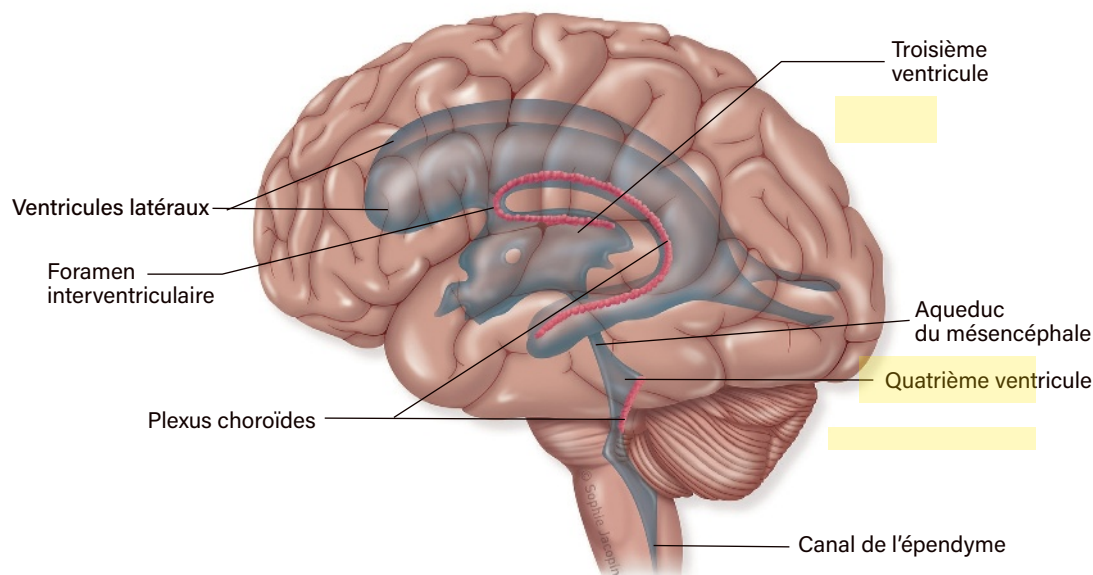




Les études d'imagerie cérébrale (voir la figure page 67) ayant permis de mesurer ces vitesses ont également révélé un autre phénomène: comme le ressac en bord de mer, le flux de LCR est en réalité un va-et-vient. Une observation qui semble de prime abord contradictoire avec sa production constante par les plexus choroïdes, mais dont l'explication est relativement simple. Le crâne étant un espace clos, toute variation de volume d'un compartiment se fait aux dépens des autres. Lorsque le cœur bat, il introduit à chaque systole (contraction) un nouveau volume de sang dans les vaisseaux cérébraux. Cette augmentation de volume est largement compensée par la sortie de sang *via* le système veineux, mais ces variations ont un impact sur les autres compartiments. Le LCR bat donc au rythme de notre cœur. La respiration, ainsi que la posture (debout ou allongée), affectent aussi les marées du liquide.

ZONES D'ÉCHANGES MARITIMES: LES ORGANES CIRCUMVENTRICULAIRES

De sorte qu'à une moindre échelle que dans l'aqueduc de Sylvius, l'ensemble du LCR est mis en mouvement par les rythmes cardiaques et respiratoires. Ces flux permettent le transport de solutés divers, nutriments, messagers ou déchets, sécrétés par diverses parties du système nerveux.

En outre, éparpillées dans le système ventriculaire, se trouvent de petites zones ayant un lien bien particulier avec le LCR: les organes circumventriculaires. À l'instar des plexus choroïdes qui en font partie, les vaisseaux sanguins y sont plus perméables que partout ailleurs dans le cerveau. Cela assure des échanges renforcés entre sang et LCR, que

Chez les humains comme chez la plupart des mammifères, le système ventriculaire se compose de quatre ventricules cérébraux – deux latéraux, le troisième et le quatrième – connectés les uns aux autres et débouchant dans l'espace sous-arachnoïdien. C'est dans ces lacs intérieurs que se trouvent les plexus choroïdes, responsables de la formation du LCR.

ceux-ci servent à une sécrétion ou à la surveillance des composés du sang ou du LCR. Ainsi, il existe des zones dites «sensitives», comme l'organe subfornical, sensible à la salinité du sang, ou l'area postrema, qui peut déclencher le vomissement si des composés toxiques sont détectés dans le LCR...

De plus, des structures cérébrales sécrétrices d'hormones sont associées au LCR: la neurohypophyse, libérant l'hormone ocytocine impliquée dans l'attachement et le soin apporté à la progéniture, et la fameuse glande pinéale. Cette dernière, du fait de sa position centrale dans le cerveau, a jadis été présentée comme le siège de l'âme, notamment par Descartes. Même si cette théorie fait aujourd'hui sourire, la glande pinéale s'est révélée être, ironiquement, un vestige du «troisième œil» que possèdent encore certains lézards. Une structure qui, chez nos lointains ancêtres, était sensible à la lumière et régulait le cycle jour-nuit. Aujourd'hui, la glande pinéale a perdu cette sensibilité, mais garde son rôle régulateur en sécrétant la mélatonine, l'hormone favorisant le sommeil. C'est donc la circulation du LCR dans tout le système nerveux qui favorise la dispersion de ces deux hormones, la mélatonine et l'ocytocine, essentielles à notre sommeil et à nos liens d'attachement.

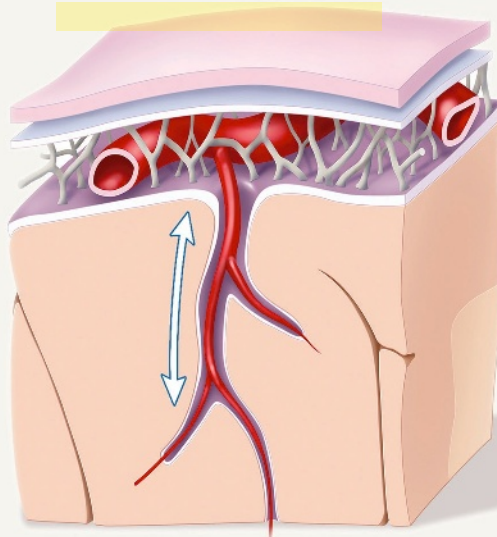
RUINE ENGLOUTIE DE L'ÈRE EMBRYONNAIRE, LE CANAL DE L'ÉPENDYME

À la sortie du quatrième ventricule, le LCR se jette ensuite dans l'espace sous-arachnoïdien, une zone en périphérie du cerveau comprise entre les méninges. Il existe aussi une autre voie, plus ancienne et plus dérobée, qui court tout le long de la moelle épinière pour

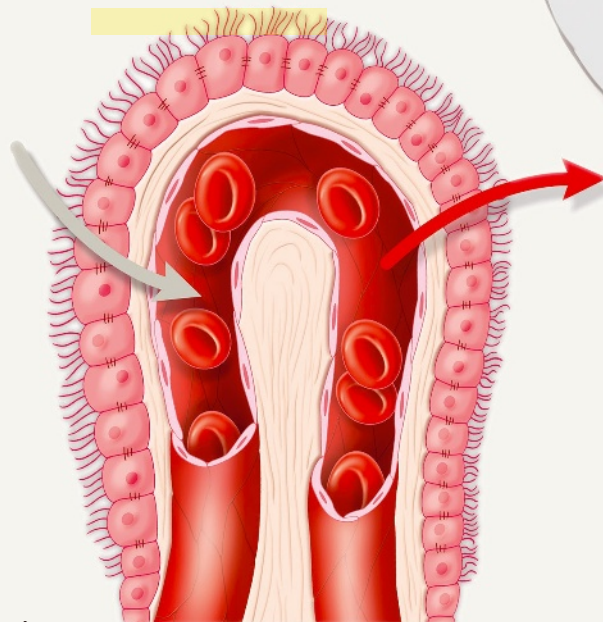
VOYAGE AU FIL DU LCR...

Le LCR prend sa source dans le système ventriculaire, où il est produit par les plexus choroïdes ① à partir du sang. S'écoulant le long des ventricules ②, il y interagit avec diverses structures dont la glande pinéale ③, écho archaïque de notre « troisième œil » impliqué dans la régulation du sommeil. Après un parcours tumultueux au rythme des battements du cœur et de la respiration, le LCR quitte les ventricules pour se jeter dans l'espace sous-arachnoïdien ④, vaste océan baignant le pourtour de l'ensemble du système nerveux central. Le long de la moelle épinière court une voie annexe, le canal de l'épendyme ⑤, relique du tube neural ayant joué un rôle majeur lors de l'embryogenèse. Au long de son trajet dans l'espace sous-arachnoïdien, le LCR peut se glisser dans les espaces périvasculaires ⑥, de fines couches de liquide autour des vaisseaux sanguins assurant la communication avec les couches profondes du cerveau. Nichées dans les larges sinus qui surplombent le cerveau se trouvent de petites protrusions de l'espace sous-arachnoïdien, les villosités arachnoïdiennes ⑦, par lesquelles l'excédent de LCR se jette dans le sang veineux pour y être évacué. Le réseau lymphatique méningé ⑦, ainsi que les espaces périnerveux franchissant la lame criblée ⑧, contribuent dans une moindre mesure à l'élimination du LCR vers la lymphe (en vert).

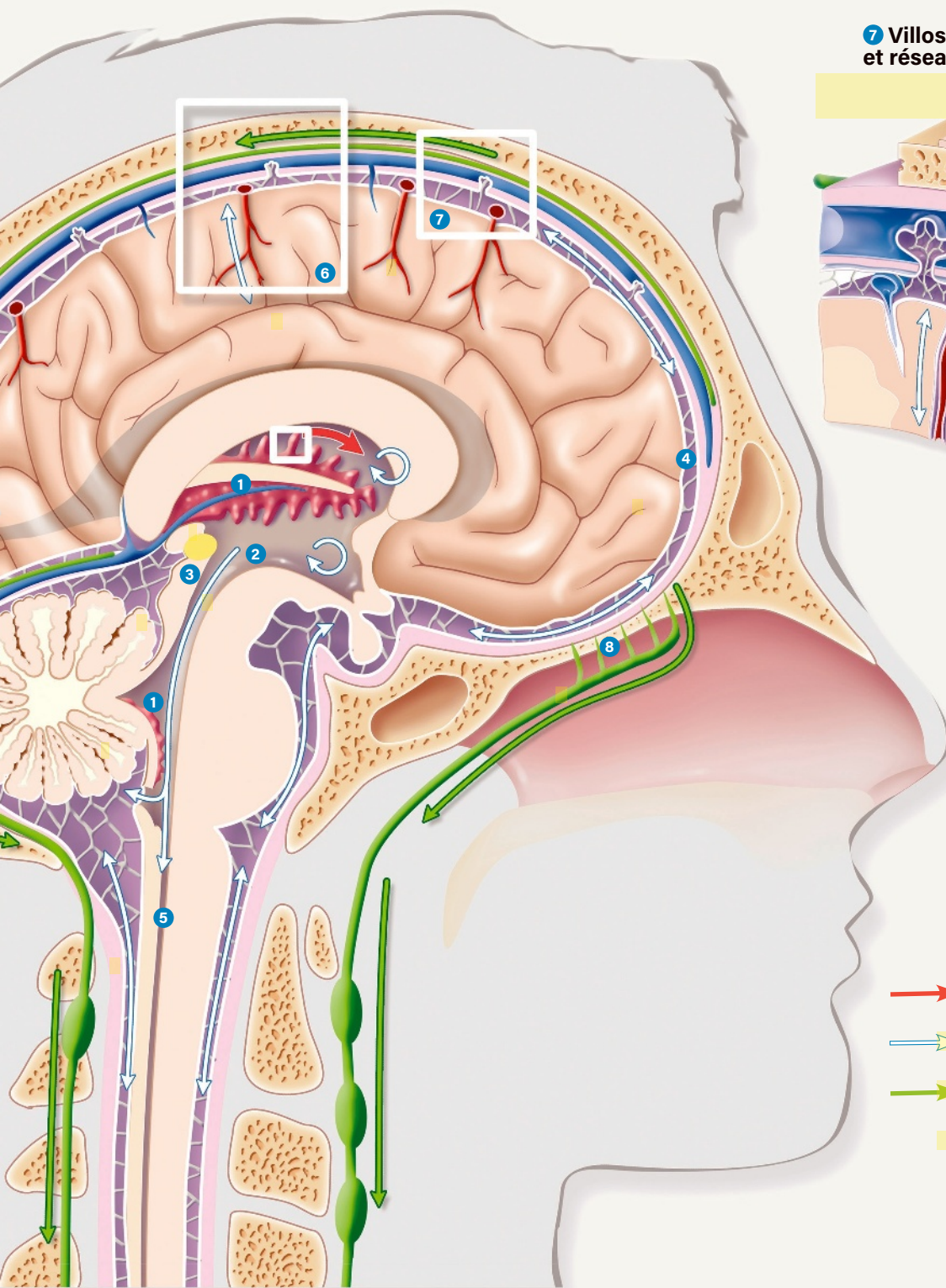
⑥ Espaces périvasculaires



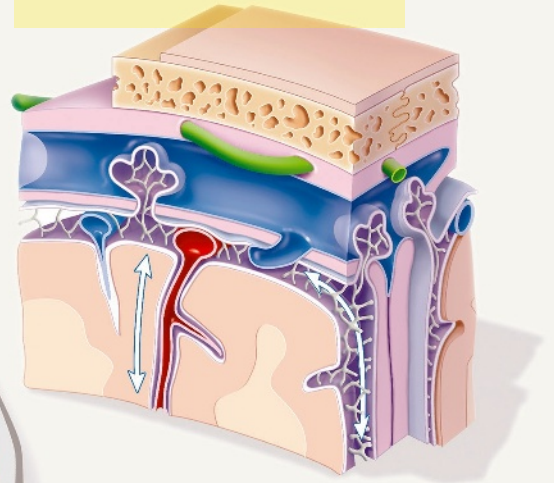
① Plexus choroïdes



- ① Plexus choroïdes
- ② Système ventriculaire
- ③ Glande pinéale
- ④ Espace sous-arachnoïdien
- ⑤ Canal de l'épendyme
- ⑥ Espaces périvasculaires
- ⑦ Villosités arachnoïdiennes et réseau lymphatique méningé
- ⑧ Lame criblée



7 Villosités arachnoïdiennes et réseau lymphatique méningé



- Production de LCR
- Mouvement de LCR
- Drainage du LCR

COMMENT LE LCR NETTOIE LE CERVEAU

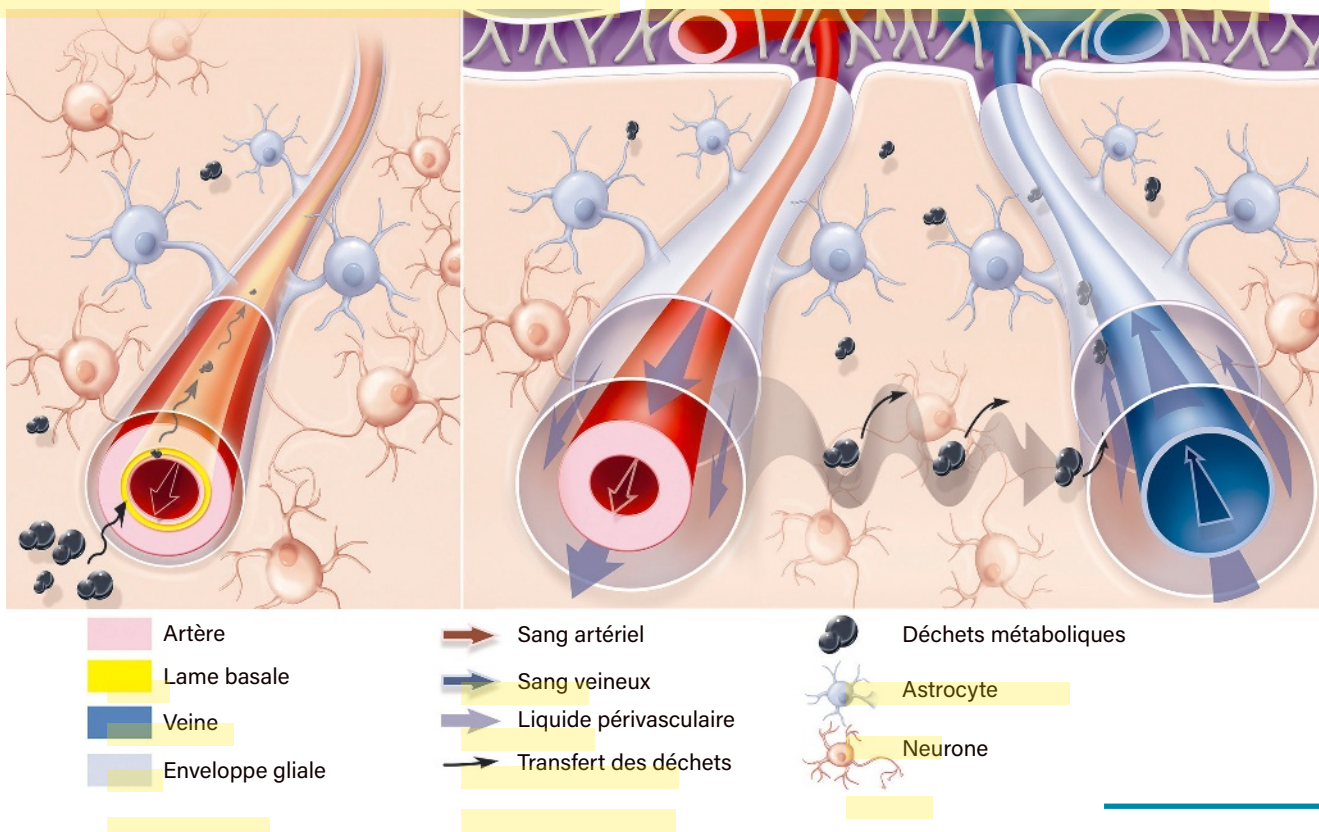
La plupart des déchets du cerveau sont rejetés dans le sang ou détruits par les cellules immunitaires qui le protègent. Mais certains chercheurs envisagent d'autres voies de nettoyage...

A. Le drainage intramural périartériel

Proposé par l'équipe de Roxana Carare en 2008, ce modèle suggère que certains déchets pourraient se lier chimiquement à la membrane basale de la paroi des artères, un réseau dense de liquide et de fibres intercalé entre les couches musculaires du vaisseau. Les contractions de l'artère ramèneraient les déchets vers les canaux lymphatiques à l'extérieur du cerveau, accompagnés d'une fraction de liquide.

B. Le système glymphatique

Proposée par l'équipe de Maiken Nedergaard en 2012, cette théorie suggère qu'un flux de liquide serait produit entre les espaces périartériel et périveineux, permettant ainsi un lavage en profondeur du cerveau. Si le rôle des espaces périvasculaires dans le drainage des déchets a été décrit depuis la fin du ^{xx}^e siècle, l'hypothèse d'un flux de liquide dans le tissu cérébral est de plus en plus contestée.



aboutir dans une sorte de cinquième et dernier ventricule: le canal de l'épendyme.

Cette route peu fréquentée est un vestige de ce qui a été, dans les tout premiers jours après la conception de l'embryon, le tube neural. De quoi s'agit-il? Trois semaines après la fécondation, l'embryon ressemble encore à une galette de la taille d'une tête d'épingle, parcourue par un renflement central: le tube neural. Il s'y trouve des cellules ciliées dont le battement joue un rôle crucial en transportant les facteurs de croissance destinés à guider le développement de l'organisme.

Puis, les parois du tube neural donnent progressivement naissance au système nerveux, le liquide situé au centre devenant le LCR. Chez l'adulte, le canal de l'épendyme est donc

une ultime réminiscence de ce stade archaïque. À son extrémité caudale se trouve une connexion délabrée vers l'espace sous-arachnoïdien du rachis, mais la plus grande partie du LCR emprunte désormais les sorties du quatrième ventricule.

DANS LA MANGROVE SOUS-ARACHNOÏDIENNE

L'espace sous-arachnoïdien contient plus des trois quarts du LCR. Cet océan, qui baigne le système nerveux central, est délimité par l'arachnoïde, l'une des trois méninges avec la dure-mère, plus coriace et externe, et la pie-mère, une membrane délicate qui épouse les moindres contours du cerveau. De nombreux piliers membraneux traversent l'espace

sous-arachnoïdien: des «trabécules élastiques» qui suspendent le système nerveux central dans son bain de LCR et permettent ainsi d'amortir les chocs et de maintenir le tissu mou et fragile du système nerveux en quasi-apesanteur.

C'est également dans cet espace que courent les vaisseaux sanguins avant de s'engouffrer dans le système nerveux central. Artères et veines, enrobées d'une fine couche membraneuse les séparant du LCR, forment une toile arborescente, plaquée contre le cerveau, d'où partent une multitude de vaisseaux pénétrants.

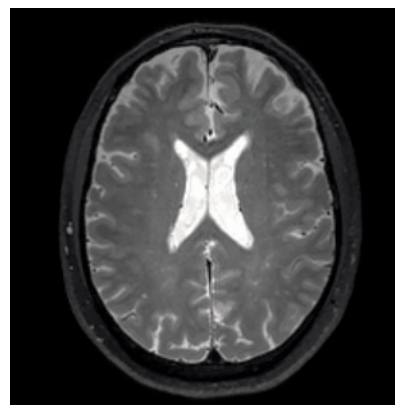
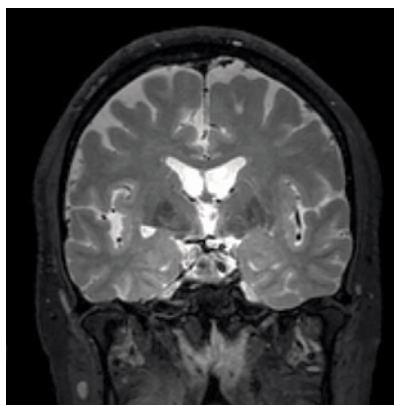
CHUTES DU BOUT DU MONDE

Entre les deux hémisphères s'allonge un énorme sinus veineux, vaste poche de sang dans laquelle se jettent les veines cérébrales qui ramènent le sang ayant irrigué les tissus cérébraux. L'espace sous-arachnoïdien s'étend également dans ce sinus en petites cavités nommées «villosités arachnoïdiennes». Il s'agit d'un des sites majeurs de drainage et d'évacuation du LCR, qui permet d'en réguler la pression grâce à un système de valves anti-retour à l'échelle microscopique. Par les villosités arachnoïdiennes, l'excédent de LCR se jette dans le sang veineux pour y être évacué.

Les villosités arachnoïdiennes ne sont cependant pas la seule voie d'élimination du LCR. Le réseau lymphatique méningé remplit une fonction équivalente. Découvert en 1787 par l'Italien Paolo Mascagni, il est ensuite tombé dans l'oubli, avant d'être de nouveau observé simultanément par les équipes de Jonathan Kipnis et Kari Alitalo, en 2015. Passé inaperçu aux yeux des scientifiques pendant des siècles du fait de fortes variations interindividuelles, le réseau lymphatique méningé est, à l'instar du système lymphatique présent dans le reste de l'organisme, un ensemble de canaux spécialisés, destinés à ramener le liquide excédentaire des tissus vers le système veineux.

Le réseau méningé présente tous les aspects des vaisseaux lymphatiques «classiques» et s'étend au repos le long des gros vaisseaux. Cependant, en cas de traumatisme, choc ou accident vasculaire cérébral, il peut étendre sa superficie et ainsi contribuer à drainer le LCR, pour limiter l'augmentation de la pression intracrânienne.

D'autres voies moins importantes permettent d'évacuer directement une partie du LCR vers le système lymphatique. Par exemple, la lame criblée de l'éthmoïde, structure osseuse permettant le passage des nerfs olfactifs vers la cavité nasale, voit s'écouler une fraction du LCR vers la muqueuse olfactive, abondamment desservie par des vaisseaux lymphatiques. Peu développée chez les êtres humains, cette voie



L'imagerie par résonance magnétique (IRM) est une méthode pour observer l'intérieur du corps grâce à un puissant aimant et des ondes radio faisant vibrer le noyau des atomes. Le signal reçu provient surtout des molécules d'eau et change en fonction de leur état physicochimique. Grâce à ces propriétés, il est possible de distinguer le LCR (*en blanc*) du tissu cérébral. Le contraste de phase est un type d'IRM exploitant les propriétés d'encodage de la machine pour déceler des tissus ou fluides en mouvement par rapport au reste du corps et donner une approximation de leur vitesse et de leur sens de déplacement. Ainsi, cette technique est utilisée pour mesurer les flux de LCR, mais aussi les flux sanguins dans le cœur et les gros vaisseaux.

est cependant prépondérante chez les rongeurs dont la surface olfactive est plus importante. À noter que les tractus olfactifs parfois se résorbent, lors d'un rhume par exemple, ce qui perturbe le flux général de LCR.

LES FLEUVES DU TISSU CÉRÉBRAL

C'est le Hongrois Michael Földi qui, en 1968, a découvert qu'un marqueur injecté dans le cerveau se retrouvait, quelques heures plus tard, dans les nœuds lymphatiques de la base du cou, ouvrant la voie à l'étude des liens entre cerveau et système lymphatique. Földi a également montré que le traceur quittait le cerveau en suivant le contour des vaisseaux sanguins. Pourtant, le traceur n'entrait jamais dans le sang ! Il s'agit donc d'une voie périvasculaire (située autour des vaisseaux), à laquelle l'Américaine Helen Cserr a ajouté les voies périnerveuses, le long des grands axes de fibres parcourant le cerveau. Ainsi, les solutés, sels minéraux, nutriments, neuromédiateurs, suivent ces voies de moindre résistance pour se déplacer.

De fait, il existe, autour des artères et veines pénétrant dans le cerveau, une couche de fluide communiquant avec l'espace sous-arachnoïdien: l'espace de Virchow-Robin. Ce compartiment se prolonge en profondeur par l'espace périvasculaire, avant de disparaître au niveau des capillaires. Il est formé grâce à des prolongements que certaines cellules chargées de l'entretien du système nerveux, les astrocytes, envoient au contact des vaisseaux. Ces «pieds astrocytaires» contribuent à la formation de la barrière hématoencéphalique et sont enrichis en aquaporine de type IV, une protéine canal perméable à l'eau qui facilite les échanges entre ces cellules et l'espace périvasculaire.