

Cinétique des transferts de potassium en cours d'hémodialyse

C. Bulliard¹, J.-P. Guignard², J. Ruiz¹, H. Moret³ et G. Fellay³

¹Division d'endocrinologie, diabétologie et métabolisme, Département de médecine interne, CHUV, Lausanne;

²Division de néphrologie pédiatrique, Département de pédiatrie, CHUV, Lausanne;

³Unité de néphrologie, Service de médecine interne, Hôpital cantonal, Fribourg

Résumé • Summary

Introduction : Afin de définir dans quelle mesure l'extraction du potassium peut être accrue chez les sujets dialysés, nous avons analysé la cinétique de ses échanges dans le dialyseur.

Méthode : Quarante patients ont participé à l'étude. Nous avons : a) étudié les échanges de potassium entre érythrocytes et plasma ; b) mesuré les concentrations plasmatique et érythrocytaire de potassium, à l'entrée et à la sortie du dialyseur ; c) comparé les transferts de potassium calculés à partir de la clearance plasmatique à ceux mesurés directement dans le dialysat et d) mesuré les concentrations érythrocytaires de potassium en début et fin de dialyse.

Résultats : In vitro, le potassium diffuse peu des érythrocytes vers le plasma. In vivo, la concentration érythrocytaire de potassium à l'entrée du dialyseur est de $98,7 \pm 6,4$ mmol/l, à la sortie de $97,7 \pm 7,5$ mmol/l ($p = \text{NS}$). Les transferts de masse calculés à partir de la clearance plasmatique ($0,71 \pm 0,10$ mmol/min) ne diffèrent pas significativement de ceux mesurés directement dans le dialysat ($0,68 \pm 0,10$ mmol/min, $p = \text{NS}$). Ainsi, l'extraction dépend de la clearance plasmatique, alors que les échanges entre érythrocytes et plasma sont négligeables. Les mesures des concentrations érythrocytaires de potassium, inchangées entre le début ($104,0 \pm 5,6$ mmol/l) et la fin de dialyse ($104,2 \pm 5,0$ mmol/l, $p = \text{NS}$) confirment cette analyse.

Mots clés : Hyperkaliémie – Hémodialyse – Transfert de potassium.

Introduction : In order to study whether the removal of potassium in haemodialysis patients could be increased, we analyzed the kinetics of potassium transfer in the dialyzer.

Method : 40 patients were included in the study. We studied : a) in vitro potassium exchanges between erythrocytes and plasma ; b) plasma and erythrocyte potassium concentrations at dialyzer input and output ; c) potassium transfers into the dialysate, using plasma clearance and direct measurement in the collected dialysate and d) erythrocyte potassium concentrations at the beginning and the end of dialysis.

Results : In vitro, there is virtually no potassium transfer between erythrocytes and plasma. In vivo, erythrocyte potassium concentration is not affected by the dialyzer ($98,7 \pm 6,4$ mmol/l to $97,7 \pm 7,5$ mmol/l, $p = \text{NS}$). Potassium transfer levels determined by calculated plasma clearance were similar to values obtained by measuring potassium in dialysate ($0,71 \pm 0,10$ mmol/min vs $0,68 \pm 0,10$ mmol/min, $p = \text{NS}$). These results suggest that erythrocytes do not participate in potassium exchange in the dialyzer. This was confirmed by measured erythrocyte potassium concentrations, which were the same at the beginning and the end of dialysis ($104,0 \pm 5,6$ mmol/l vs $104,2 \pm 5,0$ mmol/l, $p = \text{NS}$).

Key words : Hyperkalemia – Haemodialysis – Potassium transfer.

● Abréviations

K_e : concentration érythrocytaire de potassium
 K_s : concentration moyenne de potassium dans le sang total
 K_p : concentration plasmatique de potassium
Ht: hématoците
T: temps
Q: transfert de masse de potassium mesuré du côté sang
D: débit
C: concentration
UF: ultrafiltration

p: plasmatique
g: globulaire
t: total soit g + p
e: entrée du filtre
s: sortie du filtre
 Q_d : transfert de masse de potassium mesuré dans le dialysat
D: débit
C: concentration
d: dialysat
MCV: volume corpusculaire moyen
NS: non significatif

■ Introduction

Dans l'insuffisance rénale terminale, l'excrétion rénale de potassium est généralement négligeable.¹ La balance externe de ce cation dépend alors principalement de la dialyse et de la sécrétion colique.^{2,3,4} Pendant les périodes inter-dialytiques, le potassium a tendance à s'accumuler⁵ et une hyperkaliémie sévère (kaliémie > 6 mmol/l) survient chez 10% des patients,^{6,7} ce qui nécessite fréquemment une adaptation de la prescription dialytique.

Dans la perspective de rendre ce traitement plus efficace à long terme, nous avons tenté de mieux cerner la cinétique des échanges de potassium dans le dialyseur.

Dans notre approche, un modèle à trois compartiments est pris en considération : les érythrocytes, le plasma et le dialysat. Dans chacun d'eux, la concentration du soluté étudié est homogène. Entre ces compartiments, les échanges s'effectuent par diffusion, par convection et par transport actif.^{8,9,10} Pour les solutés de bas poids moléculaire, comme l'urée et le potassium, la diffusion permet un rapide équilibre de concentration entre le plasma et le dialysat. Toutefois, si l'urée diffuse librement entre les globules rouges et le plasma, la cinétique des échanges transmembranaires du potassium est très différente.

L'objet de ce travail a été l'analyse des échanges de potassium entre les compartiments érythrocytaire, plasmatique et le dialysat, durant une séance d'hémodialyse. Pour ceci, nous avons successivement :

- Analysé in vitro les échanges d'urée et de potassium entre les globules rouges et le plasma, en fonction du temps.
- Mesuré la concentration de potassium dans les compartiments plasmatique et érythrocytaire, à l'entrée et à la sortie du dialyseur.
- Mesuré les transferts de masse du sang vers le dialysat.
- Mesuré la concentration érythrocytaire de potassium en cours de dialyse.

■ Patients et méthode

Trois groupes de patients hémodialysés ont successivement participé à l'étude.

Un premier groupe nous a permis d'analyser les échanges de potassium entre globules rouges et plasma. Il comprend sept hommes et trois femmes, âgés de 43 à 76 ans, dont la kaliémie pré-dialytique est habituellement supérieure à 5,5 mmol/l. Les débits sanguins se situent entre 300 et 400 ml/min.

Dans un deuxième groupe, nous avons mesuré la concentration de potassium dans les compartiments plasmatique et érythrocytaire, à l'entrée et à la sortie du filtre, ainsi que les transferts de masse. C'est un groupe de vingt patients anuriques, quatorze hommes et six femmes, âgés de 36 à 70 ans. Leur kaliémie pré-dialytique est fréquemment supérieure à 5,5 mmol/l. Le dialysat est tamponné au bicarbonate et ne contient pas de glucose. Sa concentration en potassium est nulle pendant la première heure, puis s'élève à 2 ou 3 mmol/l par la suite. Le débit du dialysat se situe entre 480 et 520 ml/min alors que celui du sang se situe entre 220 et 400 ml/min suivant les patients.

Enfin pour la mesure de la concentration érythrocytaire de potassium en cours de dialyse, un troisième groupe de dix patients a participé à l'étude, soit huit hommes et deux femmes, âgés de 53 à 75 ans. Les paramètres du traitement dialytique n'ont pas été modifiés pour cette étude. Les filtres capillaires sont de type triacétate de cellulose ou AN 69.

Les douze cas-témoins sont des volontaires sains, travaillant dans notre laboratoire de chimie clinique.

● Analyse des échanges in vitro de l'urée et du potassium entre globules rouges et plasma en fonction du temps

Après une heure de dialyse contre un bain sans potassium, 2 ml de sang sont prélevés à l'entrée et à la sortie du dialyseur, chez les dix patients du groupe 1. Les globules rouges sont séparés du plasma par centrifugation.

Pour évaluer l'efflux d'urée et de potassium des globules rouges vers le plasma, les érythrocytes prélevés à l'entrée sont mélangés à du plasma, prélevé à la sortie du dialyseur. La concentration de chaque soluté est mesurée dans le plasma aux temps 5, 120 et 240 minutes.

L'influx est, quant à lui, défini par la variation de la concentration plasmatique d'urée et de potassium, lorsque des érythrocytes prélevés à la sortie sont mélangés à du plasma prélevé à l'entrée du dialyseur.

● Mesure des concentrations de potassium dans les compartiments plasmatiques et érythrocytaires à l'entrée et à la sortie du dialyseur

Après une heure de dialyse contre un bain ne contenant pas de potassium, la concentration plasmatique (K_p) et la concentration érythrocytaire (K_e), à l'entrée et à la sortie du filtre, sont mesurées chez dix patients du deuxième groupe. La concentration érythrocytaire est déterminée selon la formule 1 (annexe).

Pour mesurer la concentration moyenne de potassium dans le sang total (K_s), 1 ml de sang est mélangé à 4 ml d'eau distillée. Après hémolyse, la solution est centrifugée, et en tenant compte de la dilution 1/5, K_s est mesurée.

● Mesure des transferts de masse

Dans l'hypothèse où le potassium érythrocytaire ne participe pas aux échanges dialytiques, l'extraction peut être obtenue par mesure de la clearance du flux plasmatique. Pour vérifier notre hypothèse, nous avons comparé, chez les vingt patients du groupe 2, le transfert de masse calculé à partir des clearances, selon la formule 2, à celui mesuré dans le dialysat, selon la formule 3 (annexe).

● Mesure de la concentration érythrocytaire de potassium en cours d'hémodialyse

La concentration érythrocytaire de potassium est mesurée dans le sang artériel chez les dix patients du groupe 3, aux temps 0, 60, 180 minutes et en fin de dialyse. Ces valeurs sont comparées à celles du groupe témoin.

Annexe

Formule 1

$$K_e = \frac{K_s - K_p(1-Ht)}{Ht}$$

K_e : concentration érythrocytaire de potassium
 K_s : concentration moyenne de potassium dans le sang total
 K_p : concentration plasmatique de potassium
 Ht : hématoците

Le transfert de masse est défini par la quantité de soluté extraite par unité de temps, soit Q

Mais $Q = Q_e - Q_s$

Et $Q = D \cdot C$, donc:

$Q = D_e \cdot C_e - D_s \cdot C_s$

Hypothèse: l'extraction du potassium ne s'effectue qu'à partir du compartiment plasmatique, alors:

$Q = (D_{pe} \cdot C_{pe}) - (D_{ps} \cdot C_{ps})$

Mais $D_p = Dt \cdot (1-Ht)$, alors:

$Q = D_{te}(1-Ht_e) \cdot C_{pe} - D_{ts}(1-Ht_s) \cdot C_{ps}$

Or $D_{ts} = D_{te} - UF$, donc le transfert de masse est:

Formule 2

$$Q = D_{te}(1-Ht_e) \cdot C_{pe} - (D_{te} - UF) \cdot (1-Ht_s) \cdot C_{ps}$$

T : temps
 Q : transfert de masse de potassium mesuré du côté sang
 D : débit
 C : concentration
 UF : ultrafiltration
 p : plasmatique
 g : globulaire
 t : total soit $g + p$
 e : entrée du filtre
 s : sortie du filtre

En mesurant l'hématocrite et la concentration plasmatique du potassium à l'entrée et à la sortie du filtre (Ht_e , Ht_s , C_{pe} et C_{ps}), le débit sanguin (D_{te}) et l'UF, nous pouvons ainsi calculer le transfert de masse du potassium grâce à des paramètres provenant exclusivement du compartiment sanguin.

Parallèlement, si la concentration du potassium dans le dialysat est nulle à l'entrée du dialyseur, l'extraction du potassium peut être mesurée directement dans le dialysat, selon:

Formule 3

$$Q_d = D_d \cdot C_d$$

Q_d : transfert de masse de potassium mesuré dans le dialysat
 D : débit
 C : concentration
 d : dialysat

● Analyse statistique

Les analyses statistiques ont été réalisées avec le logiciel JMP Software 1989-1997 SAS Institute Inc. Les résultats sont donnés en moyenne \pm déviation standard. Les comparaisons des concentrations de potassium érythrocytaire à l'entrée et à la sortie du dialyseur ainsi que la comparaison des transferts de masse par mesure directe et par calcul ont été réalisées avec le test t apparié. Les comparaisons des concentrations érythrocytaires en potassium et des volumes corpusculaires moyens (MCV) durant une hémodialyse standard ont été réalisées par analyse de variance ANOVA en fonction du temps. Des valeurs de $p < 0,05$ ont été considérées comme statistiquement significatives.

■ Résultats

● Echanges d'urée et de potassium in vitro entre les globules rouges et le plasma en fonction du temps

Les figures 1 et 2 illustrent les échanges d'urée et de potassium entre les érythrocytes et le plasma. Pour l'urée, l'équilibre des concentrations entre les érythrocytes et le plasma est atteint très rapidement.¹¹ Pour le potassium, la variation de la concentration plasmatique entre la première et la dernière mesure est inférieure à 1 mmol/l, alors que le gradient transmembranaire est

de l'ordre de 40/1. Seule une infime quantité de potassium est par conséquent transférée des érythrocytes vers le plasma pendant la durée d'une dialyse standard.

La variation de la concentration plasmatique de potassium entre les temps 0 et 5 minutes est probablement l'effet du « manteau » plasmatique entourant les érythrocytes, car ce plasma est plus riche en potassium.

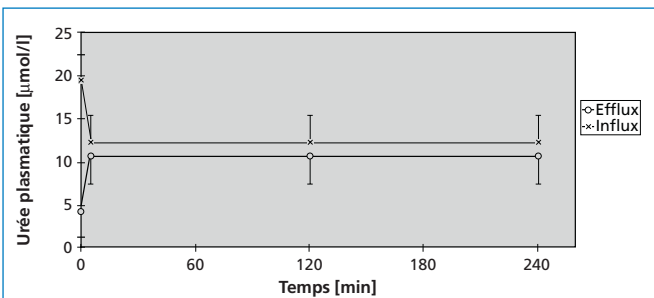


Fig. 1: Analyse in vitro des échanges de l'urée entre plasma et érythrocytes en fonction du temps, chez dix patients hémodialysés (moyenne \pm SD).

L'efflux est défini par la variation de la concentration plasmatique d'urée en fonction du temps, lorsque des globules rouges prélevés à l'entrée sont mélangés à du plasma prélevé à la sortie du dialyseur. L'influx est défini par la variation de la concentration plasmatique d'urée en fonction du temps, lorsque des érythrocytes prélevés à la sortie sont mélangés à du plasma prélevé à l'entrée du dialyseur.

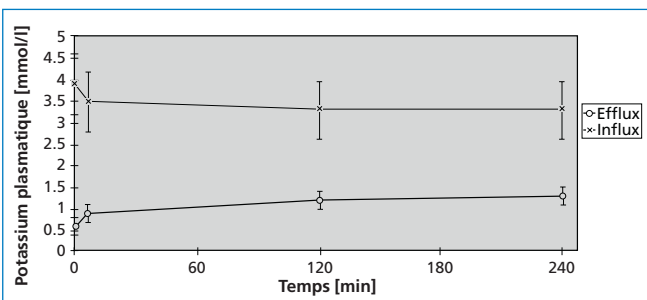


Fig. 2: Analyse in vitro des échanges de potassium entre plasma et érythrocytes en fonction du temps, chez dix patients hémodialysés (moyenne \pm SD).

L'efflux est défini par la variation de la concentration plasmatique de potassium en fonction du temps, lorsque des globules rouges prélevés à l'entrée sont mélangés à du plasma prélevé à la sortie du dialyseur. L'influx est défini par la variation de la concentration plasmatique de potassium en fonction du temps, lorsque des érythrocytes prélevés à la sortie sont mélangés à du plasma prélevé à l'entrée du dialyseur.

● Concentrations de potassium dans les compartiments plasmatique et érythrocytaire à l'entrée et à la sortie du dialyseur

Les mesures de la concentration de potassium dans le plasma et les érythrocytes, prélevés à l'entrée et à la sortie du dialyseur, sont présentées dans le tableau I. Après passage dans le filtre, la concentration du potassium plasmatique s'abaisse de $3,9 \pm 0,6$ mmol/l à $0,6 \pm 0,1$ mmol/l, alors que celle du potassium érythrocytaire n'est pas significativement affectée par ce transit ($98,7 \pm 6,4$ vs $97,7 \pm 7,5$ mmol/l, $p = \text{NS}$). L'hématocrite varie de 0,37 à 0,41, ce qui correspond à une augmentation de 11,6%, liée à l'extraction de l'eau par le dialyseur.

Tableau I: Concentrations de potassium dans les compartiments plasmatique et érythrocytaire à l'entrée et à la sortie du dialyseur, chez dix sujets

	Entrée dialyseur	Sortie dialyseur	p
Kp (mmol/l)	$3,9 \pm 0,6$	$0,6 \pm 0,1$	$p < 0,01$
Ke (mmol/l)	$98,7 \pm 6,4$	$97,7 \pm 7,5$	NS
Ht %	37 ± 3	41 ± 9	NS
Q sang (l/min)	$0,33 \pm 0,06$		
UF (l/h)	$0,96 \pm 0,10$		

Mesures des concentrations de potassium (moyenne \pm SD) dans les compartiments plasmatique et érythrocytaire à l'entrée et à la sortie du dialyseur, chez dix sujets hémodialysés. Kp = concentration plasmatique de potassium, Ke = concentration érythrocytaire de potassium, Ht = hématocrite, Q sang = débit sanguin dans le dialyseur et UF = débit d'ultrafiltration.

● Transferts de masse

Le transfert de potassium calculé à partir de la clearance plasmatique s'élève à $0,71 \pm 0,10$ mmol/min, alors que l'extraction mesurée directement dans le dialysat est de $0,68 \pm 0,10$ mmol/min. Les transferts de masse estimés par ces deux méthodes ne sont pas significativement différents ($p = \text{NS}$). Ainsi les échanges de potassium entre globules rouges et plasma, dans le dialyseur, paraissent négligeables.

● Concentration érythrocytaire de potassium en cours d'hémodialyse

Dans le tableau II sont reportées les concentrations érythrocytaires mesurées dans le sang artériel en cours d'hémodialyse. En accord avec les résultats précédents, la concentration érythrocytaire de potassium reste constante durant l'hémodialyse. Elle s'élève à $104,0 \pm 5,6$ mmol/l au début du traitement et se maintient à $104,2 \pm 5,0$ mmol/l ($p = \text{NS}$), après 4 heures de dialyse. Par comparaison, les concentrations mesurées chez douze sujets sains ($100,0 \pm 4,9$ mmol/l, tableau III), sont semblables aux valeurs relevées par Etteldorf et coll.,¹² mais discrètement inférieures à celles des patients dialysés ($104,0 \pm 5,6$ mmol/l). En 1991, Gellert et coll.¹³ ont étudié les variations du volume globulaire durant une hémodialyse et ont remarqué que le volume globulaire moyen (MCV) restait constant si le traitement se déroulait sans complication hémodynamique. Dans nos résultats, nous avons également constaté la stabilité du MCV, variant entre $95,1 \pm 7,1$ fl et $94,9 \pm 7,1$ fl ($p = \text{NS}$) à la fin de la dialyse. Par conséquent, si la concentration potassique et le volume érythrocytaire restent constants durant la dialyse, on peut admettre que le contenu érythrocytaire en potassium n'est pas affecté par l'hémodialyse.

Tableau II: Concentrations érythrocytaires en potassium durant une hémodialyse standard.

	0 min	Temps 60 min	240 min	p
Kp (mmol/l)	$4,5 \pm 1,0$	$3,8 \pm 0,7$	$3,1 \pm 0,6$	
Ks (mmol/l)	$40,1 \pm 4,0$	$39,4 \pm 4,0$	$40,0 \pm 3,9$	NS
Hématocrite %	36 ± 3	36 ± 3	37 ± 3	NS
MCV (fl)	$95,1 \pm 7,1$	$94,8 \pm 6,6$	$94,9 \pm 7,1$	NS
Ke (mmol/l)	$104,2 \pm 5,6$	$104,2 \pm 4,8$	$104,2 \pm 5,0$	NS

Mesure des concentrations de potassium érythrocytaires en cours d'hémodialyse standard, chez dix sujets hémodialysés (moyenne \pm SD). Kp = Concentration plasmatique de potassium, MCV = volume corpusculaire moyen, Ke = concentration érythrocytaire de potassium.

Tableau III: Concentrations érythrocytaires en potassium chez 12 sujets sains.

	Cas témoins	Mesure des concentrations plasmatiques (Kp) et érythrocytaires (Ke) de potassium, chez douze sujets sains (moyenne \pm SD). Ks = concentration de potassium dans le sang total, MCV = volume corpusculaire moyen.
Kp (mmol/l)	$4,0 \pm 0,3$	
Ks (mmol/l)	$45,3 \pm 2,5$	
Hématocrite %	43 ± 3	
MCV (fl)	$82,7 \pm 2,4$	
Ke (mmol/l)	$100,0 \pm 4,9$	

■ Discussion

Le transfert d'un soluté du sang vers le dialysat est influencé par la cinétique des échanges entre les érythrocytes et le plasma. Pour les solutés diffusant rapidement, comme l'urée, l'extraction concerne les compartiments érythrocytaire et plasmatique. Par contre, pour les substances diffusant lentement, la clearance est essentiellement plasmatique.¹¹

S'intéressant à la perméabilité de la membrane érythrocytaire, Raker et coll.¹⁴ ont calculé une demi-vie de 43 heures pour le turnover du potassium érythrocytaire. Cette faible perméabilité est notamment liée à la pompe Na/K ATPase et au gradient électrochimique transmembranaire généré.^{10,15} En 1964, Welt et coll.¹⁶ décrivent une altération de la pompe érythrocytaire lors d'insuffisance rénale. L'inhibition est réversible,^{17,18,19} mais elle semble altérer la balance interne et contribuer à l'hyperkaliémie.²⁰

En 1997, Blumberg et coll.⁶ suggèrent qu'un défaut de l'adaptation extrarénale pourrait être à l'origine d'une élévation de la kaliémie pré-dialytique.^{21,22} D'autres auteurs ont décrit une altération de la balance interne chez les sujets dialysés,^{23,24,25,26} cependant aucun ne s'est intéressé à son impact sur les transferts transmembranaires et au rôle des érythrocytes dans la clearance dialytique du potassium.

De notre étude des échanges in vitro de l'urée et du potassium, entre globules rouges et plasma, il ressort clairement (fig. 1 et 2) que l'équilibre entre les deux compartiments est presque instantané pour l'urée. Le flux transmembranaire net du potassium est, par contre, pratiquement négligeable et n'influence pas significativement l'extraction de ce cation.

En outre, la concentration du potassium dans les globules rouges reste constante durant leur transit dans le dialyseur ($98,7 \pm 6,4$ vs $97,7 \pm 7,5$ mmol/l, $p = \text{NS}$, tableau I) et le volume corpusculaire moyen n'est pas modifié par l'hémodialyse ($95,1 \pm 7,1$ vs $94,9 \pm 7,1$ fl, $p = \text{NS}$, tableau II). Le contenu en potassium des érythrocytes n'a donc pas changé, ce qui signifie que les érythrocytes ne participent pas aux échanges de potassium dans le dialyseur. La comparaison des transferts de masse calculés à partir de la clearance plasmatique avec ceux mesurés directement dans le dialysat ($0,71 \pm 0,10$ mmol/min vs $0,68 \pm 0,10$ mmol/min, $p = \text{NS}$), ainsi que les mesures des concentrations érythrocytaires de potassium en début ($K_e = 104,2 \pm 5,6$ mmol/l, $\text{MCV} = 95,1 \pm 7,1$ fl, tableau II), et fin de dialyse ($K_e = 104,2 \pm 5,0$ mmol/l, $p = \text{NS}$, $\text{MCV} = 94,9 \pm 7,1$ fl, $p = \text{NS}$) renforcent, par leur similitude, cette interprétation.

En résumé, le transfert de potassium survenant dans le dialyseur, entre le plasma et le dialysat, est conforme à sa cinétique de diffusion^{9,14}, alors que les érythrocytes ne participent pas aux échanges de façon significative sur un plan clinique.

Adresse de correspondance :

Dr G. Fellay
Unité de néphrologie
Service de médecine interne
Hôpital Cantonal
1700 Fribourg
Suisse



Références

- Allon M. Treatment and prevention of hyperkalemia in end-stage renal disease. *Kidney Int* 1993; 43: 1197-209.
- Panese S, Martin RS, Virginillo M, Litardo M, Siga E, Arrizurieta E, Hayslett JP. Mechanism of enhanced transcellular potassium-secretion in man with chronic renal failure. *Kidney Int* 1987; 31: 1377-82.
- Quintanilla AP, Weffer MI. Hyperkalemia in the patient on chronic dialysis. *Intern J Artif Organs* 1987; 10: 17-9.
- Sandle GI, Gaiger E, Tapster S, Goodship THJ. Evidence for large intestinal control of potassium homeostasis in uraemic patients undergoing long-term dialysis. *Clin Sci* 1987; 73: 247-52.
- Feig PU, Shook A, Sterns RH. Effect of potassium removal during hemodialysis on the plasma potassium concentration. *Nephron* 1981; 27: 25-30.
- Blumberg A, Roser HW, Zehnder C, Müller-Brand J. Plasma potassium in patients with terminal renal failure during and after haemodialysis; relationship with dialytic potassium removal and total body potassium. *Nephrol Dial Transplant* 1997; 12: 1629-34.
- Tzamaloukas AH, Avasthi PS. Temporal profile of serum potassium concentration in nondiabetic and diabetic outpatients on chronic dialysis. *Am J Nephrol* 1987; 7: 101-9.
- Kotyk P, Lopot F, Bláha J. Study on sodium and potassium balance during hemodialysis. *Artif Organs* 1995; 19: 185-93.
- Parker JC, Welt LG, Hill C. Pathological alterations of cation movements in red blood cells. *Arch Intern Med* 1972; 129: 320-32.
- Lacelle PL, Rothstein A. The passive permeability of the red blood cell to cations. *J Gen Physiol* 1966; 50: 171-88.
- Descombes E, Perriard F, Fellay G. Diffusion kinetics of urea, creatinine and uric acid in blood during hemodialysis. Clinical implications. *Clin Nephrol* 1993; 40: 286-95.
- Etteldorf JM, Hill FS, Tuttle AH, Pinheiro D, Bass AC, Overman RR. Alterations in blood chemistry caused by diarrhea during infancy as determined by direct analysis of plasma and erythrocytes. *Pediatrics* 1952; 10: 694-701.
- Gellert R, Billip-Tomecka Z, Hijaz H, Bogdanska-Straszynska B, Malecka B, Sicinski A. Intradialytic erythrocyte volume changes. *Nephrol Dial Transplant* 1991; 6 (Suppl. 3): 10-3.
- Raker JW, Taylor IM, Weller JM, et al. Rate of potassium exchange in the human erythrocyte. *J Gen Physiol* 1959; 33: 691-702.
- Kokko JP, Tannen R. *Fluids and Electrolytes* 3rd ed. Philadelphia: Saunders, 1996.
- Welt LG, Smith EKM, Dunn MJ, Czerwinski A, Proctor H, Cole C, Balfe JW, Gitelman HJ. Membrane transport defect. The sick cell. *Trans Assoc Am Phys* 1967; 80: 217-26.
- Cheng JT, Kahn T, Kaji DM. Mechanism of alteration of sodium potassium pump of erythrocytes from patients with chronic renal failure. *J Clin Invest* 1984; 74: 1811-20.
- Brennan BL, Yasumura S, Letteri JM, Cohn SH. Total body electrolyte composition and distribution of body water in uremia. *Kidney Int* 1980; 17: 364-71.
- Bergström J, Hultman E. Water, electrolyte and glycogen content of muscle tissue in patients undergoing regular dialysis therapy. *Clin Nephrol* 1974; 2: 24-34.
- Kaji DM, Kahn T. Na-K pump in chronic renal failure. *Am J Physiol* 1987; 252: F785-F93.
- Mitch WE, Wilcox CS. Disorders of body fluids, sodium and potassium in chronic renal failure. *Am J Med* 1982; 72: 536-50.
- Salem MM, Rosa RM, Batle DC. Extrarenal potassium tolerance in chronic renal failure: Implications for the treatment of acute hyperkalemia. *Am J Kidney Dis* 1991; 18: 421-40.
- Redaelli B. Electrolyte modelling in haemodialysis-potassium. *Nephrol Dial Transplant* 1996; 11 (Suppl. 2): 39-41.
- Sherman RA, Hwang ER, Bernholz AS, Eisinger RP. Variability in potassium removal by hemodialysis. *Am J Nephrol* 1986; 6: 284-8.
- Fervenza FC, Hendry BM, Ellory JC. Effects of dialysis and transplantation on red cell Na pump function in renal failure. *Nephron* 1989; 53: 121-8.
- Alvo M, Krsulovic P, Fernández V, Espinoza AM, Escobar M, Marusic ET. Effect of a simultaneous potassium and carbohydrate load on extrarenal K homeostasis in end-stage renal failure. *Nephron* 1989; 53: 133-7.