

Quelle est la place du Doppler rénal dans la prise en charge de l'insuffisance rénale aiguë ?

Renal Doppler Ultrasound for the Management of Acute Kidney Injury

D. Schnell · M. Darmon

Reçu le 17 juillet 2016 ; accepté le 26 septembre 2016
© SRLF et Lavoisier SAS 2016

Résumé L'échographie rénale couplée au Doppler est l'examen de référence pour l'étude des gros vaisseaux artériels et veineux rénaux. Il pourrait également être intéressant comme outil d'évaluation du pronostic et de la perfusion rénale en réanimation. Deux techniques ont été proposées : l'indice de résistance (IR) et le Doppler avec injection de produit de contraste (*contrast-enhanced ultrasound*, CEUS). L'IR est un paramètre calculé à partir du Doppler rénal comme suit : $IR = \frac{\text{pic de vitesse systolique} - \text{vitesse minimale diastolique}}{\text{pic de vitesse systolique}}$. Ce dernier pourrait s'avérer utile pour le diagnostic précoce de l'insuffisance rénale aiguë ou de sa réversibilité chez des patients de réanimation. Cependant, de nombreux facteurs, physiologiques et pathologiques, peuvent influencer l'IR de façon imparfaitement connue. De plus, les données disponibles suggèrent que l'IR soit un paramètre fonctionnel intégré et non un outil fiable de monitoring du débit sanguin rénal ou un substitut à

la ponction-biopsie rénale. Si des études de confirmation sont nécessaires, les potentielles applications cliniques, la faisabilité, la reproductibilité et le faible coût pour un service déjà équipé en échographe justifient probablement que les investigations dans ce domaine soient poursuivies. Le CEUS permet théoriquement d'évaluer plus précisément la microcirculation rénale. Cependant, les résultats préliminaires sont décevants, la fiabilité des mesures limitées et le coût de la technique non négligeable. Des études supplémentaires sont nécessaires pour permettre de mieux appréhender l'intérêt potentiel et les limites de cet outil.

Mots clés Doppler · Indice de résistance · Insuffisance rénale aiguë · Diagnostic · Contrast-enhanced ultrasound

Abstract Renal Doppler has been proven to be a valuable tool for assessing large arteries and veins of the kidney. An increasing body of evidences suggests that renal Doppler may help to assess perfusion of kidneys in the critically ill. Two techniques have been proposed: renal resistive index (RI) and contrast-enhanced ultrasound (CEUS). The RI is a Doppler-derived parameter that is calculated as follows: $RI = \frac{\text{peak systolic shift} - \text{minimum diastolic shift}}{\text{peak systolic shift}}$. An increasing body of evidences suggests RI may be of interest for the early diagnosis of acute kidney injury and to evaluate its reversibility. However, numerous physiological and pathological factors have been shown to influence RI and this integrative parameter neither constitutes an alternative to renal biopsy nor provides valuable information on renal blood flow. Although confirmation studies are needed, the potential clinical usefulness, feasibility, reproducibility, and the low cost of the technic probably justify additional investigations in this field. Theoretically, CEUS allows a more precise assessment of renal microcirculation. However, preliminary results in the critically ill are limited and disappointing; reproducibility is limited and the cost of the contrast media is significant.

D. Schnell (✉)
Réanimation polyvalente,
centre hospitalier d'Angoulême,
rond-point de Girac, F-16959 Angoulême, France
e-mail : david.schnell1@gmail.com

M. Darmon
Réanimation médicochirurgicale,
CHU de Saint Étienne, avenue Albert Raymond,
F-42270 Saint-Priest-en-Jarez, France

Faculté de médecine Jacques Lisfranc,
université Jean Monnet, 10 chemin de la Marandière,
F-42270 Saint-Priest-en-Jarez, France

Abréviations

CEUS : *contrast-enhanced ultrasound*, Doppler avec injection de produit de contraste

IP : indice de pulsativité intrarénal

IR : indice de résistance intrarénal

IRA : insuffisance rénale aiguë

Therefore, although additional studies are expected, CEUS remains mainly a research tool.

Keywords Renal Doppler · Resistive index · Acute kidney injury · Evaluation · Contrast-enhanced ultrasound

Introduction

L'insuffisance rénale aiguë (IRA) complique fréquemment l'évolution des patients de réanimation et reste associée à un pronostic péjoratif [1–3]. Son diagnostic repose sur des critères fonctionnel (oligurie) et biologique (élévation de la créatininémie) qui comportent d'importantes limitations [4]. L'oligurie est peu spécifique, et l'élévation de la créatininémie est souvent retardée ne survenant que pour des baisses de plus de 30 % du débit de filtration glomérulaire [5,6]. Si la manière d'appréhender les mécanismes de l'IRA a changé, la durée et la sévérité de celle-ci étant plus probablement la conséquence de l'importance de l'agression que de mécanismes physiopathologiques distincts, la distinction entre IRA persistante et transitoire reste cliniquement pertinente afin de permettre la mise en place des thérapeutiques adaptées [7–9]. Cette distinction reste complexe, et les paramètres fonctionnels urinaires ont un pouvoir discriminant limité [10–13].

L'échographie rénale est un examen de routine pour l'évaluation des reins, des cavités excrétrices et des artères et veines rénales [14,15]. L'étude des veines rénales est néanmoins rarement utile en réanimation. Deux stratégies d'analyse Doppler de la perfusion rénale sont cependant en cours d'évaluation afin d'évaluer plus précisément le pronostic ou la perfusion rénale : l'indice de résistance (IR) intrarénal évalué en technique Doppler et le Doppler avec injection de produit de contraste (*contrast-enhanced ultrasound*, CEUS). L'IR mesuré en échographie couplée au Doppler a été proposé afin d'apprécier soit la perfusion rénale au cours de diverses néphropathies [16,17], soit le pronostic rénal [11,18,19]. Si cet outil semble prometteur, plusieurs données suggèrent qu'il ne serait qu'un reflet très médiocre de la perfusion ou des résistances vasculaires rénales. À l'opposé, le Doppler avec injection de produit de contraste pourrait être plus fiable afin d'évaluer la perfusion rénale [20,21]. Les données disponibles sont cependant extrêmement préliminaires, décevantes et la technique coûteuse [20,22,23].

Cette mise au point abordera successivement ces deux techniques, reviendra sur les données disponibles tant en termes de faisabilité qu'en termes de performance et tentera de délimiter l'intérêt potentiel de ces outils. Les données disponibles sont cependant insuffisantes pour recommander leur utilisation en pratique courante [24].

Indice de résistance rénal mesuré par le Doppler

Mesure, faisabilité et reproductibilité

La mesure de l'IR nécessite une étude Doppler, mais sa réalisation est néanmoins simple, rapide et son apprentissage aisé. En effet, des internes ou chefs de clinique de réanimation avec une simple formation en échographie générale sont à même de réaliser une mesure de l'IR chez la plupart des patients après un apprentissage d'une demi-journée [25]. La reproductibilité interobservateur de l'IR est bonne lorsque mesuré par des radiologues ou des réanimateurs expérimentés [16,17,19]. Chez les patients de réanimation, la reproductibilité interobservateur entre internes et réanimateurs expérimentés est satisfaisante, mais la précision de la mesure est limitée, la zone d'incertitude de la mesure étant de plus ou moins 10 % [25].

La mesure est habituellement réalisée à l'aide de sondes de 2 à 5 MHz [16,17]. Si une sonde convexe destinée à l'échographie abdominale est préférable, une petite sonde sectorielle destinée à l'échographie cardiaque peut aussi convenir [16,17]. La voie préférentielle reste la voie postéro-latérale. L'examen est débuté en échographie bidimensionnelle pour localiser les reins, rechercher les signes d'une éventuelle atteinte rénale chronique ou une dilatation des cavités pyélocalicielles. L'obtention d'une coupe longitudinale du rein permet une bonne visualisation des vaisseaux en Doppler couleur et d'obtenir des mesures de qualité [16,17]. Une échelle d'évaluation semi-quantitative de la perfusion rénale a été proposée (Tableau 1) et semble corrélée à l'IR [14,25]. L'analyse est poursuivie en Doppler pulsé au niveau des artères interlobaires ou arquées. La fenêtre de tir Doppler est réduite au minimum, et le spectre obtenu doit être optimisé de manière à faciliter les mesures : l'échelle de vitesse est réglée de manière à obtenir les plus grandes courbes possible sans repliement spectral (*aliasing*) [16,17]. Le spectre Doppler est considéré optimal lorsque au moins trois cycles successifs sont analysables. Il faut noter que la vitesse du

Tableau 1 Échelle d'évaluation semi-quantitative de la perfusion rénale en Doppler couleur [14]

Grade	Perfusion rénale évaluée en Doppler couleur
0	Pas de vaisseau identifiable
1	Quelques vaisseaux visibles au niveau du hile
2	Vaisseaux hilaires et interlobaires visibles dans la majorité du parenchyme
3	Vaisseaux visibles jusqu'aux artères arquées dans la majorité du parenchyme

flux sanguin rénal décroît progressivement de l'artère rénale jusqu'aux artères arquées en parallèle avec une augmentation relative du flux diastolique. En conséquence, l'IR décroît progressivement depuis l'artère rénale vers les artères interlobaires et arquées, au niveau desquelles sont réalisées les mesures [26]. L'analyse des courbes Doppler est le plus souvent réalisée par l'IR (aussi appelé indice de Pourcelot ;

Fig. 1). Il est obtenu en moyennant les mesures réalisées sur trois à cinq cycles à l'aide de la formule suivante :

$$IR = \frac{[\text{pic de vitesse systolique} - \text{vitesse minimale diastolique}]}{\text{pic de vitesse systolique}}$$

L'index de pulsatilité (IP = $[\text{pic de vitesse systolique} - \text{vitesse minimale diastolique}] / \text{vitesse moyenne}$) a été utilisé par certains auteurs. Il est étroitement corrélé à l'IR

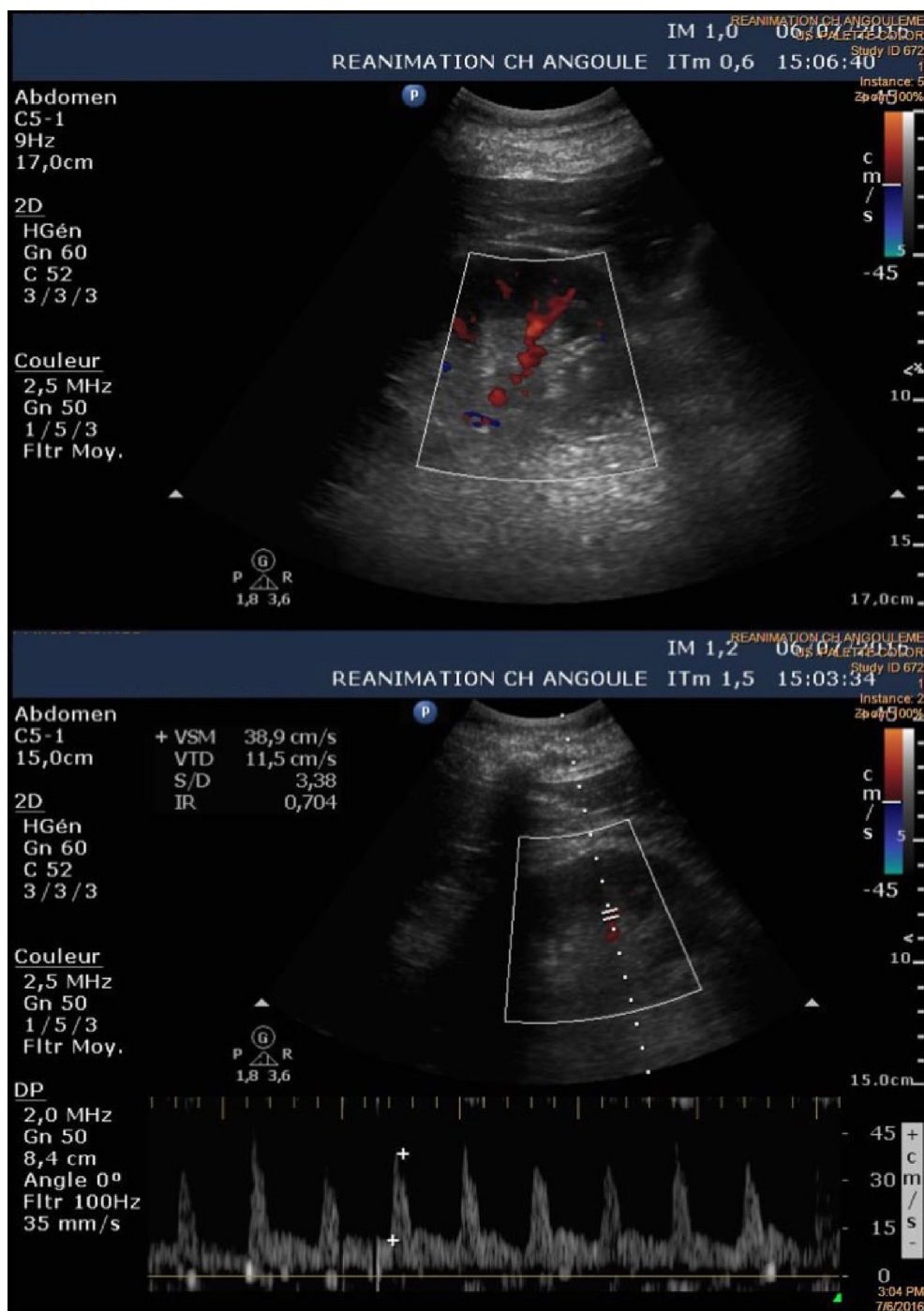


Fig. 1 Étude échographique rénale en Doppler couleur montrant la vascularisation rénale avec mesure de l'indice de résistance en Doppler pulsé

($r = 0,92$; $p < 0,001$) [27]. Si le choix de l'un ou l'autre de ces deux paramètres est théoriquement indifférent, l'IR est cependant plus simple à mesurer (pas de nécessité de mesure de la vitesse moyenne) et a été plus largement étudié en réanimation.

Déterminants de l'indice de résistance

L'IR a longtemps été considéré comme un indicateur des résistances vasculaires et du débit sanguin rénal [28]. Cependant, des études cliniques et expérimentales ont montré une faible corrélation entre l'IR d'une part et les résistances vasculaires et le débit sanguin rénal d'autre part [29–31]. En réalité, de nombreux facteurs physiologiques et pathologiques influencent les vitesses du flux sanguin intraparenchymateux rénal et donc l'IR.

En pratique, l'IR semble peu représentatif des résistances vasculaires rénales. Ainsi, si les études expérimentales confirment une corrélation entre résistances vasculaires et IR, cela n'est vrai que pour des variations supraphysiologiques des résistances responsables de variations de l'IR de l'ordre de l'erreur de mesure [32]. Par ailleurs, de nombreux facteurs peuvent influencer sur l'IR, au sein desquels il convient de souligner le rôle de la compliance vasculaire (distensibilité vasculaire) rénale mais aussi centrale [29,30,32]. Ce facteur expliquerait la plupart des variations d'IR observées dans certaines situations physiologiques et pathologiques : influence de l'hypertension et du diabète sur l'IR [33,34], élévation de l'IR avec l'âge [35] et élévation de l'IR du greffon rénal après transplantation en cas d'atteinte vasculaire préalable [36].

Dans le même sens, toute modification de pression intra-abdominale ou interstitielle rénale peut, par diminution de la distensibilité vasculaire, entraîner une élévation de l'IR [30,37,38].

Indice de résistance en réanimation

L'IR a été proposé comme outil de monitoring de la perfusion rénale chez les malades de réanimation en lien avec les études antérieures suggérant une corrélation entre IR, résistances vasculaires et débit sanguin rénal [32,39–41]. Des études menées chez des patients de réanimation ont utilisé l'IR pour évaluer l'impact sur la perfusion rénale de l'administration de faibles doses de dopamine et de changements graduels de la pression artérielle moyenne induits par la noradrénaline [27,42]. Malgré des résultats significatifs, il faut noter que les variations observées d'IR étaient modestes et leur signification réelle en termes de perfusion rénale indéterminée. Fondées sur la même hypothèse, plusieurs études ont tenté de démontrer un intérêt de l'IR pour la détection précoce d'un choc hémorragique occulte chez

des patients traumatisés normotendus [43] et d'évaluer la réponse rénale à une épreuve de remplissage chez des malades de réanimation [44,45]. L'utilisation de l'IR comme outil de monitoring du débit sanguin rénal reste cependant discutable et limitée par les facteurs confondants précédemment cités. Une étude interventionnelle vient de se terminer sur cette thématique et devrait permettre de clarifier le rôle du Doppler dans cette indication (NCT01473498, Personalized Mean Arterial Pressure Management on Renal Function During Septic Shock [DORESEP]).

Dans une étude préliminaire menée chez des patients de réanimation souffrant de sepsis sévère et choc septique, l'IR mesuré à l'admission était significativement plus élevé chez les patients développant une IRA dans les jours suivants [19]. Ce résultat a été confirmé dans une population de patients après chirurgie cardiaque nécessitant une circulation extracorporelle [46]. De plus, plusieurs études ont suggéré l'intérêt de l'IR mesuré à l'admission en réanimation pour différencier les patients avec IRA persistante de ceux avec IRA réversible [11,18,47]. En effet, l'IR était significativement plus élevé chez des patients développant une IRA persistante comparés à ceux sans IRA ou avec IRA transitoire (Fig. 2) [11]. Ces résultats découlent cependant de séries souvent monocentriques, au nombre de patients inclus limités et à la reproductibilité externe incertaine. Ils doivent donc être interprétés avec prudence en l'absence d'une étude de confirmation. Cette prudence est d'autant plus justifiée qu'une étude contradictoire a été publiée, suggérant qu'aucune valeur seuil de l'IR ne permettait d'évaluer la réversibilité de l'IRA chez les malades de réanimation [48]. Si une méta-analyse souligne l'intérêt potentiel de cette technique démontrant une performance bonne à excellente, une hétérogénéité notable entre les études était notée et la qualité méthodologique de ces dernières était limitée [49].

Enfin, il convient de souligner que si la performance de l'IR à évaluer le pronostic rénal à court terme devait se confirmer, deux hypothèses non exclusives pourraient permettre d'expliquer cette association. Ainsi, un IR élevé pourrait témoigner soit d'une atteinte vasculaire rénale préexistante, soit d'une élévation de la pression interstitielle rénale consécutive à l'agression rénale aiguë. En effet, les anomalies préexistantes de la compliance vasculaire rénale, en lien avec une atteinte rénale préalable, préclinique ou méconnue observée chez les patients âgés, hypertendus et diabétiques sont à la fois un facteur de risque d'IRA et d'IRA persistante en réanimation [11,19]. L'élévation de l'IR serait alors le marqueur d'un terrain à risque de développer une IRA persistante en réanimation. Par ailleurs, une élévation de la pression interstitielle peut survenir dans les suites d'une agression rénale, du fait d'un œdème interstitiel, entraînant une diminution de la distensibilité vasculaire [11,19]. L'élévation de l'IR serait alors le marqueur de lésions rénales évolutives.

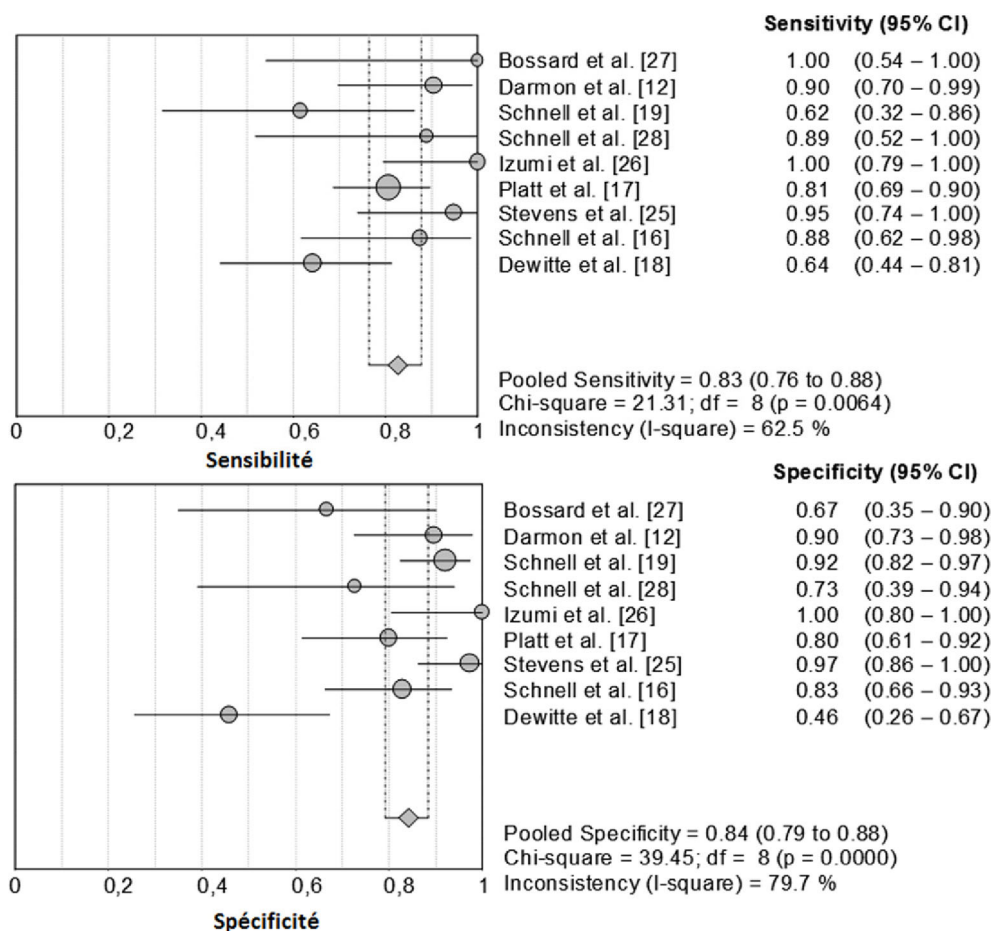


Fig. 2 Sensibilité et spécificité de l'IR pour la prédiction de la récupération rénale à court terme (reproduit d'après Ninet et al. [49], avec autorisation du journal)

Si les doutes actuels ne permettent pas de recommander l'utilisation de cet outil en pratique clinique [24], les données disponibles suggèrent cependant une performance diagnostique pour l'évaluation du pronostic rénal à court terme similaire à celle des nouveaux biomarqueurs plasmatiques ou urinaires [50]. Les potentielles applications cliniques, la faisabilité, la reproductibilité et l'absence de surcoût pour un service déjà équipé en échographe justifient probablement que les investigations dans ce domaine soient poursuivies.

Échographie avec produit de contraste

Au-delà de la simple mesure de l'IR, l'échographie peut être utilisée avec l'aide d'un produit de contraste constitué de microbulles (échographie avec produit de contraste — *contrast-enhanced ultrasound*, CEUS) (Fig. 3). Cette technique permet d'évaluer plus précisément la microcirculation, et elle a été utilisée afin d'évaluer la perfusion de multiples organes ou tumeurs [20,51,52]. D'une part, les microbulles

permettent de visualiser la microcirculation, d'autre part, leur sensibilité aux ondes acoustiques permet de réaliser des séquences de destruction–reperfusion permettant d'approcher la perfusion viscérale quantitative [21]. Deux indices dérivés sont obtenus : le temps de transit moyen et le volume sanguin relatif, le rapport de ces deux indices reflétant la perfusion viscérale. Dans une étude réalisée chez le sujet sain exposé à une perfusion d'angiotensine II puis à un inhibiteur de l'enzyme de conversion, cet indice de perfusion était concordant à la fois avec les variations attendues de perfusion rénale et les variations de débit sanguin rénal estimées par l'acide para-aminohippurique [21]. Les données préliminaires réalisées en chirurgie cardiaque ont confirmé la parfaite tolérance de cette technique ainsi que sa faisabilité [23]. Cependant, plusieurs limites méritent d'être soulignées. Ainsi, l'augmentation de la pression artérielle moyenne induite par la noradrénaline chez des patients présentant un état de choc n'était associée à aucune variation significative de la perfusion rénale estimée par CEUS [22]. Les données de perfusion rénale obtenues par CEUS n'étaient par ailleurs, chez ces

patients, associées à aucune caractéristique clinique ou biologique, et notamment de fonction rénale [22]. Enfin, les données soulignaient une fiabilité de la mesure limitée avec un intervalle de confiance de la mesure de $\pm 25\%$ et des discor-

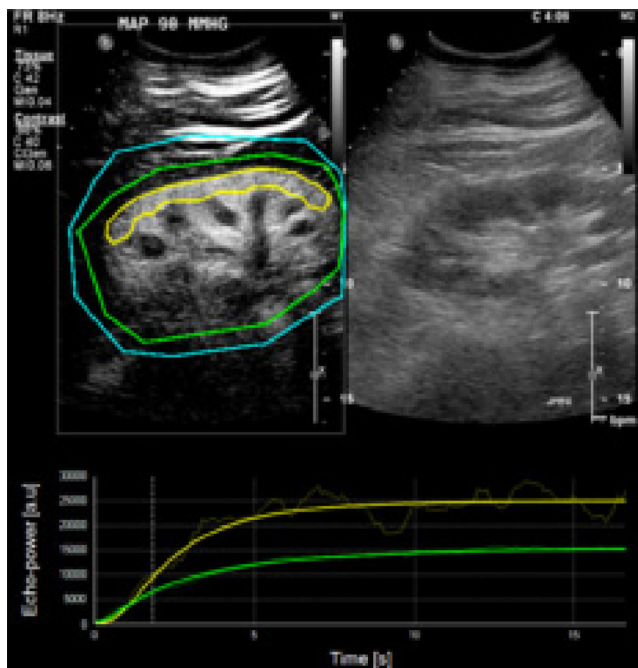


Fig. 3 Étude échographique rénale en Doppler avec produit de contraste (CEUS) : réalisation d'une séquence destruction-reperfusion et mesure du volume sanguin relatif et du temps de transit moyen. Après définition d'une large zone d'intérêt sur le cortex (ligne jaune, panel du haut à gauche), le logiciel établit une courbe d'intensité du signal en fonction du temps (courbe jaune, panel du bas) utilisée pour calculer les indices dérivés. La courbe verte correspond à l'ensemble des tissus (zone d'intérêt, rein restant et loge rénale) et n'a pas d'intérêt dans l'étude. Le T0 correspond à la destruction des microbulles par un flash d'ultrasons (reproduit d'après Schneider et al. [22])

dances dans la variation des paramètres estimés (temps de transit et volume sanguin) dans près de 25 % des cas [22,23]. Ces données humaines ont été secondairement confirmées par une étude animale, soulignant l'hétérogénéité des résultats obtenus et l'absence de corrélation entre indices dérivés du CEUS et les données macro- ou microcirculatoires rénales [22]. Au-delà de ces résultats décevants, la technique reste coûteuse, ne serait-ce que par le coût actuel des produits de contraste (80 à 100 € par examen) et le coût estimé de la technique en dehors de la réanimation (cancérologie), est de l'ordre de 180 € par examen [20].

Conclusion

Plusieurs techniques d'échographie rénale couplée au Doppler ont été proposées afin d'évaluer le pronostic et la perfusion rénale en réanimation, avec chacune ses avantages et inconvénients propres (Tableau 2). Si l'échographie de contraste permet théoriquement d'évaluer précisément la perfusion rénale, la signification exacte de la mesure en termes de perfusion reste incertaine, sa précision limitée et son coût élevé. Ces limites confinent actuellement la technique à la recherche. L'IR mesuré en échographie rénale couplée au Doppler est un examen simple, rapide, reproductible et non invasif. Une échelle semi-quantitative en Doppler couleur est par ailleurs disponible, permettant de simplifier cet examen et bien corrélée à l'IR [25]. Un faisceau d'arguments suggère que l'IR et l'échelle semi-quantitative pourraient s'avérer utile pour le diagnostic précoce de l'IRA et de sa réversibilité chez les patients de réanimation. Ces données préliminaires doivent cependant être interprétées avec prudence au vu des multiples déterminants de l'IR. Des études de confirmation sont nécessaires avant d'envisager la diffusion de ces techniques en pratique quotidienne.

Tableau 2 Comparaison des outils d'évaluation de la perfusion rénale en échographie couplée au Doppler : indice de résistance (IR), échelle semi-quantitative et échographie de contraste (CEUS)

	IR	Échelle semi-quantitative	CEUS
Avantages	Rapide Non invasif Reproductible Apprentissage aisé	Simplicité et rapidité accrues Reproductible Apprentissage aisé	Imagerie fonctionnelle spécifique de la perfusion ?
Inconvénients	Déterminants nombreux Précision limitée de la mesure	Mesure subjective	Signification exacte inconnue Fiabilité très limitée Matériel spécifique et coût
Applications cliniques	Pronostic rénal	Pronostic rénal	Optimisation hémodynamique rénale
Niveau de preuve	Faible à modéré	Faible à modéré	Études de faisabilité

Liens d'intérêts : Les auteurs déclarent ne pas avoir de lien d'intérêt.

Références

- Chertow GM, Burdick E, Honour M, Bonventre JV, Bates DW (2005) Acute kidney injury, mortality, length of stay, and costs in hospitalized patients. *J Am Soc Nephrol* 16:3365–70
- Metnitz PG, Krenn CG, Steltzer H, et al (2002) Effect of acute renal failure requiring renal replacement therapy on outcome in critically ill patients. *Crit Care Med* 30:2051–8
- Bagshaw SM (2008) Short- and long-term survival after acute kidney injury. *Nephrol Dial Transplant* 23:2126–8
- Mehta RL, Kellum JA, Shah SV, et al (2007) Acute kidney injury network: report of an initiative to improve outcomes in acute kidney injury. *Crit Care* 11:R31
- Waikar SS, Bonventre JV (2009) Creatinine kinetics and the definition of acute kidney injury. *J Am Soc Nephrol* 20:672–9
- Prowle JR, Liu YL, Licari E, et al (2011) Oliguria as predictive biomarker of acute kidney injury in critically ill patients. *Crit Care* 15:R172
- Khwaja A (2012) KDIGO clinical practice guidelines for acute kidney injury. *Nephron Clin Pract* 120:c179–c84
- Schneider AG, Bellomo R (2013) Urinalysis and pre-renal acute kidney injury: time to move on. *Crit Care* 17:141
- Perinel S, Vincent F, Lautrette A, et al (2015) Transient and persistent acute kidney injury and the risk of hospital mortality in critically ill patients: results of a multicenter cohort study. *Crit Care Med* 43:e269–e75
- Pons B, Lautrette A, Oziel J, et al (2013) Diagnostic accuracy of early urinary index changes in differentiating transient from persistent acute kidney injury in critically ill patients: multicenter cohort study. *Crit Care* 17:R56
- Darmon M, Schortgen F, Vargas F, et al (2011) Diagnostic accuracy of Doppler renal resistive index for reversibility of acute kidney injury in critically ill patients. *Intensive Care Med* 37:68–76
- Darmon M, Vincent F, Dellamonica J, et al (2011) Diagnostic performance of fractional excretion of urea in the evaluation of critically ill patients with acute kidney injury: a multicenter cohort study. *Crit Care* 15:R178
- Legrand M, Le Cam B, Perbet S, et al (2016) Urine sodium concentration to predict fluid responsiveness in oliguric ICU patients: a prospective multicenter observational study. *Crit Care* 20:165
- Barozzi L, Valentino M, Santoro A, Mancini E, Pavlica P (2007) Renal ultrasonography in critically ill patients. *Crit Care Med* 35: S198–S205
- Platt JF (1997) Doppler ultrasound of the kidney. *Semin Ultrasound CT MR* 18:22–32
- Schnell D, Darmon M (2012) Renal Doppler to assess renal perfusion in the critically ill: a reappraisal. *Intensive Care Med* 38:1751–60
- Schnell D, Darmon M (2015) Bedside Doppler ultrasound for the assessment of renal perfusion in the ICU: advantages and limitations of the available techniques. *Crit Ultrasound J* 7:24
- Schnell D, Deruddre S, Harrois A, et al (2012) Renal resistive index better predicts the occurrence of acute kidney injury than cystatin C. *Shock* 38:592–7
- Lerolle N, Guérot E, Faisy C, Bornstain C, Diehl JL, Fagon JY (2006) Renal failure in septic shock: predictive value of Doppler-based renal arterial resistive index. *Intensive Care Med* 32:1553–9
- Lassau N, Bonastre J, Kind M, et al (2014) Validation of dynamic contrast-enhanced ultrasound in predicting outcomes of antiangiogenic therapy for solid tumors: the French multicenter support for innovative and expensive techniques study. *Invest Radiol* 49:794–800
- Schneider AG, Hofmann L, Wuerzner G, et al (2012) Renal perfusion evaluation with contrast-enhanced ultrasonography. *Nephrol Dial Transplant* 27:674–81
- Schneider AG, Goodwin MD, Schelleman A, Bailey M, Johnson L, Bellomo R (2014) Contrast-enhanced ultrasonography to evaluate changes in renal cortical microcirculation induced by noradrenaline: a pilot study. *Crit Care* 18:653
- Schneider AG, Goodwin MD, Schelleman A, Bailey M, Johnson L, Bellomo R (2013) Contrast-enhanced ultrasound to evaluate changes in renal cortical perfusion around cardiac surgery: a pilot study. *Crit Care* 17:R138
- Ichai C, Vinsonneau C, Souweine B, et al (2016) Acute kidney injury in the perioperative period and in intensive care units (excluding renal replacement therapies). *Ann Intensive Care* 6:48
- Schnell D, Reynaud M, Venot M, et al (2014) Resistive Index or color-Doppler semi-quantitative evaluation of renal perfusion by inexperienced physicians: results of a pilot study. *Minerva Anestesiol* 80:1273–81
- Knapp R, Plotzeneder A, Frauscher F, et al (1995) Variability of Doppler parameters in the healthy kidney: an anatomic-physiologic correlation. *J Ultrasound Med* 14:427–9
- Lauschke A, Teichgraber UK, Frei U, et al (2006) “Low-dose” dopamine worsens renal perfusion in patients with acute renal failure. *Kidney Int* 69:1669–74
- Platt JF, Rubin JM, Ellis JH, DiPietro MA (1989) Duplex Doppler US of the kidney: differentiation of obstructive from nonobstructive dilatation. *Radiology* 171:515–7
- Bude RO, Rubin JM (1999) Relationship between the resistive index and vascular compliance and resistance. *Radiology* 211:411–7
- Murphy ME, Tublin ME (2000) Understanding the Doppler RI: impact of renal arterial distensibility on the RI in a hydronephrotic ex vivo rabbit kidney model. *J Ultrasound Med* 19:303–14
- Wan L, Yang N, Hiew CY, et al (2008) An assessment of the accuracy of renal blood flow estimation by Doppler ultrasound. *Intensive Care Med* 34:1503–10
- Tublin ME, Tessler FN, Murphy ME (1999) Correlation between renal vascular resistance, pulse pressure, and the resistive index in isolated perfused rabbit kidneys. *Radiology* 213:258–64
- Derchi LE, Leoncini G, Parodi D, et al (2005) Mild renal dysfunction and renal vascular resistance in primary hypertension. *Am J Hypertens* 18:966–71
- Ohta Y, Fujii K, Arima H, et al (2005) Increased renal resistive index in atherosclerosis and diabetic nephropathy assessed by Doppler sonography. *J Hypertens* 23:1905–11
- Terry JD, Rysavy JA, Frick MP (1992) Intrarenal Doppler: characteristics of aging kidneys. *J Ultrasound Med* 11:647–51
- Naesens M, Heylen L, Lerut E, et al (2013) Intrarenal resistive index after renal transplantation. *N Engl J Med* 369:1797–806
- Umgelter A, Reindl W, Franzen M, Lenhardt C, Huber W, Schmid RM (2009) Renal resistive index and renal function before and after paracentesis in patients with hepatorenal syndrome and tense ascites. *Intensive Care Med* 35:152–6
- Kirkpatrick AW, Colistro R, Laupland KB, et al (2007) Renal arterial resistive index response to intraabdominal hypertension in a porcine model. *Crit Care Med* 35:207–13
- Duranteau J, Deruddre S, Vigue B, Chemla D (2008) Doppler monitoring of renal hemodynamics: why the best is yet to come. *Intensive Care Med* 34:1360–1
- Platt JF (1992) Duplex Doppler evaluation of native kidney dysfunction: obstructive and nonobstructive disease. *AJR Am J Roentgenol* 158:1035–42
- Mostbeck GH, Gössinger HD, Mallek R, Siostrzonek P, Schneider B, Tscholakoff D (1990) Effect of heart rate on Doppler

- measurements of resistive index in renal arteries. *Radiology* 175:511-3
42. Deruddre S, Cheisson G, Mazoit JX, Vicaut E, Benhamou D, Duranteau J (2007) Renal arterial resistance in septic shock: effects of increasing mean arterial pressure with norepinephrine on the renal resistive index assessed with Doppler ultrasonography. *Intensive Care Med* 33:1557-62
 43. Corradi F, Brusasco C, Vezzani A, et al (2011) Hemorrhagic shock in polytrauma patients: early detection with renal Doppler resistive index measurements. *Radiology* 260:112-8
 44. Schnell D, Camous L, Guyomarc'h S, et al (2013) Renal perfusion assessment by renal Doppler during fluid challenge in sepsis. *Crit Care Med* 41:1214-20
 45. Moussa MD, Scolletta S, Fagnoul D, et al (2015) Effects of fluid administration on renal perfusion in critically ill patients. *Crit Care* 19:250
 46. Bossard G, Bourgoin P, Corbeau JJ, Huntzinger J, Beydon L (2011) Early detection of postoperative acute kidney injury by Doppler renal resistive index in cardiac surgery with cardiopulmonary bypass. *Br J Anaesth* 107:891-8
 47. Izumi M, Sugiura T, Nakamura H, Nagatoya K, Imai E, Hori M (2000) Differential diagnosis of prerenal azotemia from acute tubular necrosis and prediction of recovery by Doppler ultrasound. *Am J Kidney Dis* 35:713-9
 48. Dewitte A, Coquin J, Meyssignac B, et al (2012) Doppler resistive index to reflect regulation of renal vascular tone during sepsis and acute kidney injury. *Crit Care* 16:R165
 49. Ninet S, Schnell D, Dewitte A, Zeni F, Meziani F, Darmon M (2015) Doppler-based renal resistive index for prediction of renal dysfunction reversibility: a systematic review and meta-analysis. *J Crit Care* 30:629-35
 50. Dewitte A, Joannes-Boyau O, Sidobre C, et al (2015) Kinetic eGFR and novel AKI biomarkers to predict renal recovery. *Clin J Am Soc Nephrol* 10:1900-10
 51. Sever A, Broillet A, Schneider M, et al (2010) Dynamic visualization of lymphatic channels and sentinel lymph nodes using intradermal microbubbles and contrast-enhanced ultrasound in a swine model and patients with breast cancer. *J Ultrasound Med* 29:1699-704
 52. Friedrich-Rust M, Klopffleisch T, Nierhoff J, et al (2013) Contrast-enhanced ultrasound for the differentiation of benign and malignant focal liver lesions: a meta-analysis. *Liver Int* 33:739-55