



PCEM2

THÈME X

L'APPAREIL EXCRÉTEUR

ANNÉE UNIVERSITAIRE **2022-2023**

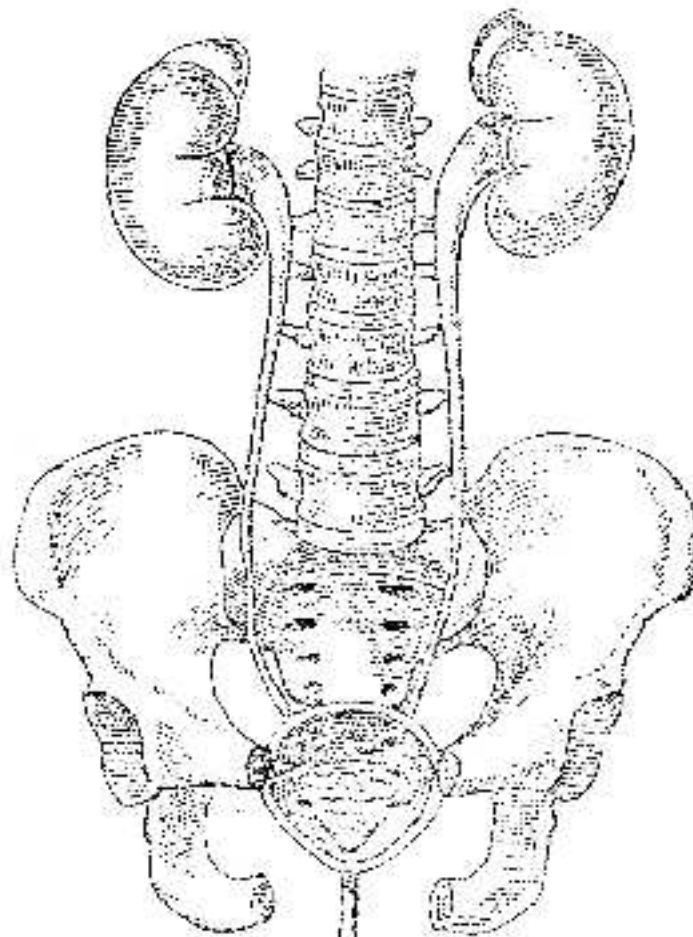
www.fmt.rnu.tn

PLAN

ANATOMIE	3
La région rétro péritonéale médiane	4
La loge latéroviscérale	11
La loge rétrorectale	13
La région rétropéritonéale latérale	15
L'uretère abdominal	41
La vessie	44
L'urètre masculin	48
L'urètre féminin	49
Appareil génital masculin	50
Appareil génital féminin	58
HISTOLO-EMBRYOLOGIE	67
Histologie de l'appareil urinaire	68
Embryologie du système urinaire	82
PHYSIOLOGIE	101
Relation structure fonction	104
La filtration glomérulaire	106
Les fonctions tubulaires	113
Concentration des urines	118
La miction	121
Régulation de l'équilibre acido-basique	122

ANATOMIE

L'APPAREIL EXCRÉTEUR URINAIRE



LA REGION RETRO PERITONEALE MEDIANE

A. INTRODUCTION :

Située devant le rachis lombaire, la région rétropéritonéale médiane constitue une importante voie de passage pour les gros vaisseaux qui descendent dans le pelvis ou qui remontent vers le thorax, accompagnés par l'axe lymphatique et par les chaînes nerveuses du système sympathique.

B. LIMITES :

1. EN HAUT :

La face inférieure du diaphragme et les orifices qui le traversent.

2. EN BAS :

De façon conventionnelle, l'articulation lombo-sacrée, que repère la saillie du promontoire.

3. LATÉRALEMENT :

Également de façon conventionnelle, un double plan sagittal passant par le sommet des processus transverses.

4. EN AVANT :

Le péritoine pariétal postérieur et la masse des viscères intrapéritonéaux.

5. EN ARRIÈRE :

Le plan osseux des deux dernières vertèbres dorsales, et celui des cinq vertèbres lombaires, séparées par le relief convexe des disques intervertébraux.

Deux sortes de formations fibreuses tapissent la face antérieure du rachis dorso-lombaire.

- Le ligament vertébral commun antérieur ou ligament longitudinal antérieur.
- Les piliers du diaphragme :
 - Les piliers principaux sont asymétriques, le droit, plus épais, descendant jusqu'à la 3^{ème} vertèbre lombaire, alors que le gauche ne dépasse pas la 2^{ème} lombaire.
 - Les piliers accessoires, plus grêles et plus variables, sont conditionnés par le passage des nerfs splanchniques, ils montent en dehors des piliers principaux, depuis la 2^{ème} lombaire jusqu'au bord postérieur du centre phrénique.

C. CONTENU :

Dans la région rétropéritonéale médiane circulent :

- Les gros vaisseaux : aorte et veine cave inférieure,
- Les formations lymphatiques,
- Les chaînes et les plexus nerveux sympathiques.

1. AORTE ABDOMINALE :

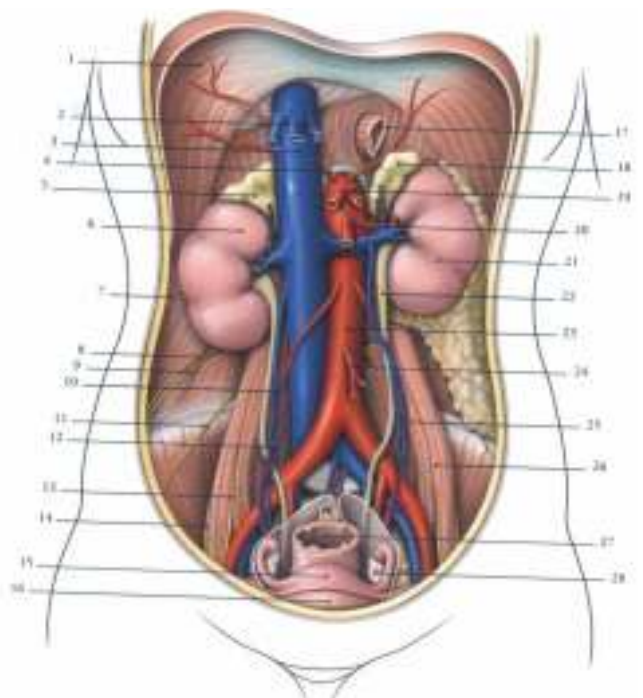
L'aorte abdominale est la partie terminale de l'aorte descendante (aorte thoracique).

Elle est fréquemment atteinte, chez le sujet âgé, par des phénomènes de surcharge athéromateux.

A. TRAJET :

Elle naît au niveau de l'hiatus aortique, en regard du bord inférieur du corps de D12. Elle descend verticalement, à gauche de la ligne médiane jusqu'à L4 ou elle se termine en trois branches : deux branches volumineuses, les artères iliaques communes droite et gauche, et une branche grêle, l'artère sacrée moyenne.

Elle peut être paramédiane droite ou paramédiane gauche.



B. DIMENSIONS :

Elle est cylindrique, avec un calibre de 20 à 30 mm. La longueur est de 15 à 18 cm et l'épaisseur de sa paroi est de 1,5 mm environ.

C. BRANCHES COLLATÉRALES :

L'aorte abdominale donne des branches pariétales, à disposition segmentaire, et des branches viscérales, impaires et médianes ou paires et latérales.

• Branches pariétales :

* **L'artère diaphragmatique ou phrénique inférieure** : paire et symétrique, elle naît de la face ventrale de l'aorte au niveau de son émergence de l'hiatus aortique :

– Trajet : elle se dirige obliquement en haut, en dehors et en avant, contre les piliers du diaphragme pour se terminer à la face inférieure du diaphragme en deux rameaux principaux, médial et latéral.

– Branche collatérale : l'artère surrénale supérieure.

* **Les artères lombaires** : au nombre de 5 artères paires, elles naissent de la face postérieure de l'aorte abdominale pour les quatre premières et de l'artère sacrée moyenne, pour la cinquième

– Trajet : elles se portent latéralement contre le corps des vertèbres lombaires, en arrière du tronc sympathique, puis dans l'intervalle des processus transverses pour se terminer dans la paroi abdominale.

– Branches collatérales : en regard des foramens intervertébraux, chaque artère donne un rameau dorsal pour les muscles et la peau du dos et un rameau spinal, qui pénètre dans le canal rachidien.

• Branches viscérales :

* **Le tronc coeliaque** : il naît de la face antérieure de l'aorte, immédiatement au-dessous des artères diaphragmatiques, à la hauteur de D12-L1.

Après un court trajet (10 à 30 mm) descendant, il se divise de façon très variable en 3 terminales :

– artère coronaire stomacique ou gastrique gauche

– artère splénique

– artère hépatique commune

* **artères capsulaires moyennes ou surrénales moyennes** : elles naissent à la hauteur de L1, abordant le bord interne de chaque glande surrénale.

* **Artère mésentérique supérieure** : de gros calibre à l'origine (8 à 9 mm), à la face antérieure de l'aorte, à la hauteur du disque L1-L2, à 10 au-dessous tronc coeliaque.

* **Artères rénales** : naissent des faces latérales de l'aorte, un peu au-dessous de la mésentérique supérieure, à la hauteur du disque L1-L2 ou de la moitié supérieure de L2.

* **Artères génitales au gonadique** : naissent de la face antérieure de l'aorte, un peu au-dessous des rénales, à la hauteur de L2

– Chez l'homme : L'artère spermatique

– Chez la femme : L'artère ovarique

* **Artère mésentérique inférieure** : naît de la face antérieure de l'aorte un peu à gauche de ligne médiane, à 5 cm au-dessus de la bifurcation aortique, à la hauteur du disque L2-L3 ou du corps de L3.

D. BIFURCATION DE L'AORTE :

Est formée par les deux terminales principales de l'aorte, les artères iliaques

primitives : elle est désignée en chirurgie sous le nom de « carrefour aortique ».

• **Situation** : Plaquée contre la partie basse du rachis lombaire, elle se projette le plus souvent sur le corps de L4 ou sur le disque L4-L5 ; elle est toujours plus haute chez les surjets jeunes (parfois L3). Sur la paroi abdominale, elle correspond approximativement à l'ombilic.

• **Angle d'ouverture** : L'angle sous aortique d'écartement des artères iliaques est de 60 ° à 70 °.

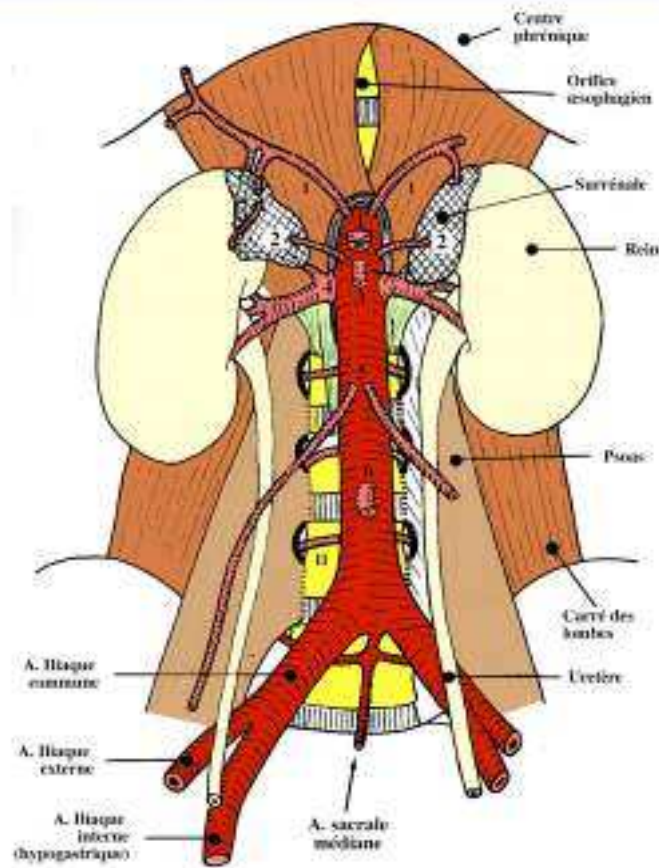
E. BRANCHES TERMINALES :

* **Artères iliaques primitives ou iliaques communes** formant avec l'aorte un Y à l'envers, elles se dirigent en bas, en avant et en dehors, et se divisent en :

– Artère iliaque externe

– Artère iliaque interne

BRANCHES DE L'AORTE ABDOMINALE



I - Artères phréniques inférieures
II - Artères lombales

1 - Tronc cœliaque
2 - A. surrénale moyenne
3 - A. mésentérique supérieure
4 - A. rénale
5 - A. génitale
6 - A. mésentérique inférieure

Schéma 17 : Aorte abdominale

* **Artère sacrée moyenne ou sacrée médiane** : grêle et médiane, continuant la direction de l'aorte, elle naît au sommet de la bifurcation un peu en arrière, puis elle franchit le promontoire et descend sur la ligne médiane jusqu'au coccyx. Dans son trajet, elle donne de chaque côté la 5^{ème} artère lombaire, et quatre rameaux horizontaux qui s'anastomosent avec les artères sacrées latérales.

2. VEINE CAVE INFÉRIEURE :

Est un gros tronc veineux drainant la moitié, infradiaphragmatique du corps, dans l'atrium droit.

Située presque entièrement dans la cavité abdominale, elle traverse le diaphragme et présente un court trajet thoracique.

Satellite de l'aorte abdominale, elle forme le tronc de retour commun des veines sous-diaphragmatiques :

A. ORIGINE par jonction des deux veines iliaques primitives, sur le flanc droit de L5, à 2 cm au-dessous de la bifurcation aortique.

B. TRAJET : ELLE DÉCRIT DEUX PORTIONS :

- **Abdominale** : la plus longue, à droite de la colonne lombaire, d'abord verticale jusqu'à L1, puis légèrement oblique à droite, lorsqu'elle s'enfonce dans la gouttière de la face postérieure du foie,
- **Thoracique** : après la traversée du diaphragme par l'orifice quadrilatère, elle s'infléchit en avant et à gauche, et pénétrant dans le péricarde, se jette dans l'atrium droit, à la hauteur de D9.

C. DIMENSIONS :

- Longueur 22 cm en moyenne, dont 18 cm pour la portion abdominale.
- Calibre augmentant de bas en haut, il passe de 20 à 30 mm, et présente deux renflements : l'un rénal : au-dessus des veines rénales, l'autre sus-hépatique : au-dessus des veines sus-hépatiques

D. VEINES AFFLUENTES :

La veine cave inférieure draine au-dessous du foie, les veines rénales, surrénale droite, testiculaire ou ovarique droite et lombaires. En arrière du foie, les veines hépatiques accessoires.

Au-dessus du foie, les veines sus-hépatiques et diaphragmatiques inférieures.

- **Veines pariétales :**

- *Veines diaphragmatiques inférieures* : recevant les veines surrénales supérieures, elles se jettent dans la veine cave inférieure immédiatement au-dessus des veines sus-hépatiques.
- *Veines lombaires* : généralement au nombre de 5 de chaque côté. Les gauches sont plus longues.

- **Veines viscérales :** Nombreuses et importantes.

- *Veine génitale droite*. La gauche se jetant dans la veine rénale gauche
- *Veines rénales* : courte à droite, longue et préaortique à gauche.
- *Veine surrénale moyenne droite* : courte et volumineuse. La gauche se jetant dans la veine rénale gauche.
- *Veines hépatiques accessoires* : elles drainent le lobe caudé et le lobe droit, et parfois le lobe gauche.
- *Veines sus-hépatiques* : elles sont au nombre de 3 : droite, moyenne et gauche.

E. ANASTOMOSES :

- **Avec le système cave supérieur :**

- Dans la paroi abdominale antérieure (entre veines épigastrique et mammaire internes),
- Avec les azygos : par les racines internes de la grande azygos et de l'hémiazygos inférieure.
- Dans le canal rachidien par les plexus intra et extrarachidiens.

Ces anastomoses expliquent que la ligature ou la thrombose de la veine cave inférieure au-dessous des rénales soit compatible avec la vie :

- **Avec le système porte :**

- Anastomoses rectales : entre les veines hémorroïdales,
- Anastomoses œsophagiennes : entre la veine coronaire stomacique et la veine diaphragmatique inférieure gauche, et les veines œsophagiennes,
- Anastomoses ombilicales : entre les veines pariétales et les veines para-ombilicales (accompagnant le cordon fibreux de la veine ombilicale),
- Anastomoses péritonéo-pariétales : ou veines de Retzius**, développées dans les portions accolées du tube digestif (racine du mésentère et côlon).

Normalement peu fonctionnelles, ces anastomoses se dilatent notablement au cours des obstructions portales, et permettent le retour du sang du tube digestif vers le cœur droit.

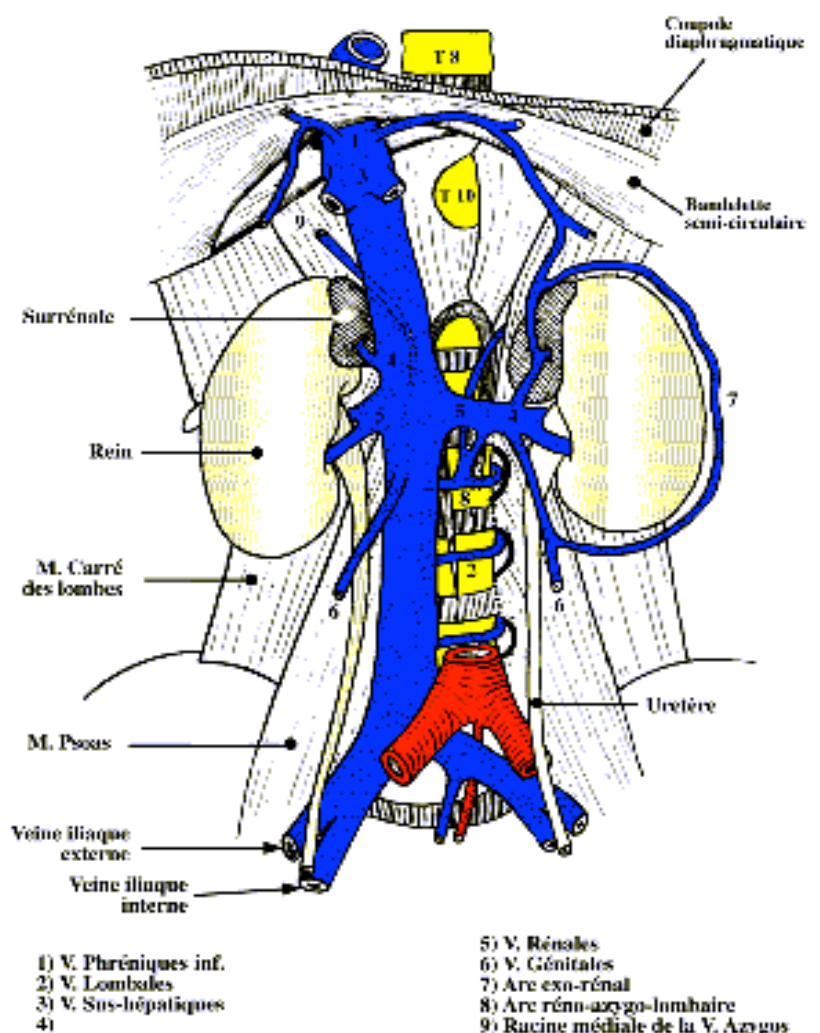


Schéma 18 :
Veine cave inférieure

3. LYMPHOCENTRE DE L'ESPACE RETROPÉRITONÉAL:

Situé le long de l'aorte abdominale, il draine la lymphe des membres inférieurs, du pelvis, et des viscères abdominaux et se collecte dans le canal thoracique-

A. LES GANGLIONS PARA-AORTIQUES

Particulièrement nombreux, ils constituent une lame discontinue de 40 à 50 ganglions disposés le long de l'aorte suivant 4 groupes :

- **Latéroaortique gauche** : le plus simple, formé de 5 à 10 ganglions qui font suite aux ganglions iliaques primitifs, depuis la bifurcation aortique jusqu'à l'orifice diaphragmatique :
- **Latéroaortique droit** : plus complexe, en raison de la présence de la veine cave inférieure, qui permet d'individualiser 4 sous-groupes :

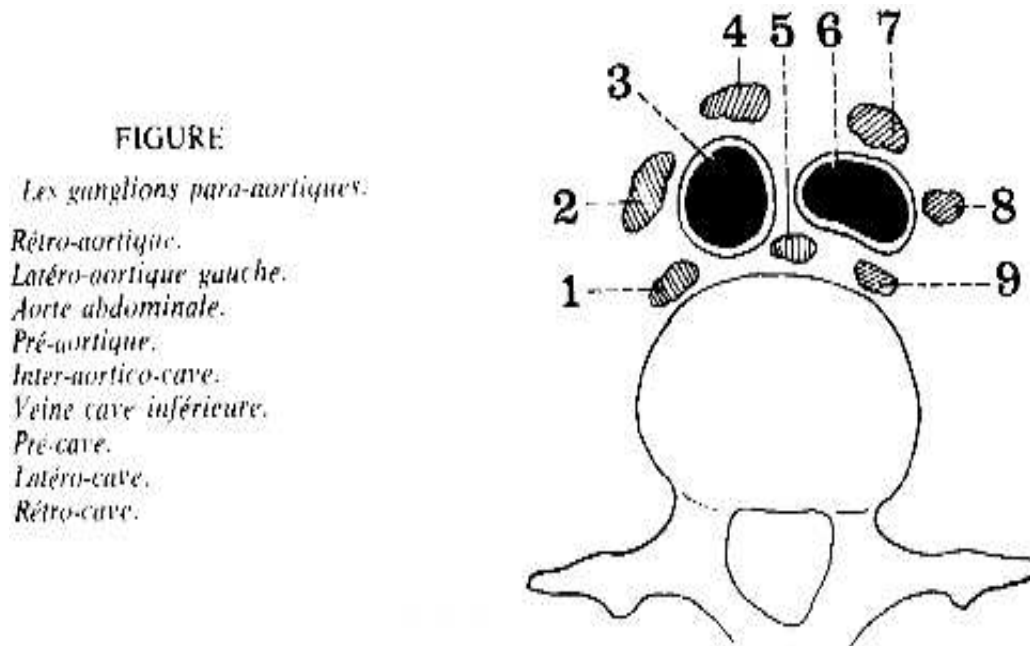


Schéma 19 : Ganglions lymphatiques

- **préaortique** : subdivisé en 3 sous-groupes
 - Mésentérique inférieur 3 ou 4 ganglions
 - Rénal 2 ou 3 ganglions
 - Mésentérique supérieur

Ces ganglions reçoivent la lymphe des ganglions du promontoire, et une partie de celle du territoire mésentérique inférieur (côlon gauche et rectum).

- **rétroaortique** : en liaison directe avec le groupe latéroaortique gauche, il reçoit des collecteurs issus des ganglions iliaques primitifs et du rectum.

Tous ces **ganglions para-aortiques** sont largement anastomosés entre eux, formant des plexus qui entourent les gros vaisseaux prévertébraux.

B. LES TRONCS LYMPHATIQUES LOMBAIRES :

Les chaînes ganglionnaires para-aortiques aboutissent dans deux troncs lombaires principaux :

- Droit qui draine les groupes latéroaortiques droit.
- Gauche, plus développé, qui draine les groupes latéroaortiques gauche et rétroaortique, et reçoit également le tronc intestinal, qui correspond au territoire mésentérique supérieur.

C. LE CANAL THORACIQUE :

Tronc collecteur de tous les lymphatiques, à l'exception de ceux du membre supérieur droit et de la moitié droite de la tête et du cou, il prend naissance dans la partie haute de l'abdomen, et se termine dans la veine sous-clavière gauche.

- * **Origine** : La confluence des 2 troncs lombaires et du tronc intestinal

- En arrière de l'aorte à la hauteur de L1-L2, elle constitue une dilatation ampullaire : la citerne de chyle.
- Ou à la hauteur de D11-D12.

* **Trajet** : D'abord rétroaortique, sa portion sous-diaphragmatique est plus ou moins longue suivant le niveau de son origine, d'un calibre de 5 mm, il s'incline très légèrement à droite pour franchir, avec l'aorte, l'orifice du diaphragme, et pénétrer dans le thorax (médiastin postérieur).

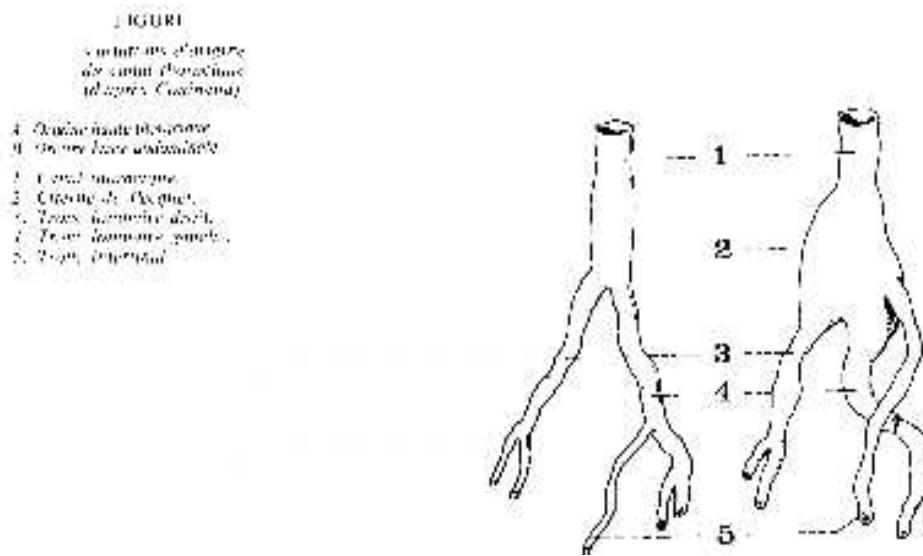


Schéma 20 : Troncs lymphatiques lombaires et canal thoracique

4. SYSTEME NERVEUX VEGETATIF :

Les nerfs végétatifs de l'abdomen assurent l'innervation des viscères de l'abdomen et participent à l'innervation des viscères pelviens. Ils contiennent des neurofibres parasympathiques et sympathiques.

A. SYSTÈME PARASYMPATHIQUE ABDOMINAL :

* **Les neurofibres parasympathiques** proviennent des nerfs vagues et du centre parasympathique spinal.

- Les neuro-fibres du parasympathique vagal empruntent les ganglions cœliaques, aortico-rénaux et mésentériques supérieurs pour se distribuer à l'estomac, au foie, à l'intestin grêle, au rein, au cæcum, aux côlons ascendant et transverse.
- Les neurofibres du parasympathique spinal empruntent les plexus hypogastriques inférieurs pour se distribuer aux viscères pelviens, aux côlons descendant et sigmoïde. Les neuro-fibres parasympathiques destinées aux côlons cheminent ensuite dans les plexus hypogastriques supérieur et mésentérique inférieur.

B. SYSTÈME SYMPATHIQUE ABDOMINAL :

Il est formé des 2 chaînes sympathiques lombaires et des nerfs splanchniques thoraciques.

α. Chaîne sympathique lombaire :

* **Constitution** :

Fait suite à la chaîne sympathique thoracique qui traverse le diaphragme entre pilier moyen et pilier externe. Elle est constituée par 4 ganglions lombaires réunis entre eux par des rameaux interganglionnaires. Elle se continue par la chaîne sympathique sacrale.

* **Rapport** :

Chaque chaîne lombaire est située sur la face latérale des corps vertébraux lombaires, en avant des arcades d'insertion du muscle grand psoas.

* **Rameaux efférents : Nerfs splanchniques lombaires** :

Les trois premiers nerfs splanchniques lombaires droits parviennent à la face antérieure de l'aorte en s'insinuant entre la veine cave inférieure et l'aorte.

- Le premier nerf splanchnique lombaire rejoint les plexus cœliaque, rénal et intermésentérique
- Le deuxième rejoint le plexus intermésentérique ou le ganglion mésentérique inférieur.
- Le troisième passe en avant des vaisseaux iliaques communs pour atteindre le plexus hypogastrique supérieur.
- Le quatrième nerf, passe en arrière des vaisseaux iliaques communs pour rejoindre le plexus hypogastrique supérieur ou le nerf hypogastrique.

* **Connexion** :

Chaque ganglion est relié aux nerfs spinaux lombaires par des rameaux communicants. Au-dessous du 3^{ème} nerf spinal lombaire, il n'existe plus de rameau communicant.

β. Nerfs splanchniques thoraciques :

* *Nerf grand splanchnique thoracique :*

- Ses racines d'origine proviennent des ganglions thoraciques 5 à 9 ou 10.
- Il descend le long du corps des vertèbres thoraciques pour traverser le diaphragme entre pilier interne et pilier moyen. Il présente souvent sur son trajet un ganglion splanchnique.
- Il se termine dans le ganglion coélique et parfois dans les ganglions aortico-rénal et diaphragmatique.

* *Nerf petit splanchnique thoracique :*

- Ses racines d'origine naissent des 9-10^{ème} ganglions thoraciques, parfois des 10^{ème} et 11^{ème} ganglions
- Il traverse le diaphragme entre pilier moyen et pilier externe et se distribue aux ganglions semi-lunaire, mésentérique supérieur et aortico-rénal.

* *Nerf splanchnique imus (nerf splanchnique inférieur)*

- Il naît du 11^{ème} - 12^{ème} ganglions thoraciques
- Il traverse le diaphragme entre pilier moyen et pilier externe
- Il se termine dans le ganglion aortico-rénal

C. PLEXUS DE L'AORTE ABDOMINALE :

Situé au contact de l'aorte abdominale, il assure l'innervation des viscères abdominaux et comprend : le plexus coélique, les ganglions mésentériques inférieurs et le plexus intermésentérique.

α. Plexus coélique : plexus solaire :

* *Constitution :* il est formé d'un ensemble des trois paires de ganglions unis entre eux par un réseau de nerfs :

- Les ganglions semi-lunaires situés de chaque côté de l'origine du tronc coélique. Ils sont fusiformes et de coloration gris rougeâtre. Ils mesurent environ chacun 20 mm de longueur, 10 mm de largeur et 3 mm d'épaisseur.
- Les ganglions mésentériques supérieurs situés contre l'origine de l'artère mésentérique supérieure
- Les ganglions aortico-rénaux situés contre l'origine de l'artère rénale.

* *Rapport :* situé dans l'espace rétropéritonéal : contre l'aorte, le plexus répond.

- En arrière, aux piliers du diaphragme, et à la citerne du chyle
- En avant, dans sa partie supérieure, au péritoine postérieur de l'arrière-cavité des épiploons, et dans sa partie inférieure, au corps du pancréas.

* *Branches afférentes :* elles comprennent.

- Le nerf vague droit, qui donne une branche à chaque ganglion coélique.
- Les nerfs grand splanchnique, petit splanchnique et splanchnique inférieur
- Le nerf phrénique droit qui peut donner des rameaux au ganglion coélique droit.

* *Branches efférentes :*

Elles contiennent des neurofibres parasympathiques et sympathiques. Elles constituent les plexus périartériels phréniques gastrique, hépatique, splénique, mésentérique supérieur, pancréatique, rénal, surrénal, testiculaire ou ovarique.

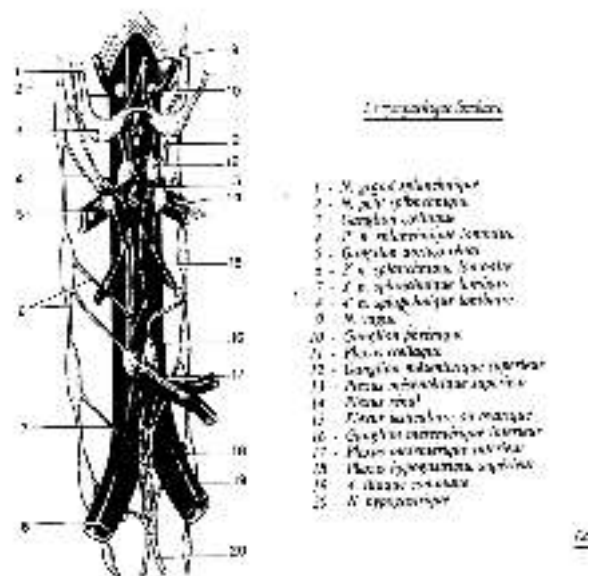
β. Ganglions mésentériques inférieurs :

Au nombre de 2, ils sont situés à l'origine de l'artère mésentérique inférieure. Leurs branches afférentes proviennent du plexus intermésentérique, et du deuxième nerf splanchnique lombaire.

- Leurs branches efférentes participent à la formation du plexus hypogastrique supérieur et du plexus mésentérique inférieur destiné au côlon descendant, au côlon sigmoïde et au rectum.
- Leurs neuro-fibres parasympathiques proviennent du centre parasympathique sacral.

γ. Plexus intermésentérique :

Il unit le plexus coélique et les ganglions mésentériques inférieurs. Il donne des rameaux au plexus testiculaire ou ovarique.



LA LOGE LATERO-VISCERALE

Entre la paroi pelvienne latérale et les viscères descend, dans la partie la plus large ou espace latéroréctal, l'artère iliaque interne, accompagnée de sa veine et de ses lymphatiques, et longée :

- En avant : par l'uretère pelvien,
- En arrière : par l'éventail nerveux des plexus sacré et honteux.

A. LES VAISSEAUX ILIAQUES INTERNES :

1. ARTERE ILIAQUE INTERNE OU HYPOGASTRIQUE :

Branche de bifurcation interne de l'iliaque primitive, elle possède de nombreuses branches pariétales et viscérales qui assurent l'irrigation des parois et des viscères du petit bassin.

A. ORIGINE un peu au-dessus de l'aileron sacré, en dedans de la sacro-iliaque, un peu plus haute chez la femme que chez l'homme.

B. TRAJET dessinant une large courbe à convexité antéro-interne, elle présente deux portions :

- **Haute ou supra-pelvienne** : oblique en bas, en avant et en dehors, où l'artère est accolée à l'iliaque externe, de son origine au détroit supérieur;
- **Basse ou pelvienne** : très courte, en bas et en arrière dans le pelvis.

C. TERMINAISON : au niveau du bord supérieur de la grande échancrure sciatique, en donnant :

- Soit un bouquet de terminales,
- Soit le plus souvent deux troncs, postérieur et antérieur, donnant chacun un certain nombre de branches pariétales et viscérales.

D. DIMENSIONS : **Longueur** = variable selon le niveau d'origine et le mode de terminaison; en moyenne = 4 à 5 cm, mais peut atteindre 7 cm.

Calibre = 8 à 9 mm à l'origine.

E. BRANCHES : de façon schématique, l'artère iliaque interne se divise en deux troncs :

LE TRONC POSTÉRIEUR : ne donnant que des branches pariétales :

- **Artère ilio-lombaire** se divisant sous le psoas en deux branches ascendante ou lombaire et transversale ou iliaque.
- **artères sacrées latérales**
 - L'une supérieure : pénétrant dans le 1^{er} trou sacré antérieur,
 - L'autre inférieure : plus volumineuse, pénétrant dans les 2^{ème}, 3^{ème} et 4^{ème} trous sacrés antérieurs.
- **Artère fessière ou fessière supérieure** sortant du bassin par le canal sus-pyramidal, et donnant deux branches :

LE TRONC ANTÉRIEUR : donnant des branches pariétales et viscérales :

- **Artère obturatrice** : sortant du petit bassin par le canal sous-pubien, et donnant deux branches : antérieure ou interne postérieure ou externe
- **Artère ombilicale**
- **Artère génito-vésicale**
- **Artère hémorroïdale moyenne ou rectale moyenne**
- **Artère ischiatique ou fessière inférieure** quittant le bassin par le canal sous-pyramidal,
- **Artère pudendale interne** destinée au périnée et aux organes génitaux externes.

2. LA VEINE ILIAQUE INTERNE :

Homologue de son artère, elle a le même territoire, mais sa disposition est très variable; trois types peuvent être décrits :

A. TYPE UNIQUE : le plus classique, sous forme d'un gros tronc veineux long de 5 cm, d'un calibre de 12 mm.

Franchement postérieure à son artère, à droite, et postéro-interne à gauche elle rejoint la veine iliaque externe en avant de la sacro-iliaque, mais le confluent veineux est plus bas situé que le confluent artériel, et apparaît au-dessous de la fourche des artères iliaques.

B. TYPE DOUBLE : dans 50 % des cas, avec deux veines :

- L'une postérieure : volumineuse,
- L'autre antérieure : plus grêle recevant les veines ombilicale et obturatrice.

C. TYPE PLEXIFORME : Plus rare, avec deux ou trois anastomoses qui unissent les deux troncs veineux.

D. COLLATÉRALES :

Les branches afférentes collectent le sang des parois du pelvis, de la région fessière, des viscères pelviens et du périnée; elles peuvent être classées en deux groupes; le plus souvent deux veines accompagnent chaque artère :

1. Veines pariétales :

Veines fessières, veines ischiatiques, veines obturatrices, veine ilio-lombaire, veines sacrées latérales.

2. Veines viscérales :

Veine honteuse interne, veines vésicales inférieures, veines hémorroïdales moyennes, veines utérines, veines vaginales.

B. GANGLIONS ILIAQUES INTERNES :

Huit à dix ganglions lymphatiques s'étagent le long de l'artère iliaque interne, siégeant dans les angles formés par les diverses branches artérielles.

A. GROUPE ANTÉRIEUR : entre l'ombilicale et l'obturatrice.

B. GROUPE MOYEN

- Ganglion de l'utérine (ou de Cunnéo),
- Ganglion de l'ischiatique et de la honteuse interne,
- Ganglion de l'hémorroïdale moyenne.

C. GROUPE POSTÉRIEUR :

- Ganglion de la fessière,
- Ganglions de la sacrée latérale inférieure.

D. VOIES AFFÉRENTES :

- des viscères pelviens,
- De la face postérieure de la cuisse, de la région fessière

E. VOIES EFFÉRENTES

- En partie vers les ganglions iliaques externes,
- Surtout vers les ganglions iliaques primitifs.

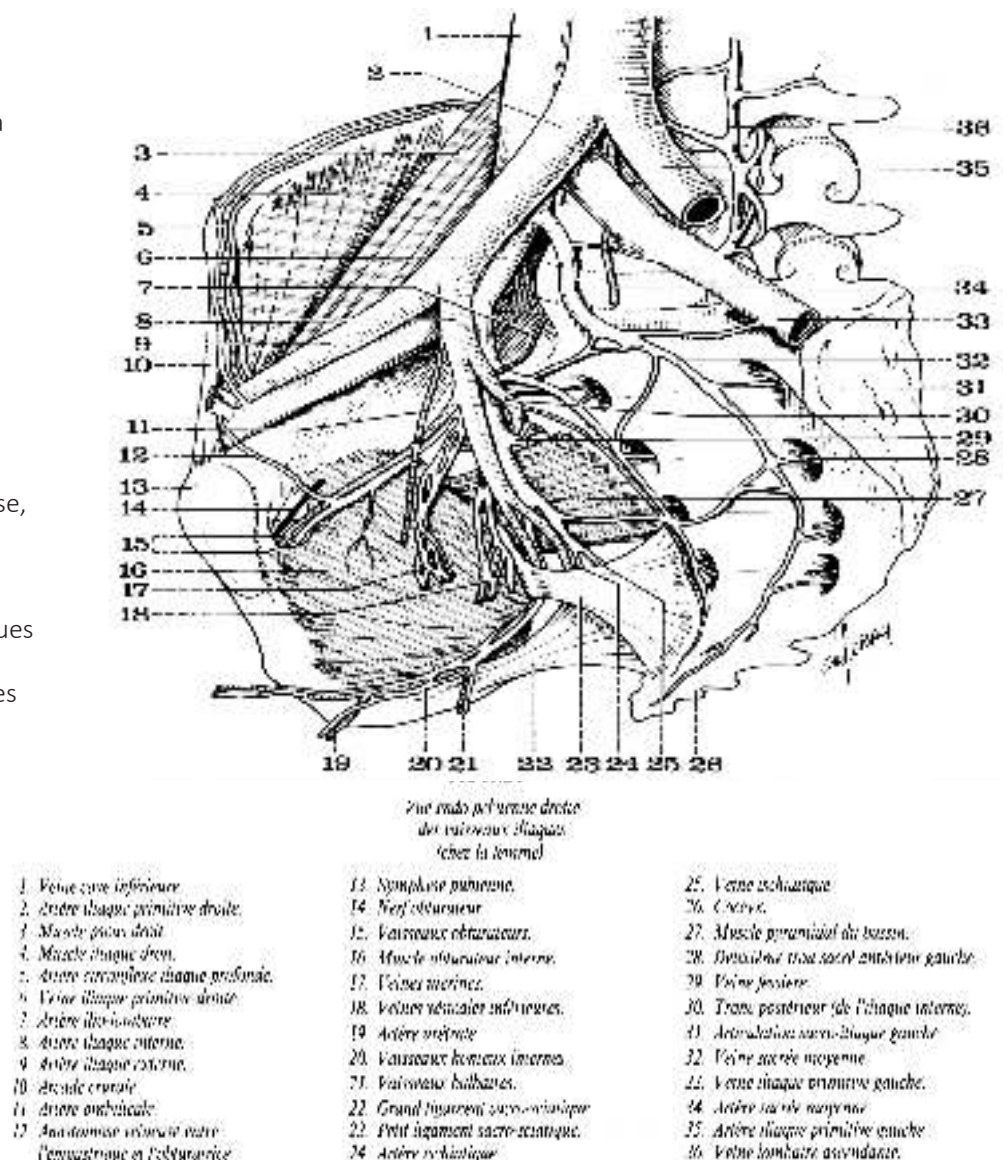


Schéma 27 : Artère et veine iliaque interne

LA LOGE RETRO-RECTALE

La loge rétrorectale est limitée par :

- **En arrière** : la face antérieure du sacro-coccyx, dans l'espace compris entre les deux rangées droite et gauche des trous sacrés antérieurs;
- **En avant** : la face postérieure de l'ampoule rectale;
- **Latéralement** : la partie postérieure de l'aponévrose sacro-recto-génito-vésico-pubienne;
- **En bas** : les adhérences du rectum aux deux muscles releveurs de l'anus.
- **En haut**, la loge rétrorectale n'est pas fermée, communiquant largement avec la région rétropéritonéale médiane de l'abdomen, par laquelle arrivent les pédicules vasculaires et le système nerveux sympathique.

A. LES PÉDICULES VASCULAIRES

1. L'ARTÈRE SACRÉE MOYENNE OU MÉDIANE

Branche de trifurcation médiane de l'aorte abdominale, elle représente un véritable reliquat embryonnaire, prolongeant l'aorte vers l'extrémité caudale de l'organisme.

- **ORIGINE** : de la face postérieure de l'aorte, devant L4.
- **TRAJET** : derrière la veine iliaque primitive gauche, puis devant le promontoire, et, sur la ligne médiane, dans l'excavation sacrée,
- **TERMINAISON** : au-dessous de la pointe du coccyx, dans la glande coccygienne (de Luschka) ou glomus coccygien.
- **COLLATÉRALES** de chaque côté
 - La 5^{ème} artère lombaire, qui passe derrière les vaisseaux iliaques primifs
 - Quatre rameaux transversaux : anastomosés avec les artères sacrées latérales.

2. LA VEINE SACRÉE MOYENNE :

Satellite de l'artère, elle est double devant le sacrum, de chaque côté de l'artère, puis unique au niveau du promontoire, se jetant le plus souvent dans la veine iliaque primitive gauche.

3. LES ARTERES SACREES LATÉRALES nées de l'artère iliaque interne

- supérieure : pénétrant dans le 1^{er} foramen sacral antérieur.
- inférieure plus volumineuse, croisant le plexus sacré, et pénétrant dans les 2^{ème}, 3^{ème}, et 4^{ème}, trous sacrés antérieurs.

4. LES VEINES SACREES LATÉRALES homologues des artères, mais souvent plexiformes, elles montent en dehors des trous sacres antérieurs, et se jettent dans la veine iliaque interne.

B. LE SYSTÈME NERVEUX SYMPATHIQUE :

Sur la face antérieure du sacrum descendent deux formations sympathiques destinées à l'innervation des viscères pelviens :

- Latéralement : les deux chaînes sympathiques sacrées, qui continuent les chaînes sympathiques lombaires,
- Au milieu : le réseau plus complexe du plexus présacré.

1. LA CHAÎNE SYMPATHIQUE SACRÉE :

A. CONSTITUTION :

Plaquée sur la face antérieure du sacrum, un peu en dedans des trous sacrés antérieurs, elle comprend de chaque côté :

- Un cordon connecteur, souvent divisé en petits filets,
- Trois à quatre ganglions allongés, d'autant plus petits que l'on se rapproche du coccyx, en haut : le 1^{er} ganglion sacré est fréquemment fusionné avec le 5^{ème} ganglion lombaire, en bas : Les deux chaînes se réunissent soit au niveau d'un ganglion commun, qui équivaut à la fusion des 5^{ème} ganglions sacrés, le ganglion de Walter d'où partent des filets pour le glomus coccygien qui lui est sous-jacent;

B. BRANCHES EFFÉRENTES :

Rameaux communicants : 2 à 3 par nerf sacré, formés uniquement de fibres post-ganglionnaires, amyéliniques, et divisés en deux sortes de rameaux :

- Extraorificiels : abordant le nerf sacré en dehors du foramen sacral antérieur.
- Intraorificiels : pénétrant dans le foramen sacral pour atteindre le nerf correspondant,
- Rameaux viscéraux : nés des 2^{ème} et 3^{ème} ganglions sacrés, et destinés au plexus présacré,
- Rameaux osseux : pour le sacrum et le coccyx,
- Rameaux musculaires : pour le pyramidal du bassin et le releveur de l'anus,
- Rameaux vasculaires : pour l'artère sacrée moyenne.

2. LE PLEXUS PRE-SACRE OU NERF PRE-SACRE :

Correspondant au « plexus hypogastrique supérieur » d'Hovelacque, il concentre les fibres afférentes du « splanchnique pelvien » :

A. ORIGINE :

- Deux racines latérales : formées par des rameaux préaortiques venus des ganglions sympathiques lombaires,
- Une racine médiane : issue des nerfs intermésentériques, qui descendent au-delà de la bifurcation aortique.

B. TRAJET : Ces fibres nerveuses se réunissent sur la ligne médiane, franchissent la veine iliaque primitive gauche, et chevauchent la saillie du promontoire; elles se présentent de deux façons :

- Soit sous forme d'un véritable « plexus présacré », formé de faisceaux unis par des anastomoses courtes = 80 % des cas,
- Soit sous forme d'un cordon plat et irrégulier, le « nerf présacré » = 20 % des cas.

C. TERMINAISON : Après 4 à 6 cm de trajet, le plexus présacré se divise en deux branches, droite et gauche, comme un Y renversé;

Chacune de ces branches forme le nerf hypogastrique qui glisse entre le sacrum et la lame présacrée, puis se porte obliquement en bas et en avant sous le péritoine latéral du rectum, dans la portion interne de l'aponévrose sacro-recto-géni-to-pubienne de Delbet.

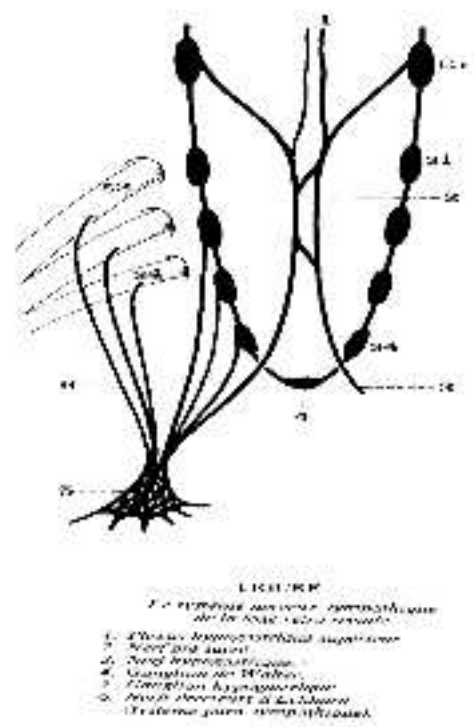
Long en moyenne de 8 à 10 cm, le nerf hypogastrique se dissocie en plusieurs branches anastomosées, et vient se jeter dans la corne postéro-supérieure du **ganglion hypogastrique ou pelvien** : celui-ci plaqué sur les faces latérales du rectum, assure l'innervation viscérale des organes du pelvis.

D. BRANCHES EFFÉRENTES :

- **du plexus présacré :**
 - Rameaux pour le côlon sigmoïde,
 - Rameaux vasculaires : pour les iliaques primitives et l'artère sacrée moyenne,
- **du nerf hypogastrique**
 - Rameau urétéral : pour la portion pariétale de l'uretère pelvien,
- **du ganglion hypogastrique**
 - nerfs du rectum,
 - nerfs de la vessie et de la portion terminale de l'uretère
 - nerfs de la prostate,
 - nerfs des vésicules séminales
 - nerfs des canaux déférents
 - nerfs de l'utérus
 - nerfs du vagin

E. ANASTOMOSES : de chaque côté

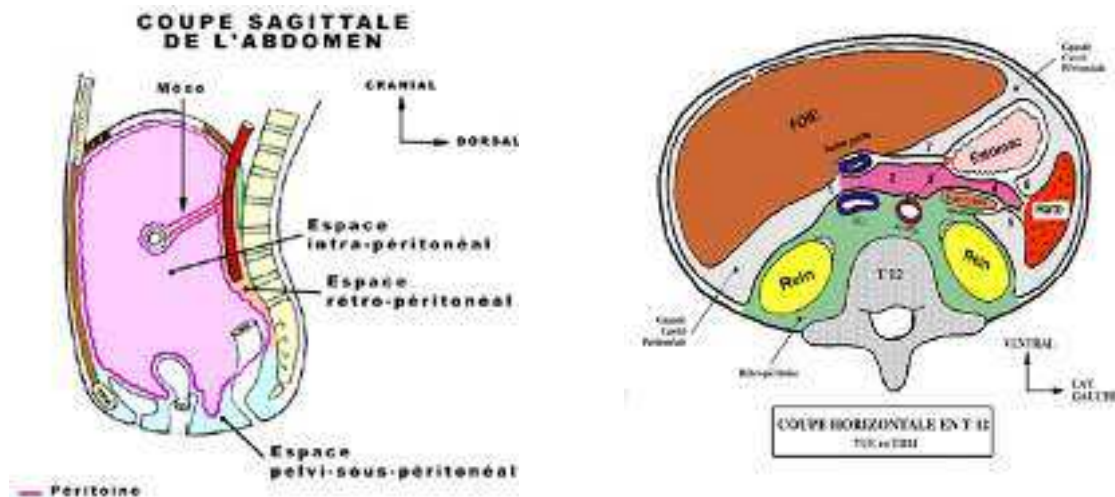
- **Avec le sympathique lombaire :** par un rameau qui part du 5^{ème} ganglion, chevauche le promontoire, et rejoint la partie postérieure du plexus présacré
- **Avec le sympathique sacré :** par 3 sortes de rameaux
 - supérieurs : du 2^{ème} ganglion à la partie haute du nerf,
 - moyen : du 3^{ème} ganglion à la partie basse du nerf.
 - inférieur : du 4^{ème} ganglion sacré au ganglion hypogastrique.
- **Avec le plexus honteux = nerfs érecteurs d'Eckhard*** relativement volumineux, ils naissent des racines S2, S3 et S4, à proximité de l'émergence des trous sacrés antérieurs, se dirigent sagittalement, fauflés par les branches des vaisseaux hémorroïdaux moyens, et abordent la corne postéro-inférieure du ganglion hypogastrique; ils appartiennent au système parasympathique.



LA REGION RETRO-PERITONEALE LATERALE

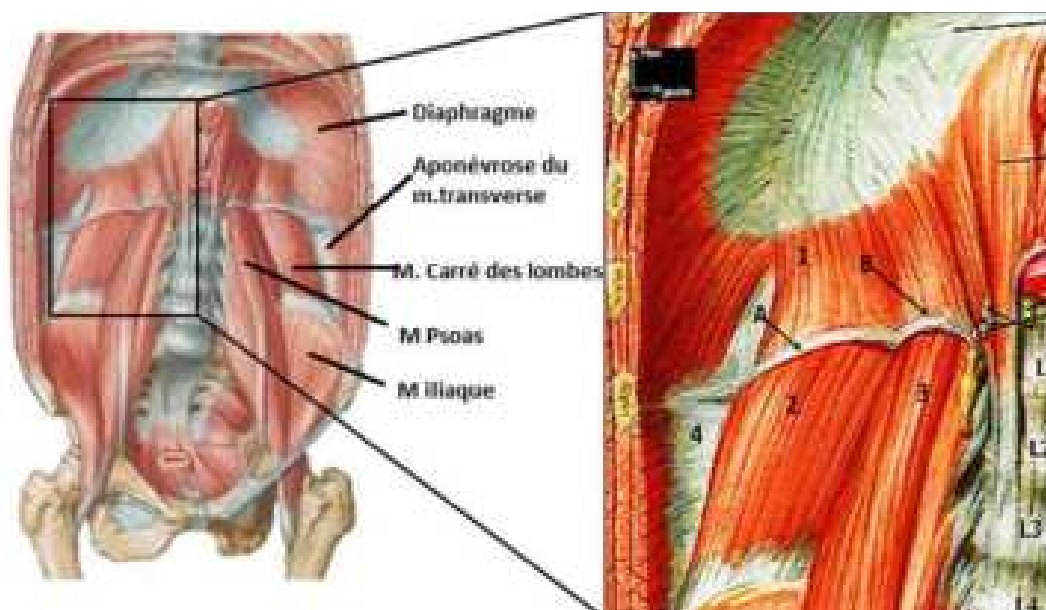
1. SITUATION :

La région rétro péritonéale latérale est située en dehors de la région pré vertébrale des gros vaisseaux, entre le péritoine pariétal postérieur et la cavité péritonéale en avant et les muscles de la paroi lombaire en arrière, au-dessus de la région pelvi-sous-péritonéale qu'elle surplombe, au-dessous du diaphragme et la paroi postérieure du thorax.



2. LIMITES :

- **EN AVANT :** Le péritoine pariétal postérieur et la cavité péritonéale avec la masse des viscères intrapéritonéaux.
- **EN ARRIÈRE :** par la face antérieure verticale du diaphragme et celle des plans musculo-aponévrotiques de la paroi dorsale représentés par :
 - tous en dedans le muscle psoas revêtu du fascia iliaca qui s'épaissit en haut pour former l'arcade du psoas ou ligament arqué médial. Il s'attache sur les vertèbres de T12 à L4 (se réunit avec le muscle iliaque pour former l'ilio-psoas).
 - plus en dehors le muscle carré des lombes tapissé par son aponévrose qui s'épaissit en haut pour former l'arcade du carré des lombes ou ligament arqué latéral. Il s'attache entre le ligament arqué latéral et la crête iliaque.
 - en dehors et en arrière l'aponévrose postérieure du muscle transverse qui s'attache sur le sommet des processus transverses.
 - en bas et en dehors le muscle iliaque tapissant la fosse iliaque interne et revêtu du fascia iliaca.



La paroi postérieure de la région rétro péritonéale latérale : 1 : diaphragme, 2 : muscle carré des lombes, A : l'arcade du carré des lombes ou ligament arqué latéral, 3 : muscle psoas, B : l'arcade du psoas ou ligament arqué médial, 4 : l'aponévrose postérieure du muscle transverse

- **EN DEDANS :** La limite est arbitraire, représentée par le bord interne du muscle psoas qui correspond au plan sagittal passant par le sommet des processus transverses.
- **EN DEHORS:** La limite correspond schématiquement à une verticale passant par l'extrémité de la douzième côte qui correspond en fait sensiblement au bord interne du muscle oblique interne.

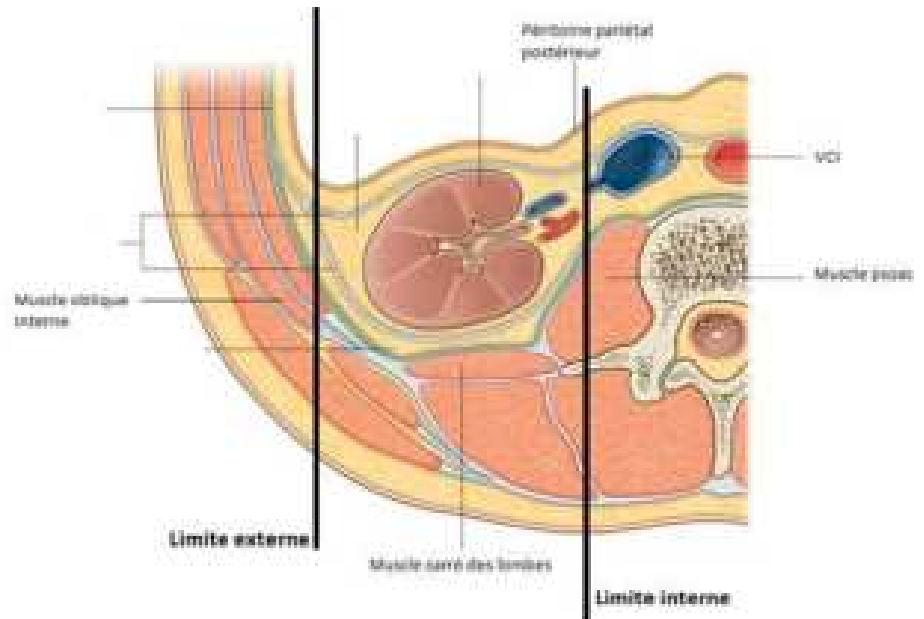
• EN HAUT :

La limite supérieure de la région rétro péritonéale latérale correspond à la ligne horizontale passant par D11. Cette région est délimitée en haut par la face inférieure du diaphragme.

• EN BAS :

- En dedans : le détroit supérieur qui correspond à l'articulation lombo-sacrée, que repère la saillie du promontoire.

- En dehors : l'angle dièdre formé par le muscle psoas-iliaque, la paroi abdominale antérieure et le ligament inguinal, angle dièdre qui constitue l'espace de Bogros.



Les limites interne et externe de la région rétro péritonéale latérale

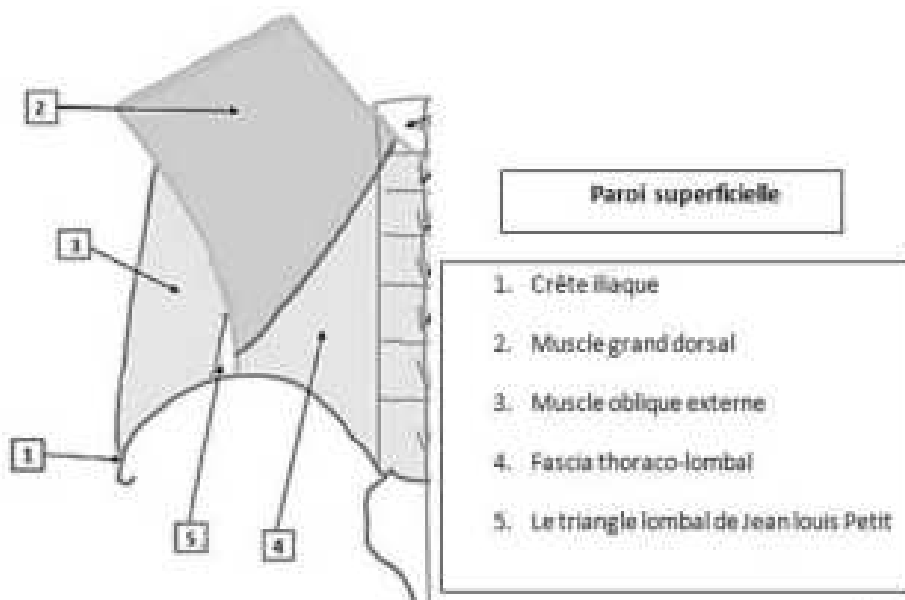
3. LES MUSCLES DE LA PAROI POSTERIEURE DE LA REGION RETRO PERITONEALE LATERALE :

Les éléments musculaires limitent en arrière la région rétro-péritonéale avec plusieurs plans musculaires :

A. UN PLAN SUPERFICIEL (LE PLUS POSTÉRIEUR) : le plan des muscles **grand dorsal** et **grand oblique**

- **Le muscle grand dorsal :** il se termine sur le processus épineux des vertèbres, il ne s'insère pas directement sur la crête iliaque mais s'y insère par l'intermédiaire du fascia thoraco-lombal.
- **Le muscle oblique externe de l'abdomen :** c'est le muscle le plus superficiel des muscles latéraux de l'abdomen.
- **Le triangle lombal de Jean Louis Petit:** Il se situe entre le muscle oblique externe, le grand dorsal (fascia thoraco-lombal) et la crête iliaque.

C'est une zone de faiblesse de la paroi musculaire où, en théorie, chez les patients très obèses ou ayant une hyperpression intra-abdominale élevée il pourrait y avoir des hernies car les couches musculaire se superposent.

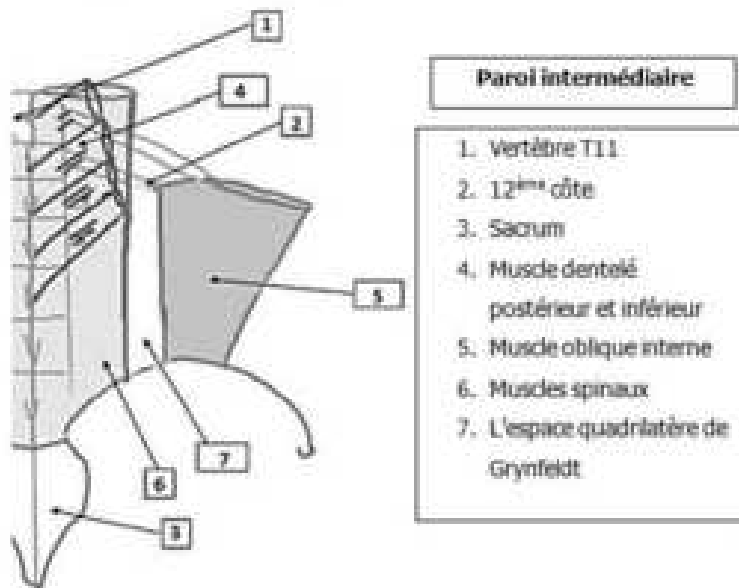


B. UN DEUXIÈME PLAN : le plan des muscles **petit oblique** et le **dentelé postérieur et inférieur**.

- **Le muscle oblique interne ou petit oblique :** c'est un muscle de la paroi abdominale latérale situé sous le grand oblique.
- **Le muscle dentelé postérieur et inférieur :** Il est formé de petites bandelettes. Cette couche musculaire s'attache sur les 2 dernières vertèbres thoraciques et les 3 premières vertèbres lombaires (T11, T12, L1, L2, L3).

C. UN TROISIÈME PLAN : muscles spinaux et l'aponévrose postérieure du muscle transverse.

- **Les muscles spinaux :** ce sont les muscles érecteurs du rachis en ancienne nomenclature. Ils se trouvent sur toute la longueur de la colonne vertébrale.
- **Le muscle transverse :** c'est le muscle le plus profond de la paroi abdominale latérale. Il présente une aponévrose postérieure occupant l'espace entre la dernière côte et la crête iliaque.
- **Espace quadrilatère de Grynfeldt :** zone de faiblesse (recouverte par l'aponévrose postérieure du muscle transverse) limitée en haut par le bord inférieur de la dernière côte, en bas par la crête iliaque, latéralement par le muscle oblique interne et en dedans par les muscles spinaux.



D. UN PLAN PROFOND (le plus antérieur) : le plan des muscles **psos** et **carré des lombes**.

4. CONTENU DE LA REGION RETROPERITONEALE LATÉRALE :

Dans la région rétro-péritonéale latérale on trouve :

- Les nerfs du plexus lombaire
- La graisse para rénale
- La loge rénale
- Les uretères
- Le pédicule spermatique ou ovarien.

A. LE PLEXUS LOMBAIRE : il est issu des racines L1 à L4

- La racine **L1** donne deux nerfs : **N. ilio-hypogastrique** et **N. ilio-inguinal**
- La racine **L2** donne deux nerfs : **N. cutané latéral de la cuisse** et **N. génito-fémoral**.
- Des racines **L2**, **L3** et **L4** vont naître les nerfs **fémoral** (passe en avant dans la région inguinale) et **obturateur** qui lui est en postérieur, il passe en arrière du M. Psoas rentre dans le petit bassin, puis passe par le foramen obturé.

Le nerf cutané latéral de la cuisse va jusqu'au sommet de l'épine iliaque antéro-supérieure qui est un repère chirurgical lors de la greffe iliaque. Lorsqu'on a besoin d'os pour une chirurgie de colonne vertébrale on prend un morceau de crête iliaque, si on le prend trop loin en avant, il y a un risque de blesser ce nerf donnant une perte de la sensibilité de la face latérale de la cuisse.

Plexus lombaire

Nerf ilio-hypogastrique

Nerf ilio-inguinal

Nerf génito-fémoral

Nerf cutané latéral de la cuisse

Nerf crural (fémoral)

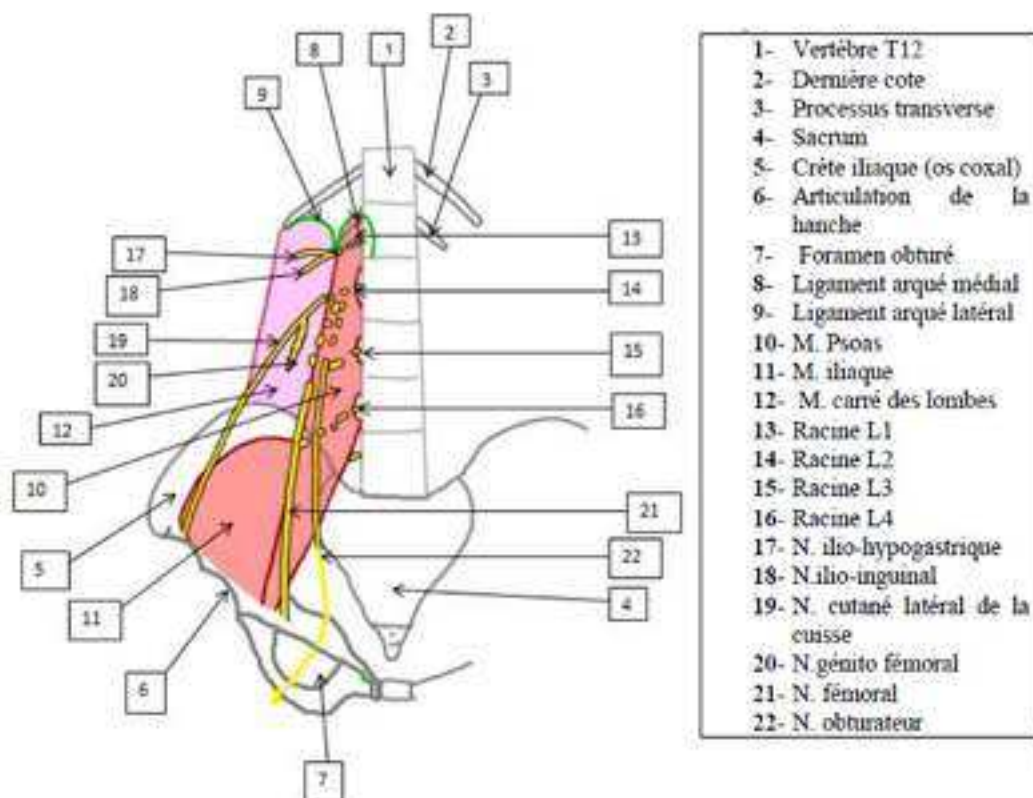
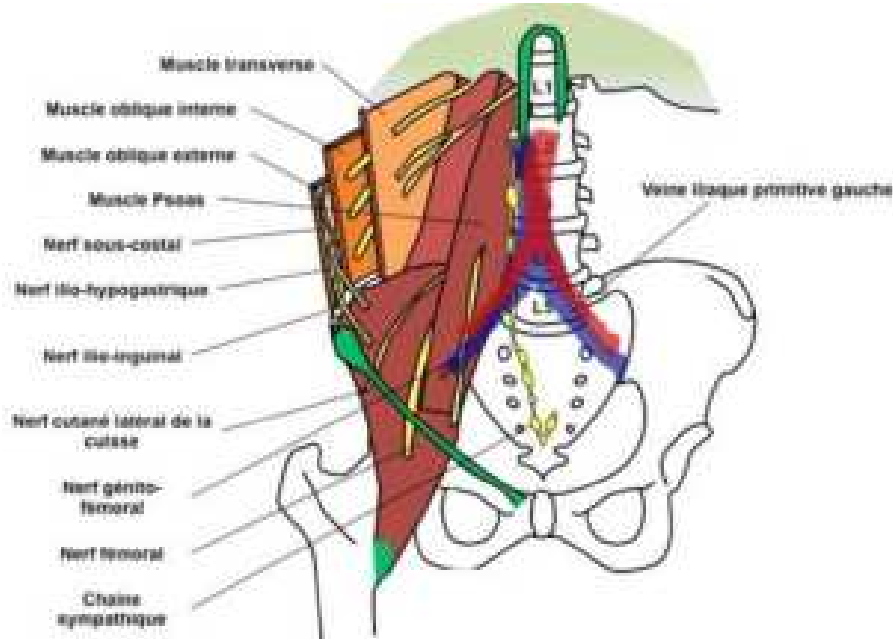
Nerf obturateur

L1

L2

L3

L4



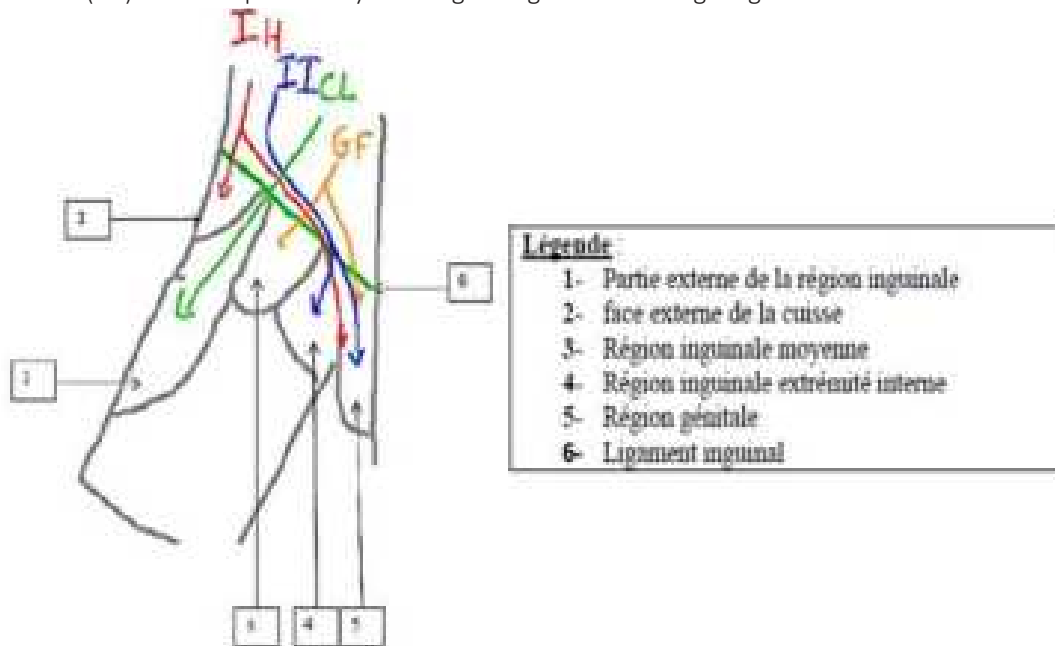
Les nerfs ilio-hypogastrique, ilio-inguinal et génito-fémoral sont des nerfs sensitifs destinés à la région inguinale et à la région génitale.

Le **N. ilio-hypogastrique** (IH) innerve : la partie externe de la région inguinale et la région génitale

Le **N. ilio-inguinal** (II) innerve: la région inguinale et la région génitale

Le **N. Cutané latéral cuisse** (CL) innerve: la face externe de la cuisse (*aucune participation dans la région inguino-génitale*)

Le **N. Génito-fémoral** (GF) innerve : partie moyenne région inguinale et la région génitale



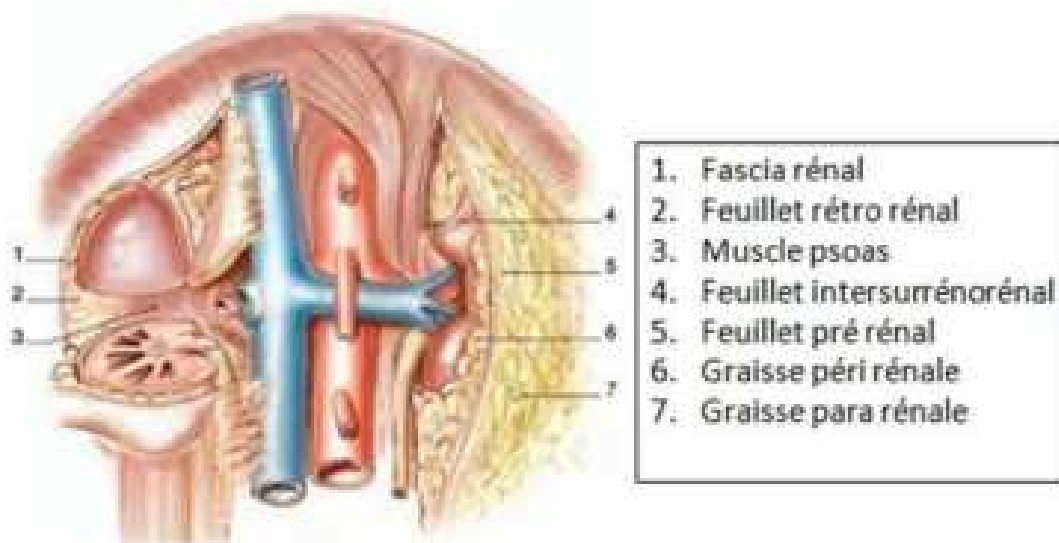
B. LA LOGE RÉNALE :

La loge rénale est une loge cellulo-adipeuse située dans la fosse lombaire, dépression de la paroi lombaire latérale située:

- En avant de la paroi abdominale dorsale.
- En dehors de la saillie du rachis lombaire et du psoas.
- En hauteur, elle s'étend depuis la 11ème côte jusqu'à la crête iliaque et occupe donc toute la partie supérieure de l'espace retro-péritonéal latéral.

La loge rénale est délimitée par le fascia rénal qui se compose de deux feuillets:

- Le feuillet pré-rénal (ou fascia de Gerota) relativement mince et adhère au péritoine pariétal postérieur.
- Le feuillet rétro-rénal (dit de Zuckermandl) qui est relativement dense et résistant.



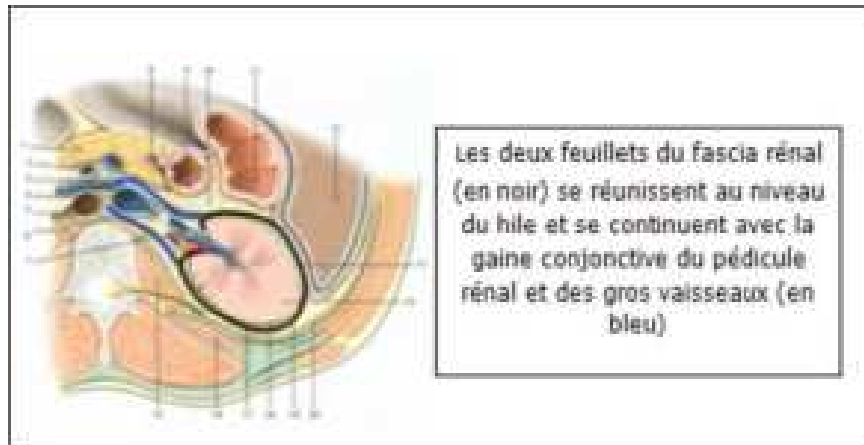
- En haut les deux feuillets se rejoignent et englobent la glande surrénale, en contractant de solides adhérences avec l'aponeurose du diaphragme. La surrénale est séparée du reste de la loge rénale par une fine cloison intersurrénalo-rénale, ce qui permet de faire une néphrectomie en préservant la glande surrénale.

- En bas, les deux feuillets se fusionnent, constituant un cône à pointe inférieure comme le confirment les épanchements (urinome, hématome, abcès) dans la loge rénale.

- Latéralement, les deux feuillets fusionnent en arrière de la convexité du rein.

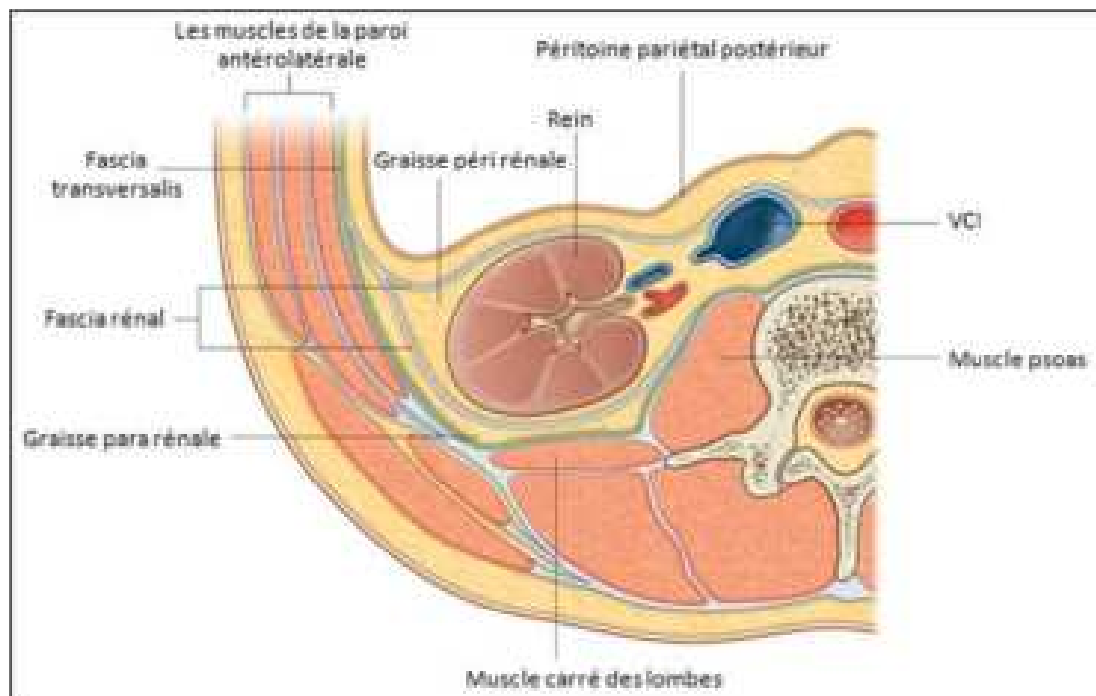
- Médialement, les deux feuillets se réunissent au niveau du hile et se continuent avec la gaine conjonctive du pédicule rénal et des gros vaisseaux.

Donc, les deux loges rénales ne communiquent pas ce qui permet de contenir les phénomènes infectieux, inflammatoires, hématiques ou tumoraux dans une loge et éviter l'extension vers la loge controlatérale.



Le rein est entouré à l'intérieur de la loge rénale par la graisse périrénale est une graisse jaune pâle, à la différence de la graisse pararénale plus compacte, située en dehors de la loge rénale. Elle s'infiltre entre les éléments du pédicule rénal, dans le sinus rénal et autour de la voie excrétrice supérieure.

La graisse pararénale, proportionnelle à l'adiposité de l'individu, elle tend à combler les espaces laissés libres entre la loge rénale et la paroi musculaire postérieure.



Dans la loge rénale on trouve :

- Le rein et son pédicule
- La graisse périrénale
- La glande surrénale
- L'uretère lombaire

C. ANATOMIE DU REIN :

1. Anatomie descriptive :

1.1. Forme :

Le rein a la forme d'un haricot, il présente donc :

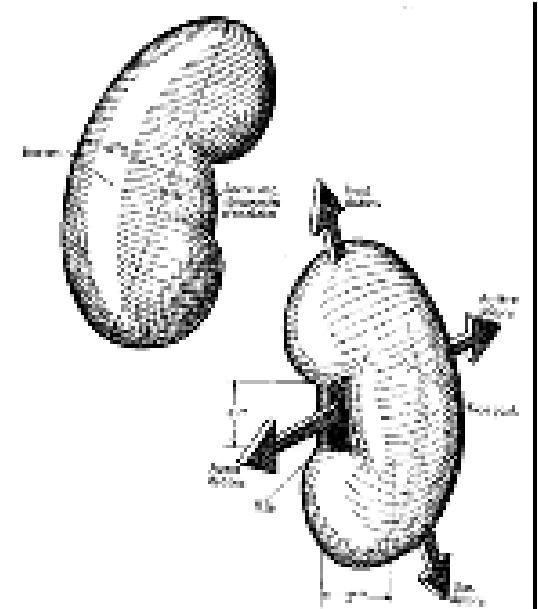
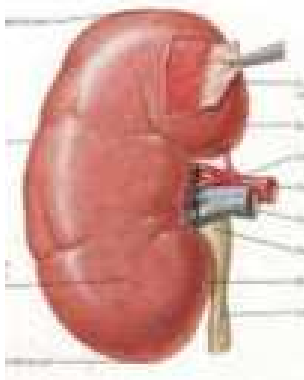
- Deux faces, ventrale et dorsale. Sa face antérieure est discrètement convexe tandis que la face postérieure est plane.
- Deux bords, un bord externe convexe et un bord interne échancré à sa partie moyenne par le hile où cheminent les vaisseaux rénaux et le bassinnet qui se poursuit vers le bas par l'uretère.
- Deux extrémités ou pôles, supérieur (ou crânial) et inférieur (ou caudal).

1.2. Dimension :

Ses dimensions chez l'adulte sont : 12cm en hauteur, 6cm en largeur, 3cm en épaisseur, avec un poids moyen de 150 gr chez l'homme et de 130 gr chez la femme.

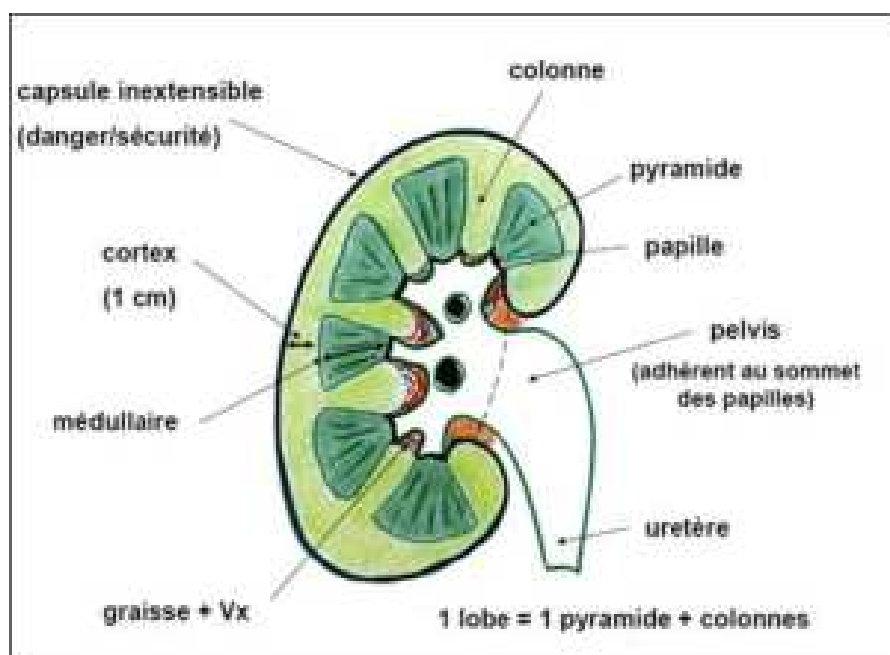
1.3. Architecture et structure du rein:

a- La capsule fibreuse : une capsule fibreuse entoure le rein et se réfléchit sur les lèvres du hile. Blanchâtre et relativement résistante, on peut la détacher assez facilement du parenchyme rénal et elle représente le plan de clivage classique pour la néphrectomie sous capsulaire.

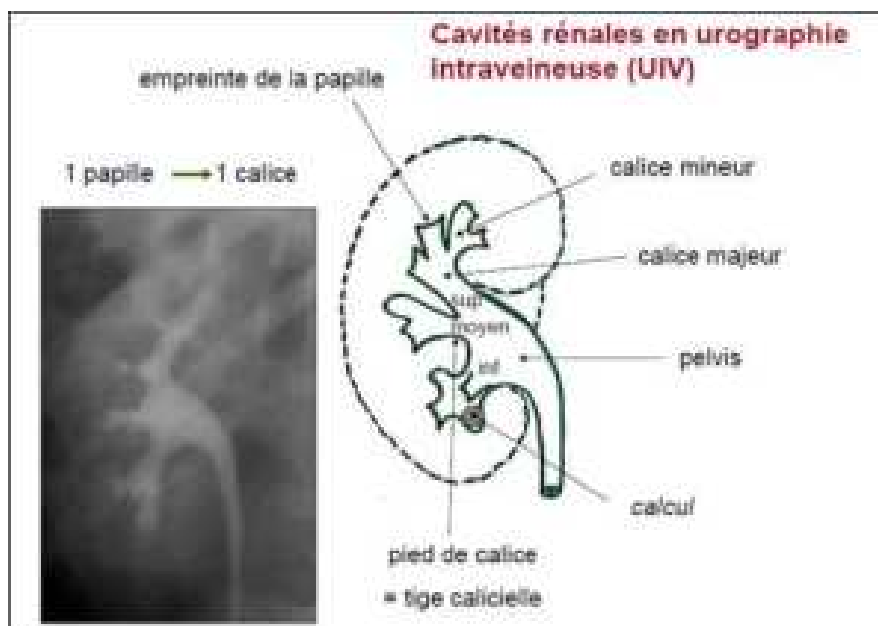


b- Le parenchyme rénal: Le rein est constitué de 2 zones de structure différente : la médullaire et le cortex.

c- Le sinus rénal: Il comporte les ramifications du pédicule rénal (artère et veine rénale) et les voies excrétrices supérieures intra rénale ou intra sinusale.



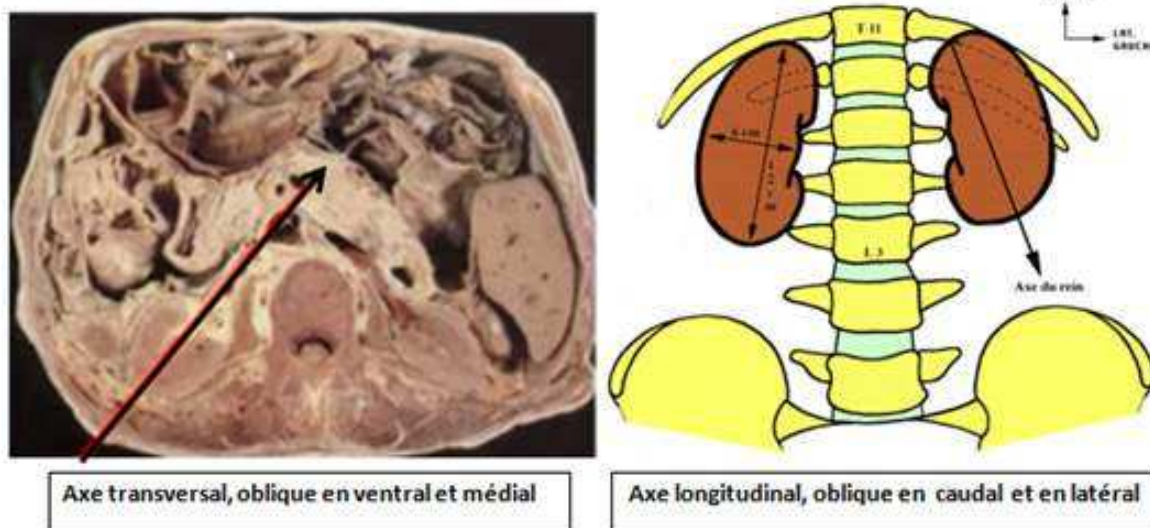
d- Les voies excrétrices: Les voies excrétrices recueillent l'urine qui sort des papilles. Elles sont formées des calices mineurs, des calices majeurs nés de la confluence des calices mineurs et du bassinot ou pyélon né de la confluence de calices majeurs.



1.4 Direction et orientation :

La connaissance de cette orientation est un préalable indispensable à tout abord percutané du rein. Dans le plan frontal, le grand axe de chaque rein est oblique en bas et en dehors, selon l'orientation des muscles grand psoas sur lesquels la face dorsale des reins repose.

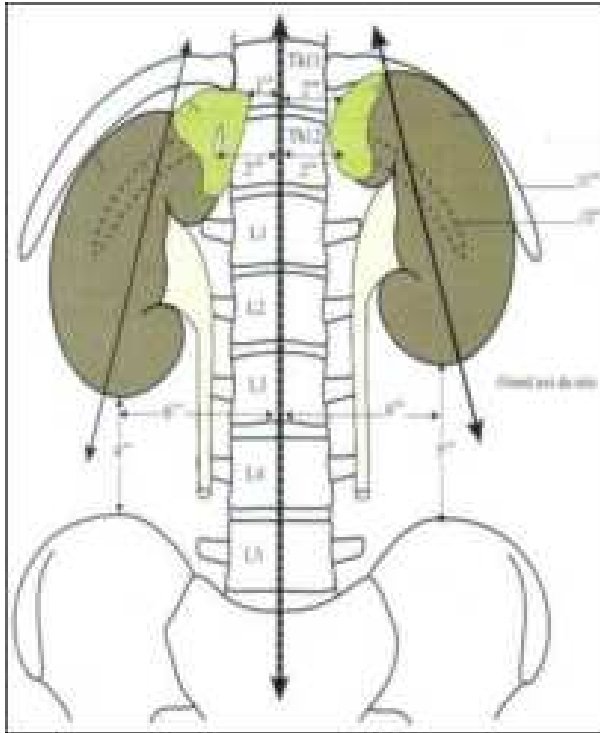
Dans le plan horizontal, les hiles rénaux sont orientés vers l'aorte abdominale et la VCI, qui assurent leur vascularisation. Les deux faces de chaque rein sont donc dorsomédiale et ventrolatérale.



1.5. Situation et projection :

Le rein droit est plus bas situé que le gauche, il s'étend du bord inférieur de la 11ème côte au processus transverse de la 3ème vertèbre lombaire, son pôle inférieur est situé à 3 cm de la crête iliaque.

Le rein gauche s'étend du bord supérieur de la 11ème côte au disque L2-L3, son pôle inférieur est situé à 5cm de la crête iliaque.



L'accès à la loge rénale se fait par lombotomie : incision cutanée sur le bord supérieur de la 11^{ème} ou 12^{ème} côte, table cassée au niveau de la fosse lombaire controlatérale.

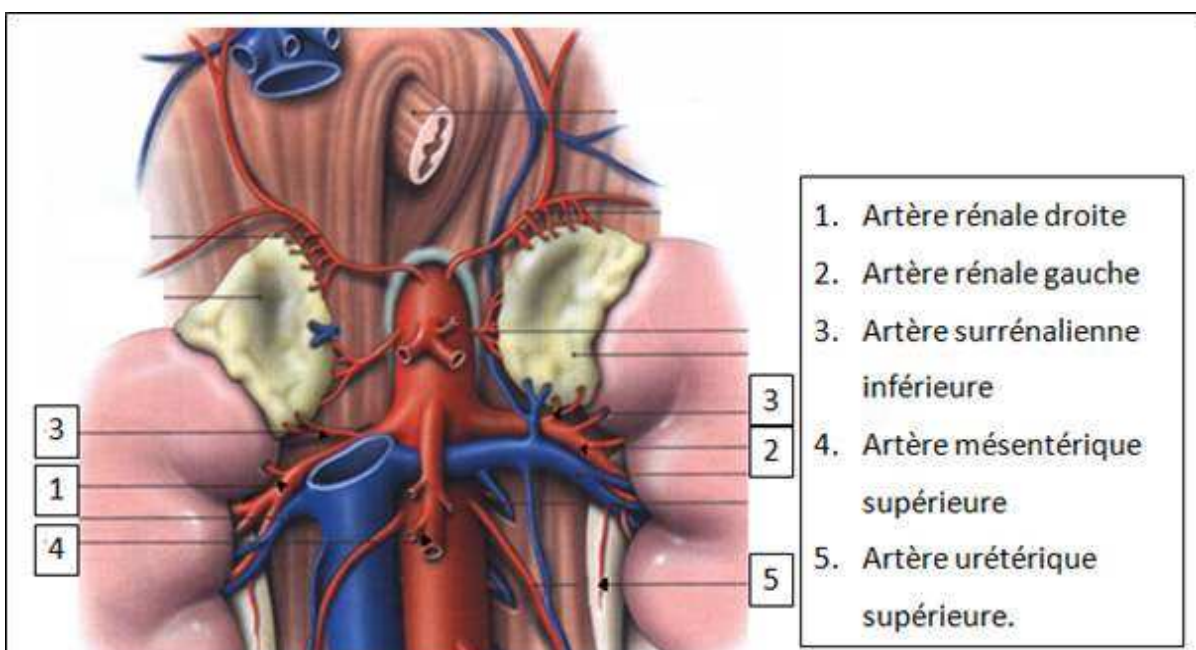
2. Le pédicule rénal :

2.1. L'artère rénale :

Les deux artères rénales ont pour origine la face latérale de l'aorte. Elles naissent un peu au-dessous de la mésentérique supérieure, à la hauteur du disque L1-L2, permettant la vascularisation du rein, le segment initial de l'uretère et une partie de la surrénale par ses collatérales : l'artère surrénalienne inférieure et l'artère urétérique supérieure.

- L'artère rénale droite est la plus longue mesurant 7cm de longueur et 7mm de diamètre elle chemine derrière la veine cave inférieure et la veine rénale droite, décrivant une courbe à concavité dorsale en se moulant sur la saillie du corps vertébral et du psoas. Elle est oblique en bas et en dedans (puisque le rein droit est plus bas situé).

- L'artère rénale gauche est plus courte mesurant 5cm de longueur et 7mm de diamètre, elle se trouve derrière la veine rénale gauche, le corps du pancréas et les vaisseaux spléniques. Elle a un trajet horizontal.



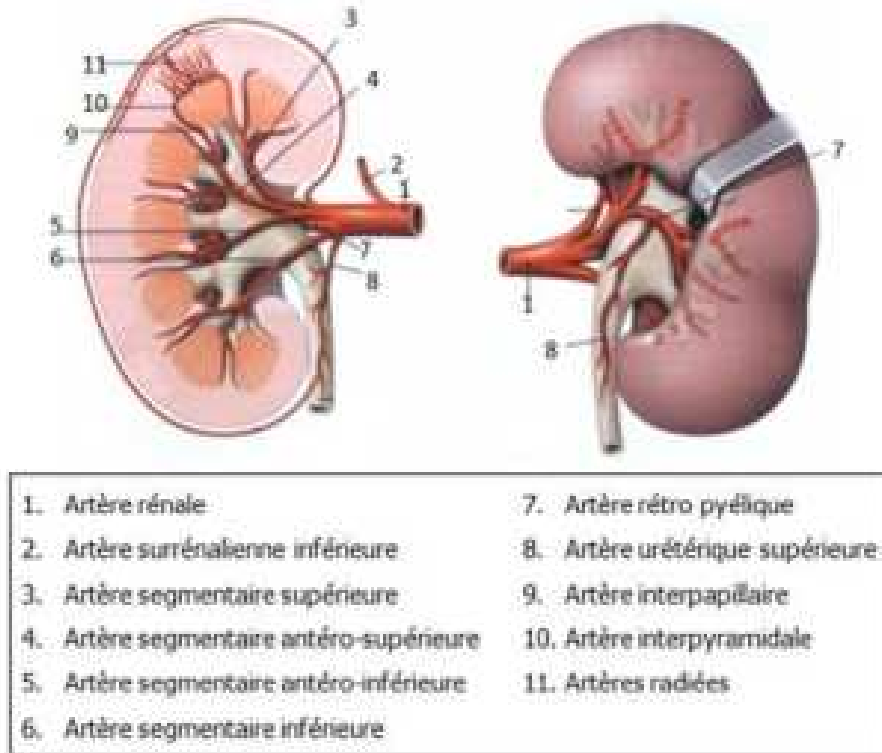
2.2. La division de l'artère rénale :

Chaque artère rénale au voisinage se divise au hile en deux branches terminales principales qui cheminent de part et d'autre du pyélon : un rameau antérieur dit pré pyélique et un rameau postérieur dit rétro pyélique. Chaque rameau se divise ensuite en branches intrarénales dites segmentaires.

- **La branche antérieure ou pré pyélique** croise la face antérieure du pelvis rénal pour donner les artères segmentaires supérieure, antéro-supérieure, antéro-inférieure et inférieure.

- **La branche postérieure ou rétro pyélique** contourne le bord supérieur du pelvis rénal pour longer le bord postérieur du hile du rein. C'est l'artère segmentaire postérieure.

- **Les artères segmentaires** donnent chacune des artères inter lobaires qui se terminent en artères interpapillaires (puis, des artères interpyramidales et des artères radiées).



2.3. La segmentation du rein :

La distribution artérielle, de type terminale, permet de diviser le rein en cinq segments : les segments supérieurs, inférieur, antéro-supérieur, antéro-inférieur et postérieur.

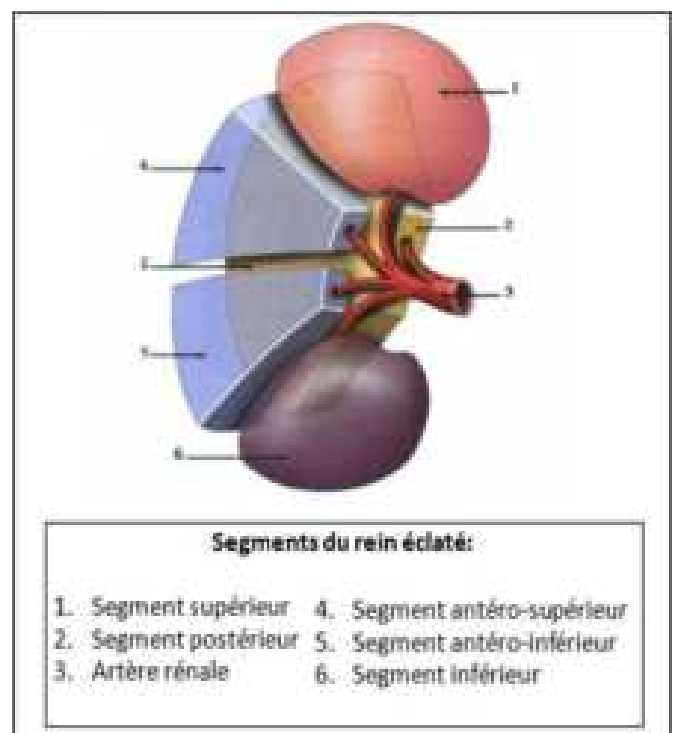
• **L'artère pré pyélique** donne :

- L'artère segmentaire supérieure qui se distribue et irrigue le segment supérieur.

- L'artère segmentaire antéro-supérieure et antéro-inférieure se distribuent et irriguent les deux tiers antérieurs de la partie moyenne du rein.

- L'artère segmentaire inférieure se distribue et irrigue le segment inférieur.

• **L'artère rétro pyélique** donne l'artère segmentaire postérieure, qui par des branches, irriguent le tiers postérieur de la partie moyenne du rein.

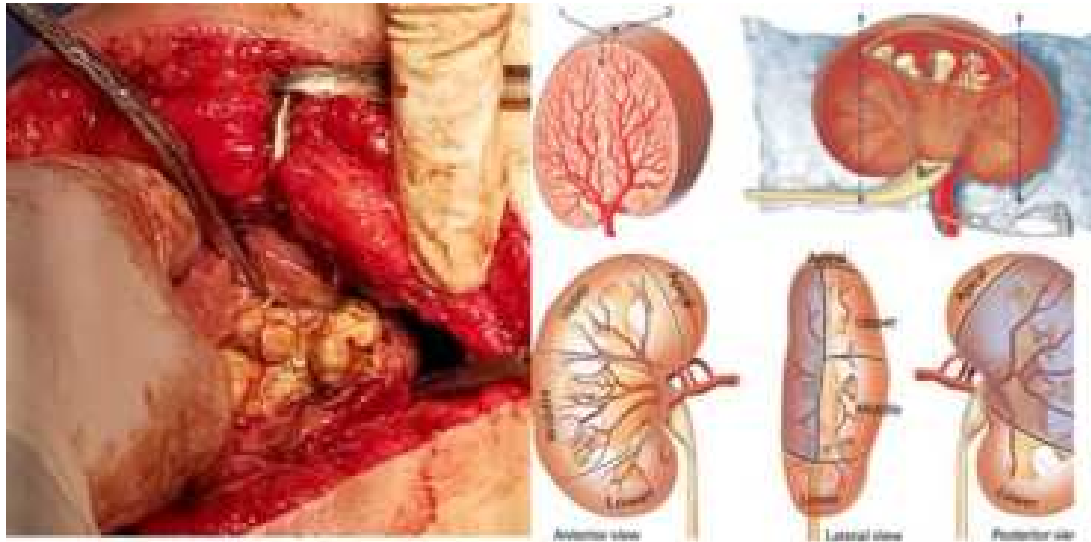


La segmentation du rein a des implications au cours de la chirurgie rénale :

1/ La chirurgie des lithiases rénales :

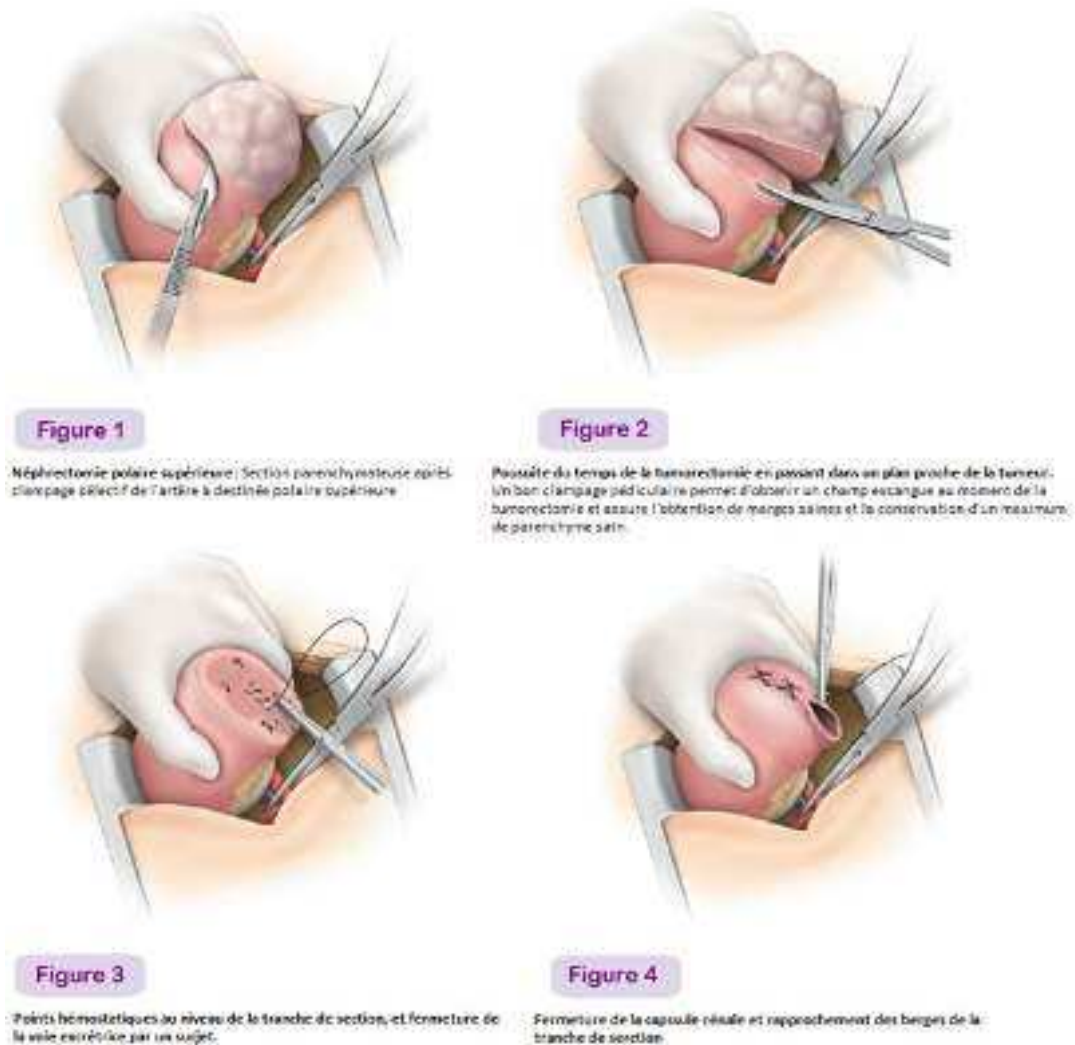
La séparation entre les deux territoires est indiquée sur la surface extérieure du rein par une ligne menée parallèlement au bord externe du rein, à 1 cm en arrière de ce bord (ligne entre le segment antérieur et postérieur).

Elle représente la zone avasculaire qui est préférentielle pour les néphrotomies anastrophiques permettant d'ouvrir le parenchyme du rein et extraire un calcul rénal sans endommager la vascularisation du rein qui est de type terminal.



2/ La chirurgie conservatrice des tumeurs rénales :

En cas de tumeur localisée au niveau d'une partie du rein, on peut ligaturer l'artère qui irrigue le segment intéressé par la tumeur uniquement permettant de faire une néphrectomie partielle et conserver le rein.



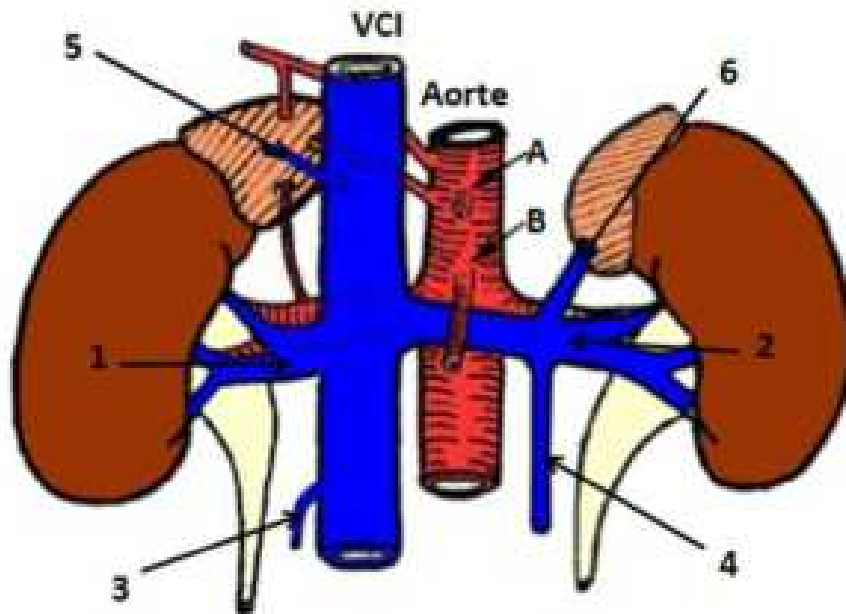
2.4. La veine rénale :

La veine rénale provient de la réunion des troncs pré-pyélique et rétro pyélique au niveau du bord médial du sinus rénal et en avant des artères rénales.

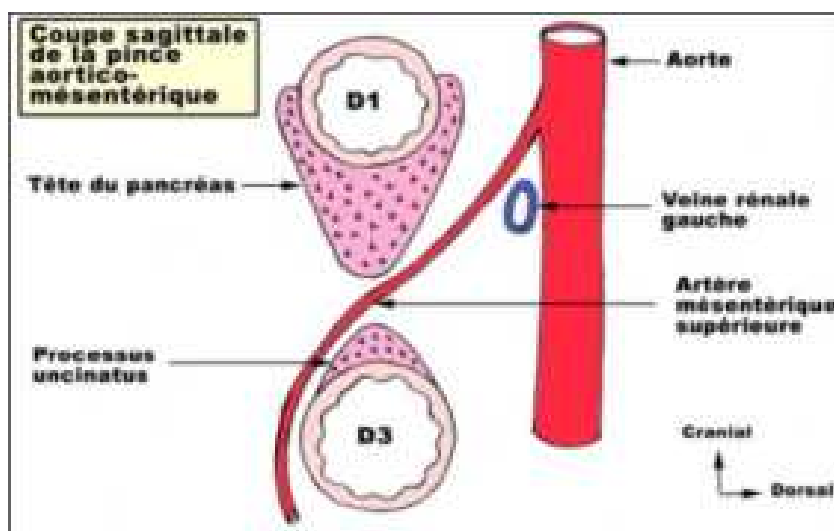
- **La veine rénale droite** est courte mesurant 3cm de longueur et horizontale.
- **La veine rénale gauche** est plus longue mesurant 7cm de longueur passe en avant de l'aorte et en arrière de l'artère mésentérique supérieure, à l'intérieur de la pince aortico-mésentérique avant de se jeter dans la veine cave inférieure.

Des deux côtés, la veine rénale se jette dans la VCI, à hauteur des bords latéraux de L1, un peu plus haut à gauche qu'à droite. Les veines rénales drainent les veines urétériques supérieures et les veines surrenaliennes inférieures. A gauche uniquement, la veine rénale reçoit la veine surrenallienne moyenne et la veine gonadique.

En cas de varicocèle (dilatation variqueuse des veines du cordon spermatique qui est la conséquence d'un mauvais fonctionnement de valves situées dans les veines), dans 85 à 90% des cas, c'est le côté gauche qui est atteint. Cela est expliqué par le fait que, la veine spermatique rejoint la veine rénale gauche alors que du côté droit elle rejoint la VCI.



1. Veine rénale droite	4. Veine gonadique gauche
2. Veine rénale gauche	5. Veine surrenallienne moyenne droite
3. Veine gonadique droite	6. Veine surrenallienne moyenne gauche

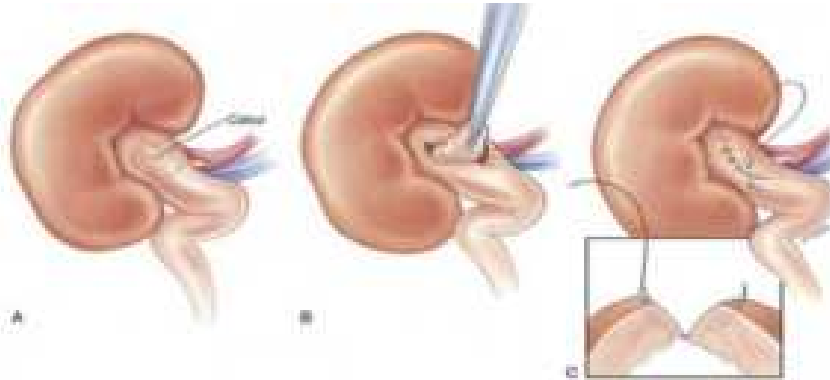


2.5. Le pyélon :

Le pyélon a une forme triangulaire. Il est aplati d'avant en arrière et possède :

- deux faces, antérieure et postérieure ;
- un bord supérieur presque vertical ;

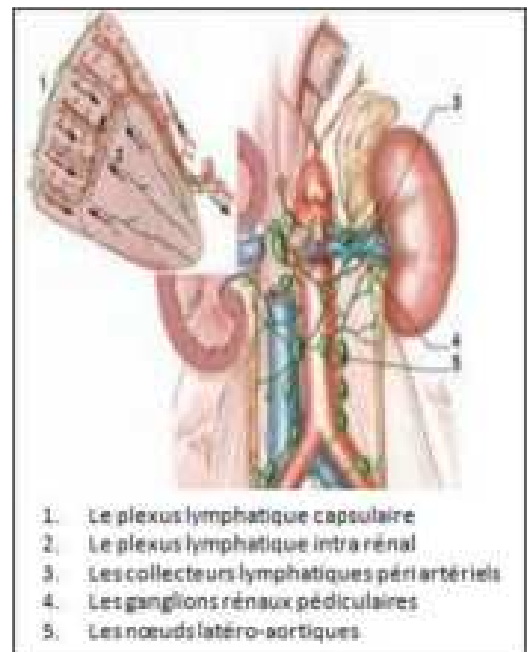
- Il peut être plus ou moins large et plus ou moins extra- sinusal. Le pyélon est le plus postérieur des éléments du hile rénal, ce qui explique pourquoi on aborde le rein par sa face postérieure pour réaliser une pyélotomie pour extraire une lithiase rénale.



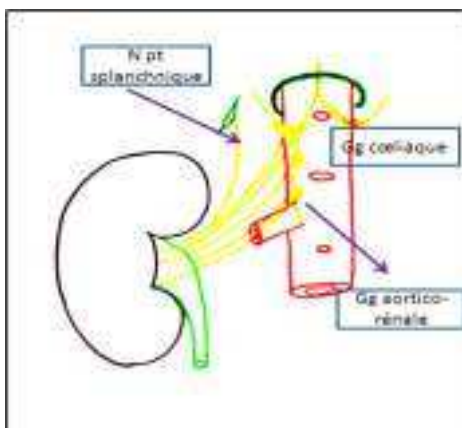
2.6. Les lymphatiques :

- **Le plexus lymphatique intrarénal** : Il entoure les tubules rénaux et se collecte dans le hile en 4 ou 5 troncs lymphatiques

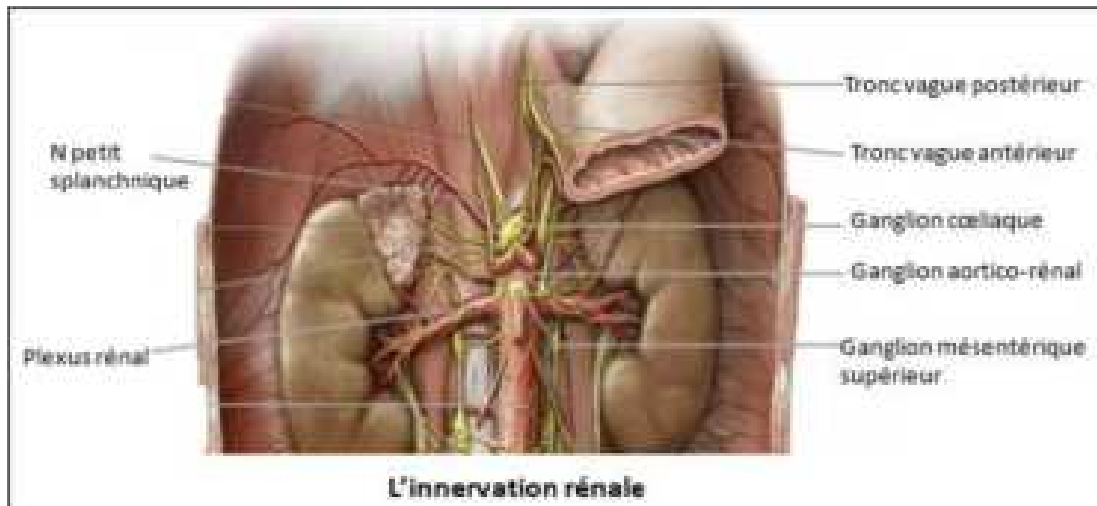
Les lymphatiques suivent dans le parenchyme le trajet des vaisseaux sanguins puis ils se regroupent en trois plans : antérieur, postérieur, et inférieurs par rapport au pédicule rénal. Les ganglions se situent entre les veines et les artères, ils se drainent dans les nœuds latéro-aortiques, inter-aortico-caves et latéro-caves.



L'innervation rénale appartient au système sympathique et parasympathique. Les afférences sympathiques du plexus rénal proviennent des ganglions du tronc sympathique de T10 à L1 via les nerfs splanchniques : ganglions coéliquaux, des ganglions mésentériques supérieurs et des ganglions aortico-rénaux. Par ailleurs les afférences parasympathiques proviennent des nerfs vagues.



Les niveaux médullaires T10 à L1 de transmission des signaux nociceptifs expliquent que la sensation douloureuse au cours des coliques néphrétiques (douleur d'origine rénale) puisse être également perçue au niveau du tube digestif ou du système génital.

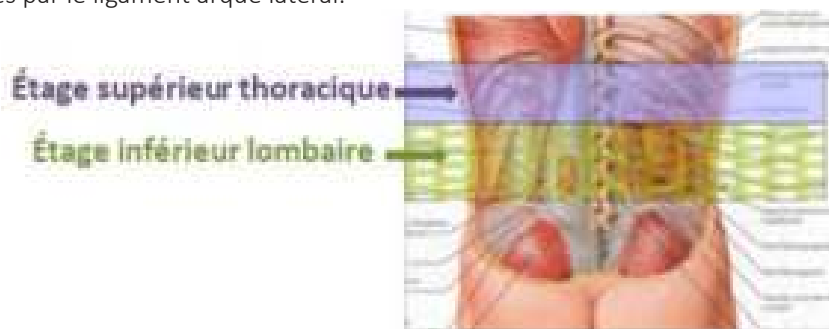


3. Les rapports du rein :

Les rapports du rein se font par l'intermédiaire de la loge rénale. Le rein a des rapports antérieurs, différents à droite et à gauche, et des rapports postérieurs divisés en thoraciques et lombaires.

3.1. Les rapports postérieurs :

En dehors de la loge rénale, la face postérieure du rein s'applique en haut sur le diaphragme, en bas sur la paroi lombaire. On peut donc subdiviser les rapports postérieurs en deux segments : un segment supérieur thoracique et segment inférieur lombaire séparés par le ligament arqué latéral.



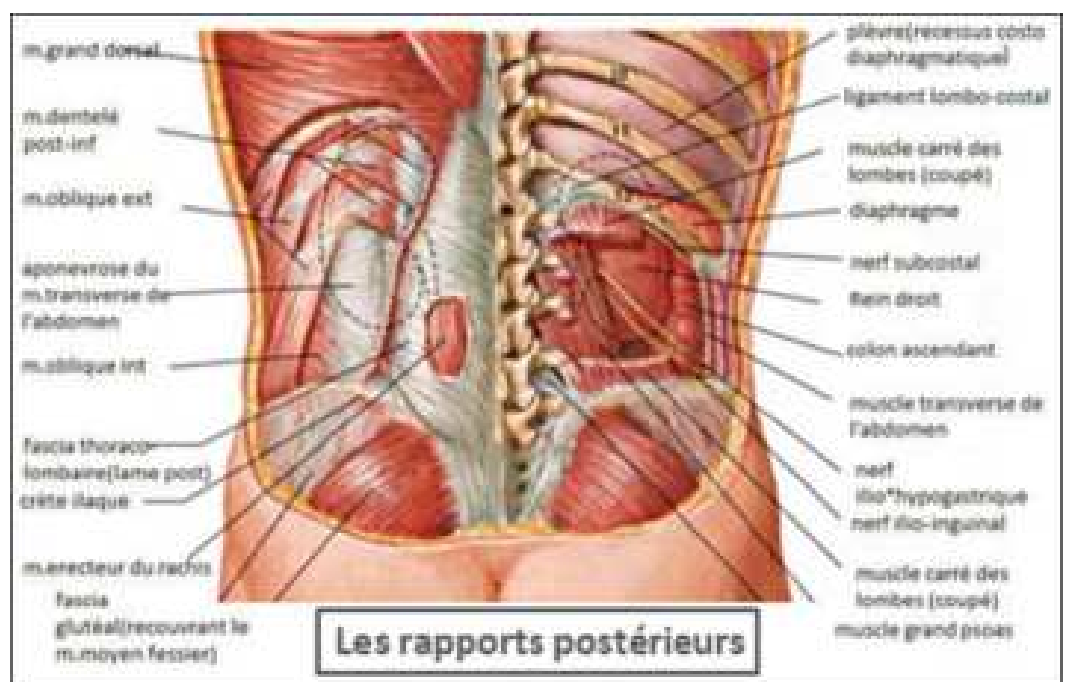
a. Les rapports de l'étage thoracique :

La face postérieure du rein répond successivement, et d'avant en arrière, par l'intermédiaire de la graisse pararénale, à :

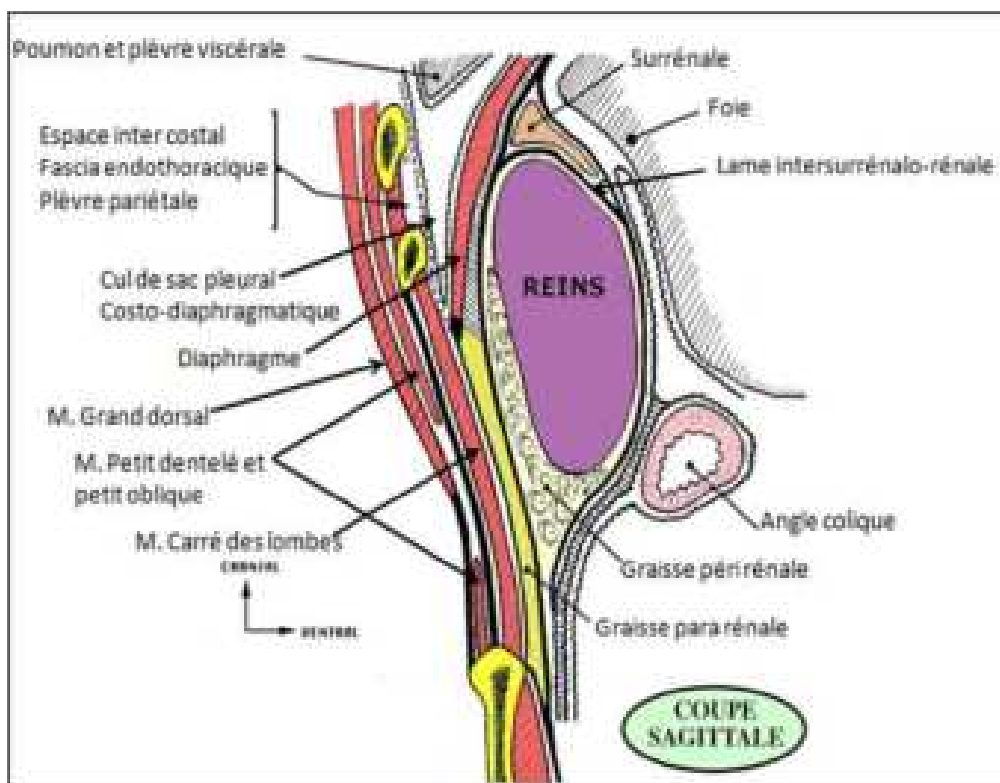
- Un premier plan constitué par les faisceaux du diaphragme qui s'attachent aux ligaments arqué médial et latéral. Le diaphragme présente à ce niveau une déhiscence : le hiatus costo-lombaire, mettant en contact la graisse pararénale avec le fascia endothoracique.

Ce rapport explique la possibilité d'épanchement pleural en cas d'infection rénale.

- Le deuxième plan est représenté par le cul de sac pleural costo-diaphragmatique qui est attaché processus transverse de la première vertèbre lombaire par le ligament lombo-costal de Henlé, *un repère chirurgical important (lorsqu'on fait une lombotomie, il ne faut jamais aller au dessus de ce ligament pour ne pas ouvrir la plèvre). Le poumon est plus haut situé et donc n'est pas un rapport postérieur du rein.*



- Le troisième plan est formé à gauche par la 11ème et 12ème côtes et l'espace intercostale correspondant, et à droite par la 12ème côte et le dernier espace intercostal. *Ces rapports expliquent la possibilité de lésion rénale en cas de fracture des dernières côtes.*



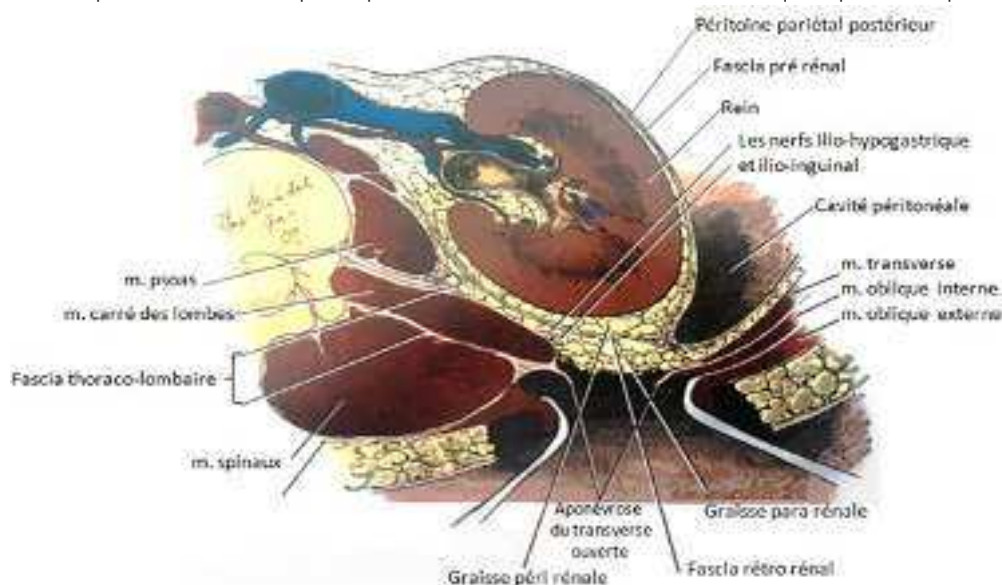
b. Les rapports de l'étage lombaire :

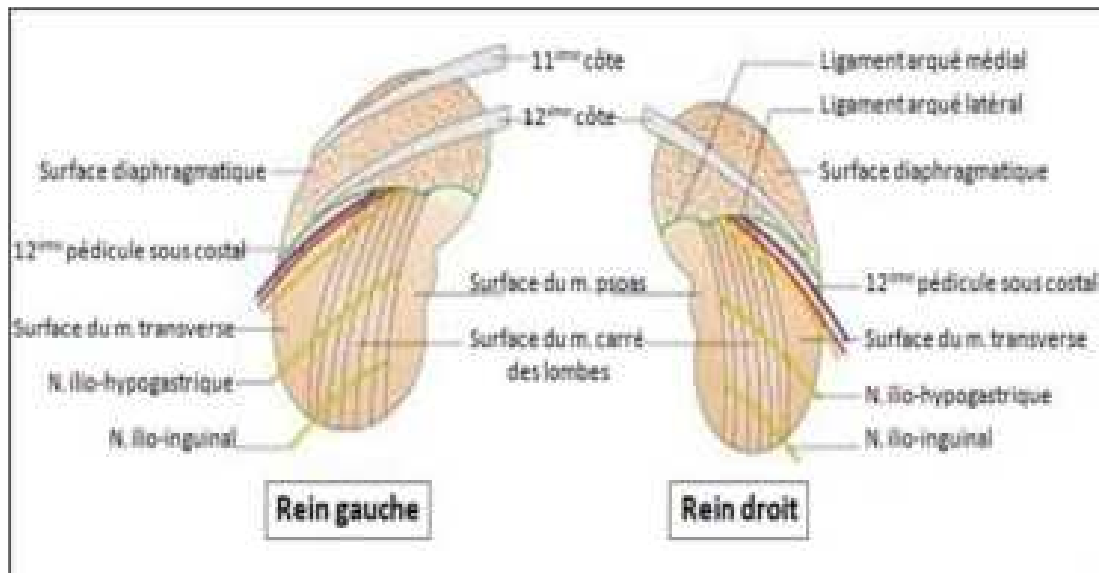
Le segment lombaire répond aux parties molles de la fosse lombaire comprise entre la colonne vertébrale, la 12ème côte et la crête iliaque, correspondant aux différents éléments de la voie d'abord habituelle, postérieure du rein.

- Le premier plan est formé par une couche de graisse pararénale assez dense dans laquelle cheminent de haut en bas : **le 12ème nerf sous-costal**, le nerf **ilio-hypogastrique**, le nerf **ilio-inguinal**. *Seule une dissection poussée de cette graisse au cours d'un geste curatif de néphrectomie élargie ou lors d'un abord postérieur peut menacer ces nerfs avec des conséquences sensitivomotrices dans leurs territoires : région lombaire, flanc, hypogastre et région inguinale.*

- Le deuxième plan est formé par le muscle carré des lombes qui répond au tiers moyen du rein et le muscle psoas qui répond à la partie interne du rein. Le muscle psoas est le rapport musculaire le plus important. D'une part, la loge rénale est fixée à son fascia iliaque par le feuillet rétro-rénal. D'autre part, la face postérieure de la capsule adipeuse et les éléments du pédicule, en particulier l'artère rénale qui est postérieure, reposent sur son corps charnu. **Au plan chirurgical, le muscle grand psoas est donc un repère anatomique très utile pour la dissection du pédicule rénal.**

- Le troisième plan est constitué par l'aponévrose d'insertion du transverse qui répond à la partie externe du rein.

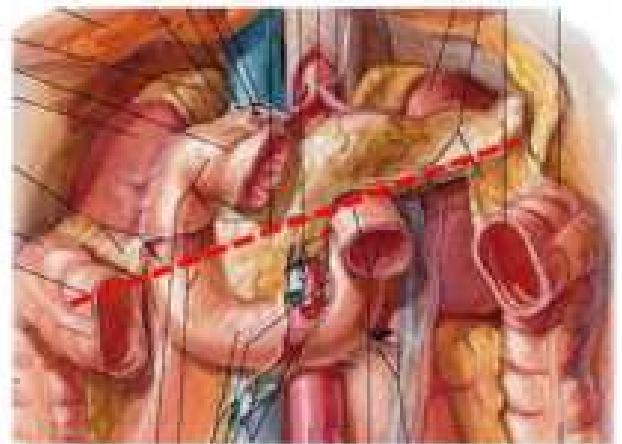




3.2. Les rapports antérieurs :

En dehors de la loge rénale, la face antérieure du rein répond par l'intermédiaire de la graisse pararénale et du péritoine pariétal postérieur aux organes digestifs. Ils sont différents à droite et à gauche.

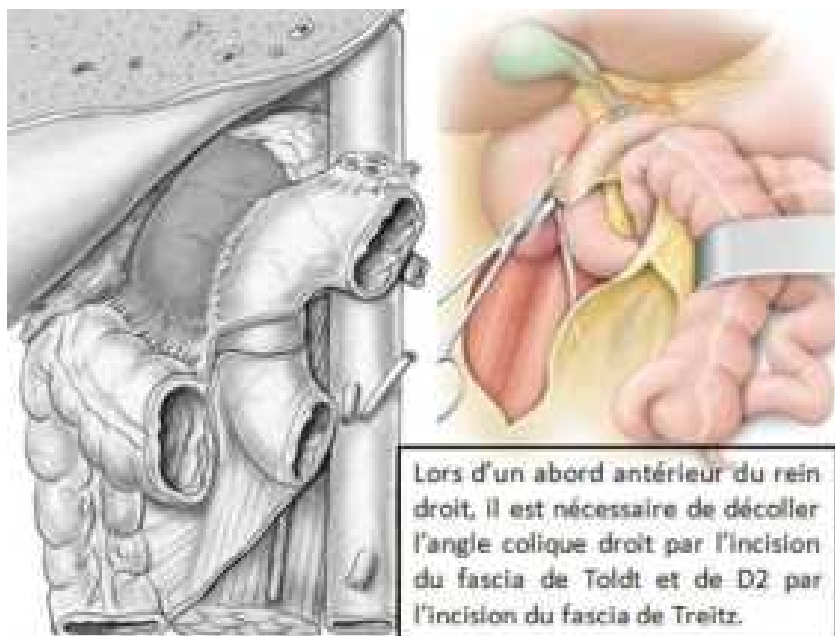
La racine du mésocôlon transverse étant oblique de bas en haut et de droite à gauche, le rein droit présente des rapports antérieurs entièrement sus-mésocoliques et le rein gauche sus et sous mésocoliques.



--- Racine du mésocôlon transverse

a. Les rapports du rein droit : entièrement sus-mésocoliques

- La partie supérieure de la face antérieure du rein répond par l'intermédiaire du péritoine pariétal postérieur, à la face inférieure du **foie** sur laquelle, elle marque l'empreinte rénale. Il y a un cul de sac de la cavité péritonéale entre le foie et le rein, nommé l'espace hépato rénale (ou Morrison).
- La partie interne du rein répond par l'intermédiaire du fascia de Treitz à la **deuxième portion du duodénum**, Ceci explique la possibilité de fistule ou de plaie duodénale lors de la chirurgie du rein.
- Sur sa partie inférieure, le rein est en contact avec l'**angle colique droit**, accolé au péritoine pariétal postérieur par le fascia de Toldt et la **racine du mésocolon transverse**.



Lors d'un abord antérieur du rein droit, il est nécessaire de décoller l'angle colique droit par l'incision du fascia de Toldt et de D2 par l'incision du fascia de Treitz.

b. Les rapports du rein gauche :

La partie moyenne du rein est barrée par le mésocôlon transverse qui va subdiviser les rapports antérieurs du rein gauche en sus et sous mésocoliques :

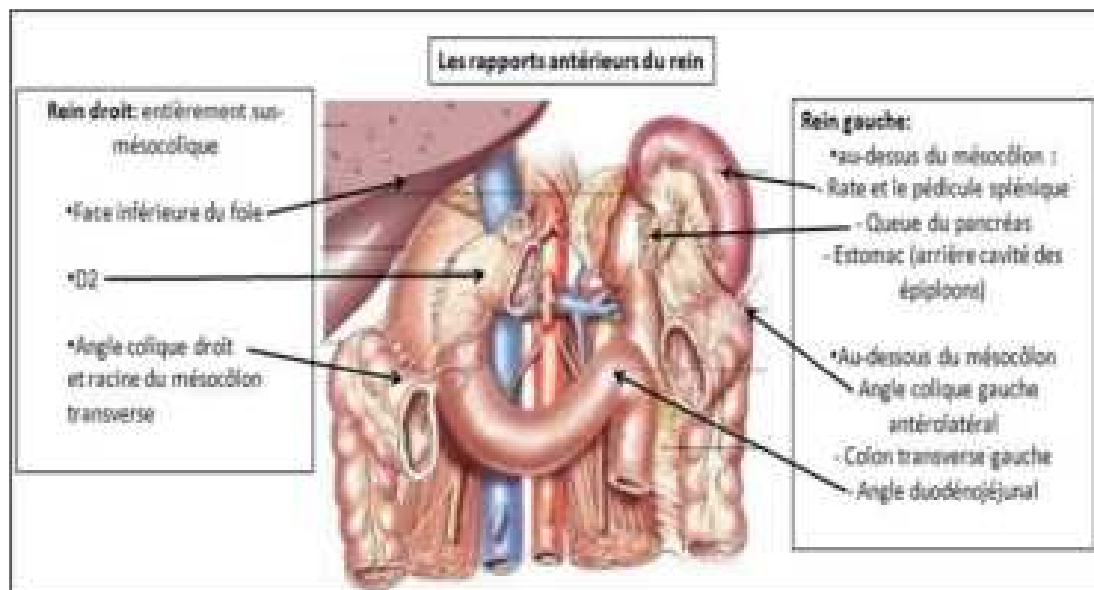
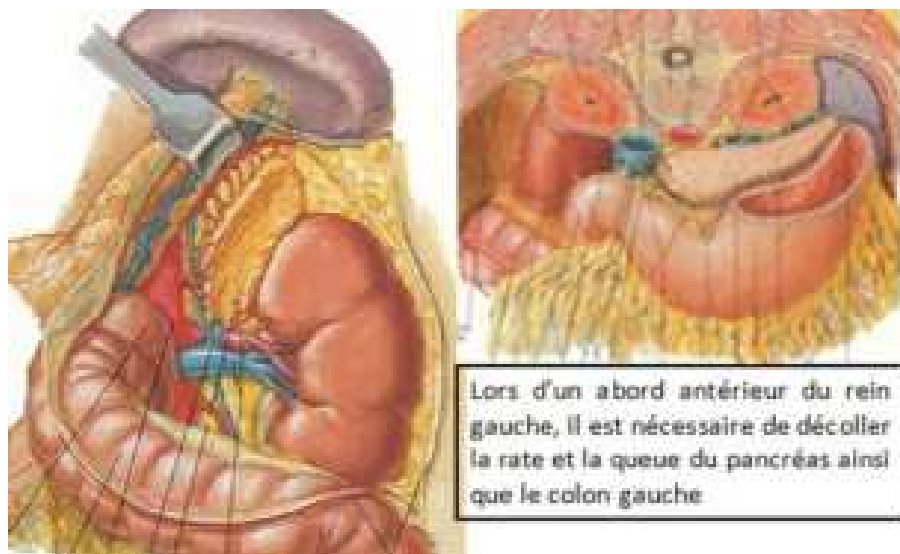
• au-dessus du mésocôlon :

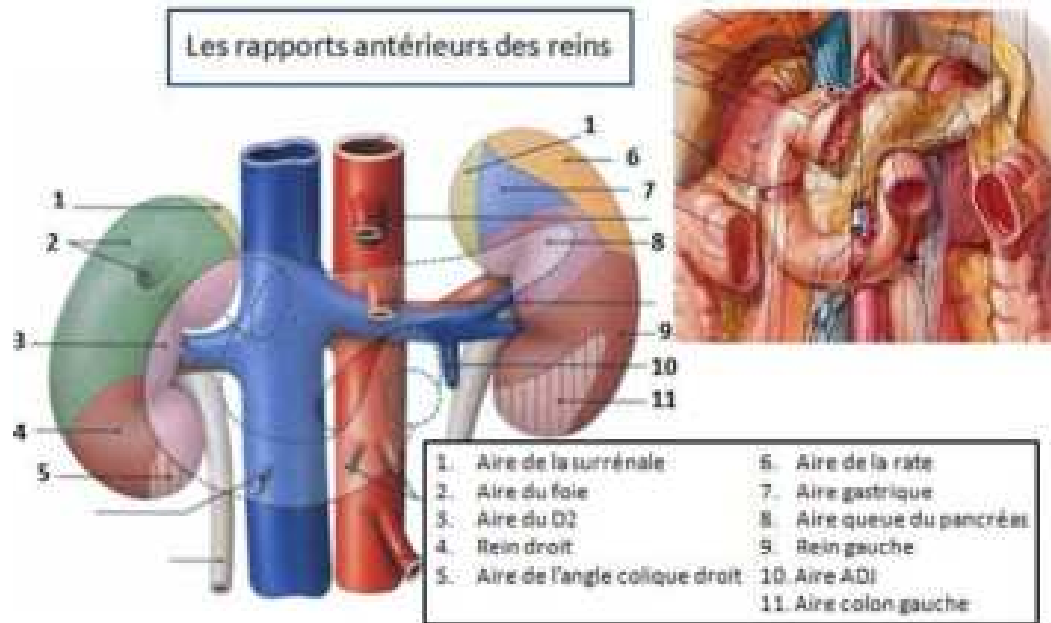
- La queue du pancréas, accompagnée des vaisseaux spléniques, croise en avant le rein. La rate s'appuie par l'intermédiaire du péritoine pariétal postérieur sur la partie externe du pôle supérieur du rein gauche. *Ce rapport intime explique la possibilité de ruptures traumatiques associées des deux organes.*

- L'estomac entre en rapport par l'intermédiaire de la bourse omentale (ou l'arrière cavité des épiploons) avec la face antérieure du rein gauche, selon une surface triangulaire, limitée en bas par le pancréas, en dehors par la rate et en dedans par la glande surrénale.

• au-dessous du mésocôlon :

La face antérieure du rein, tapissée du fascia rétrocolique gauche, est croisée par l'extrémité gauche de la racine du mésocôlon transverse. Au-dessous de la racine du mésocôlon transverse, la face antérieure du rein répond, à la partie gauche du côlon transverse ainsi que l'angle duodénojéjunal. L'angle colique gauche se situe en dehors du rein.





D. ANATOMIE DES GLANDES SURRÉNALES :

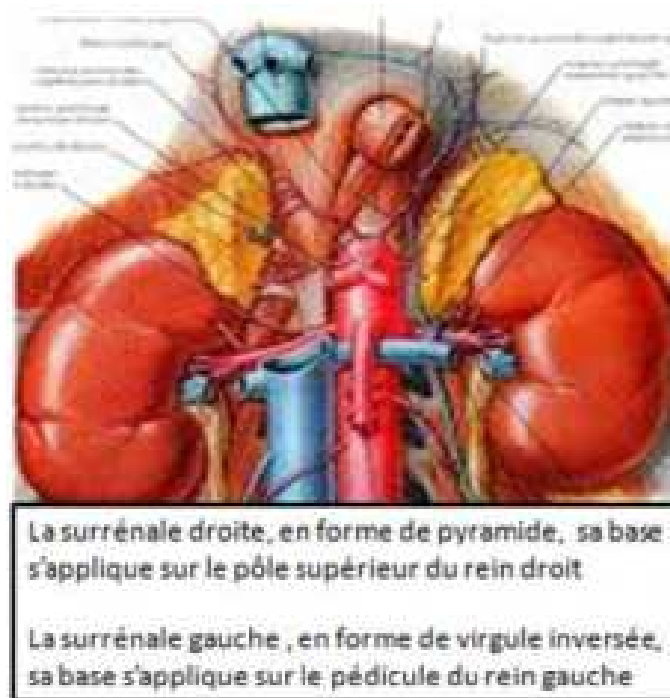
Les glandes surrénales sont des glandes endocrines rétropéritonéales, paires, non symétriques, nées de la fusion de deux tissus glandulaires en tous points différents : la corticosurrénale et la médullosurrénale. Ces tissus diffèrent par leur origine embryologique, leurs structures microscopique et macroscopique, leurs fonctions et les pathologies qui peuvent les atteindre.

1. MORPHOLOGIE :

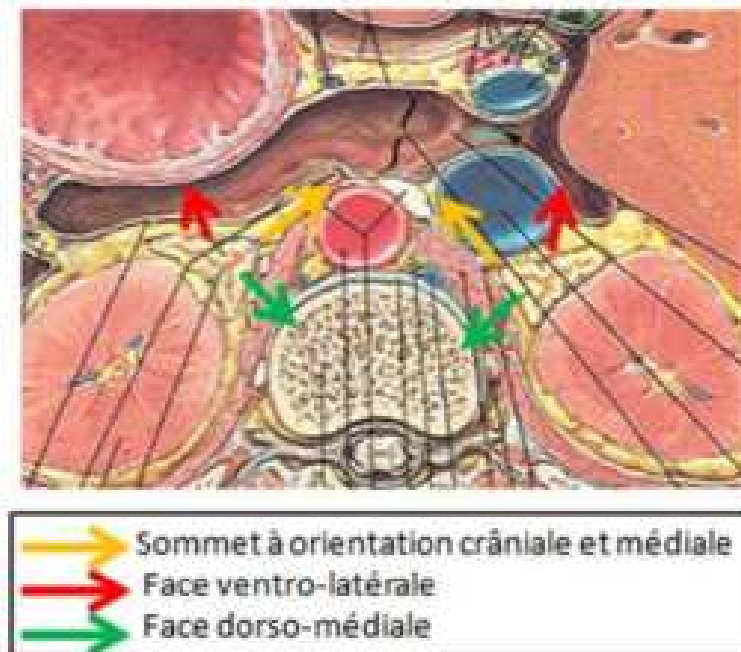
Les deux glandes surrénales, sans être symétriques, présentent des caractéristiques communes.

La glande gauche a une forme plus allongée verticalement que la glande droite. Ainsi, la surrénale gauche a une forme de virgule inversée alors que la surrénale droite a une forme de pyramide. Elles sont très aplaties avec une hauteur de 4-5 cm, une largeur de 2-4 cm et une épaisseur de moins de 1 cm pour un poids moyen de 5-6 g.

La base de la glande droite s'applique sur le pôle supérieur du rein droit alors que celle de la glande gauche s'applique plutôt sur le pédicule du rein gauche. Ce qui explique que la glande surrénale droite est plus haute et plus profonde.

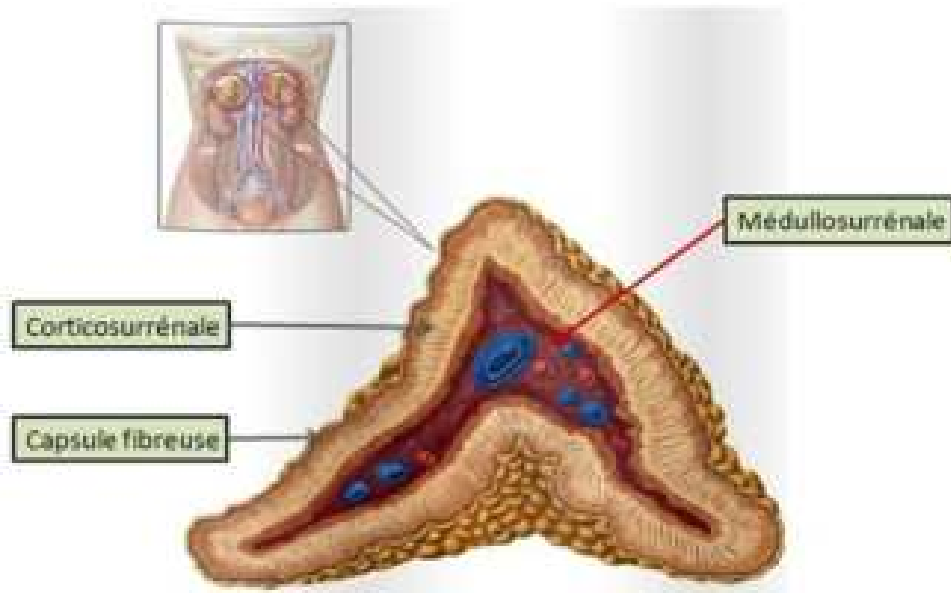


Les sommets de ces deux glandes ont une orientation crâniale et médiale et on leur décrit donc une base caudale, une face ventro-latérale et une face dorso-médiale.



Les surrénales ont une couleur jaune chamois tranché au sein de l'abondant tissu adipeux qui les entoure. Leur surface est irrégulière, marquée de nombreux sillons et une capsule fibreuse entoure la glande.

Un sillon plus profond, véritable hile de la glande, correspond à l'émergence de la veine surrénalienne centrale, dépression unique au milieu de la face ventrale à droite et à la base de la glande à gauche. La structure interne se compose d'une zone centrale ou médullosurrénale (20 % du volume total), entourée par un cortex ou corticosurrénale (80 % du volume total). La zone centrale, inconsistante, de couleur plus sombre que la périphérie, est riche en lacs veineux et en filets nerveux, son réseau veineux converge vers une veine centrale unique, démesurée par rapport à la taille de la glande.



2. VASCULARISATION DE LA GLANDE SURRÉNALE :

Les glandes surrénales comme toutes les glandes endocrines, bénéficient d'une grande richesse d'apport vasculaire.

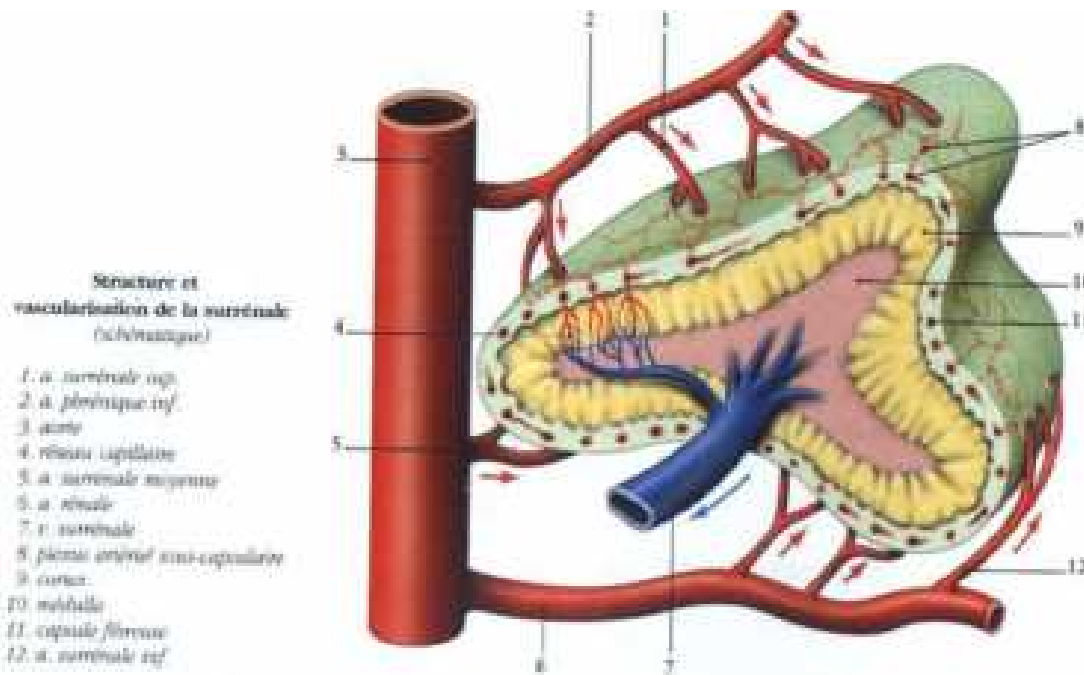
2.1. Vascularisation artérielle :

Comme l'embryologie nous l'apprend, ces glandes ne migrent pas ou très peu dans la région rétropéritonéale : les pédicules artériels sont donc courts et multidirectionnels.

Les artères surrénaliennes se répartissent en 3 groupes :

- **Les artères surrénaliennes supérieures** : Sont grêles, multiples, elles naissent des artères phréniques inférieures, et ont des trajets courts descendant de la face inférieure du diaphragme vers le sommet des deux glandes.
- **Les artères surrénaliennes moyennes** : Sont des branches directes de l'aorte abdominale nées entre l'origine des artères phréniques inférieures et celle des artères rénales.

• **Les artères surrénaliennes inférieures** : Sont les plus importantes, les plus constantes, elles naissent des deux cotés du bord supérieur des artères rénales. Elles peuvent naître d'une artère rénale polaire supérieure si elle existe.



2.2. Vascularisation veineuse :

Il faut opposer la circulation veineuse, accessoire, à faible débit, à la circulation veineuse centrale dirigée vers une veine principale. Le réseau périphérique est constitué de fine veinules à la surface de la glande, et surtout dans le tissu adipeux péri-surrénalien est essentiellement destiné à la circulation de la loge et la capsule surrénaliennes sans drainage hormonal endocrinien. Alors que la veine centrale est le véritable conduit sécrétoire de la médullosurrénale et de la corticosurrénale. Chaque glande a une veine centrale unique, non valvulée, constante, d'un diamètre de 5mm ou plus. Ces veines diffèrent d'un côté à l'autre par leur longueur, leur direction et leur abouchement.

• **Veine surrénalienne gauche** : Elle a un trajet presque vertical, descendant de la base de la glande vers la veine rénale gauche, où elle s'abouche à son bord supérieur en regard de la terminaison de la veine gonadique gauche. Elle a une longueur de 20 mm environ. Elle présente une anastomose quasi-constante avec la veine phrénique inférieure.

• **Veine surrénalienne droite** : Elle a un trajet très court, de moins de 10 mm, émergeant de la face ventrale de la glande, elle se termine au milieu de la face dorsale de la veine cave caudale ou sur son bord droit.



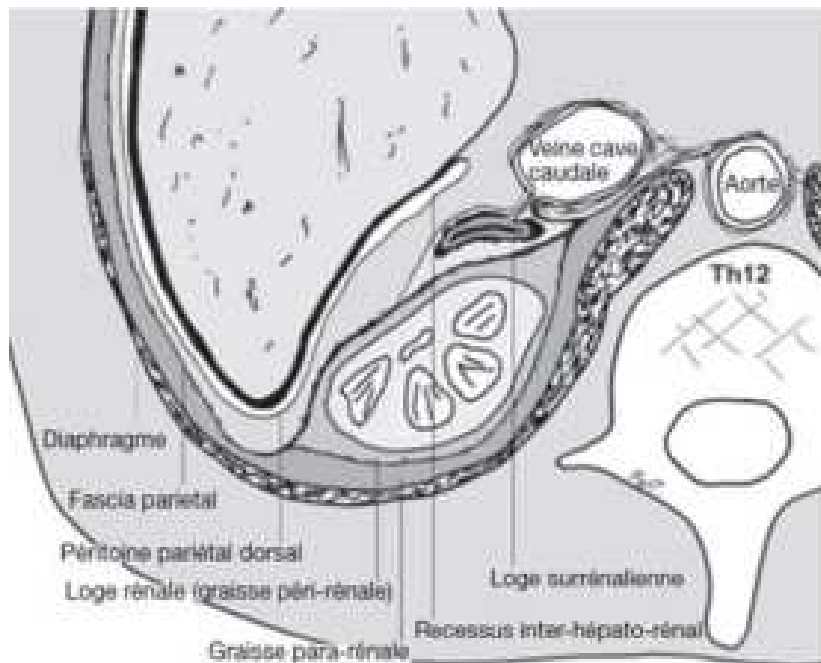
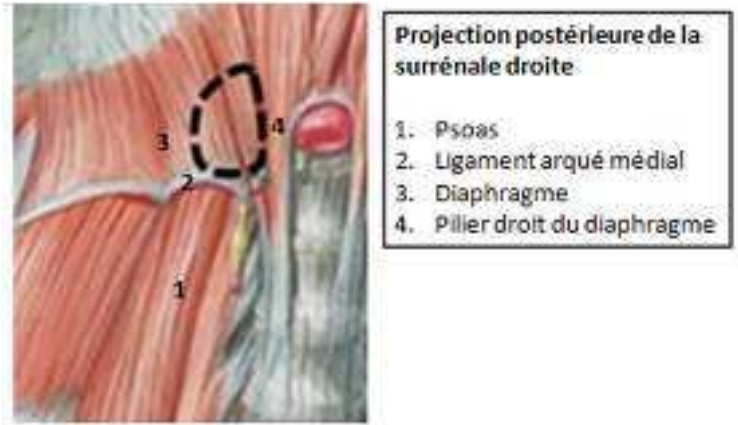
3. LES RAPPORTS DES GLANDES SURRÉNALES :

On doit considérer séparément les rapports des glandes gauche et droite qui sont différents

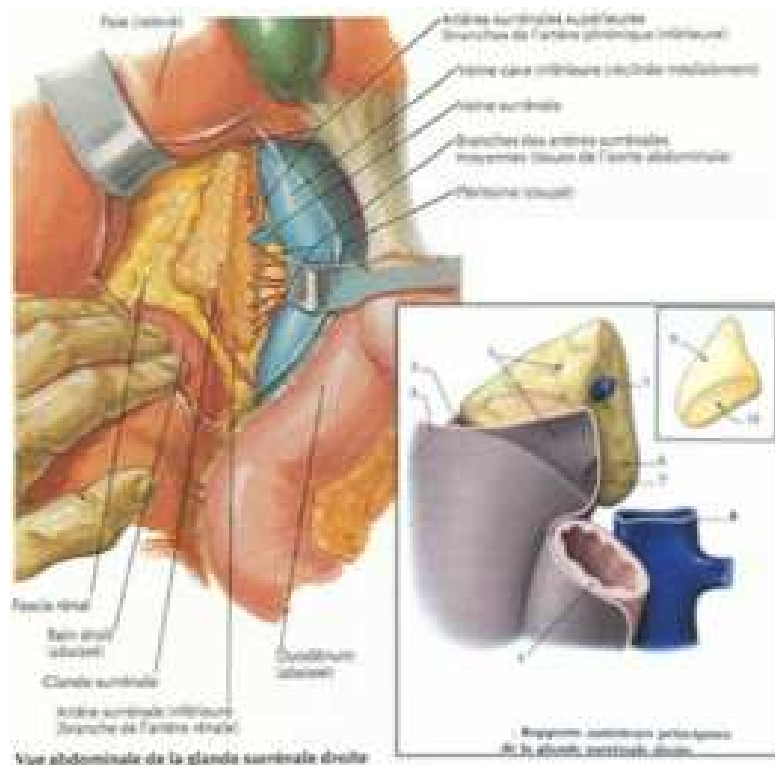
3.1. Rapports de la glande surrénale droite :

La glande surrénale droite, à la différence de la gauche, chapeaute le pôle supérieur du rein au point de n'apparaître que rarement sur une coupe axiale passant par le rein droit. Elle s'appuie dorsalement sur le ligament arqué médial (arcade du posas), sur la partie musculaire verticale du diaphragme et son pilier droit.

Ventralement, la glande droite est au contact direct de la face dorsale de la veine cave et du lobe droit du foie par l'intermédiaire du récessus interhépatorénal ou « cul-de-sac de Morrison ».

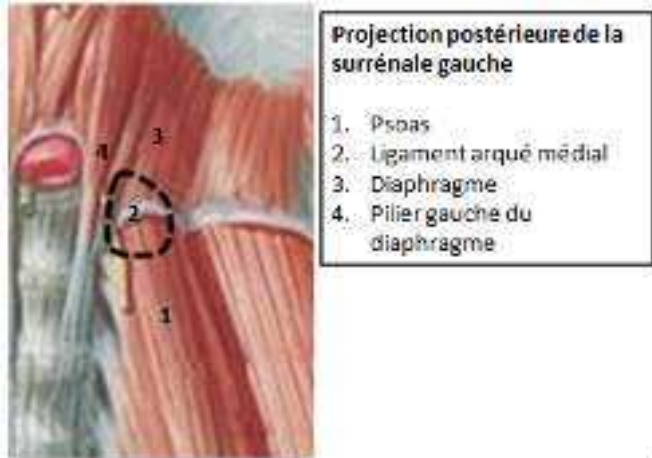


Loges rénale et surrénalienne droites (coupe axiale passant par Th12).



3.2. Rapports de la glande surrénale gauche :

La glande gauche est, globalement, plus en dedans du pôle supérieur du rein que véritablement au-dessus de lui. Elle semble en fait comprise entre le bord médial du rein et le pilier gauche du diaphragme, un peu au-dessus du pédicule rénal gauche. De ce fait la surrénale gauche est plus basse que la droite.



En arrière, la loge surrénalienne s'appuie sur le muscle psoas, sur le ligament arqué médial et plus haut sur la partie musculaire verticale du diaphragme et son pilier gauche.

Ventralement, le rapport essentiel est celui de la queue du pancréas avec la veine splénique incrustée dans la face dorsale du pancréas et l'artère splénique qui s'enroule à son bord supérieur. Au-dessus du pancréas, la surrénale est au contact de la bourse omentale rétro-gastrique.

E. ANATOMIE DE L'URETÈRE :

L'uretère constitue la voie excrétrice supérieure extrarénale. Les uretères, droit et gauche sont les conduits urinaires qui se situent dans l'espace rétropéritonéal et qui relient les pyélons à la vessie.

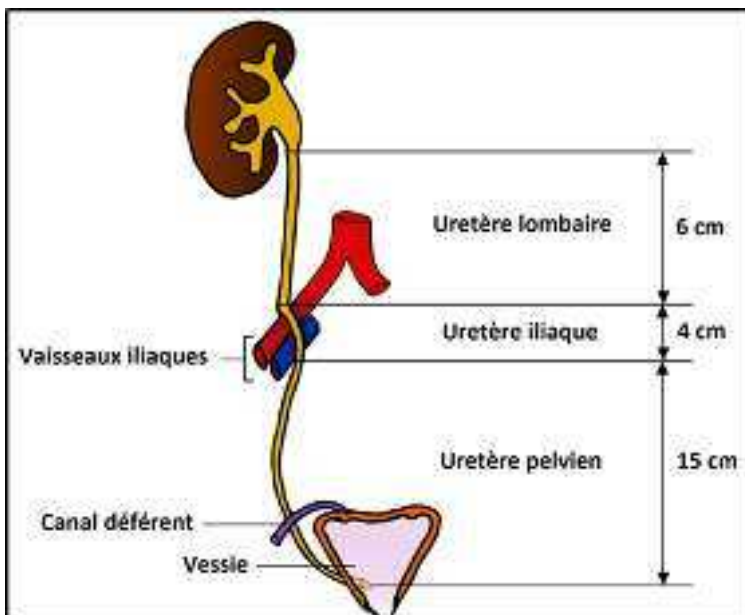
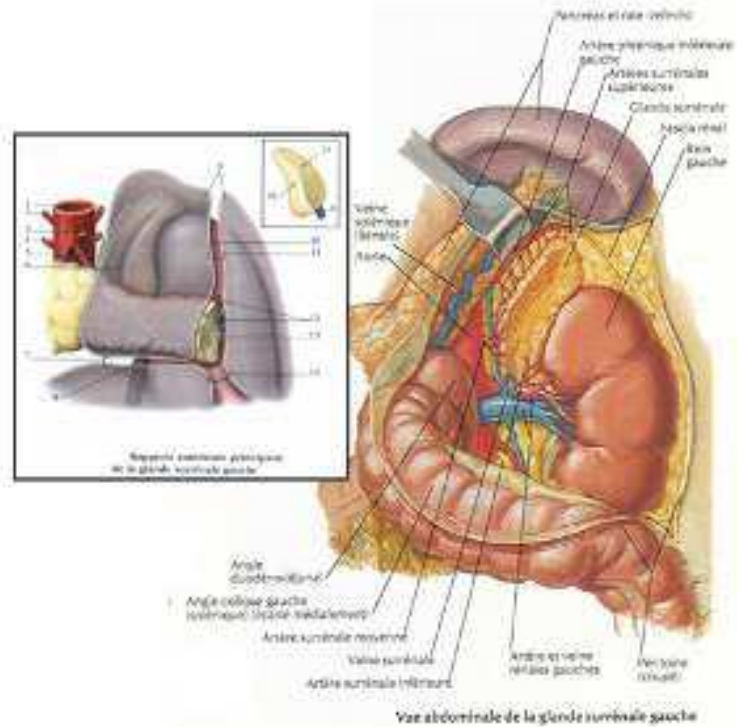
1. Anatomie externe :

C'est un conduit musculo-membraneux, blanc rosé, animé le long de son trajet de mouvements péristaltiques réguliers. Il s'étend de la jonction pyélo-urétérale jusqu'au méat urétéral dans la vessie. L'uretère chez l'adulte mesure de 25 à 30 cm de long.

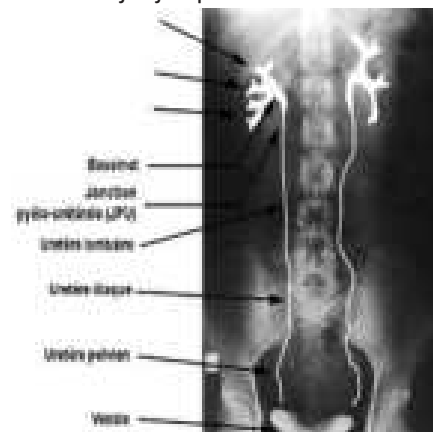
La consistance de la musculature de sa paroi, ainsi que ses mouvements péristaltiques caractéristiques facilitent l'identification per-opératoire de l'uretère.

Il présente deux parties : abdominale et pelvienne, dont la limite se situe au niveau du détroit supérieur.

La partie abdominale de l'uretère est formée, à son tour, de deux segments : lombaire et iliaque. La partie pelvienne de l'uretère sera traitée indépendamment dans le chapitre anatomie du pelvis. La partie abdominale de l'uretère mesure environ 10 à 12 cm. L'uretère lombaire fait 6 cm, et le segment iliaque mesure 4 cm.



La partie abdominale de l'uretère descend verticalement et légèrement en médial jusqu'au détroit supérieur (uretère lombaire), où il décrit une courbure à concavité postérieure, épousant les vaisseaux iliaques (uretère iliaque). L'uretère, devenu pelvien, continue son trajet jusqu'à la vessie.



A l'état de vacuité, l'uretère est aplati. Le long de son trajet, le diamètre de la portion abdominale de l'uretère varie de 4 à 10 mm, avec 2 rétrécissements physiologiques :

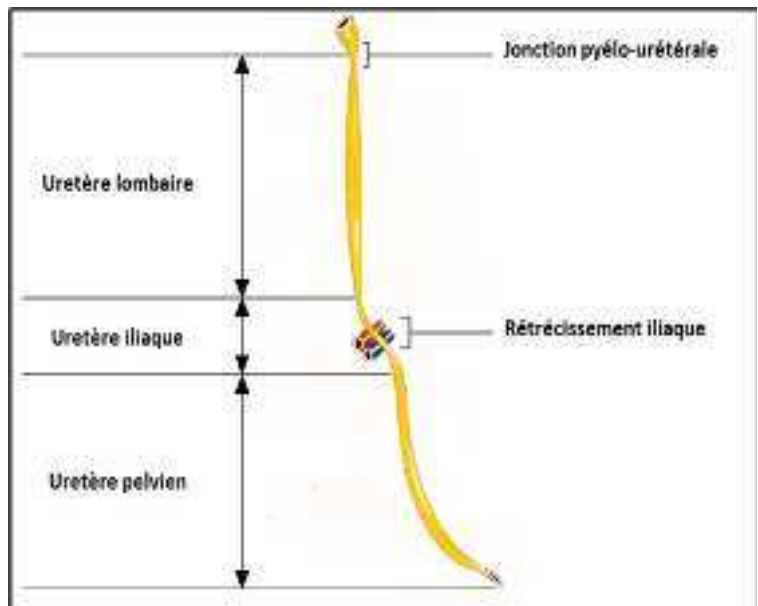
- A son origine, au niveau de la jonction pyélo-urétérale.
- Au niveau du croisement avec les vaisseaux iliaques.

Ces rétrécissements constituent les sièges de prédilection pour l'enclavement des calculs urétéraux.

2. Morphologie interne :

Les uretères sont des conduits musculaires cylindriques, constituées de 3 tuniques :

- Une muqueuse, l'urothélium qui est en continuité avec celle du pyélon et de la vessie.
- Une musculuse dont la composition est la même que celle du pyélon, dans les deux tiers proximaux de l'uretère, et qui dans son tiers inférieur se compose de 3 couches : longitudinales interne et externe, et circulaire moyenne.
- Une adventice ou le fascia péri urétéral, qui contient des vaisseaux, des nerfs et du tissu adipeux sur la face dorsale, constituant ainsi une étroite lame porte-vaisseaux. La face ventrale de ce fascia est accolée au péritoine pariétal postérieur.



3. Rapports :

Les rapports des uretères diffèrent selon leur segment (lombaire, iliaque), le côté (droit, gauche), et le sexe.

La partie abdominale de l'uretère se situe dans l'espace rétropéritonéal et présente deux segments : Uretère lombaire et uretère iliaque.

3.1 L'uretère lombaire :

3.1.1 Rapports postérieurs :

Il repose, par l'intermédiaire de la graisse pararénale homolatérale, sur le fascia iliaque qui recouvre le muscle grand psoas. Sous ce fascia chemine le nerf génito-fémoral qui chemine en bas et latéralement. La jonction pyélo-urétérale se projette habituellement en regard du processus transverse de la vertèbre L2. L'uretère lombaire se projette le long de son trajet sur les processus transverses de L2 à L5, dont ils sont séparés par le grand psoas.

3.1.2 Rapports antérieurs : Ils sont différents à droite et à gauche.

• Uretère droit :

Il répond à la partie descendante du duodénum (D2) et au genius inferius par le fascia de Treitz, puis au mésocôlon ascendant.

Il est croisé par les vaisseaux gonadiques (testiculaires ou ovariens) en projection de la vertèbre lombaire L3, pour se placer en dedans de ces vaisseaux en dessous du croisement. Il est également croisé par les vaisseaux coliques droits et iléo-coliques.

• Uretère gauche :

Il est recouvert par le mésocôlon descendant. Il est croisé par les vaisseaux gonadiques gauches, en projection de L3 et par les vaisseaux coliques gauches.

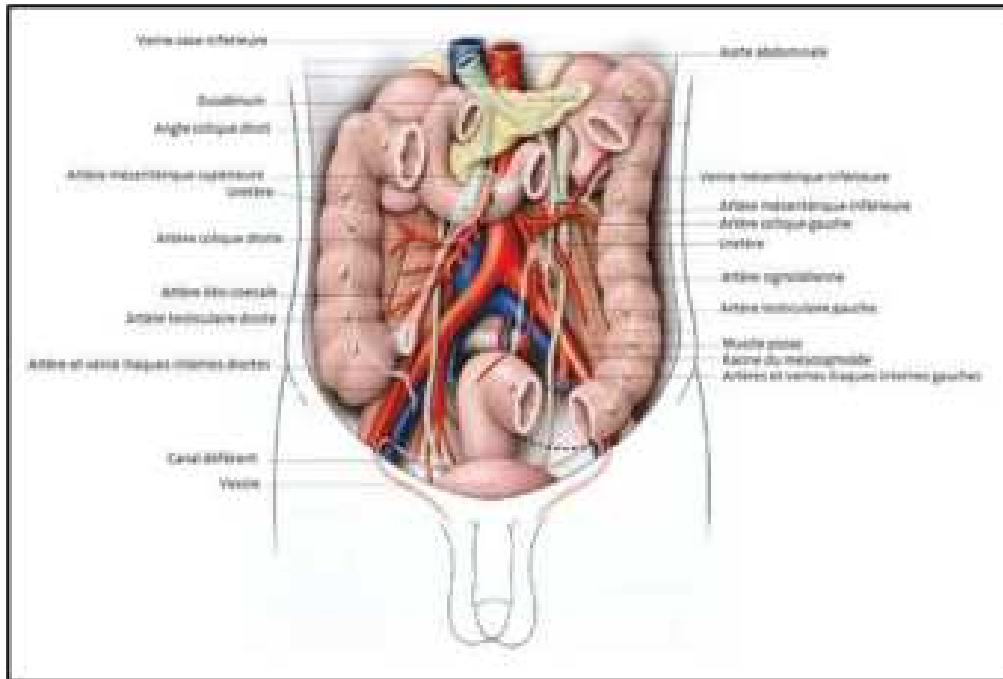
3.1.3 Latéralement :

Chaque uretère répond au pôle inférieur du rein, puis répond à droite au côlon ascendant et à gauche au côlon descendant.

3.1.4 Médialement :

L'uretère droit est à 2 cm de la veine cave inférieure et aux lymphonœuds latéro-caves.

L'uretère gauche longe l'aorte abdominale et répond aux lymphonœuds latéro-aortiques.



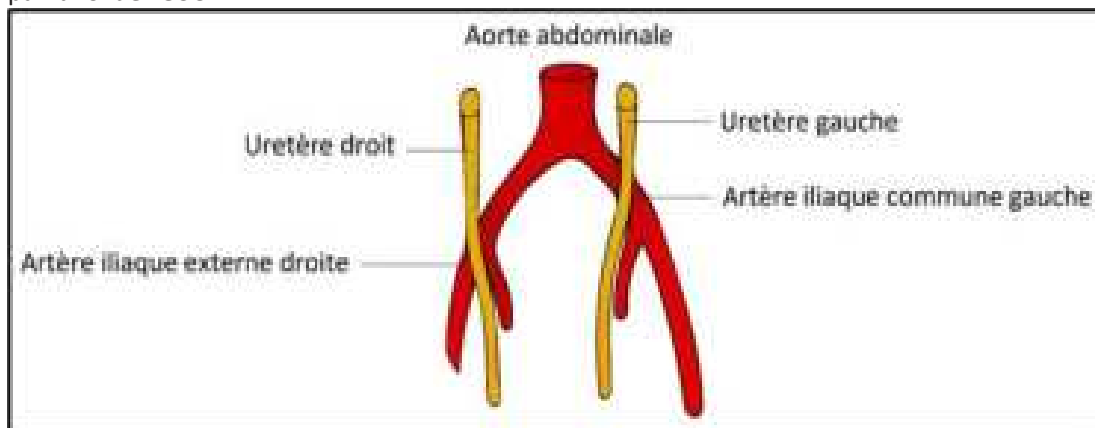
3.2 L'uretère iliaque :

3.2.1 En arrière

A son entrée dans le détroit supérieur, les uretères passent en avant des vaisseaux iliaques.

Il se projette sur l'épine iliaque postéro-supérieure

L'uretère droit répond aux vaisseaux iliaques externes, à 1,5 cm de l'origine de l'artère iliaque externe. L'uretère gauche répond à la terminaison des vaisseaux iliaques communs. Cette variation de rapport par rapport aux vaisseaux iliaques est définie par **la loi de LUSCHKA**.



Ce rapport intime des uretères avec les axes iliaques justifie une grande attention lors de la chirurgie du carrefour aortique, pour éviter la lésion des uretères iliaques à ce niveau.

3.2.2 En avant

L'uretère droit est croisé par la racine du mésentère et les vaisseaux iléo-coliques.

L'uretère gauche est croisé par le mésocolon sigmoïde et les vaisseaux sigmoïdiens.

3.2.3 Latéralement

Ils répondent au bord médial du muscle grand psoas, et aux vaisseaux gonadiques qui leur restent parallèles.

4. Vascularisation :

4.1 Artères :

L'uretère est irrigué par des artères urétériques d'origines diverses.

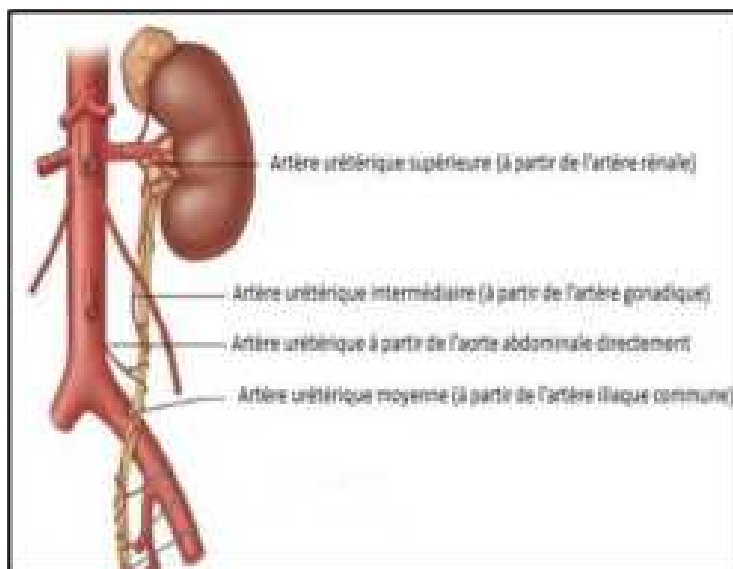
4.1.1 Origines :

Les artères urétériques antéro-supérieures et postéro-supérieures : elles naissent respectivement des branches antérieure et postérieure de l'artère rénale. Elles peuvent naître aussi des artères segmentaires supérieure ou postérieure. Elles sont destinées aux faces correspondantes du pyélon et de l'uretère.

L'artère urétérique intermédiaire, parfois double, prenant naissance de l'artère gonadique lorsqu'elle croise l'uretère.

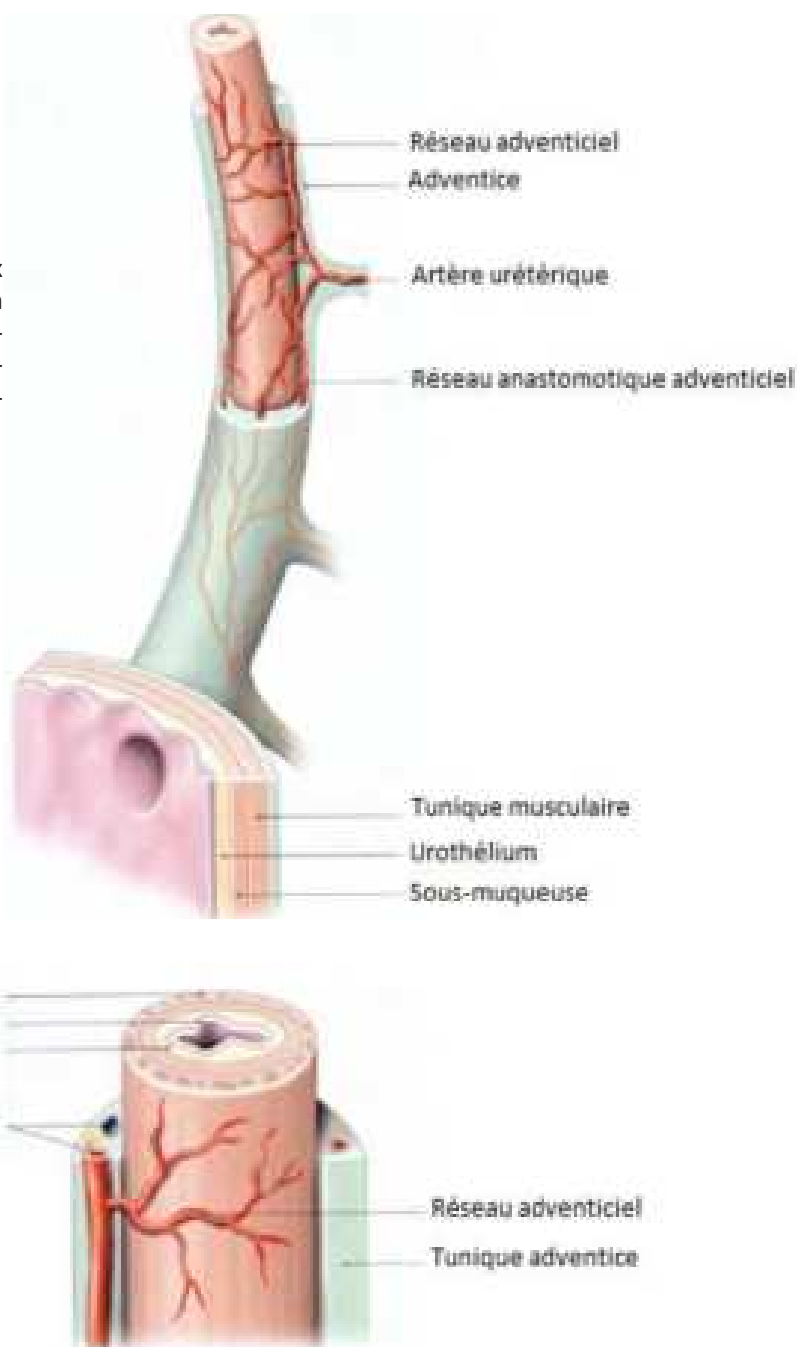
L'artère urétérique moyenne : Elle est inconstante, naît de l'artère iliaque commune. Elle est plus fréquente à gauche.

L'artère urétérique inférieure : Elle prend son origine au niveau de l'artère utérine ou déférentielle.



4.1.2 Distribution :

Chaque artère urétérique se divise en deux branches au contact de l'uretère pour former un réseau anastomotique adventiciel, qui est une excellente voie de suppléance permettant de disséquer l'uretère sur une grande longueur, à condition de respecter l'adventice.



Lors de la greffe rénale, il faut veiller à bien disséquer l'uretère sur une longueur suffisante mais en veillant à bien respecter l'adventice urétérale, qui est le support de la vascularisation de l'uretère.

4.2 Veines :

Les veines urétériques se drainent dans les veines rénales, veines gonadiques (testiculaire ou ovarique), vésicale chez l'homme et utérine chez la femme.

4.3 Lymphatiques :

Le plexus adventiciel se draine dans les nœuds lymphatiques latéro-caves, latéro-aortiques, iliaques communs, iliaques externes et iliaques internes.

4.4 Nerfs :

Les nerfs urétériques dérivent des plexus rénaux, testiculaires ou ovariens, et hypogastriques inférieurs. Ils contiennent des neurofibres sympathiques et parasympathiques (Nerf vague).

RÉFÉRENCES :

1. Kamina P. Anatomie clinique : Tome 3 .3e édition. Paris : Maloine, 2009.
2. Henry N, Sèbe P. Anatomie des reins et de la voie excrétrice supérieure. EMC - Néphrologie 2008 :1-10 [Article 18-001-C-10].
3. Rouvière H, Dalmas A. Anatomie humaine ; descriptive, topographique. Tome2, Tronc, 15ème édition Masson Paris ,2002 ; 725
4. Vacher P. Anatomie du rétropéritoine Ronéo3- UE4 cours n°3. 2017
5. Delmas V, Benoit G. Anatomie du rein et de l'uretère. Encycl Méd Chir,Elsevier Masson. Néphrologie 2001; 18-001-C-10.
6. Netter F. Atlas d'anatomie humaine. 5ème édition : Masson.
7. Bouzouita A. Etude anatomique de la vascularisation rénale et ses rapports avec la voie excrétrice à propos de 80 cas [Thèse]. Médecine: Tunis; 2007.
8. Philippe C. UE5 - Anatomie du rétropéritoine. Chapitre 12 : Reins et vaisseaux. 2011/2012.
9. Duclos JM. Chirurgie de la glande surrénale. Encycl Méd chir, Techniques chirurgicalesUrologie 2003 ; 41-496,22p.
10. Saadi A. Etude anatomique des glandes surrénales applications dans les surrénalectomies laparoscopiques [Thèse]. Médecine: Tunis; 2018.
11. Philippe C. Anatomie chirurgicale des glandes surrénales. Monographies de l'Association française de chirurgie», édition Arnette, 2011.

L'URETÈRE ABDOMINAL

Conduit excréteur de l'urine, faisant suite au bassinet, il s'étend depuis le pôle inférieur de celui-ci jusqu'à la vessie. Ce conduit contractile présente deux parties, abdominale et pelvienne, dont la séparation est située au niveau du détroit supérieur.

Dans son segment supérieur lombo-iliaque, il a un trajet vertical descendant légèrement oblique en bas et en dedans depuis le pôle inférieur du bassinet, à hauteur du processus transverse de la deuxième lombaire, jusqu'au détroit supérieur qu'il croise pour pénétrer dans le pelvis.

A. GÉNÉRALITÉS :

1. TRAJET :

L'uretère est situé dans l'espace rétro et sous-péritonéal. Il présente à décrire 3 segments.

- **Lombaire pré-psyque** : à peu près vertical.
- **Iliaque** : il croise le détroit supérieur à 3 cm environ de la ligne médiane.
- **Pelvien** : il décrit une courbe concave en avant et en dedans. Il est divisé en trois parties :
 - une partie pariétale
 - une partie viscérale
 - une partie vésicale.

2 - DIMENSIONS :

La longueur fait approximativement 25 à 30 cm. Le calibre est de 3 à 5 mm. A l'état de vacuité, l'uretère est aplati.

3 - ASPECT :

L'uretère est blanc rosé, animé de mouvements péristaltiques réguliers caractéristiques.

B. RAPPORTS :

1. LE SEGMENT LOMBO-ILIAQUE :

Il est situé dans l'espace rétropéritonéal et présente deux segments : l'uretère lombaire et l'uretère iliaque.

A/ ANATOMIE DE SURFACE :

- **En arrière**, il se projette sur le sommet des processus (apophyses) transverses des vertèbres lombaires L3, L4 et L5.
- **En avant**, l'origine de la partie abdominale ou point urétérique supérieur est située à 4 cm de la ligne médiane.

L'extrémité inférieure de cette partie ou point urétérique inférieur, répond au tiers externe de la ligne unissant les deux épines iliaques antérosupérieures.

B/ L'URETÈRE LOMBAIRE :

- **En arrière** : Il repose sur le muscle grand psoas, sur lequel chemine le nerf génito-fémoral qui se dirige en bas et latéralement.
- **En avant** :
 - L'uretère droit : répond d'abord au fascia de Treitz qui le sépare du deuxième duodénum et du gène inférieurs. Plus bas, à la hauteur de la troisième vertèbre lombaire, le pédicule vasculaire de la gonade croise obliquement de haut en bas et de dedans en dehors la face antérieure de l'uretère. Plus en avant le fascia de Toldt accole le mésocôlon ascendant où cheminant les vaisseaux coliques droits qui croisent donc l'uretère : le côlon droit est situé un peu en dehors.

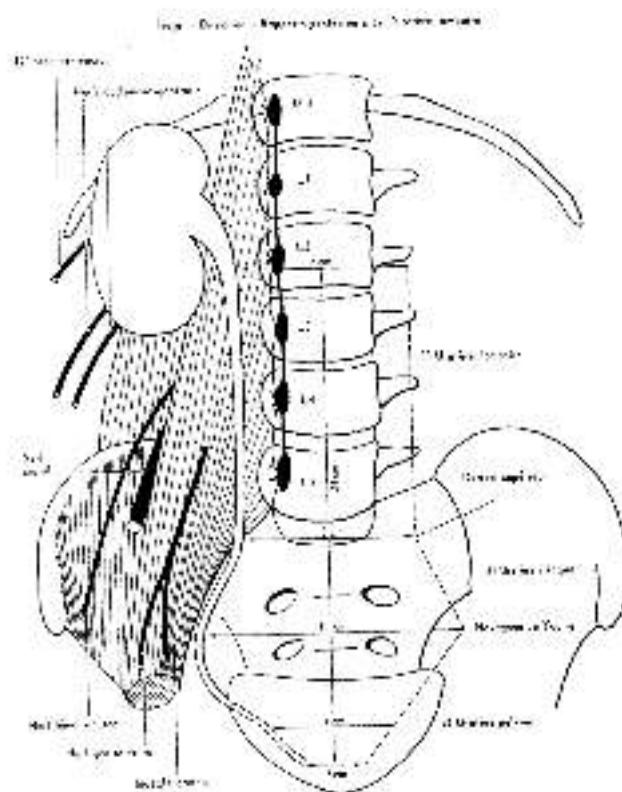


Schéma 14 : Uretère

–l'uretère gauche : répond dans toute son étendue au fascia de Toldt accolant le mésocôlon gauche où cheminent les vaisseaux coliques gauches qui croisent l'uretère. Le côlon descendant est situé plus en dehors. Il est également croisé, comme à droite, par les vaisseaux de la gonade, mais la veine, qui de ce côté se jette dans la veine rénale gauche, croise l'uretère plus haut qu'à droite.

• Latéralement :

Chaque uretère est adhérent à la partie infrahilaire des reins, puis répond à droite au côlon ascendant et à gauche au côlon descendant.

• Médialement :

L'uretère droit répond à la veine cave inférieure et à ses nœuds lymphatiques. L'uretère gauche, à l'aorte abdominale et ses nœuds lymphatiques

C. L'URETÈRE ILIAQUE :

• En arrière :

- Chez l'homme, l'uretère droit répond à l'origine des vaisseaux iliaques externes, et l'uretère gauche à la terminaison des vaisseaux iliaques communs.
- Chez la femme, chaque uretère répond à la terminaison des vaisseaux iliaques communs.

• En avant :

- L'uretère droit est croisé par la racine du mésentère et les vaisseaux iléo-coliques.
- L'uretère gauche est croisé par le mésocôlon sigmoïde et les vaisseaux sigmoïdiens

2. L'URETÈRE PELVIEN :

Chemine dans l'espace sous-péritonéal et présente trois segments, pariétal, viscéral et vésical.

A. TRAJET :

- Le segment pariétal** : descend contre la paroi pelvienne latérale en suivant le bord antérieur de la grande incisure ischiatique jusqu'au niveau de l'épine ischiatique où il s'incurve.
- Le segment viscéral** : se dirige en avant et médialement, à distance du diaphragme pelvien.

B. CHEZ L'HOMME :

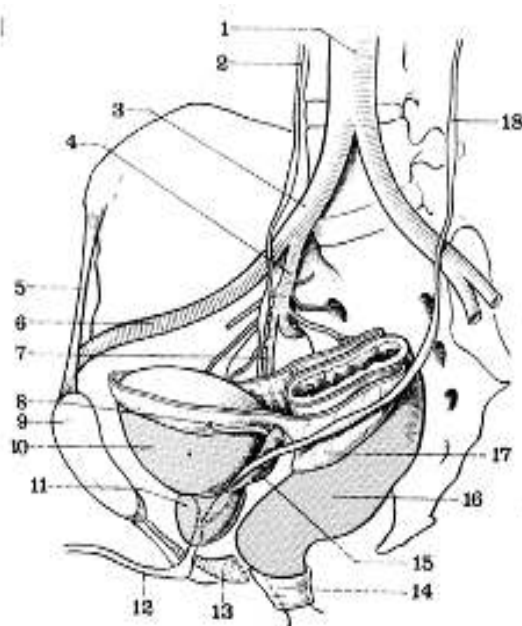
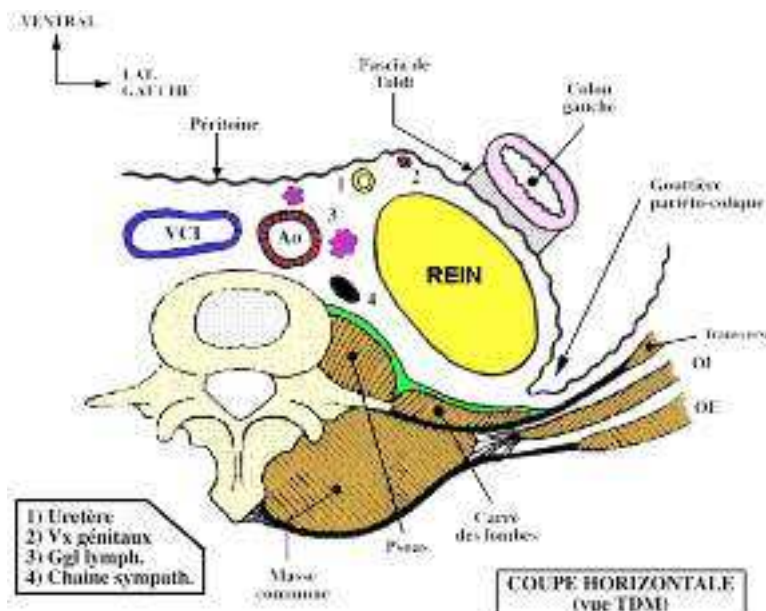
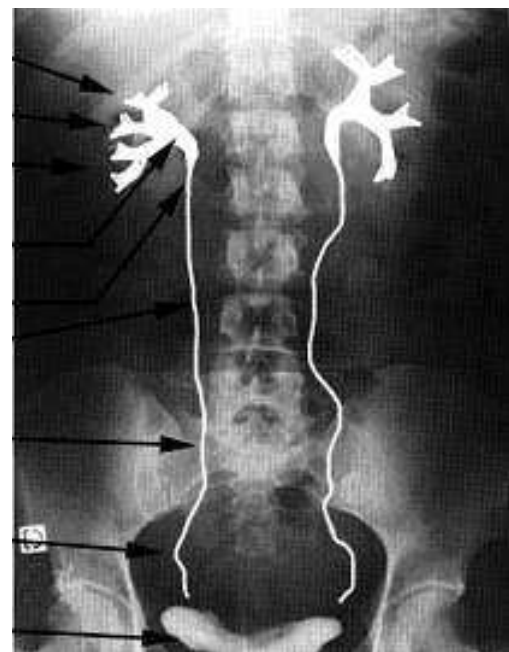
• Le segment pariétal :

Il descend en avant de l'artère iliaque interne. En dehors, il répond à la veine iliaque interne, au nerf obturateur, l'origine des vaisseaux ombilicaux, obturateurs et vésicaux inférieurs.

En dedans, il adhère à la face profonde du péritoine pelvien et répond au rectum dont le sépare la fosse para rectale.

• Le segment viscéral :

Il est surcroisé par le conduit déférent et traverse le ligament latéral de la vessie (lames recto-géni-to-vésico-pubiennes), entouré d'un plexus veineux et des rameaux du plexus hypogastrique inférieur. Puis



Vue endo-pelvienne droite du pelvis montrant le trajet des deux uretères (chez l'homme).

1. Aorte abdominale.
2. Uretère droit.
3. Artère iliaque primitive droite.
4. Artère iliaque interne droite.
5. Arcade crurale (ligament inguinal).
6. Artère iliaque externe droite.
7. Artère honteuse interne.
8. Canal déférent gauche.
9. Symphyse pubienne.
10. Vessie.
11. Prostate.
12. Urètre.
13. Muscle recto-urétral.
14. Sphincter anal.
15. Vésicule séminale gauche.
16. Ampoule rectale.
17. Cul-de-sac péritonéal latéro-rectal (de Waldeyer).
18. Uretère gauche.

Schéma 2 : Uretère pelvien chez l'homme

il passe légèrement au-dessus de la vésicule séminale pour atteindre la base de la vessie.

- **Le segment vésical :**

Chaque uretère traverse obliquement la paroi vésicale sur 1 cm environ. Leurs pénétrations sont distantes de 4 cm environ. Leurs aboutissements au niveau des angles latéraux

du trigone vésical sont distants de 2,5. Cet ostium vésical est elliptique.

C. CHEZ LA FEMME :

- **Le segment pariétal :**

Il descend en avant de l'artère iliaque interne.

En dehors, il est en rapport avec la veine iliaque interne, le nerf obturateur, les vaisseaux obturateurs, ombilicaux, utérins et vaginaux.

En dedans, il adhère à la face profonde du péritoine et répond au rectum dont le sépare la fosse pararectale

Par l'intermédiaire du péritoine pelvien, la présence de l'ovaire

Chez la nullipare : l'uretère croise en profondeur la fossette ovarienne.

Chez la multipare : la fossette ovarienne est plus postérieure entre l'uretère en avant, la paroi pelvienne postérieure, en arrière, et le ligament utéro-sacré, en dedans.

- **Le segment viscéral :**

Il se dirige en avant et médialement dans le paramètre le long du bord postéro médial de l'artère utérine. Ensuite l'artère utérine le croise en avant à 15 mm de l'isthme. A ce niveau il croise sur 1 à 2 cm le cul-de-sac latéral puis le cul-de-sac antérieur du vagin. Ensuite il parcourt brièvement le septum vésico-vaginal avant de pénétrer dans la vessie.

- **Le segment vésical :**

Il est identique à celui de l'homme.

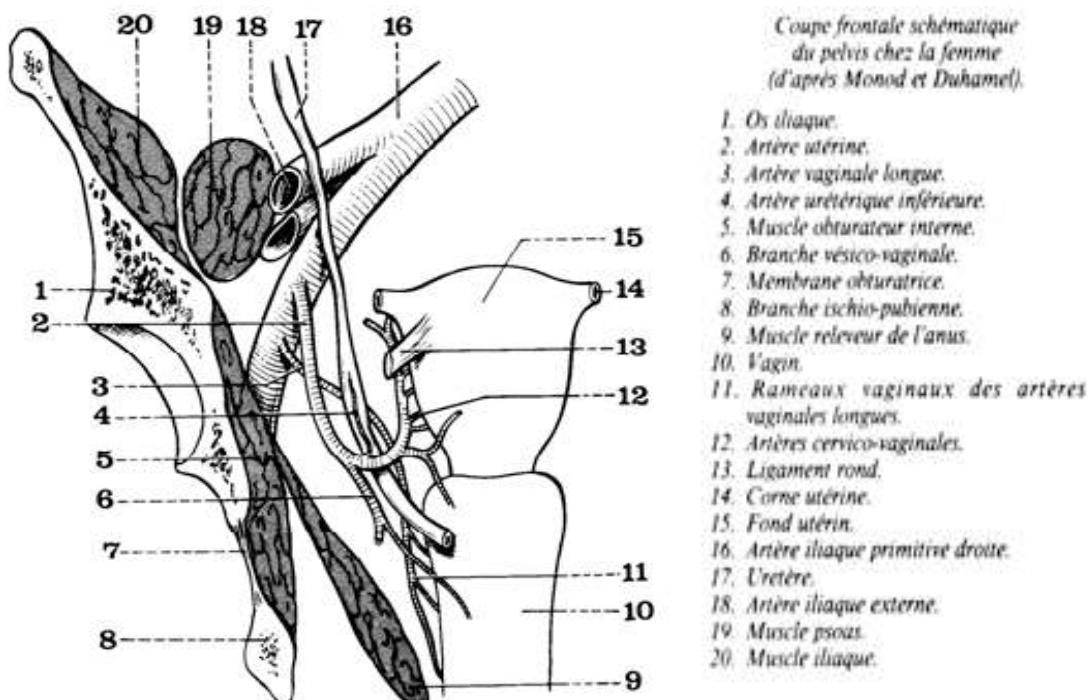


Schéma 3 : Uretère pelvien chez la femme

LA VESSIE

La vessie est un réservoir musculo-membraneux où s'accumule dans l'intervalle des mictions l'urine sécrétée de façon continue par les reins. Elle reçoit à sa partie postéro-inférieure les deux uretères et donne naissance à sa partie antéro-inférieure à son canal évacuateur : le canal de l'urètre. La vessie est caractérisée par son extensibilité. Aplatie lorsqu'elle est vide, elle peut se distendre considérablement en se remplissant; sa morphologie, sa situation et ses rapports sont donc différents selon son état de réplétion ou de vacuité.

ANATOMIE DESCRIPTIVE :

1) LA FORME de la vessie dépend de son état de réplétion.

° **VIDE** : on peut lui reconnaître :

- * une face craniale, triangulaire et concave
- * une face ventro-caudale, convexe
- * une face dorso-caudale ou bas-fond,

Ces 2 dernières se rejoignent au niveau du col vésical

* 3 angles, 2 postérieurs et 1 antérieur, répondant à l'ouraqué, résidu allantoïdien.

° **PLEINE** : elle devient globuleuse, essentiellement au dépend de sa face supérieure que l'on appelle fréquemment calotte ou dôme vésical.

2) DIMENSIONS :

- ° vide, elle mesure 6 cm de longueur et 5 cm de largeur.
- ° Pleine, elle double ses dimensions.
- ° En moyenne, elle contient 300 cm³, chez l'adulte, mais peut contenir jusqu'à 2 ou 3 litres.

3) SA CONFIGURATION INTERNE : Cystoscopie

- * Le col, marqué par la présence des sphincters, lisse et strié.
- * Le bas-fond vésical
- * Le trigone vésical, situé entre les 2 orifices urétéraux réunis par le bourrelet interurétrique et le col vésical
- * Le dôme ou calotte vésicale

4) SA STRUCTURE :

- * une **muqueuse**, appelée urothélium
- * une **muscleuse** ou **détrusor** qui selon les niveaux affecte une disposition circulaire, longitudinale ou oblique
- * un **adventice** cellulo nerveux et vasculaire
- * le péritoine recouvre partiellement la vessie au niveau du dôme. La vessie peut donc être abordée chirurgicalement par voie extrapéritonéale.

Les uretères traversent obliquement cette paroi vésicale pour s'ouvrir aux angles craniaux et latéraux du trigone. L'implantation très oblique de l'uretère dans la paroi vésicale et son amarrage aux plans musculaires du trigone crée un dispositif **anti-reflux** qui fait qu'à l'état normal, l'urine ne peut en aucun cas remonter à contre-courant vers le rein.

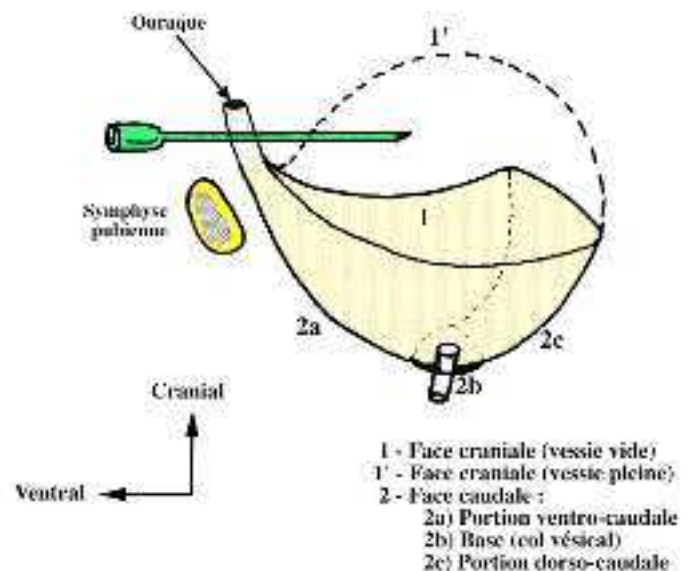


Figure 4 : Morphologie de la vessie

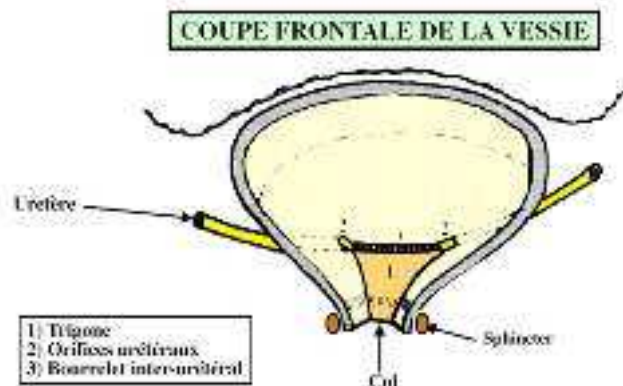


Figure 5 : Coupe frontale de la vessie

Trajet intra-mural de l'uretère

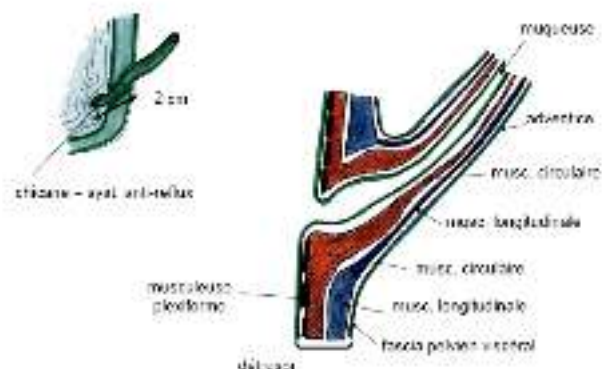


Figure 6 : Trajet de l'uretère

* **L'étude de la fonction vésicale** montre que l'organe est constitué de 2 parties :

- Le trigone, pièce musculaire maîtresse contrôlant les orifices urétéraux et le col vésical caractérisée par sa profondeur et sa fixité.
- La calotte ou dôme vésical, véritable chambre d'expansion, s'adaptant à chaque instant à son contenu et se contractant en force pour expulser l'urine au moment de la miction.

RAPPORTS DE LA VESSIE

1) RAPPORTS EN VENTRAL :

La vessie répond à la symphyse pubienne et à la paroi abdominale

- * Lorsque la vessie est vide, elle demeure enfouie en arrière de la symphyse pubienne : c'est un **organe purement pelvien**, ni palpable, ni percutable
- * Lorsque la vessie est pleine, elle se met en rapport avec la paroi abdominale antérieure : c'est un **organe abdomino-pelvien**. Elle devient alors palpable et percutable.
- * Elle reste séparée des parois abdomino-pelviennes par le plan cellulaire de glissement du fascia ombilico-prévésical.

2) RAPPORTS LATÉRAUX :

La vessie répond aux parois latérales ostéomusculaires du pelvis et aux vaisseaux iliaques.

3) RAPPORTS EN CAUDAL :

La vessie répond au plancher pelvien et surtout à la partie élévatrice du muscle élévateur du rectum

4) RAPPORTS EN DORSAL :

Ils sont différents chez l'homme et chez la femme :

- * **Chez l'homme**, la vessie répond à la prostate et aux vésicules séminales, puis au rectum par l'intermédiaire du septum rectoprostatique. Entre vessie et rectum se trouve le cul-de-sac rectogénital (de Douglas).
- * **Chez la Femme** : elle répond au vagin séparée de lui par le septum vésico-vaginal et à l'utérus. Le cul-de-sac rectogénital (de Douglas) n'est pas un rapport vésical.

5) RAPPORTS EN CRANIAL :

Le dôme vésical est qu'en partie tapissé de péritoine. On peut donc aborder la vessie chirurgicalement par voie extrapéritonéale. Par son intermédiaire, elle répond à la grande cavité péritonéale.

Chez la femme se crée entre utérus et vessie un cul-de-sac inter vésico-utérin dont la profondeur varie en fonction de l'état de remplissage de la vessie.

VASCULARISATION DE LA VESSIE :

1. LA VASCULARISATION ARTÉRIELLE :

Elle est répartie, chez l'homme comme chez la femme en trois pédicules :

- **LE PÉDICULE SUPÉRIEUR**, court et ramassé est formé par trois ou quatre branches qui naissent de la partie perméable de l'artère ombilico-vésicale au moment où elle longe le bord latéral de l'aponévrose ombilico-prévésicale. Il s'y ajoute parfois quelques rameaux nés de l'artère obturatrice.
- **LE PÉDICULE INFÉRIEUR**, le plus important est généralement étalé dans le sens antéro-postérieur. Il a un aspect et une constitution différents chez l'homme et chez la femme.
 - a. **Chez l'homme** : Le pédicule inférieur de la vessie est formé aux dépens de l'artère génito-vésicale, branche du tronc antérieur de l'hypogastrique qui après un court trajet sur la paroi pelvienne se dirige obliquement en bas, en avant et en dedans, croisant l'uretère par en avant pour venir se terminer au niveau de la vésicule séminale. Elle se divise à distance du bord latéral de la vessie en ses deux branches terminales.
 - La vésiculo-déférentielle qui, comme son nom l'indique, se ramifie à la face postérieure de la vésicule séminale et de la partie terminale du déférent en donnant quelques collatérales à la base vésicale.
 - L'artère prostatique qui se dirige en avant et se divise au contact de la base vésicale en une artère prostatique qui descend sur la base des faces latérales de la prostate et une branche vésicale inférieure qui s'applique sur la face postéro-latérale de la vessie; c'est essentiellement l'artère du trigone vésical.

b. Chez la femme : La vascularisation est assurée par les branches vésico-vaginales nées de l'artère utérine un peu en dehors de son point de croisement avec l'uretère dans le paramètre. Cheminant dans la cloison vésico-vaginale elles se ramifient à la base vésicale. Ce pédicule est complété par quelques rameaux issus de l'artère vaginale longue et des artères cervico-vaginales.

– **Le pédicule antérieur**, moins important est formé par l'artère vésicale antérieure qui, née de la honteuse interne dans le périnée antérieur, gagne la face antéro-inférieure de la vessie où elle se ramifie

2. LA VASCULARISATION VEINEUSE :

Les veines vésicales ont une disposition différente de celles des artères puisqu'il n'existe pas de veines ombilicales. Elles tirent leur origine d'un important réseau superficiel qui chemine dans l'épaisseur de la gaine allantoïdienne, particulièrement à la face antérieure de la vessie. Les veines efférentes de ce réseau superficiel se groupent en **trois pédicules** :

- **Un pédicule antérieur** formé par deux volumineuses veines paramédianes qui descendent sur la face antérieure de la vessie et se déversent en bas dans le plexus veineux préprostatique de Santorini, chez l'homme et de là gagnent les veines honteuses internes.
- **Un pédicule latéral**, le plus important qui se jette dans les plexus veineux vésico-prostatiques et de là gagne les veines vésicales.
- **Un pédicule postérieur**, rejoignant les veines séminales et déférentielles chez l'homme, les veines vésico-utérines chez la femme pour rejoindre plus loin les veines hypogastriques

3. LES LYMPHATIQUES:

Les lymphatiques vésicaux prennent leur origine à partir de la musculuse et de la muqueuse. Ceux de la face antérieure présentent quelques ganglions paravésicaux et vont se jeter dans les **ganglions iliaques externes**. Les lymphatiques de la partie postérieure de la vessie se rendent aux ganglions de la **bifurcation de l'hypogastrique**.

Les lymphatiques du col vésical longent les lames sacro-recto-génito-vésico-pubiennes pour gagner les **ganglions du promontoire**.

4. LES NERFS vésicaux proviennent d'une part des troisième et quatrième nerfs sacrés, d'autre part et surtout du plexus hypogastrique. Ils gagnent la vessie en cheminant le long des lames sacro-génito-pubiennes en passant en dehors des vésicules séminales chez l'homme, à l'intérieur du paramètre, au-dessus de l'uretère, chez la femme.

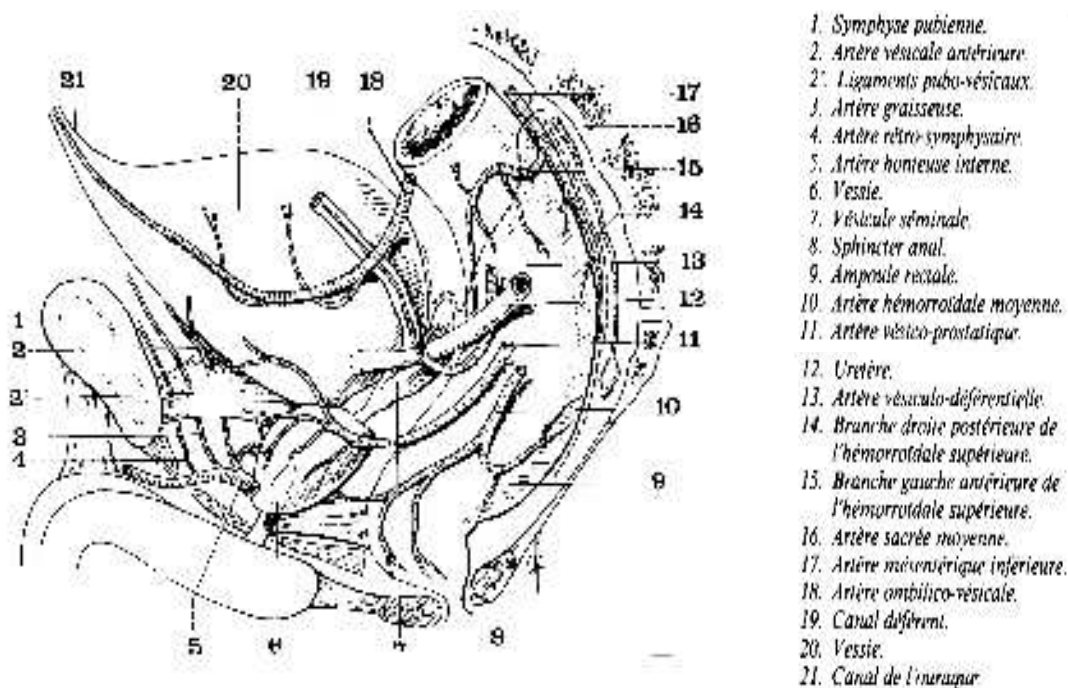


Schéma 7 : Vascularisation artérielle de la vessie chez l'homme

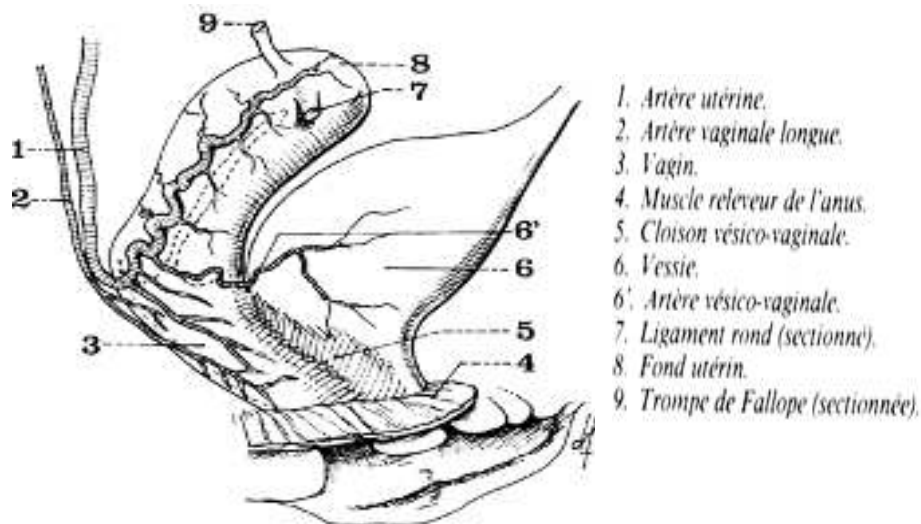


Schéma 8 : Vascularisation artérielle de la vessie chez la femme

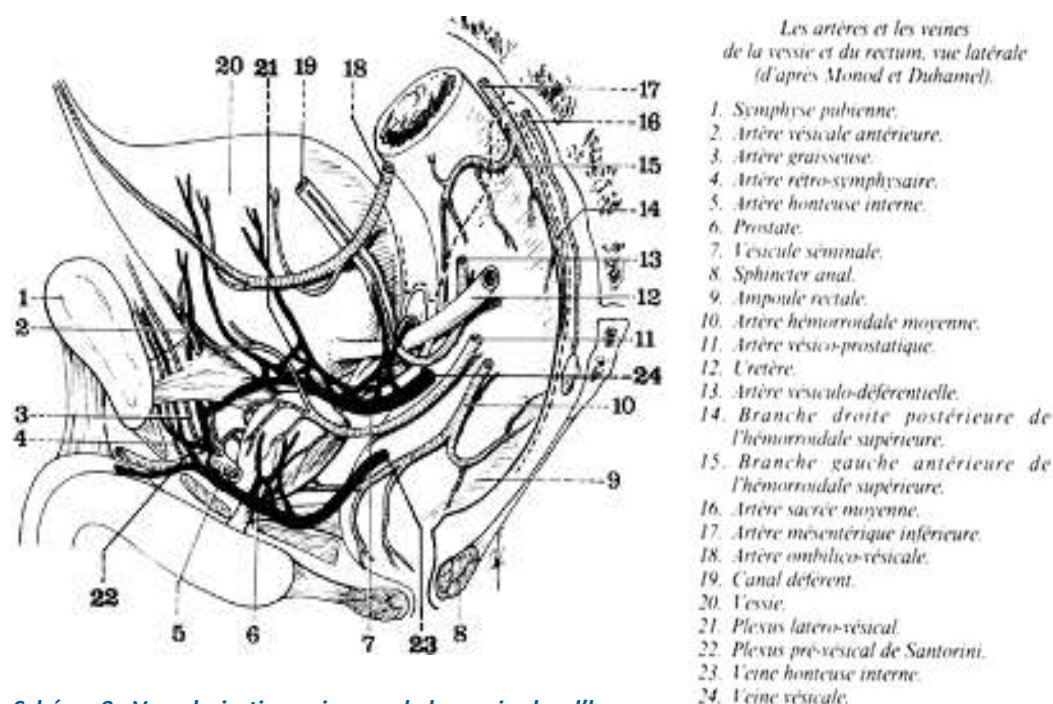


Schéma 9 : Vascularisation veineuse de la vessie chez l'homme

L'URETHRE MASCULIN

Il s'étend du col de la vessie et se termine à l'extrémité du pénis, au niveau du gland, par le méat urétral.

Il mesure, en moyenne, 16 cm de long.

On lui reconnaît **2 parties** : l'urètre postérieur et l'urètre antérieur.

1) URÈTRE POSTÉRIEUR :

L'urètre postérieur qui comprend l'urètre prostatique et l'urètre membraneux :

* URÈTRE PROSTATIQUE :

La prostate contient l'urètre prostatique qui est entouré du **sphincter lisse**, cependant que le **sphincter strié** refoulé par le développement de la prostate n'adopte une disposition véritablement en sphincter qu'au niveau du bec de la prostate.

A sa partie moyenne, l'urètre présente :

- * une saillie dorsale, le **veru montanum** (ou **colliculus séminal**). A sa partie supérieure, existe 2 replis, les **freins** du colliculus, dont l'hypertrophie peut entraver la miction, surtout chez le garçon (valves de l'urètre)
- ° au centre duquel s'ouvre l'**utricule prostatique**, résidu embryonnaire, d'environ 1 cm de long. Il est borgne.
- ° avec de chaque côté, les orifices des **canaux éjaculateurs** qui traversent obliquement la prostate.
- * Le **veru montanum** (colliculus séminal) est constitué de tissu érectile. Lors de l'érection, il se dilate, basculant vers la paroi ventrale de l'urètre, empêchant d'une part la miction lors de l'éjaculation et évitant que cette éjaculation ne soit rétrograde.

* **URÈTRE MEMBRANEUX** : c'est la courte portion qui traverse le plancher pelvien

2) URÈTRE ANTÉRIEUR

L'urètre antérieur est formé par l'**Urètre spongieux** :

Appelé ainsi, car il est englobé dans une formation érectile, le corps spongieux. Il reçoit les **glandes bulbo-urétrales** qui assurent une lubrification de l'urètre. Dans sa portion juxta méatique, au niveau du gland, il s'élargit en une **fossette naviculaire**.

Lorsque le pénis est flaccide, la direction de l'urètre est d'abord ventrale puis l'urètre se coude en caudal à l'intérieur de la verge. Ainsi, l'urètre présente un **trajet en « S » inversé** avec 2 courbures :

- * 1 dorsale et concave, en cranial et ventral, qui correspond à la jonction entre l'urètre membraneux et spongieux.
- * 1 ventrale et concave, en caudal et dorsal.

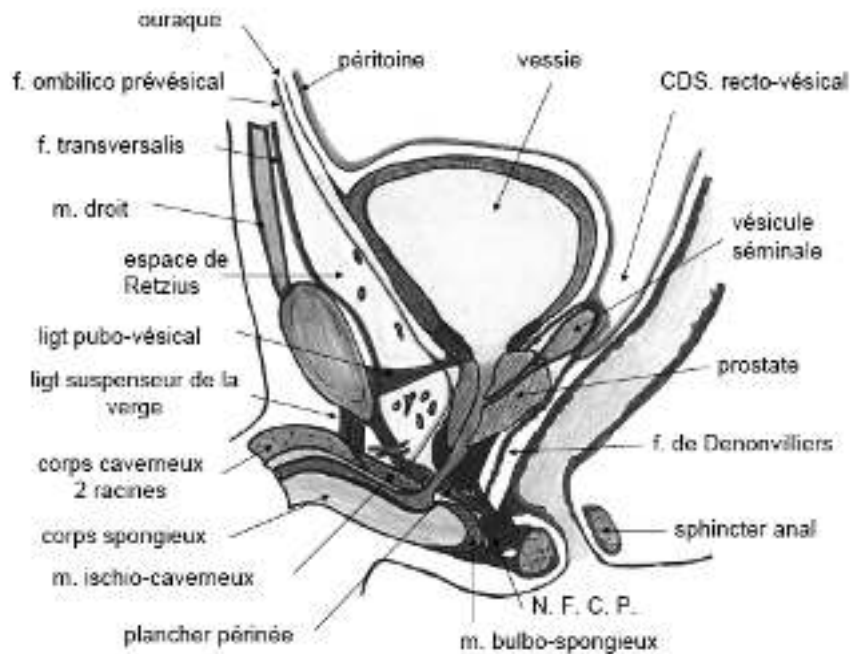


Schéma 1 : Coupe sagittale du pelvis et du périnée

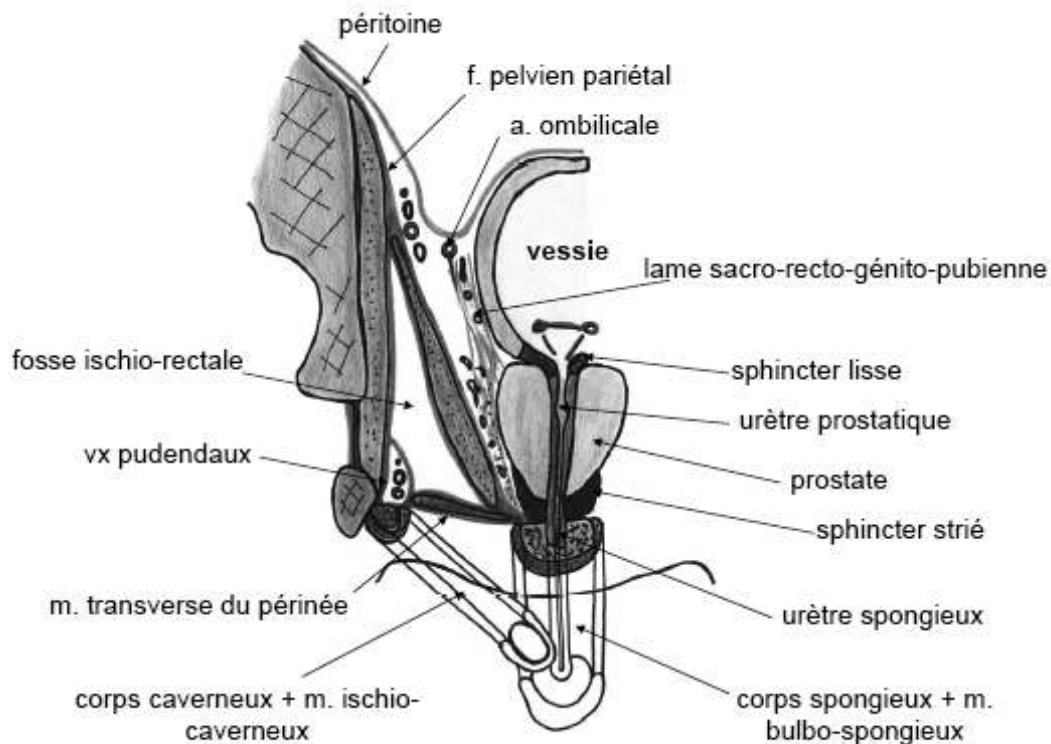


Schéma 2 : Coupe frontale du pelvis et du périnée

L'URETHRE FÉMININ

Il s'étend du col de la vessie jusqu'à la vulve où il s'ouvre par un orifice légèrement proéminent.

Il décrit dans son ensemble une courbe concave en ventral. Il mesure, en moyenne, 3 cm de long.

On lui décrit 2 parties :

1) UNE PARTIE PELVIENNE : entre le col et le muscle élévateur de l'anus. A sa partie supérieure se trouvent les sphincters, lisse et strié. Cette partie reste séparée du vagin par le septum vésico-vaginal.

2) UNE PARTIE PÉRINÉALE : entre muscle élévateur et vulve. Cette partie est étroitement unie au vagin par une lame cellulo-fibreuse -> danger de fistule urétrale dans la chirurgie vaginale.

APPAREIL GÉNITAL MASCULIN

Les objectifs éducationnels

Au terme de son apprentissage, l'étudiant devra être capable de :

- 1) Étudier l'anatomie topographique de l'appareil génital masculin
- 2) Reconnaître les différents organes de l'appareil génital masculin
- 3) Décrire l'anatomie descriptive de l'appareil génital masculin
- 4) Décrire la vascularisation de l'appareil génital masculin

INTRODUCTION

L'appareil génital masculin comprend les organes qui ont pour fonction de produire les spermatozoïdes et de les introduire dans les organes génitaux féminins pour fertiliser un ovule. En plus les testicules sécrètent les hormones mâles.

Après le testicule, il y a les **voies spermatiques** : elles commencent au contact des testicules par un organe : l'**épididyme**. Celui-ci va se poursuivre par le canal excréteur du testicule : le **canal déférent** qui pénètre dans l'abdomen en franchissant la paroi ; il se termine au niveau de la base de la vessie en se réunissant au canal excréteur d'un petit réservoir : la **vésicule séminale**. La réunion de ces 2 éléments forme le **canal éjaculateur** qui vient s'ouvrir dans l'**urètre prostatique**. À ces voies sont annexées une glande, la **prostate** et les **organes érectiles**.

1. TESTICULES ET VOIES SPERMATIQUES

1.1. ANATOMIE DESCRIPTIVE DU TESTICULE :

Le testicule, organe pair, a la forme d'un ovoïde aplati transversalement, dont le grand axe est oblique en bas et en arrière. Sa surface est lisse, nacrée. Sa consistance est ferme et régulière. Il mesure, en moyenne, 4 à 5 cm de

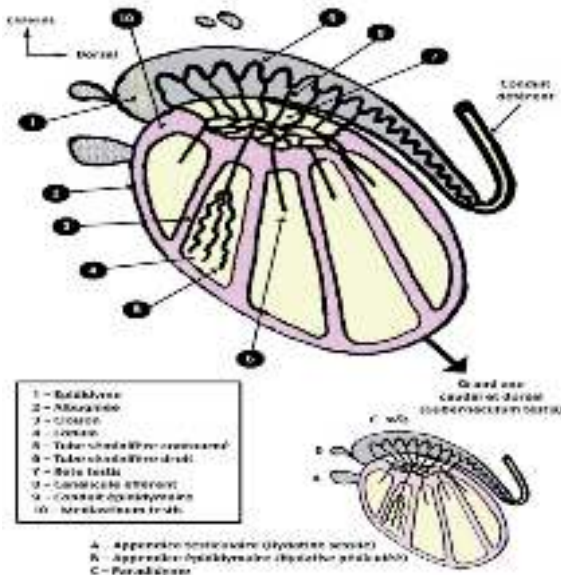


Schéma 1 : Testicule

long, 2,5 cm d'épaisseur et pèse 20 grammes. Il présente :

- * **2 faces**, latérale et médiale,
- * **2 bords**, dorso-cranial et ventro-caudal,
- * **2 pôles**, cranial et caudal

Il est coiffé, comme un **cimier de casque**, par l'**épididyme** qui s'étend tout au long de son bord dorso-cranial. Il est entouré d'une enveloppe résistante, l'**albuginée** qui envoie des cloisons à l'intérieur du testicule, le segmentant en lobules qui contiennent les tubes séminifères. L'albuginée présente un épaississement surtout localisé à la partie ventrale du bord dorso-cranial : le **médiastinum testis** qui va contenir le rete testis.

Le testicule est fixé à la paroi scrotale, au niveau de son pôle inférieur, par un ligament, le **gubernaculum testis**.

1.2. ANATOMIE DESCRIPTIVE DES VOIES SPERMATIQUES :

1.2.1. VOIES SPERMATIQUES INTRATESTICULAIRES :

- Tubes séminifères **contournés**
- Tubes séminifères **droits**
- **Rete testis**, réseau de canalicules anastomosés contenu dans un épaississement de l'albuginée : le **médiastinum testis**
- **Canalicules efférents** se déversant dans le **conduit épididymaire**

1.2.2. VOIES SPERMATIQUES EXTRATESTICULAIRES :

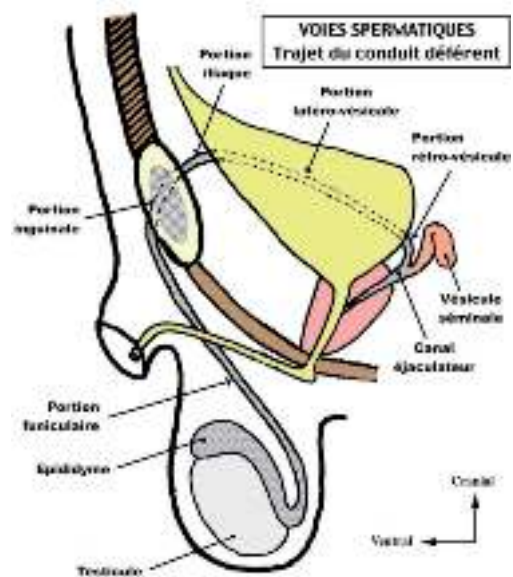


Schéma 2 : Voies spermatiques

présentent successivement des structures paires :

1) L'épididyme 2) Le conduit déférent 3) La vésicule séminale 4) Le canal éjaculateur

a. L'épididyme : organe allongé d'avant en arrière, accolé au bord dorso-cranial du testicule. On peut lui reconnaître :

- Une extrémité antérieure renflée, la **tête**, plaquée contre le testicule auquel il est uni par le médiastinum testis
- Un **corps prismatique**, triangulaire, séparé du testicule
- Une extrémité postérieure, aplatie, libre, la queue qui se continue avec le conduit déférent en formant avec lui un angle très aigu ouvert en avant (**anse épididymo-déférentielle**).

b. Le conduit déférent : s'étend depuis la queue de l'épididyme jusqu'à la base de la prostate. Il chemine sur la face médiale du testicule puis traverse successivement la racine des bourses, la région inguinale, la fosse iliaque et la cavité pelvienne.

Sa longueur est de 35 à 45 cm. Son diamètre extérieur de 2 à 3 mm. Sa paroi très épaisse lui confère une résistance particulière qui permet de le palper facilement, car « **il roule** » sous les doigts.

c. La vésicule séminale : réservoir de spermatozoïdes et de sucs prostatiques (sperme) entre les éjaculations, de forme piriforme, elle s'unit au conduit déférent.

* La vésicule séminale coudée sur elle-même a une surface mamelonnée et bosselée.

* Sa longueur moyenne, une fois dépliée, est de 5 à 10 cm.

d. Le canal éjaculateur : formé par l'union de la vésicule séminale et du conduit déférent correspondant, est situé dans sa quasi-totalité dans l'épaisseur de la prostate. Il débouche dans la l'urètre au niveau d'une zone bombée, le **colliculus seminal** (ou veru montanum).

1.3. RAPPORTS DU TESTICULE ET DES VOIES SPERMATIKES

1.3.1 LES BOURSES :

Saillie volumineuse, impaire et médiane, elle est libre, sauf en haut où son extrémité supérieure, étroite et pédiculée. Adhère à la région pubienne.

Le scrotum est un sac libre et pendant qui contient les testicules. Sur sa face antérieure, un large sillon longitudinal, au fond duquel est marqué un raphé médian, le divise en deux lobes asymétriques, le gauche étant plus bas situé que le droit. Chacun d'eux renferme le testicule, l'épididyme et la portion initiale du conduit déférent.

À l'intérieur de la bourse, le testicule et l'épididyme sont en partie recouverts d'une séreuse à 2 feuillets, d'origine péritonéale, la **tunique vaginale**. Elle recouvre la totalité de la face latérale du testicule et en partie seulement la face médiale de la glande. La vaginale se poursuit en cranial par le vestige du processus vaginal.

Les bourses sont constituées par une **évagination de la paroi abdominale** (on va donc retrouver tous les éléments constitutifs de cette paroi) : de la profondeur à la superficie :

- une tunique fibreuse profonde, le **fascia spermatique interne**, expansion du fascia transversalis.
- une tunique musculaire, appelée **crémaster** dépendant

de l'oblique interne et du transverse

- une tunique fibreuse superficielle, le **fascia spermatique externe**, mince, expansion du muscle oblique externe.
- un **tissu cellulaire** sous-cutané, extension du fascia superficialis
- la **peau**, fine et plissée, doublée par un muscle peaucier, le **dartos**.

À partir de la bourse va se former le **CORDON SPERMATIQUE** par conjonction du conduit déférent et des vaisseaux testiculaires et épididymaires.

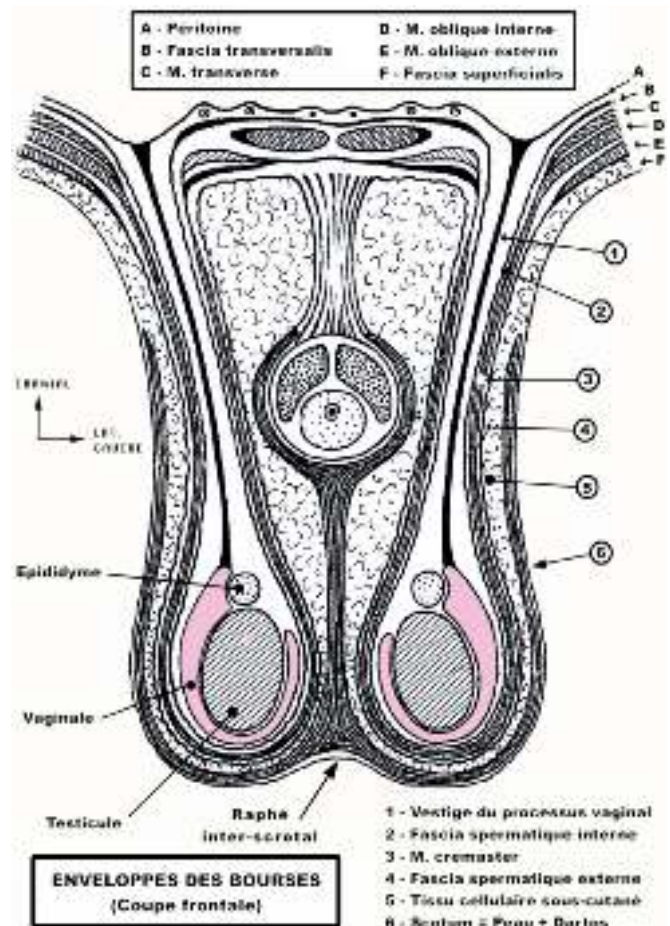


Schéma 3 : Enveloppes des bourses

1.3.2. LE CORDON SPERMATIQUE :

Le cordon spermatique suspend le testicule et l'épididyme. Il est contenu dans une **tunique fibreuse**, centré par le **vestige du processus vaginal**. Il contient le conduit déférent, les vaisseaux du testicule et de l'épididyme.

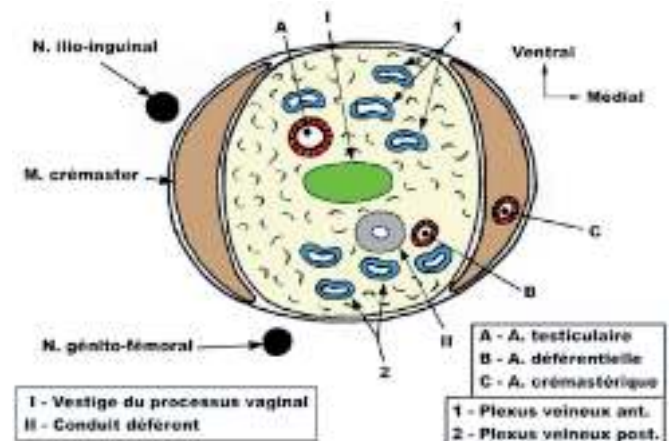
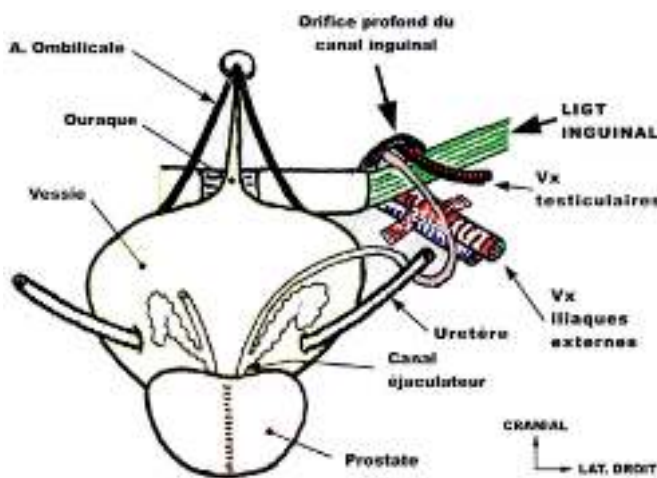


Schéma 4 : Coupe cordon spermatique

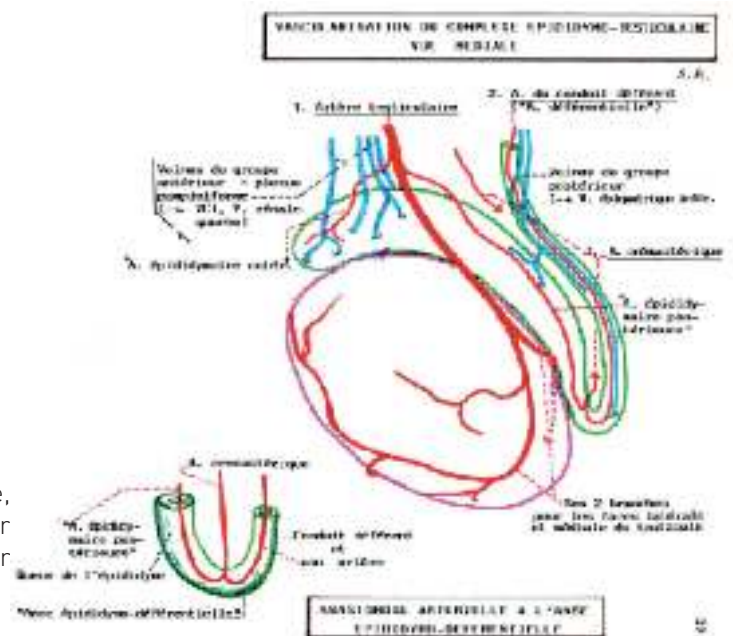
* portion inguinale, dans le canal inguinal, entre orifice inguinal superficiel et orifice inguinal profond. On y retrouve aussi des nerfs, ilio-inguinal et génito-fémoral.

- **Trajet latéro-vésical**, où il rentre en rapport avec les vaisseaux **iliaques externes**
- **Trajet rétro-vésical**, où après avoir **précroisé** l'uretère, il gagne la base de la vessie où ses rapports seront les mêmes que ceux des vésicules séminales.



Ces artères s'anastomosent entre elles formant la triple

c. Lymphatiques : ils gagnent, **sans relais intermédiaire**, les nœuds lymphatiques latéro-aortiques **immédiatement sous-rénaux (L2)**. Ce long drainage explique la difficulté du traitement et l'étendu du curage ganglionnaire dans le cancer du testicule.



- * d'appendice (hydatide) testiculaire ou épididymaire qui peut donner une symptomatologie évocatrice d'une torsion testiculaire

2. GLANDES ANNEXES

2.1. LA PROSTATE

C'est une glande annexe de l'appareil génital, développée autour de la portion initiale de l'urètre, au carrefour des voies urinaires et des voies spermatiques. Sa sécrétion contribue à la formation du liquide séminal. Son atteinte compromet la fertilité, l'éjaculation et la miction.

2.2.1. ANATOMIE DESCRIPTIVE :

a. Configuration externe :

La prostate a la forme générale d'une châtaigne, c'est à dire d'un cône aplati et présente :

- * une **face ventrale** plane, presque verticale
- * une **face dorsale**, convexe en caudal et dorsal, présentant un sillon médian émoussé qui paraît diviser la glande en deux lobes latéraux
- * un **sommet ou apex** caudal, encore appelé **bec** de la prostate, duquel paraît émerger l'urètre
- * une **base** craniale qu'un discret bourrelet transversal divise en 2 portions :
 - **Ventrale** répondant à la vessie
 - **Dorsale** répondant aux canaux déférents et aux vésicules séminales et dans laquelle plongent les **canaux éjaculateurs**.

Les dimensions moyennes de la prostate sont :

- * hauteur : 30 mm* largeur : 20 mm* épaisseur : 25 mm*
- Poids : 20 à 25 g

La prostate est **ferme et élastique** permettant de la reconnaître par le toucher rectal.

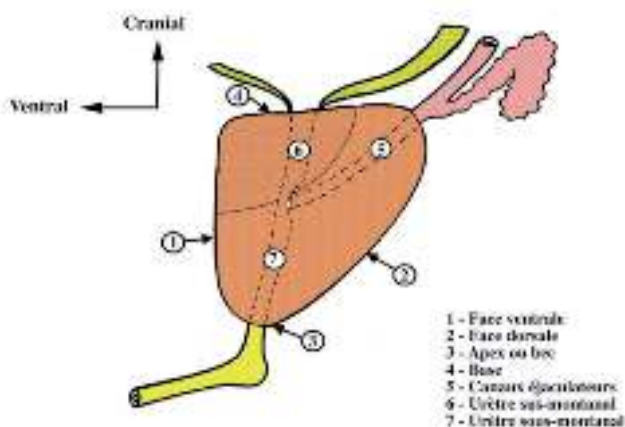


Schéma 7 : Vue latérale de la prostate

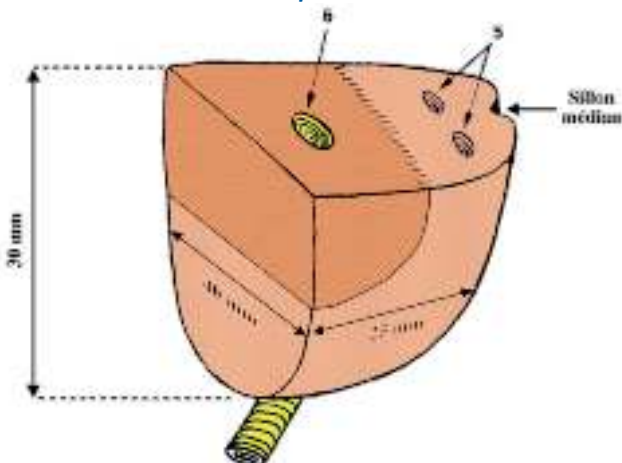


Schéma 8 : Configuration interne de la prostate

b. configuration interne :

La prostate est traversée par l'urètre et les voies spermatiques. Par rapport à ces formations, on distingue :

- Une **prostate ventrale** ou **isthme** situé en avant de l'urètre
- Une **prostate craniale** développée en arrière de l'urètre et au-dessus des conduits éjaculateurs
- Une **prostate caudale** développée en arrière de l'urètre et au-dessous des canaux éjaculateurs, en caudal et dorsal.

Dans la majorité des cas, l'**adénome prostatique** se développe aux dépens de la prostate craniale alors que le **cancer de la prostate** se développe à partir de la portion caudale.

2.2.2. RAPPORTS DE LA PROSTATE :

a. Rapports intrinsèques :

La prostate contient l'urètre prostatique qui est entouré du sphincter lisse au niveau du col vésical. Ce sphincter a une forme circulaire.

Le sphincter strié refoulé par le développement de la prostate n'adopte une disposition véritablement en sphincter qu'au niveau du bec de la prostate. Il entoure partiellement l'urètre au niveau de ses faces latérales et sa face antérieure.

À sa partie moyenne, l'urètre présente :

- * une saillie dorsale, le **veru montanum** (ou colliculus séminal). À sa partie supérieure existe 2 replis, les freins du colliculus, dont l'hypertrophie peut entraver la miction, surtout chez le garçon (valves de l'urètre)
 - au centre duquel s'ouvre l'**utricule prostatique**, résidu embryonnaire, d'environ 1 cm de long. Il est borgne.
 - avec de chaque côtés, les orifices des **canaux éjaculateurs** qui traversent obliquement la prostate.
- * Le **veru montanum** (colliculus séminal) est consti-

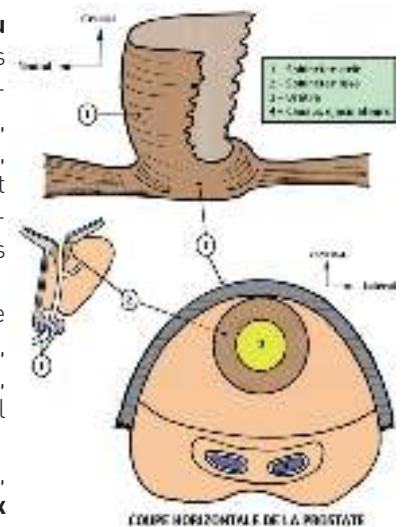


Schéma 9 : Sphincter Strié de l'urètre

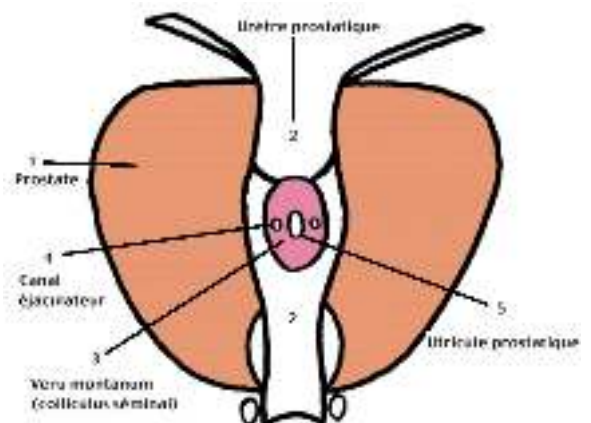


Schéma 10 : Coupe frontale de la prostate (vue antérieure)

tué de tissu érectile. Lors de l'érection, il se dilate, basculant vers la paroi ventrale de l'urètre, empêchant d'une part la miction lors de l'éjaculation et évitant que cette éjaculation ne soit rétrograde.

b. Rapports Extrinseques :

La prostate présente des rapports :

- * **en ventral**, la région rétro pubienne qui contient d'important plexus veineux prévésical : le plexus de Santorini
- * **en latéral**, les pédicules vasculaires génito-vésicaux
- * **en dorsal**, le rectum et ampoule rectale, séparé par le fascia de Dénonvillier (T.R ++)
- * **en cranial et ventral**, la vessie
- * **en cranial et dorsal**, les uretères, les vésicules séminales et les conduits déférents
- * **en caudal**, l'urètre qui s'engage dans le plancher pelvien.

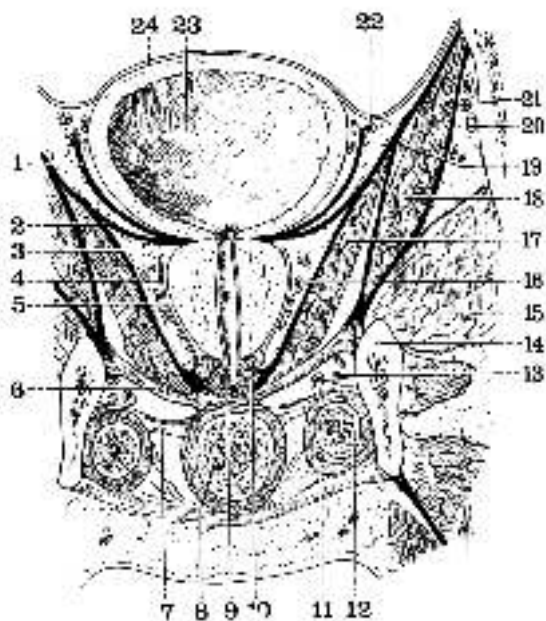


Schéma 11 : Coupe frontale du pelvis et du périnée (loge prostatique) Loge prostatique

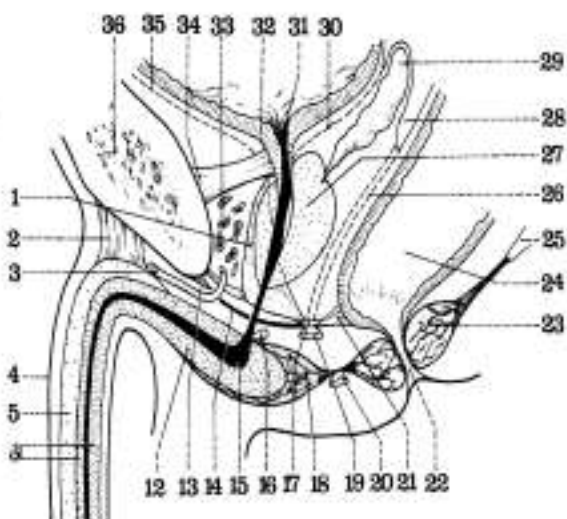


Schéma 12 : Coupe sagittale du pelvis et du périnée (Loge prostatique)

2.2.3. VASCULARISATION :

- * **Artères** : La prostate est vascularisée essentiellement par l'artère prostatique, branche collatérale du tronc ventral de l'artère iliaque interne.
- * **Veines** : se drainent vers la veine iliaque interne
- * **Lymphatiques** : nœuds iliaques internes et externes.
- * **Nerfs** : Plexus hypogastrique

3. LE PERINEE ANTERIEUR CHEZ L'HOMME. LE PÉRINÉE URO-GENITAL

3.1. DÉFINITION ET LIMITES DU PÉRINÉE :

Le Périnée est formé par la superposition des plans musculo-aponévrotique qui traversent le losange limité par :

- o En Antérieure : Symphyse pubienne
- o En Postérieure : Coccyx
- o De chaque côté : La branche ischio - pubienne, la tubérosité ischiatique et le ligament sacro- ischiatique

3.2. SUBDIVISIONS DU PÉRINÉE :

On dessine une ligne qui joint les 2 tubérosités ischiatiques et qui passe dans le Centre Tendineux du Périnée. Cette ligne divise le périnée en 2 triangles.

- o Triangle anal : Postérieur à la ligne
- o Triangle uro-génital : antérieur à la ligne

3.3. TRIANGLE URO-GENITAL

Ce triangle est divisé en 2 espaces :

3.3.1 L'ESPACE PROFOND DU PÉRINÉE :

Cet espace se trouve entre 2 fascias, le fascia supérieur du diaphragme uro-génital (Aponévrose périnéale moyenne), et le fascia inférieur du diaphragme uro-génital. Les 2 fascias sont attachés de chaque côté aux branches ischio-pubiennes. En avant et en arrière ces 2 fascias se fusionnent.

• Contenu de l'espace profond :

- Diaphragme uro-génital : C'est un muscle formé de 2 parties. La partie antérieure se nomme le muscle sphincter de l'urètre membraneux (c'est un sphincter volontaire). La partie postérieure se nomme muscle transverse profond du périnée.
- 2 glandes bulbo-urétrales de Cowper. Leurs conduits se terminent dans l'urètre spongieux.
- L'urètre membraneux (1-2 cm de longueur).
- Le paquet vasculo-nerveux honteux interne (Pudendal interne) formé par l'artère et la veine honteuses internes, des lymphatiques et le nerf dorsal de la verge cheminant dans l'épaisseur de l'aponévrose périnéale moyenne.

3.3.2. L'ESPACE SUPERFICIEL DU PÉRINÉE :

Cet espace se trouve entre 2 fascias qui sont le fascia inférieur du diaphragme uro-génital et le fascia de Colles (appelé fascia superficiel du périnée).

Le fascia de Colles est la continuation du fascia de Scar-

pa (fascia superficiel de l'abdomen). Il se prolonge pour recouvrir le pénis et le scrotum et de chaque côté, il est attaché aux rameaux ischio-pubiens et au fascia lata (le fascia profond de la cuisse). Postérieurement le fascia de Colles s'attache au centre tendineux du périnée et au fascia inférieur du diaphragme uro-génital. Il ne continue pas dans le triangle anal.

•Contenu de l'espace superficiel :

•Les corps érectiles:

Latéralement les deux corps caverneux et au-dessous le corps spongieux.

•Les muscles des corps érectiles :

Ces muscles sont annexés au corps érectile destiné à les comprimer pour entretenir l'érection. Ils sont au nombre de 3 de chaque côté.

•Muscle ishiocaverneux :

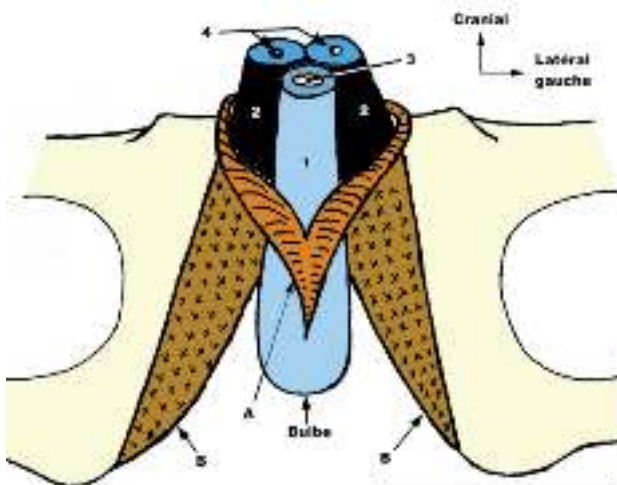
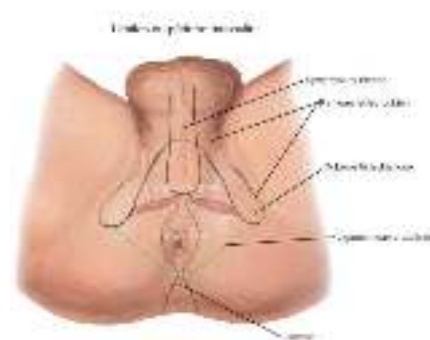
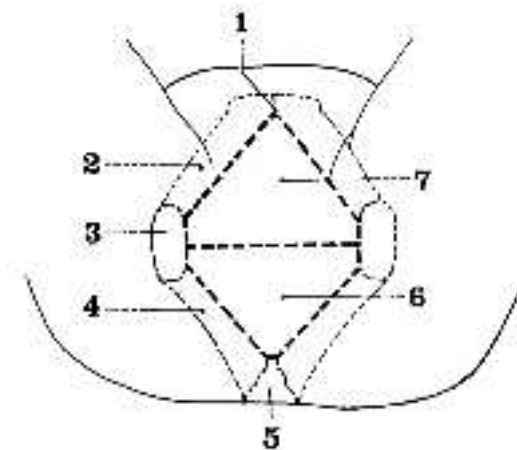
Enveloppe la face inférieure et latérale des corps caverneux depuis la branche ascendante de l'ischion jusqu'à l'albuginée.

•Muscle bulbo-caverneux :

Muscle aplati, enveloppe le bulbe et fusionne avec le muscle opposé. Les fibres les plus antérieures contournent les corps caverneux à la face dorsale.

•Muscle transverse superficiel du périnée :

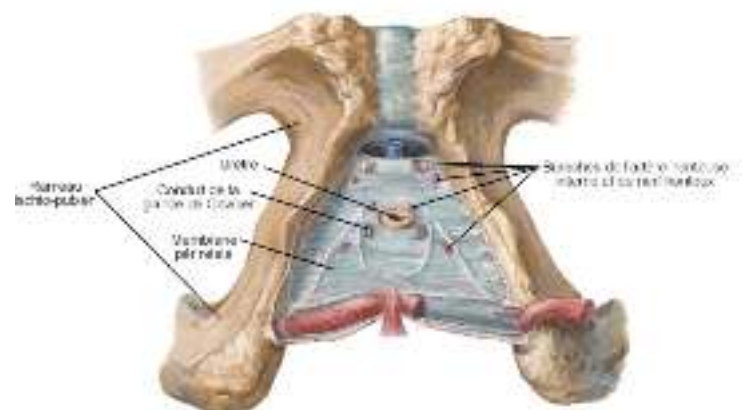
S'insère par sa base sur la face interne de l'ischion et par son sommet sur le raphé ano-bulbaire (noyau fibreux central).



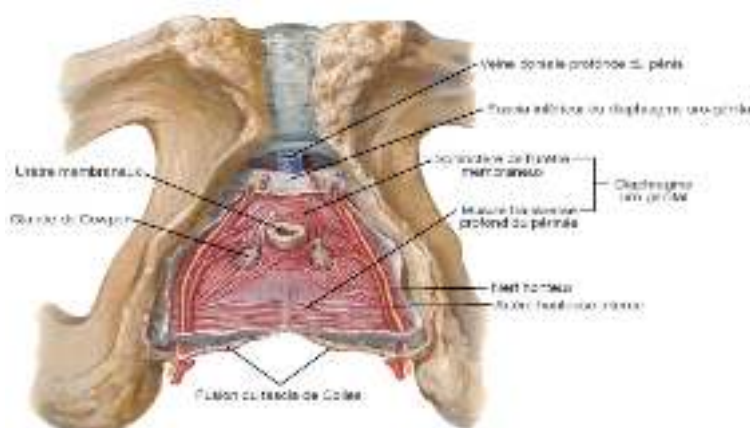
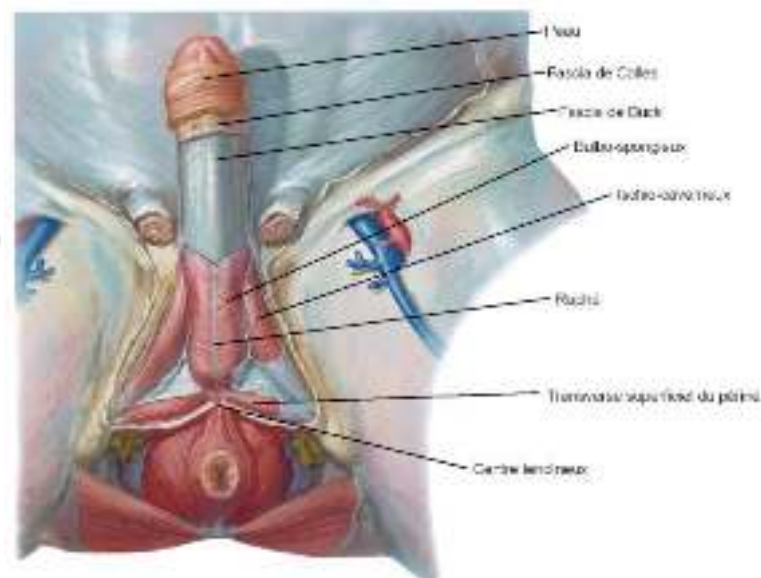
A - M. bulbo-caverneux
B - M. ischio-caverneux

1 - Corps spongieux
2 - Corps caverneux
3 - Urètre
4 - A. caverneuses (profondes)
5 - A. dorsales
6 - Veine dorsale superficielle

Fascia inférieur du diaphragme uro-génital (membrane périméale)



Espace superficiel du périnée et pénis



4. LA VERGE

La verge ou pénis est l'organe masculin de la copulation. Elle est constituée par des organes érectiles qu'entourent plusieurs enveloppes. Elle est aussi un des organes de la miction.

4.1. GÉNÉRALITÉS :

On peut isoler deux portions pénienues :

- L'une postérieure, qui prend naissance dans le périnée antérieur, formée par l'origine des corps érectiles ou racine de la verge.
- L'autre antérieure : libre et mobile, entourée d'enveloppes.

Le ligament suspenseur de la verge marque la limite entre les deux portions. Il s'insère

- * en haut, sur la symphyse pubienne et la partie voisine de la ligne blanche de l'abdomen
- * en bas, sur la face dorsale de la verge, se fixant à l'albuginée des corps caverneux, et les contournant sous forme d'une sangle.

4.2. CONFORMATION EXTÉRIEURE :

La verge présente deux portions : un corps et une extrémité antérieure ou gland.

4.2.1. LE CORPS :

De forme cylindrique à l'état de repos, il devient prismatique triangulaire lors de l'érection et présente 3 bords arrondis :

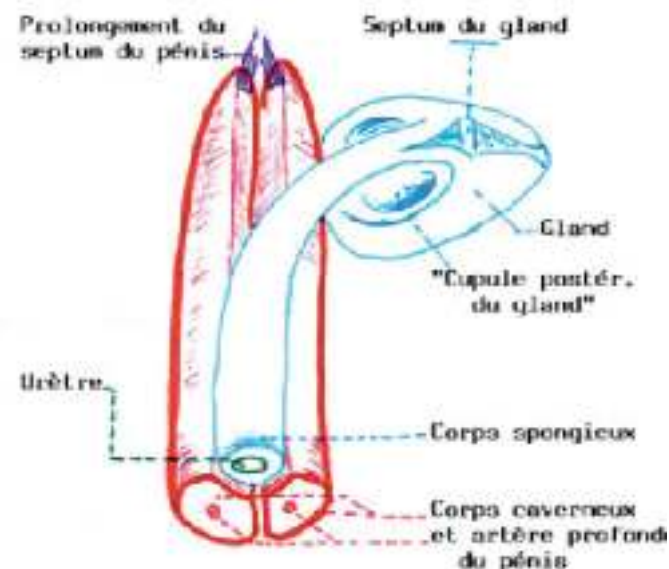
- Deux latéraux : correspondant au corps caverneux
- Un inférieur : formé par la saillie médiane du corps spongieux qui entoure l'urètre.

4.2.2. LE GLAND :

Est une saillie lisse, de forme conoïde, constituée par un renflement du corps spongieux. Il est recouvert par une muqueuse qui est rosée à l'état de repos, et devient rouge foncé pendant l'érection.

On lui décrit :

- * Un sommet : percé d'une fente verticale de 7 mm de haut, le méat urétral



- * Une base : constitue un relief circulaire, la couronne du gland, délimitant le sillon balano-préputial ou collet du gland. Le long de ce sillon, les enveloppes de la verge forment un repli annulaire, le prépuce.
- * Une face supérieure
- * Une face inférieure, creusée sur la ligne médiane par un sillon longitudinal, le frein du prépuce.

4.3. CONSTITUTION ANATOMIQUE :

4.3.1. LES CORPS ÉRECTILES :

a. les corps caverneux:

Ils limitent entre eux, sur les faces supérieure et inférieure, deux gouttières longitudinales

- * L'une supérieure : occupé par la veine dorsale profonde de la verge
- * L'autre inférieure, plus large et plus profonde, où vient s'encaster le corps spongieux.

b. Le corps spongieux : impair et médian.

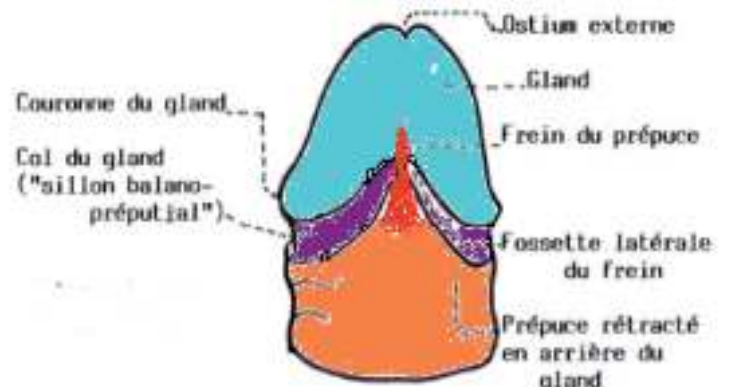
Il présente deux extrémités :

- * postérieure ou bulbe
- * antérieure ou gland

c. Le Gland : se développe à partir de la portion sus urétrale du corps spongieux.

On peut décrire ainsi au gland deux portions :

- * directe : qui continue le corps spongieux jusqu'au méat
- * réfléchi : qui part de la précédente et s'écarte de chaque côté en formant le bord arrondi de la couronne. Entre les 2 portions s'ouvre en arrière une excavation, la cupule postérieure.



4.3.2. ENVELOPPES :

Sont au nombre de 4 de la profondeur à la superficie.

a. Enveloppe fibroélastique : Fascia pénis

Il engaine les corps érectiles. Il répond en profondeur aux vaisseaux profonds et aux nerfs dorsaux, à l'albuginée des corps spongieux et corps caverneux. Il adhère en arrière à l'aponévrose périnéale superficielle. En avant il s'arrête à la base du gland et ne participe pas à la formation du prépuce.

b. couche celluleuse : très lâche, contient les vaisseaux et nerfs superficiels

c. Enveloppe musculieuse : Dartos pénien formé de fibres musculaires lisses

d. Enveloppe cutanée

Le **prépuce** : recouvre le gland, est formé par les 3 dernières couches qui se prolongent en avant, se replient sur elles-mêmes et vont se fixer sur le sillon balano-préputial, à ce moment, la peau se transforme en muqueuse qui s'étale sur la totalité du gland.

4.4. VAISSEAUX ET NERFS DE LA VERGE

4.4.1 ARTÈRES :

a. Profondes : artères des corps érectiles, de l'urètre. Toutes branches de l'artère honteuse interne.

a.1. Artère caverneuse ou artère profonde du pénis : Parcourt le corps caverneux de façon axiale, donne des rameaux spiraux : les artères hélicines

a.2. Artère bulbaire ou bulbo-urétrale, pour la partie post du corps spongieux et l'urètre.

a.3. Artère dorsale de la verge : Au cours de son trajet elle donne une série de collatérales pour le corps de caverneux et pour le corps spongieux.

b. Superficielles : artères des enveloppes, proviennent de l'A.H.E, périnéale superficielle et dorsale de la verge.

4.3.2. VEINES :

a. Profondes : les veines du gland se concentrent en deux plexus latéro-balaniques d'où naît la veine dorsale profonde de la verge qui se draine dans le plexus de Santorini. Elle reçoit des branches des corps caverneux et corps spongieux.

b. Superficielles : se jetant dans la veine dorsale superficielle qui rejoint la veine saphène interne.

4.3.3. LYMPHATIQUES :

a. Profondes :

se drainent dans les ganglions inguinaux et iliaques externes.

b. Superficielles :

Se drainent dans les ganglions inguinaux du groupe supéro-interne.

4.3.4. NERFS :

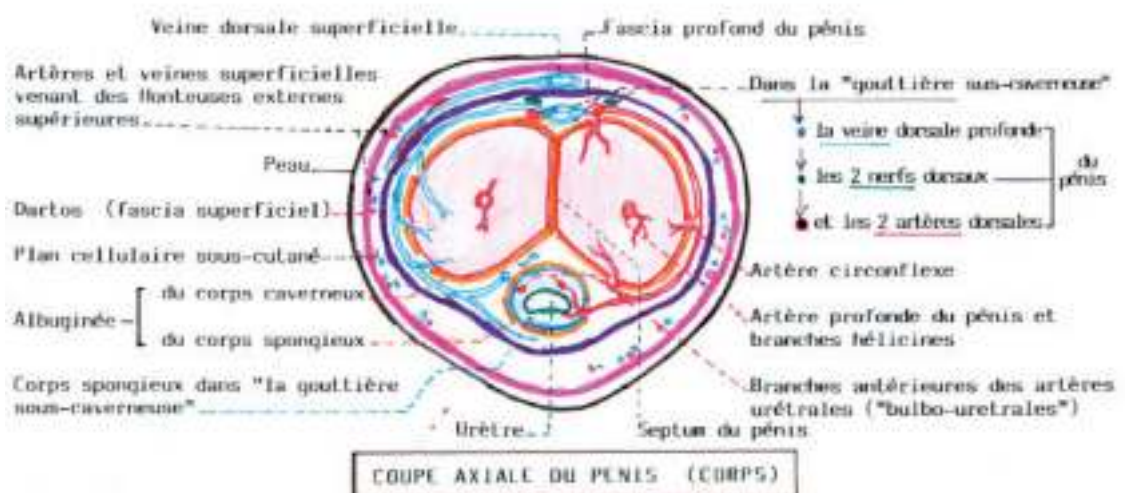
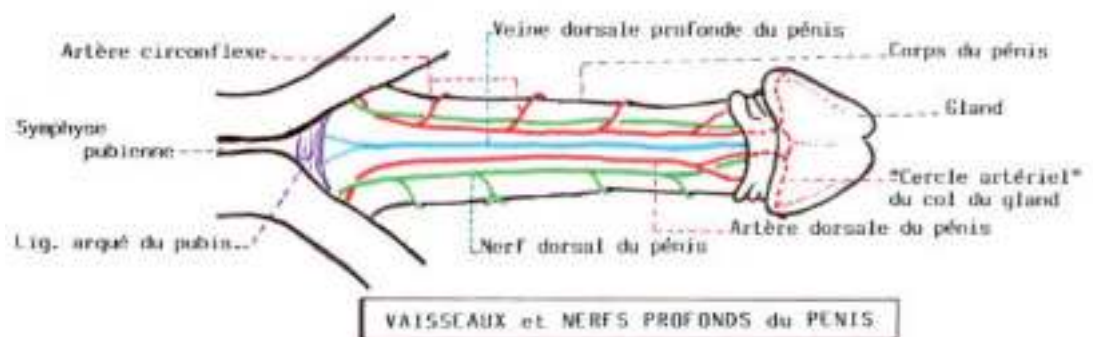
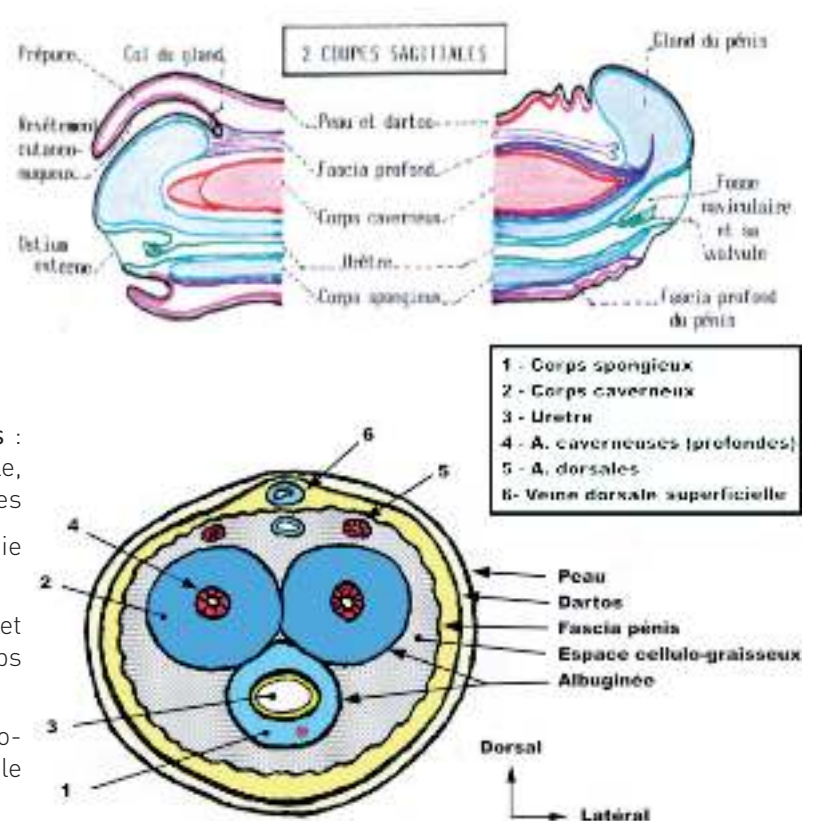
a. Système cérébro-spinal.

Deux branches du nerf honteux interne (nerf dorsal de la verge, nerf périméal).

b. Système

sympathique :

issus du plexus hypogastrique.



APPAREIL GÉNITAL FÉMININ

Les objectifs éducationnels

Au terme de son apprentissage, l'étudiant devra être capable de :

- 1) Étudier l'anatomie topographique de l'appareil génital féminin
- 2) Reconnaître les différents organes de l'appareil génital féminin
- 3) Décrire l'anatomie descriptive de l'appareil génital féminin
- 4) Décrire la vascularisation de l'appareil génital féminin

INTRODUCTION

L'appareil génital féminin occupe la loge génitale de la cavité pelvienne, en arrière de la loge vésicale et en avant de la loge rectale. La loge génitale est limitée en ventral par le septum vésico-vaginal, en dorsal par le septum recto génital et latéralement par les lames sagittales. Elle contient l'utérus (organe de la gestation), les annexes de l'utérus trompes (organes de la fécondation), les ovaires (organes de l'ovulation) et la majeure partie du vagin (organe de la copulation). Tous ces éléments, sauf les ovaires, sont recouverts de péritoine dressant ainsi d'une paroi latérale à l'autre du pelvis une véritable cloison transversale : le ligament large. La deuxième partie du vagin et la vulve sont situées dans le périnée uro-génital ou périnée antérieur.

1. OVAIRES

L'ovaire est la gonade, paire, de la femme. C'est une glande exocrine qui produit les ovules. C'est aussi une glande endocrine qui sécrète des hormones sexuelles. Il se situe dans la grande cavité péritonéale contre la paroi pelvienne.

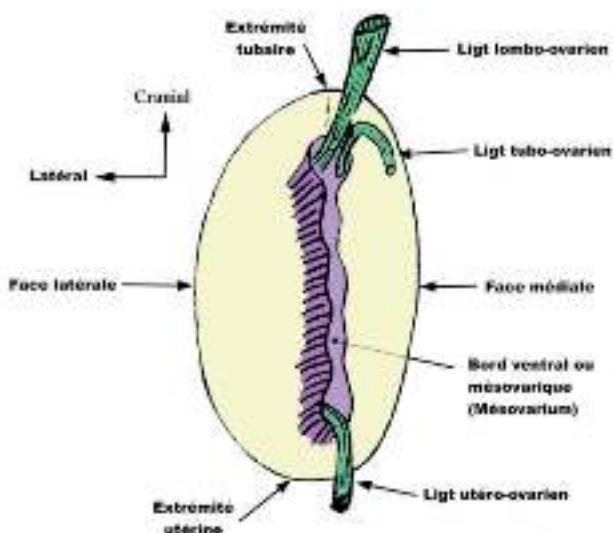


Schéma 25 : L'ovaire

1.1. ANATOMIE DESCRIPTIVE :

Il a la forme d'une amande, de couleur blanchâtre, en position à peu près verticale. Il présente :

- * **2 faces**, latérale et médiale
- * **2 bords**, dorsal (bord libre) et ventral (bord mésoovarique) qui représente le hile de l'ovaire et la zone de réflexion du péritoine.
- * **2 pôles**, supérieur (extrémité tubaire) et inférieur (extrémité utérine)

L'ovaire a une consistance ferme.

Il est lisse et régulier **avant la puberté**, mamelonné par les follicules ovariens **pendant la période d'activité génitale**, et atrophié, scléreux **après la ménopause**.

Ces dimensions moyennes sont, chez l'adulte :

Longueur : 4 cm ; Largeur : 2 cm ; Epaisseur : 1 cm et il a un poids de 8 g.

1.2. RAPPORTS PÉRITONÉAUX :

L'ovaire est entièrement dépourvu de péritoine, sauf sur son bord ventral.

Ses moyens de fixité sont :

- **Le mésovarium** qui se termine sur le bord mésoovarique de l'ovaire.
- **Le ligament utéro-ovarien** (ou **ligament propre** de l'ovaire) qui relie l'extrémité utérine de l'ovaire à la corne (angle latéral) utérine
- **Le ligament tubo-ovarien** reliant l'extrémité tubaire au pavillon de la trompe
- **Le ligament lombo-ovarien** (ou **ligament suspenseur** de l'ovaire) qui accompagne les vaisseaux ovariens depuis la région lombaire et qui se termine au niveau de l'extrémité tubaire.

Ses rapports avec les organes se font essentiellement avec les anses grêles et le côlon sigmoïde.

1.3. VASCULARISATION :

1.3.1. ARTÈRES

a. Ovariennes,

Naissent de la face ventrale de l'aorte au niveau de L2, suivent le ligament lombo-ovarien, croisent l'uretère au niveau de L3 et se terminent au niveau de l'extrémité tubaire de l'ovaire, par l'**artère ovarienne latérale** qui s'anastomose avec une branche de l'artère utérine. Elles donnent une collatérale, l'**artère tubaire latérale**.

b. Utérines,

Naissent du tronc ventral de l'artère iliaque interne, atteignent l'ovaire au niveau de son extrémité utérine et donnent 3 branches terminales :

- * **l'artère rétrograde du fundus**, destinée à l'utérus,
- * **l'artère tubaire médiale** qui s'anastomose avec l'artère tubaire latérale,
- * **l'artère ovarique médiale** qui s'anastomose avec l'artère ovarique latérale.

1.3.2. VEINES :

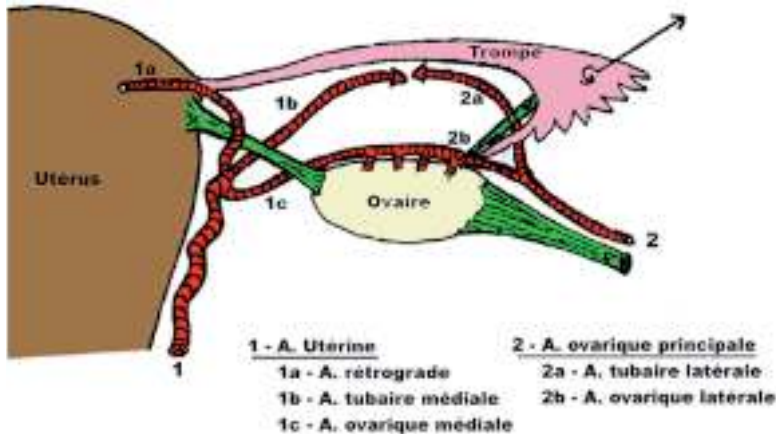


Schéma 26 : Artères de l'ovaire (vue dorsale)

Forment un plexus veineux complexe au niveau de l'ovaire puis deviennent satellites des artères et rejoignent :

A) Les veines utérines qui rejoignent la veine iliaque interne homo latérale.

B) Les veines ovariques qui rejoignent directement la veine cave à droite au niveau de L2 et la veine rénale gauche à gauche

1.3.3. LYMPHATIQUES :

Ils sont satellites de l'artère ovarique et rejoignent les nœuds latéro-aortiques situés en L2, sans relais intermédiaire (même origine embryologique que le testicule)

1.3.4. NERFS : Plexus hypogastrique

2. LA TROMPE UTÉRINE

La trompe utérine est un canal pair et symétrique qui conduit l'ovule de l'ovaire à l'utérus. C'est le site habituel de rencontre avec les spermatozoïdes. C'est donc **l'organe de la fécondation**. La trompe se nomme aussi salpinx (d'où salpingite)

Le **ligament large** est une cloison péritonéale à 2 feuillets, paire et symétrique, tendu de chacun des bords latéraux de l'utérus à la paroi pelvienne latérale, en recouvrant les 2 trompes.

2.1. ANATOMIE DESCRIPTIVE :

2.1.1. CONFIGURATION EXTERNE :

elle présente 4 segments. De médial en latéral :

- * **1 segment utérin**, segment interstitiel environ 1 cm non visible, puisque situé dans l'épaisseur même de la corne utérine. Il s'ouvre dans la cavité utérine par l'ostium utérin
- * **L'isthme**, environ 3 à 4 cm horizontal, oblique en dorsal et en latéral entre l'angle latéral du corps utérin et l'extrémité utérine de l'ovaire
- * **L'ampoule**, environ 7 - 8 cm perpendiculaire à l'isthme, longe le bord ventral de l'ovaire puis se replie en arrière et en bas sur la face médiale, après avoir contourné l'extrémité tubaire de l'ovaire.

* **Le pavillon**, en forme d'entonnoir, est appliqué sur la face médiale de l'ovaire. Son pourtour présente 10 à 15 franges dont la plus longue (**frange ovarique**) adhère à l'ovaire en suivant le ligament tubo-ovarien. Le pavillon est ouvert dans la grande cavité péritonéale par **l'ostium abdominal**, ce qui explique la possibilité de grossesse extra-utérine et de péritonite primitive
La trompe mesure de 10 à 14 cm de long.

2.1.2. CONFIGURATION EXTERNE :

la trompe présente 4 tuniques, de l'intérieur vers l'extérieur :

- Une muqueuse très plissée
 - Une musculature en 2 couches : interne, circulaire et externe, longitudinale
 - Une tunique conjonctive
 - La séreuse péritonéale
- 2.1.3. RELIQUATS EMBRYONNAIRES**
- Hydatide (ou appendice) vésiculeux, appendue à l'une des franges du pavillon.
 - Epophore, au niveau de l'ampoule tubaire
 - Parophore, au niveau de l'isthme tubaire
 - Canal de Gartner, près de l'isthme utérin

Comme chez l'homme, possibilités de torsion d'ovaire ou de reliquats embryonnaires

2.2. RAPPORTS PÉRITONÉAUX : LE LIGAMENT LARGE

Le ligament large contient la trompe et s'arrête au niveau du pavillon, à la limite des franges, n'incluent pas l'ovaire. Il a la forme d'une **cloison transversale quadrilatère**. Il est constitué par le prolongement latéral des 2 feuillets péritonéaux, ventral et dorsal qui recouvrent l'un

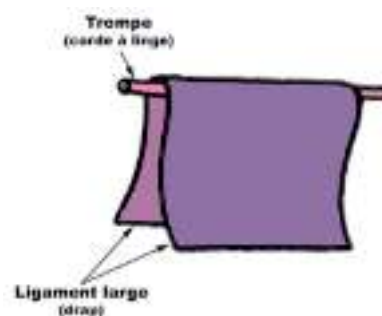


Schéma 27 : Ligament large

la face antérieure, l'autre la face postérieure de l'utérus. On le compare à un drap plié en deux que l'on met à sécher sur une corde à linge :

Il présente 4 bords :

- **Un bord cranial** formé par l'union des 2 feuillets au-dessus de la trompe.
 - **Un bord caudal** ou base, plus large, car les 2 feuillets s'écartent l'un de l'autre, reposant sur le plancher pelvien et se poursuivant par le péritoine pariétal
 - **Un bord médial** qui suit le bord latéral de l'utérus
 - **Un bord latéral** inséré sur la paroi pelvienne latérale
- Mais cet état de base, simple au départ, se complique du fait de la présence, de part et d'autre de la trompe, d'éléments ligamentaires ou **ailerons**.

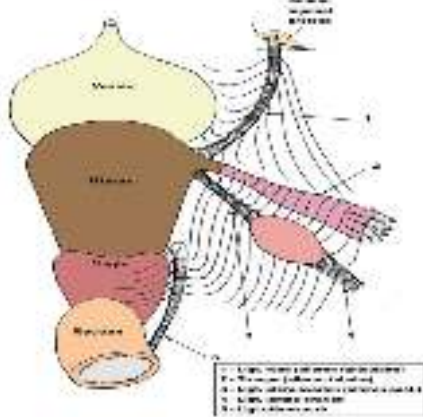


Schéma 28 : Rapports de l'utérus (vue dorso-craniale)

En fait, on distinguera au ligament large 2 segments différents :

- * **un segment supérieur**, mince et mobile, et qu'on appelle **mésomètre** ou **mésométrium**. Ce mésomètre est constitué de 3 ailerons de forme triangulaire à base pariétale et à sommet utérins, convergeant vers la corne utérine
 - En haut, **l'aileron médian tubaire** ou **mésosalpinx**, englobe la trompe et ses vaisseaux et correspond au bord cranial du ligament large
 - En avant, **l'aileron ventral funiculaire** ou **aileron du ligament rond**. Il est, en effet sous-tendu par le ligament rond. Ce ligament est tendu de la corne utérine jusqu'à la grande lèvre, en passant par le canal inguinal.
 - En arrière, **l'aileron dorsal** ou **mésovarium** sous-tendu de médial en latéral par le ligament utéro-ovarien, le bord mésovarique de l'ovaire et une partie du ligament

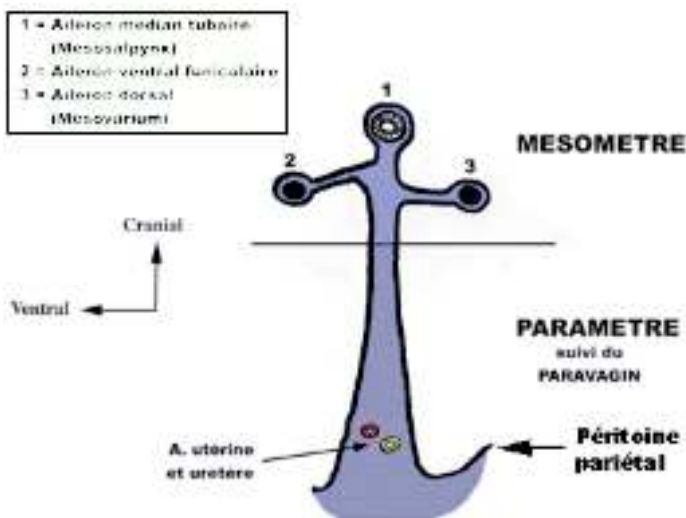


Schéma 29 : Coupe sagittale paramédiane du ligament large

lombo-ovarien.

- * **un segment inférieur, la base**, large et fixé, correspondant au bord caudal du ligament large, renfermant du tissu cellulo fibreux et qu'on appelle **paramètre**.

Le **Paramètre** qui constitue la base du ligament large est formé d'un tissu cellulaire dense, il se poursuit en caudal par le Paravagin. Le rapport essentiel dans le paramètre est celui de l'uretère pelvien et l'artère utérine. Cette dernière décrit une crosse qui lui fait surcroiser l'uretère. C'est un rapport majeur lors de l'abord chirurgical de l'utérus.

2.2.3. VASCULARISATION :

a. Artères : la trompe est vascularisée par une arcade infratubaire formée par l'anastomose de

- l'artère **tubaire latérale**, branche collatérale de l'ovarique,
- l'artère **tubaire médiale**, branche terminale de l'utérine.

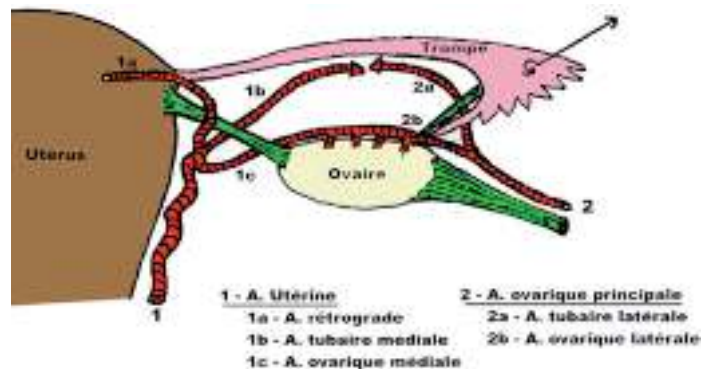


Schéma 30 : Artères de la trompe (vue dorsale)

b. Veines : *satellites des artères.*

c. Lymphatiques : rejoignent les lymphatiques de l'utérus et de l'ovaire.

d. Nerfs : proviennent du plexus hypogastrique

3. L'UTÉRUS

L'utérus est l'organe de la gestation dans lequel se développe l'œuf fécondé.

3.1. ANATOMIE DESCRIPTIVE :

3.1.1. CONFIGURATION EXTERNE

L'utérus est un organe **médian**, impair, situé dans le petit bassin, entre la vessie, en ventral, et le rectum, en dorsal. Il a la forme d'un **tronc de cône à sommet inférieur**. Il présente dans sa partie moyenne un léger rétrécissement, **l'isthme utérin** qui sépare l'utérus en 2 parties :

* **Au-dessus de l'isthme, le corps utérin**,

- de forme conique et aplati d'avant en arrière.- deux faces, ventrale et dorsale- deux bords latéraux - un bord cranial ou **fundus** est fortement convexe dans le sens ventro-dorsal,° rectiligne transversalement chez la nullipare et convexe chez la multipare.
- À la jonction des bords latéraux et du fundus se

trouvent les angles latéraux ou **cornes utérines** se poursuivent par les trompes et donnent insertions aux ligaments ronds, **en ventral**, et utéro-ovariens, en dorsal.

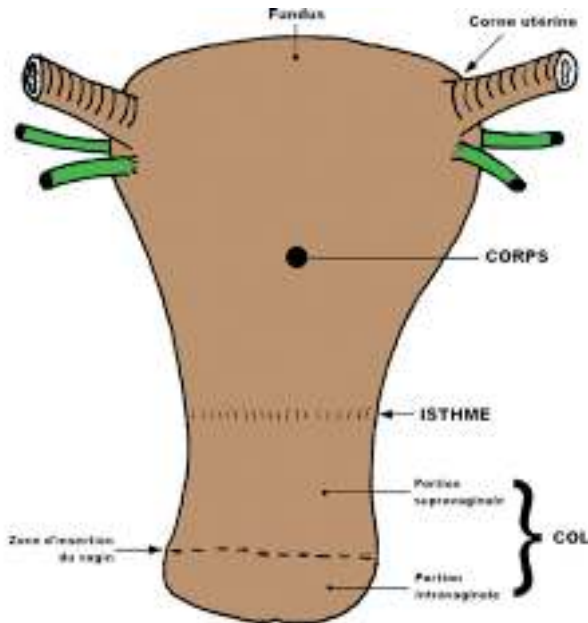


Schéma 31 : Morphologie extérieure de l'utérus

*** Au-dessous de l'isthme, le col utérin,**

- * Cylindrique, un peu renflé à sa partie moyenne.
- * Il est divisé en **2 portions** par la zone d'insertion vaginale :
 - la portion supra-vaginale prolongeant le corps est visible dans la cavité pelvienne° la portion intravaginale, est visible au spéculum et accessible au doigt par le toucher vaginal et le toucher rectal. Celle-ci est percée à son sommet d'un orifice : **l'orifice externe du col** qui se prolonge vers le haut, à l'intérieur de l'utérus, par le canal cervical
 - **Chez la nullipare**, l'orifice est punctiforme.
 - **Chez la primipare ou multipare**, l'orifice s'allonge transversalement avec une lèvre antérieure, une lèvre postérieure et 2 incisures latérales peu profondes. On parle alors de col « en museau de tanche ».

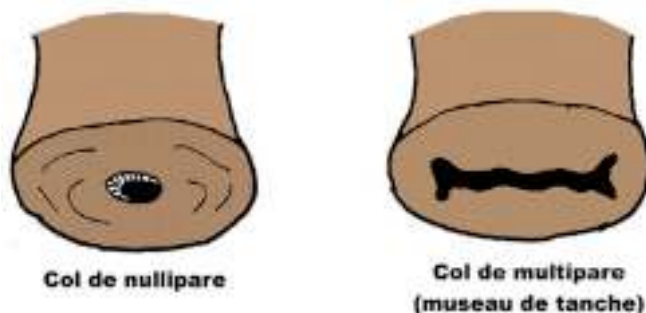


Schéma 32 : L'orifice externe du col

L'orientation de l'utérus fait qu'il se présente en :

- * **antéversion** = angle ouvert en ventral et crânial que fait l'axe du corps utérin avec l'axe ombilico-coccygien (axe de la cavité pelvienne)
- * **antéflexion** = angle ouvert en ventral et caudal que fait l'axe du corps utérin avec l'axe du col utérin (environ 130°).

Il existe des variations positionnelles qui apparaissent chez la femme plus âgée : **rétroversion et rétroflexion** utérine. Ceci favorise le prolapsus utérin (populairement appelé « descente d'organe »).

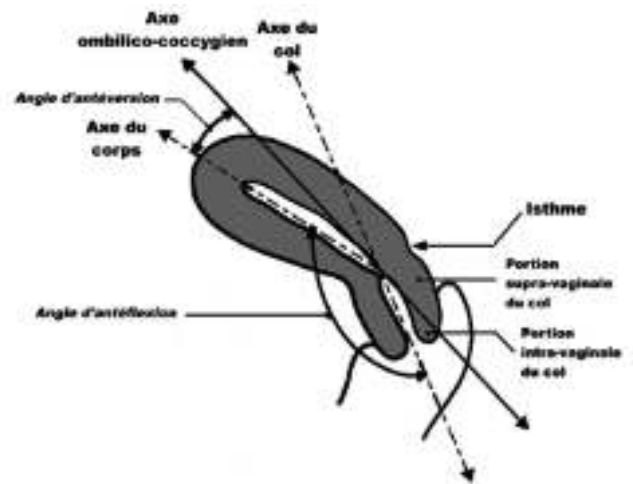


Schéma 33 : Orientation de l'utérus

Les dimensions moyennes de l'utérus chez la nullipare sont de :

- * Hauteur : 6 à 7 cm
- * Largeur :
 - 4 cm au niveau du corps
 - 2,5 cm au niveau du col
- * Épaisseur : 2 cm

Ferme et élastique à l'examen, il pèse environ 50g chez la nullipare et 70 g chez la multipare. Après plusieurs grossesses, l'utérus reste plus gros et plus globuleux et ses dimensions s'accroissent de 1 cm.

3.1.2. CONFIGURATION INTERNE

L'utérus est creusé d'une cavité qui peut être opacifiée lors d'une hystérogrophie. Cette cavité utérine comprend 2 parties :

*** La cavité corporelle :**

- de forme triangulaire à sommet inférieur.
- Elle est normalement virtuelle.
- Les angles cranio-latéraux ou cornes se poursuivent par les trompes ouvertes dans l'utérus par **l'ostium utérin**.

*** Le canal cervical :**

- fusiforme. C'est une cavité réelle.
- Ses parois, ventrale et dorsale, présentent chacune à leur tiers moyen 1 saillie longitudinale ou **colonnes principales**.

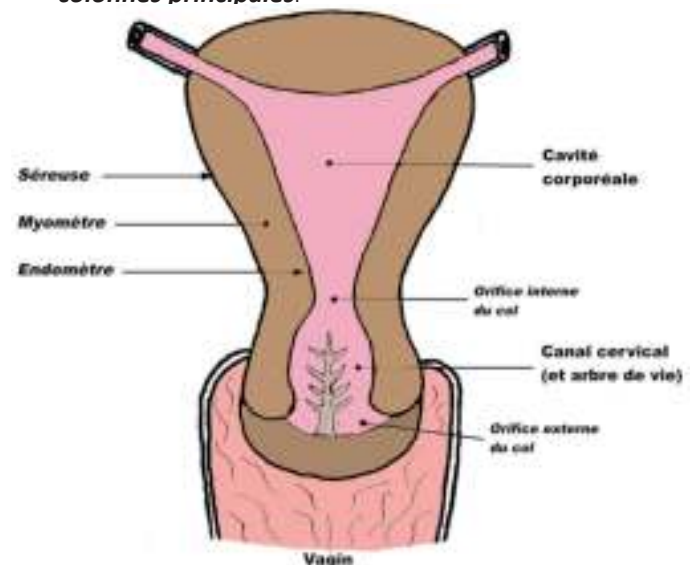


Schéma 34 : Le canal cervical

- Des colonnes principales partent latéralement des **plis palmés** : ce relief, appelé **arbre de vie** peut gêner l'introduction d'un stérilet.
- L'extrémité supérieure se confond avec l'isthme et porte le nom d'**orifice interne du col**
- L'extrémité inférieure s'ouvre dans le vagin et porte le nom d'**orifice externe du col**.

3.1.3. STRUCTURE : 3 tuniques

- Séreuse péritonéale
- Musculaire ou **myomètre** : 3 couches.
- Muqueuse, appelée **endomètre** au niveau du **corps** : sa desquamation cyclique provoque les **menstruations**.

3.1.4. VARIATIONS

* Au niveau de l'utérus

Utérus cloisonné, utérus didelphe, utérus bicorné

Possibilité de grossesse gémellaire.

* Au niveau du col

Absence de col, imperforation du col

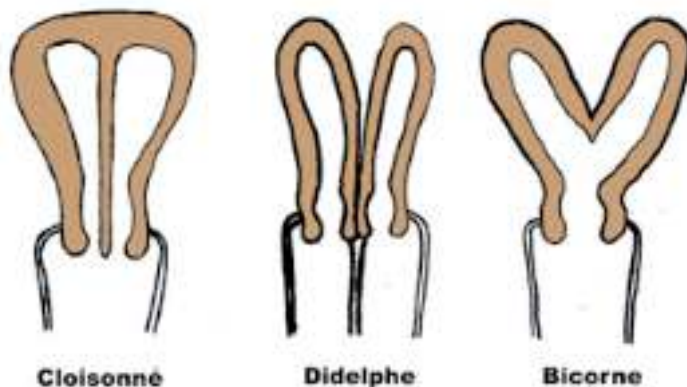


Schéma 35 : variation de l'utérus

3.2. RAPPORTS :

3.2.1. AVEC LE PÉRITOINE.

Les 5 ligaments utérins

Le péritoine recouvre le corps de l'utérus, l'isthme et la face dorsale de la portion supra-vaginale du col

- * **en ventral**, le péritoine se réfléchit au niveau de l'isthme formant le **cul-de-sac vésico-utérin**
 - * **en dorsal**, le péritoine se réfléchit sur la face dorsale du vagin et va former le **cul-de-sac recto génital** (Douglas)
 - * **en latéral**, le péritoine va former le **ligament large**
- L'utérus est solidement fixé à la paroi pelvienne par **5 ligaments**, de chaque côté :
- **Le ligament large** unit le bord latéral du corps utérin à la paroi latérale du petit bassin
 - **Le ligament rond** ou **funiculaire** qui unit l'angle latéral du corps utérin à la grande lèvre en passant dans le canal inguinal
 - **Le ligament utéro-ovarien** unit l'angle latéral du corps utérin à l'extrémité utérine de l'ovaire
 - **Le ligament utéro-sacré** unit le col de l'utérus au sacrum et se confond avec le bord supérieur de la lame sagittale sacro-recto-génito-vésico-pubienne
 - **Le ligament vésico-utérin** correspond à un épaississement de la partie supérieure du septum vésico-vaginal

3.2.2. AVEC LES ORGANES

* **Portion supra-vaginale** : c'est à dire le corps utérin, l'isthme et la portion supra-vaginale du col

- **en ventral**, la **vessie** (sa face dorso-craniale et une partie du dôme), par l'intermédiaire du cul-de-sac vésico-utérin
- **en dorsal**, le **rectum** (ampoule rectale), par l'intermédiaire du cul-de-sac recto génital (cul-de-sac de Douglas)
- **en latéral**,
 - * dans le **mésomètre**, qui est le prolongement cranial du paramètre sur les bords latéraux du corps utérin, les **vaisseaux utérins**
 - * dans le **paramètre**, on trouve un élément important qui est le croisement de l'uretère et de l'artère utérine
- **en cranial**, au niveau du **fundus** utérin, les anses grêles et le côlon sigmoïde.

* **Portion intravaginale** : le col est séparé de la paroi vaginale par un **cul-de-sac annulaire**

- **en ventral**, le septum vésico-vaginal et par son intermédiaire, le trigone vésical
- **en dorsal**, le **rectum** (cap du rectum) -> TR
- **en latéral**, se trouve le **paravagin** (ou paracervix), prolongement caudal du paramètre.

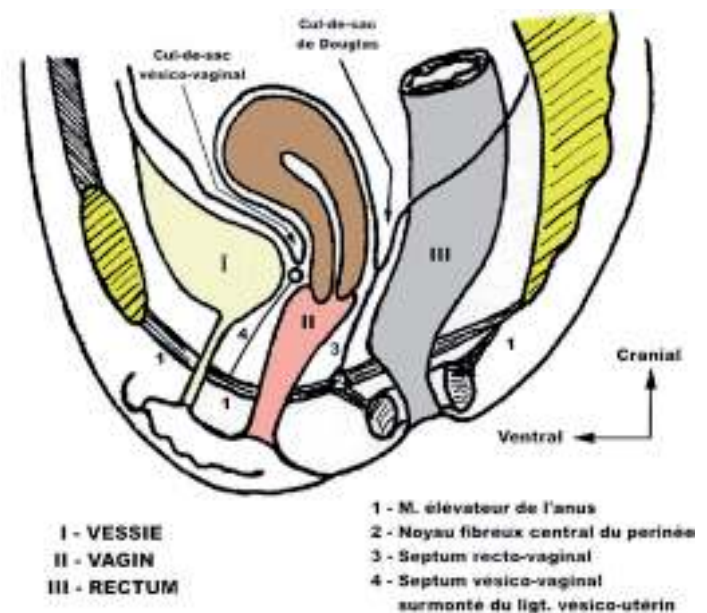


Schéma 36 : Coupe sagittale du petit bassin féminin

3.3. VASCULARISATION :

3.3.1. ARTÈRES :

a. **Artère utérine** : c'est l'artère principale de l'utérus

a.1 Origine : elle naît du tronc ventral de l'artère iliaque interne

Trajet : 3 segments par rapport aux **ligaments larges** :

- * **Segment pariétal ou rétroligamentaire**, presque vertical, plaqué contre la paroi pelvienne
- * **Segment paramétrial ou sous-ligamentaire**, oblique en caudal, en médial et en ventral, en direction du col où elle va effectuer sa crosse qui enjambe l'uretère
- * **Segment mésométrial ou intraligamentaire** où elle longe le bord latéral de l'utérus entre les deux feuillets, ventral et dorsal, du ligament large, à l'intérieur du mésométrium

a.2. Terminaison : au niveau de la corne de l'utérus

- * **Artère rétrograde** du fundus utérin
- * **Artère tubaire médiale** s'anastomosant avec la tubaire latérale
- * **Artère ovarienne médiale** s'anastomosant avec l'ovarienne latérale dans le mésovarium

a.3. Branches collatérales :

- * Segment rétroligamentaire : aucune
- * **Segment sous-ligamentaire** :
 - plusieurs artères vésico-vaginales (5 à 6) qui naissent avant le croisement avec l'uretère
 - 1 artère cervico-vaginale, naît après le croisement avec l'uretère, destinée en particulier à la portion intr-vaginale du col utérin. Elle naît après le croisement de l'uretère.
 - 1 artère urétrique inférieure, inconstante qui naît au niveau du croisement avec l'uretère.
- * **Segment ligamentaire**
 - **artères supra-vaginales du col**, au nombre de 6 en moyenne
 - **artères du corps**, au nombre de 8 en moyenne, pénètrent dans le myomètre et se divisent en branches ventrales et dorsales

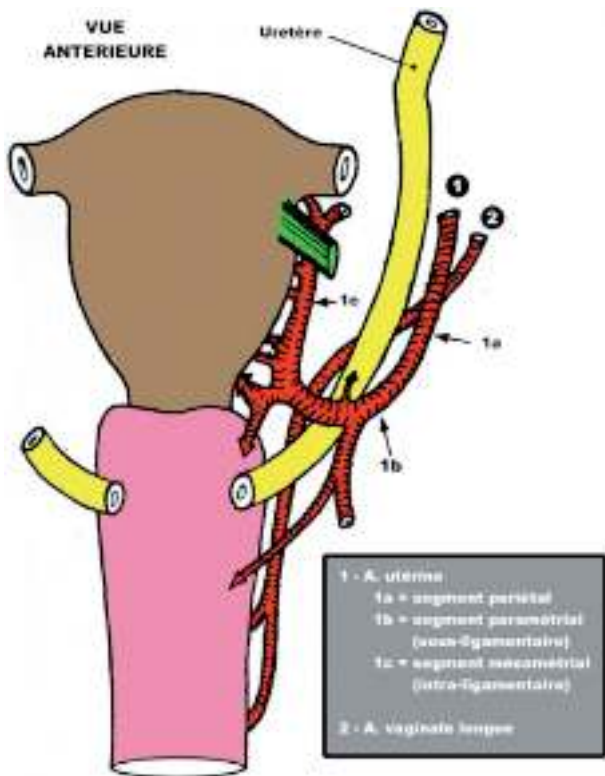


Schéma 37 : Rapports artère utérine et artère vaginale longue avec l'uretère

b. Artères accessoires :

- * artère ovarienne
- * artère du ligament rond, née de l'artère épigastrique inférieure

3.3.2. VEINES : SATELLITES DES ARTÈRES

3.3.3. LYMPHATIQUES :

a. du corps utérin : 3 pédicules

- * **Principal**, utéro-ovarien, aboutit aux nœuds latéro-aortiques voisins de l'origine de l'artère mésentérique inférieure (L3)

- * **Accessoire**, vers les nœuds iliaques externes
- * **Inconstant**, suivant le ligament rond jusqu'aux nœuds inguinaux superficiels

b. du col utérin :

le pédicule principal aboutit aux nœuds iliaques externes

Les lymphatiques du col et du corps sont anastomosés entre eux, mais aussi aux réseaux vaginal et annexiel, d'où la complexité de la propagation du cancer de l'utérus.

3.3.4. NERFS :

ils sont regroupés en 2 pédicules, au niveau du col et du corps et dépendent tous les deux du plexus hypogastrique.

4. LE VAGIN

Le vagin et la vulve sont les organes de la copulation.

4.1. ANATOMIE DESCRIPTIVE :

Le vagin est un canal aplati en ventro-caudal. Il est souple, élastique et contractile. Il s'étend du col de l'utérus jusqu'à la vulve. Il est oblique en caudal et ventral. Il est long d'environ 8 à 10 cm. Sa compliance, très importante, maximale lors de l'accouchement, diminue après la ménopause

- **Son extrémité craniale** (ou **fornix** du vagin) est insérée sur le col utérin selon une ligne oblique en caudal et ventral. Cette insertion détermine autour de la partie intravaginale du col utérin des **culs-de-sac**, ventral, dorsal et latéraux. Le cul-de-sac ventral est à peine marqué alors que le cul-de-sac dorsal est très **profond**.

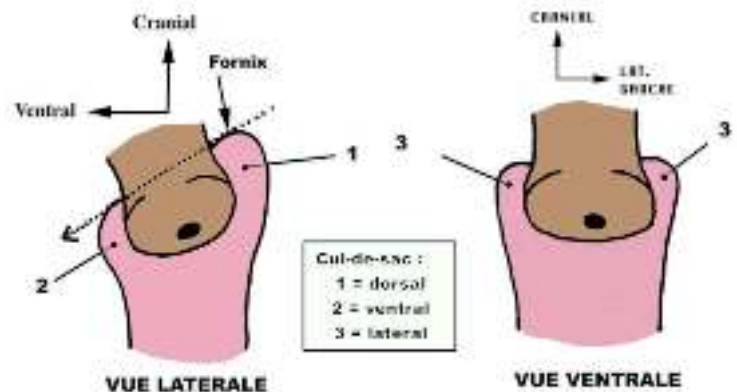


Schéma 38 : Cul-de-sac du vagin

- **L'extrémité inférieure** du vagin forme l'orifice vaginal qui contribue à la formation du **vestibule** vulvaire. Cet orifice est fermé incomplètement chez la femme vierge par une membrane muqueuse perforée : **l'hymen**. Lors du premier rapport sexuel, l'hymen se déchire entraînant une légère hémorragie et laissant persister des résidus : les **caroncules hyménaux**.
- * **Deux faces, ventrale et dorsale**, au contact l'une de l'autre.

Sa surface interne :

- Présence sur chaque paroi ventrale et dorsale, d'une saillie longitudinale médiane, **les colonnes du vagin**. La colonne ventrale, et elle seule, se divise en 2 branches, à hauteur du col de la vessie, pour délimiter un triangle, appelé **triangle vaginal** (de Pawlick) et qui correspondrait à la zone la plus érogène du vagin.

- Est parcouru par des plis transversaux nommés **rides vaginales**

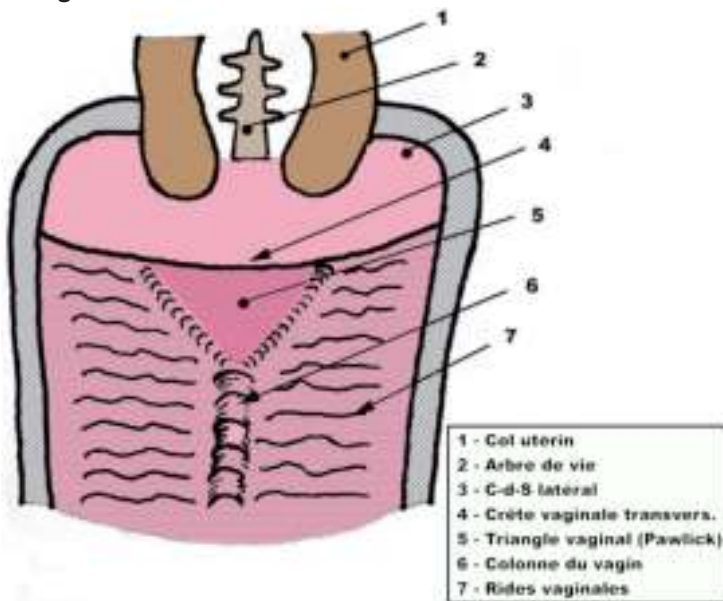


Schéma 39 : Paroi vaginale

4.2. RAPPORTS :

• En ventral

- et cranial : le trigone vésical par l'intermédiaire du septum vésico-vaginal
- et caudal : l'urètre (rapport très étroit qui explique la possibilité de fistule uro-génitale chirurgicale ou par envahissement tumoral).

• En dorsal

- et cranial : le cap du rectum par l'intermédiaire du cul-de-sac recto génital de Douglas
- et caudal : le canal anal par l'intermédiaire du noyau fibreux central du périnée (centre tendineux du périnée)

• En latéral

- et cranial : le paramètre
- et caudal : le paravagin (ou paracervix)

4.3.VASCULARISATION :

4.3.1. ARTÈRES :

- * **la vaginale longue**, collatérale du tronc ventral de l'artère iliaque interne ou hypogastrique
- * **les vésico-vaginales**, collatérales de l'artère utérine dans sa portion sous-ligamentaire et avant d'avoir croisé l'urètre
- * **la cervico-vaginale**, collatérale de l'artère utérine dans sa portion sous-ligamentaire et après avoir croisé l'urètre

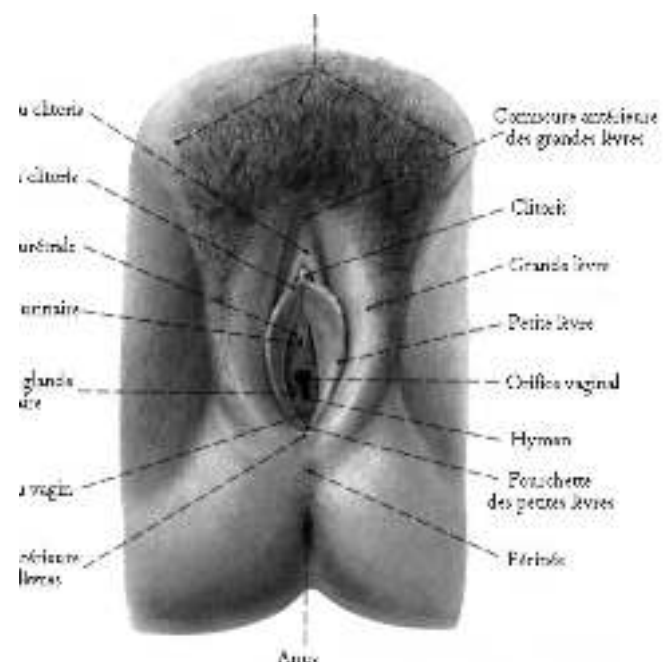
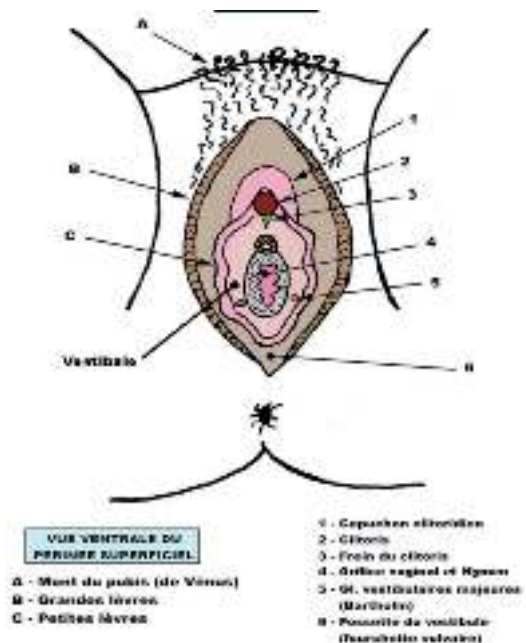
4.3.2. VEINES : satellites des artères, rejoignent la veine iliaque interne.

4.3.3. LYMPHATIQUES : ils gagnent les nœuds iliaques internes et externes ainsi que les nœuds inguinaux.

4.3.4. NERFS : Plexus hypogastrique.

5. LA VULVE

Elle s'étend devant et sous le pubis, surmontée par le mont du pubis. Elle est oblique en caudal et dorsal. La vulve se présente comme une saillie ovoïde avec une fente médiane, la fente vulvaire qui sépare les grandes lèvres. En écartant les grandes lèvres, on découvre 2 nouveaux replis, les petites lèvres qui délimitent le vestibule.



Schémas 40a et 40b : La vulve

5.1. LE MONT DU PUBIS

(anciennement appelé mont de Vénus)

C'est un relief triangulaire, à sommet inférieur, situé devant la symphyse pubienne, recouvert de poils et constitué par un amas cellulo-adipeux plus ou moins prononcé.

5.2. LES GRANDES LÈVRES

Ce sont 2 replis cutanés qui limitent la fente vulvaire. Elles mesurent, en moyenne 8 cm de long et 1,5 cm de large.

- **Sa face externe**, comme la peau scrotale est plissée, de couleur foncée et pileuse. Elle est séparée de la face interne des cuisses par le sillon génito-fémoral
- Sa face interne est lisse, rosée et glabre. Elle est séparée des petites lèvres par le sillon interlabial.
- **Les 2 extrémités ventrales** des grandes lèvres se réunissent pour former la commissure ventrale qui se perd dans le mont du pubis.
- **Les 2 extrémités dorsales** forment la commissure dorsale qui présente une légère dépression, la fossette du vestibule du vagin (ou fourchette vulvaire).

5.3. LES PETITES LÈVRES :

elles sont rosées, lisses et dépourvues de poils.

- **La face externe** est séparée des grandes lèvres par le sillon interlabial
- **La face interne** des 2 petites lèvres délimite le vestibule
- **Leurs extrémités ventrales et craniales** se dédoublent en 2 replis,
 - 1 repli ventral qui passe au-dessus du clitoris pour former le prépuce ou capuchon clitoridien
 - 1 repli dorsal qui se fixe au-dessous du clitoris pour former le frein du clitoris.
- **Leurs extrémités dorsales et caudales** se réunissent pour former le frein vulvaire

5.4. LE VESTIBULE

C'est la dépression délimitée par les faces internes des petites lèvres et le clitoris. De bas en haut, on rencontre :

- **L'orifice vaginal** fermé chez la femme vierge par l'hymen. L'hymen est séparé des petites lèvres par le sillon vestibulaire. Dans ce sillon, on trouve à 5 heures et à 7 heures, l'orifice des glandes vestibulaires majeures.
- **Le méat urétral** situé au-dessus de la carina urétrale du vagin. De part et d'autre du méat s'ouvre l'orifice des glandes para-urétrales.
- **Le clitoris**, organe érectile de la femme, correspond aux corps caverneux du pénis de l'homme. Il est donc l'objet d'érection. En moyenne, il mesure 2,5 cm de long sur 6 mm de diamètre. Il est formé d'un corps terminé par une extrémité conique et mousse, le gland du clitoris.
- **Les bulbes vestibulaires**, analogues au corps spongieux chez l'homme et qui se sont dédoublés par l'interposition du vagin qu'ils entourent en partie. Ils sont situés dans la profondeur des petites lèvres, depuis le clitoris en avant et en haut jusqu'aux orifices des glandes vestibulaires majeures, en arrière et en bas. Ils sont fixés au bassin par des muscles qui se prolongent dans les petites lèvres, en particulier, les muscles bulbo-spongieux. Ceci explique la possibilité, rare chez l'Homme, de pénis captivus.

5.5. LES GLANDES VULVAIRES :

elles contribuent toutes à la lubrification de la vulve. Elles comprennent :

- **Les glandes vestibulaires** mineures situées à la surface des formations labiales
- **Les glandes para-urétrales** de part et d'autre du méat urétral
- **Les glandes vestibulaires majeures (de Bartholin)** : parfois l'objet d'infections très douloureuses connues sous le nom de Bartholinite.

6. PÉRINÉE ANTÉRIEUR

Forme une véritable loge fibromusculaire traversée par le segment terminal de l'urètre et la partie inférieure du vagin. Du point de vue topographique, ces différents éléments s'organisent en plusieurs plans superposés.

6.1. L'ESPACE PROFOND DU PÉRINÉE :

Le plus important, constitué essentiellement par le diaphragme uro-génital (l'aponévrose périnéale moyenne) formé par : un feuillet supérieur mince et un feuillet inférieur épais.

Entre les 2 feuillets, 2 muscles :

- transverse profond du périnée en arrière
- sphincter strié de l'urètre en avant

À la face inférieure se fixent les muscles érectiles

A. CORPS CAVERNEUX :

plus réduits que ceux de l'homme se fixent à la partie moyenne de la face interne des branches ischio-pubiennes. Les deux convergent vers la ligne médiane et se réunissent pour former le corps du clitoris.

B. BULBES VESTIBULAIRES :

Ils représentent l'homologue dédouble du corps spongieux masculin situés de chaque côté de l'orifice inférieur du vagin, de forme ovoïde et allongés

C. ÉLÉMENTS GLANDULAIRES

- glandes de SKENE : au contact de la paroi de l'urètre (homologue de la prostate)
- glande de BARTHOLIN : (homologues des glandes de Cooper)

D. URÈTRE PÉRINÉAL

E. SEGMENT PÉRINÉAL DU VAGIN.

6.2. L'ESPACE SUPERFICIEL DU PÉRINÉE :

constitué des muscles :

a. transverse superficiel,

b. ischio-caverneux,

c. bulbo-caverneux,

d. constricteur de la vulve

e. aponévrose périnéale superficielle

f. Les artères : la vascularisation artérielle des plans profonds du périnée est assurée essentiellement par l'artère honteuse interne. Elle fournit plusieurs collatérales pour le périnée

- artère périnéale superficielle
- artère bulbaire
- artère bulbo-urétrale
- artère caverneuse
- artère prévésicale
- artère graisseuse
- artère rétrosymphysaire

h. Les veines : ont une disposition schématiquement calquée sur celle des artères. Elles tirent leur origine du plexus veineux de Santorini qui se draine dans la veine honteuse interne puis dans la veine iliaque interne

i. Les lymphatiques : se jettent dans les ganglions iliaques internes et les ganglions de la bifurcation iliaque

j. Les nerfs : sont représentés par le nerf honteux interne et ses branches

Peau et tissu cellulaire sous-cutané du périnée et de la vulve ont une structure différente suivant le point considéré.

PCEM2

HISTO-EMBRYOLOGIE

L'APPAREIL EXCRÉTEUR URINAIRE

HISTOLOGIE DE L'APPAREIL URINAIRE

Les objectifs éducationnels

Au terme de son apprentissage, l'étudiant devra être capable de :

1. Schématiser l'unité structurale et fonctionnelle du rein (tube urinaire) en délimitant la topographie histologique de ses différents composants
2. Indiquer la particularité de la microcirculation rénale annexée au néphron
3. Nommer les couches de la barrière de filtration glomérulaire
4. Identifier la double sélectivité de taille et de charge au niveau de chaque couche de la barrière de filtration glomérulaire
5. Nommer les composantes de l'appareil juxta-glomérulaire
6. Corréler les caractéristiques histologiques de la cellule juxtaglomérulaire à ses fonctions
7. Corréler les caractéristiques histologiques de la cellule mésangiale à ses fonctions
8. Corréler les caractéristiques histologiques de l'épithélium des différents segments du tube urinaire à ses fonctions (filtration, réabsorption, concentration de l'urine)
9. Identifier les structures histologiques impliquées dans la création et le maintien du gradient osmotique cortico-médullaire responsable de la concentration de l'urine
10. Connaître la structure histologique de base des voies excréto-urinaires
11. Relier les caractéristiques microscopiques et ultrastructurales de l'urothélium à ses fonctions

Prérequis

L'étudiant est invité à :

- * répondre aux questions d'autoévaluation proposées à la fin du mini-module. Les réponses seront discutées lors de la séance ou dans le forum de discussion de la plateforme numérique de la FMT.
- * consulter le document numérisé mis à sa disposition à la Médiathèque et sur la plateforme numérique de la FMT, intitulé : « Histologie du système urinaire : Questions d'autoévaluation sur lames virtuelles ».

Activités d'apprentissage

- Structure de l'épithélium de type urinaire, du tissu conjonctif et de la lame basale (Thème 3)
- Structure, organisation et contraction des cellules musculaires lisses (Thème 5)
- Structure et organisation des vaisseaux (Thème 9)

PLAN

I. GENERALITES

II. PARENCHYME RENAL

1. STRUCTURE GENERALE

2. LOBE RENAL

2.1. Tube urinaire

2.1.1. Vascularisation

2.1.2. Histologie topographique

2.1.3. Structure histologique et caractéristiques histo-fonctionnelles

A. Corpuscule rénal

B. Système tubulaire

C. Appareil juxtaglomérulaire

2.2. Interstitium rénal

2.3. Drainage lymphatique

2.4. Innervation

III. VOIES EXCRETO-URINAIRES

1. Structure générale

2. Particularités histologiques

2.1. Vessie

2.2. Urètre

INTRODUCTION

Ce chapitre présente les caractéristiques histologiques, microscopiques et ultrastructurales, du système urinaire (reins et voies excrétrices). Nos connaissances actuelles sur la morphologie de ce système relèvent du recours à trois techniques : microscopie optique, microscopie électronique à transmission et à balayage. La microscopie électronique a fourni une aide considérable à la distinction et compréhension des particularités histologiques des différentes portions de l'unité structurale et fonctionnelle du rein (tube urinaire). Il est donc important, pour mieux comprendre la relation de la structure du tube urinaire avec ses fonctions, de s'intéresser à son ultrastructure.

Toute altération de la structure du rein et/ou des voies excrétrices peut retentir sur la fonction rénale et induire une insuffisance rénale. D'où l'importance de connaître l'histo-physiologie du système urinaire.

I. GENERALITES

Le parenchyme rénal est formé de trois composantes fondamentales : **tubes urinaires**, **vaisseaux** et **interstitium**. Ces structures sont impliquées dans **l'élaboration de l'urine** et la **sécrétion de certaines molécules** à activités locales et/ou systémiques, dont notamment celles impliquées dans la **régulation de la volémie et de la pression artérielle**, de **l'érythropoïèse**, et du **bilan phosphocalcique**. La fonction endocrine est traitée dans le cours de physiologie.

Les voies excrétrices ont une même **structure histologique de base** avec certaines particularités relevées aux étages vésical et urétral.

II. PARENCHYME RENAL

1. STRUCTURE GENERALE

L'examen macroscopique de la coupe longitudinale du rein permet de reconnaître deux zones : corticale et médullaire (**Fig 1**).

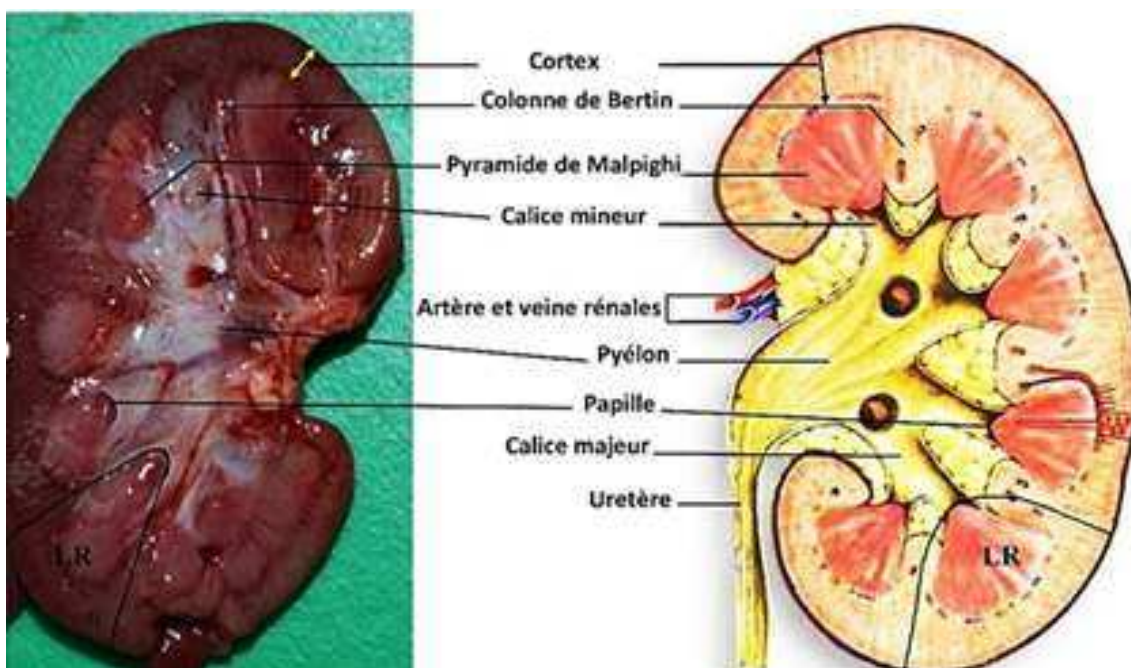


Figure 1. Structure générale du rein. LR, lobe rénal.

La zone corticale, foncée, correspond au cortex rénal, compris entre la capsule rénale et la base des pyramides de Malpighi.

La zone médullaire correspond à la partie interne qui comprend les **pyramides de Malpighi**, plus claires, et les **colonnes de Bertin**, aussi foncées que le cortex, situées entre ces pyramides. Le sommet de chaque pyramide est dirigé vers les calices. La partie pointue de la pyramide correspond à la **papille**, entourée d'un calice mineur. Les **calices mineurs** convergent par groupe de deux ou trois pour former les **calices majeurs** qui à leur tour confluent pour former le **pyélon**.

Chaque pyramide de Malpighi associée au cortex voisin forme un **lobe rénal**.

2. LOBE RENAL

Microscopiquement, le cortex externe est parcouru par plusieurs groupements étroits et hauts de tubes qui descendent verticalement dans la médulla. Ils constituent les **pyramides de Ferrein**. L'ensemble pyramide de Ferrein et parenchyme

rénal environnant constitue un **lobule rénal**. La région corticale entourant les pyramides de Ferrein est appelée **labyrinthe** (Fig 2).

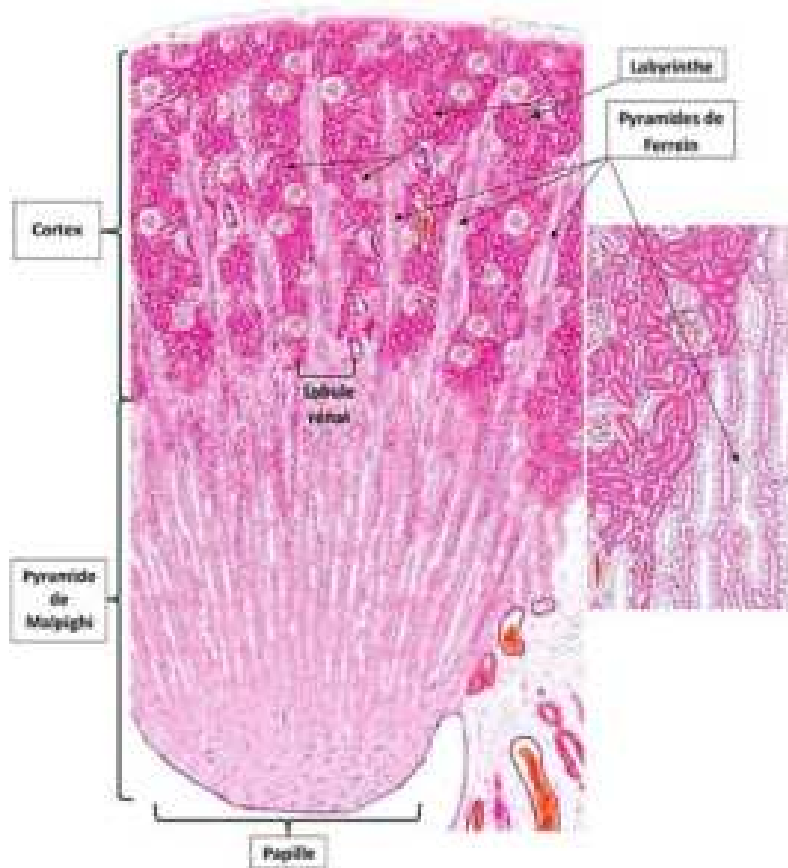


Figure 2. Cortex et pyramide de Malpighi: Aspect microscopique à faible grossissement.

Les pyramides de Malpighi et les pyramides de Ferrein, constitués par les mêmes éléments structuraux (tubes), forment la **substance médullaire**. Les colonnes de Bertin et le cortex externe à l'exclusion des pyramides de Ferrein, ayant une structure commune, constituent la **substance corticale**.

Le rein adulte montre une mince région sous-capsulaire dépourvue de corpuscules rénaux, appelée **cortex corticis**. Ce dernier est absent au niveau du rein fœtal et du jeune enfant.

Le **lobe rénal** est formé de tubes urinaires, de vaisseaux et d'interstitium.

2.1. TUBE URINAIRE

Le **tube urinaire** représente l'unité structurale et fonctionnelle du rein (Fig 3). Il est constitué de deux éléments principaux :

- (1) **Néphron** : comprend le corpuscule rénal, le segment contourné du tube proximal (TCP), l'anse de Henle et le segment contourné du tube distal (TCD). L'anse de Henle regroupe le segment droit descendant du tube proximal ou pars recta proximale, le segment grêle moyen, et le segment droit ascendant du tube distal ou pars recta distale.
- (2) **Canal collecteur**, dont fait partie le **tube de connexion** qui connecte ce canal au TCD.

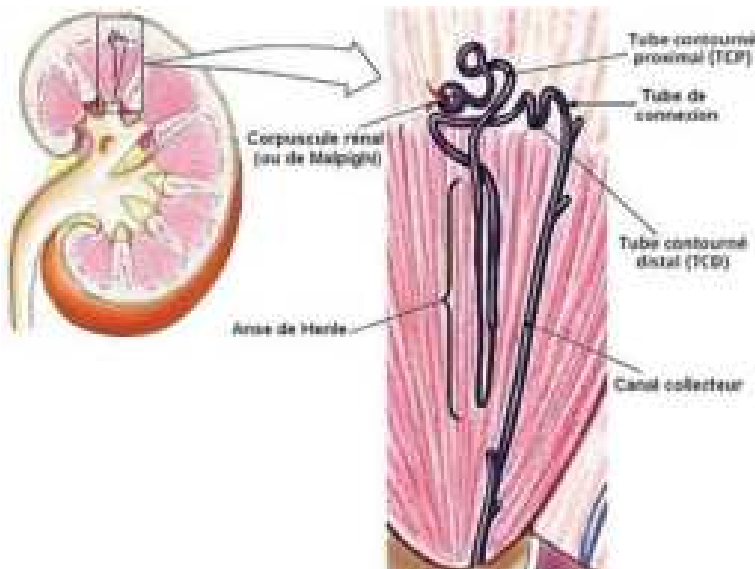


Figure 3. Composantes du tube urinaire.

2.1.1. Vascularisation

L'artère rénale se ramifie dans le parenchyme et donne successivement les **artères interlobaires, arquées ou arciformes** et **interlobulaires**. Chaque artère interlobulaire chemine verticalement dans le cortex et développe une **microcirculation** pour chaque néphron. Cette microcirculation est très particulière et constitue la clé de la fonction rénale. Elle comprend successivement une **artériole afférente**, un **premier réseau capillaire glomérulaire**, une **artériole efférente**, et un **deuxième réseau capillaire péri-tubulaire cortical et médullaire (vasa recta)**, constituant un **réseau porte artériel** (Fig 4).

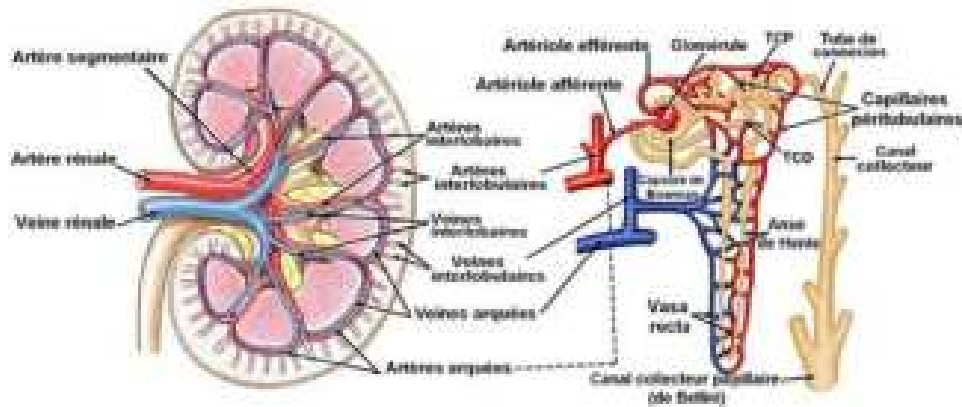


Figure 4. Vascularisation du tube urinaire.

Près de la jonction cortico-médullaire, l'artère arquée (mais aussi les artérioles efférentes des néphrons juxtamédullaires) donnent naissance à de longs capillaires, les **vasa recta**, qui descendent verticalement dans les pyramides de Malpighi, le long des anses de Henle.

La circulation veineuse naît du réseau capillaire péritubulaire, se draine dans des veinules qui s'abouchent dans la **veine interlobulaire** (essentiellement dans la veine arquée pour les veinules drainant les vasa recta). Les veines interlobulaires, arciformes et interlobaires cheminent parallèlement aux artères et se drainent dans la **veine rénale**.

Les vaisseaux interlobulaires et le réseau capillaire entourant les tubes corticaux sont localisés dans le labyrinthe.

2.1.2. Histologie topographique

Les tubes urinaires sont localisés dans les deux substances corticale et médullaire selon la répartition suivante (Fig 5) :

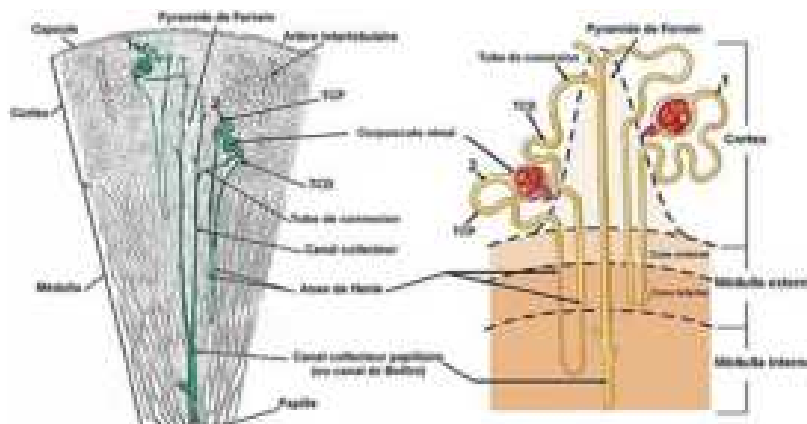


Figure 5. Histologie topographique des tubes urinaires.

1 : Néphron superficiel (cortical) ; 2 : Néphron profond (juxtamédullaire).

- Corpuscule rénal, l'essentiel des tubes contournés proximaux et distaux : labyrinthe cortical (substance corticale).
- Anse de Henle et canal collecteur : pyramides de Ferrein et de Malpighi (substance médullaire).
- Tube de connexion : labyrinthe et pyramides (substances corticale et médullaire).

2.1.3. Structure histologique et caractéristiques histo-fonctionnelles

A. Corpuscule rénal

Le corpuscule rénal est constitué d'un **glomérule** recouvert par la capsule de Bowman (Fig. 6).

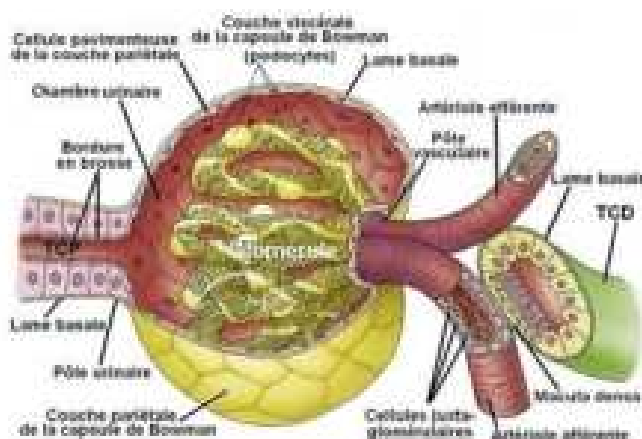


Figure 6. Vue en 3D d'un corpuscule rénal et de ses deux pôles, vasculaire et urinaire.

a. Glomérule

Il est constitué de **capillaires** et de **mésangium** (Fig 7).

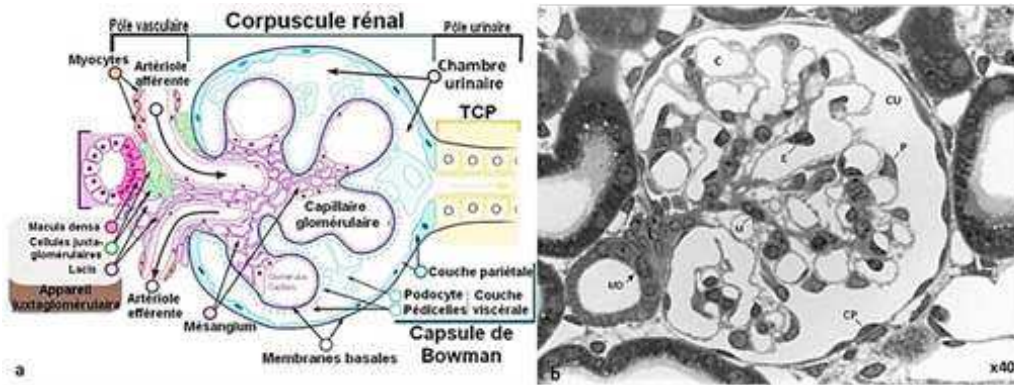


Figure 7. Structure du corpsculaire rénal.

(a) Aspect schématisé ; (b) Aspect microscopique. C, capillaire glomérulaire ; CU, chambre urinaire ; CP, cellule pariétale pavimenteuse ; E, cellule endothéliale ; L, lacis ; M, cellule mésangiale ; MD, macula densa, P, podocyte.

i. Capillaires glomérulaires

Ils sont revêtus d'un endothélium mince et fenêtré, pourvu de nombreux petits pores d'un diamètre d'environ 70 nm, représentant 30 à 45 % de la surface endothéliale. Les noyaux des cellules endothéliales sont habituellement situés en regard du mésangium. La surface endothéliale est chargée négativement, en rapport avec la présence de **glycocalyx**.

ii. Mésangium

Il constitue les axes conjonctifs du glomérule, assurant le rôle de **support des capillaires glomérulaires**. Il est séparé de la lumière capillaire par l'endothélium fenêtré, et de l'espace urinaire par la LBG. Il est constitué de **cellules** et de **matrice** (Fig 7&10).

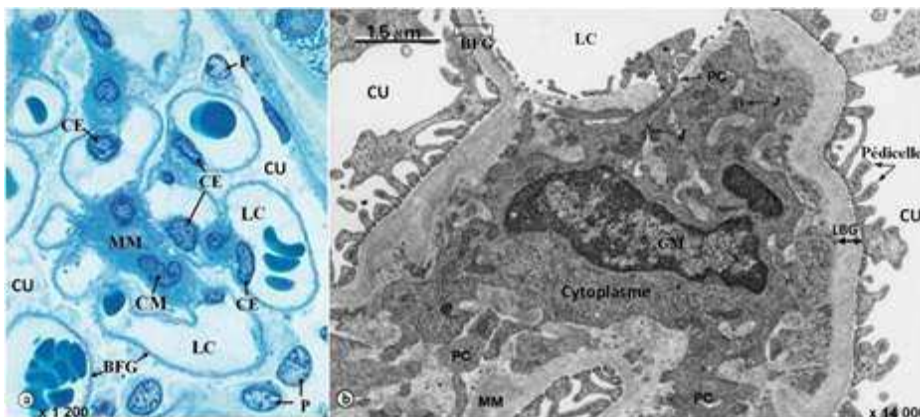


Figure 10. Aspect du mésangium en microscopie optique (a) et électronique (b). Notez-en (b) que la densité de la matrice mésangiale est comparable à celle de la LBG. BFG, barrière de filtration glomérulaire ; CE, noyau de cellule endothéliale ; CM, noyau de cellule mésangiale ; CU, chambre urinaire ; J, jonction type desmosome ; LC, lumière capillaire ; MM, matrice mésangiale ; P, podocyte ; PC, prolongement cytoplasmique de la cellule mésangiale.

Les cellules mésangiales ont un grand noyau riche en euchromatine et des organites bien développés (**activité de synthèse**, matrice et substances vasoactives), des lysosomes et des filaments d'actine et myosine. Elles sont pourvues de longs prolongements cytoplasmiques ramifiés, particulièrement riches en protéines contractiles, liées par des jonctions de type desmosome et gap, et s'étendant dans la LBG (Fig 10). Bien que ces cellules ne fassent pas partie de la barrière de filtration glomérulaire (cf. infra), elles participent indirectement à la filtration glomérulaire grâce à leur activité phagocytaire (contrôle du turn-over de la LBG), leur activité contractile (modification du calibre des capillaires en réponse notamment à l'angiotensine II), et à leur **activité sécrétoire**.

La **matrice mésangiale** est composée d'un matériel membranoïde (analogue à une lame basale), d'aspect microfibrillaire en microscopie électronique, en rapport avec la présence de glycoprotéines structurales fibrillaires qui contribuent à l'amarrage de l'ensemble LBG-cellules-matrice mésangiale.

b. Capsule de Bowman

Elle est formée de deux couches de cellules épithéliales qui sont en continuité au pôle vasculaire, délimitant un espace appelé **chambre urinaire**, en continuité avec la lumière du TCP (Fig 6&7) :

(1) **Couche pariétale** constituée d'un épithélium pavimenteux simple en continuité avec l'épithélium cubique simple du TCP ;

(2) **Couche viscérale**, revêtant la face externe des capillaires glomérulaires, constituée de grandes cellules épithéliales hautement spécialisées, appelées **podocytes**.

Les **podocytes** présentent un volumineux corps qui baigne dans l'espace urinaire et de longs prolongements cytoplasmiques ramifiés dont les expansions terminales correspondent aux **pédicelles** (Fig 8). Ces derniers sont amarrés à la face externe de la lame basale glomérulaire (LBG, cf. infra) et délimitent des fentes de filtration. Chaque fente est traversée par un **diaphragme (dit de fente)** formé d'un complexe multiprotéique dont le constituant majeur est une glycoprotéine transmembranaire appelée néphrine.

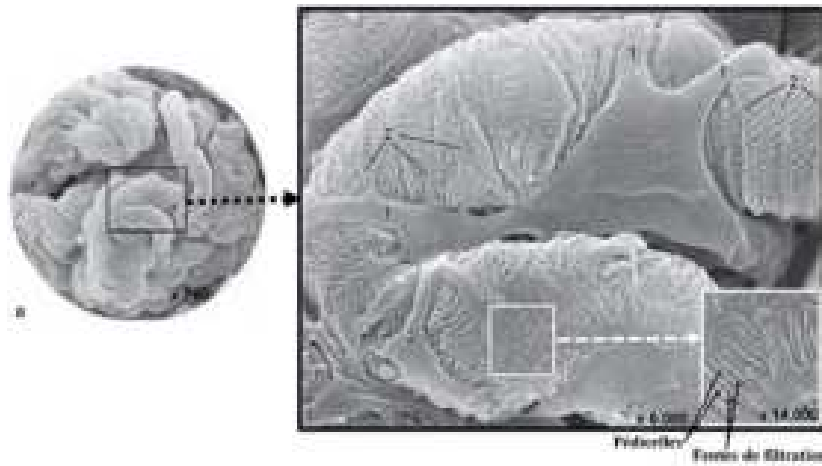


Figure 8. Aspect du podocyte en microscopie électronique à balayage.

(a) Glomérule. (b) Ramifications des prolongements cytoplasmiques du podocyte se terminant par les pédicelles (3^{ème} ordre) qui délimitent les fentes de filtration.

A noter que les pédicelles intriqués appartiennent à deux podocytes voisins.

Les pédicelles possèdent un **cytosquelette dynamique d'actine** bien développé et hautement organisé, qui est connecté au diaphragme de fente, à la LBG et au glycocalyx podocytaire (podocalyx) par le biais d'autres complexes protéiques.

c. Barrière de filtration glomérulaire

Les structures comprises entre la lumière capillaire et la chambre urinaire constituent la **barrière de filtration glomérulaire** (Fig 9).

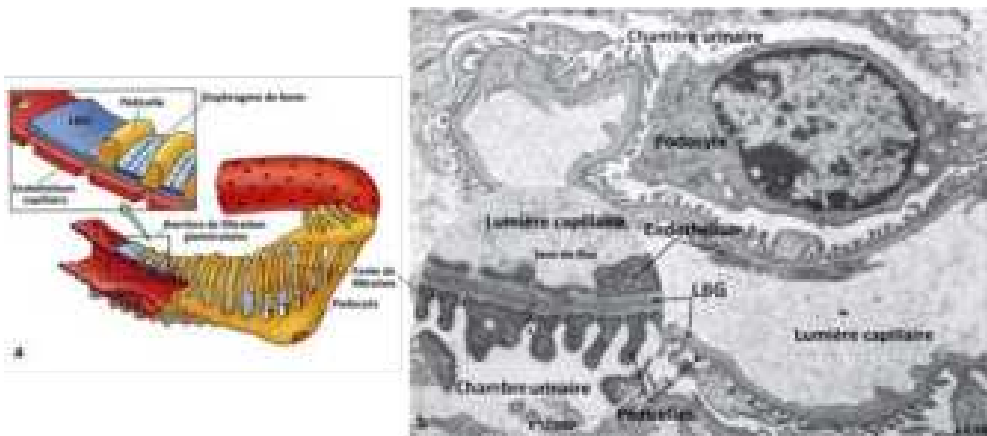


Figure 9. Barrière de filtration glomérulaire : Aspect schématique en 3D (a) et en microscopie électronique en transmission (b).

Cette barrière est composée de trois couches :

* Endothélium capillaire

* **LBG** : commune aux cellules endothéliales et podocytes, d'où son épaisseur importante. Sa trame moléculaire de base est constituée de collagène IV réalisant un feutrage régulier serré où s'intègrent des protéoglycanes très anioniques.

* Diaphragme de fente

Ces trois couches délimitent un passage complètement extracellulaire aux molécules filtrées. Elles s'opposent au passage des grosses molécules (poids moléculaire >70 kDa/taille $\geq 3,5$ nm) et des molécules chargées négativement, quelle que soit leur taille, grâce aux trois sites polyanioniques : glycocalyx endothélial, glycosaminoglycanes de la LBG et podocalyx.

B. Système tubulaire (Fig 11)

• TCP

C'est le segment le plus long du néphron (14 mm), occupant la plus grande partie du cortex rénal. Il est revêtu de **cellules cubiques hautes** présentant un cytoplasme abondant et **très éosinophile**, un noyau central nucléolé et une **bordure en brosse apicale** recouverte d'un **glycocalyx épais** qui assure une double protection physique et chimique pour l'épithélium. En microscopie électronique, la bordure en brosse est constituée de **nombreuses hautes microvillosités très serrées** qui augmentent la surface d'absorption d'environ 20 fois. Le cytoplasme sous-jacent renferme de **nombreux lysosomes et vésicules de pinocytose** impliqués dans la réabsorption et la dégradation de petites quantités de protéines ayant franchi la barrière de filtration. La membrane plasmique basale présente de nombreux **prolongements latéraux interdigités** avec ceux des cellules voisines délimitant un **espace intercellulaire latéral complexe**. Ce dernier est séparé de la lumière tubulaire par les jonctions serrées intercellulaires qui sont cependant perméables aux solutés. Dans ces prolongements, de **nombreuses mitochondries de grande taille** sont disposées perpendiculairement à la lame basale ; elles fournissent l'ATP nécessaire au transport actif de sodium médié par la pompe Na⁺/K⁺ ATPase à travers la membrane plasmique basolatérale.

Le rôle principal du TCP est la réabsorption massive des deux tiers de l'ultrafiltrat glomérulaire grâce à l'importante surface de réabsorption au niveau des domaines apical (microvillosités) et basolatéral (interdigitations). L'épithélium du TCP est aussi le lieu de synthèse du **calcitriol** (cf. cours physiologie).

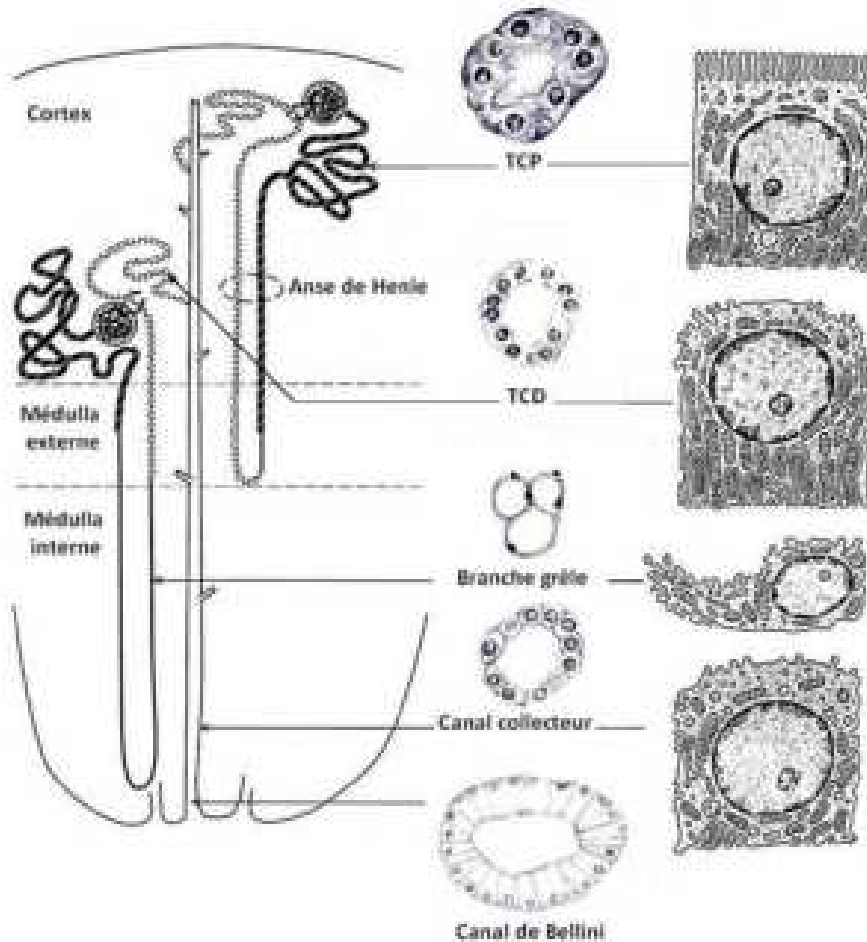


Figure 11. Caractéristiques microscopiques et ultrastructurales des différents segments du tube urinaire.

• Anse de Henle

* **Pars recta proximale** : se distingue du TCP par un épithélium moins complexe, cubique plus bas, avec une bordure en brosse plus réduite (microvillosités plus courtes et moins nombreuses), des interdigitations basolatérales moins développées, des mitochondries et lysosomes de densité moindre, ce qui est corrélé avec une réabsorption moindre d'eau et de solutés.

* **Pars recta distale** : bordée par un épithélium comparable à celui du TCD ; cubique bas, dépourvu de bordure en brosse, et riche en mitochondries qui sont étroitement associées à d'importantes interdigitations basolatérales.

* **Branche grêle** : bordée par un épithélium pavimenteux simple, pauvre en organites, dépourvu d'interdigitations latérales dans son trajet médullaire, avec de rares microvillosités limitées au segment descendant. Ces caractéristiques histologiques reflètent l'absence de transports actifs. Les cellules épithéliales expriment de façon constitutive uniquement dans le segment descendant un grand nombre de canaux à eau (aquaporines), expliquant leur perméabilité à l'eau. En revanche, le segment ascendant est perméable au NaCl qui est réabsorbé par diffusion passive paracellulaire avant de subir un transport actif contre un gradient de concentration dans la pars recta distale. Ce mode asymétrique de réabsorption de l'eau et du NaCl, appelé **mécanisme de contre-courant multiplicateur**, crée un gradient osmotique interstitiel cortico-médullaire qui permet la concentration de l'urine. Les vasa recta permettent d'échanger les solutés (NaCl, urée) et maintenir une hyperosmolarité médullaire en les renvoyant en profondeur, d'où le **mécanisme de contre-courant échangeur** (cf. cours physiologie).

• TCD

Optiquement, il se distingue du TCP par l'absence de bordure en brosse, d'où une lumière plus large et plus nette, un **épithélium cubique plus bas**, et un **cytoplasme plus clair** avec des organites moins développés. En ultrastructure, la cellule épithéliale montre des **microvillosités courtes irrégulières et éparses**, de **rare**s lysosomes et vésicules apicales, et des **interdigitations basolatérales bien développées** contenant de **nombreuses mitochondries** (l'activité de la pompe Na^+/K^+ ATPase étant plus élevée que dans les autres parties du tube urinaire).

Le rôle principal du TCD rejoint celui du reste de la partie distale du tube urinaire : ajustement du bilan hydroélectrolytique aux besoins de l'organisme. Il est le site d'action de l'aldostérone qui stimule la réabsorption de sodium (cf. cours physiologie).

• Tube de connexion ou connecteur

La transition entre le TCD et le canal collecteur n'est pas brutale puisqu'il existe un segment intermédiaire, le tube de connexion. L'épithélium de surface est constitué de cellules de type TCD et de type canal collecteur (cellules principales et intercalaires) avec un noyau sphérique clair (chromatine décondensée), nucléolé.

• Canal collecteur

Il est bordé par un épithélium de type prismatique, constitué de deux types de cellules (**Fig. 12**) :

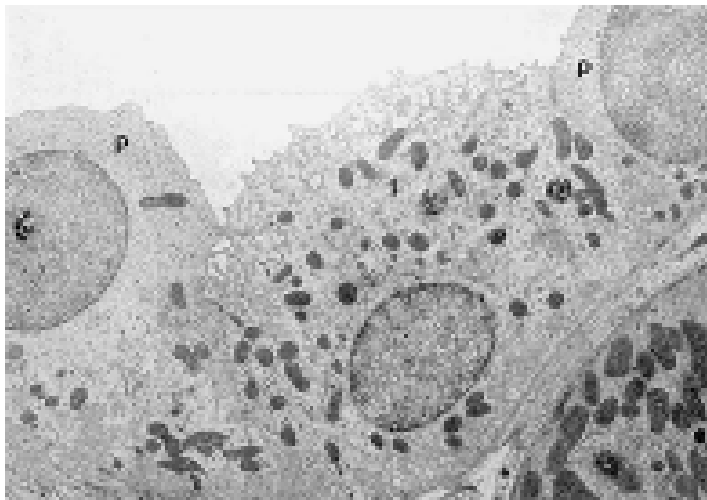


Figure 12. Aspect ultrastructural de la cellule intercalaire (I) et cellule principale (P).

• **les cellules principales** : plus nombreuses, présentant un cytoplasme clair contenant peu d'organites (surtout de petites mitochondries rondes de disposition essentiellement basale), une membrane apicale pratiquement lisse, pourvue de rares microvillosités courtes et éparses, et une membrane plasmique basale pourvue de profonds replis (invaginations marquées) sans interdigitations latérales. Ces replis deviennent moins apparents au fur et à mesure que l'on progresse en aval. Ces caractéristiques histologiques sont à corrélérer à la réabsorption active résiduelle de sodium contre une sécrétion de potassium qui a lieu dans la portion corticale du canal collecteur sous le contrôle de l'aldostérone. L'eau est également réabsorbée au niveau de ces cellules, tout le long du canal collecteur, grâce à l'expression de nombreuses aquaporines, induites par l'ADH. La réabsorption d'eau permet la concentration de l'urée dans le canal collecteur, ce qui facilite sa diffusion facilitée dans l'interstitium papillaire et la création de **gradient médullo-cortical** (ou **papillo-cortical**) de l'urée qui **contribue à l'osmolarité totale de la médulla interne**.

• **les cellules intercalaires** : ont un cytoplasme plus sombre en raison de leur richesse en organites, surtout en mitochondries avec un développement marqué des différenciations apico-basales (microvillosités, invaginations basales). Ces cellules participant activement à l'équilibre acido-basique par sécrétion d'ions H^+ ou d'ions HCO_3^- . Le nombre de ces cellules varie selon la région du canal collecteur et elles sont pratiquement absentes de sa portion médullaire interne.

Dans leur trajet dans les pyramides de Ferrein vers la médulla, le nombre des cellules intercalaires décroît et les cellules principales deviennent progressivement plus hautes, ce qui fait qu'en approchant de la papille, les gros canaux (dits de Bellini) sont bordés uniquement par des cellules principales prismatiques hautes claires, disposées en colonnes.

C. Appareil juxtaglomérulaire (AJG)

Il est situé au pôle vasculaire du corpuscule rénal (**Fig 6, 7&13**). Il est constitué de trois types de cellules :

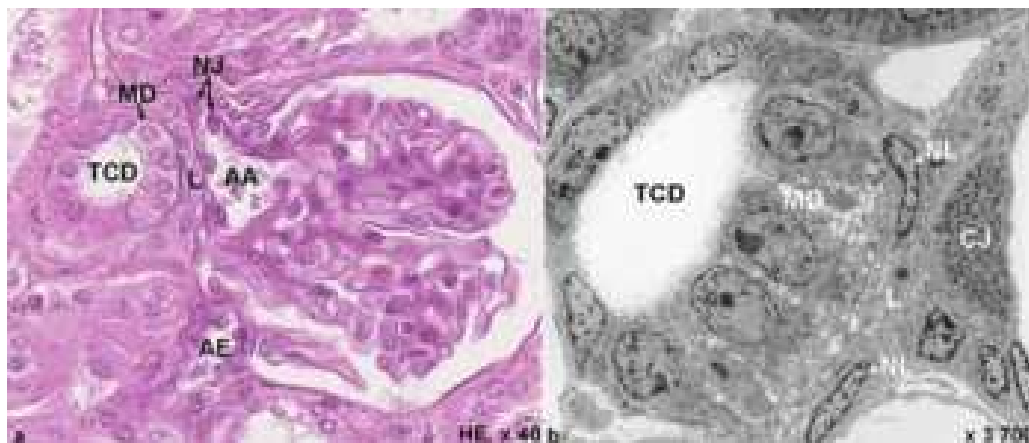


Figure 13. Appareil juxtaglomérulaire. (a) Microscopie optique ; (b) Microscopie électronique. AA, artériole afférente ; AE, artériole efférente ; CJ, cellule juxtaglomérulaire (noyau non visible) ; L, lacis ; NL, noyau de cellule du lacis ; MD, macula densa ; NJ, noyau de cellule juxtaglomérulaire ; TCD, tube contourné distal.

- **les cellules de la macula densa** : sont en contact avec le pôle vasculaire du corpuscule rénal du même néphron et correspondent à une différenciation de l'épithélium du TCD (cellules plus hautes, plus riches en microvillosités apicales et moins riches en organites et en interdigitations cytoplasmiques basolatérales). Elles fonctionnent comme **chémo-récepteurs**, capables de percevoir de fines variations du contenu tubulaire en NaCl et moduler le débit de filtration glomérulaire et l'excrétion urinaire de sodium.

- **les cellules juxtaglomérulaires** : ce sont des cellules productrices de rénine, situées dans les parois des artérioles afférentes (surtout) et efférente. Elles ont un phénotype ultrastructural de **cellules myoendocrines**, renfermant à la fois des granules endocrines et quelques myofilaments contractiles qui permettent de sécréter la rénine dans la circulation sanguine en réponse à divers stimuli. La rénine est une enzyme faisant partie du **système rénine-angiotensine-aldostérone**,

principal système de régulation **de l'excrétion rénale de sodium**, qui agit en modifiant l'hémodynamique intrarénale et systémique, et le transport tubulaire de sodium. Sa sécrétion par les cellules juxtaglomérulaires est stimulée par la diminution de la pression artérielle, la diminution du débit de NaCl dans le TCD et la stimulation sympathique (**cf. cours physiologie**).

- les **cellules du lacis** : sont similaires aux cellules mésangiales étant pourvues de myofilaments contractiles et de minces prolongements, et entourées de matrice. Elles sont reliées entre elles et aux cellules mésangiales et musculaires lisses de l'artériole afférente par des jonctions communicantes. Leur rôle serait de médier la transmission des signaux, impliqués dans le rétrocontrôle tubulo-glomérulaire, entre la macula densa et l'artériole afférente (**cf. cours physiologie**).

2.2. INTERSTITIUM RÉNAL

Il est quasiment virtuel dans le cortex. En revanche, son volume est plus important dans la médulla, d'autant plus qu'on approche de la papille. Il est occupé par des vaisseaux sanguins et lymphatiques et contient essentiellement deux types de cellules interstitielles : cellules de type fibroblastique (cortex), responsables de la synthèse de la matrice extracellulaire et de l'érythropoïétine (servant de facteur de croissance pour l'**érythropoïèse**, cf. thème 6), et cellules de type myofibroblastique (médulla), orientées selon le grand axe des structures tubulaires et vasculaires, renfermant des gouttelettes lipidiques (synthèse des prostaglandines).

L'interstitium rénal **participe à la concentration de l'urine** par sa composante matricielle, support de l'hyperosmolarité médullaire.

2.3. DRAINAGE LYMPHATIQUE

Les capillaires lymphatiques naissent à proximité des corpuscules rénaux et au voisinage immédiat des cellules juxtaglomérulaires de l'artériole afférente. Les canaux principaux suivent les vaisseaux interlobulaires, arciformes et interlobaires pour émerger au niveau du hile rénal. Un système lymphatique mineur circule dans la capsule rénale et reçoit de petits affluents venant du cortex externe (**Fig 14**).

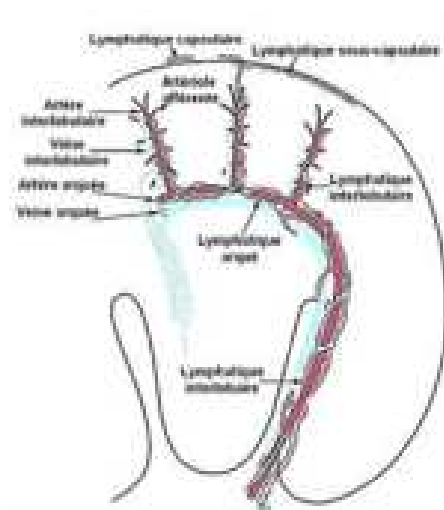


Figure 14. Drainage lymphatique rénal.

2.4. INNERVATION

L'innervation du rein est assurée par des fibres à la fois adrénérergiques (sympathiques) et cholinérergiques (parasymphatiques) qui suivent le trajet des vaisseaux sanguins dans le cortex et la médulla externe. L'appareil juxtaglomérulaire est richement innervé par des axones exclusivement adrénérergiques qui arrivent au contact des cellules juxtaglomérulaires, des myocytes lisses artériolaires et des cellules du lacis. La stimulation sympathique induit une vasoconstriction artériolaire (médiée par les récepteurs α_1) et une dégranulation des cellules juxtaglomérulaires (médiée par les récepteurs β_1).

III.VOIES EXCRETO-URINAIRES

Elles comprennent les voies urinaires du haut appareil urinaire (**calices, bassinet et uretère**) qui permettent la vidange de l'urine grâce à leur péristaltisme, et les voies urinaires du bas appareil urinaire correspondant à la **vessie**, réservoir principal et temporaire de l'urine, et l'**urètre**, permettant l'évacuation de l'urine au cours de la miction.

Ces voies excrétrices ont la même structure histologique de base avec certaines particularités inhérentes à leur fonction. Une coupe transversale à leur niveau met en évidence, de dedans en dehors, la même série de tuniques : **muqueuse**, **muscleuse** et **adventice**.

1. STRUCTURE GÉNÉRALE

a. Muqueuse

Elle comprend un revêtement épithélial spécialisé appelé urothélium, reposant sur une lame basale, et un chorion ou lamina propria.

L'**urothélium** paraît formé de plusieurs assises de cellules (basales cubiques, intermédiaires polygonales/fusiformes en raquette et superficielles ovalaires en massue) qui, en

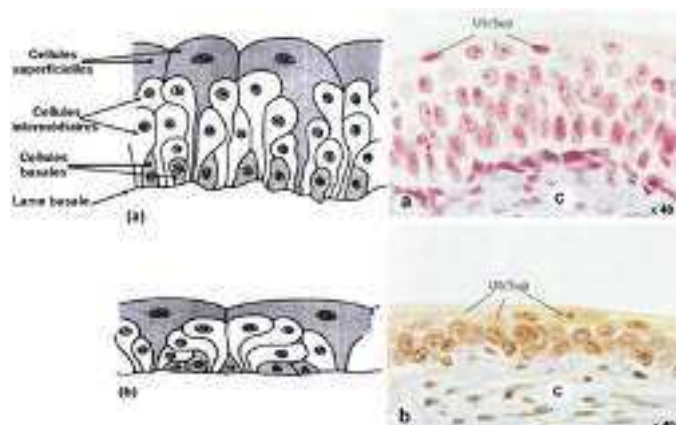


Figure 15. Urothélium. (a) Epais (vessie vide relâchée) ; (b) Aplati (vessie pleine distendue). C, chorion ; UtcSup, urothéliocytes superficiels.

réalité, ont un prolongement fin qui les attache à la lame basale, et dont les formes se modifient selon le degré de distension de la paroi. Pour ces raisons, l'urothélium est dit pseudostratifié de transition. Seuls le trigone vésical chez la femme et l'urètre échappent, pour une partie, à cette règle générale (**cf. infra**). L'épaisseur de l'urothélium varie dans les différentes zones des voies excrétrices, reflétant les différents degrés de distension auxquels ces structures sont habituellement soumises. Au niveau des calices et bassinets, il n'y a que trois couches de cellules, contre quatre à cinq au niveau de l'urètre et six à huit au niveau de la vessie à l'état de vacuité, alors qu'il n'y a que deux à trois couches de cellules aplaties visibles à l'état de réplétion (**Fig 15**).

En microscopie électronique, il existe une forte cohésion intercellulaire : présence de jonctions serrées entre les cellules superficielles et de desmosomes entre les membranes latérales interdigitées des cellules voisines, avec présence d'hémidesmosomes au contact de la lame basale. Cela permet **l'adaptation de l'épithélium à la distension** (glissements des cellules les unes par rapport aux autres) et à **l'étanchéité de la barrière sang-urine**. Par ailleurs, les cellules superficielles présentent deux particularités (plus évidentes au niveau de la vessie) : (1) présence de vésicules fusiformes sous membranaires qui sont incorporées à la membrane lors de la distension (réserves de membrane) ; (2) une membrane apicale asymétrique, où le feuillet dense externe est plus épais que le feuillet dense interne, en rapport avec la présence d'urolakines (glycoprotéines transmembranaires), séparées de **zones interplaques souples**, servant de points de plicature (**Fig 16**). Ce dispositif permet ainsi de **renforcer la membrane et de prévenir sa rupture pendant la distension**. Enfin, le cytoplasme renferme des filaments de kératine et il est pauvre en organites (réticulum endoplasmique granuleux pratiquement inexistant), traduisant une faible activité métabolique. Toutefois, il existe au sein de l'assise basale des cellules neuro-endocrines éparées capables de sécréter diverses hormones (sérotonine, HCG, bombésine, somatostatine).

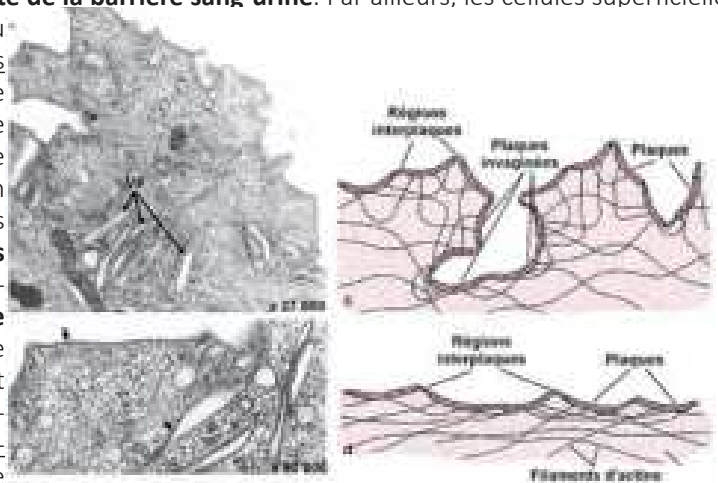


Figure 16. Surface lumineuse des urothéliocytes superficiels (vessie).

(a, b) Microscopie électronique : Notez les vésicules fusiformes (VF) délimitées de membranes similaires à la membrane plasmique (flèches). (c, d) Aspect schématique des plaques invaginées à l'état de vacuité (c) et intégrées dans la membrane plasmique à l'état de réplétion (d).



Figure 17. Coupe transversale de l'urètre en microscopie optique. Notez les replis muqueux responsables de l'aspect étoilé de la lumière. U, urothélium ; C, chorion ; M, musculature avec couche longitudinale interne (CI) et circulaire externe (CE) ; A, adventice.

Le chorion est fait de tissu conjonctif riche en fibres élastiques, vaisseaux sanguins et lymphatiques et en filets nerveux végétatifs. Il est dépourvu de glandes, excepté le chorion de l'urètre (**cf. infra**). La richesse en fibres élastiques et la relative lâcheté du chorion confèrent à la muqueuse des **propriétés élastiques**. Cela rend compte de la formation de **replis muqueux** observés à l'état de vacuité sur une coupe transversale du bassinets, l'urètre et la vessie ; ceux de l'urètre sont longitudinaux et saillants, responsables de l'aspect étoilé de la lumière urétérale (**Fig 17**).

b. Musculeuse: Elle est constituée de cellules musculaires lisses qui sont groupées en faisceaux séparés par des travées conjonctives, organisés en deux couches, longitudinale interne et circulaire externe. La musculature est beaucoup plus développée dans le tiers inférieur de l'urètre et la vessie, où une troisième couche longitudinale externe est notée. La disposition des couches **musculaires de la musculature vésicale (ou détrusor)** semble souvent plus aléatoire sur les coupes histologiques, d'où le terme de **muscle plexiforme**.

c. Adventice: Elle est de nature fibroélastique et renferme de nombreux éléments vasculo-nerveux (vaisseaux sanguins et lymphatiques, nerfs végétatifs) et du tissu adipeux qui est très abondant au niveau vésical. En haut et en arrière de la vessie, l'adventice est très mince et doublée par la séreuse péritonéale, à laquelle elle adhère.

La paroi des voies urinaires est innervée par des fibres végétatives motrices sympathiques et parasympathiques cheminant

dans l'adventice, la musculature et le chorion (particulièrement abondantes au niveau de la paroi vésicale), à effets antagonistes : la stimulation sympathique provoque le relâchement de la musculature, celle du parasympathique provoque l'effet inverse. Toutefois, l'innervation autonome a un rôle minime dans le contrôle des contractions musculaires rythmiques (péristaltisme) des voies urinaires sus-vésicales. L'initiation du péristaltisme, naissant des calices, est semblable à ce qui est observé dans les autres tissus musculaires lisses, où le stimulus est fourni par des cellules « pacemaker », correspondant à des cellules musculaires modifiées. La conduction électrique (mouvement d'ions entre cellules voisines), responsable de la progression de l'onde péristaltique vers la vessie, est assurée par les jonctions communicantes (cf. Thème 5). Les voies urinaires sont également innervées par des fibres végétatives sensibles, contrairement aux reins, ce qui explique les coliques néphritiques en cas de lithiase urinaire.

L'innervation vésicale est traitée dans le cours de physiologie.

2. PARTICULARITÉS HISTOLOGIQUES

La structure histologique des voies urinaires du haut et bas appareil est très comparable avec, toutefois, des particularités qui accentuent certains traits fonctionnels au niveau notamment de l'urothélium et la musculature.

2.1. Vessie

- Chez la femme, le **trigone** est tapissé par un épithélium malpighien non kératinisé avec des îlots d'épithélium transitionnel. Ce revêtement épithélial malpighien est soumis aux mêmes influences hormonales cycliques oestrogéniques que la muqueuse vaginale.

- Le **chorion de la vessie**, surtout celui du trigone, est le siège de petites invaginations de l'épithélium transitionnel constituant des bourgeons pleins ou pourvus de lumière, qui prennent un aspect pseudoglandulaire en l'absence de continuité avec l'urothélium de surface (incidence de coupe). Il est, par ailleurs, d'épaisseur variable, très mince au niveau du trigone et du col et plus épais au pourtour des orifices urétéraux et au dôme. Il est séparé en deux couches, superficielle et profonde, par une tunique musculaire d'épaisseur variable (équivalent de musculature muqueuse), constituée de petits faisceaux plus ou moins clairsemés et discontinus.

- La **couche musculaire circulaire moyenne** est la plus épaisse, et plus nettement marquée dans la région du col vésical chez l'homme, où elle réalise le **sphincter interne lisse**. Chez la femme il n'existe au niveau du col vésical que des faisceaux musculaires longitudinaux ou obliques qui se continuent dans la paroi urétrale, ce qui ne constitue pas un système sphinctérien aussi puissant que chez l'homme.

2.2. Urètre

L'urètre présente des différences selon le sexe. L'urètre masculin est un conduit uro-génital ; il est abordé plus en détail en thème 13.

L'épithélium urétral est successivement de type transitionnel (à la jonction uréthro-vésicale chez la femme, et au niveau de l'urètre prostatique chez l'homme), prismatique stratifié dans sa portion médiane (portions membraneuse et spongieuse chez l'homme), puis malpighien non kératinisé à son extrémité distale (méat externe chez la femme, et fossette naviculaire chez l'homme).

Le chorion est particulièrement riche en fibres élastiques et en plexi veineux. Contrairement au reste du tractus urinaire, il renferme des glandes mucosécrétantes (glandes de Skene chez la femme et glandes de Littre au niveau de l'urètre spongieux chez l'homme).

La musculature est organisée en deux couches, interne longitudinale et externe circulaire, excepté dans l'urètre spongieux chez l'homme, où elle est mal individualisée et constitue un réseau plexiforme qui se confond avec celui du corps spongieux.

A l'extérieur de cette tunique musculaire lisse, des cellules musculaires striées se disposent de façon circulaire et constituent le **sphincter externe**. Ce dernier est anatomiquement distinct du muscle strié péri-urétral du plancher pelvien.

ANNEXE

SYNONYMES

Cellule/structure histologique	Synonyme(s)
Canal collecteur	Tube collecteur
Cellule intercalaire	Cellule intercalée
Cellule juxtaglomérulaire	Cellule myoépithélioïde/cellule granulaire à rénine
Chambre urinaire	Espace urinaire/espace de Bowman
Corpuscule rénal	Corpuscule de Malpighi
Glomérule	Flocculus/peloton capillaire
Médulla	Médulla
Pars recta proximale	Segment droit descendant du tube proximal
Pars recta distale	Segment droit ascendant du tube distal
Pyélon	Bassin/pelvis rénal
Pyramide de Ferrein	Rayon médullaire

REFERENCES

Bulger RE. Kidney morphology: update 1985. Toxicol Pathol. 1986;14(1):13-25.

Dalghi MG, Montalbetti N, Carattino MD, Apodaca G. The Urothelium: Life in a Liquid Environment. Physiol Rev. 2020 ; doi:10.1152/physrev.00041.2019.

Darouich S. Intérêt de la microscopie électronique dans le diagnostic des néphropathies glomérulaires : Etude prospective à propos de 20 cas. Thèse Med: Université de Tunis El Manar. 2008; T0011.

Downie ML, Lopez Garcia SC, Kleta R, Bockenhauer D. Inherited Tubulopathies of the Kidney: Insights from Genetics [published online ahead of print, 2020 Apr 1]. Clin J Am Soc Nephrol. 2020;CJN.14481119. doi:10.2215/CJN.14481119.

Eroschenko VP. diFiore's Atlas of histology with functional correlations. 12th Edition. Baltimore:Lippincott Williams & Wilkins; 2013.

Feraille E, Dizin E. Coordinated Control of ENaC and Na⁺,K⁺-ATPase in Renal Collecting Duct. J Am Soc Nephrol. 2016;27(9):2554-2563.

Nawata CM & Pannabecker TL. Mammalian urine concentration: a review of renal medullary architecture and membrane transporters. J Comp Physiol B. 2018;188(6):899-918.

Ren Y, Carretero OA, Garvin JL. Role of mesangial cells and gap junctions in tubuloglomerular feedback. Kidney Int. 2002;62(2):525-531.

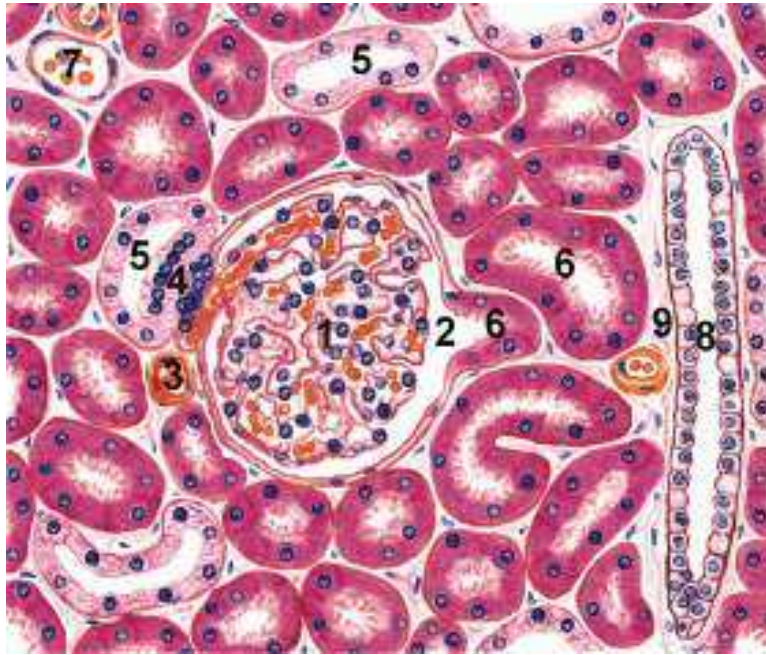
Ross MH, Pawlina W. Histology: a text and atlas with correlated cell and molecular biology. 6th Edition. Baltimore:Lippincott Williams & Wilkins;2011.

Vidal-Petiot E, Faucon AL, Tabibzadeh N, Flamant M. Bilan du sodium et sa régulation. EMC - Endocrinologie-Nutrition 2019;31(2):1-16 [Article 10-352-B-10].

Young B, O'Dowd G, Woodford P. Atlas d'histologie fonctionnelle de Wheater. 3^e édition. Paris:De Boeck Supérieur;2015.

QUESTIONS D'AUTO-EVALUATION

Q1.



- a. Nommez les structures désignées par des chiffres (1-9).
- b. Comparez les deux éléments 5 et 6.
- c. L'élément 4 fait partie d'une triade. Laquelle ? Que forme cette triade ? Quel est le rôle de l'élément 4 ?
- d. Précisez la localisation de cette région.

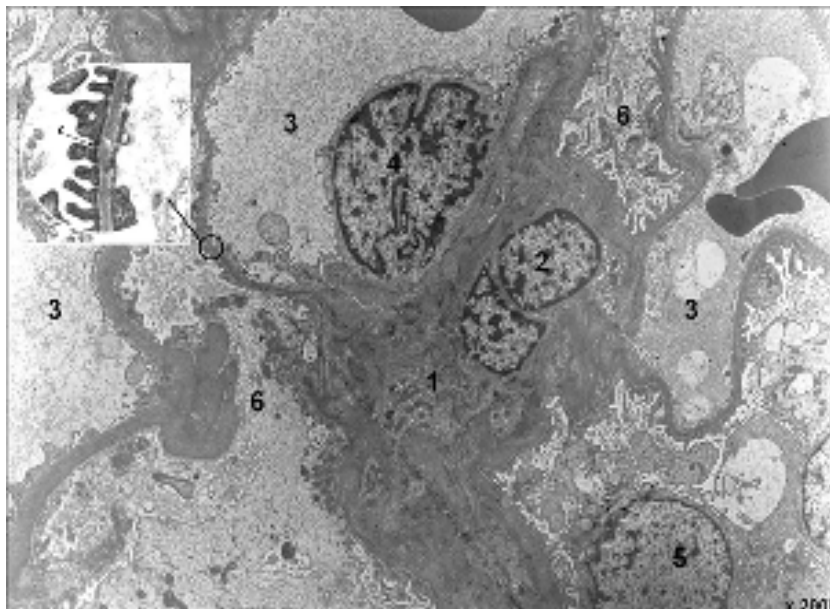
.....

.....

.....

.....

Q2.



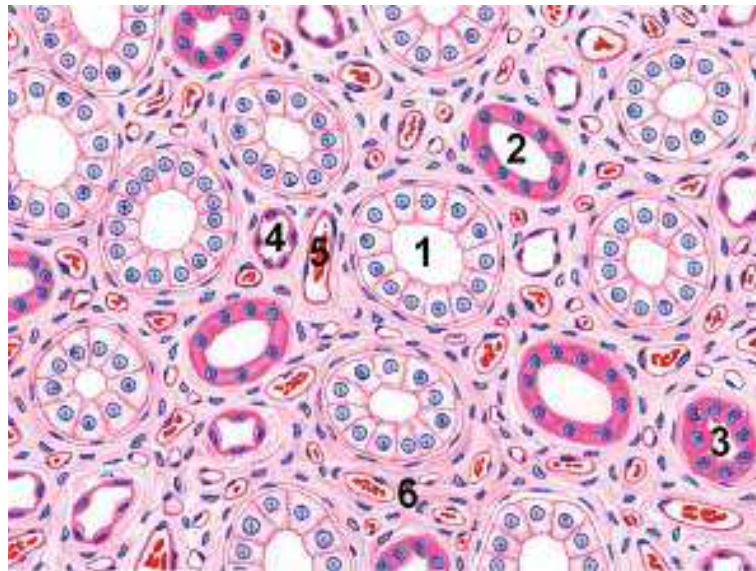
- a. Nommez les éléments et structures désignés par des chiffres (1-6).
- b. Nommez la structure entourée d'un cercle. Enumérez ses composantes (a, b, c).
- c. Citez trois propriétés histo-physiologiques de l'élément 2.

.....

.....

.....

Q3.



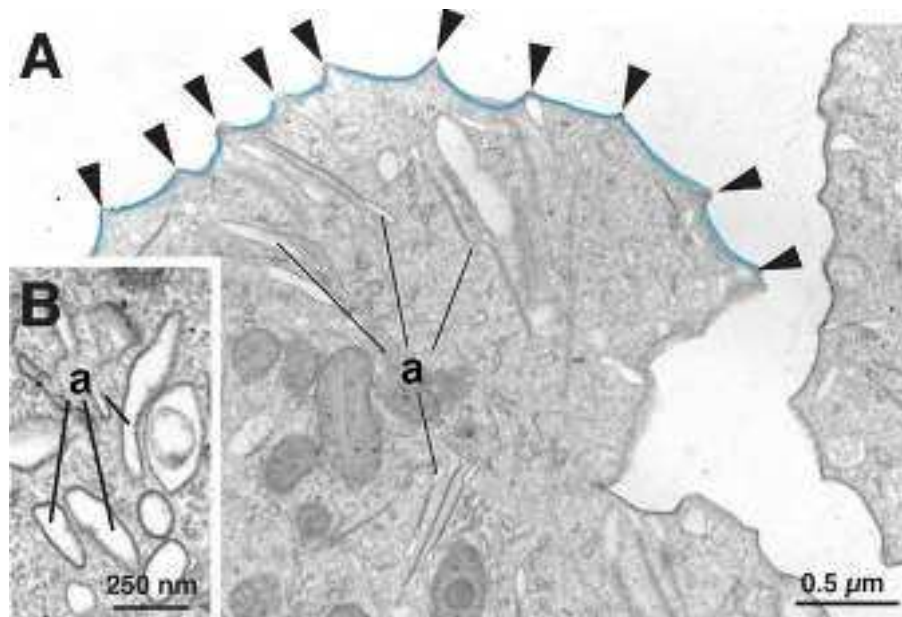
- Nommez les éléments désignés par des chiffres (1-6).
- Lesquels de ces éléments sont impliqués dans la concentration de l'urine ?
- Précisez la localisation de cette région.

.....

.....

.....

Q4.



- Cette photo prise en microscopie électronique montre une région spécifique des voies urinaires. Laquelle ?
- Nommez les éléments désignés par la lettre (a).
- Nommez les éléments délimités par les têtes des flèches.
- Précisez les rôles de ces éléments.

.....

.....

.....

.....

Les objectifs éducationnels

Au terme de son apprentissage, l'étudiant devra être capable de :

1. Comprendre la succession temporo-spatiale des trois systèmes néphritiques au cours du développement.
2. Reconnaître l'origine embryologique du bourgeon urétéral et du blastème métanéphrogène.
3. Comprendre les conséquences d'interaction entre le bourgeon urétéral et le blastème métanéphrogène au cours du développement normal.
4. Expliquer les mécanismes embryologiques spécifiques des malformations du haut appareil urinaire secondaires aux anomalies d'interaction entre le bourgeon urétéral et le blastème métanéphrogène (anomalies de nombre, de taille et de structure).
5. Expliquer les mécanismes des différentes anomalies de relocalisation rénale.
6. Expliquer les mécanismes de la dilatation des voies excrétrices supérieures associée aux malformations urétérales (syndrome de la jonction pyélo-urétérale, duplication urétérale, méga-uretère).
7. Comprendre l'interdépendance embryologique, temporelle et anatomique, du bas appareil urinaire, génital et digestif.
8. Comprendre le rôle du sinus urogénital et de l'allantoïde dans le développement normal du bas appareil urinaire.
9. Reconnaître les différentes anomalies liées à un défaut d'oblitération du diverticule allantoidien.
10. Reconnaître la cause de l'uropathie obstructive congénitale la plus fréquente chez le garçon.

Prérequis

Processus de la gastrulation enseigné en thème 3.

Activités d'apprentissage

L'étudiant est invité à :

- * répondre aux questions d'autoévaluation proposées à la fin du mini-module. Les réponses seront discutées lors de la séance ou dans le forum de discussion de la plateforme numérique de la FMT.
- * consulter le document numérisé mis à sa disposition à la Médiathèque de la FMT et sur la plateforme numérique, intitulé : « Anomalies du développement du système urinaire. Questions d'autoévaluation sur iconographies fœtopathologiques ».

PLAN

1. GENERALITES

2. EMBRYOLOGIE DU HAUT APPAREIL URINAIRE

2.1. NEPHROGENESE

- 2.1.1. Développement normal
 - a. Développement du pronéphros
 - b. Développement du canal mésonéphrotique et du mésonéphros
 - c. Développement du métanéphros ou rein définitif
- 2.1.2. Anomalies du développement du haut appareil urinaire
 - A. Malformations rénales**
 - a. Anomalies de nombre
 - b. Anomalie de taille
 - c. Anomalies de structure
 - B. Malformations des voies excrétrices supérieures**
 - a. Syndrome de la jonction pyélo-urétérale
 - b. Duplication urétérale
 - c. Méga-uretère

2.2. RELOCALISATION DU REIN FŒTAL

- 2.2.1. Migration et rotation normales
- 2.2.2. Anomalies de relocalisation rénale
 - A. Anomalies de migration : ectopies rénales
 - B. Anomalies de fusion ou symphyses rénales
 - C. Anomalies de rotation
 - D. Anomalies de revascularisation rénale

3. EMBRYOLOGIE DU BAS APPAREIL URINAIRE

3.1. DEVELOPPEMENT NORMAL DES VOIES EXCRETRICES INFÉRIEURES (VESSIE ET URETRE)

3.2. ANOMALIES DU DEVELOPPEMENT

- a. Défaut d'oblitération du diverticule allantoïdien
- b. Valves de l'urètre postérieur

INTRODUCTION

Les malformations rénales sont des anomalies congénitales fréquentes, touchant environ 3 à 4% de la population pédiatrique. Elles constituent la principale cause d'insuffisance rénale chronique chez l'enfant. La gravité potentielle de certaines malformations rend leur dépistage et leur prise en charge précoce essentiels. Le diagnostic est plus fréquemment établi en période anténatale grâce à l'échographie ou plus tardivement dans l'enfance. Les mécanismes et les étiologies de ces malformations ne sont pas entièrement élucidés, mais la connaissance de l'embryologie rénale et les progrès de la recherche génétique permettent d'expliquer un grand nombre de ces anomalies. Le développement rénal est sous la dépendance de diverses protéines (facteurs de transcription, facteurs de croissance, molécules d'adhérence...) servant de signaux d'induction entre le bourgeon urétéral et le blastème métanéphrogène à l'origine du rein définitif. Des mutations des gènes codant ces protéines, au même titre que l'exposition à un facteur tératogène au cours de la grossesse interférant avec la fonction de ces gènes, entraînent une dérégulation de ces signaux et induisent des anomalies du développement rénal. L'objectif de ce cours est de comprendre le développement normal du système urinaire afin de pouvoir expliquer les malformations.

Les annexes ont pour but d'approfondir et d'illustrer certains concepts embryologiques et ne feront pas l'objet d'une évaluation sanctionnelle.

1. GENERALITES

L'étude du développement normal du système urinaire est un préalable nécessaire à la description et la compréhension des anomalies congénitales du rein et des voies excrétrices.

Le haut appareil urinaire (rein et voies excrétrices supérieures) se développe à partir du **cordon néphrogène** qui s'individualise à partir du **mésoderme intermédiaire** dès la 3^{ème} semaine. Le territoire néphrogène est situé entre le mésoderme paraxial et latéral (**Fig. 1**).

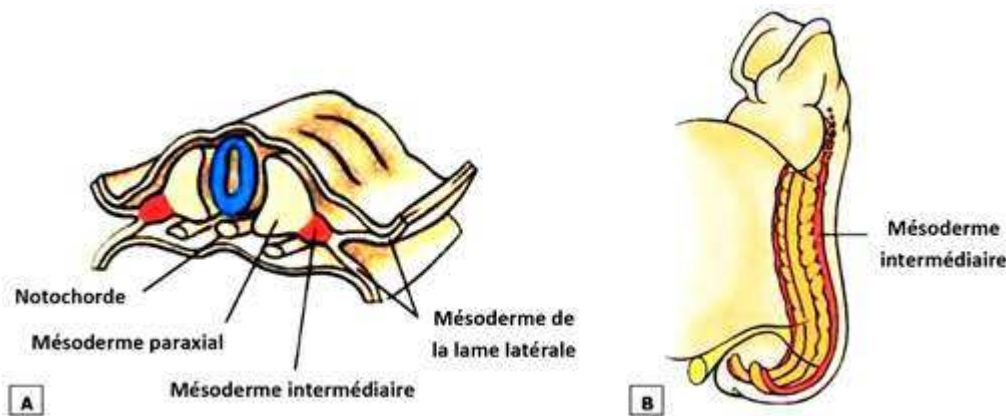


Figure 1. Coupe schématique transverse (A) et longitudinale (B) de l'embryon de 23 j mettant en évidence le mésoderme intermédiaire qui s'étend de la région cervicale jusqu'à la région sacrée.

Le **mésoderme paraxial** et l'**ectoderme** jouent un rôle dans l'**induction** et le **maintien** de la **potentialité néphrogène du mésoderme intermédiaire** via l'induction de l'expression **coordonnée dans le temps et dans l'espace**, au sein du mésoderme intermédiaire, d'une **multitude de gènes** qui sont impliqués dans la **spécification de la lignée néphritique**. Cette complexité moléculaire, ajoutée à la durée du processus de la néphrogenèse qui se prolonge pendant quasi toute la grossesse, explique la fréquence des accidents génétiques ou environnementaux (agressions infectieuses, ischémiques, pharmacologiques), responsables d'anomalies du développement réno-urinaire.

Le **bas appareil urinaire** (vessie et urètre) se développe à partir du **sinus urogénital primitif** (endodermique) qui dérive du **cloaque**, expansion distale de l'intestin postérieur. Sa mise en place se fait, par conséquent, en étroite relation avec celle de l'intestin postérieur et du tractus génital. Un cloisonnement défectueux du cloaque est à l'origine des anomalies des structures urinaires, génitales et/ou anorectales.

2. EMBRYOLOGIE DU HAUT APPAREIL URINAIRE

2.1. NEPHROGENESE

2.1.1. DÉVELOPPEMENT NORMAL

Dès le 18^{ème} jour de l'embryogenèse, chaque cordon néphrogène se segmente progressivement en néphrotomes et forme trois systèmes néphritiques suivant une succession crânio-caudale : le **pronéphros** dans la région cervicale, le **mésonephros** dans la région thoraco-lombaire et le **métanéphros** ou rein définitif dans la région sacrée (**Fig. 2**). La formation du pronéphros marque un véritable déclenchement d'une cascade d'événements développementaux conduisant à la formation du rein définitif puisque chaque système néphritique pose les bases de l'induction du système suivant.

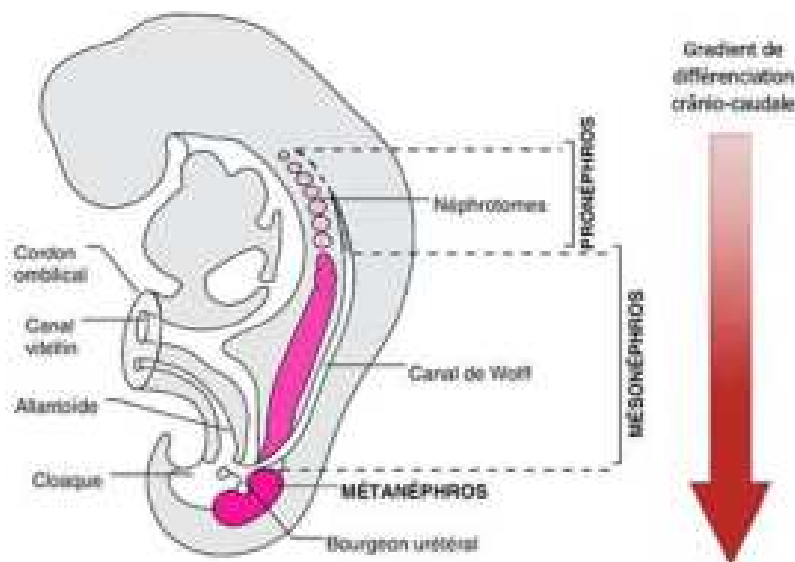


Figure 2. Différenciation des trois systèmes néphritiques à partir du cordon néphrogène suivant une succession crânio-caudale.

a. Développement du pronéphros

Le **pronéphros** (terme grec signifiant « premier rein »), **structure rudimentaire et vestigiale**, apparaît à la 3^{ème} semaine dans la future région cervicale. Il se développe sous forme de bourgeons épithéliaux pleins ou **néphrotomes** qui deviennent rapidement creux, formant sept à dix **vésicules** qui s'allongent en **tubules pronéphrotiques**. Ces unités ne se différencient pas en néphrons et subissent une involution totale à la fin de la 4^{ème} semaine (**Fig. 3**).

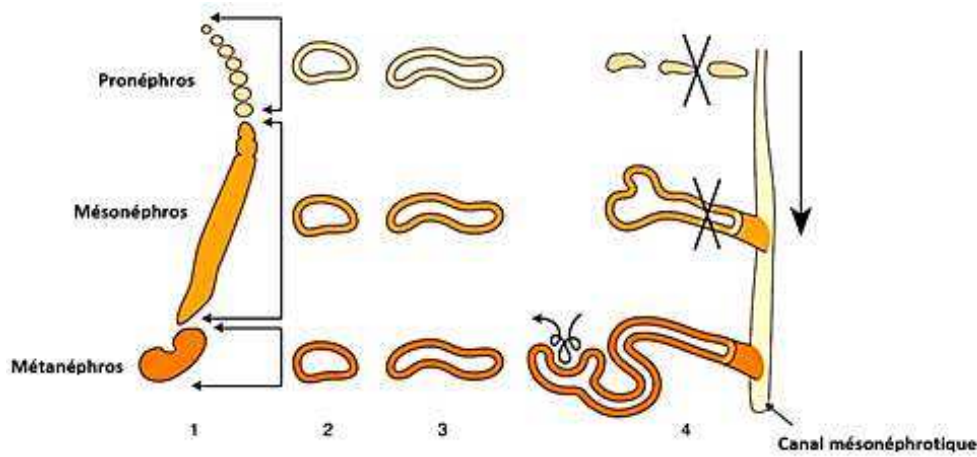


Figure 3. Stades de la différenciation du cordon néphrogène. 1. Néphrotome ; 2. Vésicule ; 3. Tubule ; 4. Néphron.

b. Développement du canal mésonéphrotique et du mésonéphros

Le **canal mésonéphrotique** (ou de **Wolff**) résulte d'une **délamination dorsolatérale du cordon néphrogène**. Cette délaminisation commence dès le début de la 4^{ème} semaine, à la hauteur du pronéphros, formant un **cordon mésenchymateux plein** longitudinal. A mesure qu'il s'accroît en direction caudale sous l'effet inductif de la **transition mésenchymo-épithéliale**, ce cordon se dissocie et s'écarte du cordon néphrogène pour fusionner finalement avec la paroi ventro-latérale du cloaque vers le 26^{ème} jour du développement. La canalisation de chaque cordon est initiée au niveau du segment juxtaocloacal et progresse en direction crâniale épargnant la partie caudale qui reste mésenchymateuse et contribue au développement de la paroi postérieure de la future vessie. Chaque canal émet, dans sa portion juxtaocloacale vers le 30^{ème} jour, un bourgeon diverticulaire, le **bourgeon urétéral**, qui s'allonge d'abord vers l'arrière puis en direction crâniale vers le blastème métanéphrogène à l'origine du métanéphros (cf. Développement du métanéphros).

Le **mésonéphros** ou **corps de Wolff** commence à se différencier assez tôt dans le courant de la 4^{ème} semaine sous l'effet inductif du cordon mésonéphrotique au cours de sa progression crânio-caudale dans la région thoraco-lombaire. Il apparaît progressivement sous forme de **néphrotomes**, **vésicules**, **tubules** puis **néphrons** (Fig. 3). Ces néphrons sont **fonctionnels entre la 6^{ème} et la 10^{ème} semaine**, produisant de petites quantités d'urine drainées par le canal mésonéphrotique vers le cloaque. A partir de la 10^{ème} semaine, ils cessent de fonctionner et involuent.

Le canal mésonéphrotique régresse chez l'embryon féminin après avoir induit le canal de Müller à l'origine du tractus génital féminin. En revanche, il persiste chez l'embryon masculin pour former avec quelques tubules mésonéphrotiques des constituants importants du système des conduits génitaux masculins (cf. thème 13).

c. Développement du métanéphros : néphrogenèse proprement dite

Le développement du métanéphros est induit dès la 5^{ème} semaine par des **interactions tissulaires réciproques** entre :

- le **canal mésonéphrotique** puis le **bourgeon urétéral** à l'origine du **système excréteur** ou **collecteur** (uretère, bassinnet, calices et canaux collecteurs) ;
- et le **blastème métanéphrogène**, différencié à partir de la portion pelvienne non segmentée du cordon **néphrogène**, qui développe les néphrons, les **cellules du lacis** et l'**interstitium rénal**.

Schématiquement, la néphrogenèse peut être divisée en trois stades successifs et interdépendants : 1) induction du bourgeon urétéral, 2) division dichotomique du bourgeon urétéral et formation du système excréteur, et 3) développement des néphrons.

1) Induction du bourgeon urétéral

Les interactions réciproques entre le canal mésonéphrotique et le blastème métanéphrogène contrôlent le **point d'émergence du bourgeon urétéral** et induisent son **développement** jusqu'à sa connexion avec le blastème. Ces interactions résultent d'une cascade moléculaire inductive mettant en jeu la **voie de signalisation Ret/Gdnf** (cf. Annexe 1).

2) Division dichotomique du bourgeon urétéral et formation du système excréteur

Le bourgeon urétéral pénètre le blastème métanéphrogène et subit une série précise de divisions dichotomiques asymétriques.

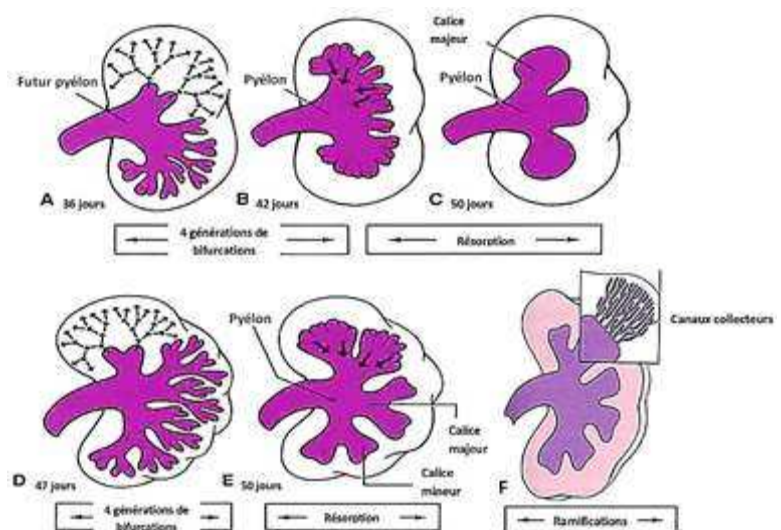


Figure 4. Développement du système excréteur.

Ces ramifications déterminent l'organisation pyélocalicielle définitive, les lobes et lobules rénaux. Le pyélon rénal est issu de la dilatation de l'extrémité du bourgeon urétéral au contact du blastème. Les huit premières générations de divisions du bourgeon donnent naissance successivement aux calices majeurs et mineurs par coalescence des branches au cours des 6^{ème} et 7^{ème} semaines. Les bifurcations se poursuivent jusqu'à la 32^{ème} semaine formant un à trois millions de canaux collecteurs (**Fig. 4**).

3) Développement des néphrons

À chaque ramification dans le futur cortex rénal, le rameau urétéral forme une branche qui poursuit ses divisions et une terminale qui ne se divise plus et s'élargit en ampoule urétérale.

Refoulé par la progression des divisions urétérales, le mésenchyme métanéphrogène est le siège d'une intense activité mitotique à l'origine de condensations cellulaires qui se disposent en coiffe autour de chaque ampoule terminale. Ces condensations se différencient par **conversion mésenchymo-épithéliale** en **néphrotomes** qui se creusent rapidement en **vésicules** demeurant accolées à la tige urétérale. Chaque vésicule s'allonge ensuite en se recourbant, formant un **tubule en S** dont une extrémité s'ouvre dans l'ampoule urétérale, et l'autre se déprime en cupule à double couche cellulaire, formant la **capsule de Bowman**, dans la concavité de laquelle se développe le glomérule pour constituer le **corpuscule rénal** (**Fig. 5**). Le tubule s'allonge et se différencie pour former les différents segments du néphron: tube contourné proximal, anse de Henle et tube contourné distal qui est connecté au canal collecteur. Pour chaque néphron, le processus de différenciation s'étale sur 4 à 5 semaines. Les premiers néphrons formés sont situés à la jonction cortico-médullaire, les plus récents sont plus proches de la capsule.

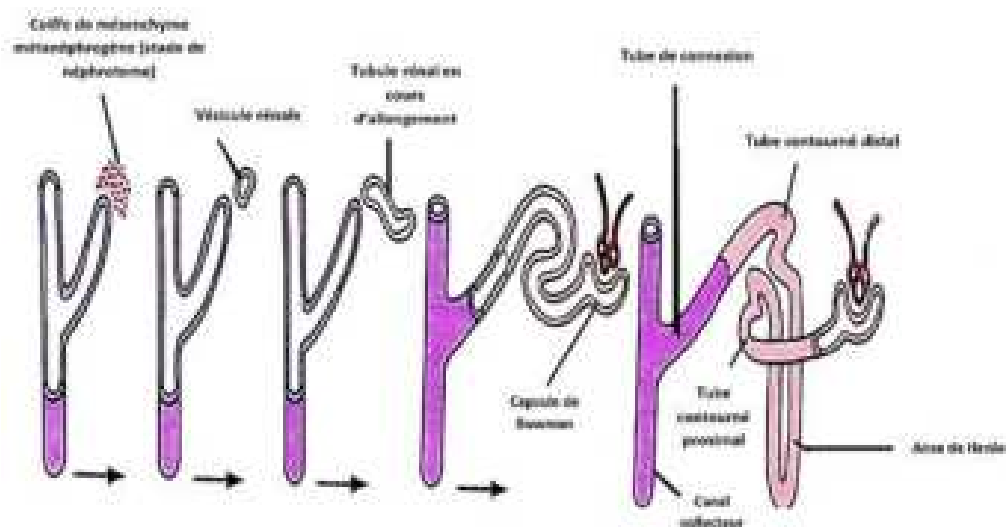


Figure 5. Processus de différenciation du néphron.

Le développement des néphrons **dépend des signaux inducteurs réciproques entre les ramifications urétérales et le mésenchyme de la coiffe (cf. Annexe 2)**. En effet, chaque rameau urétéral induit la prolifération et la condensation du mésenchyme néphrogène qui lui est adjacent, tandis que le mésenchyme contrôle continuellement la ramification et la croissance urétérales. **Le nombre de néphrons formés dépend finalement de la ramification du bourgeon urétéral et de la prolifération du mésenchyme de la coiffe.** Le capital néphronique est atteint vers la 35^{ème} semaine et évalué à terme à 1,2 million de néphrons par rein. La croissance du rein est désormais fonction de l'augmentation de la longueur des différents segments du tube néphronique et notamment celle du segment proximal dont l'allongement se poursuit bien au-delà de la naissance. Les corpuscules de Malpighi subissent également une très longue phase de maturation qui s'achève vers l'âge de 12 ans. **En raison du mode de division du bourgeon urétéral et de la segmentation du blastème qui en résulte,** le rein présente un **aspect polylobé externe** qui s'estompe habituellement dès la fin de la grossesse par comblement progressif des sillons.

L'excrétion d'urine fœtale d'origine métanéphronique commence dès la **9^{ème} semaine** à la suite de la mise en place de la filtration glomérulaire au niveau des premiers néphrons. Elle joue un **rôle important dans le modelage des voies excrétrices** par effet de la pression hydrostatique puisque le développement des papilles et la dilatation du bassin et des calices sont initiés à partir de la 10^{ème} semaine, préfigurant l'architecture définitive du rein mature.

2.1.2. ANOMALIES DU DÉVELOPPEMENT DU HAUT APPAREIL URINAIRE

A. Malformations rénales

Un défaut dans l'une des étapes de la néphrogenèse peut être à l'origine d'une malformation rénale d'autant plus sévère que sa survenue est plus précoce.

a. Anomalies de nombre

Une interaction défectueuse entre le canal mésonéphrotique et le blastème métanéphrogène par l'intermédiaire de la **voie de signalisation Ret/Gdnf** peut être responsable d'une agénésie rénale ou du développement d'un rein surnuméraire chez l'homme.

* **Agénésie rénale** : résulte le plus souvent d'un **défaut du développement du bourgeon urétéral**, dont la conséquence est l'absence d'induction de la différenciation du blastème métanéphrogène qui dégénère. Elle peut également résulter d'une **régression du bourgeon urétéral**, d'un **défaut de connexion de celui-ci avec le blastème métanéphrogène**, d'une **absence de formation ou dégénérescence précoce du blastème** ou encore d'une **absence de développement du canal mésonéphrotique**.

L'agénésie rénale peut être unilatérale (plus fréquente) ou bilatérale (létale après la naissance). Elle peut être isolée ou associée à d'autres malformations. Elle s'accompagne de **malformations génitales** en cas d'**absence de développement du canal mésonéphrotique (cf. thème 13)**.

* **Duplication rénale** ou **rein surnuméraire** : est due à une **duplication du bourgeon urétéral (cf. duplication urétérale) (Fig. 6)**. Les deux bourgeons induisent le blastème métanéphrogène qui se clive en deux blastèmes homolatéraux.

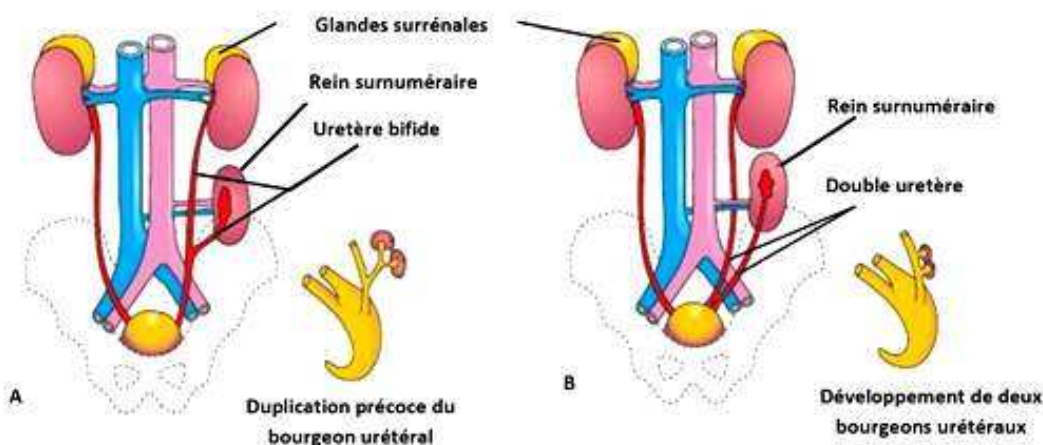


Figure 6. Mécanismes embryologiques de la duplication rénale.

Le rein surnuméraire est habituellement plus petit que le rein ipsilatéral, en position inféromédiale par rapport à ce dernier. Il peut être asymptomatique ou à l'origine de complications (reflux vésico-urétéral, infection urinaire, lithiase) liées à un abouchement ectopique de l'uretère dans la vessie, justifiant une néphrectomie.

b. Anomalie de taille

Hypoplasie rénale congénitale : est définie par un rein de petite taille, en rapport avec une réduction du nombre des néphrons. Elle résulte de l'**arrêt précoce de l'induction du blastème métanéphrogène par le bourgeon urétéral**, lequel lié à l'altération de la fonction de l'un des gènes impliqués dans ce processus (dont notamment **PAX2** ; cf. **Annexe 2**). Elle est souvent unilatérale ; dans ce cas la fonction rénale reste normale. Elle peut être bilatérale induisant une hypertrophie des glomérules existants et évoluant vers l'insuffisance rénale chronique secondaire à une glomérulosclérose évolutive (excès de mésangium).

c. Anomalies de structure

* **Dysplasie multikystique rénale (DMKR)** : résulte d'une anomalie de différenciation du blastème métanéphrogène en rapport avec soit un **décalage du point de rencontre du bourgeon urétéral et du blastème métanéphrogène**, soit un **obstacle précoce et sévère sur les voies excrétrices**. Dans le cas du premier défaut, le bourgeon émerge plus haut ou plus bas que normalement du canal mésonéphrotique ou celui-ci donne naissance à deux bourgeons. L'aire du territoire métanéphrogène étant prédéterminée au niveau du cordon néphrogène, si le bourgeon entre en contact trop haut ou trop bas avec l'ébauche rénale, il induit une zone qui n'a pas la même potentialité de différenciation (**Fig. 7**).

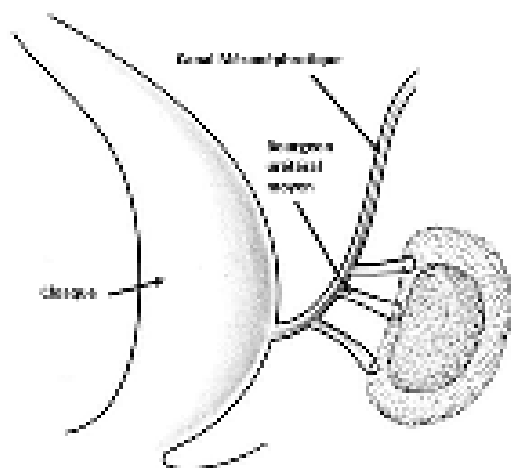


Figure 7 : Variations du point d'émergence du bourgeon urétéral à partir du canal mésonéphrotique. Le bourgeon moyen correspond au cœur du territoire métanéphrogène pré-déterminé. Au-dessus ou au-dessous, le bourgeon entre en contact trop haut ou trop bas avec l'ébauche rénale, ce qui peut induire une DMKR.

Le rein dysplasique est réduit à une **grappe de kystes** de différentes tailles, sans parenchyme reconnaissable, avec un **aspect très grêle de l'uretère (atrétique)** lié à un **défaut d'excrétion d'urine** (Fig. 8).

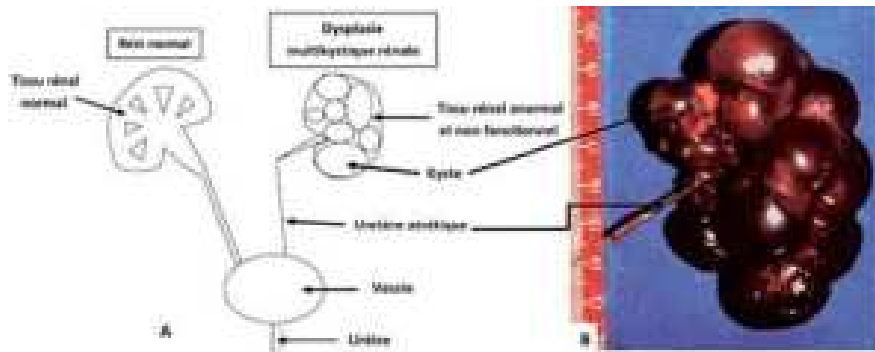


Figure 8. Aspect schématique (A) et macroscopique (B) de DMKR.

La DMKR implique dans 85 % des cas. Elle est fréquemment révélée par l'échographie fœtale. Elle est le plus souvent unilatérale. Mais, une atteinte bilatérale est possible, justifiant une interruption médicale de grossesse, souvent d'origine chromosomique (trisomie 13, trisomie 21, monosomie X...) ou de transmission autosomique récessive ou dominante.

**** Maladies polykystiques rénales héréditaires** : sont caractérisées par la présence de kystes rénaux diffus et bilatéraux. Elles sont liées à un **dysfonctionnement du cil primaire** présent à la surface de quasiment toutes les cellules épithéliales. Ce cil joue le rôle de mécanorécepteur des flux apicaux de la cellule, permettant de réguler **l'organisation** des cellules tubulaires dans le **plan apico-basal**, censée assurer l'élongation du tube rénal. Ainsi, toute anomalie de cette organisation planaire est susceptible d'induire un élargissement des tubes (**cf. annexe 3**).

- **Polykystose rénale autosomique dominante** : c'est la pathologie rénale héréditaire la plus fréquente. Les kystes rénaux sont essentiellement développés aux dépens des **canaux collecteurs**, mais peuvent aussi impliquer les néphrons. La kystogénèse est le plus souvent à début adulte, mais il existe des formes infantiles voire anténatales (aspect de gros reins hyperéchogènes à l'échographie fœtale de troisième trimestre). L'évolution se fait dans près de 70% des cas vers l'insuffisance rénale terminale, avec possibilité du développement de kystes extrarénaux (foie, pancréas, arachnoïde).

- **Polykystose rénale autosomique récessive** : est beaucoup plus rare. Elle affecte à la fois les reins avec une hypertrophie rénale et une **dilatation kystique des canaux collecteurs (néphrons épargnés)**, et le **foie** avec une **prolifération des canaux biliaires et une fibrose des espaces portes**. Cette forme de polykystose est plus précoce ; le diagnostic est habituellement évoqué in utero devant de gros reins hyperéchogènes et un oligoamnios (diminution de la quantité du liquide amniotique). L'évolution se fait plus ou moins rapidement vers l'insuffisance rénale et hépatique.

***** Néphroblastome ou tumeur de Wilms** : c'est une tumeur embryonnaire maligne de bon pronostic (chimiosensible). Elle représente 90% des tumeurs rénales pédiatriques. Elle est liée à la **persistance de résidus de blastème métanéphrogène dans le tissu rénal mature après la 36^{ème} semaine de gestation**. Des cas sporadiques et familiaux sont liés à une mutation du gène *WT1*, codant un facteur de transcription qui sensibilise le mésenchyme métanéphrogène aux signaux inductifs émanant du bourgeon urétéral (**cf. Annexe 2**). La tumeur reproduit l'histologie du rein en développement, avec présence de cellules blastémateuses, mésenchymateuses et épithéliales en proportion et à des degrés de différenciation variables.

B. Malformations des voies excrétrices supérieures

a. Syndrome de la jonction pyélo-urétérale : se définit par une dilatation du pyélon (ou pyélectasie) et des calices avec un uretère d'aval de calibre normal (Fig. 10).

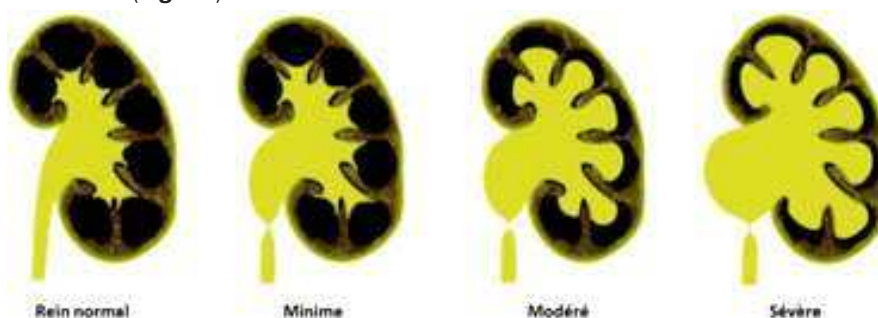
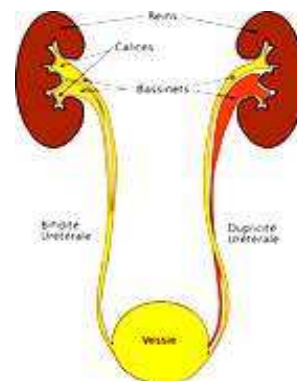


Figure 10. Aspect schématique du syndrome de la jonction pyélo-urétérale à des degrés de sévérité variables.

C'est l'uropathie congénitale la plus fréquente. Elle est liée à la présence d'obstacle au niveau de la jonction pyélo-urétérale, dont la nature est variable : **sténose intrinsèque** en rapport le plus souvent avec le remplacement des cellules musculaires par du tissu fibreux, **insertion haute non déclive de l'uretère sur le pyélon ou compression extrinsèque par un vaisseau surnuméraire polaire**. Elle est souvent unilatérale, pouvant être asymptomatique, de découverte fortuite, ou révélée chez l'enfant ou l'adulte par des complications (pyélonéphrite, lithiase, douleurs lombaires).

b. Duplication urétérale : est associée à une duplication pyélique avec ou sans duplication rénale. Elle est essentiellement de deux types (Fig. 11) :

Figure 11. *Duplications urétérales (sans duplication rénale).*



* **Duplication totale** ou **duplicité** : les deux uretères homolatéraux sont indépendants jusqu'à la vessie, s'abouchant chacun par un orifice distinct. **Elle est due au développement d'un bourgeon urétéral accessoire** à partir du canal mésonéphrotique à une distance variable du bourgeon principal, mais le plus souvent en amont de lui. Le bourgeon principal (inférieur) est incorporé le premier (destiné à la portion caudale du rein) suivi par le bourgeon accessoire (supérieur) dont l'incorporation est plus caudale et plus en dedans (destiné à la portion crâniale).

** **Duplication partielle ou bifidité** : est due à une **division précoce du bourgeon urétéral** (avant d'atteindre le métanéphros). Un seul bourgeon urétéral naît en position normale du canal mésonéphrotique et se divise plus ou moins précocement en bourgeon accessoire (à l'origine de l'uretère supérieur) et bourgeon principal (à l'origine de l'uretère inférieur).

Le rein non dupliqué à double pyélon induit par les deux bourgeons est habituellement le siège de dysplasie multikystique liée à l'induction inappropriée (cf. DMKR), dilatation urétéro-pyélocalicielle (et son corollaire pyélonéphrite) liée au reflux vésico-urétéral induit par l'abouchement urétéral ectopique au niveau de la vessie, et à long terme d'atrophie parenchymateuse.

c. Méga-uretère : désigne une dilatation de l'uretère (> 7 mm), éventuellement associée à une dilatation du pyélon et des calices (Fig. 12).

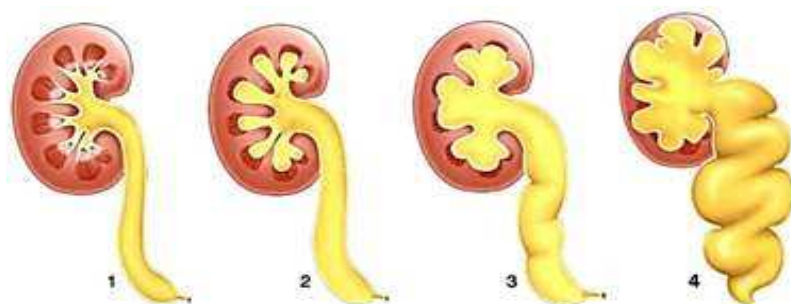


Figure 12. *Aspect schématique de méga-uretère de sévérité variable.*

Il peut être lié à une **anomalie de la jonction vésico-urétérale** ou de la **muscleuse de l'uretère terminal par hypotonie voire atonie urétérale** (méga-uretère primitif obstructif), constituant un obstacle à l'écoulement de l'urine. La forme avec pyélectasie modérée régresse le plus souvent spontanément au cours de la première année de vie. Celle associée à une pyélectasie majeure (diamètre de l'uretère supérieur à 1 cm) ne régresse que très lentement et peut nécessiter une intervention chirurgicale relativement précoce.

2.2. RELOCALISATION DU REIN FŒTAL

2.2.1. Migration et rotation normales

Au cours du développement, le métanéphros migre en même temps qu'il acquiert progressivement sa parfaite configuration. Initialement pelvien, il atteint une **position lombaire haute**, localisation définitive du rein, **sous l'influence essentiellement d'une croissance différentielle** des régions lombaire et sacrée de l'embryon. Cette migration s'effectue entre la **6^{ème}** et la **9^{ème}** semaine. Dans leur ascension, chaque rein subit un mouvement de **rotation de 90°** qui amène le pyélon, primitivement antérieur, en dedans et la convexité rénale, primitivement dorsale, en dehors (Fig. 13).

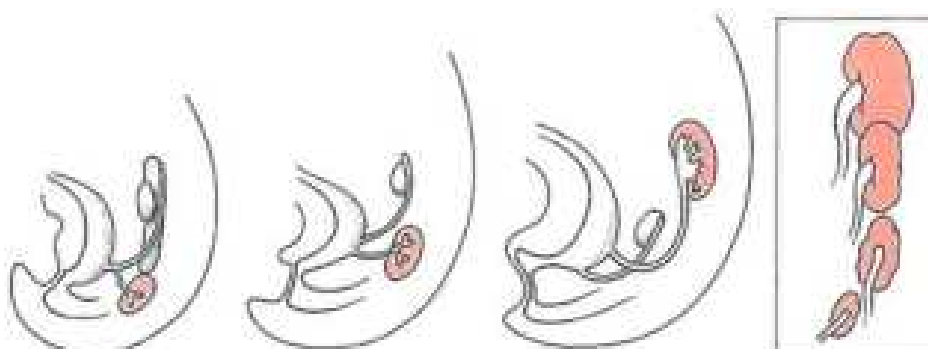


Figure 13. *Migration et rotation du rein.*

Au fur et à mesure de cette ascension, le rein est progressivement revascularisé par des vaisseaux de proximité jusqu'à une situation définitive directement sur l'aorte et la veine cave inférieure.

2.2.2. Anomalies de relocalisation rénale

Une perturbation du processus de migration ou de rotation des reins explique la plupart des anomalies anatomiques de position, de fusion et/ou de rotation.

A. Anomalies de migration : ectopies rénales

Durant sa migration, un rein (ou plus rarement les deux) peut s'arrêter à un niveau quelconque, réalisant un rein ectopique. Ce dernier peut être en position haute (sous ou intra-diaphragmatique), basse (lombaire basse, iliaque ou pelvienne) ou controlatérale (croisée).

Le rein garde alors une vascularisation d'étage provenant de l'artère hypogastrique, de l'iliaque primitive ou de l'aorte. La plupart des cas sont asymptomatiques et de découverte fortuite.

- **Ectopie haute** : est due à une migration excessive du rein en position sous- ou intra-diaphragmatique. Le diagnostic de certitude se fait sur l'échographie rénale qui permet d'éliminer une ascension d'un rein normal secondaire à une agénésie diaphragmatique ou à un traumatisme.

- **Ectopie basse** : il s'agit le plus souvent d'un rein pelvien, de taille réduite mais normalement fonctionnel, et fréquemment associé à un syndrome de la jonction pyélo-urétérale ou à un reflux vésico-urétéral (**Fig. 14**).

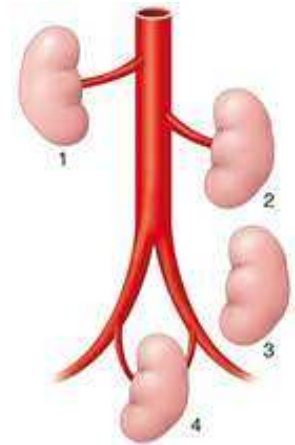


Figure 14. Ectopies rénales basses. 1. Situation normale ; 2. Ectopie lombaire basse ; 3. Ectopie iliaque ; 4. Ectopie pelvienne.

- **Ectopie croisée** : l'uretère croise la ligne médiane alors que l'orifice vésico-urétéral reste en position normale (**Fig. 15**). Elle peut être liée à une **migration croisée du bourgeon urétéral** qui induit la différenciation du blastème métanéphrogène controlatéral (d'où la duplication pyélique avec ou sans duplication rénale) et la régression de celui homolatéral.

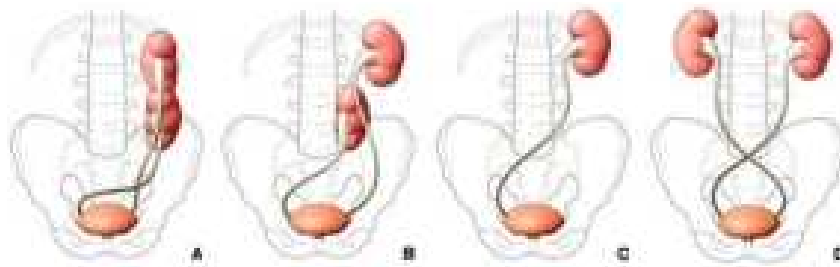


Figure 15. Variétés d'ectopie rénale croisée : sans duplication rénale (A), avec duplication rénale (B), sur rein unique (C) et bilatérale (D).

B. Anomalies de fusion ou symphyses rénales

La fusion des deux masses parenchymateuses au cours de la migration rénale est possible réalisant diverses formes (**Fig. 16**).

Ces symphyses rénales peuvent être expliquées par le **rapprochement voire la compression** des reins lors de leur passage dans la **fourche artérielle des artères ombilicales** (**Fig. 17**). Elles sont favorisées par une **anomalie de l'orientation des reins**, liée à une anomalie de position de l'artère ombilicale ou de l'artère iliaque primitive, ou une anomalie du développement de la partie caudale de l'embryon.

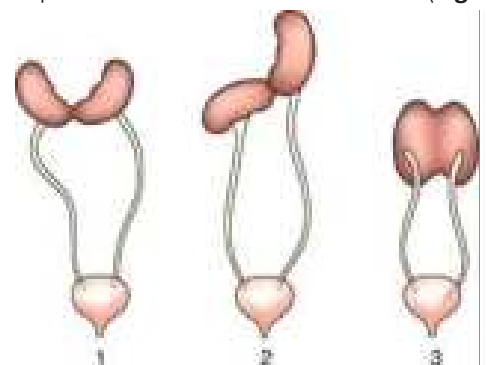


Figure 16. Anomalies de fusion. 1. Rein en fer à cheval ; 2. Rein sigmoïde ; 3. Rein discoïde.

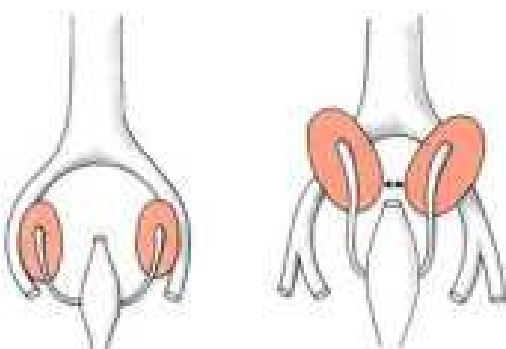


Figure 17. Passage des reins dans la fourche artérielle : possible mécanisme de fusion parenchymateuse.

La symphyse rénale la plus commune est celle qui réunit les deux reins par leurs pôles inférieurs, réalisant un **rein en fer à cheval**. Ce rein reste coincé sous l'artère mésentérique inférieure, ce qui entrave sa migration. La fusion des deux reins se produit avant que ceux-ci achèvent leur rotation. Ainsi, le rein en fer à cheval associe **trois anomalies** : de fusion (ou symphyse), de migration (ectopie basse) et de rotation (pyélon antérieur) (Fig. 18).

Le trajet non déclive des uretères, qui croisent en avant l'isthme, favorise le reflux vésico-urétéral (présent dans 50% des cas), pouvant se compliquer de pyélonéphrite et de lithiase. Cette anomalie est souvent isolée, mais elle peut s'intégrer dans un syndrome polymalformatif de cause notamment chromosomique (monosomie X, trisomie 18...).

C. Anomalies de rotation

Il s'agit d'une anomalie fréquente qui peut être uni- ou bilatérale. On parle de **malrotation** lorsque la jonction pyélo-urétérale est orientée en antérieure (absence de rotation), en postérieure (excès de rotation) ou en externe (rotation inverse) (Fig. 19).

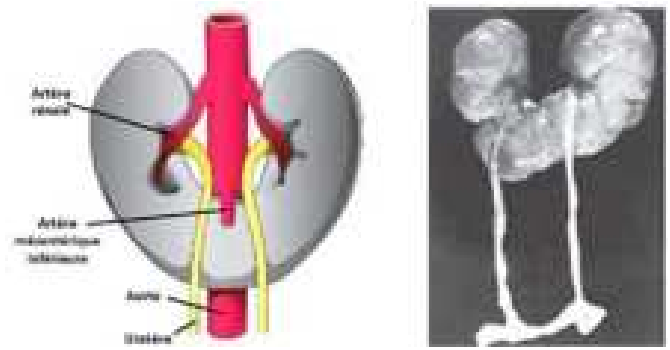


Figure 18. Rein en fer à cheval.

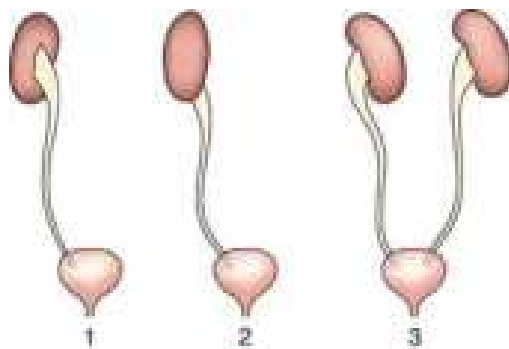


Figure 19. Malrotation :

1. antérieure
2. postérieure
3. inverse.

Le rein et les voies excrétrices sont anatomiquement normaux, mais il n'est pas rare que la malrotation soit associée à un syndrome de la jonction pyélo-urétérale, une ectopie rénale ou à une symphyse rénale.

D. Anomalies de la vascularisation rénale

Vaisseaux aberrants, accessoires et multiples

Le phénomène de revascularisation explique la variabilité de l'origine et du nombre des vaisseaux assurant la vascularisation définitive du rein : artères ectopiques, surnuméraires, polaires. Ainsi, la présence d'artère polaire ou d'artères rénales multiples est la conséquence d'un défaut de dégénérescence des vaisseaux primitifs.

3. EMBRYOLOGIE DU BAS APPAREIL URINAIRE

3.1. DEVELOPPEMENT NORMAL DES VOIES EXCRETRICES INFÉRIEURES

La vessie et l'urètre proviennent pour l'essentiel de la portion antérieure du cloaque, endodermique, que prolonge l'allantoïde. Le cloaque est divisé, entre la 4^{ème} et la 7^{ème} semaine, par le septum urorectal en canal anorectal dorsal et sinus urogénital primitif ventral (Fig. 20).

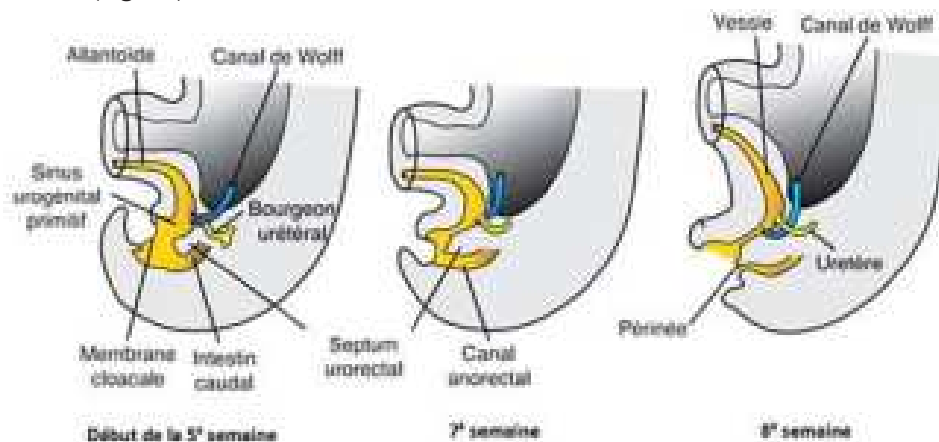


Figure 20. Division du cloaque en sinus urogénital primitif et canal anorectal. Remarquez l'incorporation progressive du canal de Wolff dans la paroi du sinus urogénital, entraînant l'abouchement séparé de l'urètre.

Le sinus urogénital primitif est relié à l'orifice ombilical par le canal allantoïdien et reçoit à sa partie postérieure l'abouchement des canaux de Wolff. La portion supérieure de ce sinus, en continuité avec l'allantoïde, s'évase et constitue la vessie, tandis que sa portion inférieure forme l'urètre pelvien et pénien chez l'embryon masculin, et l'urètre pelvien et le vestibule du vagin chez l'embryon féminin. La portion des canaux de Wolff comprise entre l'émergence des bourgeons urétéraux et leur abouchement dans la paroi postérieure du sinus urogénital s'élargit et forme deux ampoules au sommet desquelles les canaux urétéraux et wolffiens débouchent en canon de fusil (**Fig. 21**).

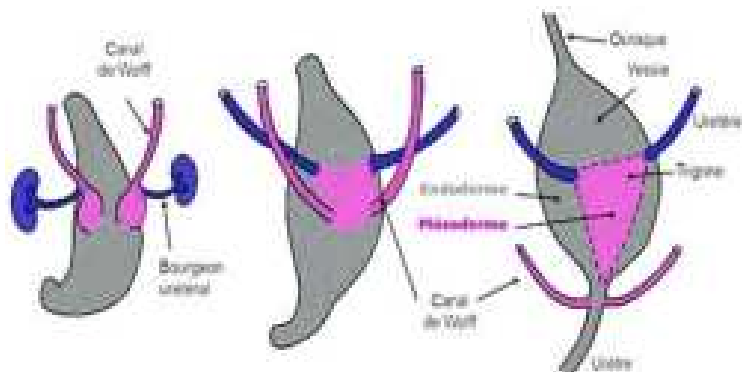


Figure 21. Développement du trigone vésical. Incorporation des canaux mésonéphrotiques (de Wolff) et des uretères dans la paroi vésicale (4-6ème semaines).

Le modelage du sinus urogénital, du fait de sa croissance, englobe progressivement ces ampoules en arrière dans la paroi vésicale, de sorte que canaux urétéraux et wolffiens débouchent dans le sinus par des orifices distincts (**Fig. 21&22**).

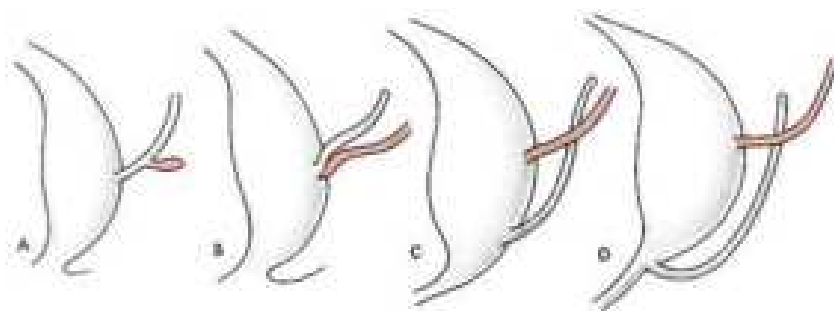


Figure 22 : Evolution du canal de Wolff, du bourgeon urétéral puis de l'uretère.

Les ouvertures des canaux de Wolff sont transposées vers le bas sur l'urètre pelvien (contribuant à la formation de la paroi postérieure de ce dernier) par un processus qui positionne les ouvertures des uretères sur la paroi vésicale. **Le point d'émergence du bourgeon urétéral à partir du canal de Wolff détermine son futur niveau d'abouchement dans la vessie.**

La zone comprise entre les orifices urétéraux et wolffiens est de forme triangulaire, le **trigone vésical**, dont la pointe s'oriente vers l'urètre. L'épithélium vésical a donc deux origines embryologiques : **endodermique** (cloaque) et **mésodermique** (canaux de Wolff) (**Fig. 21**). Les autres tuniques des parois vésicale et urétrale (conjonctive et musculaire) se développent à partir du mésenchyme environnant à l'instar des voies excrétrices supérieures.

Le diverticule allantoïdien subit une oblitération progressive à partir de la 6ème semaine et sa fermeture est complète à la naissance. Il laisse un **vestige fibreux, l'ouraque, reliant la vessie à l'ombilic**.

3.2. ANOMALIES DU DEVELOPPEMENT

a. Défaut d'oblitération du diverticule allantoïdien

Les anomalies congénitales de l'ouraque sont liées à un **défaut d'oblitération partiel ou total du diverticule allantoïdien** (**Fig. 23**).

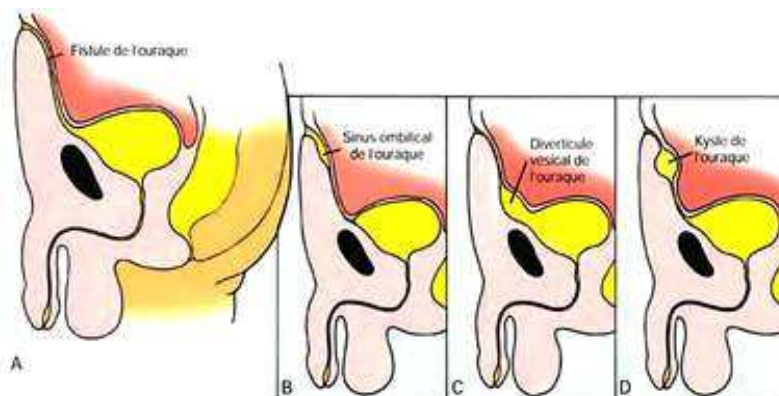


Figure 23. Anomalies d'oblitération du diverticule allantoïdien.

En fonction du niveau, on décrit :

- **Fistule de l'ouraque** : anomalie la plus fréquente liée à un défaut d'oblitération total. Elle se révèle par l'émission d'urine par l'ombilic à la naissance à la suite de la chute du cordon.
- **Kyste de l'ouraque** : lié à un défaut d'oblitération partiel. Le diverticule allantoïdien est oblitéré de part et d'autre du kyste (anomalie plus commune chez l'adulte).
- **Sinus ombilical** : lié à un défaut d'oblitération haute.
- **Diverticule vésical** : le défaut d'oblitération est situé vers la portion vésicale.

Le diagnostic est évoqué cliniquement (écoulement ombilical, tuméfaction sous ombilicale) et confirmé par l'échographie (kyste, diverticule) et la fistulographie (fistule, sinus).

b. Valves de l'urètre postérieur

La persistance des **valves de l'urètre postérieur**, replis membraneux souvent localisés sous le veru montanum, constitue l'étiologie la plus fréquente de l'**obstruction sous-vésicale congénitale chez le garçon (Fig. 24)**.

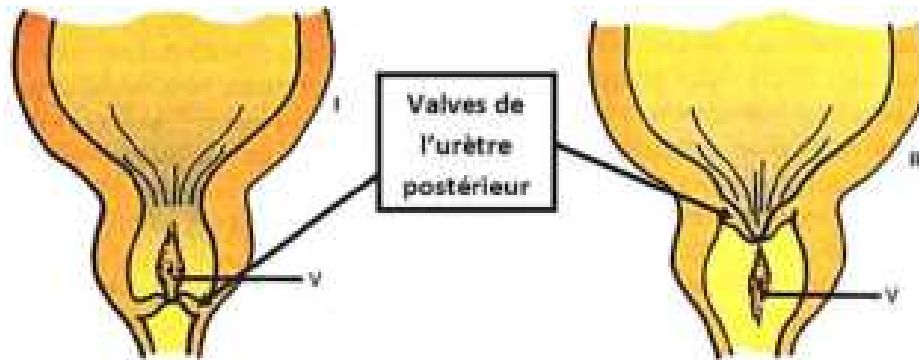


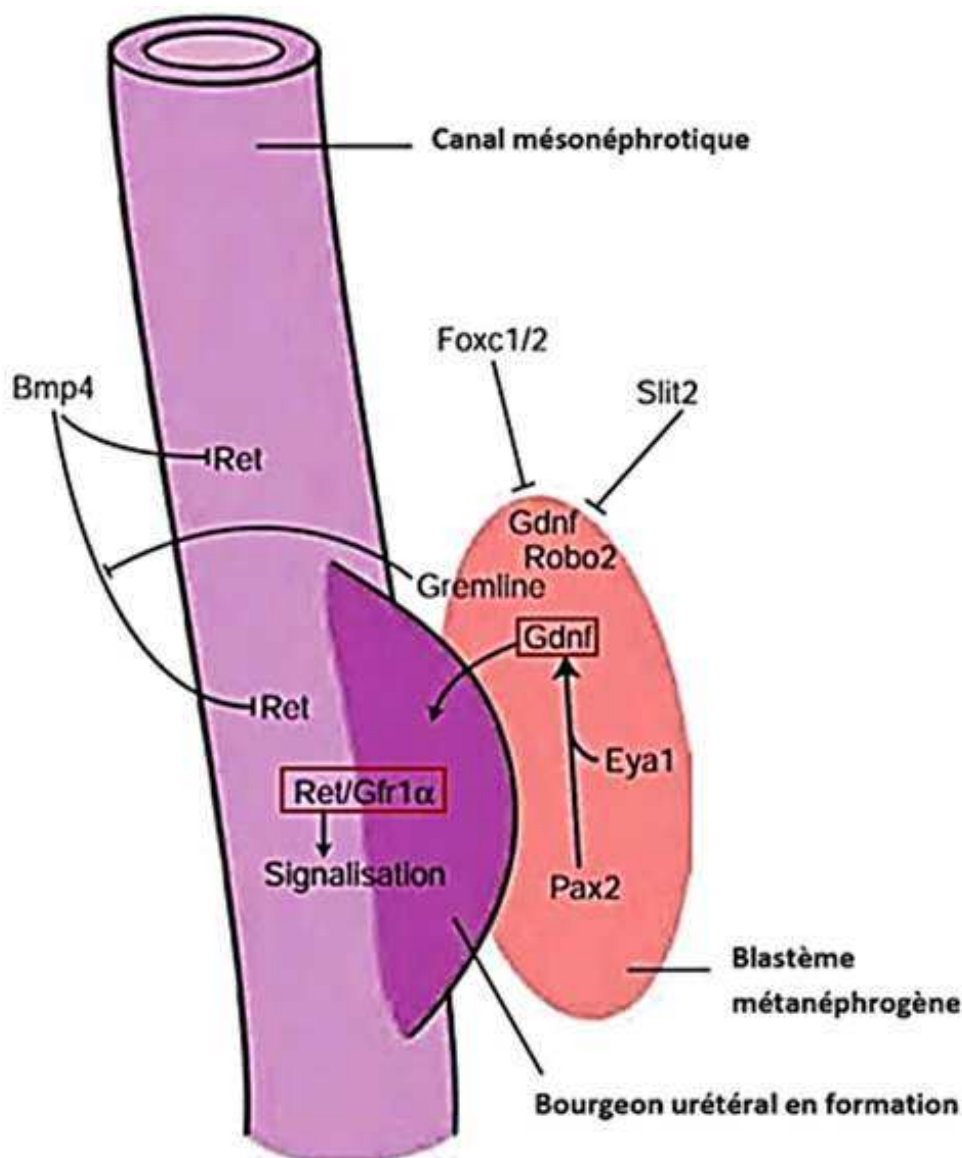
Figure 24. Valves de l'urètre postérieur : localisation par rapport au veru montanum (V).

Type I : Valves sous-montanales ; Type II : Valves sus-montanales.

Ce défaut développementale est responsable d'une **dilatation ou hypertrophie vésicale (vessie de lutte)** et d'une **dilatation bilatérale du haut appareil**. Le diagnostic est souvent suspecté en anténatal, mais peut également être établi plus tardivement après la naissance sur une pyélonéphrite aiguë ou une insuffisance rénale plus ou moins sévère secondaire à une dysplasie multikystique rénale bilatérale.

ANNEXES

ANNEXE 1: VOIE DE SIGNALISATION RET/GDNF



La **voie de signalisation Ret/Gdnf** induit et contrôle le point d'émergence du bourgeon urétéral à partir du segment caudal du canal mésonéphrotique. Elle implique le **récepteur Ret**, son **corécepteur Gfr1 α** (exprimés dans le canal mésonéphrotique) et son **ligand Gdnf** (exprimé dans le blastème métanéphrogène). Un équilibre entre l'activation transmise par le mésenchyme métanéphrogène et la régulation de la signalisation Ret dans le canal est nécessaire. Une dysrégulation de la voie de signalisation Ret peut être responsable d'**agénésie rénale**. Environ **40%** des patients porteurs d'agénésie rénale ont des mutations dans le gène **RET** et **5 à 10%** en ont dans le gène **GDNF**.

ANNEXE 2

CONTRÔLE MOLÉCULAIRE DE LA DIVISION DU BOURGEON URÉTÉRAL ET DU DÉVELOPPEMENT DES NÉPHRONS

La différenciation du parenchyme rénal résulte d'une cascade d'événements liés à l'activation progressive de nombreux gènes codant des facteurs de transcription, des facteurs de croissance, des protéines de la matrice extracellulaire ou encore des molécules d'adhérence.

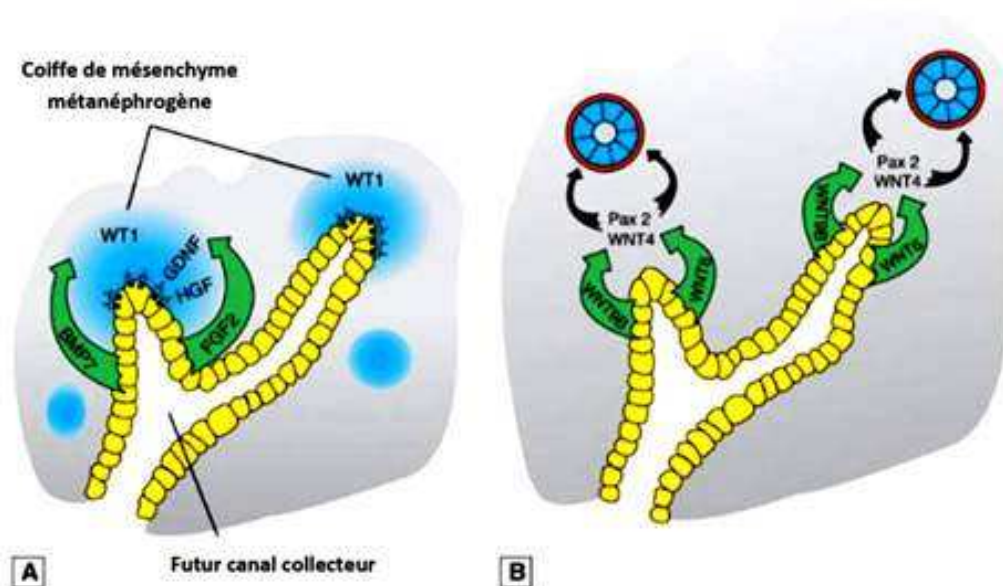
- Au stade de division du bourgeon urétéral et de formation du système excréteur, les principaux gènes impliqués sont :

- * **WT1** : exprimé dans le mésenchyme métanéphrogène, code un facteur de transcription qui rend ce tissu apte à répondre à l'induction émanant du bourgeon urétéral ;

- * **GDNF** et **HGF** : également exprimés dans le mésenchyme, codent des protéines qui interagissent par l'intermédiaire des récepteurs codés par **RET** et **MET**, exprimés par l'épithélium du bourgeon urétéral, afin de stimuler la croissance du bourgeon et de maintenir les interactions ;

- * **FGF2** et **BMP7** : exprimés par l'épithélium du bourgeon urétéral, codent les facteurs de croissance respectifs qui stimulent la prolifération du mésenchyme et entretiennent l'expression de WT1.

- Au stade de formation des néphrons, les principaux gènes impliqués sont **PAX2** codant un facteur de transcription et **WNT4**, dont l'expression dans le mésenchyme environnant est stimulée par **WNT9B** et **WNT6** qui sont exprimés par les branches du diverticule urétéral. Ces gènes induisent l'épithélialisation du mésenchyme (**PAX2**) pour former les tubes du néphron (**WNT4**).



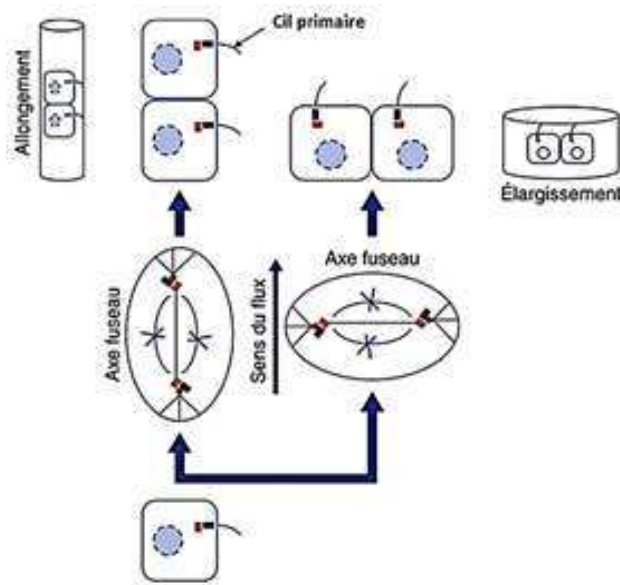
Principaux gènes intervenant dans l'induction de la division du bourgeon urétéral (A) et de la différenciation des néphrons (B).

ANNEXE 3

MÉCANISME DE LA KYSTOGENÈSE DANS LES MALADIES POLYKYSTIQUES RÉNALES HÉRÉDITAIRES : ANOMALIE DE L'ORGANISATION PLANAIRE DES CELLULES TUBULAIRES

L'anomalie de l'organisation planaire des cellules tubulaires peut être expliquée par l'un de ces trois mécanismes :

1. Perturbation des voies de signalisation liée à la polarité : les cellules tubulaires orientent, en situation normale, leur fuseau parallèlement au sens du flux tubulaire, permettant la prolifération cellulaire dans le sens de ce flux et rendant possible l'allongement tubulaire. En cas de désorganisation du fuseau, le sens des divisions s'oriente anarchiquement pouvant être responsable d'un allongement perpendiculaire au flux et par conséquent d'un élargissement des tubes :



Ce mécanisme est probablement exprimé exclusivement à des stades tardifs de la kystogenèse et reste rare lors du développement embryonnaire.

2. Anomalies de la convergence-extension qui est un mécanisme de réorientation planaire des cellules censé assurer l'élongation du tube urinaire. Après leur division initialement aléatoire, les cellules subissent des mouvements intercalaires visant à limiter l'élargissement du tube au profit de son allongement. L'absence de cette réorganisation jouerait de plus un rôle dans l'orientation fonctionnelle des cellules, leur affectant un phénotype de sécrétion plutôt que de réabsorption, participant ainsi à l'élargissement du tube par augmentation de la pression hydrostatique intratubulaire.

3. Anomalies des jonctions intercellulaires ou de liaison à la lame basale et à la matrice extracellulaire, susceptibles de perturber les schémas sécrétoires des cellules.

RÉFÉRENCES

Articles :

- Bouty A, Godron-Dubrasquet A, Pelluard F, Llanas B, Pietrera P, Dobremez E. Anomalies congénitales du développement rénal. EMC- Urologie 2016;9(4):1-14 [Article 18-125-B-20].
- Driessen M, Chéreau E, Aubry MC, Vibert-Guigue C, Ruano R, Dommergues M. Anomalies urogénitales fœtales. EMC- Obstétrique 2013;9(1):1-20 [Article 5-031-A-35].
- Encha-Razavi F. Embryologie humaine. De la molécule à la clinique. Coll. Abrégés. Issy-les-Moulineaux : Masson; 2008.
- Encha-Razavi F, Escudier E. Embryologie. EMC- Obstétrique 2010:1-30 [Article 5-001-A-50].
- Geslin D, Gorduza D, Paganelli L, Laconi F, Mouriquand P. Anomalies de l'urètre chez le garçon. EMC- Pédiatrie- Maladies infectieuses 2017;12(4):1-6 [Article 4-089-F-10].
- Grenier N, Cimpean A, Perot V, Douws C. Maladies kystiques du rein. EMC- RADIOLOGIE ET IMAGERIE MÉDICALE : Génito-urinaire- Gynéco-obstétricale- Mammaire 2007:1-19 [Article 34-119-B-40].
- Lescure V, Descazeaud A. Pathologie de l'ouraue. EMC- Urologie 2015;9(1):1-6 [Article 18-270-A-10].
- McMahon AP. Development of the Mammalian Kidney. Curr Top Dev Biol 2016;117:31–64.
- Nobili F. Maladies rénales kystiques. EMC- Pédiatrie- Maladies infectieuses 2016;12(1):1-7 [Article 4-084-B-20].
- Pasqualini C, Irtan S. Tumeurs du rein de l'enfant. EMC- Pédiatrie- Maladies infectieuses 2017;12(3):1-10 [Article 4-089-L-10].
- Rousset-Rouvière C, Tsimaratos M. Malformations rénales. EMC- Pédiatrie- Maladies infectieuses 2010:1-6 [Article 4-088-C-10].
- Tanase A, Rega A, Jaouen AP, El Ghoneimi A, Alison AM. Anomalies congénitales du rein et des voies excrétrices. EMC- RADIOLOGIE ET IMAGERIE MÉDICALE : Génito-urinaire- Gynéco-obstétricale- Mammaire 2017;12(3):1-18 [Article 34-550-A-10].

Livres :

- Bloch B, Sadler TW, Langman J. Embryologie médicale. Traduction de la 13e édition anglaise.
- LARSEN W, SCHOENWOLF GC, BRAUER PR, FRANCIS-WEST P. Embryologie humaine. Traduction de la 4ème édition anglaise.

ÉVALUATION FORMATIVE

QCM

1. Concernant l'embryologie rénale, quelle(s) est (sont) la (les) proposition(s) exacte(s) ?

- A. La mise en place du blastème métanéphrogène est induite par le mésonéphros
- B. Le bourgeon urétéral se développe à partir de la partie crâniale du canal mésonéphrotique
- C. Le point d'émergence du bourgeon urétéral à partir du canal mésonéphrotique dépend de l'interaction entre ce dernier et le blastème métanéphrogène
- D. La division dichotomique asymétrique du bourgeon urétéral détermine l'organisation pyélocalicielle définitive, les lobes et les lobules rénaux
- E. La migration du métanéphros débute à la quatrième semaine et se poursuit jusqu'à la neuvième semaine.

2. L'agénésie rénale unilatérale :

- A. est une malformation rénale létale
- B. est due à une absence d'induction du blastème métanéphrogène
- C. elle entraîne habituellement une hypertrophie compensatrice du rein controlatéral
- D. est due le plus souvent à une mutation du gène RET
- E. peut être associée à des malformations génitales

3. La dysplasie multikystique rénale :

- A. se caractérise par un rein réduit à de multiples kystes de différentes tailles disposés en grappe de raisin sans parenchyme fonctionnel
- B. est associée à une dilatation urétérale
- C. est due à une anomalie d'interaction entre le bourgeon urétéral et le blastème métanéphrogène
- D. peut être secondaire à un obstacle précoce sur les voies excrétrices
- E. involue dans la majorité des cas

4. Le rein en fer à cheval :

- A. c'est une anomalie de rotation rénale
- B. peut être due à une anomalie de l'orientation des reins au cours de leur migration
- C. est situé plus bas que le rein normal
- D. l'uretère chemine en arrière de l'isthme
- E. peut se compliquer d'infection urinaire en rapport avec le reflux vésico-urétéral

5. Le syndrome de la jonction pyélo-urétérale est le plus souvent lié à :

- A. une anomalie de la musculature au niveau de la jonction pyélo-urétérale
- B. une insertion anormale de l'uretère sur le pyélon
- C. la présence de valves muqueuses
- D. la présence d'une vraie sténose au niveau de la jonction pyélo-urétérale
- E. un croisement de la jonction avec un vaisseau polaire

6. La duplication urétérale peut être associée à :

- A. une duplication rénale
 - B. un abouchement ectopique de l'uretère supérieur
 - C. un abouchement ectopique de l'uretère inférieur
 - D. une dysplasie multikystique du pôle supérieur
 - E. une dilatation urétéro-pyélocalicielle
-

7. Les valves de l'urètre postérieur :

- A. constituent un obstacle sous-vésical
 - B. sont le plus souvent localisées sous le veru montanum
 - C. peuvent être responsables de méga-vessie et dilatation du haut appareil urinaire
 - D. peuvent être responsables de dysplasie multikystique rénale
 - E. sont à risque d'insuffisance rénale à long terme
-

QROC

1. Au cours du développement de l'appareil urinaire, trois systèmes néphritiques se succèdent selon une séquence crânio-caudale.

a. Citez-les

b. Qu'en reste-t-il chez le nouveau-né de deux sexes ?

2. Une échographie anténatale pratiquée au début du deuxième trimestre a montré un anamnios (absence de liquide amniotique). La grossesse a été interrompue. L'examen fœtopathologique a révélé chez le fœtus de sexe féminin une agénésie rénale bilatérale et une agénésie des deux trompes et de l'utérus.

a. Donnez une explication embryologique à l'agénésie rénale.

b. Quelle est l'origine embryologique des malformations génitales constatées ?

c. Quelle est votre conclusion quant au mécanisme embryologique impliqué dans l'agénésie rénale le plus probable ?

3. Une échographie morphologique anténatale pratiquée chez une femme enceinte a montré de gros reins hyperéchogènes avec un oligoamnios chez le fœtus. L'interrogatoire a révélé que le père de la mère est atteint de polykystose rénale autosomique dominante.

a. De quelle malformation rénale serait atteint ce fœtus selon ce contexte ?

b. Quel est le mécanisme embryologique de cette malformation.

4. Une dilatation urétéro-pyélocalicielle bilatérale est détectée à l'échographie chez un fœtus de sexe masculin.

a. Citez deux malformations des voies excrétrices susceptibles d'induire cette anomalie.

b. Précisez pour chaque malformation le mécanisme embryologique.

5. Une dilatation urétéro-pyélocalicielle unilatérale sévère est diagnostiquée chez un fœtus à l'échographie.

a. Indiquez les malformations qui peuvent provoquer cette dilatation.

b. Que devriez-vous vérifier ?

6. Une maman vous consulte parce qu'elle a constaté la présence d'une tuméfaction au niveau de la région ombilicale chez son enfant. L'échographie a montré une image kystique.

a. A quoi correspond cette anomalie ?

b. Quel est le mécanisme embryologique de cette anomalie ?

PHYSIOLOGIE

L'APPAREIL EXCRÉTEUR URINAIRE

INTRODUCTION

RAPPORT STRUCTURE FONCTION

1. INNERVATION RÉNALE
2. VASCULARISATION RÉNALE
3. LE NÉPHRON

FILTRATION GLOMÉRULAIRE

1. FORMATION DE L'URINE
2. BARRIÈRE DE FILTRATION
3. DÉTERMINANTS DE LA FILTRATION GLOMÉRULAIRE
4. PRINCIPAUX FACTEURS INFLUENÇANT LA FILTRATION GLOMÉRULAIRE
5. NOTION DE CLAIRANCE
6. NOTION DE COEFFICIENT D'EXTRACTION
7. MESURE DU DÉBIT DE FILTRATION GLOMÉRULAIRE (DFG)
8. MESURE DES DÉBITS : PLASMATIQUE ET SANGUIN RÉNAL (DPR ET DSR)
9. NOTION DE FRACTION DE FILTRATION (FF)
10. NOTION DE CHARGE FILTRÉE
11. RÉGULATION DU DGF ET DU DPR

TRANSFERTS TUBULAIRES

1. DIFFÉRENTS TYPES DE TRANSPORT
2. RÉABSORPTION TUBULAIRE
3. SÉCRÉTIONS TUBULAIRES
4. EXCRÉTION RÉNALE DES PRODUITS TERMINAUX DU MÉTABOLISME

CONCENTRATION DES URINES

1. INTRODUCTION
2. CRÉATION DU GRADIENT OSMOTIQUE CORTICOPAPILLAIRE
3. MAINTIEN DU GRADIENT OSMOTIQUE CORTICO-PAPILLAIRE INTERSTITIEL
4. RÔLE DE L'ADH DANS LA CONCENTRATION DE L'URINE

LA MICTION

1. RAPPEL ANATOMOFONCTIONNEL
2. EPLETION ET CONTENTION VÉSICALE

RÉGULATION DE L'ÉQUILIBRE ACIDO-BASIQUE

1. DÉFINITION DU pH
2. ORIGINE DES GAINS ET DES PERTES D'IONS H⁺
3. LES MOYENS DE DÉFENSE DE L'ORGANISME
4. LES TROUBLES DE L'ÉQUILIBRE ACIDO-BASIQUE ET LEUR COMPENSATION

Les objectifs éducationnels

Au terme de ce cours, l'étudiant pourra :

1. Décrire les deux réseaux capillaires de la circulation rénale.
2. Différencier les deux types de néphrons et leurs particularités.
3. Représenter la variation de pression au niveau de la circulation rénale.
4. Définir le débit sanguin rénal.
5. Définir la clairance rénale et le coefficient d'extraction de différentes substances.
6. Définir la filtration glomérulaire.
7. Expliquer le principe de mesure du débit de filtration glomérulaire.
8. Calculer la pression nette d'ultrafiltration.
9. Définir la charge tubulaire.
10. Expliquer les mécanismes impliqués dans l'autorégulation rénale.
11. Définir les notions de : réabsorption, sécrétion et d'excrétion d'une substance.
12. Définir les différents mécanismes de transport d'une substance.
13. Expliquer les mécanismes de réabsorption tubulaires du glucose, des protéines et des acides aminés.
14. Expliquer le mécanisme d'excrétion des produits terminaux du métabolisme : urée, créatinine, PAH.
15. Décrire les comportements tubulaires du sodium, du potassium, des phosphates et du calcium.
16. Décrire le rôle du rein dans la réabsorption des bicarbonates
17. Décrire les mécanismes de sécrétions acides et de régénération des bicarbonates
18. Expliquer le rôle des différents segments du néphron dans la concentration de l'urine.
19. Définir le principe de contre-courant multiplicateur
20. Expliquer le rôle de l'anse de Henlé dans la création du gradient cortico-papillaire.
21. Expliquer le rôle des vasa recta dans le maintien de ce gradient.
22. Localiser le site d'action de l'ADH au niveau du néphron et établir son mode d'action.
23. Décrire le rôle du cycle de l'urée dans l'établissement du gradient cortico-papillaire.
24. Expliquer le rôle du système nerveux central et végétatif dans la miction

« Il n'est pas exagéré de dire que la composition du sang est déterminée non par ce que la bouche prend, mais par ce que les reins gardent »

Homer Smith

INTRODUCTION

Le rein est un organe vital qui contrôle strictement la composition des secteurs liquidiens de l'organisme. Cet organe très sophistiqué, assure :

1. LA CONSERVATION des substances essentielles à la vie (eau, électrolytes, nutriments...).

2. L'EXCRÉTION : des déchets du métabolisme protéique (urée, créatinine, ammoniacque), des purines (acide urique, allantoïne), des substances organiques complexes, d'origine endogène ou exogène : toxines, médicaments...

3. L'HOMÉOSTASIE DU MILIEU INTÉRIEUR :

- pH (bilan H^+ nul),
- osmolarité (bilan Na^+ nul)
- volémie (bilan de l'eau = 0)
- kaliémie (bilan K^+ nul)
- pression artérielle moyenne.

4. RÔLE ENDOCRINE

- Synthèse et sécrétion d'hormones (rénine et érythropoïétine),
- Formation de vitamine D active (hydroxylation du cholécalférol)

L'activité rénale est modulée localement (prostaglandines) et par des mécanismes de rétrocontrôle où interviennent le système nerveux central (hormone antidiurétique et arcs réflexes périphériques) et le système endocrinien (l'hormone antidiurétique pour l'excrétion d'eau), l'aldostérone pour l'excrétion de potassium et la parathormone pour l'excrétion de calcium et de phosphore.

Le glomérule assure la première étape de la formation des urines qui est la FILTRATION GLOMÉRULAIRE.

RELATION STRUCTURE FONCTION

1. INNERVATION RÉNALE

L'innervation des reins provient du plexus rénal de la division sympathique du système nerveux autonome. Les nerfs du plexus accompagnent les artères rénales et leurs branches, et sont distribués aux vaisseaux sanguins. Les nerfs étant vasomoteurs, ils

contrôlent la circulation sanguine dans les reins en réglant le diamètre des artérioles afférentes et efférentes. La stimulation du système sympathique rénal stimule la sécrétion de rénine et par conséquent d'angiotensine II.

2. VASCULARISATION RÉNALE

Les reins sont principalement chargés de retirer les déchets du sang et de régler sa teneur en liquides et en électrolytes. Ainsi, ces organes qui ne représentent qu'à peu près 0.5% du poids corporel, reçoivent environ 20 à 25% du débit cardiaque (5,5 l/min), soit environ 1,2 l/min pour les deux reins.

2.1 RÉSEAU VASCULAIRE RÉNAL

La distribution du débit sanguin rénal (DSR) est inégale :

- Le cortex reçoit 80 à 90% du sang,
- La médulla, très peu irriguée : 10 à 20% du sang.

Dans un passage rénal, le sang traverse la séquence de vaisseaux suivante :

1. L'artère rénale, provenant de l'aorte, pénètre le rein par le hile,
2. Les artères interlobaires,
3. Les artères arquées, qui se situent à la jonction cortico-médullaire,
4. Les artères interlobulaires ou corticales radiales,
5. Les artérioles afférentes :

Chaque corpuscule rénal reçoit une artériole afférente qui se divise pour former un réseau enchevêtré de capillaires, appelé capillaires glomérulaires.

6. Les capillaires glomérulaires (un glomérule par artériole afférente)

Ces capillaires fusionnent pour donner naissance à une artériole efférente (α), qui draine le sang du glomérule. Étant donné que le diamètre de l'artériole efférente est inférieur à celui de l'artériole afférente, la pression artérielle des capillaires glomérulaires est considérablement plus élevée que celle qui règne dans les autres capillaires de l'organisme (favorable à la filtration).

7. Les artérioles efférentes (une par glomérule rénal) :

Chaque artériole efférente d'un néphron cortical se divise pour former un réseau de capillaires, appelés capillaires péri tubulaires, autour des tubules contournés proximal et distal. L'artériole efférente d'un néphron juxtamédullaire forme aussi des capillaires péri tubulaires. De plus, elle donne naissance à des vaisseaux en forme de boucle allongée, les vasa recta, qui descendent le long de l'anse de Henlé dans la médulla.

Les veines suivent un trajet inverse : les capillaires se déversent dans une veinule qui est drainée par la veine interlobulaire, suivie de la veine arquée, la veine interlobaire, les branches de la veine rénale et finalement la veine rénale.

2.2 RÉGIME DE PRESSION (FIGURE. 1)

On distingue deux systèmes capillaires en série, le premier glomérulaire, et le second péri tubulaire. Les résistances vasculaires modulables sont situées sur les artérioles glomérulaires afférente et efférente.

La pression hydrostatique glomérulaire (50- 60 mm Hg) excède grandement celle de la capsule de Bowman (10 à 15 mm Hg), ce qui force le plasma à traverser la paroi glomérulaire. La conséquence immédiate est que la pression oncotique du sang augmente en avançant dans le glomérule jusqu'à annuler l'effet de la pression hydrostatique. L'artériole efférente transfère le sang non filtré par le glomérule vers un deuxième réseau capillaire qui entoure les tubules proximal et distal du néphron ainsi que le tube collecteur (les capillaires péri tubulaires). La pression hydrostatique dans l'artériole efférente

chute à environ 15 mm Hg ce qui, conjointement avec l'augmentation de la pression oncotique, favorise la récupération de l'eau qui est réabsorbée passivement par les capillaires péri tubulaire. La variation de pression hydrostatique et oncotique dans le trajet vasculaire rénal est illustrée dans la figure ci-dessous.

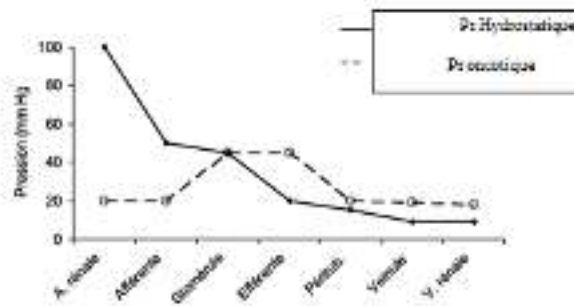


Figure 1. Évolution de la pression hydrostatique et de la pression oncotique du sang, lors de son trajet rénal

3. LE NÉPHRON

Chaque rein humain contient environ 1,25 million de néphrons, qui forment les unités fonctionnelles du rein. Chaque néphron consiste en un corpuscule rénal ou corpuscule de Malpighi, attaché à un tube long, fin, convoluté et sa vascularisation associée. Le tubule rénal comprend successivement : le tube contourné proximal (TCP), l'anse de Henlé (AH), le tube contourné distal (TCD). Chaque segment exerce des fonctions multiples et intervient sur une urine intra tubulaire qui change de composition en allant depuis le segment de départ (TCP) au segment final : tube collecteur (TC).

3.1 DIFFÉRENTS TYPES DE NÉPHRONS

A. NÉPHRONS COURTS OU CORTICAUX

Ce sont des néphrons dont les corpuscules sont à la périphérie du cortex. Ils ont des AH courtes qui ne dépassent pas la portion externe de la médulla. Ils sont majoritaires : 85 à 90 % de la totalité des néphrons.

B. NÉPHRONS LONGS JUXTA MÉDULLAIRES

Les corpuscules de ces néphrons se trouvent à la jonction cortico-médullaire. Ils possèdent des AH qui descendent jusqu'à la papille rénale. Ces néphrons bénéficient d'une vascularisation en épingle à cheveux ou vasa recta et assurent la création du gradient de concentration corticopapillaire. Ils sont minoritaires : 10 à 15% de la totalité des néphrons.

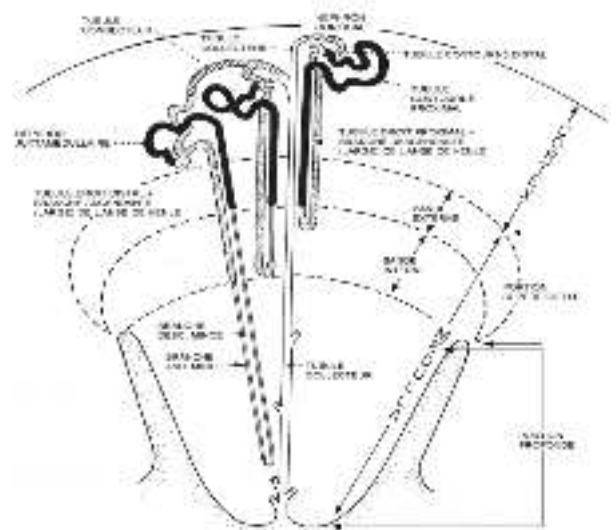


Figure 2. Structure des néphrons

3.2 APPAREIL JUXTAGLOMERULAIRE

La branche ascendante large de l'anse de Henlé (BAL) et le segment initial du tube distal. Lors de son trajet centrifuge vient en contact avec son propre glomérule pour former l'**APPAREIL JUXTAGLOMÉROLAIRE**. D'une part, les cellules épithéliales du tubule distal qui s'apposent à la racine du glomérule se spécialisent pour former la MACULA Densa. D'autre part, les cellules musculaires lisses de l'artériole afférente sont remplacées par des CELLULES GRANULAIRES qui sécrètent la rénine. Cet appareil juxtaglomérulaire joue un rôle clé dans la régulation de la volémie et de la pression artérielle moyenne (cf. thème XII).

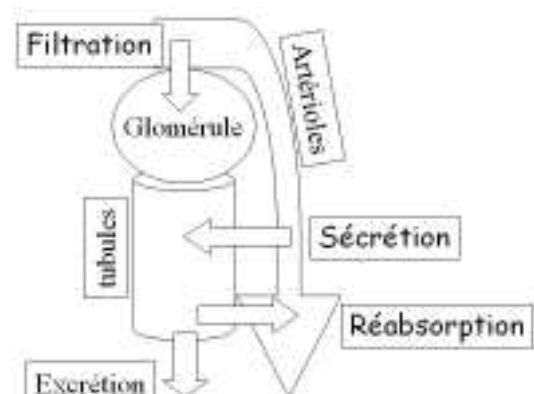


Figure 3. Appareil juxta glomérulaire

LA FILTRATION GLOMÉRULAIRE

1. FORMATION DE L'URINE

L'urine est formée par l'action séquentielle des différentes composantes du néphron : filtration, réabsorption, sécrétion et excrétion. (figure.4).

1.1 FILTRATION :

C'est la première étape de la formation des urines qui consiste à faire passer les substances des capillaires glomérulaires vers la lumière de la capsule de Bowman.

1.2 RÉABSORPTION :

Elle consiste à ramener la substance de la lumière tubulaire vers les capillaires péri tubulaires (glucose, Na^+ , HCO_3^-).

1.3 SÉCRÉTION : C'est l'inverse de la réabsorption, elle consiste à ramener la substance des capillaires ou des cellules tubulaires vers la lumière tubulaire (K^+ , acides organiques...).

1.4 EXCRÉTION : L'élimination de la substance dans les urines définitives (urée, créatinine, Na^+ ...).

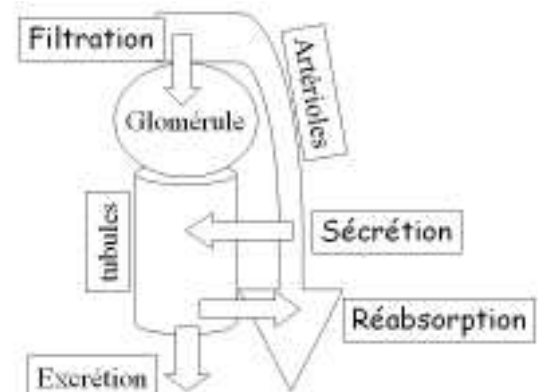


Figure. 4 Différentes fonctions du néphron

2. BARRIÈRE DE FILTRATION

Sur un plan fonctionnel et anatomique, la barrière de filtration comporte trois couches successives de dedans en dehors :

2.1 ENDOTHÉLIUM CAPILLAIRE GLOMÉRULAIRE

Il est largement fenêtré qui n'assure aucune restriction de taille (excepté les globules sanguins).

2.2 MEMBRANE BASALE GLOMÉRULAIRE

C'est un assemblage complexe (maillage) de glycoprotéines. Elle assure environ 30 % de la restriction de passage de taille. Sa composition chimique riche en glycoprotéines anioniques qui repoussent les charges négatives.

2.3 LES CELLULES ÉPITHÉLIALES

Elles sont appelées également podocytes. Elles recouvrent le versant externe de la membrane basale glomérulaire. Ces cellules fortement différenciées étendent des pieds ou pédicelles. Cette couche épithéliale assure l'ensemble de la restriction au passage de taille empêchant notamment le passage de protéines de poids supérieur à 60 KD. Les pédicelles sont également recouverts de glycoprotéines poly anioniques qui assurent une restriction au passage de charge.

La concentration de l'albumine (60KD) dans l'urine primitive est inférieure à 5 mg/l contre 40 g/l. Malgré cette concentration extrêmement faible dans l'urine primitive et compte tenu d'une ultrafiltration importante de 180 litres par jour, la quantité d'albumine passant le filtre glomérulaire est d'environ 1 g /jour. Cette albumine présente dans l'urine primitive n'apparaît cependant pas dans l'urine définitive en raison d'une réabsorption tubulaire très intense à plus de 99 % au niveau du tube contourné proximal.

En conclusion : La barrière de filtration glomérulaire est triplement sélective : sélectivité de poids, de taille et de charge (Figure. 5). L'ultra filtrat ou urines primitives a ainsi la même composition que le plasma sauf qu'il ne contient pas de protéines.

En conclusion : l'ultra filtrat ou les urines primitives ont la même composition que le plasma sauf qu'ils ne contiennent pas de protéines et d'éléments figurés du sang. Les glomérules filtrent environ 180 l/j soit 60 fois le volume plasmatique.

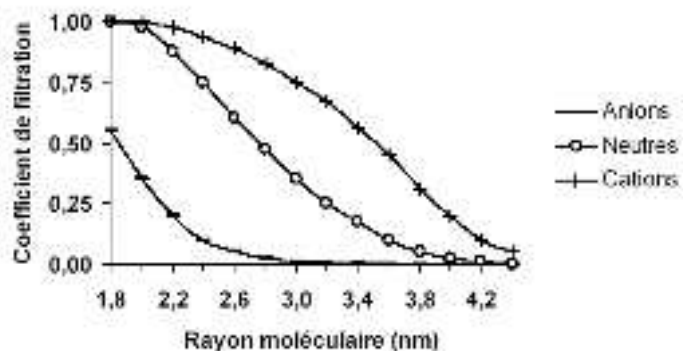


Figure.5 Sélectivité de taille et de charge à poids moléculaire identique

3. DÉTERMINANTS DE LA FILTRATION GLOMÉRULAIRE

La filtration glomérulaire est phénomène passif déterminé par les pressions qui s'exercent de part et d'autre du capillaire glomérulaire. La pression hydrostatique capillaire favorise la filtration alors que la pression oncotique des protéines dans le plasma ($\pi_{\text{onc cap}}$) et la pression hydrostatique dans la capsule de Bowman (PCB) s'y opposent. La quantité de protéines traversant la barrière de filtration étant négligeable, elle sera par conséquent négligée ($\pi_{\text{onc CB}} \approx 0$). Ainsi, la force résultante (loi de Starling) est la pression nette d'ultrafiltration ou pression efficace d'ultrafiltration (PUF).

$$\begin{array}{ccc} \text{PUF} = & (P_{\text{Hcap}} - P_{\text{HCB}}) & - & (\pi_{\text{onc cap}} - \pi_{\text{onc CB}}) \\ & \downarrow & & \downarrow \\ & \Delta P \text{ Hydrostatique} & - & \Delta \pi \text{ oncotique} \end{array}$$

Example :

$$\begin{aligned} P_{H\text{ cap}} &= 60 \text{ mm Hg} \\ P_{HCB}) &= 15 \text{ mm Hg} \\ \pi_{\text{onc cap}} &= 27 \text{ mm Hg} \\ \text{PUF} &= (60 - 15 \text{ mm}) - 27 \text{ mm Hg} = 18 \text{ mmHg} \end{aligned}$$

Débit de filtration glomérulaire ou DFG est égal :

DFG	=	k	x	PUF
ml/min		ml/min/mm Hg		mm Hg
K _f	=	k	x	S
Facteur de perméabilité hydraulique,		surface de filtration		

Le DFG varie en fonction de l'âge et du sexe. Il est de 120 ± 25 mL/min chez l'homme et de 95 ± 20 mL/min chez la femme, soit un chiffre aux alentours de 180 l/j.

La Figure 6 ci-dessous représente l'interaction des forces de Starling dans le corpuscule rénal. À l'inverse des autres réseaux capillaires de l'organisme, la pression hydrostatique dans le glomérule (P_{Hc}) est très élevée et elle demeure à peu près constante sur toute sa longueur grâce à l'activité hémodynamique des artérioles afférente et efférente. La pression hydrostatique dans l'espace de Bowman (P_{HCB}) est aussi beaucoup plus élevée que dans le liquide interstitiel, mais la pression oncotique à ce niveau est à peu près nulle, car la barrière de filtration glomérulaire est pratiquement imperméable aux protéines. Cette rétention sélective des protéines à l'intérieur du capillaire glomérulaire fait que la pression oncotique dans le glomérule augmente progressivement, de sorte que la pression nette de filtration glomérulaire diminue jusqu'à s'annuler chez certaines espèces animales : **point d'équilibre**.

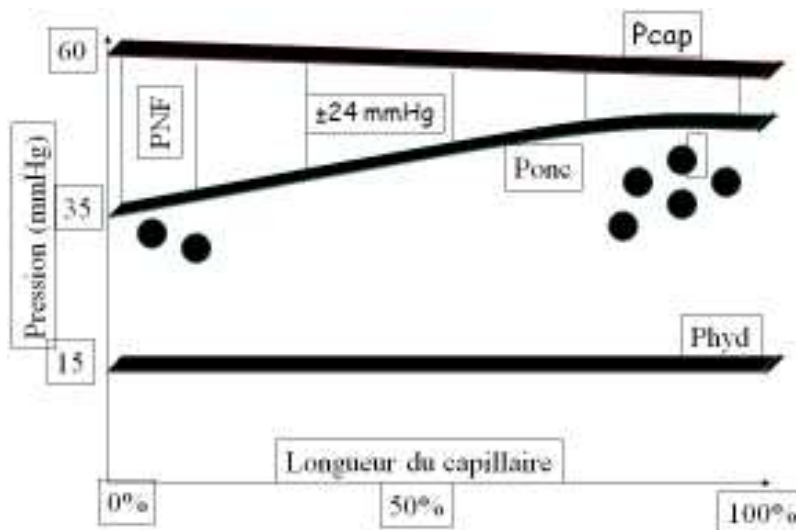


Figure 6. Évolution des pressions le long d'un capillaire glomérulaire

4. PRINCIPAUX FACTEURS INFLUENÇANT LA FILTRATION GLOMÉRULAIRE

4.1 PRESSION HYDROSTATIQUE DANS LE CAPILLAIRE GLOMÉRULAIRE

Cette pression varie essentiellement en fonction :

- de la vasomotricité des résistances des artérols afférente-efférente.
- de la pression de perfusion rénale ou pression artérielle moyenne (volémie)

4.2 PRESSION ONCOTIQUE

La baisse de la pression oncotique augmente le DFG.

4.3 PRESSION HYDROSTATIQUE DANS LA CAPSULE DE BOWMAN

L'augmentation de cette pression suite à une occlusion des voies urinaires (Ex. calcul rénal) diminue la DFG.

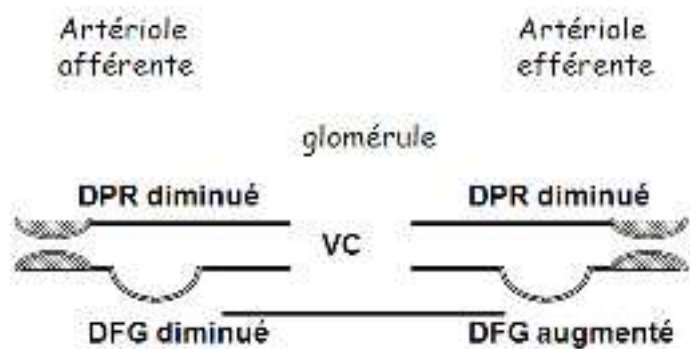


Figure 7. Effet de la vasomotricité sur le DPR et le DFG

4.4 COEFFICIENT DE PERMÉABILITÉ (Kf)

La valeur de Kf varie selon les espèces, car la composition de la barrière de filtration est variable. La surface de filtration est difficile à estimer : 5 à 15 m²/100 g de rein. Elle varie selon les espèces et selon le degré de contraction des cellules mésangiales (↓ : Angiotensine II et hormone antidiurétique, ↑ : Facteur Atrial Natriurétique).

5. NOTION DE CLAIRANCE

LA CLAIRANCE (C) indique le volume (virtuel) de plasma totalement débarrassé d'une substance y par unité de temps (ml/min ou l/j)

$$C_y = \frac{[U]_y \times V}{[P]_y}$$

[U]_y = concentration urinaire de x exprimée en (mg/ml : inuline, glucose....) ou meq/l pour les électrolytes (Na⁺, K⁺...) ou mmoles/l (électrolytes, urée...).

V = débit urinaire ml/min

[U]_y . V = débit d'excrétion urinaire de y (mg/min, meq/min ou mmoles/min).

[P]_y = concentration plasmatique de y (mêmes unités que [U] x).

6. NOTION DE COEFFICIENT D'EXTRACTION

Le débit urinaire moyen V étant faible par rapport au débit plasmatique (DPR). En considérant que les débits artériels d'entrée et veineux de sortie sont égaux. Ainsi, selon le principe de conservation de masse, on peut écrire pour une substance y donnée :

$$U_y \times V = (C_a - C_v) \times DPR$$

U_y = concentration urinaire de y dans l'urine,
C_a = concentration artérielle
C_v = concentration veineuse
 $U_y \times V / C_a = (C_a - C_v) / C_a \times DPR$
 $(C_a - C_v) / C_a =$ coefficient d'extraction de y (**E_y**)

E_y = Coefficient, indice, pourcentage ou taux d'extraction rénale de y. $0 \leq E \leq 1$

Ex : $E_{\text{Glucose}} = 0$ et $E_{\text{PAH}} = 1$ (Acide Para-Amino-Hippurique).

La clairance peut être également exprimée en fonction du coefficient d'extraction rénale de y.

Étant donné que $U_y \times V / C_a =$ clairance de y, on peut écrire :

$$C_y = E_y \cdot DPR$$

7. MESURE DU DÉBIT DE FILTRATION GLOMÉRULAIRE (DFG)

Le DFG est la quantité de liquide plasmatique qui traverse le filtre glomérulaire par unité de temps (ml/min ou l/j).

7.1 CLAIRANCE DE L'INULINE

Le DFG peut être déterminé par la technique de la clairance de l'inuline, un polysaccharide de fructose. Cette molécule neutre, de petite taille est éliminée exclusivement par filtration et n'est ni réabsorbée ni sécrétée par le rein. L'inuline n'est pas toxique pour l'organisme et ne subit pas de biotransformation ni de dégradation chimique.

$$\text{DFG ou } C_i = \frac{[U]_i \cdot V}{[P]_i}$$

Ou

$$\text{DFG ou } C_i = E_i \cdot \text{DPR}$$

$$\text{Or } E_i = 0,2 \text{ ou } 1/5 \quad \text{d'où} \quad \text{DFG} = C_i = 1/5 \text{ DPR}$$

7.2 CLAIRANCE DE LA CRÉATININE

La créatinine, produit de dégradation des protéines musculaires, est normalement présente dans le plasma. Cette substance endogène a une clairance proche de celle de l'inuline, de sorte qu'elle peut être utilisée en pratique clinique pour évaluer la filtration glomérulaire. Cependant, à forte concentration (exercice physique, insuffisance rénale), la créatinine est également sécrétée et ne peut être utilisée comme indicateur du DFG.

La clairance de la créatinine peut être estimée par la formule de Cockcroft :

$$\text{Clairance de la créatinine (ml/min)} = (140 - \text{âge}) \times \text{poids} / \text{créatininémie}$$

A = 1,23 chez l'homme et 1,04 chez la femme.

Cette formule est peu fiable chez les enfants, les sujets obèses, les sujets âgés et les femmes en période de grossesse.

8. MESURE DES DÉBITS : PLASMATIQUE ET SANGUIN RÉNAL (DPR ET DSR)

Le DPR est estimé par la clairance du PAH qui est un acide organique filtré et sécrété par les tubules rénaux. Cette substance disparaît de la circulation rénale dès le premier passage ($E_{\text{PAH}} = 1$), à condition qu'il soit utilisé à des doses faibles (concentration plasmatique < 20 mg/100 ml sang). A doses > 20 mg/100 ml, le Taux maximal de sécrétion ou Tm de sécrétion est atteint et la concentration veineuse du PAH n'est plus égale à 0 ($E < 1$).

8.1 MESURE DU DPR

$$\text{DPR ou } C_{\text{PAH}} = \frac{[U]_{\text{PAH}} \cdot V}{[P]_{\text{PAH}}}$$

$$\text{DPR ou } C_{\text{PAH}} = E_{\text{PAH}} \cdot \text{DPR}$$

8.2 MESURE DU DSR

$$\text{DPR} = \text{DSR} (1 - \text{Hématocrite})$$

$$\text{DSR} = \frac{\text{DPR}}{1 - \text{Hématocrite}}$$

Ainsi, pour un hématocrite de 40 %, le débit plasmatique d'un sujet ayant une surface corporelle de 1,73 m² est de l'ordre de 600 ml par minute.

$$\text{DSR} \approx 1/5 \text{ Débit cardiaque}$$

9. NOTION DE FRACTION DE FILTRATION (FF)

$$FF = \frac{DFG}{DPR} \approx 0,2$$

L'augmentation de la FF entraîne une augmentation de la π oncotique dans les capillaires péri tubulaires ce qui favorise le processus de réabsorption.

10. NOTION DE CHARGE FILTRÉE

La charge filtrée d'une substance y (F'_y) est la quantité de substance filtrée par unité de temps.

$$F'_y = DFG \times [P]_y$$

$[P]_y$ = Concentration plasmatique de y

F_y s'exprime en : mg/min, mmoles/min, meq/min.....

11. RÉGULATION DU DSR ET DU DFG

Le DSR n'est pas déterminé par les besoins métaboliques du rein, car le rein ne consomme que 10 à 15 % de l'oxygène qui lui est présenté. Le rôle majeur de la circulation rénale est de maintenir un DFG stable malgré les variations hémodynamiques systémiques.

Ainsi, un DFG élevé risque de faire perdre à l'organisme des substances essentielles (nutriments, électrolytes...) alors qu'un DFG bas, limite les capacités d'élimination des déchets métaboliques d'où l'intérêt de maintenir constant ce paramètre.

Étant donné que le DFG varie en fonction du DPR, la régulation de ce dernier paraît à l'évidence nécessaire.

Cette régulation est double :

- intrinsèque, propre au rein
- extrinsèque : nerveuse sympathique et hormonale.

11.1 RÉGULATION INTRINSÈQUE OU AUTORÉGULATION

L'autorégulation rénale est une propriété intrinsèque qui existe même sur un rein dénervé et isolé. Le DSR est maintenu constant pour de larges variations de la pression artérielle moyenne systémique, entre 80 et 180 mm Hg (Figure 8).

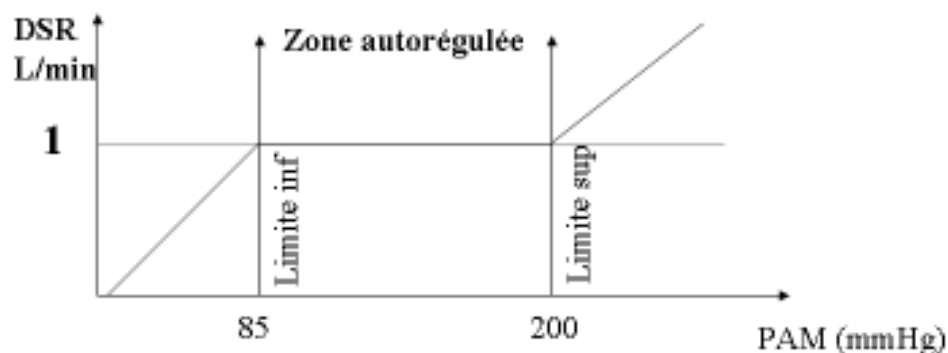


Figure 8. Autorégulation du DSR et du DFG

L'autorégulation du DSR est secondaire à deux mécanismes principaux : myogénique et le rétrocontrôle tubulo-glomérulaire par l'intermédiaire de la macula densa. Les hormones synthétisées au niveau du rein joueraient également un rôle dans le maintien de la stabilité du DSR et du DFG.

• UN MÉCANISME MYOGÉNIQUE

Les cellules musculaires lisses des artéioles afférentes sont sensibles à l'étirement provoqué par une augmentation de la pression artérielle de perfusion répondant par une vasoconstriction active. Ce mécanisme réflexe est lié à l'ouverture des canaux calciques et à l'entrée de calcium dans la cellule musculaire. Il est inhibé par la papavérine puissant myorelaxant et par les inhibiteurs calciques.

• RÉTROCONTRÔLE NÉGATIF TUBULO-GLOMERULAIRE :

Lorsque l'on augmente la pression de perfusion rénale, on augmente la pression hydrostatique dans les capillaires glomérulaires et la charge filtrée de NaCl. L'augmentation de la pression hydrostatique dans les capillaires péri tubulaires et la baisse du temps de réabsorption proximale entraîne une augmentation de la quantité de NaCl livrée à la macula densa ce qui stimule la sécrétion d'un agent paracrine (probablement l'adénosine) qui agit en contractant les cellules myoépithéliales de l'artériole afférente. De même, on assiste à une baisse de la sécrétion de rénine et d'angiotensine II locale.

Un mécanisme inverse intervient en cas de diminution de la pression de perfusion rénale.

• HORMONES RÉNALES

Le rein synthétise plusieurs substances vaso-actives agissant localement sur la vascularisation intra rénale.

- Système rénine angiotensine (SRA) intra rénal
- Système des prostaglandines (PG)
- Système kinine kallicréine (KK)

Système rénine angiotensine intra rénal

La rénine est synthétisée par les cellules granulaires de l'artériole afférente et libérée dans l'interstitium. Elle permet la transformation de l'angiotensinogène en angiotensine I qui est convertie en angiotensine II en présence de l'enzyme de conversion.

L'angiotensine II produite localement entraîne :

- une vasoconstriction de l'artériole efférente à l'origine d'une chute du débit sanguin glomérulaire et une augmentation de la fraction de filtration.
- une contraction des cellules mésangiales glomérulaires et une baisse du coefficient de filtration glomérulaire (Kf).
- Une vasoconstriction médullaire

Prostaglandines

Les prostaglandines sont synthétisées dans le cortex et la médullaire à partir de l'acide arachidonique par la voie de la cyclo-oxygénase. L'effet global est vasodilatateur et permet de limiter l'effet vasoconstricteur de l'angiotensine II.

Système Kinine – kallicréine

La Kallicréine rénale synthétisée par les cellules tubulaires distales agit sur la kininogène pour aboutir à la formation de la bradykinine.

Les kinines entraînent une vasodilatation des artérioles afférentes et efférentes avec augmentation du débit sanguin glomérulaire sans augmentation significative du DFG.

11.2 RÉGULATION EXTRINSÈQUE

Elle associe des effets extra rénaux et des effets sur l'hémodynamique intra rénale et participe à la régulation de la pression artérielle systémique :

- le système nerveux sympathique
- le système rénine angiotensine
- l'hormone antidiurétique
- le facteur atrial natriurétique

• SYSTÈME NERVEUX SYMPATHIQUE

L'innervation rénale est exclusivement sympathique principalement noradrénergique, mais également à un moindre degré dopaminergique.

Les terminaisons nerveuses sympathiques se distribuent à la totalité des vaisseaux du cortex, à tous les éléments de l'appareil juxta glomérulaire et aux tubules. Les terminaisons nerveuses dopaminergiques sont situées aux pôles vasculaires des glomérules.

Les effets vasoconstricteurs de la noradrénaline entraînent :

- une augmentation des résistances vasculaires rénales
- une diminution du DSR et du DFG

Cependant à l'état basal physiologique, l'effet vasoconstricteur porte essentiellement sur l'artériole efférente. Les effets vasomoteurs sympathiques noradrénergiques sont directs (α) et indirects (B1) stimulant la sécrétion de rénine.

Lorsque la pression artérielle systémique diminue beaucoup, la stimulation sympathique est responsable d'une vasoconstriction rénale importante et diffuse qui entraîne une réduction franche du DSR et du DFG (insuffisance rénale fonctionnelle).

La stimulation des fibres dopaminergiques induit une vasodilatation artériolaire glomérulaire. En thérapeutique, les effets vasomoteurs de la dopamine sont fonction de la posologie :

- à faible dose, les effets sont vasodilatateurs
- à forte dose, les effets sont vasoconstricteurs

• HORMONES EXTRA RÉNALES

Hormone antidiurétique (ADH) ou vasopressine (AVP)

Cette hormone synthétisée par les cellules des noyaux supraoptiques et paraventriculaires de l'hypothalamus est stockée au niveau de la post-hypophyse. Cette hormone est libérée sous l'effet de deux stimuli principaux : l'hypovolémie et l'hyperosmolarité.

A concentrations supraphysiologiques, l'ADH des effets vasopresseurs (récepteurs V1). Elle entraîne une élévation de la pression artérielle systémique, une augmentation des résistances vasculaires rénales et une diminution du DSR.

Facteur Atrial Natriurétique (FAN)

Le facteur atrial natriurétique est synthétisé par les myocytes auriculaires. C'est une hormone libérée en cas d'augmentation de la volémie.

Les effets de cette hormone sur l'hémodynamique rénale et la filtration glomérulaire sont dissociés :

- augmentation du DFG sans augmentation significative du DSR.
Ces effets sont dus à une vasodilatation de l'artériole afférente et une vasoconstriction plus modérée de l'artériole efférente entraînant une augmentation de la pression hydrostatique glomérulaire.
- augmentation de la charge filtrée de Na^+ secondaire à l'augmentation du DFG.
- augmentation du coefficient d'ultrafiltration (K_f) secondaire au relâchement des cellules mésangiales.
- augmentation des débits sanguins et de la pression hydrostatique des vasa recta descendants et ascendants ce qui entraîne une augmentation de l'excrétion sodée.

Cette hormone vasodilatatrice agit également :

- en inhibant la sécrétion de rénine
- en s'opposant aux effets vaso constricteurs de l'angiotensine II.

LES FONCTIONS TUBULAIRES

Les urines primitives en provenance de la capsule de Bowman subissent des traitements à chaque niveau du néphron, ainsi, sur les 180 l/j de liquide filtré les reins n'éliminent qu'environ 1,5 à 2 l/j dans les conditions normales d'hydratation.

Le débit d'excrétion d'une substance y ou U'_y est la résultante de trois processus :

$$U'_y = F'_y - R'_y + S'_y$$

F'_y , R'_y et S'_y représentent respectivement les débits ou charges : filtrées, réabsorbées et sécrétées de y.

1. DIFFÉRENTS TYPES DE TRANSPORT

La réabsorption tubulaire est effectuée par les cellules épithéliales tout au long des tubules rénaux. Elle se produit surtout dans les tubules contournés proximaux, dont les cellules épithéliales présentent de nombreuses microvillosités qui augmentent la surface de réabsorption et de nombreuses mitochondries pour énergiser les transports. Les parties distales du néphron sont à l'origine des processus de réabsorption plus précis (hormones) qui visent à maintenir les équilibres homéostatiques. La réabsorption tubulaire restitue des nutriments à l'organisme. Des déchets métaboliques tels que l'urée ne sont que partiellement réabsorbés.

1.1 TRANSPORT PASSIF

Le passage de la substance a lieu sans dépense d'énergie. Le flux passif se fait grâce à un gradient électrochimique, de concentration ou osmotique. Cependant, le sens du flux va toujours du compartiment le plus concentré vers celui qui l'est moins.

- au cours de la diffusion facilitée, un système de transport intervient dans le flux de la substance. Elle a lieu généralement du côté basolatéral (Glucose...). Le débit sera affecté par la quantité de substance en rapport au nombre de transporteurs (possibilité de saturation) ou par la présence d'autres substances (possibilité de compétition).

1.2 TRANSPORT ACTIF

Le transport actif se fait contre des gradients de concentration ou électrochimiques. Ce transport requiert une dépense d'énergie fournie dans la plupart des cas par une réaction chimique (par exemple, hydrolyse de l'ATP). Ces mécanismes de transport actif sont responsables du maintien des différences de potentiel de part et d'autre des membranes épithéliales (pompes Na^+/K^+ ATPase).

2. RÉABSORPTIONS TUBULAIRES

2.1 TUBE PROXIMAL

A. LA RÉABSORPTION DU SODIUM

La réabsorption du Na^+ est la principale activité du rein : elle est responsable de 90% de la consommation d' O_2 de cet organe. Le sodium est le seul substrat que le rein peut récupérer sans connaître une saturation de ses mécanismes de transport. Environ 60 à 70% de la charge filtrée du Na^+ est réabsorbée au niveau du TP.

- **Réabsorption par co-transport**

Le cotransport ou symport véhicule deux substances dans la même direction. Les co-transporteurs du Na^+ permettent la récupération par le tubule proximal des nutriments (glucose acides aminés...) présents dans l'ultra-filtrat. Cet ion est transféré vers l'espace intercellulaire au moyen des pompes Na^+/K^+ ATPase de la membrane basolatérale.

- **La pompe Na^+/K^+ ATPase**

La pompe Na^+/K^+ située du côté basolatéral expulse trois ions Na^+ du cytoplasme en échange de deux ions K^+ . Ce transporteur consomme l'énergie de l'hydrolyse de l'ATP. En raison de l'imperméabilité de la membrane basolatérale de l'épithélium rénal au Na^+ , cet ion qui est expulsé dans l'espace intercellulaire est entraîné par l'eau vers les capillaires sanguins. En effet, en expulsant le Na^+ vers l'espace intercellulaire du tubule, il se crée un appel d'eau qui entraîne les autres solutés, certains par la voie transcellulaire, d'autres par la voie paracellulaire processus connu sous le nom de « solvant drag ». L'eau et les solutés de l'espace intercellulaire diffusent vers les capillaires péri tubulaires en raison de la pression oncotique élevée et la faible pression hydrostatique dans le capillaire, de sorte qu'environ 60% du volume de l'ultrafiltrat est récupéré au niveau du TP. Cependant, cette réabsorption d'eau entraîne peu de changement dans l'osmolarité de l'urine.

• L'échangeur Na^+/H^+ ou le contre transport Na^+/H^+

Cet antiport est indispensable à la réabsorption de bicarbonates (cours Régulation du pH). Il est stimulé par l'angiotensine II et les catécholamines et inhibé par le FAN.

B. LE TRANSPORT DU POTASSIUM

Normalement, une grande partie du potassium filtré par le glomérule est réabsorbée par le tubule proximal : l'épithélium est très perméable au K^+ , ce qui permet à cet ion d'atteindre l'espace intercellulaire par la voie para cellulaire jusqu'à ce que ses concentrations de part et d'autre de la jonction serrée s'équilibrent. Dans ce cas, le K^+ est entraîné par l'eau qui diffuse à la faveur du gradient osmotique (ce qui est connu sous le nom de « solvant drag ». Environ 50 à 60% du K^+ est réabsorbé au niveau du TP.

C. LA RÉABSORPTION DES NUTRIMENTS DANS LE TCP

Cinq substances présentes dans le filtrat glomérulaire ont une grande importance nutritionnelle : glucose, protéines, acides aminés, acétoacétates et vitamines. Normalement, elles sont toutes complètement ou presque complètement réabsorbées par des processus actifs au niveau du tube proximal.

La quasi-totalité du glucose, des acides aminés et d'autres métabolites utiles sont librement filtrés et réabsorbés dans le tubule contourné proximal. Toutes ces substances sont réabsorbées par les symporteurs du sodium, qui fonctionnent par transport actif secondaire. L'ion Na^+ et une molécule de glucose du filtrat se lient à un symporteur Na^+ -Glucose (protéine intégrale de membrane : Glu T2) qui achemine les deux substances dans le cytosol. Il s'agit d'un transport actif secondaire énergisé par la pompe Na^+/K^+ l'ATPase basolatérale. Les substances introduites dans les cellules du tubule contourné proximal par les symporteurs les quittent habituellement par diffusion facilitée à travers la membrane basolatérale et diffusent ensuite dans les capillaires péri-tubulaires.

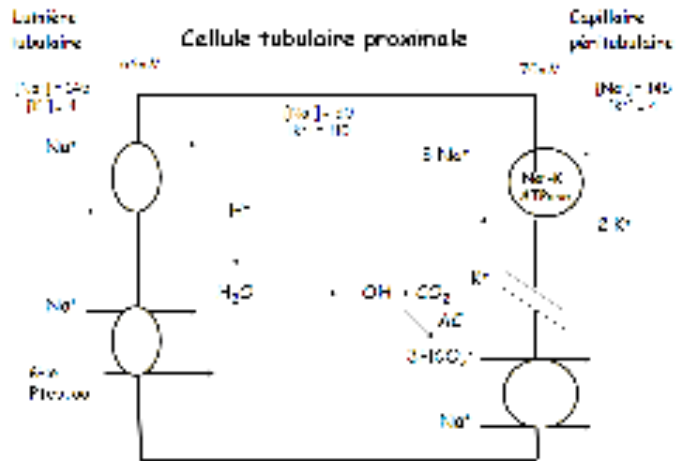


Figure 9. Cellule tubulaire proximale (Réabsorption des nutriments)

a. Réabsorption du glucose

En règle générale, tout le glucose et les acides aminés filtrés par les glomérules sont réabsorbés dans le TCP. Cependant, chaque type de symporteur comporte une vitesse maximale à laquelle il peut fonctionner, tout comme un escalier mécanique ne peut transporter qu'un nombre limité de personnes en une heure. **Cette limite est appelée taux maximal de réabsorption (T_m) ou transport maximal et est mesurée en mg/min.** Lorsque l'une de ces substances possède une concentration sanguine anormalement élevée, le T_m peut être dépassé. En conséquence, la substance est éliminée dans les urines définitives.

Le seuil rénal de réabsorption mesuré en mg/ml, est la concentration plasmatique à partir de laquelle une substance commence à se déverser dans l'urine parce que son T_m a été dépassé.

La courbe de titration du glucose figurant ci-dessous illustre l'exemple d'une réabsorption limitée par un T_m . Le glucose a une concentration dans l'urine glomérulaire identique à celle du plasma et la charge tubulaire en glucose est égale à chaque minute dans les conditions normales à $\text{FP} = 1 \text{ mg/l} \times 125 \text{ ml/min} = 125 \text{ mg/min}$.

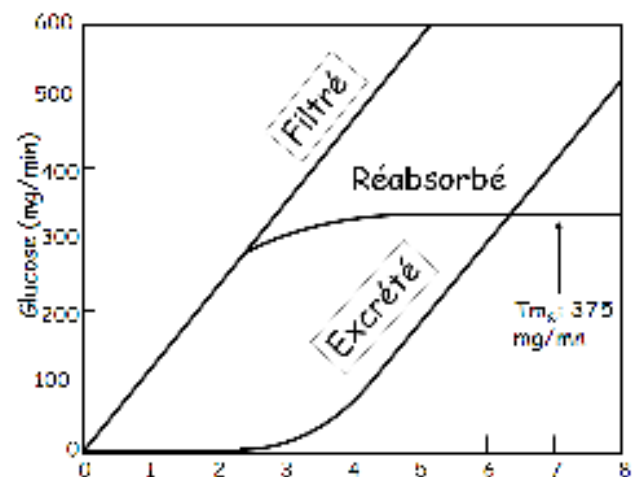


Figure. 10 Courbe de titration du glucose

À l'état physiologique, la glycosurie est nulle ($E'G = U \cdot V = 0$) et les 125 mg/mn de glucose filtrés sont donc réabsorbés.

Si la glycémie est progressivement élevée par une perfusion intraveineuse de glucose, on peut calculer pour chaque concentration plasmatique du glucose la charge tubulaire ou la charge filtrée ou F :

$F = \text{DFG} \cdot [\text{Glycémie}]$

- pour une glycémie voisine de 1,8 g/l à 2 g/l, tout le glucose filtré est réabsorbé ($E'G = 0$ et la clairance est nulle).

- Au-dessus de 1,8 à 2 g/l, le glucose apparaît progressivement dans les urines :

$$E'_G = UV \gg \# 0.$$

$$E \gg F \gg R \gg$$

- Quand la glycémie dépasse 3 g/l, la courbe d'excrétion $E \gg$ devient parallèle à la courbe de filtration (FP). À partir de ce moment, TG est devenu constant. Le seuil est ainsi atteint : $Tm_G = FP - U.V \gg F \gg - E \gg$.

Le Tm_G est une constante qui se situe aux alentours de 300 à 375mg/mn. Ce seuil est atteint progressivement du fait de l'hétérogénéité néphronique.

b. Les acides aminés

Les acides aminés circulants filtrent librement, mais ils sont totalement réabsorbés selon des mécanismes actifs et à seuil. On connaît 7 types de transporteurs suivant les acides aminés ou les classes d'acides aminés. Ainsi, à l'état physiologique, n'y a pas d'aminocidurie.

Un déficit de réabsorption de la cystine entraîne l'apparition de calculs rénaux : on parle de lithiase cytinurique.

c. Les protéines

La très faible quantité de protéines filtrées (≈ 30 g/j) est réabsorbée par pinocytose puis dégradée en acides aminés.

d. Les phosphates

La plus grande fraction des phosphates filtrés sont réabsorbés le long du tube proximal. Cependant, il existe une réabsorption le long du tube contourné distal et de la portion terminale du néphron. Le transport des phosphates de la lumière tubulaire dans la cellule à travers la membrane est lié au gradient de Na^+ . Entre la lumière tubulaire et la cellule, il s'agit d'un cotransport de phosphate avec le Na^+ , analogue aux cotransports du glucose et des aminoacides (Tm phosphates).

e. Le calcium (Ca^{++})

Le calcium est un cation vital et l'un des principaux constituants de l'organisme (squelette). Dans le tube proximal, la pars recta, le segment cortical de la branche large de l'anse de Henlé et le tube distal, la concentration intracellulaire du Ca^{++} est probablement très faible et la cellule a une différence de potentiel négative à l'intérieur. L'entrée apicale du Ca^{++} dans la cellule pourrait donc être passive, alors que sa sortie basolatérale devrait être active. Le mécanisme de ce flux actif du Ca^{++} au niveau des membranes basolatérales pourrait être double, une pompe de type Calcium ATP ase dépendant de l'ATP et un contre-transport d'échange Na^+ / Ca^{++} .

En tant qu'organe excréteur, le rein participe fondamentalement à l'équilibre du bilan calcique. Environ 270 mm/j sont filtrée. De cette quantité, 0,5 à 3 % seulement apparaît dans l'urine et 98 % du Ca^{++} filtré est donc réabsorbé. La dynamique de cette réabsorption est étroitement liée à celle du Na^+ et 60 à 70 % de la charge filtrée est réabsorbée dans le TP.

f. Les déchets métaboliques

• L'acide urique

Sa production journalière importante résulte de la dégradation des bases puriques et des purines contenues dans l'alimentation (en particulier carnée).

L'élimination de l'acide urique est biliaire, mais surtout rénale. L'acide urique est filtré puis réabsorbé totalement (Tm élevé). Cette substance est également sécrétée ce qui assure l'excrétion urinaire de l'acide urique formé quotidiennement (10% de la charge filtrée).

Dans le sang, l'acide urique circule sous forme d'urate. Chez les sujets qui ont une hyperuricémie et des urines acides, l'acide urique peut précipiter et former des calculs, on parle de lithiase urique. Le traitement prévoit de donner une eau minérale riche en bicarbonates pour alcaliniser les urines.

• L'urée

Il s'agit du principal catabolite protéique. L'excrétion sous forme d'urée représente 90% de la perte azotée journalière. La formation uréique quotidienne dépend de :

- l'intensité du catabolisme protéique
- l'alimentation : apport protéique journalier

La réabsorption passive est secondaire au gradient de concentration créé par une autre réabsorption passive, celle de l'eau. Plus l'eau est réabsorbée, plus l'urée se concentre dans les urines. La réabsorption passive varie avec l'état d'hydratation. Quand le débit urinaire est assez faible (< 3 ml/min), cela veut dire que beaucoup d'eau a été réabsorbée, donc l'urée a été très concentrée et donc beaucoup réabsorbée. Sa clearance est basse, son excrétion fractionnelle est faible. Quand le débit urinaire augmente, l'urée se concentre moins et est donc moins réabsorbée. Sa clearance est plus élevée et atteint une valeur d'environ 75 ml/min ; son excrétion fractionnelle est d'environ 60%. Ces conditions offrent une clearance maximale de l'urée.

La diffusion est facilitée par des transporteurs membranaires en fonction du gradient.

La réabsorption tout le long du tube prend un caractère très important au niveau du canal collecteur des néphrons. Cette réabsorption participe à la réabsorption facultative de l'eau, aux mécanismes de concentration et dilution des urines.

g. Autres

L'acide Para AminoHippurique et certains antibiotiques tels que les pénicillines sont sécrétés par le rein.

La courbe de filtration est symétrique inverse de celle du glucose. Tout le PAH est sécrété quand la concentration est basse. Quand elle est haute, la sécrétion est plafonnée, c'est le Tm de sécrétion du PAH.

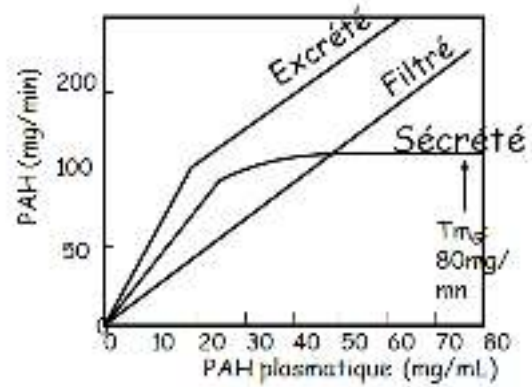


Figure. 11 Courbe de titration du PAH

En conclusion :

A la sortie du TP :

- Le liquide tubulaire est isotonique au plasma
- 60 à 70% de l'eau et des électrolytes sont réabsorbés
- Le pH est légèrement acide (6,9 – 7,2).
- Le liquide est dépourvu de glucose et d'acides aminés.
- Les déchets métaboliques sont partiellement réabsorbés

2.3 L'ANSE DE HENLÉ

Une réabsorption additionnelle de cations, d'anions et de molécules d'eau se produit dans l'anse de Henlé, les tubules contournés distaux et les tubules collecteurs.

L'anse de Henlé réabsorbe environ 40% de K^+ filtré, 25% du Na^+ et Cl^- filtrés. A ce niveau du néphron, l'eau filtrée par osmose n'est pas automatiquement associée à la réabsorption des solutés filtrés. Cette caractéristique permet à l'organisme de produire un volume élevé d'urine très diluée ou un petit volume d'urine très concentrée (Cf chapitre concentration des urines). Ainsi, la régulation de la quantité d'eau totale corporelle et celle de la pression osmotique des liquides organiques peuvent s'effectuer indépendamment l'une de l'autre.

La figure ci-dessous décrit le mécanisme principal de réabsorption dans ce fragment du néphron. Les cellules de la branche ascendante épaisse de l'anse de Henlé renferment des transporteurs qui récupèrent simultanément un ion Na^+ , un ion K^+ et deux ions Cl^- à partir du filtrat. Ce cotransport apical électro neutre dépendant de la pompe Na^+/K^+ basolatérale maintient une concentration faible en ions Na^+ dans le cytosol qui favorise les transports apicaux.

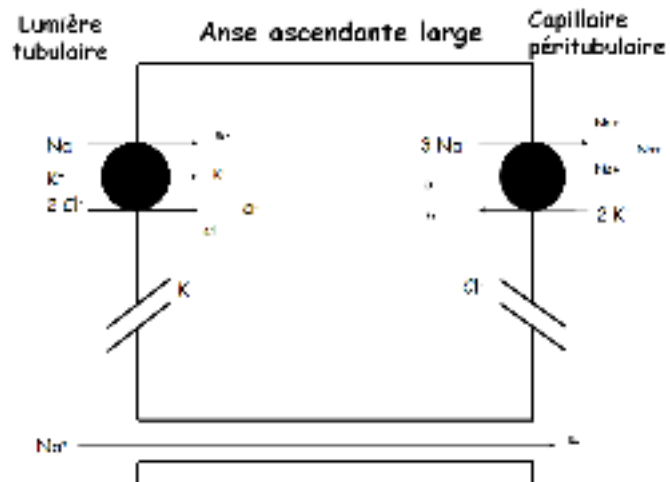


Figure 12. Cellule de la BAH

Par ailleurs, les canaux de fuite permettent de nouveau le recyclage des ions K^+ dans le filtrat et dans le liquide interstitiel. Ainsi, l'effet global de ce mécanisme est la réabsorption d'ions Na^+ et Cl^- . Une certaine quantité d'eau est réabsorbée dans la branche descendante de l'anse de Henlé grâce à un processus que nous décrirons un peu plus loin. Cependant, une quantité faible ou nulle d'eau est réabsorbée dans la branche ascendante de l'anse de Henlé, parce que les surfaces apicales de ces cellules sont presque imperméables à l'eau.

A la sortie de l'AH :

- le liquide tubulaire est hypotonique au plasma
- légèrement acide
- réabsorption de 10-15% de HCO_3^-
- réabsorption de 15 à 20% du $NaCl$ filtré

2.4 LA RÉABSORPTION DANS LE TD ET DANS LE TC

Le tube distal fait suite à la branche ascendante de l'anse de Henlé. Fonctionnellement, on le divise en deux parties : initiale et terminale.

1.1. TUBE DISTAL INITIAL

Cette partie partage de nombreuses propriétés avec la branche large ascendante de l'anse de Henlé. Elle est imperméable à l'eau et à l'urée (segment diluant du rein) et elle est le siège de réabsorption de la plupart des ions : sodium, potassium, chlore, calcium et magnésium. On retrouve :

- des échangeurs Na^+/H^+ pour l'acidification de l'urine
- des cotransports Na^+/Cl^- qui peuvent être inhibés par les thiazidiques (famille de diurétiques)
- une pompe à Ca^{++} sur la membrane baso-latérale. A son niveau il existe une régulation (modulation) du transfert de Ca^{++} par la **PTH**.
- un échangeur $\text{Ca}^{++}/\text{Na}^+$

1.2. LES SEGMENTS TERMINAUX

Ces segments sont constitués par la partie terminale du TCD et la partie initiale du TC. Ils permettent la réabsorption de 5 à 10% du Na^+ et de l'eau filtrés et sont responsables de l'ajustement final de la composition de l'urine.

A ce niveau, il existe les **cellules principales et intercalaires (Figure 13)** qui sont sous l'action de **l'ADH et de l'aldostérone**.

- La cellule principale est caractérisée par un canal sodique à amiloride qui permet la réabsorption du Na^+ et un canal potassique qui sécrète le K^+ . L'aldostérone stimule la réabsorption de Na^+ en augmentant le nombre et l'activité du canal sodique à amiloride et de la pompe Na^+/K^+ ATPase et elle va stimuler la sécrétion de K^+ par le gradient électrique créé. La réabsorption de l'eau est régulée par l'ADH.
- La cellule intercalaire A est caractérisée par une pompe H^+ ATPase qui sécrète H^+ et une pompe H^+/K^+ ATPase qui sécrète H^+ et réabsorbe K^+ ; la réabsorption de bicarbonate du côté basolatérale se fait grâce à un antiport $\text{HCO}_3^-/\text{Cl}^-$. L'aldostérone active la pompe H^+ ATPase
- La cellule intercalaire B est une image en miroir de la cellule A.

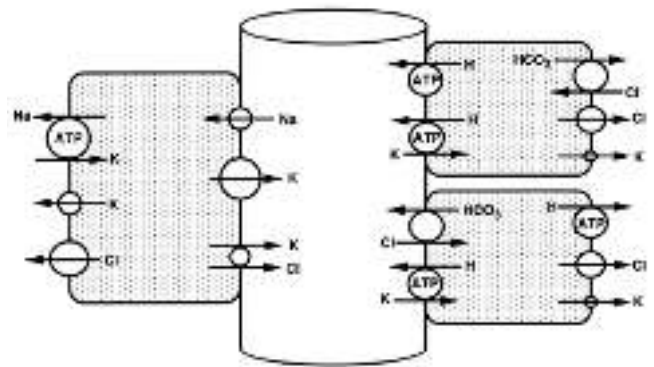


Figure 13. Les trois populations cellulaires : Principale, intercalaire A et B

Certains facteurs pouvant intervenir sur la sécrétion du K^+ :

Augmentée	Diminuée
<ul style="list-style-type: none"> • Alimentation riche en K^+ • Hyperaldostéronisme • Alcalose • Diurétiques thiazidiques • Diurétiques de l'anse • Anions luminaux • ↑ du débit urinaire, ↑ débit distal de Na^+ 	<ul style="list-style-type: none"> • Alimentation pauvre en K^+ • Hypoaldostéronisme • Acidose aiguë • Diurétique d'épargne du K^+

Au niveau du canal collecteur médullaire, le sodium continue à être réabsorbé, mais il n'y a plus de cellules principales et l'aldostérone continue à stimuler uniquement la sécrétion de H^+ (médullaire externe). L'ADH continue à augmenter la perméabilité à l'eau et augmente la perméabilité à l'urée au niveau de la médullaire interne. Cette réabsorption contribue à l'augmentation de l'osmolarité de l'interstitium médullaire et à la formation d'urine concentrée.

CONCENTRATION DES URINES

1. INTRODUCTION

La capacité des reins à produire une urine concentrée (hypsomotique) est un déterminant majeur des possibilités de survie en l'absence d'eau. Le rein humain peut produire une concentration urinaire maximale voisine de 1400 mosm/L. L'urée, les ions sulfates, phosphates et les autres produits de déchets métaboliques sont excrétés obligatoirement chaque jour à une osmolarité d'environ 600 mosm. Par conséquent, l'eau nécessaire à leur excrétion constitue une perte hydrique obligatoire égale à :

$$\frac{600 \text{ mosm} / 24 \text{ H}}{1400 \text{ mosm}} = 0,44/\text{jour}$$

Tant que les reins fonctionnent, l'excrétion de ce volume d'urine se produit, en dépit de l'absence d'ingestion d'eau.

La concentration des urines dépend :

- a. d'un processus physique : le mécanisme de contre-courant multiplicateur
- b. d'une action hormonale médiée par l'hormone antidiurétique (ADH)

La conjugaison de ces deux effets permet d'augmenter ou de diminuer la quantité d'eau réabsorbée au cours du trajet tubulaire en fonction des besoins hydrique.

2. CRÉATION DU GRADIENT OSMOTIQUE CORTICOPAPILLAIRE

La conformation de l'anse de Henlé permet de réaliser un mécanisme de contre-courant dans le rein. La présence d'une boucle formée par les branches rapprochées de l'anse, à l'intérieur desquelles le liquide circule en sens inverse, autorise les échanges de constituants entre les segments ascendant et descendant.

Ce mécanisme est expliqué sur la figure. 14 où le déplacement du fluide tubulaire et les mécanismes de transfert dans le temps sont dissociés artificiellement.

Initialement, au temps 0, l'urine s'écoule et l'osmolarité, de 300 mosm/l (A) en tout point de l'anse, est identique à celle du fluide tubulaire proximal et de l'interstitium. On immobilise ensuite la colonne d'urine. La branche ascendante, imperméable à l'eau est alors le siège d'un transfert actif de NaCl constituant à chaque niveau l'effet élémentaire qui aboutit à la création d'une différence transépithéliale de concentration (B).

La branche descendante étant largement perméable à l'eau, il s'y produit une soustraction nette d'eau, jusqu'à équilibration de l'osmolarité interstitielle. Une différence de concentration de 200 mosm est ainsi créée entre la lumière de la branche ascendante et (D) l'interstitium. Les mécanismes de transfert sont alors stoppés et on laisse l'urine s'écouler (C).

Lorsque l'on stoppe de nouveau la colonne urinaire et que l'on laisse l'effet élémentaire se produire une nouvelle différence de concentration entre lumière tubulaire et interstitium apparaît (D), etc.

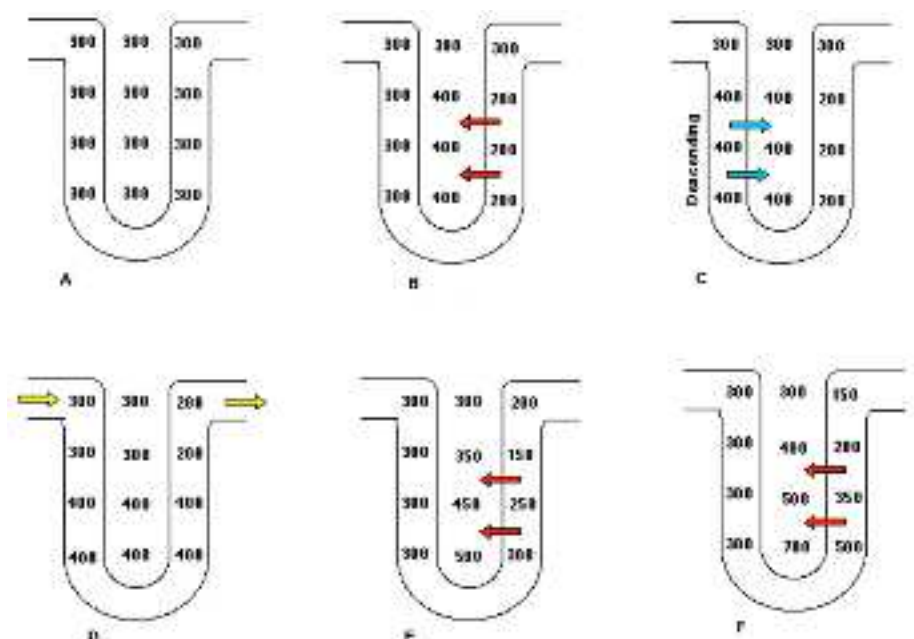


Figure 14. Concentration des urines (Modèle expérimental)

L'effet progressif de multiplication de concentration à contre-courant aboutit à la situation suivante :

- il se forme un gradient corticopapillaire osmotique progressif dans l'interstitium avec une branche descendante qui s'équilibre avec l'interstitium
- une dilution progressive de l'urine le long de la branche ascendante de l'anse de Henlé permet à cette urine de sortir hypo-osmotique par rapport au plasma

Ainsi, le moteur de la création du gradient corticopapillaire est l'effet élémentaire de réabsorption de NaCl dans la branche ascendante de l'anse de Henlé. Si cet effet est inhibé, le gradient corticopapillaire disparaît. L'importance du gradient corticopapillaire dépend aussi de la longueur de l'anse. Plus l'anse est longue, plus le gradient corticopapillaire est important.

3. MAINTIEN DU GRADIENT OSMOTIQUE CORTICO-PAPILLAIRE INTERSTITIEL

Si le milieu interstitiel était vascularisé par du plasma ayant une osmolarité à 300 mosm/L et un grand débit, le gradient osmotique corticopapillaire aussitôt constitué serait dissipé par drainage des solutés vers le sang.

Deux phénomènes majeurs permettent d'entretenir le gradient osmotique corticopapillaire :

- D'une part, le débit sanguin dans les vasa recta est faible, ne représentant que 1% du débit sanguin total
- D'autre part, et surtout les vasa recta cheminent parallèlement aux anses de Henlé, réalisant des anses vasculaires, ce qui permet un échange à contre-courant d'eau et de substances dissoutes. En effet, l'osmolarité du plasma sanguin venant du cortex (300 mosm/l) et circulant dans les vasa recta descendants s'équilibre progressivement avec l'osmolarité interstitielle plus élevée, les substances dissoutes diffusant dans le capillaire et l'eau le quittant.

Après la pointe de l'anse, lorsque le sang circule dans les vasa recta ascendants, des mouvements inverses s'observent avec entrée d'eau dans le capillaire et sortie de substances dissoutes. Tout se passe comme si l'eau court-circuitait les vasa recta, expliquant ainsi son faible renouvellement dans les parties profondes du rein, et le maintien d'une osmolarité élevée.

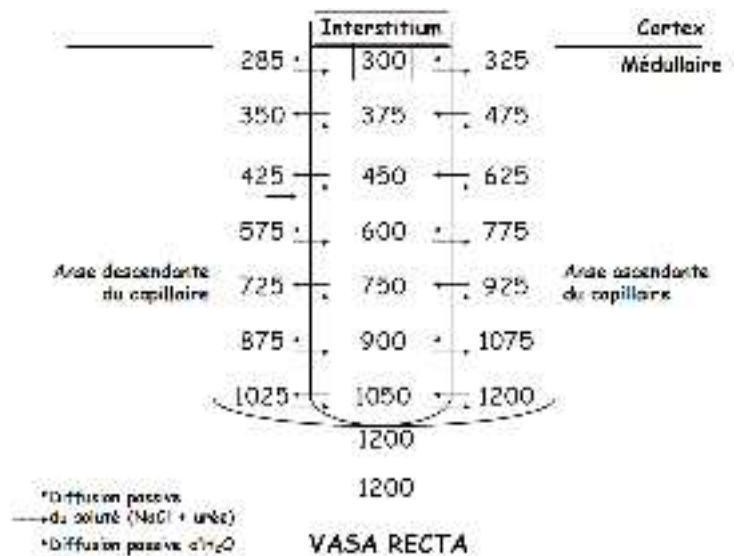


Figure 15. : Rôle des vasa recta dans le maintien du gradient corticopapillaire

Il faut noter que l'urine sortant hypotonique de la branche ascendante, le plasma sortant des vasa recta, après avoir drainé le NaCl réabsorbé est nécessairement hypertonique.

4. RÔLE DE L'ADH DANS LA CONCENTRATION DE L'URINE

La réabsorption de l'eau, toujours passive dépend de la perméabilité du tube distal et de celle du canal collecteur qui dépend elle-même de l'ADH.

- En présence d'ADH, ces segments sont perméables à l'eau, qui est réabsorbée en fonction des gradients de concentration. Dans le tube distal terminal, l'urine redevient isotonique au plasma. Dans le canal collecteur qui traverse la médulla hypertonique, l'urine se concentre.
- En absence d'ADH (diabète insipide, états de surcharge hydrique), le tube distal terminal et collecteur sont imperméables à l'eau. L'urine qui est diluée à la sortie de l'anse de Henlé, le reste jusqu'à la papille. Ces états correspondent donc à une diurèse abondante faite d'urines hypotoniques.

En augmentant la perméabilité à l'urée du canal collecteur dans sa partie terminale, l'ADH va permettre à une partie de l'urée concentrée en amont, de diffuser dans l'interstitium de la médulla interne participant ainsi à la création du gradient cortico-papillaire.

Une partie importante d'urée remontant de la profondeur sera « recyclée » dans la branche descendante des néphrons, très perméable à l'urée et sera ainsi ramenée à la médulla. Par ce processus, une concentration d'urée élevée est établie dans la médulla et dans l'urine.

L'effet de l'ADH sur les portions les plus distales du néphron est à l'origine d'une notion théorique, mais d'un grand intérêt pratique : « **la clairance de l'eau libre** » ou CH_2O (ml/min) c'est le débit d'eau qu'il faut ajouter ou soustraire des urines pour les rendre iso-osmotiques au plasma. Ainsi, le débit urinaire (V) : ml/min) est arbitrairement divisé en deux portions :

- l'une est la quantité d'eau nécessaire pour contenir les solutés de l'urine et former une solution isotonique au plasma : c'est la clairance osmolaire (C_{osm} : ml/min).

$$C_{osm} = \frac{U_{osm} \cdot V \text{ ml/min}}{P_{osm}}$$

$U_{osm} = \text{osm/ml}$

$P_{osm} = \text{osm/ml}$

- l'autre portion est la quantité d'eau qu'il faut ajouter ou retrancher à la clairance osmolaire pour avoir le volume urinaire final.

$$V = C_{osm} + CH_2O \quad CH_2O = V \left[\frac{1 - U_{osm}}{P_{osm}} \right]$$

CH_2O est positive quand l'urine est diluée (pas d'ADH) et négative en antidiurèse.

À l'état normal, la CH_2O est constamment négative, sauf pendant une charge hydrique.

- autres effets physiologiques

- Vasoconstriction
- Libération d'ACTH
- Inhibition de la sécrétion de rénine
- Stimule la synthèse de prostaglandines intra rénales
- Favorise la glycogénolyse hépatique.

CONCLUSION

La production d'urine dépend avant tout d'une perfusion sanguine du rein adéquate. L'unité fonctionnelle du rein, le néphron, est un filtre endothélial qui se déverse dans une tubule épithéliale. L'urine est formée d'un grand volume de filtrat exempt de protéines, dont la composition chimique est progressivement modifiée par l'activité sécrétoire et absorptive du tubule rénal. La filtration et la réabsorption s'équilibrent pour récupérer la presque totalité de l'eau et des électrolytes. Ces deux processus dépendent de l'hémodynamique au niveau capillaire.

L'épithélium tubulaire est divisé en segments dont les structures et les fonctions diffèrent. La fonction de chaque segment est influencée par celle des autres. Les segments proximaux du tubule récupèrent la presque totalité de l'ultra filtrat, mais il ne change pas beaucoup sa composition. À l'opposé, les segments distaux récupèrent peu d'ultra filtrat, mais ils modifient grandement sa composition. Par conséquent, la modulation de l'excrétion des électrolytes dans le tubule distal est grandement responsable de la régulation du fluide extracellulaire.

LA MICTION

Le liquide tubulaire arrive dans les calices du bassinets par les canaux collecteurs après avoir subi des modifications dans sa composition sur toute la longueur du néphron. Il s'écoule vers la vessie par l'intermédiaire des uretères. Périodiquement, le réservoir vésical se vide par l'urètre. Cette expulsion constitue la miction. Il s'agit d'un réflexe médullaire, placé sous contrôle cortical, comportant une partie volontaire.

1. RAPPEL ANATOMO-FONCTIONNEL

Les uretères sont de fins canaux symétriques étendus des bassinets jusqu'à la partie inférieure de la vessie. Ils sont constitués de fibres musculaires lisses (leur couche externe comporte un plexus nerveux intra mural et des capillaires). Ils reçoivent la double innervation sympathique et parasympathique.

De nombreuses fibres afférentes, capables de transmettre des stimulations nociceptives, sont à l'origine de fortes douleurs rencontrées lors des lithiases urétérales.

Cette structure est comparable à celle de l'intestin. Des ondes péristaltiques déclenchées par la distension des fibres lisses vont permettre la propulsion de l'urine. Elles débutent au niveau du bassinets, lorsque la pression augmente, se propagent le long de l'uretère et se terminent à l'embouchure de la vessie.

Le sphincter externe est innervé par les nerfs honteux internes issus des segments sacrés de la moelle. Ils appartiennent au système cérébro-spinal. C'est par leur intermédiaire qu'est assurée la motricité volontaire au cours de la miction.

Le corps de la vessie et le sphincter interne dépendent du système nerveux végétatif. La stimulation sympathique provoque le relâchement du détrusor et favorise la contraction du sphincter interne. Il permet le remplissage vésical et la rétention urinaire.

D'effet inverse, la stimulation parasympathique provoque la contraction du muscle vésical et le relâchement du sphincter interne. Le parasympathique agit sur l'évacuation de la vessie au cours de la miction.

2. RÉPLÉTION ET CONTENTION VÉSICALE

Le remplissage de la vessie se fait progressivement, sous l'influence des ondes péristaltiques qui parcourent les uretères. La pression intravésicale est pratiquement nulle lorsque la vessie est viciée. Dès qu'un faible volume liquidien y pénètre, la pression augmente puis reste constante grâce à un mécanisme d'adaptation. Le tonus de la paroi musculaire permet l'extension des fibres lisses limitant l'augmentation de la pression interne.

La plasticité ne peut dépasser un certain seuil. Lorsque le volume atteint 200 à 400 ml, la pression intravésicale s'élève provoquant l'apparition de contractions qui stimulent les tensorécepteurs.

Les influx afférents, déclenchés par la distension tissulaire, gagnent la moelle au niveau des segments sacrés et se projettent sur les centres cérébraux. La sensation devient consciente. Lorsque la volonté s'oppose au besoin, la mise en jeu des structures pontiques permet d'inhiber les influx parasympathiques responsables de l'augmentation de la contraction vésicale.

La pression diminue entraînant temporairement la disparition du réflexe mictionnel. Les influx corticaux descendants augmentent le tonus du sphincter externe empêchant tout écoulement. La miction peut être déclenchée par acte volontaire. Les centres supérieurs exercent un effet activateur sur le réflexe médullaire et inhibiteur sur la contraction du sphincter externe. L'élévation de la pression intravésicale entraîne l'ouverture du sphincter interne. L'évacuation du contenu de la vessie est ensuite auto-entretenu par les contractions de la paroi vésicale.

Chez le jeune enfant, les connexions neuronales s'établissent au fur et à mesure de la croissance. Tant que le contrôle du sphincter externe n'est pas acquis, la miction se fait uniquement par réflexe médullaire.

Au cours du stress émotionnel, la capacité d'adaptation des fibres vésicales diminue. Le besoin d'uriner devient très fréquent. Il apparaît dès qu'une faible quantité d'urine remplit la vessie (≈10 ml).

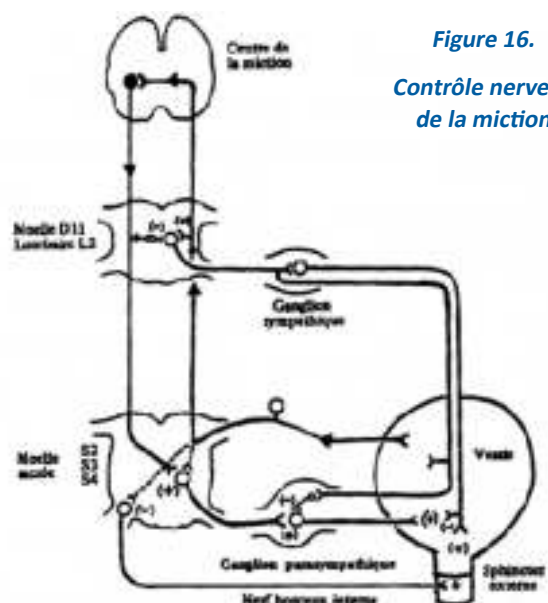


Figure 16.
Contrôle nerveux de la miction

Hypothèse de diagramme du fonctionnement réflexe de la vessie (DEGROAT)
(+) Effet d'excitation (-) Effet d'inhibition

RÉGULATION DE L'ÉQUILIBRE ACIDO-BASIQUE

Les objectifs éducationnels

Au terme de ce cours, l'étudiant pourra :

1. Définir le pH du sang
2. Indiquer l'origine des gains et des pertes d'ions H^+
3. Citer les mécanismes de contrôle de l'équilibre acido-basique
4. Expliquer l'intervention des systèmes régulateurs (poumon et rein) dans la régulation de l'équilibre acide/base
5. Décrire les troubles de l'équilibre acido-basique et leurs compensations.

PLAN

1. DÉFINITION DU pH

2. ORIGINE DES GAINS ET DES PERTES D'IONS H^+

3. LES MOYENS DE DÉFENSE DE L'ORGANISME

3.1. La première ligne de défense :
les systèmes tampons

3.2. Les systèmes régulateurs

3.3. Production adaptable des acides organiques
par le métabolisme

4. LES TROUBLES DE L'ÉQUILIBRE ACIDO-BASIQUE ET LEUR COMPENSATION

4.1. Acidose métabolique

4.2. Alcalose métabolique

4.3. Acidose respiratoire

4.4. Alcalose respiratoire

5. CONCLUSION

INTRODUCTION

Les réactions métaboliques sont très sensibles à la concentration des ions hydrogènes (H^+) dans le liquide où elles se produisent. Cette sensibilité est attribuable à l'influence que les ions H^+ exercent sur la fonction enzymatique en modifiant la conformation des protéines. C'est pourquoi la régulation de la concentration des ions H^+ est un des aspects les plus importants de l'homéostasie du milieu intérieur. Ainsi, cette concentration doit être maintenue dans des limites étroites (40 ± 5 nmoles/l d'ions H^+). Les limites compatibles avec la vie se situent classiquement entre 6,6 et $7,7 \pm 0,1$ unités pH soit 20-200 nM/l d'ions H^+ .

1. DÉFINITION DU PH :

Le pH est l'unité dans laquelle on exprime normalement la concentration des ions H^+ . Elle correspond au cologarithme de cette concentration.

$$pH = \log 1/H^+ = -\log [H^+]$$

La concentration de H^+ est exprimée en équivalent/L. Ainsi une concentration de H^+ de 10^{-7} correspond à un $pH = \log 10^7 = 7$

Avec ce système, toute augmentation de $[H^+]$ induit une baisse du pH et inversement.

Le pH normal du sang artériel est de $7,4 \pm 0,02$ et celui du sang veineux est d'environ de 7,35 du fait de l'acide carbonique qu'il contient provenant du CO_2 . Le pH intra cellulaire mesuré par des méthodes indirectes, se situe entre 6,00 et 7,40 suivant les cellules.

2. ORIGINE DES GAINS ET DES PERTES D'IONS H^+ :

2.1. LE MÉTABOLISME OXYDATIF :

Le métabolisme cellulaire oxydatif produit quotidiennement environ 12615000 mmoles/l de CO_2 qui devraient entraîner une formation d'acide carbonique (acide volatil) et donc une production d'ions H^+ correspondante.



Mais le poumon, par l'intermédiaire de la ventilation alvéolaire, élimine le CO_2 en quantité égale à celle produite et évite donc l'accumulation d'ions H^+ .



Le poumon maintient donc un bilan nul de CO_2 .

2.2. L'ALIMENTATION :

Les végétaux sont plutôt alcalins et les protéines plutôt acides. Le résultat sera donc fonction des habitudes alimentaires : surcharge alcaline pour les végétariens et acide pour les carnivores. L'alimentation apporte en moyenne 60 mM de H^+ /J. Cet apport provient surtout de la libération par le métabolisme des radicaux sulfates et phosphates fixés sur les protéines. Les protons H^+ produits par l'alimentation sont non volatils (fixés). Leur excrétion est assurée lentement par le rein, qui entretient à l'état physiologique un bilan nul de H^+ .

2.3. AUTRES AGRESSIONS ACIDO-BASIQUES :

Les agressions métaboliques et alimentaires se produisent de façon constante alors que certaines productions métaboliques peuvent avoir lieu occasionnellement.

- L'acide lactique : au cours du métabolisme des sucres, de l'acide lactique est normalement formé. Cet acide n'est pas libéré, car il est repris par le cycle de Krebs pour être dégradé en CO_2 et H_2O . Mais dans certains cas, par exemple un exercice musculaire intense, les cellules sont contraintes à travailler dans des conditions anaérobies. Une quantité importante d'acide lactique peut être alors rejetée dans la circulation. Même s'il s'agit habituellement d'un état transitoire, l'organisme va devoir se défendre activement contre cette « inondation brutale » d'acides forts.
- Les acides cétoniques qui forment une étape intermédiaire de la dégradation des acides gras sont normalement oxydés en CO_2 et H_2O . Mais en cas de déviation du métabolisme par exemple au cours du jeûne prolongé, ils peuvent être libérés dans la circulation, et se comporter alors comme des acides forts.

3. LES MOYENS DE DÉFENSE DE L'ORGANISME :

Pour maintenir le pH et les stocks d'acides et de bases constants, l'organisme dispose de plusieurs mécanismes :

- Les premiers sont passifs : ce sont les systèmes tampons. Une fois mis en place, ils ne nécessitent plus aucun apport d'énergie pour fonctionner. Ils se mettent en jeu instantanément à l'endroit même où l'agression a lieu. Ce sont des systèmes grossiers, incapables de régulation fine, mais ils ont l'avantage d'être immédiatement disponibles.
- Les autres sont actifs : ce sont les systèmes régulateurs, leur fonction est de maintenir constants les stocks d'acide et de base de l'organisme, en adaptant exactement les pertes aux apports. Ce sont des systèmes précis, mais nécessitent un minimum de temps pour intervenir, délai qui pourrait souvent être mortel en l'absence de tampons.

3.1. LA PREMIÈRE LIGNE DE DÉFENSE : LE SYSTÈME TAMPON

Un système tampon est un ensemble de substances capables de minimiser les variations de pH produites par une agression acido-basique donnée. Le pouvoir tampon d'un système est d'autant plus grand que pour la même agression la variation de pH est faible. La capacité du tampon dépend de la masse du système tampon et de son pK. Plus le pK est voisin du pH du sang, plus efficace est le tampon. Le pouvoir tampon est maximal lorsque le pH est égal au pK.

3.1.1. LES TAMPONS EXTRACELLULAIRES :

Il existe de nombreux systèmes tampons dans les liquides extracellulaires. Nous n'étudierons dans ce chapitre que le plus important d'entre eux : le système bicarbonate/acide carbonique. Vu l'importance de ce système, le pH sanguin lui est directement lié grâce à une équation appelée : équation d'HENDERSON-HASSELBACH.

$$\text{pH} = 6,1 + \log [\text{HCO}_3^-] / [\text{H}_2\text{CO}_3]$$

$$[\text{H}_2\text{CO}_3] = a \times \text{PaCO}_2$$

a = coefficient de solubilité du CO_2 = 0,03

PaCO_2 = pression artérielle de CO_2 = 40 mm Hg

$[\text{HCO}_3^-]$ = concentration de bicarbonates dans le sang artériel = 24mmoles/l

6,1 = pK du système bicarbonates / acide carbonique

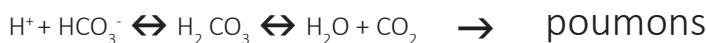
$$\rightarrow \text{pH} = 6,1 + \log 24 / 0,03 \times 40 = 6,1 + \log 20 = 6,1 + 1,3 = 7,4$$

Cette équation montre que :

- Une augmentation du taux de H^+ (c.-à-d. une \downarrow du pH) peut correspondre aussi bien à une augmentation de la quantité d'acide qu'à une diminution de la quantité de base, ici représentée par les bicarbonates.
- Le système bicarbonate est, du point de vue quantitatif, le système tampon le plus important du liquide extracellulaire, ses composants tampons (HCO_3^- et PaCO_2) reflètent instantanément toute perturbation acido-basique sanguine.
- Les trois variables de l'équation H/H sont faciles à mesurer ou bien on peut mesurer deux et calculer la troisième.
- La proportion simple de cette équation : $\text{pH} \approx \text{HCO}_3^- / \text{PaCO}_2$ peut être employée pour décrire les quatre troubles primaires de l'équilibre acido-basique. Le changement quantitatif, dans un sens ou un autre, des deux composants tampons est la clé qui permettra de comprendre les troubles acido-basiques.

Ce système pris isolément, peut sembler très mal adapté au milieu extérieur. Le pK du système est de 6,1 ce qui est assez éloigné du pH du plasma (7,4). Chimiquement parlant, le système n'est donc pas du tout dans des conditions d'efficacité optimale. A ce pH l'acide a fortement tendance à se dissocier, et la masse du tampon se trouve essentiellement sous forme basique. Un tel système ne peut plus avoir aucune efficacité vis-à-vis d'une surcharge alcaline puisqu'il a pratiquement épuisé son stock d'acide. Mais ceci ne paraît pas très désavantageux, car les agressions physiologiques sont presque toujours acides. Ce système gagne en puissance, car au lieu de fonctionner en système clos, il est ouvert sur l'extérieur par l'intermédiaire du CO_2 .

Exemple : l'addition de 10 mmoles d'HCl diminuerait de 10 mmoles la $[\text{HCO}_3^-]$ et augmenterait de 10 mmoles la concentration de CO_2 (le rapport $\text{HCO}_3^- / \text{CO}_2$ tendrait vers 1). Selon l'équation d'H-H le pH sanguin devrait passer de 7,4 à 6,1. Le caractère ouvert de ce système fait que le CO_2 formé en excès est éliminé par la ventilation alvéolaire, ce qui maintient la concentration du CO_2 à 1,2 mmoles. Dans ce cas, le pH sanguin diminue jusqu'à 7,10. A ce pH acide, les chémorécepteurs sont stimulés et induisent une hyperventilation alvéolaire qui diminue la concentration de CO_2 en dessous de 1,2 mmoles ce qui entraîne une réduction de H_2CO_3 et assure ainsi une meilleure compensation du pH.

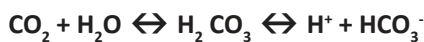


3.1.2. LES TAMPONS INTRA CELLULAIRES :

Ces systèmes intra cellulaires sont constitués dans les hématies par l'hémoglobine (Hb) et dans les autres cellules par les phosphates et les protéines. Dans les os, les systèmes tampons sont représentés par les cristaux d'hydroxyapatite (carbonate de Ca^{++}).

• Le tampon hémoglobine :

Le CO_2 produit par le métabolisme cellulaire existe dans le sang sous plusieurs formes qui aboutissent toutes à la libération de H^+ . Le CO_2 dissous est en équilibre avec l'acide carbonique :



La fixation du CO_2 sur les protéines (carbamination) aboutit à une structure acide qui libère des H^+ :



L'Hb est une protéine qui possède des propriétés allostériques et qui est capable de changer sa structure selon qu'elle est oxygénée ou non. L'oxygénation de l'hème va diminuer l'affinité de l'Hb pour le H^+ (HbO_2 = forme acide) et donc provoquer la libération d'un certain nombre de protons auparavant fixés sur l'Hb. A l'opposé, la désoxygénation de l'Hb augmente son affinité pour le H^+ (Hb = Forme base).

• Les tampons phosphates :

Ce système tampon phosphate $\text{H}_2\text{PO}_4^- / \text{HPO}_4^{--}$ fonctionne à un pK de 6,8 proche du pH 7,4 de l'organisme, ce qui permet au système de fonctionner au voisinage de son pouvoir tampon maximal. Néanmoins, malgré le fait que ce système fonctionne dans une partie favorable de la courbe de titrage, sa concentration dans le liquide extra cellulaire est seulement le 1/12 de celle du système bicarbonate. Par contre, le système phosphate est particulièrement important dans le liquide tubulaire du rein, et ceci pour deux raisons :

Premièrement, le phosphate devient en général très concentré tout au long des tubules, ce qui augmente le pouvoir tampon du système.

Deuxièmement, le liquide tubulaire est en général plus acide que le LEC, se rapprochant ainsi du pK du système. Le système tampon phosphate est également très important dans les liquides intra cellulaires parce que leur concentration y est beaucoup plus importante, et que le pH y en général plus proche du pK du système que ne l'est le pH extra cellulaire.

- **Les tampons protéines :**

Les protéines cellulaires avec les protéines plasmatiques constituent le système tampon le plus abondant de l'organisme. Le processus d'action de ce système est semblable à celui des $\text{HCO}_3^-/\text{H}_2\text{CO}_3$. Ces tampons sont puissants et efficaces, car ils opèrent à des pK proches du pH plasmatique.

- **Les tampons osseux :**

La mobilisation de ces tampons carbonate / bicarbonate est très lente, mais ce système est très efficace.

3.2. LES SYSTÈMES RÉGULATEURS :

3.2.1. LES POUMONS :

La régulation de la ventilation maintient une pression de CO_2 constante dans le sang artériel, quelle que soit la production métabolique. Ceci signifie que le poumon élimine exactement la quantité de CO_2 libérée par les tissus. Cette régulation est extrêmement rapide, puisque si l'on augmente brutalement l'apport du CO_2 au poumon, la réponse ventilatoire débute dès le premier cycle respiratoire, et met au maximum 2 à 3 min pour être parfaitement adaptée aux nouveaux besoins. L'élimination de l'acide est associée à la régénération du tampon.

Ainsi le poumon gère le stock d'acides faibles (volatils) et règle le dénominateur de l'équation d'H-H.

3.2.2. LES REINS :

Le rein a pour fonction de maintenir constants les stocks d'acide fort et de base de l'organisme ; (numérateur de l'équation H-H). Il élimine les acides en régénérant le tampon bicarbonate en cas d'agression acide, et élimine les bases en cas d'agression alcaline. Ceci aboutit à un pH urinaire très variable en fonction des besoins de l'organisme et des apports alimentaires. Les délais de mise en route de la régulation rénale sont beaucoup plus longs que pour le poumon. Elle nécessite une modification de l'activité de certains enzymes, et passe même par l'induction de la synthèse de ces enzymes. Face à une modification brutale de l'état acido-basique, la réponse rénale ne sera nette qu'au bout d'1 à 3 heures. Si la perturbation est importante, elle pourra même n'atteindre son maximum qu'en quelques jours.

- **Réabsorption tubulaire des HCO_3^- filtrés :**

24 mmoles/l de HCO_3^- se trouvent dans le filtre glomérulaire, il en découle que pour un débit de filtration glomérulaire de 180 l/j, 4320mmoles/j de HCO_3^- sont filtrés quotidiennement.

La réabsorption des HCO_3^- est quasi-totale. 99,9% des HCO_3^- sont réabsorbés en majorité dans le tube contourné proximal (90 %).

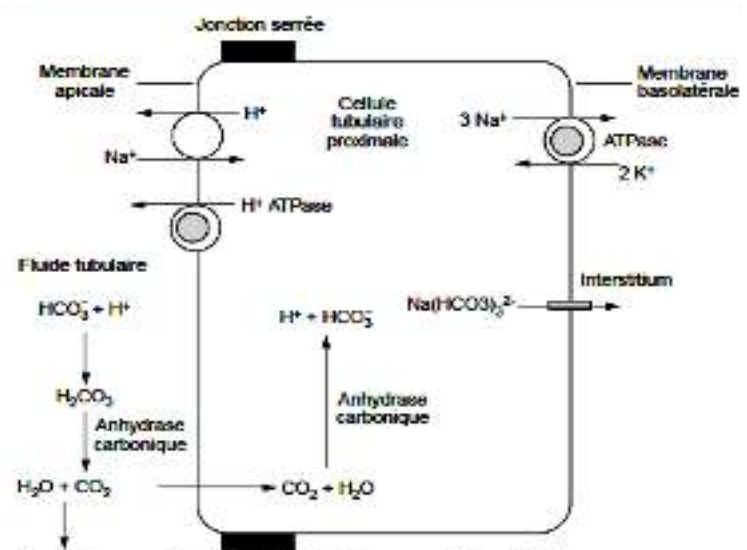
La réabsorption des HCO_3^- dans le TCP et la BAL se font selon le même mécanisme (Figure 17). L'énergie nécessaire à cette réabsorption grâce à l'activité de la pompe Na^+/K^+ ATPase basolatérale. La sortie de Na^+ de la cellule déplete le contenu cellulaire en Na^+ et favorise le fonctionnement de l'antiport Na/H apical (NHE). L'ion H^+ ainsi sécrété dans la lumière tubulaire s'associe aux HCO_3^- filtrés. Les H_2CO_3 ainsi formé se dissocient en CO_2 et H_2O . Cette réaction étant catalysée par l'anhydrase carbonique présent dans la bordure en brosse apicale (TP). Le CO_2 diffuse librement à l'intérieur de la cellule et par une réaction inverse conduit à la production intracellulaire d' H^+ et de HCO_3^- . L' HCO_3^- est alors réabsorbé par un co-transport électroneutre HCO_3Na (3HCO_3^- pour 1 Na^+).

La réabsorption de HCO_3^- dans le TCP est un phénomène saturable. Il existe donc un taux maximal de réabsorption d' HCO_3^- ou Tm.

Le Tm augmente dans les situations suivantes :

- Déshydratation extracellulaire : plusieurs mécanismes sont impliqués dont la stimulation de l'antiport Na^+/K^+ par les catécholamines et l'Ag II qui entraîne ce qu'on appelle l'alcalose de contraction.
- Hypokaliémie
- Hypercapnie ($\uparrow \text{PaCO}_2$)

Figure 17. Réabsorption des bicarbonates



- **Reconstitution des réserves de HCO_3^- et élimi-**

nation urinaire de H^+ :

Excrétion urinaire d'acidité titrable

La fonction d'acidité titrable se fait au niveau des cellules du tube proximal, distal et collecteur. Dans le plasma, les phosphates se trouvent sous deux formes : Na_2HPO_4 / NaH_2PO_4 .

Dans la lumière tubulaire, $NaHPO_4$ s'associe avec un H^+ pour former NaH_2PO_4 ($pK = 6,8$)

Il y a formation d'acidité titrable, ce qui permet :

- l'élimination d'un 1/3 des H^+ sans chute du pH
- la réabsorption de HCO_3^- néoformés par le rein

On mesure cette acidité, en titrant, c'est à dire en ramenant le pH de l'urine à 7,4.

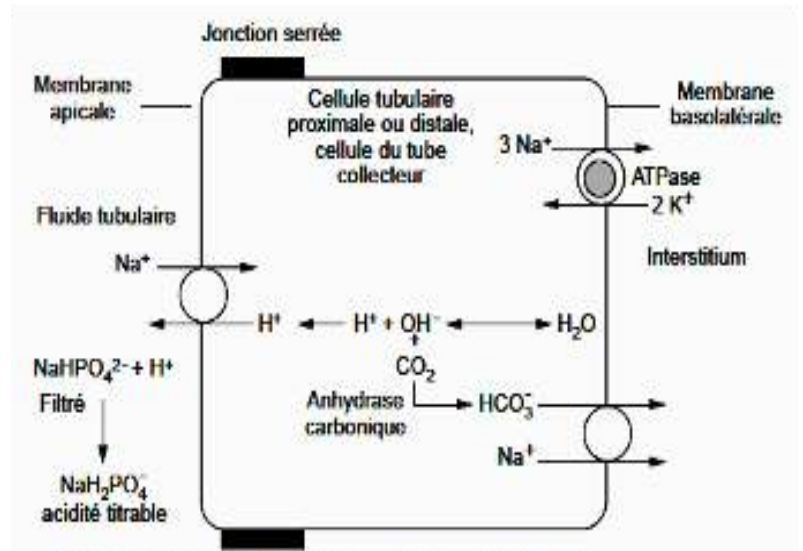
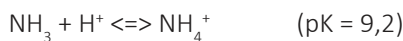


Figure 18. Excrétion urinaire d'acidité titrable

Excrétion urinaire de NH_4^+

Il y a synthèse de NH_3 (ammoniac) par les cellules rénales. À partir d'un précurseur (glutamine), il y a formation de NH_3 .



Le NH_3 est un gaz qui diffuse à travers la membrane cellulaire et se retrouve dans la lumière tubulaire, pour s'associer avec H^+ . Le NH_4^+ ne traverse pas les membranes et il est ainsi excrété. L'excrétion d'ions NH_4^+ permet :

- L'élimination urinaire des 2/3 des H^+ sans chute de pH
- La réabsorption de HCO_3^- néoformés
- Cette excrétion modulée par le pH peut être considérablement accrue, face à une limitation rapide de l'excrétion d'acidité titrable.

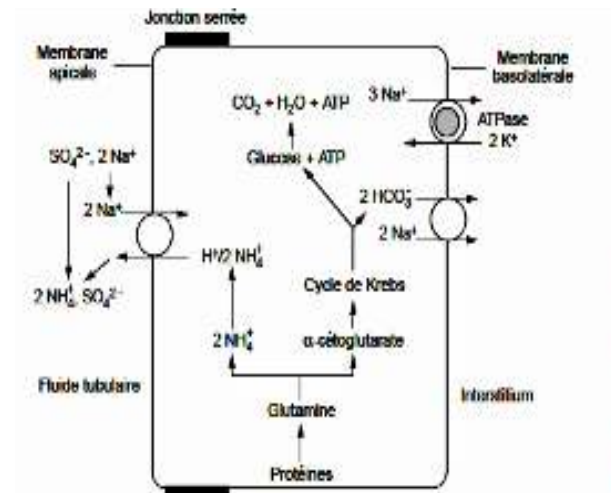


Figure 19. Excrétion urinaire d'ammonium

Excrétion d'ions H^+ libres

Elle est négligeable par rapport à l'excrétion d'acidité titrable et d'ions ammonium. Elle se fait au niveau des cellules intercalaires ou intermédiaires A du tube collecteur. Cette sécrétion détermine l'acidification terminale des urines jusqu'à un pH de 4,4 en dessous duquel ces pompes deviennent inactives. La pompe à protons apicale de cette cellule est stimulée par l'aldostérone et l'acidose.

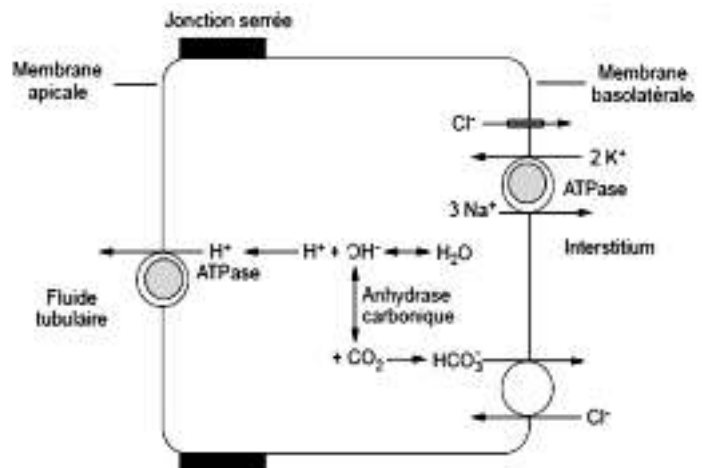


Figure 20. Cellule intercalaire A

En cas de surcharge alcaline, les cellules intercalaires B sont stimulées. Ces cellules sécrètent les ions bicarbonates et réabsorbent les H^+ .

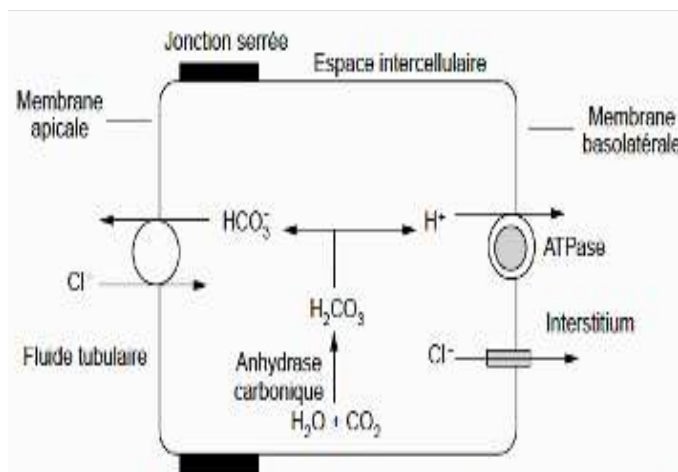


Figure 21. Cellule intercalaire B

3.3. PRODUCTION ADAPTABLE DES ACIDES ORGANIQUES PAR LE MÉTABOLISME

Normalement, le glucose et les lipides sont métabolisés en CO_2 et H_2O . Cependant, une petite quantité d'acides organiques est produite quotidiennement. Une diminution de la production quotidienne d'acides organiques ne peut jouer qu'un rôle mineur dans la correction d'une acidose étant donné que cette production est normalement modeste. Au contraire, une augmentation importante de la production d'acides organiques par rapport à leur consommation peut produire une quantité nette de H^+ susceptible de limiter les variations du pH lors d'une alcalose. Par exemple, dans l'alcalose respiratoire, l'augmentation de la production d'acides lactique et citrique rend compte de 30% environ du pouvoir tampon.

4. LES TROUBLES DE L'ÉQUILIBRE ACIDO-BASIQUE ET LEUR COMPENSATION

On les classe en acidose ou alcalose suivant qu'existe une tendance à la baisse (acidose) ou à la hausse (alcalose) du pH. Si le trouble initial porte sur le paramètre HCO_3^- de l'équation d'H-H, on parle d'acidose ou d'alcalose métabolique; inversement, si le trouble initial porte sur la PCO_2 , on parle d'acidose ou d'alcalose gazeuse.

4.1. ACIDOSE MÉTABOLIQUE :

Elle peut être provoquée par la production excessive de H^+ : (jeun, insuffisance rénale, acidocétose diabétique, etc.) ou la perte d'ions OH^- (fistule pancréatique, diarrhée...). Il en résulte une diminution de HCO_3^- , et une déviation de l'équilibre vers la gauche.



4.1.1. COMPENSATION RESPIRATOIRE

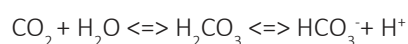
La baisse du pH secondaire à une diminution de $[HCO_3^-]$, va provoquer une hyperventilation par stimulation des chémorécepteurs. Il en découle une baisse de la $PaCO_2$, une baisse de H^+ et une élévation du pH.

4.1.2. CORRECTION RÉNALE

La baisse du pH induit une augmentation de la sécrétion rénale de H^+ et les urines deviennent plus acides. Il y a en plus réabsorption de tout HCO_3^- filtré et néoformation de bicarbonates, la $[HCO_3^-]$ va retourner lentement à la normale. Si la baisse de la $PaCO_2$ est insuffisante, ou si l'augmentation de la sécrétion rénale d'ions H^+ dépasse les possibilités respiratoires et urinaires, le pH reste bas : acidose décompensée.

4.2. ALCALOSE MÉTABOLIQUE :

Elle peut être provoquée par des vomissements acides (HCl gastrique), ou l'administration excessive de solutés basiques (bicarbonates, soude) qui augmentent le $[HCO_3^-]$ et donc le pH. L'équilibre est ainsi déplacé vers la droite :



4.2.1. COMPENSATION RESPIRATOIRE

La baisse $[H^+]$ ou l'augmentation de $[HCO_3^-]$ induit une alcalose qui inhibe la ventilation. Cette hypoventilation est à l'origine d'une augmentation de la $PaCO_2$ et donc $[H^+]$ « d'où tendance à abaisser le pH. Cette hypoventilation compense rarement de manière totale l'alcalose, car l'hypercapnie correctrice a des limites.

4.2.2. CORRECTION RÉNALE

La baisse de $[H^+]$ diminue la réabsorption de $[HCO_3^-]$. D'où élimination d'urine alcaline.

4.3. ACIDOSE RESPIRATOIRE :

L'acidose gazeuse peut être provoquée par une atteinte des centres respiratoires bulbaires qui réduit la ventilation, une obstruction des voies respiratoires, une pneumonie, une asphyxie, une intoxication, une paralysie respiratoire, une diminution de la surface d'échange pulmonaire ou tout autre facteur qui perturbe les échanges gazeux entre le sang et le gaz alvéolaire.

Cette hypoventilation est à l'origine d'une augmentation de la $PaCO_2$ (dénominateur de l'équation d'H-H) et la réaction est poussée vers la droite.



4.3.1. COMPENSATION RÉNALE

Elle se fait par une \uparrow de la sécrétion de H^+ et une \uparrow de la réabsorption de HCO_3^- . Par conséquent, $[HCO_3^-] \uparrow$ encore plus et le pH remonte. La correction totale exige la fin du trouble respiratoire.

4.4. ALCALOSE RESPIRATOIRE :

Elle est provoquée par l'hyperventilation (volontaire, hypoxie d'altitude, acidose métabolique...) et entraîne une baisse de la $PaCO_2$ avec déviation vers la gauche de la réaction :



4.4.1. COMPENSATION RÉNALE

Il y a une baisse de la sécrétion rénale de H^+ et une diminution de la réabsorption de HCO_3^- . Le pH retourne vers des valeurs normales si l'alcalose est totalement compensée.

CONCLUSION

Le maintien d'une valeur stable du pH sanguin chez le sujet normal, la limitation de variation de pH dans les situations pathologiques sont la conséquence de plusieurs mécanismes de contrôle du pH :

- l'existence de systèmes tampons extra, intracellulaires et osseux
- le contrôle respiratoire de la $PaCO_2$
- une production adaptable des acides organiques par le métabolisme intermédiaire
- le contrôle rénal du contenu de HCO_3^- de l'organisme et de la concentration plasmatique de HCO_3^-