dès la fermeture mitrale et se poursuit jusqu'à la fermeture des sigmoïdes aortiques englobant la phase de contraction isovolémique et la phase d'éjection,

Pour le physiologiste, avec notamment les travaux de Brutsaert, la systole intègre les phases de relaxation isovolumique et de remplissage rapide qui sont caractérisées par un recaptage actif du calcium au niveau du reticulum sarcoplasmique.

En définitive, au sens clinique, la diastole reste un phénomène très complexe avec deux phases actives :

- la relaxation isovolumique en rapport avec la dissociation des ponts actine-myosine des myocytes,
- et le remplissage rapide, véritable phénomène de 'suction' dû à la diminution rapide de la pression ventriculaire.

Fait suite en méso-diastole, une phase passive, le diastasis ou remplissage lent, caractérisée par l'annulation du gradient de pression OG-VG. Le diastasis est directement soumis à la compliance du ventricule gauche.

Enfin, le remplissage contemporain de la systole auriculaire qui dépend à la fois des propriétés élastiques, passives, du VG mais également des propriétés mécaniques auriculaires actives. Cette

phase contribue selon l'âge à 10 à 30 % du remplissage ventriculaire total.

Les deux phénomènes de relaxation et de compliance ventriculaire sont étroitement intriqués. Les facteurs influençant l'un des deux phénomènes modifient directement ou indirectement l'autre phénomène.

Les anomalies de relaxation sont préférentiellement observées en cas de diminution du métabolisme énergétique par insuffisance coronaire ou atteinte de la microcirculation (hypertrophie ventriculaire, diabète). Dans ces situations, elles précèdent généralement la dysfonction systolique. Les anomalies de relaxation sont présentes de façon physiologique chez le sujet âgé.

Secondairement, les anomalies de la compliance apparaissent. Elles découlent d'une diminution des propriétés élastiques du VG, nécrose, fibrose ou encore hypertrophie et entraîne une augmentation des pressions de remplissage.

L'élévation des pressions de remplissage est responsable d'un déplacement vers le haut et la gauche de la courbe pression-volume.

L'échocardiographie Doppler permet également une estimation des pressions de remplissage du ventricule gauche.

Sur un plan hémodynamique, les pressions de remplissage se dissocient en pression diastolique VG pré A (PDVG pré A) et pression télédiastolique VG (PTDVG).

La **PDVG pré A** est la pression diastolique VG avant la contribution auriculaire et correspond à la pression moyenne de l'oreillette gauche et à la pression capillaire pulmonaire moyenne.

La **PTDVG** est la pression télédiastolique du VG après l'onde A et est augmentée soit par élévation de la PDVG pré A, soit par élévation de l'onde A sur une PDVG pré A normale.

Au final, chacun des paramètres que nous décrivons vise l'une ou l'autre phase de façon plus spécifique.

## Échocardiographie-Doppler

### Flux transmitral

L'analyse de la fonction diastolique débute par l'enregistrement du flux transmitral en Doppler pulsé sur une coupe apicale 4 cavités.

Le volume d'échantillonnage est positionné à l'extrémité distale des feuillets mitraux avec réglage des filtres au minimum permettant la visualisation de ce flux avec une bonne définition de la totalité des contours.

On enregistre ainsi un flux positif diastolique en forme de 'M' avec une première onde E qui correspond au remplissage ventriculaire rapide et une deuxième onde A, habituellement moins ample, correspondant au remplissage ventriculaire tardif par contraction de l'oreillette.

Sur un plan hémodynamique, ce type de profil biphasique correspond au gradient de pression physiologique retrouvé entre l'OG et le VG en proto et télédiastole.

Le flux mitral étant obtenu de manière correcte, il faut réaliser certaines mesures standards :

- Tout d'abord, les vitesses des ondes E et A sont mesurées.
- Puis, il faut apprécier le temps de décélération de l'onde E, du sommet de l'onde E au point où la courbe croise la ligne zéro.

L'étude de la fonction diastolique se poursuit en Doppler continu ou pulsé avec la mesure du temps de relaxation isovolumique ou TRIV. Sur une coupe apicale 5 cavités, en orientant le faisceau ultrasonore dans une direction intermédiaire entre l'orifice aortique et mitral, on recherche l'obtention simultanée des 2 tracés. Le TRIV est alors l'intervalle séparant le click de fermeture aortique et le pied de l'onde E.

Nous rappelons ici les valeurs normales des différentes mesures chez l'adulte jeune :

- L'onde E possède une vitesse moyenne de 85 cm/s,
- l'onde A 60 cm/s,
- le rapport E/A est égal classiquement 1.5,
- le TD est calculé à 193 ms,
- et enfin, le TRIV est mesuré à 70 ms.

Au delà de ces chiffres, il existe un certain nombre de variations physiologiques et pathologiques à connaître :

**Sur un plan technique**, il faudra tout d'abord être vigilant sur l'orientation du faisceau ultrasonore et sur son alignement qui déterminent l'angle d'attaque.

De même, le positionnement de la fenêtre d'échantillonnage doit s'effectuer méticuleusement au niveau de l'entonnoir, le flux enregistré au niveau de l'anneau étant significativement diminué.

**Sur un plan physiologique**, l'influence de l'âge sur le flux mitral est à connaître également. Les vitesses des ondes E et A tendent à s'inverser avec l'âge liées à la contribution plus marquée de la systole auriculaire dans le remplissage ventriculaire.

**Sur un plan pathologique**, les modifications de ces paramètres sont là aussi notables.

Tout d'abord, la *pathologie valvulaire*, et en particulier, les valvulopathies mitrales, rendent en général inexploitable ces paramètres d'étude de fonction diastolique.

*Les modifications de pré-charge*, fréquentes dans de nombreuses pathologies, interviennent aussi sur le flux mitral.

On imagine alors volontiers l'effet de certains médicaments comme la trinitrine ou autres vasodilatateurs, diurétiques ou tonicardiaques sur les profils de remplissage.

Enfin, les *troubles du rythme et de conduction* influencent également les flux transmitraux, comme sur ce graphique comparant des sujets sains à des patients porteurs de bloc de branche gauche.

Les anomalies de fonction diastolique ont été caractérisées sur le profil transmitral par Appleton avec l'individualisation de 3 profils pathologiques en fonction de l'état hémodynamique, classification revisitée récemment :

Le **profil de type I** correspond à une **anomalie de relaxation** caractérisée par une diminution de l'onde E, une augmentation de l'onde A par redistribution du flux en télédiastole, un temps de décélération et un TRIV allongés.

Sur un plan hémodynamique, les pressions ventriculaires diastoliques sont encore normales ou peu élevées.

Ce type de profil peut correspondre à un profil normal, notamment chez les sujets âgés, chez les patients tachycardes ou présentant des anomalies de conduction (BBG, BAV1).

Dans la majorité des cas, il faudra considérer ce type de profil comme relatif à une PTDVG basse, surtout si la fraction d'éjection est inférieure à 45%.

En cas de doute clinique ou de présence d'HTAP, a fortiori si la FE est normale ou s'il existe une HVG, il faudra envisager l'utilisation d'autres paramètres pour confirmer ou infirmer l'élévation des pressions de remplissage.

Le **profil de type III** correspond à un trouble de la compliance ventriculaire, défini par une onde E anormalement ample, une petite onde A, un temps de décélération diminué en dessous de 150 ms, et un TRIV inférieur à 60 ms.

Cet aspect, dit hypernormal, témoigne d'un profil de remplissage de type restrictif ou constrictif avec un dip plateau proto-méso diastolique pouvant témoigner d'une élévation des pressions de remplissage en fonction de la fraction d'éjection.

Si la FE est inférieure à 45%, un temps de décélération inférieur à 150 ms signera des pressions de

remplissage élevées, là où une valeur supérieure à 150 ms ne fera que suspecter l'élévation de la PTDBG.

Il en sera de même devant une fraction d'éjection > 45 % et un flux restrictif nécessitant l'utilisation de paramètres complémentaires.

Ce profil peut être réversible sous traitement médical ou au contraire irréversible, fixée, de pronostic péjoratif, qui correspond dans la nouvelle classification au profil de type 4.

Enfin, au cours de l'évolution d'une cardiopathie, la dégradation de la fonction diastolique d'un profil de type I vers le type III s'effectue par une normalisation du tracé, appelé **profil de type II ou normalisé**. Ce profil est caractérisé par des ondes E et A normales, un TD et un TRIV normaux.

Sur un plan hémodynamique, il existe cependant une nette augmentation des pressions de remplissage.

Cet aspect pseudo-normal est particulièrement piégeant car faussement rassurant. Aussi, un aspect de flux transmitral normal chez un sujet âgé doit plutôt être interprété comme un flux normalisé.

Ce tableau indique les valeurs de TRIV, de rapport E/A et de TD à connaître en fonction du type de profil de remplissage.

### Profil normal / normalisé

Comme nous venons de le voir, les profils transmitraux de type normal et normalisé sont identiques.

Différentes méthodes écho-Doppler seront alors appliquées pour les différencier s'appuyant sur :

- le Doppler tissulaire,
- le Flux Veineux Pulmonaire,
- la vitesse de propagation en TM couleur,
- la morphologie de l'oreillette gauche,
- la manœuvre de Valsalva,
- ou encore l'échographie d'effort.

La vitesse de déplacement de l'anneau mitral est un paramètre reflétant au cours de la diastole les conséquences de l'allongement des fibres myocardiques dans le plan longitudinal au niveau de l'anneau.

L'acquisition du spectre Doppler s'effectue à partir d'une coupe apicale 4 cavités en réduisant les filtres et les gains au minimum et en plaçant la fenêtre d'échantillonnage au niveau de l'anneau latéral ou septal.

L'aspect normal de l'enregistrement DTI à l'anneau associe une onde systolique positive Sa, suivie de deux ondes diastoliques Ea et Aa. Chez le sujet normal, **l'onde Ea est supérieure à 8 cm/sec et le rapport Ea/Aa est supérieur à 1**.

### Vitesse de l'anneau mitral en Doppler Tissulaire

Le paramètre Ea est peu dépendant de la précharge, inversement proportionnel à la constante de relaxation Tau et diminue en cas de trouble de la relaxation.

Comme la vitesse de propagation, la mesure de l'onde Ea permet de différencier le flux transmitral normal avec une onde Ea supérieure à 8 cm/sec d'un flux normalisé pour lequel l'onde Ea sera significativement abaissée.

De même, l'onde Ea permet le diagnostic différentiel entre myocardopathie restrictive où elle est abaissée et péricardite constrictive où elle est normale.

En termes d'évaluation des pressions de remplissage, au-delà de la diminution progressive de l'onde Ea, c'est le rapport E/Ea qui est le mieux corrélé à la PDVG pré A.

Pour un rapport E/Ea inférieur à 8, les pressions de remplissage sont à considérer comme normales,

au-delà de 15, comme significativement élevées, mais entre ces deux bornes, le critère combiné ne permettra pas de conclure et nécessitera d'autres paramètres.

Sur cette figure, sont représentées les situations cliniques pour lesquelles le critère est valide et celles pour lesquelles il est invalidé, notamment en présence d'insuffisance mitrale sévère.

Enfin, d'après les dernières recommandations américaines et européennes (ASE/EAE), l'application des seuils dépend du site d'enregistrement et principalement en cas de FE préservée. On retiendra tout particulièrement le seuil supérieur à 13 en cas de moyennage des valeurs septale et latérale.

### Flux veineux pulmonaire

L'étude du flux veineux pulmonaire permet également de différencier le profil normal du profil pseudo-normal.

Elle est réalisée en échocardiographie transthoracique en incidence apicale 4 cavités après avoir repéré en Doppler couleur l'abouchement d'une veine pulmonaire et en plaçant la fenêtre d'échantillonnage du Doppler pulsé 1 cm avant cet abouchement.

Le flux veineux pulmonaire normal est triphasique, constitué d'une onde systolique antérograde positive S de l'ordre de 55 cm/sec et d'ITV de l'ordre de 14 cm, puis d'une diastolique antérograde D, de vitesse de l'ordre de 40 cm/sec et d'ITV de 7cm et enfin, une onde télédiastolique rétrograde négative A de 25 cm/sec témoignant d'un léger reflux lors de la systole auriculaire dans les veines pulmonaires.

Les déterminants du FVP sont :

- **pour l'onde S**, la contribution de la relaxation auriculaire et l'abaissement du plancher mitral au moment de la systole ventriculaire,
- **pour l'onde D**, la relaxation du VG et les compliances auriculaire et ventriculaire,
- **pour l'onde A**, la systole auriculaire et la compliance VG.

Sur un plan hémodynamique, il existe un parallélisme évident entre l'onde D pulmonaire et l'onde E mitrale et l'on constate chez le sujet normal que l'onde A mitrale est toujours plus ample et de durée plus grande que l'onde A pulmonaire.

L'étude des relations entre FVP et flux mitral lors d'anomalies de la fonction diastolique permet les descriptions suivantes :

Pour **un profil de type I ou trouble de la relaxation** on observe une diminution de l'onde D mais une onde A plus ample, expliquée par une redistribution télédiastolique du flux vers le ventricule gauche et les veines pulmonaires.

Devant **un profil de type III ou anomalie de la compliance**, il existe une diminution de l'onde S à 25-30 cm/sec au dépend de l'onde D qui augmente à 55-60 cm/sec, un rapport des ITV S / ITV S+D < 40% et une onde A peu modifiée en raison de la diminution de la contractilité auriculaire par élévation de la post-charge auriculaire.

Enfin, pour **le type II ou profil normalisé**, l'onde S s'abaisse et surtout, l'onde A pulmonaire est anormalement ample à 35 cm/sec et de durée augmentée de façon significative, supérieure à la durée de l'onde A mitrale.

Le flux veineux pulmonaire permet donc de distinguer un flux normal d'un flux de type normalisé en comparant les durées des ondes A mitrale et A pulmonaire.

**Quand la durée de l'onde A pulmonaire est supérieure à l'onde A mitrale, il s'agit d'un profil normalisé avec élévation de la pression télédiastolique**, signifiant un trouble de la compliance.

La faisabilité de la mesure de l'onde A pulmonaire varie de 40 à 90%, selon les auteurs. Les sensibilités et spécificités de ce critère diagnostic sont résumées sur ce tableau.

	n	ETT/ETO	Se	Sp	Faisabilité
Rossvoll	50	ETT	85	79	82%
Appleton	70	ETT	74	>95	87%
Chirillo	96	ETT	80	69	?
Roudaut	48	ETO	88	74	100%

Concernant l'estimation des pressions de remplissage à partir du flux veineux pulmonaire, les recommandations américaines et européennes (ASE/EAE) incitent à considérer trois situations :

- la première, quand la différence entre les durées des ondes A pulmonaire et A mitrale est inférieure à 0 msec, les pressions de remplissage sont à retenir comme basses,
- la deuxième, quand cette différence est supérieure à 20 msec, les pressions de remplissage sont à considérer comme élevées,
- enfin, pour une différence entre 0 et 20 msec, le niveau de pression de remplissage est douteux, nécessitant l'implémentation d'autres paramètres.

#### Vitesse de Propagation TM couleur

L'étude de la vitesse de propagation en TM couleur permet d'affiner l'analyse de la fonction diastolique.

La vitesse de propagation (VP) est un indice de relaxation qui analyse la phase de remplissage rapide au sein du ventricule gauche.

Son obtention s'effectue après repérage du flux couleur en coupe apicale 4 cavités, et alignement du curseur TM au centre de la cavité ventriculaire. La vitesse de défilement TM est réglée à 100 mm/sec et la vitesse d'aliasing abaissée entre 50 et 75% de la vitesse de l'onde E mitrale afin de faire apparaître une zone d'aliasing protodiastolique.

Le paramètre VP correspond à la pente du premier aliasing entre le plan mitral et un point situé 4 cm plus loin dans le ventricule gauche.

La valeur normale de VP est supérieure à 45 cm/sec chez l'adulte et supérieure à 55 cm/sec chez le sujet jeune.

La vitesse de propagation est inversement proportionnelle à la constante de relaxation Tau. Contrairement aux paramètres issus du flux transmitral, la VP est peu dépendante de la précharge. Elle permet ainsi de différencier le flux transmitral normal avec une VP supérieure à 45 cm/sec d'un flux normalisé pour lequel la VP sera significativement abaissée.

Également, la VP est utile au diagnostic différentiel entre mycardiopathie restrictive avec une VP abaissée et péricardite constrictive où la VP est normale.

Pour l'estimation des pressions de remplissage, il s'agit encore d'un indice combiné s'appuyant sur cette vitesse de propagation Vp et sur l'onde E mitrale qui est retenu en pratique quotidienne. D'après les recommandations ASE/EAE, les seuils généralement reconnus pour le rapport E/Vp sont :

- pour des pressions de remplissage basses, un rapport E/Vp < 1.5,
- pour des pressions de remplissage élevées, un rapport E/Vp > 2.5,

- enfin, entre 1.5 et 2.5, il est une nouvelle fois impossible de trancher.

Cet algorithme simplifié, proposé par B. Gallet, résume l'utilisation des différents paramètres et leur interprétation progressive afin de s'approcher au plus près des pressions de remplissage.

### Oreillette Gauche

Un élément d'évaluation particulièrement important et intéressant dans cette approche de la fonction diastolique est celui de la **morphologie de l'oreillette gauche**.

Cette oreillette gauche est un véritable vase d'expansion, capable d'absorber les variations de pressions et de volumes en se dilatant.

Ce phénomène est adaptatif et chronique, et de ce fait, le volume de l'oreillette gauche peut refléter le **niveau chronique** des pressions de remplissage, bien entendu en l'absence de valvulopathie mitrale significative ou de fibrillation auriculaire, ou autre cause d'atonie auriculaire.

Il faut bien noter ici que cette morphologie de l'oreillette gauche nous donne un niveau chronique d'élévation des pressions de remplissage, et non pas aigu comme les autres paramètres précédemment décrits.

La technique de mesure du volume de l'oreillette gauche s'appuie sur l'apical des 4 et 2 cavités, en utilisant la méthode Simpson biplan ou aire/longueur.

On retiendra particulièrement la valeur de 32 ml/m<sup>2</sup> comme indice d'élévation chronique des pressions de remplissage, mais également comme élément pronostique péjoratif.

### Manœuvre de Valsalva ou test à la trinitrine

Connaissant les conséquences des variations de précharge sur le flux transmitral, Dumesnil a démontré l'intérêt de la manœuvre de Valsalva pour démasquer les anomalies de la fonction diastolique chez les patients coronariens ou hypertendus.

En pratique, il faut demander au patient d'effectuer une expiration à glotte fermée, le profil normalisé se modifie alors en un profil de type trouble de la relaxation.

Une autre méthode inspirée du même principe consiste à administrer de la trinitrine qui de façon instantanée en diminuant le remplissage ventriculaire modifie un profil de type normalisé en un profil de type trouble de la relaxation caché jusqu'alors.

Cependant ces techniques peuvent être de réalisation et d'interprétation délicates.

### Échocardiographie d'effort

Certains auteurs ont proposé l'échocardiographie d'effort pour permettre une meilleure approche des pressions de remplissage au repos mais également à l'effort.

D'après les auteurs, l'analyse du flux transmitral au cours d'une échocardiographie d'effort permet de démasquer une élévation des pressions de remplissage avec les modifications d'un flux de type I vers un type II.

En pratique, c'est une technique difficile à mettre en œuvre dans les mesures des ondes E et A notamment dès que la fréquence cardiaque dépasse les 120 battements/mn.

### Curiosité

Il a été décrit dans la littérature la relation qui pouvait exister entre la présence d'une onde L mitrale, onde positive sur le flux transmitral entre l'onde E et l'onde A qui pouvait être un marqueur de flux pseudo-normal et prédicteur d'insuffisance cardiaque chez les patients avec hypertrophie ventriculaire gauche.

Il faut noter tout de même que cette onde L peut être présente de façon physiologique en cas de bradycardie.

## Limites

Les limites de l'étude de la diastole par échographie-Doppler sont respectivement :

- **l'âge**, avec chez le jeune, une onde E ample, une petite onde A, un rapport E/A > 2, un TD court, une onde D pulm > onde S.
- Au contraire, chez le sujet âgé, un trouble de la relaxation typique et une diminution des paramètres VP et Ea sont à noter. Retenons que chez le sujet âgé, un profil de type normal est anormal !
- **la fonction systolique du VG**, qui quand elle est conservée, dégrade les corrélations entre les différents paramètres écho-Doppler et les pressions de remplissage, à l'exception de  $\Delta A$  mitral/pulm. et des indices combinés.
- **la fibrillation auriculaire**, pour laquelle seuls le TD et le rapport E/VP sont validés.
- enfin **les valvulopathies régurgitantes**, pour lesquelles le flux transmitral n'a plus de valeur à l'opposé des indices combinés qui semblent valides.

## Fonction diastolique et Pronostic

Nous rappelons ici l'intérêt pronostique de l'étude de la fonction diastolique par écho-Doppler.

Cette étude de Rihal montre la différence de survie entre trois groupes de patients porteurs de cardiopathie dilatée et plus spécifiquement entre ceux ayant une fraction d'éjection inférieure à 25% et un temps de décélération supérieur ou inférieur à 130 msec.

Il est par ailleurs admis que devant un rétrécissement aortique serré, un profil de type III révèle une pression capillaire >15mmHg qui est associée à une mortalité post-opératoire significativement supérieure à un type I.

Enfin, il a été récemment démontré le caractère pronostique péjoratif d'un profil de type III irréversible (stade IV) chez des patients porteurs de cardiopathies dilatées avec 87% de décès ou transplantation à 4 ans contre 4% pour les stades III réversibles.

## Conclusion

L'échocardiographie Doppler permet une approche rapide, fiable, reproductible et non invasive de la fonction diastolique.

Le flux transmitral associé aux différents paramètres comme l'onde Ea en DTI, la vitesse de propagation, l'onde A pulmonaire et la morphologie de l'oreillette, permettent l'estimation des pressions de remplissage en aigu et en chronique.

Ces informations ont une conséquence immédiate dans la prise en charge des patients cardiaques notamment ceux qui sont porteurs de cardiopathies dilatées sévères.

Les paramètres de fonction diastolique permettent enfin un diagnostic précoce de cardiopathie débutante, d'insuffisance cardiaque à fonction systolique conservée, de rejet de greffe, ainsi que le diagnostic différentiel entre hypertrophie physiologique du sportif et HVG pathologique, ou encore entre péricardite constrictive et cardiopathie restrictive.

-----