

## **Du régulateur d'allure des années 1960 au pilote automatique (PA)**

### **Le PA et la navigation loyale**

Il se trouve que l'utilisation d'un PA est en contradiction avec une prescription sportive essentielle de la régata : la règle 52 des Règles de Course à la Voile (RCV) impose que « *le gréement dormant, courant, les espars, les appendices mobiles doivent être réglés et manœuvrés uniquement par la force de l'équipage* ».

Il est donc nécessaire pour les régates en solitaire (ou en double), que la règle 52 soit amendée afin que la manœuvre du safran et son amplitude puissent être réalisées en utilisant un autre type d'énergie que celle d'équipage et un système « technique » autre que le cerveau du skipper et/ou celui de l'équipage.

### **Le PA : Une technologie de plus en plus complexe**

Au début le PA est simplement constitué d'un compas « électronique » et d'une consigne mémorisée (le cap à suivre). Dès que le bateau s'éloigne de la consigne un vérin actionne le safran afin que la route revienne proche de la consigne. Ensuite au fil des années, apparaissent des équipements électroniques de plus en plus sophistiqués, miniaturisés et fiabilisés, comme les accéléromètres, les capteurs de vent, les gyromètres, les capteurs d'angles de barre, les GPS, etc. Tous ces matériels intègrent l'âme du PA, et permettent d'améliorer son logiciel et de fait la fonction pilotage.

### **Le PA à l'épreuve des régates océaniques et de la complexité de bateaux**

Pendant une épreuve océanique, le skipper barre très peu car il est de plus en plus accaparé par une somme de tâches importantes. Le PA est ainsi sollicité, pratiquement 24/24H, pendant environ 80 jours (pendant un Vendée-Globe) soit environ 2000 heures... Par comparaison une Route du Rhum en 1990, c'est 14 jours soit 336 heures.

Tant que les bateaux restent en mode archimédien (moyenne 10 à 15 nœuds, soit 5 à 7 m/s, avec des vitesses possibles de 20/25 nœuds), les PA assument leurs fonctions sans trop de problème. En réalité c'est plus la partie puissance, conjonction de systèmes électriques, mécaniques, hydrauliques, qui se révèlent souvent assez fragile. Le calculateur du pilote résiste mieux bien qu'il évolue dans un milieu très humide et avec des variations de température de -5°C à 40°C.

Les complexités techniques comme l'arrivée des quilles pendulaires vers les années 2000, et maintenant celles des foils a conduit les Classes à encadrer de manière très stricte les fonctions technologiques accordées aux contrôles et manœuvres des appendices, donc des PA.

Actuellement l'objectif des Classes est de limiter exclusivement l'action du PA à la commande de barre, comme à l'époque des conservateurs d'allures.

Par exemple, le règlement IMOCA actuel (2020) précise :

- Seuls la quille, les safrans, l'utilisation de ballasts peuvent être motorisés (vérins électriques, hydrauliques, pompes), c'est-à-dire avec une énergie autre que celle de l'équipage.
- Seule la quille peut être réglée et sa position contrôlée en utilisant sa propre ingénierie. La gestion de la position angulaire de la quille peut être équipée d'un système qui vérifie si la consigne d'angle a été atteinte.
- Seuls les safrans peuvent être pilotés en utilisant des systèmes d'asservissement (sous-entendu intégrés dans le PA). Ce qui revient à dire que le PA ne peut actionner que la rotation des safrans et à contrario que le PA ne peut pas gérer la position spatiale des foils, ni celle de la quille.

Au final le PA d'un IMOCA agit exclusivement sur la trajectoire (lacets) du bateau par l'intermédiaire des safrans et cela qu'il soit en mode archimédien (2D) ou en mode Vol (3D).

### **Passer du contrôle du bateau en mode archimédien à celui en mode Vol.**

Dès que le bateau s'élève au-dessus de l'eau, il entre dans un paradigme technologique totalement différent.

En régime archimédien, on peut barrer un bateau par une nuit noire complète, sans aucun instrument et même sans compas. Le barreur se sert de ses organes sensoriels pour conserver son cap par rapport au vent apparent.

Le barreur contrôle l'assiette transversale du bateau en jouant sur les écoutes et laisse le contrôle de l'assiette longitudinale (tangage et mouvement « d'ascenseur » résultants de l'amplitude des vagues) aux lois archimédiennes. La macro-géométrie de la surface de la mer représente, malgré les vagues, une plateforme horizontale immuable et cela même sans aucune visibilité.

En mode « Vol », il est par contre impossible de piloter manuellement par une nuit d'encre, si les instruments sont éteints (Black-out total).

Dans l'absolu, le barreur pourrait, comme en régime archimédien, conserver son cap par rapport au vent apparent, mais il est dans l'impossibilité totale de contrôler la 3<sup>ème</sup> dimension car il n'a aucun repère puisqu'il ne possède plus

d'horizon naturel (nuit noire). Conséquence, le barreur ne peut pas contrôler son assiette transversale (gîte), ni surtout, son assiette longitudinale (cabrer, piquer). Il termine ainsi rapidement sa trajectoire en percutant la surface de l'eau.

En supposant que le capteur d'altitude fonctionne encore, il fournit une donnée (ce n'est qu'un sondeur), exacte en termes de mesure, mais fautive verticalement. En effet cette mesure doit être corrigée par l'angle de gîte et le trim<sup>1</sup> : ce qui est impossible sans référence à un plan horizontal.

Les « PA basiques » ne fonctionnent donc pas pour gérer le domaine Vol, et cela même si tous les capteurs sont opérationnels, car ils n'ont aucune référence par rapport à un plan horizontal.

Conclusion : pour évoluer dans le domaine de vol, un « horizon artificiel » doit être incorporé au bateau et évidemment au PA.

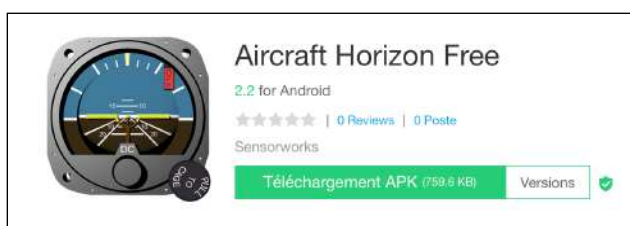
La réalisation d'un horizon artificiel passe par une Centrale inertielle installée dans le bateau, à laquelle le PA doit être connecté.

Sans Centrale inertielle, pas de contrôle du Vol possible.

Afin de barrer manuellement on peut, comme sur tous les avions, déporter dans le cockpit un répéteur de l'horizon artificiel généré par la Centrale Inertielle.



<https://apkpure.com/fr/aircraft-horizon-free-legacy-see-new-app-fdeck/com.sensorworks.aircraft-horizon-free>



Mais le Vol est un domaine sortant de l'ordinaire de la régates. Actuellement aucun bateau océanique vole en permanence. Tout au plus utilise-t-il ses foils, ou ses surfaces sustentatrices pour réaliser une sorte de « super-planing ». Toutefois les recherches sur les PA utilisés sur ces bateaux (IMOCA par exemple) déboucheront obligatoirement sur la conception des PA des bateaux plus basiques.

<sup>1</sup> Trim : angle d'inclinaison longitudinale du bateau

## **Un peu de sémantique sur le terme PA.**

Le pilote automatique remplace le barreur (le pilote sur un avion). Sur un voilier lorsque la règle 52 est amendée, on limite les actions du pilote automatique uniquement pour contrôler le safran (le lacet). Ce qui est très restrictif, mais suffit lorsque le voilier est archimédien.

Sur un avion, on parle d'AUTOPILOT. On commence d'ailleurs à voir ce terme apparaitre dans le langage des concepteurs de PA de voilier. Dans ce document je conserve le terme PA pour désigner le pilote automatique. Lorsque le PA est enclenché, c'est lui qui « prend la main ». Le skipper introduit une consigne, généralement le cap, règle les voiles pour ce cap en fonction du vent apparent et de l'état de la mer et enclenche le PA.

Par essence les PA ne sont que des systèmes électro ou hydro mécaniques commandés par un algorithme et l'électronique qui lui est dédié.

Afin de contrôler les réactions du PA (amplitude des angles de barre, fréquences des modifications d'angle), les concepteurs les équipent les PA de filtres électroniques gérés par le skipper. Ces filtres affinent le comportement du PA en adaptant « l'électronique » à l'environnement du moment.

Techniquement le PA de Voilier (ou de Foiler) contient :

- Des capteurs extérieurs qui décrivent l'environnement (vent, etc.)
- Une unité d'analyse et de commande qui, à partir de la consigne (le cap par exemple), calcule une information qui sera transmise à l'unité de puissance.
- Une unité de puissance qui actionne la barre. On parle d'actionneur, de vérin ou « actuator en anglais »
- (Facultativement) : un ou des capteurs d'état qui situent l'action en cours par rapport à la consigne.

Il faut préciser que le concepteur du PA n'est généralement pas le fabricant, ni le concepteur de l'unité de puissance, ni d'ailleurs des capteurs ou autres équipements de détection.

Le concepteur de PA gère et initie les parties « soft » et « intégration ».

Un PA peut être utilisé avec différentes unité de puissance.

Mais la base des performances d'un PA se situe dans :

- *La sensibilité de la détection de l'écart par rapport à la consigne à l'instant « t ».*  
Si je prends par exemple un capteur de direction de vent, est-ce qu'il détecte les écarts dès 0.1° ou tous les 2° ? De même pour les capteurs de vitesse du vent. Est-ce que ces capteurs sont calibrés en fonctions de perturbations extérieures (déformation du mât, perturbation dans l'écoulement, etc.) ?
- *La performance des algorithmes et la vitesse de transmission.*  
La vitesse de transmission est primordiale, puisque le PA doit corriger une anomalie qui vient de se produire à l'instant « t ». Plus le temps écoulé entre la détection de l'anomalie et sa correction est court, meilleure sera l'efficacité du PA. Sachant qu'au moment où la correction est effectivement réalisée, un autre désordre a pu se produire pendant le temps de traitement et d'exécution.
- *La qualité de l'information envoyée à l'unité de puissance.*
- *La sensibilité de la conversion mécanique entre l'information reçue et la capacité d'évolution du vérin de commande de la barre.*
- *La sensibilité du ou des capteurs de positions réelles de ou des éléments pilotés (par exemple : le capteur qui fournit la position angulaire du safran).*

Ces trois derniers items sont liés. Calculer et envoyer une consigne de 0.5° à une unité de puissance qui est prévue pour des variations de degré en degré ou avoir un capteur de position du safran qui ne pourrait pas détecter une angulation identique à la consigne qui a été envoyé au vérin, n'ont aucun intérêt.

### **Quand les choses se compliquent**

Aujourd'hui les pilotes des voiliers archimédiens utilisés en solitaire ou en double sont équipés de capteurs dits « intelligents ».

Ces capteurs intelligents regroupent pour chaque axe, des gyromètres qui fournissent la vitesse angulaire, des accéléromètres et des magnétomètres qui renseignent sur la variation du champ magnétique.

Ces données en flux continu alimentent un algorithme dont le travail est de les fusionner pour produire au final l'orientation du bateau sur l'eau par rapport au « Nord ». Les technologies embarquées dans ces PA sont en rapport avec les performances des bateaux archimédiens, relativement lents.

Il existe sur le marché des centaines de capteurs qui génèrent ces types d'informations. **On les rassemble sous le nom de Capteurs Inertiels.**

Le voilier, comme tout navire en général se situe dans l'espace par rapport à deux repères : l'horizon (gîte<sup>2</sup>) et le Nord magnétique (compas).

Ces deux axes de repérage sont indispensables.

Les mobiles (avions, fusées, sous-marin) se déplacent dans un espace sans repère visuel ou magnétique<sup>3</sup>, ce qui rend le contrôle de leurs trajectoires (en 3 dimensions) beaucoup plus complexe.

En navigation « normale », le compas, le safran, la quille, les lois archimédiennes suffisent pour contrôler les 4 degrés de liberté<sup>4</sup> que possède le bateau.

Lorsque le bateau se met à voler, il entre dans le domaine 3D et à ce moment évolue avec 6 degrés de liberté. Les équipements usuels de navigation ne suffisent plus. En d'autres mots, pour voler il faut pouvoir naviguer sur un plan horizontal situé au-dessus<sup>5</sup> de la surface de la mer et cela sans repère d'horizontalité.

L'invention, en 1852, du gyroscope (qui deviendra au fil des années et des technologies une **Centrale Inertielle**) assurera de manière automatique cette fonction.

Pendant près de 150 ans, la base de fonctionnement de gyroscope (centrale Inertielle) sera constituée par une mécanique très sophistiquée, lourde, volumineuse et énergivore. En fait un gyroscope « se résume » à un disque assez lourd que l'on fait tourner à 25 ou 30000 tr/mn, ce disque étant en équilibre sur les 3 axes X, Y, Z. L'électronique moderne, la fibre optique, les lasers vont révolutionner la technologie des gyroscopes et conduire à l'abandon des systèmes mécaniques et à la naissance d'une variante technologique le « capteur inertielle ».

Depuis une quarantaine d'années différentes technologies naissent. Elles ont permis de miniaturiser les systèmes. On trouve des « gyroscopes » dans les voitures, les Smartphones etc...

Mais cette miniaturisation s'est faite aussi au détriment des performances, à tel point qu'il existe une hiérarchisation des types de « gyroscopes » : Capteurs Inertiels ou Centrales Inertielles.

### **Capteurs inertiels... Centrales inertielles...**

Dans le principe général, leurs objectifs sont identiques : se situer dans l'espace 3D par rapport à un repère de référence. Ce sont leurs équipements

---

<sup>2</sup> On peut aussi identifier la gîte avec un pendule.

<sup>3</sup> Les avions utilisent le compas, mais sont très sensibles aux anomalies magnétiques

<sup>4</sup> En 2D, un mobile possède 2 translations sur OX et OY et 2 rotations autour de OX et OY

<sup>5</sup> Sous la surface de la mer, pour un sous-marin.

technologiques internes, essentiellement les gyromètres et les gyroscopes, qui différencient les Capteurs Inertiels et les Centrales Inertielle.

Le gyromètre fournit la vitesse angulaire par rapport à au référentiel inertielle de l'instant « t ». Le gyromètre est donc un capteur de vitesse angulaire. Il équipe les capteurs inertiels.

Le gyroscope donne la position angulaire (en 3D) de son propre référentiel à l'instant « t » par rapport à son référentiel initial qui est immuable. Une centrale inertielle doit donc être équipée d'un gyroscope car elle travaille en permanence par rapport à sa position de base 3D.

Le premier (gyromètre) fournit une vitesse, le deuxième (gyroscope) une position<sup>6</sup>. C'est mathématiquement différent, puisque la vitesse est la dérivée de la position (en fait la distance parcourue) et à l'inverse la position correspond à l'intégration de la vitesse.

Le problème est que les opérations mathématiques internes, à l'algorithme de traitement, sont très différentes en fonction de la Vitesse angulaire ou de la Position angulaire.

Et mathématiquement, les performances (résultats) sont supérieures si on travaille à partir de la position fournie par un gyroscope qui est la base technique d'une Centrale Inertielle.

Le capteur inertielle restera limité à la navigation archimédienne.

L'évolution ne se situe donc pas que dans le nom éponyme, mais dans la qualité technique des informations produites.

Les contraintes de pilotage en Vol, imposent aujourd'hui que le PA utilise une Centrale Inertielle afin d'obtenir une trajectoire constamment à quelques dizaines de cm de l'eau et à des vitesses pouvant atteindre 15m/s.

### **Quelles solutions pour le PA ?**

En configuration de Vol, l'élément variable est l'instabilité de la vitesse du bateau car elle est liée au vent réel en force et/ou en direction. Lorsque le bateau, PA enclenché, est stable en vol, c'est-à-dire que les équilibres sont corrects, que l'altitude et la vitesse de vol générée par la portance sont optimales et que le cap est conforme à la consigne, tous les paramètres sont « verts ».

---

<sup>6</sup> La vitesse est l'expression d'une distance parcourue par une unité de temps. La position c'est 3 coordonnées (x, y, z) qui permettent de calculer la distance parcourue depuis le dernier point réalisé. Entre ces deux points la vitesse peut être variable.

Si à un moment donné, la vitesse du vent réel diminue ou augmente, le vol devient instable car la puissance du moteur s'en voit modifiée.

La traduction immédiate est une chute ou une augmentation de portance, puisque cette dernière dépend de la vitesse du bateau (au carré).

Mais simultanément cela affecte aussi l'assiette longitudinale du bateau. Avec moins de puissance, le bateau s'appuie plus sur l'arrière, la trainée augmente, à l'inverse avec plus de puissance, l'arrière du bateau se soulage et l'efficacité du safran en pâtit.

Tous ces désordres momentanés sont identifiés en temps réel par les capteurs et quantifiés par rapport à la référence horizontale fournie par la Centrale inertielle. De la précision de ces informations, essentiellement liées à la sensibilité de la Centrale inertielle (CI) et des capteurs, dépend le résultat de l'information produite par les algorithmes du PA et transmis au vérin de commande de la barre.

Lorsque la sensibilité de la CI est grande, le PA est hyper réactif, le safran agit très vite avec un angle de barre très faible (correction de la vitesse quasi immédiate ce qui engendre moins de trainée).

On conçoit qu'un PA qui aurait accès à tous les appendices du bateau, en plus du safran, et modifierait simultanément un ou plusieurs réglages du foil et/ou de la quille et/ou de la barre serait l'outil parfait pour conserver en permanence les conditions de vol.

Les règles actuelles n'autorisent pas cette configuration, par contre la technique en serait capable.

### **Comment un PA « universel » devient « MyPA »**

Sur le schéma général du PA décrit précédemment, les concepteurs greffent et proposent une possible corrélation du PA avec la réalité physique propre à chaque bateau. La conception générale du PA est évidemment adaptée aux types de bateau, même si l'architecture des algorithmes des PA de deux bateaux de 10 et 12m est très proche, la partie puissance sera obligatoirement différente.

Ensuite, toutes les carènes ne possèdent pas les mêmes caractéristiques : cela va de la largeur maximale, des formes avant, de la largeur du tableau arrière, du déplacement et d'autres paramètres comme les moments d'inertie sur chacun des 3 axes x, y, z, la vitesse de début de survitesse, de la position du CG (centre de gravité) par rapport au tableau arrière (ce qui définit le centrage arrière, donc les limites du bateau en survitesse), etc...



Ces données sont fournies par l'architecte du bateau, afin que le constructeur personnalise le PA. S'ajoutent ensuite les campagnes « d'essais » réalisées par l'équipe « mer » du bateau. Ces campagnes servent, dans un premier temps à écrire les polaires réelles du bateau, à valider les performances du PA et surtout permettent d'affiner le paramétrage du PA avec le bateau.

A partir de ce PA en osmose avec le bateau, les concepteurs proposent des « surcouches algorithmiques » qui permettent, au skipper, une fois le PA enclenché, d'adapter finement les informations générées aux conditions du moment qui peuvent être légèrement différentes de celles, théoriques, prévues dans les algorithmes.

Ces surcouches porteront sur principalement la réactivité entre la détection et l'action sur la barre. Aussi un filtrage du vent est souvent proposé : cela se traduit par un écrêtage de l'instabilité angulaire du vent. En d'autres mots, on peut régler le PA afin de ne pas répondre instantanément à un shift du vent. Cela revient à moduler l'amplitude des lacets résultants des variations d'angles du vent réel. Ensuite il y a les surcouches plus techniques comme celles qui superposent la consigne de base (le cap) avec les polaires réelles de vitesse propre au bateau. C'est évidemment un algorithme qui gère cette optimisation. Le skipper a ainsi la possibilité de jouer sur l'influence qu'il souhaite donner aux critères cap ou polaires. En fonction des desiderata de chacun d'autres surcouches personnalisées peuvent être imaginées.

### **Où l'intelligence artificielle intervient dans les PA.**

Le fait que le PA ne puisse produire qu'une information, l'angle de barre (Règle 52 amendée) pour la conduite du bateau, diminue ses capacités à piloter et à faire face de la manière la plus adéquate aux évolutions de l'environnement immédiat.

Ces informations peuvent être traduites et visibles sur des cadrans d'affichage, un écran d'ordinateur, une tablette, mais le nombre de données potentiellement affichables est si important qu'il n'est pas exploitable et corrélable visuellement par le skipper.

Il devient nécessaire d'associer ce flot de données (des milliers) à un ou plusieurs algorithmes de traitements capables de simuler l'intelligence : c'est-à-dire enregistrer (ce qui revient à mémoriser, à apprendre) les événements qui se produisent à l'instant « t », ce que le PA corrige, mais aussi les aléas et conditions qui suivent à l'instant « t+1, t+2, t+3 ». L'intelligence artificielle (IA) entre alors dans le PA.

En IA on parle souvent de fonction heuristique. Une fonction heuristique est un outil mathématique qui classe les évènements perçus à l'instant « t » (par exemple l'état de la mer, le vent, etc.) et qui par un algorithme de comparaison (successions logiques de « oui/non ») avec des configurations antérieurement acquises en naviguant, propose une solution pour ce qui va se passer « t+1 ».

Pour simplifier on pourrait dire : *« voilà 3 vagues successives que je viens de subir et dont je viens d'analyser les caractéristiques. En associant ces 3 vagues aux apprentissages et historiques antérieurement acquis, je peux présager des évolutions possibles des vagues à venir (sous-entendu la 4<sup>ème</sup> et la 5<sup>ème</sup> vague), et régler le PA et les appendices pour faire face à cette prédiction ».*

Avec cette méthode le PA anticipe rapidement les actions éventuelles sur la barre afin d'avoir sous contrôle l'environnement que le bateau va rencontrer. L'intelligence artificielle devient un possible recours pour trouver une solution approximative au problème lorsque les méthodes d'analyses prévisionnelles ou de détection en temps réel s'avèrent impossibles à mettre en œuvre<sup>7</sup>.

On troque alors l'optimalité, l'exhaustivité, l'exactitude ou même la précision de ce qu'on devrait faire dans un mode idéal contre la vitesse de décision de la correction à anticiper et appliquer à la barre.

Au final la solution produite et implémentée sur le PA apparaîtra comme suffisamment bonne pour résoudre le problème en question : piloter le voilier d'une manière optimale. Pour autant elle ne sera pas la meilleure de toutes les solutions. On peut simplement espérer qu'elle se rapproche le plus possible de la solution exacte et reste viable car elle est très réactive.

L'autre avantage est que les analyses et les solutions proposées s'étendent en continu dans le temps et surtout qu'elles enrichissent le mode « apprentissage » de l'algorithme d'intelligence artificielle.

Reste qu'un PA capable de piloter dans ces conditions, dépend d'éléments techniques (capteurs, centrale inertielle, unité de puissance, capteurs de positions, algorithmes) qui doivent être de haut niveau technologiques et surtout homogènes entre eux dans leurs caractéristiques.

### **Le PA, indispensable et obligatoire**

Le PA est bien évidemment indispensable sur les bateaux conduits en solitaire. Ce ne sont pas les efforts qu'il faut exercer sur la barre qui posent problèmes,

---

<sup>7</sup> Lorsque le bateau vole à 15m/s, il est très difficile de détecter et d'éviter les « nids de poules » et autres obstacles qui se trouvent devant l'étrave et surtout devant les surfaces sustentatrices.

on pourrait utiliser des commandes compensées, mais la perception de l'évolution de l'environnement à l'instant « t » et les décisions à prendre. Le skipper doit intégrer trop de paramètres plus ou moins répétitifs pendant un temps très long : ce qui rend leurs corrélations impossibles comme d'ailleurs les actions à déclencher<sup>8</sup>.

Lorsque le PA est enclenché, le skipper peut après un moment de surveillance et d'adaptation, laisser le PA prendre intégralement la main.

Cela représente l'utilisation de base d'un PA. Mais il peut aussi enclencher le PA et « barrer » avec une télécommande qui agit sur les paramètres des surcouches. Dans cette configuration, les performances finales, c'est-à-dire la route réelle suivie, est normalement plus optimisée, dans la mesure toutefois ou les options choisies par le skipper pour l'application des surcouches ont été judicieuses.

Le PA devient alors un assistant du skipper, car si le PA est plus réactif pour corréliser les paramètres de l'environnement qui lui sont fournis et envoyer très rapidement une information à la barre pour corriger la route il ne possède pas l'expérience et la connaissance de son bateau qui reste l'apanage du skipper.

### **Le PA de demain ?**

Son architecture dépendra essentiellement de l'évolution des Règles de Course (World Sailing) utilisées dans Avis de Course ou les Instructions de Course.

On entre alors dans un autre monde...qui imposera aussi d'autres choix.

J. SANS (22/11/2020)

---

<sup>8</sup> Se poser la question : pourquoi un bateau archimédien, sous spinnaker, échappe au barreur et part à lof, malgré la batterie de cadrans qu'il a sous les yeux ?