

- Rappel anatomique et histologique
  - Physiologie de la vision
- Explorations fonctionnelles de la vision
- De la physiologie à l'anesthésie en ophtalmologie

## Physiologie oculaire

Danièle Denis\*, Pierre Wary\*\*, Pierre Lebranchu\*\*\*, Jacques Ripart\*\*\*\*, Philippe Cuvillon\*\*\*\*

\* Service d'ophtalmologie, CHU Nord, Marseille  
 \*\* Hôpital Saint-Joseph, Marseille  
 \*\*\* Service d'ophtalmologie, CHU, Nantes  
 \*\*\*\* Groupe hospitalier universitaire Caremeau, Nîmes

La fonction visuelle fait intervenir un organe récepteur, le globe oculaire qui transforme la lumière en signal électrique (rétine) que les voies visuelles (nerf optique, chiasma, bandelettes et corps genouillés) conduisent jusqu'au cortex visuel puis à d'autres structures corticales pour finalement aboutir à la perception (figure 1).

### Rappel anatomique et histologique

Le globe oculaire est irrégulièrement sphérique, de diamètre antéropostérieur de 23,5 millimètres (figure 2), son poids de 7 à 8 grammes. Il occupe le tiers antérieur de l'orbite, qu'il déborde un peu en avant. La paroi du globe oculaire est formée par trois structures (ou tuniques) de l'extérieur vers l'intérieur : une enveloppe semi-rigide, la sclérotique (tunique périphérique) avec la cornée en avant ; le tractus uvéal (tunique intermédiaire nourricière) ; la rétine (tunique profonde sensorielle). Le contenu oculaire comprend trois éléments ou milieux transparents : le cristallin, l'humeur aqueuse et le corps vitré. On individualise au globe oculaire deux segments topographiques de part et d'autre du cristallin : en avant, un segment antérieur comprenant la chambre antérieure (cornée, iris), l'angle iridocornéen, la chambre postérieure (entre l'iris et le cristallin) ; en arrière, un segment postérieur comprenant sclérotique, choroïde, vitré et rétine (figure 2).

### Trois structures

#### Sclérotique et cornée

- La **sclérotique**, nommée couramment « blanc de l'œil », est une coque membraneuse blanche, très résistante et inextensible, d'épaisseur de 1 mm. Elle reçoit les insertions tendineuses des muscles oculomoteurs et présente des orifices destinés au passage des vaisseaux et une ouverture postérieure pour le passage du nerf optique. La sclère se prolonge par la cornée (transparente) en avant.
- La **cornée** est arrondie, transparente, enchâssée en verre de montre dans la sclère. Sa surface antérieure est convexe, sa surface postérieure est concave, son épais-

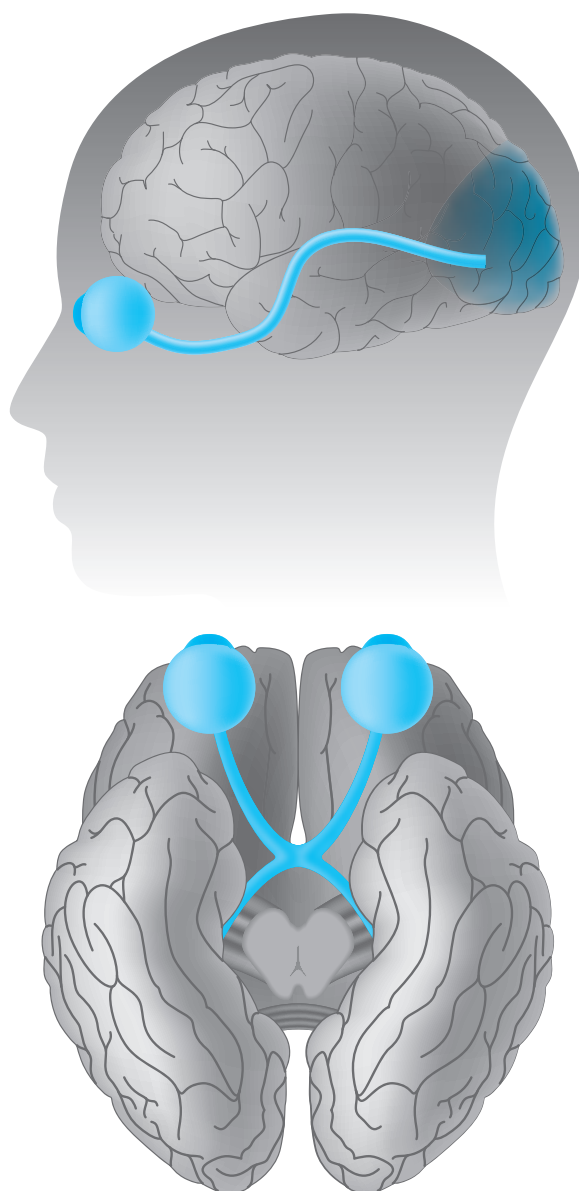


Figure 1 / Schéma du système visuel, du globe oculaire au cortex visuel

lares. Ces cellules présentent déjà une sélectivité neuronale, fonction des paramètres de la vision : sélectivité directionnelle (réponse au mouvement dans une direction, absence de réponse dans la direction opposée), sélectivité au contraste, aux couleurs... Il existe au moins 20 types différents, dont les axones s'étendent dans six régions cérébrales différentes.

- Les **cellules ganglionnaires naines** représentent 70 % de l'ensemble du groupe. Elles sont l'élément rétinien terminal d'un circuit contenant un faible nombre de neurones, la voie parvocellulaire : un cône est lié à deux cellules bipolaires naines (une « ON », une « OFF »), elles-mêmes liées à deux cellules ganglionnaires naines. Ces cellules (dites « P ») possèdent ainsi un petit champ dendritique. La voie parvocellulaire intervient dans l'acuité visuelle fine, l'analyse des formes et la sensibilité des couleurs.
- Les **cellules ganglionnaires parasols** (10 % de l'ensemble) possèdent au contraire un large champ dendritique, contenant jusqu'à 500 cellules bipolaires. Elles appartiennent à la voie magnocellulaire, spécialisée dans l'analyse du mouvement et de la luminance.

### Champ récepteur

Le champ récepteur est défini pour les cellules ganglionnaires comme la zone géographique rétinienne qui, lorsqu'elle est stimulée par un faisceau lumineux, provoque une modification du taux de décharge de la cellule.

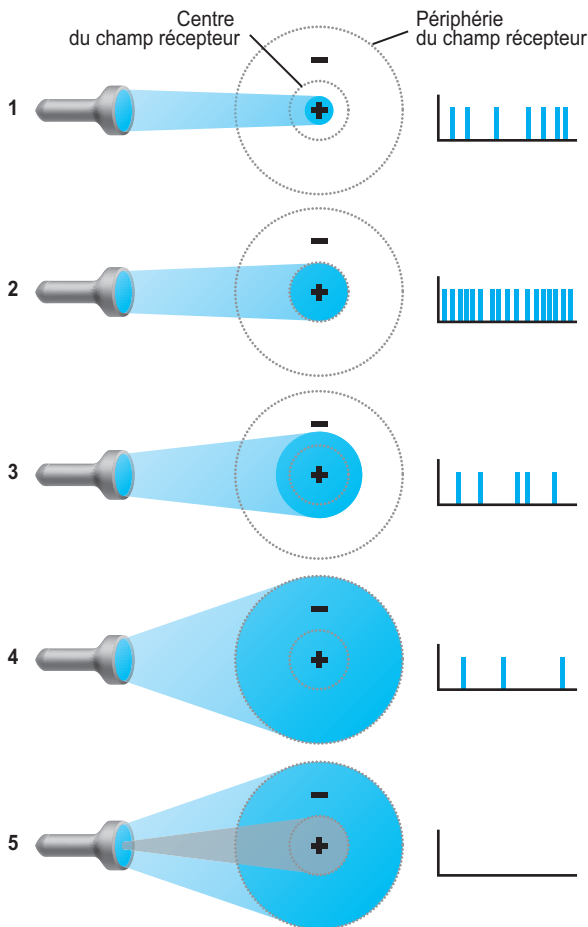


Figure 4 / Illustration de la réponse mesurée sur une cellule ganglionnaire en fonction de l'illumination de son centre ON ou de sa périphérie OFF

Les cellules ganglionnaires naines et parasols ont un champ récepteur constitué d'un centre entouré d'un pourtour. Prenons l'exemple d'une cellule ganglionnaire ON : quand un mince faisceau tombe au centre du champ récepteur, il provoque une augmentation du taux de décharge de la cellule ganglionnaire ; à mesure que ce faisceau s'élargit, il majore cette réponse ; puis, lorsque sa largeur dépasse la zone couverte par les photorécepteurs du centre, la réponse diminue ; enfin, si nous ne stimulons par un anneau lumineux que le pourtour du champ récepteur, la réponse ganglionnaire s'inverse en passant sous son niveau de base. Cette organisation permet de définir les cellules ganglionnaires à centre ON et celles à centre OFF (figure 4).

Dans tous les cas, la réponse à l'illumination du centre provient de la somme des contributions des photorécepteurs (reliés entre eux par les mêmes cellules bipolaires), alors que celle du pourtour provient de l'action antagoniste des cellules horizontales du même groupe de photorécepteurs (reliées entre elles par des *gaps junctions*) (figure 5).

### Pour résumer : du point lumineux à son image

En raison du facteur optique, l'image d'un point lumineux est un halo sur la rétine. Selon Rodieck, quand nous regardons l'étoile polaire pendant une fraction de seconde, 98 % des photons atteignent la rétine dans ses 4 mm centraux, 70 % dans les 50 µm centraux et 25 % sur les 20 cônes centraux. Les photons qui atteignent la rétine ne sont pas tous captés par les photorécepteurs. La probabilité d'absorption dépend de trois facteurs :

- la direction de l'impact (sensibilité directionnelle) ;
- la fréquence du photon ;
- la sensibilité du photopigment.

Les cônes fovéaux sont orientés vers le centre de la pupille : la probabilité de capture du photon est 20 % supérieure si celui-ci traverse la pupille en son centre plutôt qu'en son bord. Tous les cônes sont disposés sur la rétine dans la direction du centre optique (légèrement en arrière par rapport au centre de la pupille) améliorant la probabilité de capture des photons. Une fois capturés, seul 2 photons sur 3 entraînent une photo-isomérisation du chromophore. Selon l'état du cône, il faudra plusieurs absorptions de photons dans un court laps de temps pour émettre un signal visuel. Au contraire, les bâtonnets ne présentent pas de sensibilité directionnelle, et ils sont capables de signaler l'absorption d'un unique photon isolé. Les premiers photorécepteurs sont adaptés pour la vision diurne, et les seconds pour la vision nocturne, permettant d'utiliser le même capteur malgré une variation de l'intensité lumineuse d'un facteur d'environ 40 milliards entre le jour et la nuit.

L'isomérisation du pigment visuel par le photon entraîne une hyperpolarisation de la membrane du photorécepteur. Ce nouveau potentiel se propage à l'ensemble de la membrane, jusqu'à la synapse. Il existe à ce niveau un relargage permanent de glutamate dans la fente synaptique, dépendant du potentiel de membrane :

- une hyperpolarisation diminue le relargage ;
- une dépolarisation augmente le relargage.

Les cellules postsynaptiques (horizontales et bipolaires) sont sensibles aux variations de concentration de glutamate et modifient à leur tour leur potentiel de membrane pour transmettre l'information aux cellules ganglionnaires.

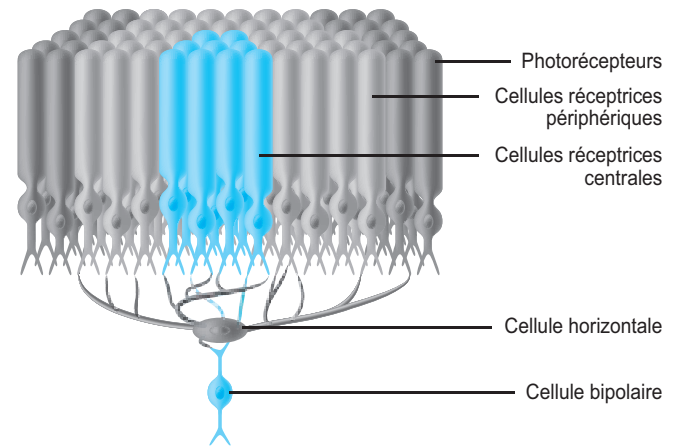
Une cellule bipolaire ON est activée lorsque la quantité de photons captés par le cône augmente. Elle active à son tour une cellule ganglionnaire ON.

Une cellule bipolaire OFF est activée lorsque cette quantité diminue. Elle transmet cette information à une cellule ganglionnaire OFF.

Les cellules ganglionnaires présentent des décharges permanentes de potentiel d'action. Les messages neuronaux sont codés en fonction des variations de fréquence de ces potentiels.

Le champ dendritique correspond à la zone rétinienne sur laquelle les dendrites d'une cellule ganglionnaire sont étendues. L'organisation rétinienne est agencée de telle façon que n'importe quel point de la rétine se situe à la fois dans un champ dendritique ON et dans un champ dendritique OFF : il peut être à la fois dans le centre de l'un et en périphérie de l'autre.

tion de liquide céphalorachidien jusqu'à la papille, ce qui explique le gonflement de la papille (œdème papillaire) lors de l'élévation anormale de la pression intracrânienne.



## Transmission vers le cerveau

### Voies optiques primaires

Les voies visuelles permettent la transmission de l'information visuelle depuis la rétine qui assure la phototransduction jusqu'au cortex occipital visuel primaire (aire V1) qui analyse le signal. La rétine encode, la voie visuelle transmet, et le cortex traite.

L'image est décomposée par la rétine en une succession de points, chacun possédant des coordonnées propres par rapport à la fovéa. Elle transite par un ensemble de canaux indépendants jusqu'au cortex visuel primaire, où elle est recomposée point à point selon une organisation rétinotopique, c'est-à-dire que deux points adjacents au niveau de la rétine sont codés par deux neurones adjacents dans le cortex visuel.

L'espace rétinien est centré sur la fovéa. Il est séparé en espaces supérieur et inférieur par un méridien horizontal traversant la fovéa, en raison de l'orientation des fibres ganglionnaires qui rejoignent le nerf optique. Il sera secondairement séparé (au niveau du chiasma) par un méridien vertical, distinguant les espaces temporal et nasal. Cette double segmentation aboutit au niveau du cortex à une représentation de l'espace rétinien en quadrants (supérieur ou inférieur, nasal ou temporal). L'ensemble de l'espace rétinien correspond à une zone perçue du champ visuel, sauf au niveau de la papille (émergence du nerf optique) : cette zone ne contient pas de photorécepteurs et forme une tâche aveugle (tache de Mariotte) dans le champ visuel. Il faut se rappeler que (figure 6) :

- les rétines supérieure et inférieure captent respectivement les parties inférieure et supérieure du champ visuel ;
- les rétines nasales et temporales captent respectivement les parties temporales et nasales du champ visuel.

### • Nerf optique

Le nerf optique est composé des axones des cellules ganglionnaires (environ 1 à 1,2 million d'axones) qui convergent pour former la papille, traversent la lame criblée (formée de fibres collagène et élastiques issues de la sclère), émergent à la face postérieure du globe oculaire. Il forme la deuxième paire crânienne qui commence par la papille optique, traverse l'orbite et le canal optique (dans l'os sphénoïde) et se termine à l'angle antérieur du chiasma. Il mesure 4 mm de diamètre et 5 cm de long. Il est entouré des gaines méningées permettant la circula-

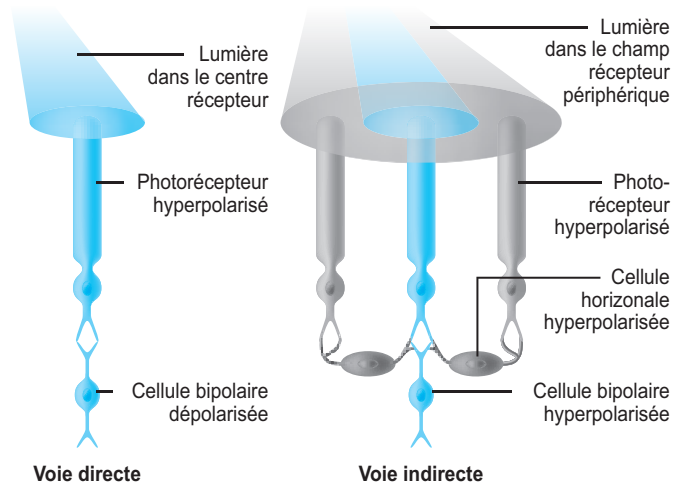


Figure 5 / Illustration de la contribution des cellules bipolaires et des cellules horizontales à la formation d'un centre ON et d'une périphérie OFF pour une cellule bipolaire

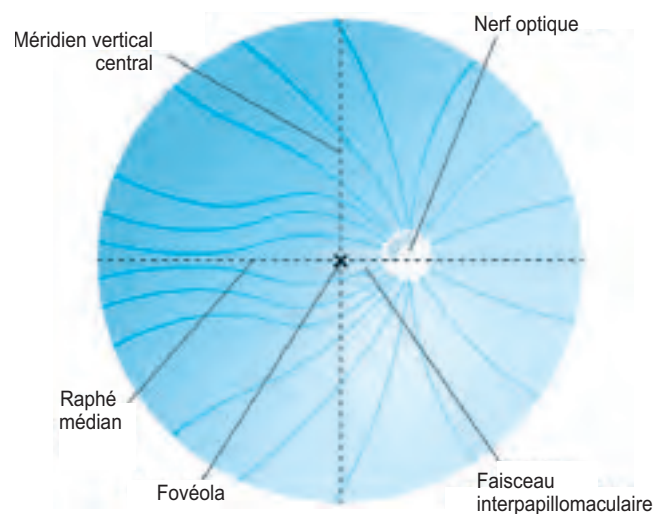


Figure 6 / Organisation de l'espace perçu en fonction de la topographie rétinienne (rétinotopie) (d'après le rapport de la SFO, 2013)

Pour le Pr Michel Imbert, « nos yeux sont un bien inestimable, pourtant ils ne sont qu'un outil, un prolongement de notre cerveau, lui seul est capable d'interpréter les signaux captés, codés par la rétine et transmis par un réseau de neurones et construire les images que nous percevons ».

## Explorations fonctionnelles de la vision

### Champ visuel

La partie de l'espace visuel que voit chaque œil constitue son champ visuel. En d'autres termes, le champ visuel est l'espace de vision perçu autour du point de fixation par un œil immobile (champ visuel monoculaire) et/ou par les deux yeux fixant droit devant (champ visuel binoculaire).

Le champ visuel normal s'étend jusqu'à une limite de 60° en haut et en dedans et jusqu'à 70° en bas et vers l'extérieur.

Au sein de ce champ visuel se retrouve une zone dépourvue de vision correspondant à la projection dans l'espace de la tête du nerf optique : tâche aveugle de Mariotte dont le patient n'a pas conscience.

L'exploration de ce champ de vision est utile en clinique : elle est réalisée soit grossièrement par confrontation, soit par des techniques d'exploration paraclinique qui relèvent des seuils de sensibilité :

- de manière cinétique avec un test de stimulation lumineux mobile déplacé de la périphérie vers le centre, du non vu vers le vu : c'est la périmétrie cinétique de Goldmann ;
- de manière statique en analysant un seuil de perception lumineuse de différents points disséminés dans l'ensemble du champ visuel explorés successivement selon différentes stratégies : c'est le champ visuel automatisé.

### Électrophysiologie

L'électrophysiologie visuelle regroupe différentes techniques paracliniques d'exploration sensorielle de la rétine ou des voies visuelles. Elles reposent sur un principe de recueil d'activité électrique par des électrodes dans des conditions de stimulation lumineuse de la rétine en flashes (ou damiers dans des conditions photopiques ou méso-piques).

Ces tests reflètent le fonctionnement visuel au niveau des cellules réceptrices cônes et bâtonnets, ainsi qu'au niveau des voies visuelles et corticales.

L'analyse de l'interface entre l'épithélium pigmentaire et les photorécepteurs est réalisée par l'électro-oculogramme (EOG). Cela consiste à mesurer l'évolution du potentiel de repos de la rétine selon les conditions d'éclairément et teste le fonctionnement de l'épithélium pigmentaire suite au changement de l'état d'adaptation lumineuse de la neurorétine.

L'analyse de l'interface entre les photorécepteurs et les cellules bipolaires est réalisée par l'électrorétinogramme (ERG). Il analyse l'activité électrique entre les couches externes photoréceptrices et les couches moyennes les cellules bipolaires en réponse à une stimulation flash (figure 9).

Et l'analyse de la conduction le long des voies visuelles est réalisée par les potentiels évoqués visuels (PEV). Cette technique consiste à enregistrer l'activité électrique au niveau du cortex visuel après stimulation maculaire rétinienne, étudiant à la fois le fonctionnement de la rétine centrale et les voies de conduction de l'influx visuel jusqu'au cortex.

## De la physiologie à l'anesthésie en ophtalmologie

La connaissance des principes fondamentaux de la physiologie oculaire (pression intra-oculaire, vascularisation de l'œil et réflexe oculo-cardiaque) est une aide précieuse à la compréhension et la prise en charge des patients opérés en ophtalmologie.

### Pression intra-oculaire

La pression intra-oculaire (PIO) se définit comme la pression régnant à l'intérieur du globe oculaire. Sa valeur physiologique est de  $16 \pm 5$  mmHg et se mesure au moyen d'un tonomètre. Une pression supérieure à 21 mmHg définit une hyperpression intra-oculaire. À l'état de base, la PIO est la résultante des pressions exercées par le contenu intra-oculaire sur les enveloppes du globe (principalement la sclère). Comme la structure du globe n'est pas extensible (forte élastance), les variations de la PIO dépendent essentiellement des variations de volume contenu dans le globe, à savoir : le volume aqueux, le volume du vitré et le volume sanguin contenu dans la choroïde. Ainsi, toute augmentation de l'un de ces volumes entraîne une élévation de la PIO. Le concept de PIO n'a de sens que lorsque la structure du globe est fermée. Lorsque le globe est ouvert (par ex., en cas de plaie), la PIO s'équilibre avec la pression atmosphérique. Ce nouvel équilibre peut aboutir à une expul-

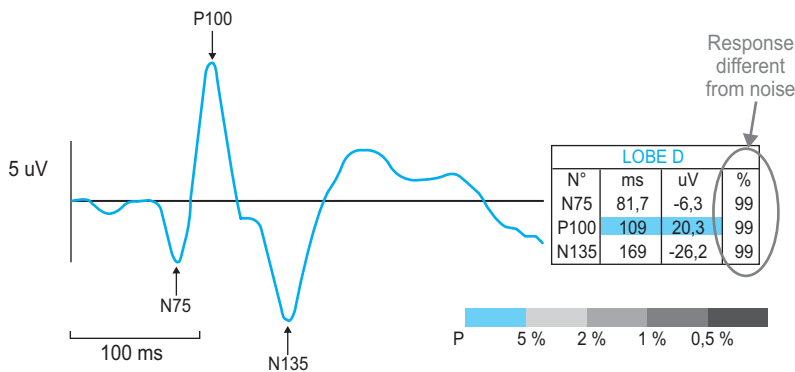


Figure 9 / Électrophysiologie oculaire : analyse de l'activité électrique rétinienne en réponse à une stimulation flash  
Temps de réaction des photorécepteurs et pics électriques (électrorétinogramme)

sion du contenu intra-oculaire du globe liée à un phénomène de dépression (expulsion de l'humeur aqueuse, iris, vitré, etc.). En pratique, cette situation peut se produire en cas de traumatisme oculaire, de chirurgie de la cornée ou de la cataracte par extraction manuelle ; à l'inverse, la phako-émulsification est considérée comme une technique à œil fermé.

À globe fermé, une élévation de la PIO (> 21 mmHg) a des retentissements sur la vascularisation intra-oculaire. L'élévation de la PIO s'oppose à la pression de perfusion artérielle et réduit ainsi le débit sanguin circulant de la choroïde (hypoperfusion de la rétine) et de la tête du nerf optique. Cette hypoperfusion peut aboutir progressivement à une cécité d'origine ischémique (par ex., glaucome à angle fermé dont la PIO s'élève lentement de façon chronique) ou à une cécité d'apparition plus brutale (par ex., en postopératoire, consécutive à une forte pression extérieure exercée sur le globe par appui chirurgical).

## Variations du volume intra-oculaire

### • Variation du volume d'humeur aqueuse

Il dépend de la balance production/élimination de l'humeur aqueuse qui est une solution d'eau salée (comme le plasma sanguin).

- **Production** : le corps ciliaire est la portion antérieure de la choroïde sur lequel est attaché le cristallin. Sur la face postérieure du corps ciliaire se trouvent les procès ciliaires qui sécrètent l'humeur aqueuse. L'humeur aqueuse est produite à partir du sang qui circule dans les capillaires du corps ciliaire. Ce sang est filtré pour obtenir du plasma qui se retrouve dans le stroma du corps ciliaire. Les cellules pigmentées et non pigmentées re filtrent ce plasma vers la chambre postérieure. Puis, l'humeur aqueuse circule de la chambre postérieure (entre l'iris et le cristallin) vers la chambre antérieure en passant par la pupille.
- **Élimination** : l'humeur aqueuse circule dans la chambre antérieure et est drainée au niveau de l'angle irido-cornéen par le trabéculum du canal de Schlemm. Le canal de Schlemm est une veine annulaire qui capte l'humeur aqueuse *via* le trabéculum. La fermeture de l'angle irido-cornéen réduit l'élimination de l'humeur aqueuse.

Les conséquences cliniques d'une élévation de ce volume aqueux sont :

- en *chronique* : le glaucome dit à angle ouvert, par anomalie entre production et élimination de l'humeur aqueuse (anomalie du trabéculum). Une élévation de la PIO sur angle ouvert est due à une dégénérescence du trabéculum qui n'assure plus correctement la réabsorption. Plusieurs thérapeutiques pharmacologiques sont disponibles pour contrecarrer ce processus d'apparition lente :
  - les myotiques (agoniste cholinergique ou bêta-adrénergique comme le timolol) qui préviennent l'obstruction de la pupille *via* la lentille en tractant le trabéculum et en le gardant « ouvert » ;
  - les inhibiteurs de l'anhydrase carbonique (tels que l'acétazolamide ou le dorzolamide) qui réduisent la production de l'humeur aqueuse ;
  - le latanoprost est un analogue de la prostaglandine F<sub>2α</sub> qui augmente la résorption par un double mécanisme : filtration *via* le trabéculum et augmentation de l'écoulement de l'humeur aqueuse par la voie uvéo-sclérale ;
- en *aigu* : le glaucome dit à angle fermé, par fermeture aiguë de l'angle irido-cornéen consécutive à une obstruction de la pupille par la lentille lors d'une mydriase. Dans ce cas, l'accumulation d'humeur aqueuse dans la chambre postérieure pousse l'iris antérieurement, fermant l'angle irido-cornéen, ce qui réduit la réabsorption par le

trabéculum. Ceci est noté dans certaines circonstances favorisant : hypermétropie, petite chambre antérieure, passage myosis-mydriase (injection d'atropine).

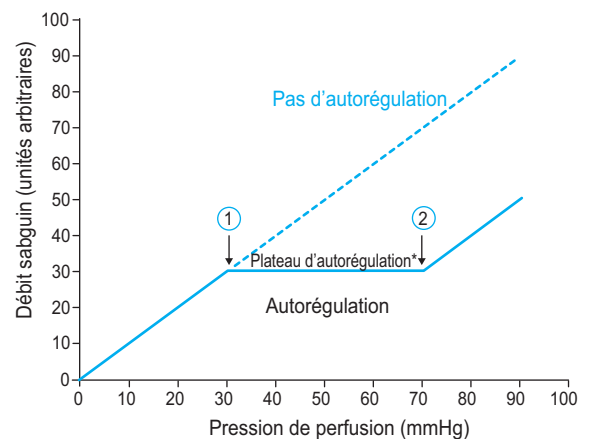
### • Volume sanguin de la choroïde

Organe richement vascularisé, le volume de la choroïde est sous la dépendance directe des variations du volume sanguin choroïdien (VSC). Plus le VSC est important, plus la PIO va s'élever et inversement.

La physiologie du débit sanguin choroïdien est similaire à celle du débit sanguin intracrânien avec une autorégulation, en fonction des besoins métaboliques locaux, qui limite les conséquences de variation de débit (figure 10). Ainsi, une élévation modérée de la pression artérielle systémique n'aura pas de conséquence sur la VSC (autorégulation) : PIO stable. À l'inverse, une forte poussée d'hyperpression artérielle engendrera une élévation du VSC et donc de la PIO (figure 10). Une variation du VSC a un impact immédiat sur la PIO qui peut altérer instantanément les conditions d'intervention pour le chirurgien. Comme pour le volume sanguin intracrânien, les principaux déterminants de la VSC sont :

- la pression veineuse centrale (PVC) : c'est le déterminant principal de l'élévation du VSC et de la PIO. On observe particulièrement une élévation de la PVC en cas de : excès de remplissage, posture en Trendelenburg, effort de toux ou de vomissement, manœuvre de Vasalva. À l'inverse, la position en proclive réduit la PVC et la PIO ;
- la pression artérielle en dioxyde de carbone (paCO<sub>2</sub>) et en oxygène (paO<sub>2</sub>) : l'hypoxie et l'hypercapnie favorisent par vasodilatation l'élévation du VSC (figure 11). Mais le rôle de variations de la paO<sub>2</sub> isolément est limité à une faible amplitude en conditions physiologiques, compatibles avec la vie. Toute élévation de paCO<sub>2</sub> provoque en revanche une augmentation linéaire de PIO.

La grande fragilité des tissus choroïdiens explique le risque d'hémorragie choroïdienne en cas de poussée d'hypertension artérielle (HTA) à globe ouvert. Lorsque le globe est fermé, cette hémorragie est contenue par la PIO. En cas de globe ouvert, la PIO ne peut contenir une hémor-



**Figure 10 / Variation du débit sanguin choroïdien (lui-même déterminant de la pression intra-oculaire) avec la pression artérielle (PA)** (d'après Schmidl *et al.*, 2011)

1. Seuil de PA en dessous duquel on n'observe pas d'autorégulation du débit sanguin choroïdien vis-à-vis de la PA.
2. Seuil supérieur de PA au-dessus duquel l'autorégulation est dépassée : une augmentation supplémentaire de PA entraîne une élévation du débit sanguin choroïdien, et donc une élévation de la pression intra-oculaire (PIO)

\* Une variation de PA n'entraîne pas de variation du volume sanguin choroïdien qui n'est régulé que par la demande métabolique rétinienne, et n'entraîne donc pas de variation de PIO.