

Index de résistance rénal au cours du choc septique

Renal resistance index during septic shock

Mahmoud Marzouk, Aymen Adhoum, Azza Ben Yedder, Rabeb Hammami, Saber Thamloui, Nader Baffoun

Université Tunis El Manar, Faculté de médecine de Tunis, 1007, Institut national de neurologie de Tunis, Service d'anesthésie-réanimation, 1007, Tunis, Tunisie

RÉSUMÉ

Introduction: L'insuffisance rénale aiguë (IRA) est la complication la plus fréquente au cours du choc septique. La mesure de l'index de résistance rénal (IRR) par échographie est un moyen qui permet d'évaluer l'hémodynamique rénale.

Objectifs: Étudier la variabilité de l'IRR au cours du choc septique et sa corrélation avec la survenue d'une IRA.

Méthodes: Il s'agit d'une étude prospective observationnelle incluant les patients en choc septique et sous ventilation mécanique. Le recueil de données a été réalisé entre octobre 2022 et Juillet 2023. L'IRR a été mesuré pendant les cinq premiers jours du choc.

Résultats: On a retenu 40 patients pour l'étude. L'âge moyen était de 51 ans \pm 13,4 avec un sex-ratio de 2,33. La valeur moyenne de l'IRR était de 0,704 avec des extrêmes de 0,52 à 0,83. Les patients ont été répartis en deux groupes : IRA (+) et IRA (-). L'IRR dans le groupe IRA(+) était significativement plus élevé que dans le groupe IRA (-) (0,757 contre 0,672; $p=0,013$). L'IRR permettait de prédire la survenue d'une IRA avec une aire sous la courbe ROC de 0,75 ($p=0,007$) et la valeur cut-off de 0,71 (spécificité=64%, sensibilité=73%).

Conclusion: L'évaluation de l'IRR pourrait être un moyen qui prédit la survenue d'IRA en association avec les marqueurs cliniques et biologiques classiques. Sa validation orientera d'avantage la prise en charge vers une protection rénale optimale chez les patients en choc septique.

Mots clés: Choc septique - Insuffisance rénale aigue - Créatinine - Diurèse - Ultrasons -Résistance vasculaire

ABSTRACT

Introduction: Acute kidney Injury (AKI) is the most frequent complication of septic shock. Bedside ultrasound measurement of the renal resistance index (RRI) is an interesting way of assessment of renal hemodynamics.

Aims: To study the variability of RRI during septic shock and its correlation with the occurrence of AKI.

Methods: This is a prospective observational study including patients in septic shock and on mechanical ventilation. Data collection was carried out between October 2022 and July 2023. RRI was measured during the first five days of shock.

Results: Forty patients were enrolled in the study. Mean age was equal to 51 years \pm 13.4 and sex ratio was equal to 2.33. The mean RRI value was 0.704, with extremes ranging from 0.52 to 0.83. Patients were divided into two groups : AKI(+) and AKI (-). RRI in the group AKI (+) was higher than in the group AKI (-) (0.757 vs. 0.672; $p=0.013$). RRI predicted the occurrence of AKI, with an area under the ROC curve of 0.75 ($p=0.007$) and a cut-off value of 0.71 (specificity=64%, sensitivity=73%).

Conclusion: Assessment of RRI could be a useful technique of predicting the onset of AKI in association with the conventional markers. Its validation will guide management towards optimal renal protection in patients with septic shock.

Key words: Acute kidney injury - Creatinine - Septic shock- Diuresis - Ultrasound - Vascular resistance

Correspondance

Mahmoud Marzouk

Service d'anesthésie réanimation de l'institut national de neurologie de Tunis.

Faculté de médecine de Tunis, Université De Tunis El Manar, Tunis, Tunisie

Email: Mahmoud.marzouk@fmt.utm.tn

INTRODUCTION

Le choc septique est un état infectieux grave qui peut aboutir à une défaillance multiviscérale et au décès (1). Il est une cause majeure de mortalité en réanimation (2). L'insuffisance rénale aiguë (IRA) complique plus de 50% des chocs septiques et contribue à l'augmentation de la morbi-mortalité et du coût des soins (3) (4).

Le diagnostic de l'IRA repose sur l'augmentation du taux sérique de la créatinine et/ou la présence d'une diminution du débit urinaire en tant que marqueurs indirects du débit de filtration glomérulaire (DFG) (5). Cependant, ces deux marqueurs peuvent être influencés par des facteurs non rénaux et ne permettent pas un diagnostic suffisamment précoce et spécifique (6).

L'index de résistance rénal (IRR), évalué par échographie doppler, est un paramètre de mesure non invasif et reproductible, utilisé pour l'évaluation de la perfusion rénale. Plusieurs études ont souligné son élévation en cas d'IRA organique sur modèle animal ou humain (7). Il a été proposé en néphrologie pour la prédiction de la survie du greffon en transplantation rénale ou pour le dépistage des lésions tubulo-interstitielles associées aux glomérulonéphrites (8) (9). Devant la discordance des résultats et la rareté des études en cas de choc septique, l'IRR n'a pas encore été validé.

Dans ce contexte, les objectifs de notre étude étaient de décrire la variabilité de l'IRR au cours du choc septique et d'étudier sa corrélation avec la survenue d'une IRA.

MÉTHODES

Type et population de l'étude

Nous avons mené une étude prospective, observationnelle et monocentrique dans notre unité de réanimation sur une durée de 9 mois entre octobre 2022 et juillet 2023.

Critères d'inclusion: Nous avons inclus les patients âgés de plus de 18 ans sous ventilation mécanique présentant

un état de choc septique, défini selon les critères établis par les définitions du troisième consensus international pour le sepsis et le choc septique (10).

Critères de non-inclusion: Nous n'avons pas inclus les patients qui présentaient : une néphropathie chronique, un rein unique, une grossesse évolutive, une insuffisance cardiaque, un arrêt cardiaque réanimé, une arythmie cardiaque, une insuffisance hépatique ou une obstruction des voies urinaires.

Critères d'exclusion: Nous avons exclus les patients décédés ou qui ont bénéficié d'une épuration extrarénale avant le cinquième jour du choc septique et ceux présentant une mauvaise échogénicité.

Déroulement de l'étude et recueil des données

Les patients ont été inclus pendant les 24 premières heures du choc septique. Après avoir démarré la réanimation, nous avons procédé à la mesure de l'IRR. Les mesures étaient réalisées une fois par jour pendant 5 jours. L'IRR est obtenu par l'exploration du flux artériel rénal en échographie doppler (11). La mesure de l'IRR était réalisée en utilisant une sonde convexe à basse fréquence au lit du patient en décubitus dorsal pour examiner les deux reins. L'objectif était de déterminer la meilleure image pour aligner le rein le long de son axe principal. Ensuite, le doppler couleur était utilisé pour visualiser les vaisseaux sanguins à l'intérieur du parenchyme rénal. Pour obtenir les vitesses sanguines artérielles, le doppler pulsé visait l'une des artères interlobaires (Figure 1).

Nous avons utilisé un échographe qui offre un mode avec des pré réglages adaptés au doppler rénal. L'IRR était ainsi calculé à partir des vitesses vasculaires selon la formule suivante :

$$\text{IRR} = (\text{Pic de vitesse systolique} - \text{vitesse télédiastolique}) / \text{Pic de vitesse systolique}.$$

Ensuite, la moyenne des deux valeurs d'IRR du rein droit et du rein gauche était calculée (Figure 1).

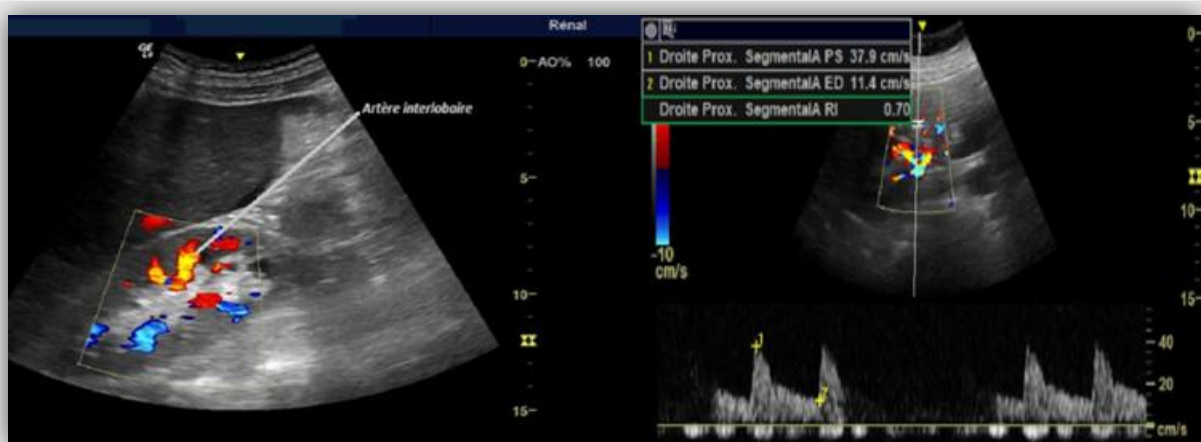


Figure 1. Echographie de repérage et doppler couleur (à gauche). Doppler rénal et mesure de l'IRR (à droite)

Ont été recueillis : Les données démographiques, le motif de l'admission, le point de départ infectieux, le débit urinaire, les marqueurs de la fonction rénale, la durée du séjour et la mortalité en réanimation.

A partir des marqueurs de la fonction rénale, nous avons noté la survenue ou non d'une IRA selon le Kidney Disease Improving Global Outcomes (KDIGO) (5). Nous avons ainsi réparti les patients en 2 groupes :

- IRA (+) : survenue d'IRA
- IRA (-) : pas de survenue d'IRA

Étude statistique

Les variables quantitatives ont été exprimées en moyenne \pm écart-type ou en médiane. Les variables qualitatives ont été décrites par leur fréquence. Les comparaisons de deux moyennes sur séries indépendantes ont été effectuées au moyen du test t de Student. Les comparaisons de pourcentages ont été effectuées par le test du chi-deux de Pearson ou le test exact bilatéral de Fisher.

Pour étudier les performances des indices de l'hémodynamique rénale à prédire une dysfonction rénale, l'aire sous la courbe (ASC) a été déterminée d'après les tracées de la courbe Receiver Operating Characteristics (ROC).

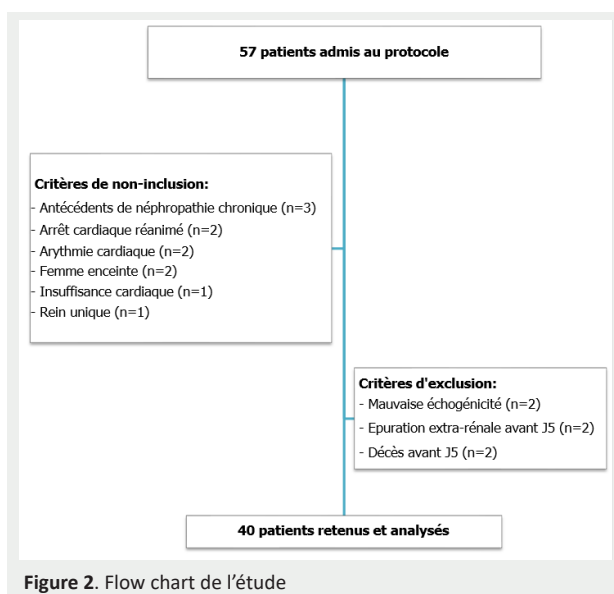
Dans tous les tests statistiques, le seuil de signification était fixé à 0,05.

Considérations éthiques

Cette étude a reçu l'approbation du comité d'éthique local de notre institution suite à sa réunion tenue le 22/09/2022. Nous avons respecté l'anonymisation des données de nos patients lors de la saisie des données.

RÉSULTATS

Durant la période de l'étude, 57 patients ont été admis dans l'étude. 40 patients ont été retenus et analysés (Figure 2).



L'âge moyen était de $51 \pm 13,4$ ans avec des extrêmes allant de 27 à 80 ans. La population retenue dans notre étude était composée de 28 hommes (70%) et 12 femmes (30%). Le sex-ratio H/F était de 2,33.

Données cliniques

Les hémorragies intracrâniennes et les ischémies cérébrales étaient les principaux motifs d'admission dans 45% des cas suivies par les neuromyopathies dans 20 % des cas.

L'hypertension artérielle (HTA) était la comorbidité la plus fréquemment retrouvée (32,5% des cas) suivie de diabète dans 20% des cas.

Le point de départ infectieux était le plus souvent pulmonaire (72,5% des cas) qui faisait suite à une pneumopathie acquise sous ventilation mécanique (PAVM). Le reste s'est réparti entre infections liées aux cathéters, infections urinaires, méningites et septicémies. La durée moyenne du séjour était de $28,3 \pm 16,2$ jours avec des extrêmes allant de 9 à 70 jours. La mortalité globale en milieu de réanimation était de 62,5% (n=25). Le choc septique était la cause directe du décès dans 76 % des cas décédés (n=19).

Variabilité de l'IRR

La valeur moyenne de l'IRR était de $0,704 \pm 0,075$ avec des extrêmes variant de 0,52 à 0,83. La valeur moyenne maximale était de $0,709 \pm 0,1$ à J4 et la valeur moyenne minimale était de $0,695 \pm 0,078$ à J3 (Figure 3).

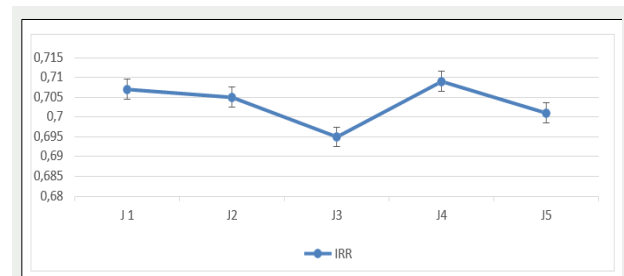


Figure 3. Variabilité de l'IRR

Étude analytique

Le groupe IRA (+) comprenait 15 patients (37,5%), le groupe IRA (-) 25 patients (62,5%).

L'âge avancé était significativement associé à la survenue d'une IRA : $59,2$ ans $\pm 11,6$ dans le groupe IRA (+) et $46,1 \pm 12$ dans le groupe IRA (-) avec $p=0,011$. Par ailleurs, pas de différence en ce qui concerne le genre ($p=0,722$) et les antécédents d'HTA ($p=0,931$) et de diabète ($p=0,414$). La mortalité était de 60% chez les patients du groupe IRA (+) et de 66,7% chez les patients du groupe IRA (-) avec $p=0,67$.

Le groupe IRA (+) avait un IRR moyen de $0,757 \pm 0,04$ et le groupe IRA (-) un IRR moyen de $0,672 \pm 0,07$. L'élévation de l'IRR était significativement associée à la survenue d'une IRA (OR = 6 ; IC 95% [1,37 – 26,2] ; $p = 0,013$) (Figure 4).

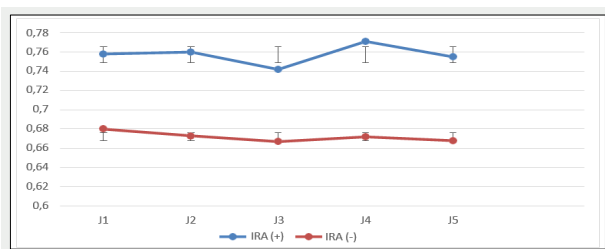


Figure 4. Variabilité de l'IRR selon la survenue d'une IRA

L'IRR à J1 permettait de prédire la survenue d'une dysfonction rénale avec une aire sous la courbe ROC de 0,75 ($p=0,007$). La valeur cut-off était de 0,71 avec une spécificité de 64% et une sensibilité de 73% (Figure 5).

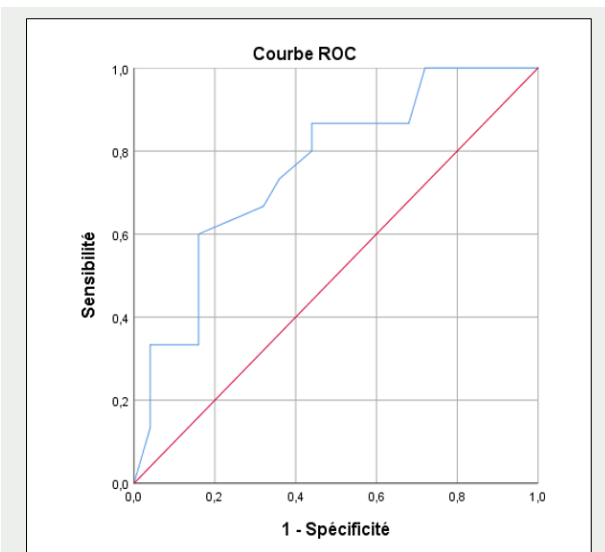


Figure 5. Courbe ROC de l'Index de Résistance Rénal

DISCUSSION

Durant la période de l'étude, 40 patients ont été retenus. L'âge moyen était de $51 \pm 13,4$ ans avec un sex-ratio H/F de 2,33. Les comorbidités les plus fréquentes étaient l'HTA (32,5%) et le diabète (20%).

Les patients ont été répartis en deux groupes selon l'apparition ou non d'une IRA. La survenue d'une IRA était notée chez 37,5% des patients ($n=15$).

La valeur moyenne de l'IRR à J1 était de $0,707 \pm 0,075$. La moyenne la plus basse était retrouvée à J3 avec un IRR moyen de $0,695 \pm 0,078$ et la moyenne la plus élevée était notée à J4 avec un IRR moyen de $0,709 \pm 0,1$.

Une association statistique significative entre l'augmentation de l'IRR et la survenue d'une IRA était notée avec un OR = 6 ; IC 95% [1,37 – 26,2] ; $p = 0,013$. Le groupe IRA (+) avait un IRR moyen de $0,757 \pm 0,04$ et le groupe IRA (-) un IRR moyen de $0,672 \pm 0,07$.

L'IRR à J1 permettait de prédire la survenue d'une dysfonction rénale avec une aire sous la courbe ROC de 0,75 ($p=0,007$). La valeur cut-off était de 0,71 avec une spécificité de 64% et une sensibilité de 73%.

Les points forts de notre étude étaient son originalité, l'absence d'étude de l'IRR dans le choc septique en Tunisie à notre connaissance, le caractère prospectif et les critères précis d'inclusion et de non inclusion rendant

la population d'étude retenue pour ce travail la plus homogène possible. Plus une population est homogène, plus les conclusions issues d'un petit échantillon sont valables. Il est à noter que dans notre étude l'IRR a été calculé à partir du doppler rénal, une technique non invasive et facile à reproduire. La variabilité interopérateur est considérée comme faible (11).

Les points faibles de notre étude étaient le caractère monocentrique, l'influence des paramètres hémodynamiques sur l'IRR et le faible effectif.

L'IRA est une affection fréquente et potentiellement mortelle (12). Elle complique plus de 50% des états de choc septiques en réanimation (2).

La détection de l'IRA utilise l'augmentation de la créatinine sérique comme marqueur de déclin aigu de la fonction rénale. Il existe un décalage entre cette augmentation et la lésion rénale entraînant un retard de diagnostic ce qui réduit la possibilité d'un traitement précoce et efficace (13).

Ainsi, plusieurs scientifiques se sont penchés sur la question en essayant de trouver un moyen de détection plus précoce de l'IRA afin d'améliorer le pronostic des patients.

Plusieurs marqueurs, urinaires et plasmatiques ont été étudiés pour prédire précocement la survenue d'une IRA telles que la NGAL et les biomarqueurs IGFBP7 et le tissu inhibitor of metalloproteinases-2 (TIMP-2) (14) (15). Cependant, aucun n'a été validé au cours du choc septique.

La pathogénie de l'IRA septique est limitée car nous ne disposons pas actuellement d'une méthode validée pour mesurer directement et instantanément le débit sanguin rénal (16).

Chez les insuffisants rénaux, les mécanismes compensatoires comprennent la diminution de la vasoconstriction artériolaire afférente et la vasoconstriction de l'artériole efférente afin de maintenir un débit sanguin suffisant.

Une augmentation des résistances vasculaires rénales par cette vasoconstriction rénale et une réduction du débit sanguin rénal a été proposée à plusieurs reprises comme étant la pathogenèse de l'IRA septique (6) (17).

Dans une étude de la Société japonaise de néphrologie en 2011, ils ont rapporté que l'IRR pourrait être un indice plus pertinent que le eDFG (débit de filtration glomérulaire estimé) afin d'évaluer les lésions rénales très précoces (18). Ils se sont aussi intéressés à l'IRR comme moyen de monitoring pour la protection rénale chez les patients à risque cardiovasculaire porteurs d'athérosclérose au niveau de la vascularisation rénale (18).

L'IRR a été suggéré chez les patients diabétiques de type 2 pour diminuer le recours aux biopsies rénales telle que l'étude de M. Insalaco et al, qui a suggéré que l'élévation de l'IRR au-delà de 0,72 est en faveur d'une néphropathie diabétique et il n'est donc pas nécessaire de faire la biopsie (19).

Dans une étude regroupant 35 patients en choc septique, N. Lerolle et al, ont montré que l'IRR mesuré à J1 était significativement plus élevé chez les patients ayant présenté une dysfonction rénale à J5 que chez les patients n'ayant pas développé d'IRA (IRR médian de 0,77 contre

0,68 ; $p < 0,001$). L'analyse de la courbe ROC mettait en évidence qu'un IRR supérieur à 0,74 à J1 permettait de prédire une IRA à J5 confirmant ainsi l'intérêt de l'IRR comme marqueur précoce (20).

Schnell et al, ayant étudié une population de 58 patients souffrant de sepsis sévère et de polytraumatisme afin de comparer la performance de l'IRR à prévoir une IRA par rapport à la Cystatine C. Il a montré qu'un IRR à J1 $> 0,707$ permettait de prédire les stades 2 ou 3 de l'IRA à J3 selon la classification AKIN. La valeur de l'IRR moyen pour les patients non IRA était de 0,66 [0,62 – 0,70] et pour les patients avec IRA de 0,80 [0,72 – 0,82] (21).

Nous avons constaté une association significative entre la variation de l'IRR et la survenue ou non d'une IRA. L'analyse de la courbe ROC a révélé des valeurs concordantes avec une ASC de 0,75 dans notre étude, de 0,74 dans la série de N. Lerolle (20) et légèrement distinctes de celle de Schnell et al qui a noté une ASC de 0,707 (21).

La valeur cut-off dans notre étude était de 0,71 avec une spécificité de 64% et une sensibilité de 73%. Dans les résultats de N. Lerolle, ils ont retrouvé une sensibilité de 78% et une spécificité de 77% (20).

Cette discordance par rapport à la spécificité est probablement expliquée par la multiplicité des déterminants de l'IRR et la différence entre les deux populations d'étude.

L'IRR mesuré le premier jour du choc septique était significativement plus élevé chez les patients IRA (+) durant les 5 premiers jours du choc septique selon la classification KDIGO que chez les patients IRA (-) avec un IRR moyen de 0,757 contre 0,672 avec une $p = 0,012$. Ces résultats étaient concordants avec les travaux de N. Lerolle et al, sur la corrélation significative entre les valeurs de l'IRR selon l'IRA.

Cependant, deux études récentes, une par Schnell et al en 2022 et une par Wiersema et al, suggèrent des résultats discordants avec les nôtres (22) (23).

L'étude de Schnell et al, suggère en effet que l'IRR n'était pas utile pour prédire le pronostic rénal à court terme. Parmi 118 patients sans IRA au moment de l'inclusion dans l'étude, 34 patients soit 29 % ont développé une IRA. Un IRR de 0,64 et de 0,67 notés respectivement dans le groupe sans IRA et dans le groupe avec IRA de novo n'a pas montré une différence significative entre les deux groupes ($p = 0,177$) (22).

A noter que la population d'étude différait de la nôtre qui était basée uniquement sur les patients atteints de choc septique et que la mesure de l'IRR a été réalisée à l'admission et non pas au premier jour du choc septique. Le tableau 1 illustre les résultats de la littérature portant sur l'étude de l'IRR selon l'apparition ou non d'une IRA durant un séjour en unité de réanimation.

Tableau 1. Etude de l'IRR en unité de réanimation dans la littérature

| Etude | Année, Pays | Effectif | IRA (+) | IRA (-) | p |
|----------------------|-----------------------|----------|----------------|----------------|------------|
| Yu et al, (24) | 2022, Chine | 50 | N=25 IRR=0,76 | N=25 IRR=0,67 | <0,05 |
| Brossard et al, (25) | 2011, grande Bretagne | 65 | N=18 IRR=0,79 | N=47 IRR=0,68 | $<10^{-3}$ |
| Marty et al, (26) | 2016, France | 48 | N=29 IRR=0,74 | N=19 IRR=0,6 | $<10^{-3}$ |
| Darmon et al, (27) | 2011, France | 51 | N=35 IRR=0,77 | N=16 IRR=0,71 | $<10^{-3}$ |
| Dewitte et al, (16) | 2012, France | 96 | N=52 IRR=0,76 | N=42 IRR=0,72 | 10^{-3} |
| Xing ZQ et al, (28) | 2015, France | 72 | N=29 IRR>0,7 | N=43 IRR<0,7 | <0,012 |
| Beloncle et al, (29) | 2019, France | 65 | N=35 IRR=0,73 | N=30 IRR=0,67 | $<10^{-3}$ |
| Lerolle et al, (20) | 2006, France | 35 | N=18 IRR=0,77 | N=17 IRR=0,68 | $<10^{-3}$ |
| Schnell et al, (22) | 2020, France | 58 | N=18 IRR=0,8 | N=44 IRR=0,66 | $<10^{-3}$ |
| Notre étude | 2023, Tunisie | 40 | N=15 IRR=0,757 | N=25 IRR=0,672 | 0,013 |

Une étude incluant un échantillon plus large et multicentrique pourrait nous éclairer sur l'étude de l'IRR dans le choc septique et surtout concernant ses déterminants afin d'apporter les modalités optimales pour améliorer l'interprétation des mesures de l'IRR.

Ce moyen pourrait s'avérer utile pour améliorer le diagnostic précoce de la dysfonction rénale et permettre ainsi une protection rénale en milieu de réanimation.

A travers cette étude, nous espérons intégrer l'échographie doppler rénale dans la pratique quotidienne dans la démarche diagnostique et thérapeutique.

Une étude multicentrique de Malhotra R et Al, en 2017 avait proposé un score pour l'évaluation du risque pour la prédiction d'une IRA. L'IRR pourrait ainsi s'intégrer dans ce genre de scores ou modèles afin d'optimiser leurs performances (30).

L'IRR est un moyen prometteur qui après études plus spécifiques et à plus grande envergure pourrait être un marqueur pertinent selon la situation clinique ou la

condition médicale chez les patients à risque d'IRA.

CONCLUSION

Les résultats de notre étude ont mis en évidence une association statistique entre l'augmentation de l'IRR et l'incidence de l'insuffisance rénale aiguë chez les patients atteints de choc septique. De plus, l'IRR a montré son potentiel en tant que marqueur précoce d'atteinte rénale. Bien que notre étude présente certaines limites, elle a éclairé l'importance de l'évaluation de l'IRR dans le contexte du choc septique, mettant en évidence son rôle potentiel en tant qu'outil prédictif et préventif et pouvant donc aider à assurer une protection rénale au cours du choc septique en l'associant aux paramètres habituels cliniques (débit urinaire) et biologiques (créatininémie).

RÉFÉRENCES

- Evans L, Rhodes A, Alhazzani W, Antonelli M, Coopersmith CM, French C, et al. Surviving sepsis campaign: international guidelines for management of sepsis and septic shock 2021. *Intensive Care Med.* 2021 Nov;47(11):1181–247.
- Bauer M, Gerlach H, Vogelmann T, Preissing F, Stiefel J, Adam D. Mortality in sepsis and septic shock in Europe, North America and Australia between 2009 and 2019: results from a systematic review and meta-analysis. *Crit Care.* 2020 Dec;24(1):239.
- Hoste EJ, Bagshaw SM, Bellomo R, Cely CM, Colman R, Cruz DN, et al. Epidemiology of acute kidney injury in critically ill patients: the multinational AKI-EPI study. *Intensive Care Med.* 2015 Aug;41(8):1411–23.
- Barbar SD, Clere-Jehl R, Bourredjem A, Hernu R, Montini F, Bruyère R, et al. Timing of renal-replacement therapy in patients with acute kidney injury and sepsis. *N Engl J Med.* 2018 Oct;379(15):1431–42.
- Khwaja A. KDIGO clinical practice guidelines for acute kidney injury. *Nephron Clin Pract.* 2012 Oct;120(4):179–184.
- Pickkers P, Darmon M, Hoste E, Joannidis M, Legrand M, Ostermann M, et al. Acute kidney injury in the critically ill: an updated review on pathophysiology and management. *Intensive Care Med.* 2021 Aug;47(8):835–50.
- Lerolle N. Utilisation de l'index de résistance vasculaire rénal mesuré par échographie Doppler au cours du choc septique. *Reanimation.* 2009 Dec;18(8):708–13.
- Sugiura T, Nakamori A, Wada A, Fukuhara Y. Evaluation of tubulointerstitial injury by Doppler ultrasonography in glomerular diseases. *Clin Nephrol.* 2004 Feb;61(2):119–26.
- Radermacher J, Mengel M, Ellis S, Stuhl S, Hiss M, Schwarz A, et al. The renal arterial resistance index and renal allograft survival. *N Engl J Med.* 2003 Jul;349(2):115–24.
- Singer M, Deutschman CS, Seymour CW, Shankar-Hari M, Annane D, Bauer M, et al. The third international consensus definitions for sepsis and septic shock (Sepsis-3). *JAMA.* 2016 Feb;315(8):801–10.
- Behrendt P, Rohner P, Baumgartner RW. A validation study on the intraobserver and interobserver reproducibility of renal artery duplex ultrasound. *Ultrasound Med Biol.* 1999 Feb;25(2):225–31.
- Dennen P, Douglas IS, Anderson R. Acute kidney injury in the intensive care unit: an update and primer for the intensivist. *Crit Care Med.* 2010 Jan;38(1):261–75.
- Aitken E, Carruthers C, Gall L, Kerr L, Geddes C, Kingsmore D. Acute kidney injury: outcomes and quality of care. *QJM.* 2013 Apr;106(4):323–32.
- De Geus H, Bakker J, Lesaffre E, Le Noble L. Neutrophil gelatinase-associated lipocalin at ICU admission predicts for acute kidney injury in adult patients. *Am J Respir Crit Care Med.* 2011 Apr;183(7):907–14.
- Kashani K, Al-Khafaji A, Ardiles T, Artigas A, Bagshaw SM, Bell M, et al. Discovery and validation of cell cycle arrest biomarkers in human acute kidney injury. *Crit Care.* 2013 Feb;17(1):R25.
- Dewitte A, Coquin J, Meyssignac B, Joannès-Boyou O, Fleureau C, Roze H, et al. Doppler resistive index to reflect regulation of renal vascular tone during sepsis and acute kidney injury. *Crit Care.* 2012 Sep;16(5):R165.
- Himmelfarb J, Joannidis M, Molitoris B, Schietz M, Okusa MD, Warnock D, et al. Evaluation and initial management of acute kidney injury. *Clin J Am Soc Nephrol.* 2008 Jul;3(4):962–7.
- Kawai T, Kamide K, Onishi M, Yamamoto-Hanasaki H, Baba Y, Hongyo K, et al. Usefulness of the resistive index in renal Doppler ultrasonography as an indicator of vascular damage in patients with risks of atherosclerosis. *Nephrol Dial Transplant.* 2011 Oct;26(10):3256–62.
- Insalaco M, Zamboli P, Floccari F, Marrocco F, Andrulli S, Logias F, et al. Indication to renal biopsy in DM2 patients: potential role of intrarenal resistive index. *Arch Ital Urol Androl.* 2012 Dec;84(4):283–6.
- Lerolle N, Guérot E, Faisy C, Bornstain C, Diehl JL, Fagon JY. Renal failure in septic shock: predictive value of Doppler-based renal arterial resistive index. *Intensive Care Med.* 2006 Sep;32(10):1553–9.
- Schnell D, Deruddre S, Harrois A, Pottecher J, Cosson C, Adoui N, et al. Renal resistive index better predicts the occurrence of acute kidney injury than cystatin C. *Shock.* 2012 Dec;38(6):592–7.
- Schnell D, Bourmaud A, Reynaud M, Rouleau S, Merdji H, Boivin A, et al. Performance of renal Doppler to predict the occurrence of acute kidney injury in patients without acute kidney injury at admission. *J Crit Care.* 2022 Jun;69:153983.
- Wiersema R, Kaufmann T, Van Der Veen HN, De Haas RJ, Franssen CFM, Koeze J, et al. Diagnostic accuracy of arterial and venous renal Doppler assessment for acute kidney injury in critically ill patients: a prospective study. *J Crit Care.* 2020 Oct;59:57–62.
- Yu A, Zhao Q, Qu Y, Liu G. Renal Doppler Ultrasound in the Evaluation of Renal Function in Patients with Sepsis. *Appl Bionics Biomech.* 2022 Apr;2022:1–8.
- Bossard G, Bourgoin P, Corbeau JJ, Huntzinger J, Beydon L. Early detection of postoperative acute kidney injury by Doppler renal resistive index in cardiac surgery with cardiopulmonary bypass. *Br J Anaesth.* 2011 Dec;107(6):891–8.
- Marty P, Ferre F, Labaste F, Jacques L, Luzi A, Conil JM, et al. The Doppler renal resistive index for early detection of acute kidney injury after hip fracture. *Anaesth Crit Care Pain Med.* 2016 Dec;35(6):377–82.
- Darmon M, Schortgen F, Vargas F, Liazydi A, Schlemmer B, Brun-Buisson C, et al. Diagnostic accuracy of Doppler renal resistive index for reversibility of acute kidney injury in critically ill patients. *Intensive Care Med.* 2011 Jan;37(1):68–76.
- Xing ZQ, Liu DW, Wang XT, Long Y, Zhang HM, Wang C, et al. The value of renal resistance index and urine oxygen pressure for prediction of acute kidney injury in patients with septic shock. *Zhonghua Nei Ke Za Zhi.* 2019 May;58(5):349–54.
- Beloncle F, Rousseau N, Hamel JF, Donzeau A, Foucher AL, Custaud MA, et al. Determinants of Doppler-based renal resistive index in patients with septic shock: impact of hemodynamic parameters, acute kidney injury and predisposing factors. *Ann Intensive Care.* 2019 Dec;9(1):51.
- 3Malhotra R, Kashani KB, Macedo E, Kim J, Bouchard J, Wynn S, et al. A risk prediction score for acute kidney injury in the intensive care unit. *Nephrol Dial Transplant.* 2017 May;32(5):814–22.