1.1 Introduction

Le sang est un tissu conjonctif spécialisé ou des cellules vivantes, les élément figurés, sont en suspension dans une matrice extracellulaire liquide appelée plasma. Bien qu'il semble épais et homogène, il contient des éléments solides et des éléments liquides visibles au microscope [1].

1.2 Nature de sang

Le sang n'est pas une solution simple ,mais une suspension d'éléments cellulaires dans un liquide physique , de plasma [2].

la phase en suspension est constitués principalement de globules rouges ou érythrocytes ,de globules blancs ou leucocytes et de plaquettes ou thrombocytes. ces particules occupent un volume sanguin de l'ordre de 45 chez l'individu sain. ce volume est défini comme l'hématocrite .

Les érythrocytes ou hématies (5 millions par mm^3) sont de minuscules disques biconcaves d'environ 7 a 8 µm de diamètre et sont très déformables . leur fonction essentielle , assurée par l'hémoglobine qui fixe les gaz , est le transport de l'oxygène des poumons aux tissus , jusqu'aux poumons .

les leucocytes (4000 a 8000 par mm^3) ,sont d'un diamétre de 20 μm . ils se caractérisent par leur diversité :

Polynucléaires , macrophages , lymphocytes .les polynucléaires , en cas d'agression microbienne importante , phagocytent les bactéries , les macrophages ont un peu la même fonction , mais assurent également l'élimination des déchets et des cellules mortes.

Les lymphocytes , quant a eux , fabriquent des anticorps et sont indispensables pour la résistance du corps a l'infection .très petite , les plaquettes ou thrombocytes, dont le nombre varie entre 160 000 et 300 000 par mm^3 et dont le diamètre moyenne est de 1µm , interviennent dan la coagulation du sang.

La nature particulière du sang . due principalement a la présence des globules rouges en suspension . Leur supériorité numériques permet de négliger les autres éléments - influence grandement son comportement .

Le sang se comporte comme un liquide pseudo-plastique . C'est un fluide non newtonien. sa viscosité , de 5 Cp , varie avec le cisaillement auquel il est soumis. Cette propriété est due

l'agrégation des globules rouges a faible cisaillement (si $\tau \leq s^{-1}$ formation de rouleaux), a leur déformation et a leur alignement a fort cisaillement ($\tau \geq 50\ s^{-1}$) [3] .

1.3 Composition du sang

1.3.1 le plasma

Le plasma , de viscosité 1.2 Cp , représente a lui seul , 55% du volume sanguin . il est chargé d transporter vers les cellules les substances nutritives (sels minéraux , glucose , lipides) et d'éliminer les déchets (urée , dioxyde de carbone) . sa composition très complexe . outre de l'eau , formant 91 % de son pois, des substances organique , il est constitué principalement de trois types de protéines plasmatiques :

i. Le fibrinogène ;
ii. L'albumine;
iii. Les globulines;

Le fibrinogène joue un rôle capital lors de la coagulation , un réseau de fibrine emprisonne alors les cellules , mais aussi lors de la formation de rouleaux d'hématies les albumines et les globulines (α β τ) sont essentielles eu maintien de l'équilibre osmotique également l'immunité du corps humain [3].

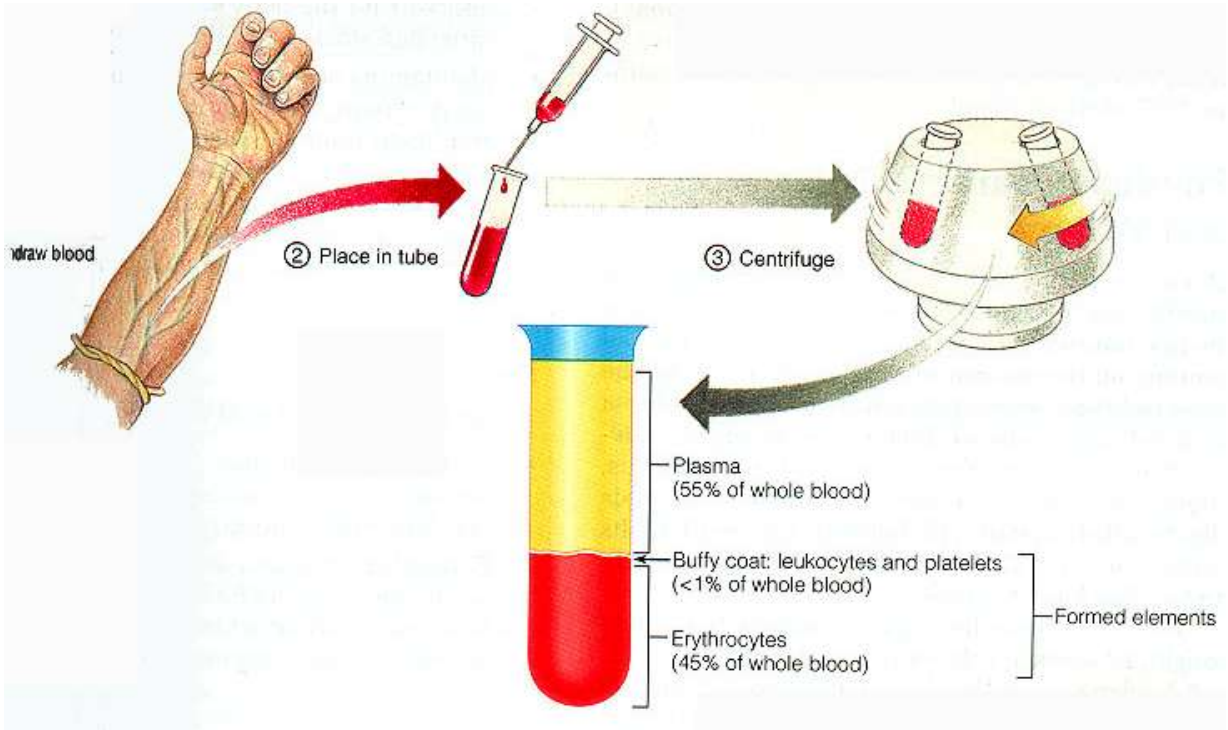


Figure (1.1): Principaux composants du sang

1.3.2 Le globule rouge (Erythrocytes)

Le globule rouge nait dans la moelle osseuse et développe en plusieurs étapes par différenciation , puis maturation . sa viscosité interne est voisine de 6 Cp . En l'absence de d'formation ,il a la forme d'un discoïde biconcave .Le globule rouge est surtout composé d'hémoglobine (Hb) en solution aqueuse saturés . Cette protéine assure le transport de l'oxygène et du gaz carbonique .

La membrane du globule rouge , constituée de deux couches asymétriques , lui confère sa plasticité et son élasticité . Elle peut se déformer d'un façon extraordinaire , l'hématie peut ainsi s'introduire dans des capillaire de diamètre inferieure a 3 µm, sans changer ni de surface ni de volume . Cette propriété essentielle qu'est la déformabilité dépend du contenu du globule rouge ,du milieu extérieur et de l'état de la membrane .Une autre propriété de l'hématie est l'agréabilité . l'agrégation des globules rouges joue un rôle très important sur la viscosité globale de la suspension ,en particulier pour de faibles vitesses de cisaillement .après cent vingt jours d'activité dans le système vasculaire , le globule rouge meurt et est détruit par des cellules de la moelle [2] .

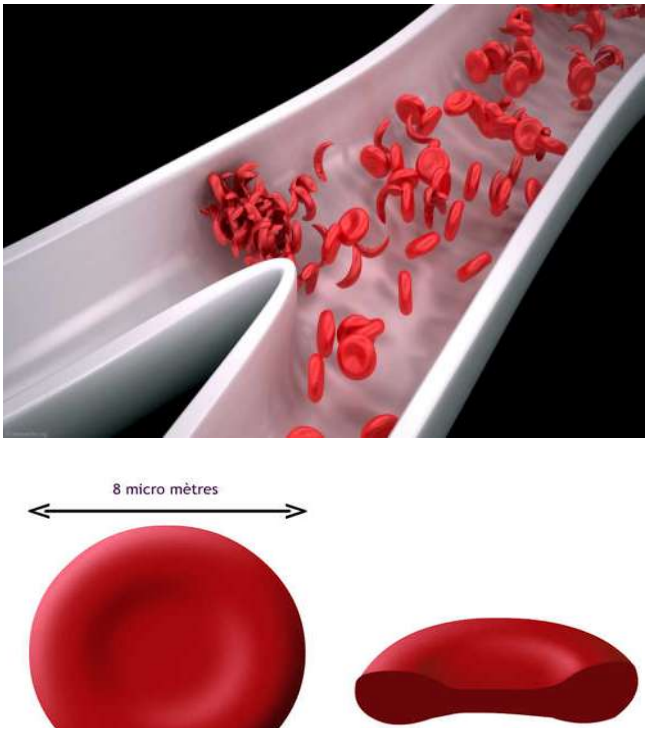


Figure (1.2) :Structure des Erythrocites [4]

1.3.3 Les globules blancs (Leucocytes)

Les leucocytes sont les seuls éléments figurés du sang à posséder un noyau et les organites habituels . Les leucocytes sont beaucoup moins nombreux que les globules rouges .en moyenne , ils sont au nombre de 4 à 11x 10^9 par litre de sang et représentent moins de 1% du volume sanguin , leur forme est indiquée sur la figure (1.3) [1] .

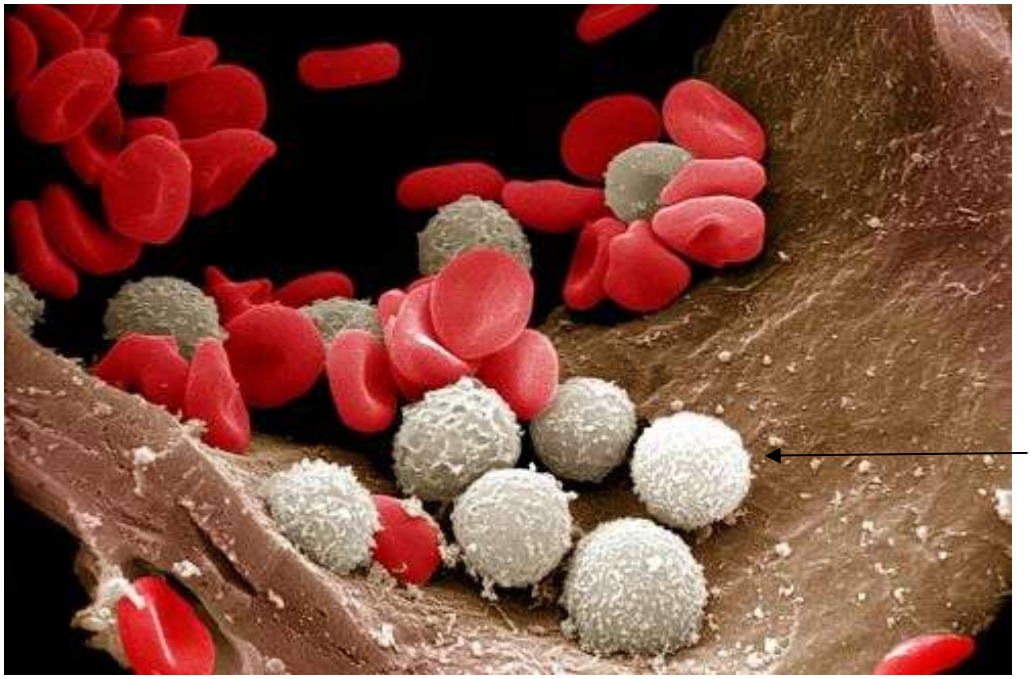


Figure (1.3) : forme de Leucocytes

Les leucocytes jouent un rôle crucial quand nous combattons une maladie . On peut les comparer à une armée sur le pied de guère ; en effet , ils protègent l'organisme contre les bactéries , les virus , les parasites , les toxines et les cellules tumorales [1] .

1.3.4 Les plaquettes Sanguines (Thrombocytes)

Les plaquettes ne sont pas des cellules proprement parler . Ce sont des fragment cytoplasmique de cellules extraordinairement grosses (mesurant jusqu'a 60 µm de diamètre) appelées mégacaryocytes . Elles sont appelées thrombocytes , car elles jouent un rôle essentiel dans la coagulation qui prend place dans le plasma à la suite d'une lésion vasculaire [6].

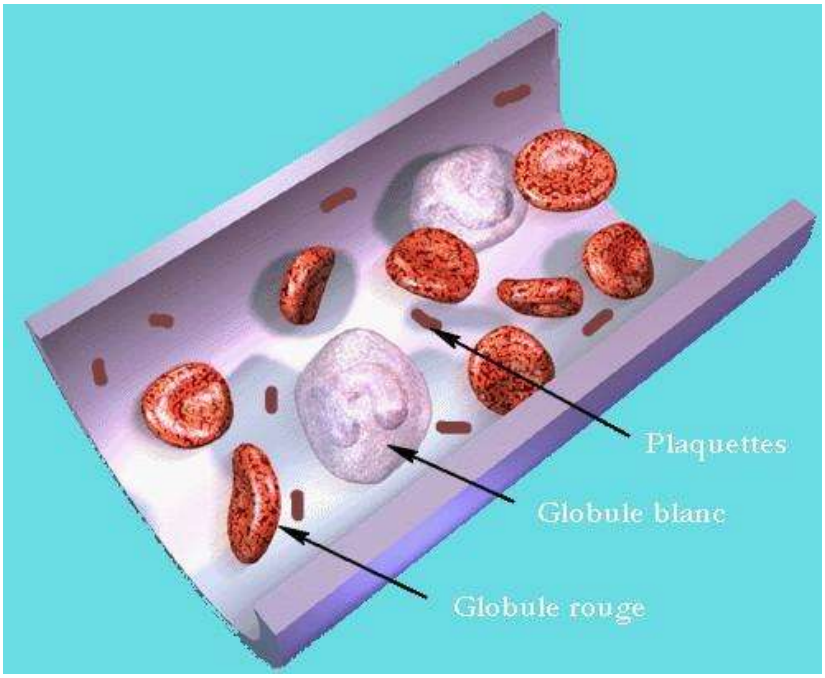


Figure (1.4): forme des Thrombocytes

1.4La circulation sanguin

Le diamètre , plus ou moins large , des vaisseaux dans lesquels s'écoule le sang contribue à augmenter les difficultés d'étudier ce phénomène in vivo .En hydrodynamique sanguine , on peut ainsi distinguer trois classes d'écoulement suivant le diamètre du vaisseau D_v :

- la macro circulation : $D_v > 500$ µm

-la microcirculation : 10 µm < D_v < 500 µm

-la circulation dans les capillaires : D_v < 10 µm

Dans la grande circulation , de nombreux auteurs pensent que le sang est Newtonien par conséquent , dans ce cas ce sont plutôt les propriétés rhéologiques des vaisseaux qui interviennent [[7].

Dans la circulation capillaire (siège des échanges transpariétaux), ce sont les propriétés mécaniques des globules rouges , notamment celles de leur membrane qui jouent le plus grand rôle .

En microcirculation , c'est le caractère non -newtonien du sang qui domine .En effet , dans ce domaine qui nous préoccupe plus particulièrement , le comportement de l'écoulement est affecté par les interactions physicochimiques qui existent entre les composants du plasma ou entre les hématies ou encore avec les parois vasculaires .

Nous allons aborder dans le paragraphe suivant , certaines particularités du sang dans la microcirculation . Caractéristiques de la microcirculation sanguine.

La relation de poiseuille s'écrit de la façon suivante :

$$\eta_{a-} = \frac{\pi R^2 \Delta p}{8\, L\, Q} \qquad (1.1)$$

avec :

R : rayon du tube

Δp :perte du charge dans le tube

L :longueur du tube

Q :débit dans le tube

On définit ainsi une viscosité apparente η_a (R) .

A partir des mesures de viscosité du sang dans des tubes de diamètre compris entre 10 et 500 µm , on a pu constater que η_a diminue avec R .paradoxalement , le sang s'écoule plus facilement dans des tubes de petites sections .Ce comportement rhéologique , lie a la taille du contenant , entraine des propriétés d'écoulement assez particulières .

- Existence d'un écoulement diphasique avec un manchon périphérique appauvri en hématies , au voisinage de la paroi de tube , et noyau central enrichi en globules rouges .

-Aplatissement du profil de vitesse dans la pâtie axiale de l'écoulement .

-Diminution du taux d'hématocrite moyen H_t dans le tube comparé a celui H_0régnant dans le " réservoir " d'alimentation (Effet Fahraeus) .

-Diminution de la viscosité apparente η_a lorsque le diamètre du tube R diminue (Effet Fahraeus-Lindqvist) [3].

1.4.1Ecoulement diphasique

L'écoulement diphasique , a deux phases séparées , est une des conséquences de la migration axial des particules .Les études de Goldmith et Masson (1965) ,Segre et Silberberg (1962) ont montré que les particules d'une suspension sont soumises , sous certaines condition bien définies , a des forces radiales .Ces conditions dépendent de la rigidité des particules , de la concentration de la suspension et d'un nombre de Reynolds interne relatif aux particules [2] .

L'effet de pincement ou "tubular pinch effect " a été mis en évidence .Ce phénomène n'apparait pas dans le cas d'élément déformables comme les globules , ceux -ci vont systématiquement vers l'axe du tube .

1.4.2 Profil de vitesse aplati

L'aplatissement du profil de vitesse dans la phases central s'explique par le fait que cette zone a une viscosité plus élevé que celle de la phase périphérique . Cet aplatissement est d'autant plus marqué que η_a augmente quant τ diminue . A force concentration , et pour des débit assez un faibles ,on doit donc s'attendre à de profils assez abrupts , avec un noyau très visqueux , entouré d'une mince couche lubrifiante peu visqueuse

1.5Modèles et lois de viscosité

1.5.1 Densité du sang

D'aprés Chimel et Walitza (1980) , lamasse volumique du sang est prise égale à

1056 $^{kg}/_{m^3}$[5]

1.5.2 La viscosité du sang

la viscosité apparente du sang dépend des trois facteurs suivants:

1. l'hématocrite ;

2. La température ;

3. Protéines, fibrinogène , albumines .....etc. .

Plusieurs chercheurs ont proposé plusieurs modèles rhéologiques pour la description de la viscosité du sang les modèles suivants sont examinés :

1.5.3 Modèle de Casson (1959)

Le comportement non-Newtonien du sang est décrit par la relation de Casson suivant [8]:

$$\sqrt{\tau} = \sqrt{\tau_y} + s\sqrt{\dot{\gamma}} \qquad (1.2)$$

avec

τ: contrainte de cisaillement

τ_y: contrai du ruptur (Pa);

$\dot{\gamma}$: taux de déformation $(Pa.s)^{1/2}$.

L'équation de Casson (1.6) peut s'écrire sous la forme [9]:

$$\sqrt{\tau} = k_0 + k_1\sqrt{\dot{\gamma}} \qquad (1.3)$$

ou : k_0 et k_1 sont donnés par :

$$k_1 = \sqrt{\mu_0/(1-H)^{a.a-1}} \qquad (1.4)$$

$$k_1 = \frac{\alpha\beta}{(a\alpha-1)}\left[\frac{k_1}{\sqrt{\mu_0}-1}\right] \qquad (1.5)$$

ou :

$k_0{}^2$: représente la contrainte de rupture ;

μ_0 : viscosité du plasma ;

H : hématocrite.

a, α, β sont des constantes expérimentales.

1.5.4 Lois de Puissance (Power Law)

Pour la prédiction de la viscosité du sang, Walburn et Schneck (1976) ont présenté le modèle suivant [5] :

$$\tau = K\dot{\gamma}^n \tag{1.6}$$

Ou :

τ: contrainte de cisaillement (Pa) ;

K: constante de Walburn (Pa.s^n) ;

n: constante ;

$\dot{\gamma}$: taux de déformation .

Alors la viscosité sanguine sera :

$$\tau = K\dot{\gamma}^{n-1} \tag{1.7}$$

1.5.5 Modèle de Quemada (1976)

Pour l'analyse de la viscosité sanguine , Quemada (1976) a proposé le modèle suivant [5]:

$$\mu_r = \frac{\mu_a}{\mu_p} = \left[1 - \frac{1}{200KH}\right] \tag{1.8}$$

$$K = \frac{\mu_a + \mu_0 \alpha_0 \sqrt{\dot{\gamma}}}{\left(\frac{\alpha_0 \sqrt{\dot{\gamma}}}{100}\right) + 10^{-3}} \tag{1.9}$$

Ou :

μ_a: viscosité apparente du sang ;

μ_r : viscosité relative du sang ;

μ_p: viscosité du plasma = $1.26.10^{-3}$ **Pa. s;**

$\mu_\infty = 1.84 \times 10^{-3}\ Pa.S$;

$\mu_0 = 4.65 \times 10^{-3}$;

$\alpha_0 = 0.67 s^{1/2}$

Les résultats obtenus par le modèle de Quemada sont en accord avec l'expérience de Merril (1963).

1.5.6 Modèle de Carreau

Le modèle de Carreau peut être utilisé pour décrire le comportement non-Newtonien du sang , lié à la structure microscopique de ce dernier (agrégation et déformation des globules rouges). La viscosité sanguine selon le model de Carreau est donnée par :

$$\frac{\mu_a - \mu_\infty}{\mu_0 - \mu_\infty} = [1 + (K\dot{\gamma})^a]^{(n-1)/a} \qquad (3.5)$$

Ou :

μ_a: la viscosité dynamique apparente du sang $[Pa.s]$;

μ_∞: la viscosité dynamique du sang aux contraintes de cisaillement élevées :

$\mu_\infty = 2.2 \times 10^{-3}$ Pa.s

μ_0: la viscosité dynamique du sang à zéro contraintes de cisaillement :

$\mu_0 = 22 \times 10^{-3}$ Pa.s

K, n, a: Constantes

$K = 0.11$ s

$a = 0.644$

$n = 0.392$

$\dot{\gamma}$: représente le tenseur de déformation .

Dans cette étude, le sang est considéré comme fluide non-Newtonien de viscosité variable approximée par le model de Carreau précédent .

1.6 Modèles diphasiques

Un très grande nombre de travaux ont tenté de justifier théoriquement l'existence de l'effet Fahraeus-Lindqvist et d'en déduire la valeur de l'épaisseur de la couche plasmatique et l'aplatissement de profil de vitesse .Nous nous limiterons aux modèles les plus classiques.

Le modèle bi-newtonien est un modèle très simple . il a été utilisé par Burgliarello et Sevilla (1970) . dans ce cas , les deux phases sont newtoniennes avec des viscosités dynamiques constante . pour des régimes permanents et oscillatoires , les profils des vitesses calculés sont beaucoup incurvés dans le noyau. l'effet Fahraeus-Lindqvist est bien traduit , par contre , le taux d'hématocrite n'étant pas pris en compte , l'effet Fahraeus est négligé.

Bugliarello et Sevilla (1970) ont également proposé un modèle diphasique constitué de deux fluides de casson . ce modèle Casson-Casson , met bien en évidence l'effet Fahraeus-Lindqvist.

Aroesty et Gross (1972) montrent, par leur modèle a un fluide de casson, que cette relation conduit a une bonne approximation de l'écoulement dans les petits vaisseaux.

Shukla et al . (1980) ont appliqué le modèle d'Ostwald, modèle a loi puissance , purement mathématique , aussi bien a la phase centrale qu'a la phase périphérique . les auteur ont supposé que l'interface noyau-manchon restait parallèle a la paroi, ce qui est contredit par l'expérience . en conclusion , ce modèle est assez peu représentatif des suspensions sanguines.

D'autres travaux , supposant la couche plasmatique newtonienne ,ont utilisé pour la modélisation du noyau central une loi de Taylor comme Bitoun (1985) ou encore une loi de Quemada comme Dufaux (1982)ou Yardin (1985).

On peut également citer le modèle viscoplastique de Herchel-Bulkley par Iida et Murata (1980) ou encore la théorie des fluides micro polaires par Ariman et al .(1974).

Tous ces modèles ne conviennent pas parfaitement .en effet , certains ne sont pas acceptables physiologiquement , comme le modèle de Casson qui présente une contrainte seuil. D'autres traduisent l'effet Fahraeus-Lindqvist , comme le modèle bi newtonien , mais pas l'effet FAHRAEUS .seul le modèle Newton-Quemada qui tient compte du taux d'hématocrite et du cisaillement caractérise de façon satisfaisante l'écoulement sanguin [10].

Protéines	6.8% (en poids)
Albumine	3.5%
α globulines	0.83%
β globulines	0.89%
ϒ globulines	0.70%
Fibrinogène	0.49%
Autres substances organiques (par mg /100ml de plasma)	
Sucre	123
Urée	22
Cholestérol	107-320(194 en moyenne)
Ions inorganiques (par mg /100ml de plasma)	
Na -	311-334
K+	13.7-19.5
Ca ++	9.2-11.2
Mg^{++}	1.22-2.43
Cl^{-}	352-373
SO_4^{--}	22.1
PO_4^{---}	13.3
HCO_4^{-}	170

Tableaux (1.1): Constituants principaux du plasma [10].