

Rédacteur  
*Heikki Sovaleinen*

## Table des matières

L'anatomie de l'oreille . . . . .	<i>Marcel-André Boillat</i>	11.2
Les troubles de l'audition d'origine chimique	<i>Peter Jacobsen</i>	11.7
Les troubles de l'audition d'origine physique . . . . .	<i>Peter L. Pelmear</i>	11.8
L'équilibre . . . . .	<i>Lucy Yardley</i>	11.9
La vision et le travail . . . . .	<i>Paule Rey et Jean-Jacques Meyer</i>	11.11
Le goût . . . . .	<i>April E. Mott et Norman Mann</i>	11.23
L'odorat . . . . .	<i>April E. Mott</i>	11.27
Les récepteurs cutanés . . . . .	<i>Robert Dykes et Daniel McBain</i>	11.33

## ● L'ANATOMIE DE L'OREILLE

Marcel-André Boillat

### L'anatomie

L'oreille est l'organe sensoriel de l'audition et du maintien de l'équilibre par la perception de la position du corps et des mouvements de la tête. Elle comprend trois parties: l'oreille externe, l'oreille moyenne et l'oreille interne. La première est extracrânienne alors que les deux autres sont incluses dans l'os temporal, (ou rocher) (voir figure 11.1).

L'oreille externe se compose du pavillon de l'oreille, formé par un cartilage recouvert de peau, et du conduit auditif externe, cylindre irrégulier d'environ 25 mm de long qui est bordé de glandes sécrétant de la cire.

L'oreille moyenne consiste en une cavité dont la paroi externe est formée par la membrane tympanique (tympan). Cette cavité remplie d'air contient les osselets et communique en avant avec le rhino-pharynx par la trompe d'Eustache qui permet l'équilibre de pression de part et d'autre du tympan. Cela explique, par exemple, comment le fait d'avaler permet l'égalisation des pressions et le retour de l'acuité auditive altérée par un changement brusque de la pression barométrique (comme c'est le cas au cours d'un atterrissage ou lors de la montée ou de la descente dans un ascenseur rapide). La chaîne des osselets — marteau, enclume, étrier — relie le tympan à l'oreille interne par la platine de l'étrier, qui est mobile et s'insère au niveau de la fenêtre ovale. La chaîne des osselets est placée sous le contrôle de muscles (muscle tenseur du tympan et muscle stapédien).

L'oreille interne contient les organes sensoriels. Elle est constituée par une coque osseuse, appelée labyrinthe osseux, contenant le labyrinthe membraneux. Celui-ci comprend un ensemble de cavités réalisant un système clos rempli d'endolymphe, liquide riche en potassium. Le labyrinthe membraneux est séparé du labyrinthe osseux par la périlymphe, liquide riche en ions sodium.

Le labyrinthe osseux comprend deux parties. L'une, antérieure, s'appelle la cochlée et a une forme de spirale dirigée vers l'avant, qui rappelle la forme d'un limaçon. Il s'agit de l'organe de l'audi-

tion. L'autre, postérieure, est formée par le vestibule et les canaux semi-circulaires et représente l'organe de l'équilibre. Les éléments neurosensoriels sont situés dans les différentes parties du labyrinthe membraneux: l'organe de Corti se trouve dans le canal cochléaire, tandis que les macules de l'utricle et du saccule, ainsi que les crêtes ampullaires des canaux semi-circulaires se trouvent dans la partie postérieure.

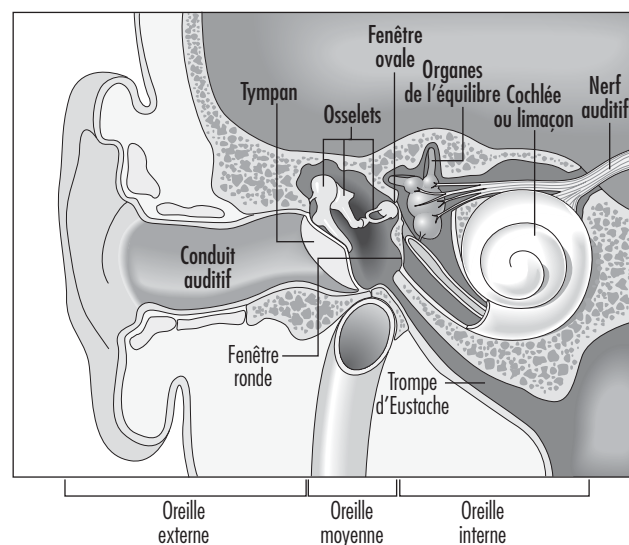
### L'organe de l'audition

Le canal cochléaire est un tube dont la coupe transversale est triangulaire, formant une spirale de deux tours et demi. D'une part, il est relié à un épaulement de la columelle (lame spirale), de l'autre, il est accolé à la paroi osseuse de la cochlée. Il sépare ainsi la rampe vestibulaire de la rampe tympanique.

La rampe vestibulaire est fermée par la fenêtre ovale (platine de l'étrier) et la rampe tympanique se termine à la fenêtre ronde. Ces deux rampes communiquent au niveau de l'hélicotréma, sommet de la cochlée. La membrane basilaire constitue le bord inférieur du canal cochléaire. Elle supporte sur toute sa longueur l'organe de Corti chargé de la transmission des stimuli sonores. Séparées par de nombreuses cellules de soutien, les cellules sensorielles à proprement parler comptent, d'une part, une rangée d'environ 3 500 cellules ciliées internes qui forment des synapses avec environ 90% des 30 000 neurones auditifs primaires, et, d'autre part, trois rangées de cellules ciliées externes qui représentent les 15 000 cellules ciliées de l'organe de Corti (voir figure 11.2). Leurs cils traversent une membrane extraordinairement mince et sont enchâssés dans la membrane tectoriale, qui se termine librement au-dessus de ces cellules. La membrane de Reissner forme la limite supérieure du canal cochléaire.

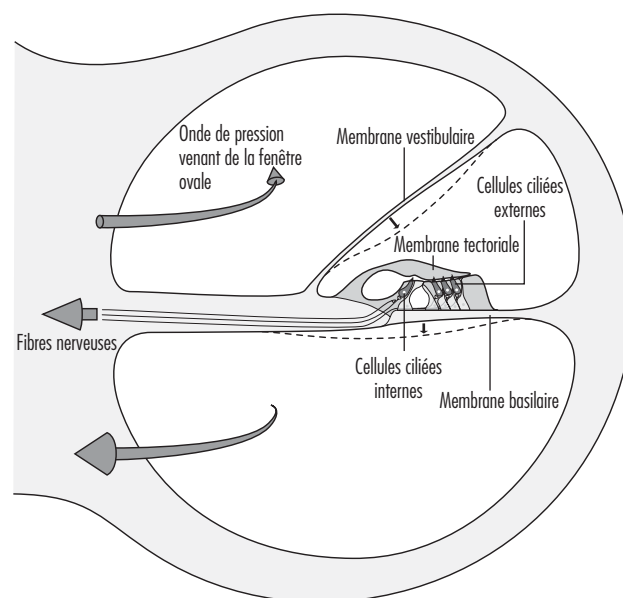
Les corps des cellules sensorielles, qui reposent sur la membrane basilaire, sont entourés par les extrémités des fibres nerveuses, dont les axones, au nombre de 30 000 environ, forment le nerf cochléaire, qui traverse le conduit auditif interne pour aller jusqu'aux structures centrales du tronc cérébral, phylogénétiquement la partie la plus ancienne du cerveau. Après un trajet complexe, les voies

Figure 11.1 • Schéma de l'oreille



Source: Hohmann et Schmuckli, 1989.

Figure 11.2 • Coupe transversale d'une spire de la cochlée. Diamètre: environ 1,5 mm



Source: Hohmann et Schmuckli, 1989.

auditives atteignent la partie du cortex cérébral qui est chargée de la perception des stimuli acoustiques (aire temporale).

### **L'organe de l'équilibre**

C'est au niveau des crêtes ampullaires des canaux semi-circulaires et des macules de l'utricle et du saccule que sont localisées les cellules sensorielles. Les excitations qui parviennent à ces cellules résultent de la pression exercée sur elles par l'endolymphe à la suite des déplacements de la tête et du corps. Ces cellules sensorielles sont en rapport avec des cellules bipolaires dont les prolongements périphériques constituent le nerf utriculaire (canaux semi-circulaires antérieur et externe) et le nerf sacculaire (canal semi-circulaire postérieur). Ces deux nerfs pénètrent dans le conduit auditif interne et forment, après réunion, le nerf vestibulaire. Joint au nerf cochléaire, celui-ci devient le huitième nerf crânien appelé nerf auditif.

Le nerf vestibulaire atteint le tronc cérébral au niveau des noyaux vestibulaires, d'où partent des fibres qui se dirigent vers le cervelet, vers les nerfs commandant les mouvements des yeux et vers la moelle épinière.

### **Le fonctionnement de l'audition**

#### **La conduction aérienne du son**

L'organe de l'ouïe est formé de deux éléments: un conducteur du son (oreille externe et moyenne) et un récepteur (oreille interne).

En passant par le conduit auditif externe, les ondes sonores frappent le tympan qui se met à vibrer et qui transmet ensuite ses mouvements à l'étrier par l'intermédiaire du marteau et de l'enclume. Le rapport de la surface tympanique (55 mm<sup>2</sup>) à la surface de la platine de l'étrier (3,5 mm<sup>2</sup>), ainsi que l'articulation en leviers des osselets entraînent une amplification de la pression sonore de vingt-deux fois. En raison de la fréquence propre de l'oreille moyenne, le rapport de transmission est maximal entre 1 000 et 2 000 Hz. Les mouvements de la platine de l'étrier donnent naissance à des ondes dans le liquide de la rampe vestibulaire. Le liquide étant incompressible, chaque mouvement vers l'intérieur de la platine de l'étrier est suivi d'un mouvement de la fenêtre ronde en direction de l'oreille moyenne.

Lors d'exposition à un niveau sonore élevé, le muscle de l'étrier se contracte et protège ainsi l'oreille interne (réflexe stapédien). Les muscles de l'oreille moyenne ont d'autres fonctions: étendre la gamme dynamique de l'oreille, améliorer la localisation des sources sonores, diminuer la résonance de l'oreille moyenne, régler la pression aérienne dans l'oreille moyenne et la pression liquidienne dans l'oreille interne.

Dans une gamme de fréquences comprises entre 250 et 4 000 Hz, le seuil du réflexe stapédien se situe à environ 80 décibels (dB) au-dessus du seuil d'audition et son amplitude croît avec le niveau de la stimulation (de 0,6 dB/dB environ). La latence de ce réflexe est de 150 ms au seuil et de 24 à 35 ms en présence de bruits de forte intensité. La contraction des muscles de l'oreille moyenne réduit de 10 dB environ la transmission des sons (pour les fréquences inférieures à la résonance principale de l'oreille moyenne). En raison de sa latence, le réflexe stapédien ne peut protéger l'oreille interne des bruits impulsifs qui se présentent isolément; en revanche, il devient efficace quand ces bruits sont générés à une fréquence supérieure à 2 ou 3 impulsions par seconde.

Au niveau de l'oreille, la vitesse de propagation des ondes dépend de l'élasticité de la membrane basilaire qui augmente de la base au sommet. Par conséquent, la vitesse de l'onde décroît en direction du sommet. Le transfert d'énergie de la vibration à la membrane de Reissner et à la membrane basilaire dépend de la fréquence. Pour les fréquences aiguës, l'amplitude de l'onde est maximale à la base, tandis que pour les fréquences graves elle l'est au sommet. Ainsi, l'excitation mécanique maximale se localise en

un point de la cochlée qui dépend de la fréquence, ce qui permet la discrimination fréquentielle des sons. Les mouvements de la membrane basilaire induisent des cisaillements des stéréocils des cellules ciliées et entraînent une série d'événements mécaniques, électriques et biochimiques qui constituent la transmission mécanosensorielle et la première étape de l'analyse du signal acoustique. Les cisaillements des stéréocils provoquent en effet l'ouverture de canaux ioniques, qui modifie la perméabilité des membranes cellulaires et permet la pénétration des ions potassium à l'intérieur des cellules, entraînant ainsi leur dépolarisation et la génération des potentiels d'action.

Cette dépolarisation provoque la libération de neuromédiateurs au pôle synaptique des cellules ciliées internes et donne naissance aux influx nerveux qui vont parcourir les fibres afférentes du nerf auditif en direction des centres supérieurs. L'intensité de la stimulation auditive dépend du nombre de potentiels d'action par unité de temps et du nombre de cellules stimulées, alors que la fréquence avec laquelle le son est perçu dépend des populations de fibres nerveuses mises en jeu. Les différentes fréquences du son ont chacune une représentation spatiale différente dans le cortex cérébral (tonotopie).

Les cellules ciliées internes sont des mécanorécepteurs qui transforment les signaux produits par les vibrations acoustiques en messages envoyés au système nerveux central, mais ce ne sont pas elles qui assurent à l'oreille ni sa sensibilité au seuil ni sa remarquable sélectivité en fréquences.

Les cellules ciliées externes n'envoient pas de message auditif au cerveau. Elles amplifient sélectivement les vibrations mécano-acoustiques près du seuil (d'un facteur 100 environ, soit 40 dB) et permettent ainsi (vraisemblablement par couplage micromécanique via la membrane tectoriale) l'excitation des cellules ciliées internes. Les cellules ciliées externes peuvent produire davantage d'énergie qu'elles n'en reçoivent du milieu extérieur et se contracter activement à des fréquences très élevées, jouant ainsi le rôle d'amplificateur cochléaire.

Au niveau de l'oreille interne, l'interférence entre les cellules ciliées externes et les cellules ciliées internes, constituant une boucle de rétroaction, permet de régler le fonctionnement du récepteur auditif et, en particulier, sa sensibilité au seuil, de même que sa sélectivité fréquentielle. Les efférences cochléaires peuvent ainsi agir en réduisant les dommages occasionnés par une exposition de la cochlée à des sons intenses. Il peut également se produire une contraction réflexe des cellules ciliées externes induite par le stimulus acoustique. Le réflexe stapédien de l'oreille moyenne qui réagit aux basses fréquences et la contraction réflexes de l'oreille interne qui répond aux fréquences élevées sont donc deux mécanismes de protection complémentaires.

#### **La conduction osseuse du son**

Les ondes sonores peuvent également être transmises par les os du crâne. Deux mécanismes physiologiques sont envisagés.

Le premier repose sur l'hypothèse que les ondes de compression agissent sur le crâne et qu'en raison de l'incompressibilité de la périlymphe les deux rampes font respectivement bomber la fenêtre ovale ou la fenêtre ronde. En raison de la différence d'élasticité des fenêtres, le mouvement de l'endolymphe n'est pas uniforme et entraîne un mouvement de la membrane basilaire.

L'autre mécanisme possible est fondé sur le principe de l'inertie: comme seule la rampe vestibulaire est chargée par la masse des osselets, un mouvement de translation est créé, entraînant un déplacement de la membrane basilaire.

La conduction osseuse est normalement de 30 à 50 dB inférieure à la conduction aérienne, ce que l'on peut aisément constater en se bouchant les deux oreilles. Cela n'est cependant valable que pour une excitation par son aérien; une excitation par contact direct sur un os crânien donnera d'autres valeurs d'atténuation.

### Le domaine de sensibilité

Les vibrations mécaniques font apparaître des variations de potentiels dans l'oreille interne, les voies et les centres nerveux. La sensation auditive n'existe qu'aux fréquences comprises entre 16 et 25 000 Hz et pour des pressions sonores variant, selon la fréquence considérée, de 20  $\mu\text{Pa}$  à 20 Pa (1 Pa = 1 pascal = 1 N/m<sup>2</sup> = 10  $\mu\text{bar}$ ). Cela correspond à un rapport de pression de 1 à 1 million! Le seuil d'audibilité d'une pression sonore donnée dépend de la fréquence. Il est minimal entre 1 000 et 6 000 Hz et il augmente vers les fréquences supérieures et inférieures.

Pour des raisons pratiques, une unité de mesure qui reflète notre perception de l'intensité sonore, en référence au seuil auditif, a été choisie selon une échelle logarithmique: le niveau de pression acoustique exprimé en décibels (dB). Ainsi, 20  $\mu\text{Pa}$  correspondent à 0 dB. La pression acoustique est multipliée par 10 lorsque le niveau s'élève de 20 dB, cela en raison de la formule suivante:

$$L_x = 20 \log P_x/P_0$$

$L_x$  = niveau acoustique en dB

$P_x$  = pression acoustique en pascals

$P_0$  = pression acoustique de référence  
( $2 \times 10^{-5}$  pascal, seuil de l'audition)

Le seuil de discrimination des fréquences, c'est-à-dire des différentes hauteurs du son, est d'environ 1,5 Hz jusqu'à 500 Hz, tandis qu'il reste constant à 0,3% pour les fréquences supérieures. Le seuil de discrimination des différences de pression sonore est d'environ 20% près du seuil auditif. Pour des pressions sonores élevées, des différences de 2% seront déjà perçues.

Si l'intervalle de fréquence entre deux sons est trop petit, on n'entend qu'un seul son dont le niveau varie et dont la fréquence perçue se situe entre les deux fréquences initiales. Un effet de masque se produit lorsque deux sons isolés ont des fréquences proches, mais des pressions différentes. Si la différence de pression sonore est suffisamment grande, seul le son le plus fort est perçu, alors que le plus faible est masqué.

La localisation du son n'est possible que si les deux organes auditifs sont intacts, de sorte que la différence de temps de parcours de la pression sonore entre les deux oreilles puisse être perçue. La plus petite différence de temps encore détectable est de  $3 \times 10^{-5}$  s. La différence d'intensité entre les deux oreilles, résultant de l'effet d'écran de la tête, aide aussi à la localisation de la source sonore.

La capacité de résolution de l'ouïe humaine est remarquable. Elle est basée sur la décomposition des fréquences dans l'oreille interne et surtout sur leur analyse dans le cerveau. L'oreille interne peut ainsi percevoir et identifier chaque source sonore individuelle, telle que chaque instrument de musique provenant d'un signal acoustique aussi complexe que celui de la musique d'un orchestre symphonique tout entier.

## Les aspects physiopathologiques

### Les atteintes ciliaires

Lorsque l'ouïe est soumise à des stimuli sonores intenses, le déplacement des cils excède leur résistance mécanique et conduit à la destruction mécanique des cellules ciliées qui, rappelons-le, sont en nombre limité. Ces cellules étant incapables de se régénérer, toute destruction de ce petit contingent est donc définitive et progressive si l'exposition à la nuisance sonore se poursuit. En général, la destruction des cellules ciliées s'accompagne finalement d'un déficit auditif.

Les cellules ciliées externes sont celles qui sont le plus sensibles au traumatisme sonore, ainsi qu'à d'autres facteurs de nature toxique, tels que l'anoxie, les médicaments ototoxiques (dérivés de

la quinine, streptomycine, quelques autres antibiotiques, certaines chimiothérapies antitumorales); c'est pourquoi, en cas d'agression, elles sont les premières à être détruites. Or, les cellules qui sont lésées ou dont les stéréocils sont détruits ne sont plus le siège de phénomènes hydromécaniques passifs et, dans ces conditions, seule une analyse grossière de la vibration acoustique est possible. En bref, la destruction des structures ciliaires des cellules ciliées externes entraîne une élévation du seuil auditif de l'ordre de 40 dB.

### Les atteintes cellulaires

Le bruit, surtout si l'exposition est répétée ou de longue durée, peut aussi perturber le métabolisme des cellules de l'organe de Corti, ainsi que celui des synapses afférentes, situées sous les cellules ciliées internes. Parmi les atteintes extraciliaires qui sont décrites dans la littérature, on trouve des modifications de l'ultrastructure (réticulum, mitochondries, lysosomes) et, dans la région postsynaptique, un gonflement des dendrites afférentes. Ce gonflement est vraisemblablement dû à l'accumulation toxique de neurotransmetteurs, conséquence de l'excès d'activité des cellules ciliées internes stimulées par le bruit. C'est néanmoins l'ampleur de la destruction des stéréocils qui suffit à déterminer le caractère temporaire ou définitif de l'atteinte de l'ouïe.

### L'atteinte de l'ouïe due au bruit

A l'époque actuelle, dans une société industrielle de plus en plus complexe, le bruit d'origine professionnelle est une sérieuse menace pour l'ouïe. L'exposition au bruit est responsable d'environ un tiers des 28 millions de cas d'atteintes auditives aux Etats-Unis. Selon l'Institut national de la sécurité et de la santé au travail (National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH)), 14% des travailleurs américains sont soumis à des niveaux de bruit potentiellement dangereux, dépassant 90 dB. Le bruit est donc la nuisance professionnelle la plus répandue. L'exposition au bruit est la deuxième cause d'atteinte auditive après les effets liés à l'âge. Enfin, on ne doit pas oublier la contribution du bruit à la perte d'audition dans des circonstances extraprofessionnelles, telles que le bricolage, la musique suramplifiée (surtout lors du port d'écouteurs), le tir, etc.

*Le traumatisme sonore aigu.* L'effet immédiat des stimuli sonores de forte intensité (une explosion, par exemple) peut se traduire par une élévation du seuil auditif, une rupture du tympan et des lésions de l'oreille moyenne et de l'oreille interne (dislocation des osselets, lésion cochléaire ou fistules).

*Le déplacement temporaire du seuil d'audition (fatigue auditive).* Après une exposition au bruit, la sensibilité des cellules sensorielles diminue en fonction de la durée et de l'intensité de ce bruit. Au début, l'élévation du seuil d'audition est totalement réversible, mais persiste pendant un temps limité après la fin de la stimulation. C'est ce que l'on appelle la fatigue auditive ou déplacement temporaire du seuil d'audition (désigné par le sigle anglais TTS).

L'étude de la récupération de la sensibilité auditive permet de distinguer plusieurs types de fatigue auditive. La fatigue à court terme se dissipe en moins de deux minutes et se traduit par un déplacement maximum du seuil à la fréquence d'exposition. La fatigue à long terme est caractérisée par une durée de récupération supérieure à deux minutes, mais inférieure à seize heures, limite arbitraire fondée sur l'étude de l'exposition à des bruits industriels. En général, la fatigue auditive est fonction de l'intensité, de la durée, de la fréquence et de la continuité de la stimulation. C'est ainsi que pour une dose donnée de bruit, résultant de l'intégration de son intensité et de sa durée, un bruit discontinu est moins dangereux qu'un bruit continu.

L'amplitude du TTS augmente en moyenne de 6 dB chaque fois que celle de la stimulation double. A partir d'une certaine intensité d'exposition (niveau critique), cette augmentation s'accé-

lère, particulièrement pour les bruits impulsionnels. Le TTS augmente de manière asymptotique avec la durée d'exposition; la valeur asymptotique elle-même augmente avec l'intensité de la stimulation. Du fait de la fonction de transfert de l'oreille externe et de l'oreille moyenne, les basses fréquences sont les mieux tolérées.

Sur la base d'études portant sur des expositions à des sons purs, on a observé que le maximum du TTS se décale progressivement vers les fréquences supérieures à celle de la stimulation sonore au fur et à mesure que le niveau de cette dernière augmente. Un sujet exposé à un son pur de 2 000 Hz développe une fatigue auditive qui est maximale à 3 000 Hz environ (décalage d'une demi-octave). Il est possible que ce phénomène soit dû à l'effet du son sur les cellules ciliées externes.

Le travailleur qui présente un TTS recouvre en général une audition normale dans les heures qui suivent la cessation de l'exposition au bruit. Mais l'exposition répétée au bruit entraîne une moins bonne récupération et induit une atteinte auditive définitive.

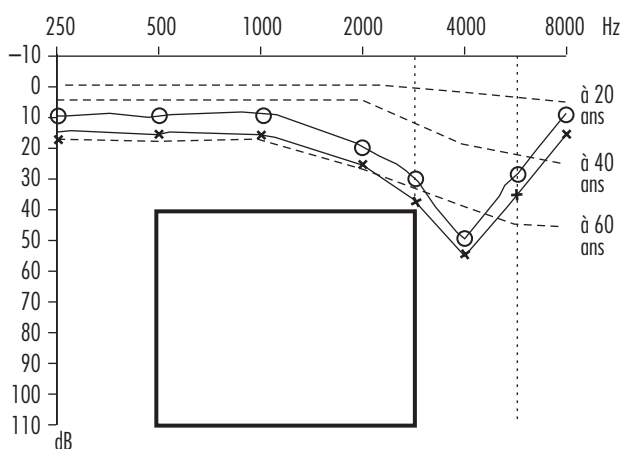
*Le déplacement permanent du seuil d'audition (atteinte auditive définitive).* Lorsque l'exposition à des intensités sonores élevées dure des années, la perte d'audition peut devenir définitive. On parle alors de déplacement permanent du seuil d'audition (designé par le sigle anglais PTS). Du point de vue anatomique, cette perte d'audition correspond à une dégénérescence des cellules ciliées, caractérisée au début par de légères altérations histologiques, pour aboutir ensuite à la destruction cellulaire complète. La perte de l'ouïe est plus susceptible de survenir aux fréquences pour lesquelles la sensibilité de l'oreille est la meilleure; c'est en effet pour ces fréquences que l'énergie acoustique est transmise de façon optimale du milieu extérieur à l'oreille interne. Cela explique l'atteinte débutant à 4 000 Hz, caractéristique des surdités professionnelles (voir figure 11.3). Les effets du niveau et de la durée de la stimulation sont interdépendants et, pour l'établissement de normes internationales, on considère que l'importance des déficits auditifs est liée à la quantité d'énergie acoustique reçue par l'oreille (dose de bruit).

Le développement de la surdité due au bruit n'est pas le même chez tous les individus. On a cherché à expliquer cette sensibilité individuelle en prenant en compte différentes variables qui semblaient devoir jouer un rôle, telles que l'âge, le sexe, la race, la présence d'une maladie cardio-vasculaire ou des habitudes tabagiques, etc. Tout cela sans pouvoir conclure.

Une question intéressante est celle de savoir si les personnes qui présentent un TTS supérieur à la moyenne seront celles qui développeront plus tard un PTS également supérieur à la moyenne. On a vu plus haut que le TTS se décale progressivement vers des fréquences supérieures à celle de la stimulation. D'autre part, la plus grande partie des dégâts ciliaires se produisant aux fortes intensités affecte des cellules qui sont sensibles à la fréquence de la stimulation. Si l'exposition se prolonge, on voit se rapprocher progressivement la fréquence à laquelle la perte d'audition définitive est maximale et la fréquence de la stimulation (alors que dans la fatigue auditive, la perte d'audition temporaire maximale se déplace vers des fréquences supérieures à celle de la stimulation acoustique). Les lésions ciliaires et les destructions cellulaires sont alors situées dans les zones de fréquence correspondant aux pertes auditives. On en déduit ainsi que la fatigue et les pertes auditives résultent de mécanismes différents et qu'il n'est pas possible de prédire un PTS à partir de la mesure d'un TTS chez un sujet donné.

Les individus souffrant d'un PTS sont en principe asymptomatiques au départ. Au fur et à mesure que le déficit auditif s'installe, ils ont du mal à suivre les conversations en milieu bruyant, lors de réceptions ou au restaurant, par exemple. Ce phénomène progressif, qui se manifeste au début par une difficulté à entendre les sons aigus, est en général sans douleur et d'installation lente.

Figure 11.3 • Audiogramme avec atteinte bilatérale due au bruit



Les cercles représentent l'oreille droite, les croix l'oreille gauche.  
Le carré central correspond au domaine de compréhension de la parole.  
Les traits interrompus montrent l'effet de l'âge sur le tracé.

### L'examen d'une personne présentant une atteinte de l'audition

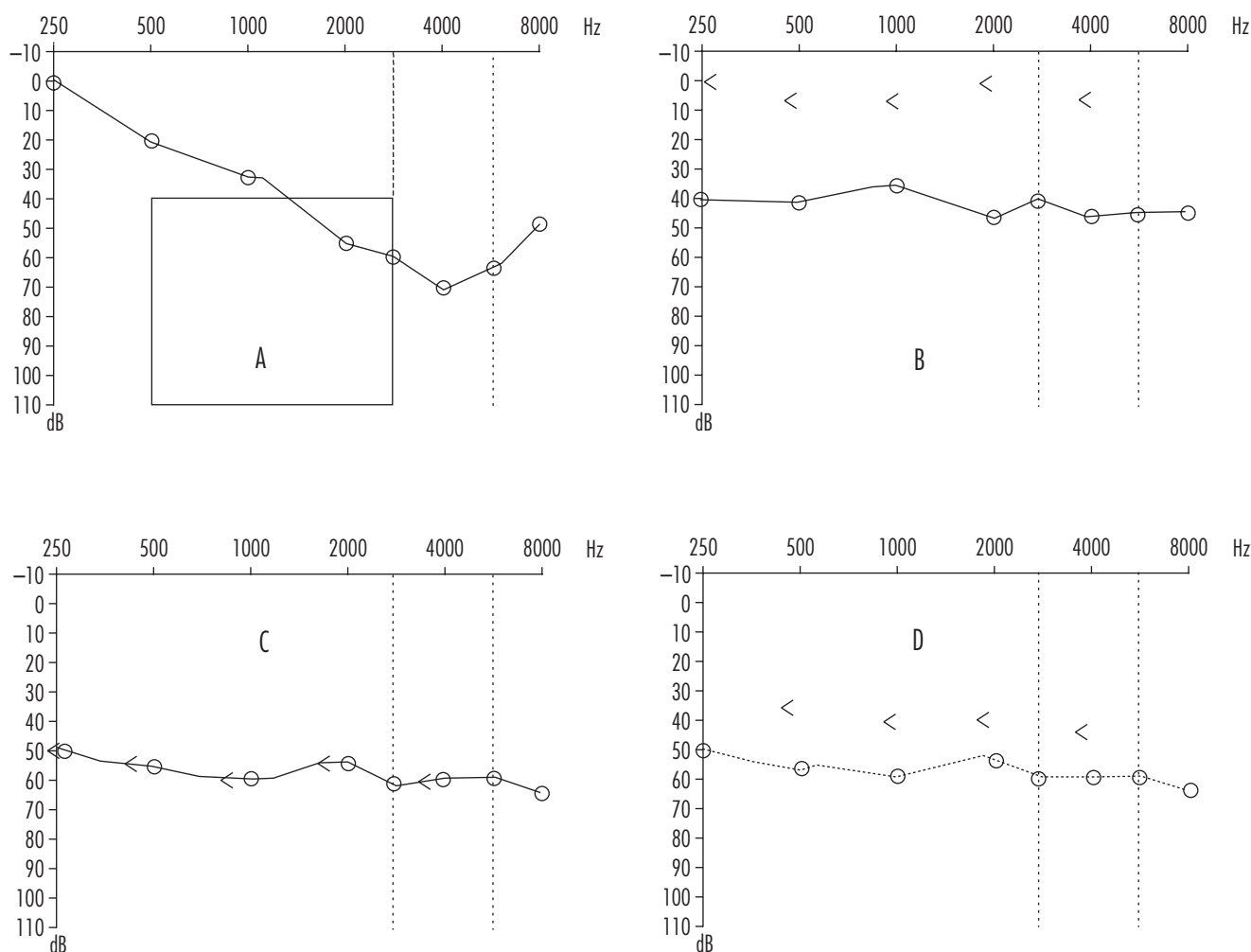
#### L'examen clinique

Le questionnaire médical doit non seulement préciser la date éventuelle à laquelle le déficit auditif a été diagnostiqué et comment il a évolué, mais aussi l'âge, les antécédents familiaux, la prise de médicaments ototoxiques, l'exposition au bruit, la symétrie entre les deux oreilles, l'association à des sifflements ou des bourdonnements dans les oreilles (acouphènes), des vertiges ou d'autres troubles neurologiques, ainsi que la présence d'infections de l'oreille avec douleur et écoulement au niveau du conduit auditif externe. L'anamnèse doit insister sur l'exposition durable aux sons de fort niveau (en se souvenant que, pour le patient, tous les sons ne sont pas des bruits), cela aussi bien au poste de travail actuel qu'aux postes occupés antérieurement ou dans la vie courante. Des épisodes de TTS confirmeraient des expositions ototoxiques antérieures.

L'examen physique portera sur l'état des nerfs crâniens et de la fonction du cervelet, complété par une ophtalmoscopie pour détecter des signes éventuels d'augmentation de la pression intracrânienne. Une tympanoscopie permettra de mettre en évidence et de retirer d'éventuels bouchons de cérumen (sans objet pointu pour ne pas léser le tympan), après quoi on recherchera des traces de cicatrices ou de perforation de la membrane tympanique. On peut déterminer grossièrement la perte auditive par un test clinique courant qui consiste à faire répéter des mots et des phrases, émis à voix basse par le médecin, qui se place derrière le patient ou hors de sa vue. Le test de Weber (où l'on place un diapason sur le milieu du front pour vérifier si le son est transmis également dans les deux oreilles) et le test de Rinne (qui consiste à poser un diapason sur la mastoïde jusqu'à ce que le son ne soit plus perçu et à le déplacer alors brusquement devant le canal auditif; souvent, le son est perçu plus longtemps par voie aérienne que par voie osseuse) vont permettre de conclure si on a affaire à une surdité de transmission ou à une surdité de perception.

L'audiométrie est le test classique utilisé pour détecter et évaluer le déficit auditif (voir ci-dessous). En fonction des constatations, on fera appel, sur conseil de différents spécialistes, à des examens complémentaires (tympanométrie, audiométrie vocale, exploration du réflexe stapédien), des analyses de laboratoire, des

Figure 11.4 • Exemples d'audiogrammes de l'oreille droite. Les cercles symbolisent la perte auditive mesurée par conduction aérienne. Les signes < représentent la conduction osseuse



A: atteinte caractéristique due au bruit, avec empiètement du tracé sur le domaine de compréhension de la parole. Le carré central correspond au domaine de compréhension de la parole.  
B: atteinte de type transmission.

C: atteinte de type perception.  
D: atteinte mixte, de transmission et de perception.

examens électrophysiologiques (électrocochléogramme, potentiels évoqués auditifs) et radiologiques (scanner, résonance magnétique).

### L'audiométrie

C'est un examen crucial dans l'évaluation médicale, qui détermine à l'aide d'un audiomètre le seuil d'audition de sons purs de fréquences variées situées entre 250 et 8 000 Hz, pour des intensités sonores s'échelonnant de -10 dB (seuil d'audition pour une oreille intacte) à 110 dB (atteinte maximale). La personne examinée ne doit pas avoir été exposée dans les seize heures qui précèdent (pour éliminer des TTS). L'audition est contrôlée séparément pour chaque oreille. Elle permet de mesurer la conduction aérienne, en plaçant les écouteurs sur les oreilles, et la conduction osseuse, en utilisant un vibreur mis en contact avec le crâne, derrière l'oreille. Le résultat est reporté sur un graphique appelé audiogramme (voir figure 11.3). L'examen est en général complété par une audiométrie vocale, qui définit un seuil d'intelligibilité, c'est-à-dire l'intensité à laquelle la parole est reconnue comme

intelligible, en utilisant des mots de deux syllabes d'égale intensité (par exemple, bouchon, souper, rondin).

La comparaison de la conduction aérienne et de la conduction osseuse permet de définir si le déficit auditif est dû à une lésion du conduit auditif externe ou de l'oreille moyenne (surdité de transmission), ou s'il s'agit d'une lésion de l'oreille interne ou du nerf auditif (surdité de perception neurosensorielle) (voir figures 11.3 et 11.4). Lors de l'atteinte de l'ouïe due au bruit, l'audiogramme présente des caractéristiques particulières (voir figure 11.3). La perte de l'ouïe débute à 4 000 Hz sous la forme d'une encoche sur le tracé de l'audiogramme. Si l'exposition à un bruit trop intense se poursuit, les fréquences voisines seront progressivement touchées et l'encoche s'élargira pour empiéter, aux environs de 3 000 Hz, sur la zone critique pour la conversation. L'atteinte touche habituellement de manière symétrique les deux oreilles, c'est-à-dire que la différence entre celles-ci ne dépasse pas 15 dB à 500, 1 000 et 2 000 Hz ou 30 dB à 3 000, 4 000 et 6 000 Hz. Dans certains cas, l'atteinte peut être asymétrique parce que l'exposition au bruit n'est pas uniforme. C'est l'exemple du tireur au

fusil chez qui la perte peut être plus marquée pour le côté opposé au doigt qui actionne la gâchette (à gauche pour un droitier). Les atteintes de l'oreille qui ne sont pas en relation avec le bruit sont en général unilatérales et l'audiogramme ne montre pas l'encoche typique à 4 000 Hz (voir figure 11.4).

Il existe deux types d'examen audiométrique: l'audiométrie clinique et le dépistage audiométrique. L'audiométrie collective s'applique à des groupes d'individus, au travail, dans les écoles ou dans les collectivités, en vue de dépister ceux qui *semblent* souffrir d'un déficit de l'audition. La mesure est faite à l'aide d'audiomètres électroniques qui permettent parfois au sujet lui-même de se tester et se pratique habituellement dans un endroit calme, sans qu'il s'agisse nécessairement d'une cabine audiométrique insonorisée et sans transmissions vibratoires. Ce type d'examen doit être considéré comme une orientation préalable en vue d'un diagnostic audiométrique qui réclamera la précision et la reproductibilité de la mesure. Le diagnostic est pratiqué par un technicien qualifié (audiologiste), de qui l'on exige parfois un diplôme. La qualité de la mesure, dans les deux types d'audiométrie, est tributaire du contrôle et de la calibration périodiques de l'appareillage.

Dans de nombreux pays, la surdité professionnelle donne lieu à réparation. C'est pourquoi de nombreux employeurs incluent l'audiométrie dans l'examen médical d'embauche afin de détecter des déficits dont un précédent employeur pourrait être responsable ou qui seraient dus à une exposition non professionnelle au bruit.

Le seuil auditif augmente progressivement avec l'âge, les fréquences les plus hautes étant les plus touchées (voir figure 11.3). On ne retrouve donc pas l'encoche caractéristique de la courbe à 4 000 Hz observée dans les déficits auditifs dus au bruit.

### Le calcul de la perte auditive

Aux Etats-Unis, la formule la plus largement acceptée pour mesurer la limitation fonctionnelle liée à la perte auditive est celle proposée en 1979 par l'Académie américaine d'otolaryngologie (American Academy of Otolaryngology (AAO)) et adoptée par l'Association médicale américaine (American Medical Association). Elle utilise une moyenne des valeurs concernant les fréquences de 500, 1 000, 2 000 et 3 000 Hz (voir tableau 11.1). La limite inférieure à partir de laquelle on parle d'atteinte fonctionnelle est placée à une perte de 25 dB.

### La presbyacousie

La presbyacousie ou la perte d'audition due au vieillissement se manifeste vers 40 ans et progresse graduellement avec l'âge. Généralement, il s'agit d'une atteinte bilatérale. En cas de presbyacousie, l'encoche typique de 4 000 Hz observée lors d'un déficit auditif induit par le bruit n'apparaît pas. Cependant, le tracé peut représenter le double effet de l'exposition au bruit et de l'âge.

### Le traitement

La première des mesures est d'éviter toute autre exposition au bruit à un niveau potentiellement nocif (voir «La prévention» ci-dessous). Il est généralement admis que, lorsque l'exposition au bruit en milieu de travail cesse, le déficit auditif observé ultérieurement n'est pas plus important que celui dû au processus normal du vieillissement.

Alors que les surdités de transmission (celles liées, par exemple, à un traumatisme acoustique aigu) peuvent faire l'objet d'un traitement médical ou chirurgical, les surdités de perception secondaires au bruit sont hors de portée thérapeutique. Le seul «remède» proposé suivant la situation est l'utilisation d'une aide auditive. Celle-ci se justifie dans les cas où l'atteinte touche les fréquences critiques pour la compréhension de la parole (500 à 3 000 Hz). D'autres assistances, telles que la formation à la lecture labiale et les amplificateurs de sonnerie (pour le téléphone, par exemple) peuvent être envisagées.

Tableau 11.1 • Exemple de calcul de l'atteinte fonctionnelle à partir d'un audiogramme

	Fréquence						
	500 Hz	1 000 Hz	2 000 Hz	3 000 Hz	4 000 Hz	6 000 Hz	8 000 Hz
Oreille droite (dB)	25	35	35	45	50	60	45
Oreille gauche (dB)	25	35	40	50	60	70	50

#### Atteinte unilatérale

Pourcentage d'atteinte unilatérale = (moyenne dB à 500, 1 000, 2 000 et 3 000 Hz) – 25 dB (limite inférieure) × 1,5

Exemple:

Oreille droite:  $[(25 + 35 + 35 + 45)/4] - 25 \times 1,5 = 15$  (%)

Oreille gauche:  $[(25 + 35 + 40 + 50)/4] - 25 \times 1,5 = 18,8$  (%)

#### Atteinte bilatérale

Pourcentage de l'atteinte bilatérale = {(pourcentage de la perte unilatérale pour la meilleure oreille × 5) + (pourcentage de la perte unilatérale pour la moins bonne oreille)}/6

Exemple:  $\{(15 \times 5) + 18,8\}/6 = 15,6$  (%)

Source: Rees et Duckert, 1994.

### La prévention

Le fait que l'atteinte liée au bruit est définitive donne un poids fondamental à toutes les mesures préventives susceptibles de réduire l'exposition. Ces mesures comprennent la diminution du bruit à la source (conception de machines plus silencieuses ou insonorisation des locaux dans lesquels elles se trouvent) ou l'utilisation de moyens de protection individuelle tels que les tampons ou bouchons d'oreilles et les casques antibruit.

Dans le cas où on choisit des protections individuelles, il est impératif de s'assurer que les déclarations du fabricant sur leur efficacité sont justifiées et que les travailleurs les utilisent correctement et systématiquement.

En situant la valeur limite d'exposition au bruit en milieu professionnel à 85 dB(A), on vise la protection du plus grand nombre. Toutefois, du fait que les individus sont diversement sensibles au bruit (comme mentionné plus haut), il est préférable que le bruit auquel sont exposés les travailleurs se situe bien au-dessous de cette valeur. L'audiométrie périodique devrait faire partie du programme de surveillance médicale pour détecter le plus tôt possible les effets d'une exposition au bruit.

## LES TROUBLES DE L'AUDITION D'ORIGINE CHIMIQUE

Peter Jacobsen

Les hypoacusies dues à la toxicité cochléaire d'un certain nombre de médicaments sont bien connues (Rybak, 1993). Toutefois, jusqu'à ces dix dernières années, on s'est assez peu intéressé aux effets des produits chimiques industriels sur l'ouïe. Les recherches récentes sur les troubles de l'audition d'origine chimique se sont

concentrées sur les solvants, les métaux lourds et les produits chimiques provoquant une anoxie.

*Solvants.* Chez les rongeurs, des études ont mis en évidence une diminution de la sensibilité aux sons de fréquence élevée après des semaines d'exposition intense au toluène. Les études histopathologiques et des études portant sur la région auditive du cerveau ont montré un effet prépondérant sur la cochlée, avec lésions des cellules ciliées externes. Il a été constaté des effets semblables après exposition au styrène, aux xylènes et au trichloroéthylène. Le sulfure de carbone et le *n*-hexane peuvent aussi agir sur la fonction auditive, mais leurs effets semblent plutôt affecter les voies plus centrales (Johnson et Nylén, 1995).

Chez l'humain, plusieurs cas de lésions de l'appareil auditif avec troubles neurologiques sévères ont été signalés après inhalation volontaire de solvants («sniffing»). Dans des groupes de personnes exposées professionnellement à des mélanges de solvants, au *n*-hexane ou au sulfure de carbone, des effets à la fois cochléaires et centraux sur les fonctions auditives ont été signalés. Dans ces groupes, l'exposition au bruit était courante; toutefois, les effets sur l'audition ont été considérés supérieurs à ceux attribuables au bruit.

Jusqu'à maintenant, seules quelques études contrôlées (c'est-à-dire dans lesquelles on a pu séparer les deux types de risque: bruit et solvants) ont eu pour objectif la recherche d'une atteinte auditive chez les personnes exposées aux solvants, mais non exposées significativement au bruit. Dans une étude danoise, une augmentation statistiquement significative du risque d'hypoacousie déclarée spontanément à 1,4 (IC95%: 1,1-1,9) a été mise en évidence après une exposition aux solvants de cinq ans ou plus. Dans un groupe exposé à la fois aux solvants et au bruit, on n'a pas constaté d'effet additif dû aux solvants. Dans un sous-échantillon de la population étudiée, on a noté une bonne concordance entre les troubles auditifs déclarés et l'évaluation audiométrique de l'atteinte auditive (Jacobsen et coll., 1993).

Dans une étude hollandaise sur des travailleurs exposés au styrène, l'audiométrie a révélé des différences dose-dépendantes des seuils auditifs (Muijser et coll., 1988).

Une étude brésilienne a été faite sur les effets auditifs d'une exposition au bruit, au toluène associé au bruit et à des mélanges de solvants chez des travailleurs de l'imprimerie et de la fabrication des peintures. Par rapport à un groupe témoin non exposé, on a constaté une augmentation significative du risque de perte de sensibilité aux sons aigus dans les trois groupes exposés. Les risques relatifs étaient respectivement de 4 et de 5 pour l'exposition au bruit et aux mélanges de solvants. Dans le groupe exposé à la fois au toluène et au bruit, le risque relatif était de 11, ce qui indique une synergie entre les deux expositions (Morata et coll., 1993).

*Métaux.* Une étude américaine a analysé les effets du plomb sur l'ouïe chez des enfants et des adolescents. Une relation dose-dépendante significative entre la plombémie et le seuil d'audition pour des fréquences allant de 0,5 à 4 kHz a été constatée, et ce, après l'élimination de plusieurs facteurs de confusion. L'effet du plomb se manifestait quelle que soit l'intensité de l'exposition et pouvait être décelé à des plombémies inférieures à 10 µg/100 ml. Chez les enfants ne présentant pas de signes cliniques d'intoxication saturnine, une relation linéaire a été mise en évidence entre la plombémie et les latences des ondes III et V des potentiels évoqués auditifs du tronc cérébral, ce qui indique un site d'action central par rapport au noyau cochléaire (Otto et coll., 1985).

L'hypoacousie est fréquemment décrite dans le tableau clinique de l'intoxication aiguë ou chronique par le méthylmercure. On a mis en cause des lésions à la fois cochléaires et rétrocochléaires (Oyanagi et coll., 1989). Le mercure inorganique peut également

affecter l'appareil auditif, probablement en lésant les structures cochléaires.

L'exposition à l'arsenic minéral a été mise en cause dans les troubles auditifs des enfants. Une hypoacousie sévère (30 dB) a été très fréquemment constatée chez des enfants nourris avec du lait en poudre contaminé par de l'arsenic minéral pentavalent. Une étude tchécoslovaque a constaté, chez des enfants de 10 ans, une hypoacousie confirmée par audiométrie, résultant d'une exposition environnementale à de l'arsenic provenant d'une centrale alimentée au charbon. Les composants non organiques de l'arsenic ont provoqué d'importantes lésions cochléaires chez les animaux d'expérience (OMS, 1983).

Dans l'intoxication aiguë par le triméthylétain, les symptômes précoces ont été une hypoacousie et des acouphènes. Lors de la consultation, l'audiométrie a révélé une atteinte auditive intéressante toute la cochlée, comprise entre 15 et 30 dB. On ne sait pas de façon claire si ces troubles ont été réversibles (Besser et coll., 1987). Chez l'animal, le triméthylétain et le triéthylétain ont provoqué des lésions cochléaires partiellement réversibles (Clerisi et coll., 1991).

*Produits asphyxiants.* Chez l'humain, dans l'intoxication aiguë par le monoxyde de carbone ou le sulfure d'hydrogène, on a souvent constaté des troubles auditifs associés à une atteinte du système nerveux central (Rybak, 1992).

Lors d'essais chez les rongeurs, on a constaté une synergie entre l'exposition au monoxyde de carbone et le bruit sur les seuils d'audition et les structures cochléaires. On n'a constaté aucun effet après exposition au seul monoxyde de carbone (Fechter et coll., 1988).

## Résumé

Les études expérimentales ont confirmé que plusieurs solvants peuvent provoquer des troubles de l'audition dans certaines conditions d'exposition. Les études faites chez l'humain ont indiqué qu'un tel effet peut se produire à la suite d'expositions qui sont courantes en milieu de travail. Des études chez l'humain et les animaux d'expérience ont montré des effets synergiques du bruit et des produits chimiques. Certains métaux lourds peuvent agir sur l'audition, pour la plupart d'entre eux seulement à des niveaux d'exposition provoquant une toxicité systémique patente. Dans le cas du plomb, des effets mineurs ont été observés sur le seuil d'audition pour des expositions très inférieures aux expositions professionnelles. On n'a pas confirmé à ce jour d'effet ototoxique spécifique des produits asphyxiants, bien que le monoxyde de carbone puisse augmenter les effets du bruit sur l'audition.

## LES TROUBLES DE L'AUDITION D'ORIGINE PHYSIQUE

*Peter L. Pelmeear*

L'appareil auditif, du fait de sa position à l'intérieur du crâne, est généralement bien protégé contre les traumatismes. Il peut, toutefois, être affecté par divers risques physiques en relation avec le travail dont les suivants:

*Barotraumatismes.* Les variations soudaines de la pression barométrique (par montée ou descente rapide en plongée ou par descente soudaine en avion) associées à un dysfonctionnement de la trompe d'Eustache (ne permettant pas l'équilibrage des pressions) peuvent provoquer une rupture de la membrane tympanique, avec douleur et hémorragie au niveau de l'oreille moyenne et externe.

Dans les cas moins graves, l'étirement de la membrane tympanique cause une douleur plus ou moins intense. Il se produit une hypoacousie passagère (de transmission), mais le traumatisme a généralement une évolution favorable et la récupération fonctionnelle est totale.

**Vibrations.** L'exposition simultanée à des vibrations et au bruit (continu ou impulsif) n'augmente pas le risque ou la sévérité de l'hypoacousie neurosensorielle due au bruit; cependant, la fréquence des troubles semble être augmentée chez les travailleurs présentant un syndrome de vibrations du système main-bras (maladie des outils vibrants). On suppose que la circulation cochléaire est affectée par un spasme sympathique réflexe quand les travailleurs concernés présentent une vasoconstriction (phénomène de Raynaud) au niveau des doigts ou des orteils.

**Infra- et ultrasons.** Ils sont normalement imperceptibles à l'oreille humaine. Les sources courantes d'ultrasons, comme les moteurs à réaction, les fraises dentaires à grande turbine, les nettoyeurs à ultrasons et les mixers, émettent toutes des sons audibles; il est donc difficile de discerner l'effet propre des ultrasons sur les sujets exposés. On suppose que les ultrasons sont inoffensifs au-dessous de 120 dB et qu'ils ne provoquent probablement pas de déficit auditif. De même, les bruits de très basse fréquence sont relativement sans danger à faible intensité, alors qu'à forte intensité (119-144 dB) on peut observer une hypoacousie.

«*Oreille du soudeur*». Des étincelles brûlantes peuvent pénétrer dans le conduit auditif externe, atteindre et brûler la membrane tympanique. Il en résulte une douleur aiguë accompagnée, parfois, d'une paralysie faciale. Les brûlures légères n'exigent pas de traitement, mais dans les cas plus graves une réparation chirurgicale de la membrane tympanique peut s'avérer nécessaire. On peut prévenir ce risque en portant correctement son masque de soudeur ainsi que des bouchons d'oreilles.

## ● L'ÉQUILIBRE

Lucy Yardley

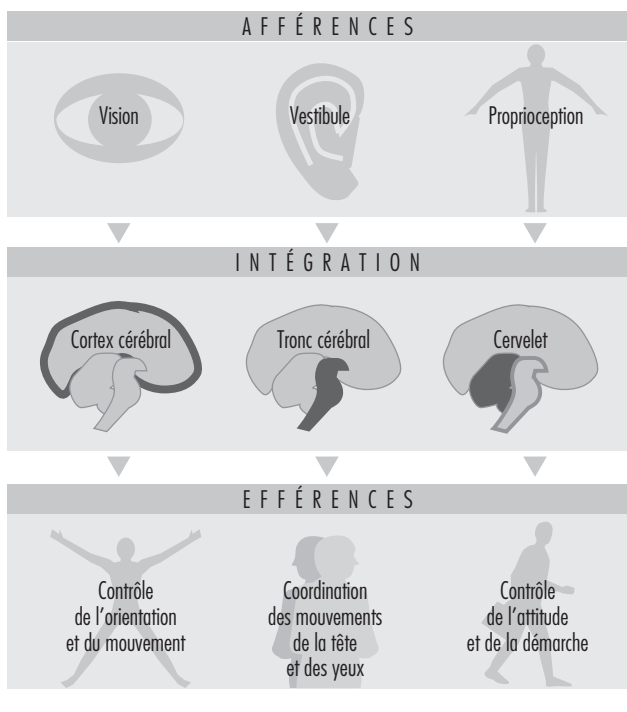
### Le fonctionnement du système de l'équilibre

#### Les signaux efférents

La perception, le contrôle de l'orientation et des mouvements du corps dans l'espace sont réalisés par un système mettant en jeu simultanément des informations ayant une triple origine: les yeux, l'appareil vestibulaire de l'oreille interne et les capteurs musculaires, articulaires et cutanés, qui fournissent les informations somato-sensorielles ou «proprioceptives» relatives aux mouvements du corps et à sa relation physique avec l'environnement (voir figure 11.5). L'ensemble de ces informations sont intégrées dans le système nerveux central qui déclenche les actions appropriées pour rétablir et maintenir l'équilibre, la coordination et le bien-être. Toute défaillance d'un élément de ce système peut entraîner un malaise, un état vertigineux ou une instabilité susceptibles de provoquer divers troubles ou une chute.

L'appareil vestibulaire enregistre directement l'orientation et les mouvements de la tête. Le labyrinthe vestibulaire est une petite structure osseuse de l'oreille interne, comprenant les *canaux semi-circulaires* remplis d'un liquide (l'endolymphe) et les *otolithes* (voir figure 11.6). Les trois canaux semi-circulaires sont perpendiculaires entre eux, ce qui leur permet de détecter les accélérations dans chacun des trois plans d'un mouvement angulaire. Quand la tête tourne, le mouvement relatif (dû à l'inertie) de l'endolymphe à

Figure 11.5 • Schéma des composants essentiels du système de l'équilibre

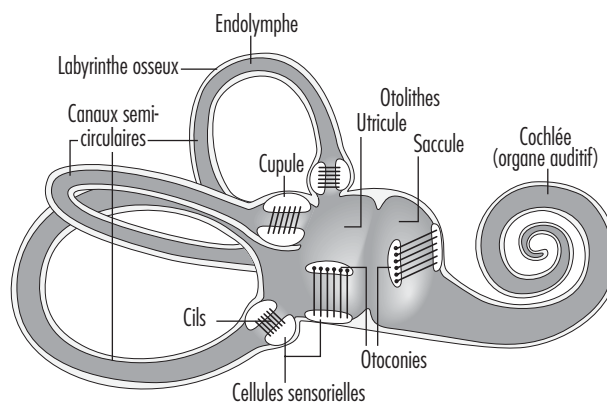


l'intérieur des canaux déplace les *cils* bordant les cellules sensorielles et induit un signal nerveux (voir figure 11.7). Les otolithes contiennent des cristaux lourds (*otoconies*) qui répondent aux changements de position de la tête par rapport à la pesanteur et aux accélérations ou décélérations linéaires, en déformant eux aussi les cils, ce qui modifie le signal nerveux provenant des cellules sensorielles auxquelles les cils et les otolithes sont fixés.

#### L'intégration

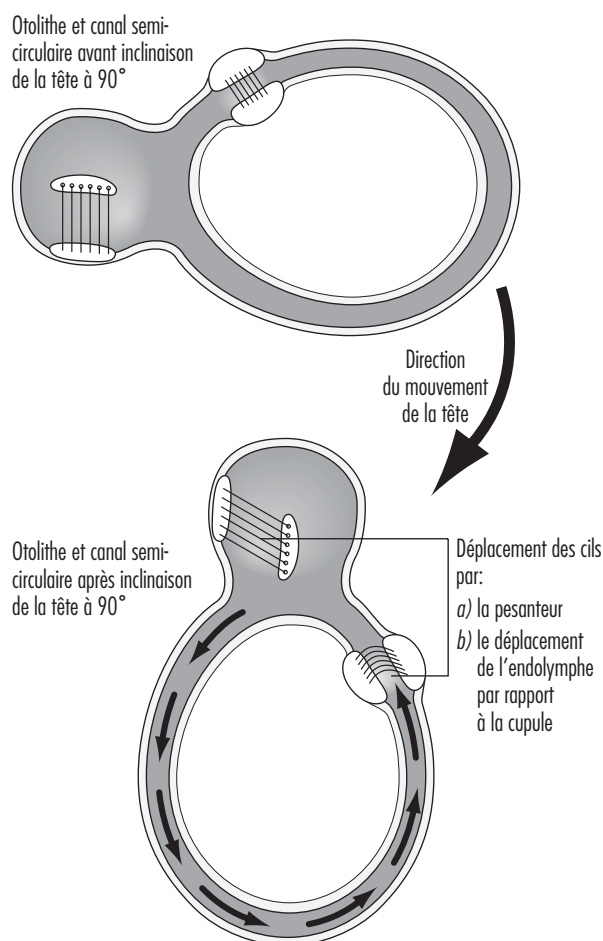
Les connexions centrales du système d'équilibration sont extrêmement complexes; les informations fournies par l'appareil vestibulaire des deux oreilles sont combinées avec celles fournies par la

Figure 11.6 • Schéma du labyrinthe vestibulaire



Source: Yardley, 1994.

Figure 11.7 • Schéma des effets biomécaniques d'une inclinaison de la tête de 90° (vers l'avant)



Source: Yardley, 1994.

vision et le système somato-sensoriel à différents niveaux du tronc cérébral, du cervelet et du cortex cérébral (Luxon, 1984).

### Les signaux efférents

Ces informations intégrées sont à la base non seulement de la perception consciente de l'orientation et du mouvement volontaire, mais aussi du contrôle automatique des mouvements des yeux et de la posture par la voie des réflexes dits vestibulo-oculaires et vestibulo-spinaux. Le réflexe vestibulo-oculaire a pour fonction de maintenir les yeux fixés de façon stable sur un point pendant les déplacements de la tête en compensant automatiquement ceux-ci par un déplacement équivalent des yeux en direction opposée (Howard, 1982). Les réflexes vestibulo-spinaux contribuent à la stabilité de la posture et à l'équilibre (Pompeiano et Allum, 1988).

### Les troubles de l'équilibre

À l'état normal, les informations vestibulaires, visuelles et somato-sensorielles concordent, mais en cas de discordance apparente entre les différentes informations sensorielles fournies au système de l'équilibre, il se produit une sensation de vertige et de désorientation ou une illusion de mouvement. Si la sensation vertigineuse se prolonge ou si elle est importante, elle s'accompagne de mani-

festations secondaires, telles que nausées, sueurs froides, pâleur, fatigue ou même vomissements. Une perturbation du contrôle réflexe des mouvements oculaires et de la posture peut entraîner une vision floue ou instable, une tendance à dévier latéralement lors de la marche, ou une instabilité et la chute. Le terme médical désignant la désorientation due à un dysfonctionnement de l'appareil de l'équilibre est «vertige»; celui-ci peut être provoqué par une atteinte de n'importe lequel des systèmes sensoriels contribuant à l'équilibre ou par un trouble de l'intégration centrale. Chaque année, seuls 1 à 2% de la population consultent un médecin pour des vertiges, mais l'incidence de la sensation de vertige et de déséquilibre augmente fortement avec l'âge. Le «mal des transports» est une forme de désorientation provoquée par des conditions environnementales artificielles, telles que transport passif en voiture ou en bateau, à la maîtrise desquelles notre système d'équilibration n'a pas été adapté au cours de l'évolution (Cramp-ton, 1990).

### Les vertiges d'origine vestibulaire

Les causes les plus fréquentes de troubles vestibulaires sont l'infection (labyrinthite vestibulaire) et le *vertige paroxystique positionnel bénin*, déclenché principalement par le décubitus latéral. Des crises récurrentes de vertige sévère, accompagnées d'hypoacousie et d'acouphènes dans une oreille, sont typiques d'un syndrome connu sous le nom de maladie de Ménière. Les lésions vestibulaires peuvent également être dues à des affections de l'oreille moyenne (dont les infections bactériennes, les traumatismes et les choléstéatomes), à des médicaments otoxiques (qui ne devraient être utilisés que dans les cas médicalement justifiés) et à des traumatismes crâniens.

### Les vertiges périphériques non vestibulaires

De nombreux cliniciens pensent que les atteintes osseuses de la colonne cervicale peuvent être une cause de vertige en modifiant les informations somato-sensorielles relatives aux mouvements de la tête ou en gênant l'irrigation sanguine de l'appareil vestibulaire. Les étiologies courantes sont les lésions du «coup du lapin» et les arthropathies. Le manque d'équilibre peut être dû parfois à une perte de sensibilité des pieds et des jambes associée au diabète, à l'alcoolisme, à des carences vitaminiques, à des lésions médullaires ou à diverses autres affections. Dans certains cas, l'origine de sensations vertigineuses ou de l'illusion de mouvement de l'environnement peut être mise en relation avec des déformations visuelles. Une telle altération des informations visuelles peut être due à une faiblesse des muscles oculaires ou se produire au cours de l'adaptation à des verres de lunette puissants ou à double foyer.

### Les vertiges centraux

La plupart des cas de vertiges peuvent être attribués à des troubles périphériques (surtout vestibulaires), mais des lésions du tronc cérébral, du cervelet et du cortex cérébral peuvent aussi être responsables de manifestations de désorientation. Les vertiges d'origine centrale s'accompagnent presque toujours d'autres signes nerveux centraux, tels que douleurs, fourmillements ou engourdissements de la face ou des membres, difficultés de la parole (dysarthrie) et difficultés à avaler (dysphagie), céphalées, troubles visuels et perte du contrôle de la motricité ou perte de connaissance. Les causes centrales les plus fréquentes de ces vertiges sont les troubles de l'irrigation sanguine du cerveau (allant de la migraine à l'accident vasculaire cérébral), l'épilepsie, la sclérose en plaques, l'alcoolisme et parfois les tumeurs. Des sensations vertigineuses et un déséquilibre passager peuvent être un effet secondaire d'une grande variété de médicaments, dont certains analogues d'usage courant, certains contraceptifs ou médicaments utilisés dans le traitement des affections cardio-vasculaires, du diabète, de la maladie de Parkinson et, en particulier, des médicaments à action centrale, tels que certains stimulants, sédatifs,

anticonvulsivants, antidépresseurs et tranquillisants (Ballantyne et Ajodhia, 1984).

### Le diagnostic et le traitement

Tous les cas de vertiges nécessitent un avis médical pour s'assurer que les affections graves (relativement rares) pouvant en être la cause soient identifiées et traitées. A court terme, des médicaments peuvent être administrés pour supprimer les symptômes de vertige aigu et une intervention chirurgicale sera proposée dans de rares cas. Dans les vertiges d'origine vestibulaire, les symptômes disparaissent généralement avec le temps, car les centres d'intégration s'adaptent aux informations vestibulaires anormales — à la façon dont les marins constamment exposés aux mouvements de leur navire acquièrent le « pied marin ». Pour ce faire, il est essentiel que le malade continue à avoir une grande activité pour stimuler son système de l'équilibre, même si cela provoque d'abord un malaise et des sensations vertigineuses. Les symptômes de vertiges étant inquiétants et gênants, ces malades peuvent avoir besoin d'une rééducation et d'un soutien psychologique pour lutter contre leur tendance naturelle à réduire leur activité (Beyts, 1987; Yardley, 1994).

### Les vertiges et le travail

#### Les facteurs de risque

Chez les travailleurs exposés aux solvants organiques, des sensations vertigineuses et une désorientation pouvant devenir chroniques sont des symptômes fréquents; de plus, une exposition prolongée peut faire apparaître des signes objectifs de dysfonctionnement du système de l'équilibre (par exemple, des réflexes vestibulo-oculaires anormaux), même chez des personnes n'éprouvant pas de sensation subjective de vertiges (Gyntelberg et coll., 1986; Möller et coll., 1990). Les barotraumatismes subis en avion ou lors de plongées peuvent léser les organes vestibulaires et provoquer une hypoacousie et un vertige brusques nécessitant un traitement immédiat (Head, 1984). D'après certaines constatations, l'hypoacousie provoquée par un bruit peut s'accompagner de lésions de l'appareil vestibulaire (van Dijk, 1986). Les personnes travaillant pendant de longues périodes devant un écran d'ordinateur se plaignent parfois de sensations vertigineuses; la cause en reste mal connue, mais elle peut être la combinaison d'une contracture de la nuque et de stimulations visuelles mobiles.

#### Les problèmes professionnels

Des crises inattendues de vertiges, telles que celles survenant dans la maladie de Ménière, peuvent se révéler dangereuses pour les personnes travaillant en hauteur, conduisant des véhicules, utilisant des engins dangereux ou responsables de la sécurité d'autres personnes. Une sensibilité accrue au mal des transports est un effet fréquent des dysfonctionnements du système d'équilibration et peut être gênante pour les personnes devant voyager.

### Conclusion

L'équilibre est assuré par un système multisensoriel complexe; la désorientation spatiale et le manque d'équilibre peuvent avoir des étiologies très variées et résulter en particulier d'affections du système vestibulaire ou du système central d'intégration des informations contribuant à l'orientation spatiale. En l'absence de lésions nerveuses centrales, la plasticité du système d'équilibration permet normalement une adaptation aux causes périphériques de désorientation, qu'il s'agisse de troubles de l'oreille interne affectant le vestibule ou de facteurs environnementaux provoquant le mal des transports. Les crises vertigineuses sont cependant souvent imprévisibles, alarmantes et invalidantes, et une rééducation peut s'avérer nécessaire pour rétablir la confiance du malade et ses fonctions d'équilibration.

## LA VISION ET LE TRAVAIL

Paule Rey et Jean-Jacques Meyer

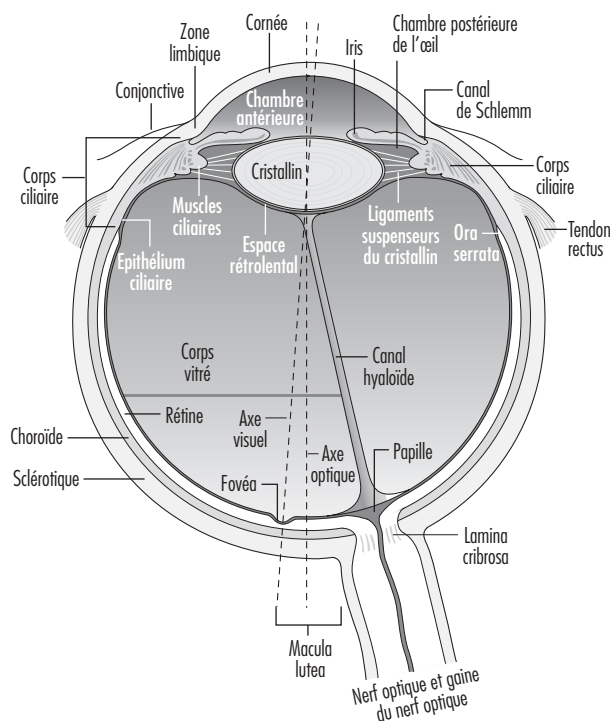
### L'anatomie de l'œil

L'œil est une sphère (Graham et coll., 1965; Adler, 1992) d'environ 20 mm de diamètre, placée dans l'orbite, qui est mue par six muscles (oculaires) attachés à la sclérotique, sa paroi externe (voir figure 11.8). En avant, la sclérotique est remplacée par la cornée qui est transparente. Derrière la cornée, dans la chambre antérieure, se trouve l'iris qui règle le diamètre pupillaire, orifice traversé par l'axe optique. Le fond de la chambre antérieure est formé par une lentille biconvexe appelée cristallin, dont la courbure est déterminée par la contraction des muscles ciliaires; ceux-ci sont fixés en avant à la sclérotique et en arrière à la membrane choroïde qui borde la chambre postérieure. Cette dernière est remplie par l'humeur vitreuse — liquide clair et gélatineux. La choroïde, surface interne de la chambre postérieure, est noire afin de prévenir les réflexions lumineuses parasites qui pourraient gêner l'acuité visuelle.

Les paupières contribuent à maintenir le film lacrymal produit par les glandes lacrymales et qui protège la surface antérieure de l'œil. Le clignement favorise la dispersion des larmes et leur évacuation vers le canal lacrymal qui se vide dans la cavité nasale. La fréquence du clignement varie beaucoup, en particulier en fonction de l'activité et de l'environnement lumineux; c'est pourquoi on l'utilise comme test en ergonomie. Ainsi, cette fréquence se ralentit lors de la lecture et quand la lumière est plus intense.

Il existe deux muscles dans la chambre antérieure: le sphincter de l'iris qui contracte la pupille et le muscle dilateur de la pupille qui l'élargit. Si un faisceau de lumière est dirigé vers un

Figure 11.8 • Représentation schématique de l'œil



Source: Brown, 1965.

œil normal, la pupille se contracte (réflexe pupillaire); il en va de même quand le regard se dirige vers un objet proche.

La rétine possède plusieurs couches internes de cellules nerveuses et une couche externe contenant deux types de photorécepteurs: les bâtonnets et les cônes. Ainsi, la lumière atteint les cônes et les bâtonnets en traversant la couche de cellules nerveuses et, selon un mécanisme non encore entièrement élucidé, génère des impulsions dans les cellules nerveuses qui, transportées le long des fibres optiques, atteindront le cerveau. Les cônes, au nombre de 4 à 5 millions, sont responsables de la vision nette et de la vision colorée; ils sont très denses au centre de la rétine, en particulier dans la fovéa qui constitue une petite dépression exempte de bâtonnets et où l'acuité visuelle est la meilleure. À l'aide de la spectrophotométrie, on a identifié trois types de cônes dont les pigments présentent un pic d'absorption soit dans le jaune, soit dans le vert, soit dans le bleu et qui rendent compte de la capacité de distinguer la couleur. Les bâtonnets, au nombre de 80 à 100 millions, sont responsables de la vision nocturne et deviennent de plus en plus nombreux vers la périphérie de la rétine. Ils jouent aussi un rôle déterminant dans la vision noir et blanc, de même que dans la perception du mouvement.

Les fibres nerveuses, accompagnées des vaisseaux sanguins qui alimentent la rétine, traversent la choroïde, la couche moyenne des trois couches constituant la paroi de la chambre postérieure, et quittent l'œil en formant le nerf optique en une région légèrement excentrée qui, dépourvue de photorécepteurs, est connue sous le nom de tache aveugle.

Les vaisseaux rétinien, les seules artères ou veines directement visibles, peuvent être observés avec un ophtalmoscope qui permet de faire pénétrer un faisceau lumineux à travers la pupille. Les images ainsi focalisées peuvent aussi être photographiées. Cet examen rétinoscopique, qui fait partie de l'examen médical de routine, permet d'apprécier la détérioration des vaisseaux, dans des maladies telles que l'artériosclérose, le diabète et l'hypertension pouvant entraîner des hémorragies et des exsudations dans la rétine et conduire à des altérations du champ visuel.

## Les propriétés de l'œil importantes pour le travail

### Le mécanisme de l'accommodation

Dans l'œil emmétrope (normal) au repos, les rayons lumineux qui traversent la cornée, la pupille et le cristallin convergent sur la rétine, produisant une image inversée qui se retourne dans les centres de la vision.

Quand l'œil regarde un objet lointain, le cristallin est aplati. S'il regarde un objet proche, le cristallin accommode — c'est-à-dire augmente sa puissance — grâce à la contraction des muscles ciliaires et acquiert, du fait de son élasticité, une forme plus bombée. La contraction pupillaire qui se produit simultanément améliore la qualité de l'image en réduisant les aberrations sphériques et chromatiques du système dioptrique et en augmentant la profondeur de champ.

Dans la vision binoculaire, l'accommodation s'accompagne nécessairement d'une convergence proportionnelle des deux yeux.

### Le champ visuel et le champ du regard

Le champ visuel (espace couvert par les deux yeux au repos) est limité par des obstacles anatomiques dans le sens horizontal (plus restreint du côté du nez) et dans le plan vertical (réduit par les rebords supérieurs de l'orbite). En vision binoculaire, le champ horizontal est d'environ 180 degrés et le champ vertical de 120 à 130 degrés. En vision photopique (vision de jour), la plupart des fonctions visuelles s'affaiblissent dans la périphérie du champ visuel; la perception du mouvement, au contraire, s'améliore. En vision mésopique (vision nocturne), il y a une perte considérable

d'acuité dans le centre du champ visuel où, comme on l'a vu, les bâtonnets sont moins nombreux.

Le champ du regard s'étend au-delà du champ visuel grâce à la mobilisation des yeux, de la tête et du corps; dans l'activité professionnelle, c'est le champ du regard qui compte surtout.

Les causes de réduction du champ visuel, qu'elles soient anatomiques ou physiologiques, sont multiples: rétrécissement pupillaire, opacité du cristallin, lésions pathologiques de la rétine, des voies ou des centres visuels; faible luminance de l'objet à percevoir; montures de lunettes de correction ou de protection, mouvement ou vitesse de l'objet à percevoir et d'autres encore.

### L'acuité visuelle

«L'acuité visuelle (AV) est l'aptitude à distinguer les détails fins d'un objet situé dans le champ de vision. Elle se définit par la dimension minimum de quelques aspects caractéristiques de l'objet que le sujet est capable d'identifier correctement» (Riggs, 1965). Une acuité visuelle élevée est la capacité de percevoir des petits détails. L'acuité visuelle définit la limite de discrimination spatiale accessible à l'œil.

La dimension rétinienne d'un objet dépend non seulement de sa dimension physique, mais aussi de sa distance à l'œil; c'est pourquoi on l'exprime en angle visuel (habituellement en minutes d'arc). L'acuité visuelle est la réciproque de cet angle.

Riggs (1965) décrit plusieurs sortes de mesures d'acuité. En pratique clinique et en médecine du travail, la tâche de reconnaissance, dans laquelle le sujet est prié de désigner l'objet-test et d'en situer certains détails, est la plus communément appliquée. Par commodité, l'acuité visuelle se mesure en ophtalmologie, relativement à une valeur dite «normale», sur des optotypes qui présentent des séries d'objets de dimensions différentes; ceux-ci doivent être vus à une distance standard.

En clinique, les tables de Snellen sont très largement utilisées pour déterminer l'acuité de loin; la dimension et la forme générale des objets sont conçues de manière à sous-tendre un angle de 1 mn à la distance standard qui varie de pays en pays (20 pieds entre l'optotype et l'œil aux États-Unis, 6 m dans la plupart des pays européens). Avec la table de Snellen, l'acuité maximale est donc de 20/20. Les optotypes contiennent également des objets plus grands, formant des angles de 1 mn pour des distances supérieures.

L'acuité visuelle d'un individu se calcule par la relation  $AV = D'/D$ , où  $D'$  est la distance de vision standard et  $D$  la distance à laquelle le plus petit objet correctement identifié par le sujet sous-tend un angle de 1 mn d'arc. Par exemple, l'acuité d'une personne est de 20/30 si, à une distance de vision de 20 pieds, cette personne peut seulement identifier un objet qui sous-tend un angle de 1 mn d'arc à 30 pieds.

Dans la pratique optométrique, les objets sont souvent des lettres ou des formes familières (pour les enfants ou pour les illettrés). Néanmoins, quand l'examen doit être répété, comme en psychophysique, il est préférable que les optotypes portent des caractères dont on ne peut pas se souvenir et qui ne sont associés à aucune valeur culturelle et ne dépendent pas du niveau d'instruction. C'est pour cette raison que l'usage des anneaux de Landolt est recommandé au niveau international, du moins pour les expériences scientifiques. Les anneaux de Landolt sont des cercles portant une brisure dont l'orientation doit être perçue et identifiée par le sujet.

Sauf chez les personnes âgées ou les porteurs de défauts de l'accommodation, l'acuité visuelle de loin et l'acuité visuelle de près évoluent parallèlement. La plupart des activités professionnelles réclament à la fois une bonne vision de loin (sans accommodation) et une bonne vision de près. Des tables de Snellen existent aussi pour la vision de près (voir figures 11.9 et 11.10). La table présentée à la figure 11.10 devrait être placée à 16 pouces (40 cm)

Figure 11.9 • Exemple de table de Snellen: anneaux de Landolt (acuité en valeurs décimales (distance de lecture non précisée))

				V=0,3
				V=0,4
				V=0,5
				V=0,6
				V=0,7
				V=0,8
				V=0,9

de l'œil; en Europe, des tables semblables existent pour la distance de 30 cm (la distance appropriée pour lire le journal).

Cependant, avec l'extension du travail informatisé, on s'intéresse de plus en plus à l'examen des opérateurs à une distance intermédiaire plus grande (60 à 70 cm d'après Krueger, 1992), afin de corriger convenablement les opérateurs sur écran.

#### Les appareils de mesure de l'acuité visuelle et le dépistage visuel

Pour le dépistage visuel en milieu de travail, on trouve sur le marché différents types d'appareils ayant beaucoup de choses en commun: on les nomme Orthorater, Visiotest, Ergovision, Titmus Optical C Vision Tester, C45 Glare Tester, Mesoptometer, Nyctometer, etc.

Ces appareils sont de petite taille; leur éclairage est indépendant de celui de la salle d'examen; ils offrent plusieurs tests visuels: non seulement l'acuité visuelle mono- et binoculaire en vision de près ou de loin (le plus souvent avec des optotypes non mémorisables), mais aussi la perception de la profondeur ou du relief, une rapide discrimination des couleurs, l'équilibre des axes du regard, etc. L'acuité visuelle de près peut être déterminée, pour certains d'entre eux, à distance courte et intermédiaire. Le plus récent de ces instruments fait appel à l'électronique pour fournir automatiquement le résultat imprimé de différents tests. Tous ces appareils peuvent être manipulés par du personnel non qualifié, après un simple apprentissage.

Ces appareils sont conçus pour le dépistage d'embauche, de même que pour l'examen périodique durant lequel on tient compte des exigences visuelles du poste de travail. On trouvera au

tableau 11.2 les niveaux d'acuité moyens requis pour remplir des tâches non qualifiées jusqu'à très qualifiées, correspondant à l'utilisation d'un appareil de dépistage particulier (Fox, 1973).

Les fabricants recommandent que les salariés soient examinés avec les lunettes qu'ils portent au travail. Fox (1973) souligne cependant que cette pratique peut aboutir à des résultats erronés. Ainsi, il peut arriver que les travailleurs portent, au moment du test, des lunettes qui ne correspondent plus à leur vue ou encore que leurs verres soient usés par l'exposition aux poussières ou à d'autres produits corrosifs. Parfois, les salariés se présentent à la salle d'examen avec les mauvaises lunettes. C'est pourquoi Fox (1973) préconise que, si la vision corrigée n'atteint pas 20/20 pour l'acuité de loin et de près, le salarié doit retourner chez un oculiste pour un examen approfondi et une réfractométrie. D'autres limites de ces appareils seront traitées plus loin dans le présent article.

#### Les facteurs ayant une incidence sur l'acuité visuelle

L'acuité visuelle trouve sa première limite dans la structure de la «mosaïque rétinienne». En vision diurne, elle peut dépasser 10/10 dans la fovéa et décroître rapidement quand on s'éloigne de quelques degrés du centre de la rétine; en vision nocturne, l'acuité très faible à nulle au centre peut atteindre 1/10 à la périphérie, du fait de la distribution des cônes et des bâtonnets qui a été décrite antérieurement (figure 11.11).

Le diamètre pupillaire agit de manière complexe sur la performance visuelle. Quand elle est dilatée, la pupille laisse passer

Tableau 11.2 • Acuité visuelle minimale demandée pour différents types d'activité (appareil Titmus Optical C Vision Tester), avec correction

#### Classe I: travail de bureau et administration

Acuité visuelle de loin: 20/30 à chaque œil et 20/25 en vision binoculaire  
Acuité visuelle de près: 20/25 à chaque œil et 20/20 en vision binoculaire

#### Classe II: travaux d'inspection

Acuité visuelle de loin: 20/35 à chaque œil et 20/30 en vision binoculaire  
Acuité visuelle de près: 20/25 à chaque œil et 20/20 en vision binoculaire

#### Classe III: opérateurs d'engins mobiles

Acuité visuelle de loin: 20/25 à chaque œil et 20/20 en vision binoculaire  
Acuité visuelle de près: 20/35 à chaque œil et 20/30 en vision binoculaire

#### Classe IV: travaux à la machine

Acuité visuelle de loin et de près: 20/30 à chaque œil et 20/25 en vision binoculaire

#### Classe V: manœuvres

Acuité visuelle de loin: 20/30 à chaque œil et 20/25 en vision binoculaire  
Acuité visuelle de près: 20/35 à chaque œil et 20/30 en vision binoculaire

#### Classe VI: mécaniciens et personnel de maîtrise

Acuité visuelle de loin: 20/30 à chaque œil et 20/25 en vision binoculaire  
Acuité visuelle de près: 20/25 à chaque œil et 20/20 en vision binoculaire

Source: Fox, 1973.

Figure 11.10 • Exemple de table de Snellen: adaptation des lettres de Sloan pour l'évaluation de la vision de près (40 cm) (acuité en valeurs décimales et en distances équivalentes)

Cm	Pouces				Distances équivalentes	Valeurs décimales														
620	256	O	S	N	R	H	0,06	$\frac{20}{333}$												
500	192	Z	C	D	V	O	N	0,08	$\frac{20}{250}$											
400	160	C	K	V	R	N	H	D	O	0,1	$\frac{20}{200}$									
310	128	D	H	Z	V	K	V	R	C	O	S	N	0,12	$\frac{20}{167}$						
250	96	R	N	H	S	O		K	D	C	Z	V	0,16	$\frac{20}{125}$						
200	80	V	R	N	H	Z		D	C	K	S	O	0,2	$\frac{20}{100}$						
160	64	S	O	C	Z	N		H	R	V	D	K	0,25	$\frac{20}{80}$						
125	48	N	H	R	O	C		C	V	H	R	N		V	Z	S	K	D	0,33	$\frac{20}{60}$
100	40	C	V	O	R	D		D	O	S	K	R		S	K	H	Z	N	0,4	$\frac{20}{50}$
80	32	H	S	V	Z	O		H	Z	D	O	V		R	K	N	C	D	0,5	$\frac{20}{40}$
60	24	R	C	D	E	N		K	R	C	N	E		D	H	Z	V	R	0,66	$\frac{20}{30}$
50	20	R	C	D	E	N		N	V	R	D	C		N	C	R	O	H	0,8	$\frac{20}{25}$
40	16	R	C	D	E	N		N	V	R	D	C		N	C	R	O	H	1,0	$\frac{20}{20}$
30	13	R	C	D	E	N		N	V	R	D	C		N	C	R	O	H	1,2	$\frac{20}{16,7}$

avantage de lumière dans l'œil, ce qui stimule la rétine; le flou dû à la diffraction de la lumière est réduit. Une pupille rétrécie, si elle a pour effet une réduction de l'éclairement rétinien, en diminuant les aberrations sphériques et chromatiques du cristallin, favorise néanmoins la vision nette.

Grâce au processus de l'adaptation, il est possible à l'être humain de voir aussi bien au clair de lune qu'en pleine lumière du soleil, alors même que le rapport des éclaircissements varie de 1 à 10 000 000. La sensibilité visuelle est si étendue que l'on a pris l'habitude de placer les intensités lumineuses sur une échelle logarithmique.

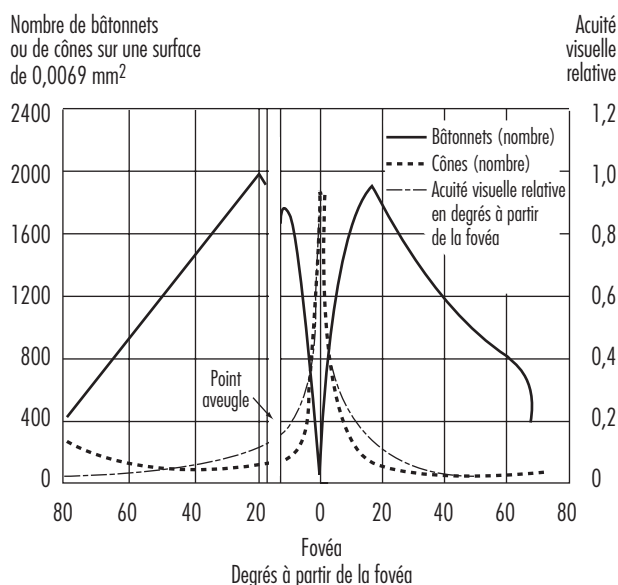
En entrant dans une chambre noire, on est d'abord totalement aveugle, puis les objets autour de soi deviennent perceptibles. A mesure que la lumière augmente, on assiste au passage de la vision dominée par les bâtonnets à la vision dominée par les cônes. Le changement de sensibilité spectrale qui accompagne ce phénomène s'appelle l'effet Purkinje. La rétine adaptée à l'obscurité est surtout sensible aux basses luminances, mais se caractérise par l'absence de vision colorée et par une faiblesse de la résolution spatiale (acuité visuelle basse); la rétine adaptée à la lumière est peu sensible aux basses luminances (il faut que les objets soient bien illuminés pour être perçus), mais se caractérise par un pou-

voir de séparation spatiale et temporelle élevé et par la vision colorée. Après diminution de sa sensibilité provoquée par une stimulation lumineuse intense, l'œil récupère cette sensibilité selon une progression caractéristique: on observe une phase rapide qui concerne les cônes et l'adaptation photopique, suivie d'une phase lente qui concerne les bâtonnets et l'adaptation scotopique; la zone intermédiaire concerne la vision mésopique.

Dans le milieu de travail, l'adaptation scotopique n'intéresse guère que des activités en chambre noire (comme dans la lecture des films en physique nucléaire ou la photographie en général) et la conduite nocturne (encore que la réflexion de la lumière des phares sur la route suffise à assurer une certaine luminance). Il est évident que la majorité des activités industrielles ou de bureau s'effectuent, sous éclairage naturel ou artificiel, dans des conditions diurnes correspondant à l'adaptation photopique. Néanmoins, avec l'arrivée des écrans d'ordinateur, on se trouve souvent aujourd'hui dans des conditions de faible luminance qui correspondent à l'adaptation intermédiaire mésopique.

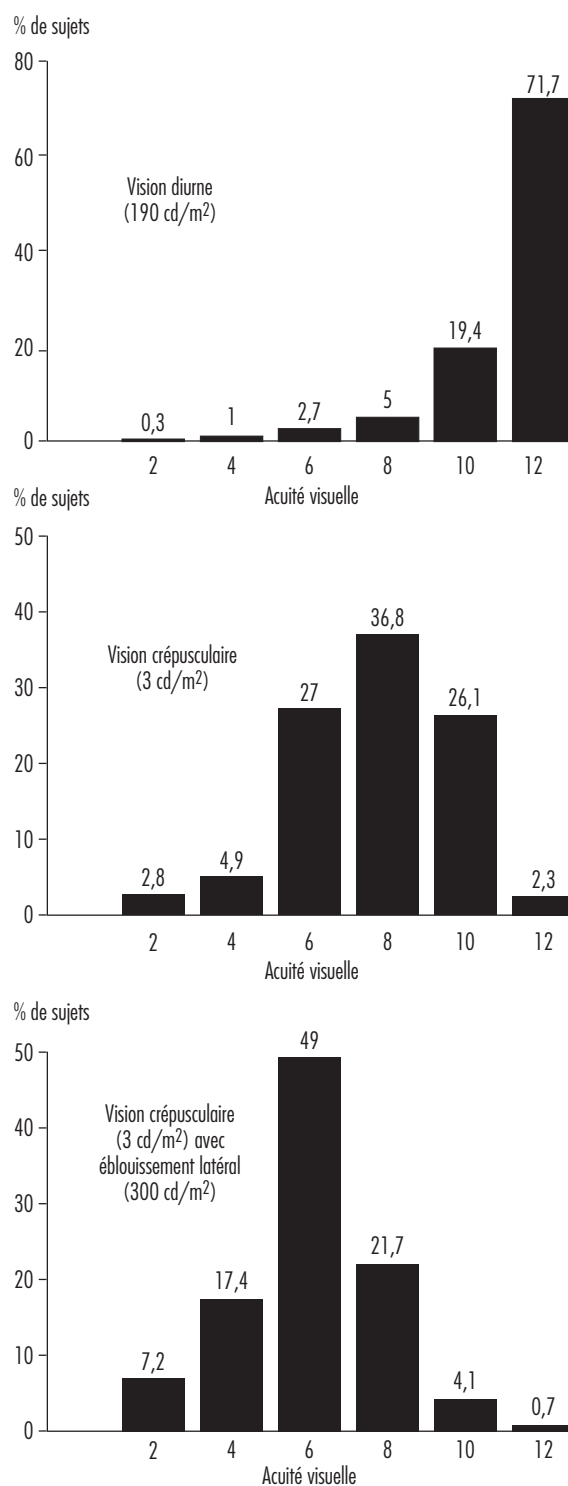
En médecine du travail, le comportement de groupes de personnes s'impose (par comparaison aux particularités individuelles) quand il s'agit de choisir l'aménagement le plus approprié des postes de travail. Les résultats obtenus à Genève par Meyer et ses collaborateurs en 1990, dans une étude portant sur 780 employés de bureau, montrent les changements de distribution des acuités visuelles avec la luminance. On s'aperçoit que, adaptés à la lumière du jour, la plupart des travailleurs examinés avec leur correction oculaire peuvent atteindre une acuité visuelle très élevée; aussitôt que la lumière environnante diminue, l'acuité visuelle moyenne diminue mais, en même temps, les valeurs se dispersent, tirées vers le bas par un certain nombre d'individus; cette tendance s'accroît quand une source éblouissante vient s'ajouter à cette ambiance lumineuse faible (voir figure 11.12). En d'autres termes, il est très difficile de prédire quelle performance un sujet présentera dans des conditions de faible éclairage, en ne mesurant son acuité que dans des conditions photopiques optimales.

Figure 11.11 • Densité des cônes et des bâtonnets dans la rétine rapportée à l'acuité visuelle pour les régions correspondantes du champ visuel



Source: Brown, 1965.

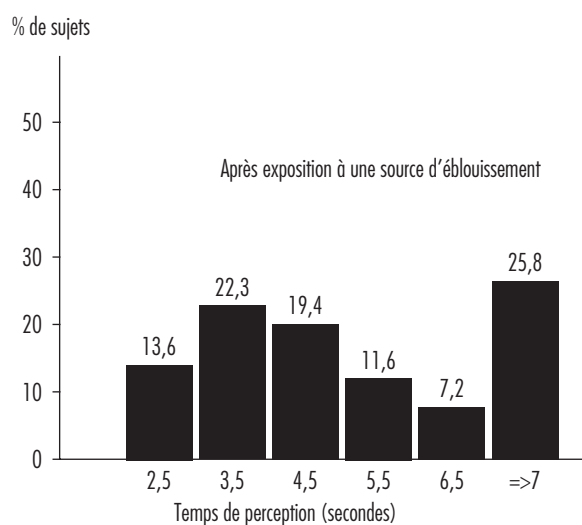
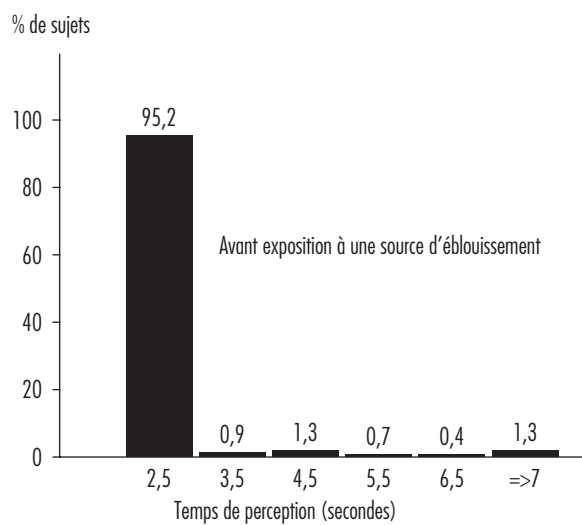
Figure 11.12 • Distribution des acuités visuelles dans un échantillon d'employés de bureau



On observe une réduction considérable de l'acuité. En conditions d'éclairage diurne, plus de la moitié des sujets atteignent 12/10; les appareils de mesure doivent en tenir compte. (Appareil Ergovision Essilor, distance de vision = 60 cm, symboles = lettres et nombres.) Trois niveaux différents d'illumination et d'adaptation. En haut: vision diurne; au milieu: vision crépusculaire; en bas: vision crépusculaire avec éblouissement latéral (N=780).

Source: Meyer et coll., 1990.

Figure 11.13 • Temps de perception de l'interruption d'un anneau de Landolt, avant et après exposition à une source d'éblouissement



Appareil Essilor C45, épreuve d'éblouissement, modifiée par Meyer et Richez. Résultats concernant 670 employés de bureau.

Source: Meyer et coll., 1990.

**L'éblouissement.** Si le regard se déplace d'une zone sombre vers une zone claire ou vice versa, ou si le sujet fixe momentanément un luminaire ou une fenêtre (avec des luminances variant entre 1 000 et 12 000 cd/m<sup>2</sup>), le changement d'adaptation ne concerne qu'une région limitée du champ visuel (adaptation locale). Le temps de récupération, après éblouissement perturbateur, peut alors atteindre plusieurs secondes, suivant l'éclairement et le contraste de l'objet à percevoir (Meyer et coll., 1986) (voir figure 11.13).

**Les images consécutives.** La désadaptation locale s'accompagne habituellement de la vision persistante d'une tache lumineuse, colorée ou non, qui produit un effet de voile ou de masque (c'est l'image consécutive). Les images consécutives ont été étudiées de manière approfondie pour mieux saisir certains phénomènes vi-

suels (Brown, 1965). Quand la stimulation visuelle a cessé, l'effet subsiste un certain temps; cette persistance explique, par exemple, pourquoi on peut percevoir une lumière continue, alors même que l'on regarde une lumière intermittente (voir plus loin) dont la fréquence est suffisamment élevée. De même, lorsqu'on regarde la nuit une file d'automobiles, l'œil peut percevoir une ligne lumineuse. Ces images consécutives se produisent dans l'obscurité quand la vue se porte sur un point lumineux; elles se produisent aussi en présence de surfaces colorées, laissant une sensation de couleur qui peut être gênante. C'est pour cette raison que des opérateurs peuvent être exposés à des images colorées persistantes après avoir travaillé, durant longtemps, devant leur écran et tourné le regard vers une autre surface de leur bureau.

Les images consécutives sont très compliquées. Par exemple, dans une expérience, on a constaté qu'une tache bleue apparaissait blanche durant les premières secondes d'observation, puis rose après trente secondes, et rouge vif après une minute ou deux. Dans une autre expérience, un champ rouge orangé apparaissait momentanément rose, puis, dans les dix à quinze secondes suivantes, tournait de l'orange au jaune pour prendre un aspect vert brillant qui persistait durant toute la fin de l'observation. Quand le point de fixation se déplace, l'image consécutive se déplace aussi (Brown, dans Graham et coll., 1965). Ces effets sont très désagréables pour les opérateurs sur écran.

La lumière diffuse émise par des sources éblouissantes a pour conséquence de diminuer le contraste objet-fond (effet de voile) et d'abaisser l'acuité. On parle alors d'éblouissement perturbant.

Les ergophtalmologistes décrivent aussi l'éblouissement inconfortable qui ne réduit pas l'acuité visuelle, mais qui occasionne une sensation pénible, voire douloureuse (IESNA, 1993).

Au poste de travail, le niveau d'éclairement doit être choisi en fonction des exigences de la tâche. Si, dans un environnement lumineux stable, il suffit de percevoir des formes, on peut se contenter d'un éclairage faible; mais dès qu'il s'agit de voir des détails fins qui nécessitent une acuité visuelle élevée, ou si le travail implique la discrimination des couleurs, alors l'éclairement rétinien doit être fortement accru.

Le tableau 11.3 indique les valeurs recommandées pour l'éclairage de quelques postes de travail dans différents secteurs d'activité (IESNA, 1993).

*La nature et la distribution spatiale des contrastes au poste de travail.* Du point de vue ergonomique, les rapports de luminance entre l'objet et son entourage immédiat et son environnement plus lointain ont été largement étudiés et on dispose de recommandations qui tiennent compte de la difficulté de la tâche visuelle (Verriest et Hermans, 1975; Grandjean, 1987).

Le contraste objet-fond est couramment défini par le rapport  $L_f - L_o / L_f$ , où  $L_f$  est la luminance du fond et  $L_o$  la luminance de l'objet; avec cette formule, le contraste varie de 0 à 1.

Comme l'indique la figure 11.14, l'acuité visuelle augmente (voir plus haut) avec le niveau d'éclairement et aussi avec l'augmentation du contraste objet-fond (Adrian, 1993). Cet effet est particulièrement marqué chez les sujets jeunes. Un large fond clair sur lequel se détache un objet foncé constitue la situation la plus efficace. Malheureusement, dans la réalité, le contraste n'atteint jamais l'unité. Par exemple, quand une lettre noire est imprimée sur une feuille de papier blanche, le contraste objet-fond n'atteint guère plus que 90%.

Dans la situation la plus favorable — c'est-à-dire, en présentation positive (lettres foncées sur fond clair) — l'acuité et le contraste sont liés, si bien que la visibilité peut être améliorée en agissant sur l'un ou l'autre facteur (en augmentant, par exemple, la dimension des lettres ou leur noirceur, comme dans la table de Fortuin) (Verriest et Hermans, 1975). Lorsque les écrans cathodiques sont arrivés sur le marché, les lettres ou symboles se présen-

Tableau 11.3 • Exemples de valeurs d'éclairage recommandées pour l'aménagement des postes de travail

Industrie du nettoyage des vêtements	
Nettoyage à sec et à la vapeur	500-1 000 lux (50-00 candelas)
Inspection et contrôle d'aspect	2 000-5 000 lux (200-500 candelas)
Réparations et retouches	1 000-2 000 lux (100-200 candelas)
Industrie des produits laitiers et d'autres matières dérivées du lait	
Stockage des bouteilles	200-500 lux (20-50 candelas)
Lavage des bouteilles	200-500 lux (20-50 candelas)
Remplissage, contrôle	500-1 000 lux ( 50-100 candelas)
Laboratoires	500-1 000 lux ( 50-100 candelas)
Équipement électrique	
Imprégnation	200-500 lux (20-50 candelas)
Bobinage de solénoïdes	500-1 000 lux (50-100 candelas)
Centrales électriques	
Équipement de climatisation	50-100 lux (50-10 candelas)
Auxiliaires, pompes, réservoirs	100-200 lux (10-20 candelas)
Industrie du vêtement	
Inspection, mesures	10 000-20 000 lux (1 000-2 000 candelas)
Coupe	2 000-5 000 lux (200-500 candelas)
Repassage	1 000-2 000 lux (100-200 candelas)
Couture	2 000-5 000 lux (200-500 candelas)
Empilage, marquage	500-1 000 lux (50-100 candelas)
Décatissage, bobinage	200-500 lux (20-50 candelas)
Services bancaires	
Services généraux	100-200 lux (10-20 candelas)
Bureaux	200-500 lux (20-50 candelas)
Guichets	500-1 000 lux (50-100 candelas)
Élevage laitier	
Granges	20-50 lux (2-5 candelas)
Aires de nettoyage	500-1 000 lux (50-100 candelas)
Secteurs de fourrage	100-200 lux (10-20 candelas)
Fonderies	
Fabrication des noyaux — pièces de petite dimension	1 000-2 000 lux (100-200 candelas)
Fabrication des noyaux — pièces de dimension moyenne	500-1 000 lux (50-100 candelas)
Modelage — pièces de dimension moyenne	1 000-2 000 lux (100-200 candelas)
Modelage — pièces de grande dimension	500-1 000 lux (50-100 candelas)
Contrôle d'aspect — pièces de petite dimension	1 000-2 000 lux (100-200 candelas)
Contrôle d'aspect — pièces de dimension moyenne	500-1 000 lux (50-100 candelas)

Source: IESNA, 1993.

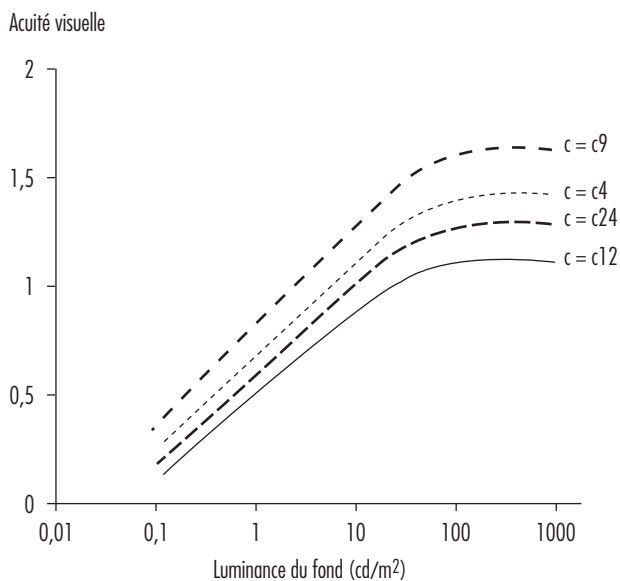
taient sur l'écran comme des points lumineux sur un fond sombre. Plus tard, des écrans ont été mis au point où les lettres apparaissaient en foncé sur un fond clair. De nombreux essais ont alors été conduits afin de vérifier si cette présentation favorisait la lecture. Aucun doute n'existe quant au fait que l'acuité visuelle est plus élevée en contraste positif; en outre, sur un écran noir, les réflexions parasites en provenance de sources éblouissantes sont plus nombreuses.

Le champ visuel fonctionnel est constitué par l'ensemble des surfaces embrassées par l'œil au poste de travail. On doit notamment se garder de créer des différences de luminosité trop importantes dans le champ visuel; suivant la dimension des surfaces en jeu, des changements d'adaptation générale ou locale apparaissent qui gênent l'exécution de la tâche. De plus, pour stimuler la performance, il est souhaitable que l'emplacement où s'effectue la tâche soit plus clair que son entourage immédiat et que les surfaces plus éloignées soient légèrement plus sombres.

*Le temps de présentation de l'objet.* La capacité de détection d'un objet dépend directement de la quantité de lumière pénétrant dans l'œil; or, cette quantité est liée à l'intensité et à la surface de l'objet, ainsi qu'au temps durant lequel il apparaît (tests de présentation tachystoscopique). L'acuité visuelle diminue quand la durée de présentation se situe au-dessous de 100 à 500 ms (millisecondes).

*Les mouvements de l'œil ou de la cible.* La perte de performance se manifeste en particulier durant les saccades; néanmoins, la stabilité totale de l'image n'est pas requise pour atteindre la meilleure résolution. On a montré que les vibrations, du type de celles des machines de chantier ou des tracteurs, pouvaient agir négativement sur l'acuité visuelle.

Figure 11.14 • Relation entre l'acuité et la luminance pour quatre contrastes dans le cas d'un objet sombre sur fond clair recevant un éclairage croissant



L'acuité augmente d'abord rapidement, puis lentement jusqu'à un plateau; pour toutes les acuités, c'est le meilleur contraste qui assure la meilleure performance.

Source: Adrian, 1993.

*La diplopie.* L'acuité visuelle est plus élevée en vision binoculaire qu'en vision monoculaire. Dans la vision binoculaire, les deux axes optiques doivent converger sur l'objet à percevoir, de manière que son image tombe dans des régions correspondantes de la rétine de chaque œil. Cela est rendu possible par l'activité des muscles oculaires. Si leur coordination est défaillante, des images doubles, plus ou moins transitoires, peuvent se former, comme on en observe dans l'extrême fatigue visuelle, et entraîner des sensations désagréables (Grandjean, 1987).

En bref, le pouvoir séparateur de l'œil est dépendant du type d'objet à percevoir et de l'environnement lumineux dans lequel on le mesure. Au cabinet médical, ces conditions sont optimales: contraste objet-fond le plus élevé possible, adaptation franchement photopique, caractères aux bords francs, présentation de l'objet sans limite de temps; enfin, une certaine redondance des signaux (par exemple, plusieurs lettres d'une même dimension sur une table de Snellen). De plus, l'acuité visuelle déterminée pour des raisons de diagnostic est une performance maximale et unique, sans intervention de la fatigue accommodative. L'acuité clinique reflète mal en cela la performance visuelle atteinte au poste de travail. Qui plus est, une bonne acuité clinique ne garantit pas nécessairement l'absence de gêne dans le travail où les conditions de confort visuel individuel sont rarement réalisées. Comme l'a souligné Krueger (1992), les objets qu'il appartient de distinguer au poste de travail sont très souvent flous et faiblement contrastés, les luminances de fond sont inégalement réparties, sans parler des nombreuses sources éblouissantes qui suscitent des effets de voile et d'adaptation locale, etc. D'après nos calculs, les résultats de l'examen clinique ne comportent pas un pouvoir prédictif fort quant à la quantité de fatigue et à la nature de cette fatigue rencontrée, par exemple, chez les opérateurs sur écran. Un appareillage de laboratoire plus proche des conditions de travail s'est révélé un peu meilleur (Rey et Bousquet, 1990; Meyer et coll., 1990).

Krueger (1992) a donc raison quand il affirme que l'examen ophtalmologique n'est guère approprié en médecine du travail et en ergonomie, que l'on devrait mettre au point de nouveaux tests et que les installations de laboratoire existantes devraient être mises à disposition des praticiens.

### La vision du relief, la vision stéréoscopique

La vision binoculaire permet de réaliser une image unique par synthèse des images reçues par les deux yeux. Les analogies entre ces images donnent lieu à une coopération active qui constitue le mécanisme essentiel du sens de la profondeur et du relief. La vision binoculaire a en plus la propriété d'agrandir le champ visuel, d'améliorer d'une manière générale la performance visuelle, de soulager la fatigue et de renforcer la résistance à l'éblouissement.

Quand la fusion des deux yeux est insuffisante, la fatigue visuelle peut apparaître plus tôt.

La sensation du relief et la perception de la profondeur, sans atteindre l'efficacité de la vision binoculaire dans l'appréciation du relief des objets relativement proches, sont néanmoins accessibles à la vision monoculaire, par le truchement de phénomènes qui ne réclament pas la disparité binoculaire. Nous savons que la dimension des objets ne change pas; c'est pourquoi la dimension apparente intervient sur notre appréciation de la distance; ainsi, les images rétiniennes de faible dimension évoqueront des objets lointains et inversement (dimension apparente). Les objets proches tendent à cacher des objets plus éloignés (on parle d'interposition). Le plus brillant de deux objets, ou celui dont la couleur est plus saturée, semble plus proche. L'environnement joue aussi un rôle: les objets plus lointains se perdent dans la brume. Deux lignes parallèles semblent se rejoindre à l'infini (c'est l'effet de perspective). Enfin, si deux cibles se déplacent à la même vitesse, celle

dont la vitesse de déplacement rétinien est plus lente apparaîtra plus éloignée de l'œil.

En fait, la vision monoculaire ne constitue pas un obstacle majeur dans la plupart des situations de travail. Il faut que le sujet s'habitue au rétrécissement de son champ visuel, ainsi qu'à la possibilité, plutôt exceptionnelle, que l'image de l'objet tombe sur la tache aveugle (on sait qu'en vision binoculaire, une même image ne tombe jamais en même temps sur la tache aveugle des deux yeux). Il faut noter aussi qu'une bonne vision binoculaire ne s'accompagne pas nécessairement d'une bonne vision du relief (stéréoscopique), car celle-ci dépend aussi de processus centraux complexes.

Pour toutes ces raisons, les contre-indications à l'emploi portant sur la vision stéréoscopique devraient être abandonnées au profit d'un examen approfondi, par l'ophtalmologue, des travailleurs. Des règlements et des recommandations existent cependant en la matière et la vision stéréoscopique est censée être indispensable dans des tâches telles que la conduite de grues, la bijouterie et la découpe. Il ne faut pas oublier toutefois que les nouvelles technologies peuvent modifier radicalement la nature du travail; ainsi, les machines-outils à commande numérique exigent probablement moins que les anciennes machines une vision stéréoscopique puissante.

En matière de conduite automobile, la réglementation diffère de pays à pays. Au tableau 11.4, on trouvera les exigences françaises pour la conduite soit de véhicules légers, soit de poids lourds. Les lecteurs américains se reporteront au règlement publié par l'Association médicale américaine (American Medical Association). Fox (1973) mentionne que, pour le ministère des Transports aux États-Unis, les conducteurs de véhicules commerciaux devaient, en 1972, avoir une acuité visuelle d'au moins 20/40, avec ou sans verres de correction; un champ visuel d'au moins 70 degrés était exigé pour chaque œil. Il fallait aussi pouvoir reconnaître les couleurs des feux de signalisation; mais, aujourd'hui, la distinction peut être faite non seulement par la couleur, mais aussi par la forme et la disposition des feux.

### Les mouvements des yeux

On en décrit plusieurs types qui ont tous pour objectif de permettre à l'œil de tirer bénéfice de toutes les informations contenues dans les images. Le système de fixation nous permet de maintenir en place, au niveau des récepteurs de la fovéa, l'objet qui peut alors être examiné dans la région rétinienne possédant le pouvoir de résolution le plus élevé. Néanmoins, les yeux sont constamment le lieu de micromouvements (trémor). Les saccades sont des mouvements rapides, induits lors d'un acte d'exploration visuelle, dont le but est de déplacer le regard d'un détail à l'autre de l'objet immobile; le cerveau perçoit ce mouvement imprévu comme le déplacement d'une image à travers la rétine. On rencontre cette illusion de mouvement dans les atteintes pathologiques du système nerveux central et de l'organe vestibulaire. Les mouvements de poursuite sont partiellement volontaires quand il s'agit de traquer de relativement petits objets, mais deviennent pratiquement irrépressibles quand on a affaire à de très grands objets. Plusieurs mécanismes de suppression d'images (dont les saccades) permettent de préparer la rétine à recevoir de nouvelles informations.

Les illusions du mouvement (mouvements autocinétiques) d'un point lumineux ou d'un objet immobile, telles que le mouvement d'un pont sur un cours d'eau, s'expliquent surtout par la persistance rétinienne et des conditions de vision non intégrées dans notre système central de référence. L'effet consécutif peut n'être qu'une simple erreur d'interprétation d'un message lumineux (parfois pernicieuse en milieu de travail) ou aboutir à des troubles neurovégétatifs graves. Les illusions causées par des figures statiques sont bien connues. Les mouvements des yeux lors de la lecture ont été mentionnés ci-dessus.

Tableau 11.4 • Exigences visuelles pour l'obtention du permis de conduire en France

Acuité visuelle (avec correction)	
Véhicules légers	Au moins 6/10 pour l'acuité binoculaire et au moins 2/10 pour l'œil le moins bon
Poids lourds	Au moins 10/10 pour l'acuité binoculaire et au moins 6/10 pour l'œil le moins bon
Champ visuel	
Véhicules légers	Pas de permis s'il y a une réduction du champ périphérique par un œil unique, ou lorsque l'acuité d'un des deux yeux est inférieure à 2/10
Poids lourds	Intégrité totale des champs visuels (pas de réduction du champ, pas de scotome)
Nystagmus (mouvements oculaires spontanés)	
Véhicules légers	Pas de permis si l'acuité visuelle binoculaire est inférieure à 8/10
Poids lourds	Aucun défaut en vision de nuit n'est accepté

### La fusion de la lumière papillotante et la courbe de de Lange

Quand l'œil est stimulé par une succession de lumières brèves, il ressent tout d'abord le papillotement puis, avec l'élévation de la fréquence, il éprouve l'impression d'une luminance stable: c'est la fréquence critique de fusion. Si la lumière stimulante oscille de manière sinusoïdale, le sujet peut éprouver la fusion pour toutes les fréquences situées au-dessous de la fréquence critique, pour autant que l'on réduise le taux de modulation de la stimulation. La courbe de de Lange, qui réunit tous ces seuils, subit différentes transformations quand la stimulation est modifiée: la courbe s'infléchit quand on réduit la luminance de la surface stimulante ou si le contraste entre celle-ci et son environnement lumineux décroît; des altérations du même genre peuvent s'observer sur la courbe de référence dans le cas de pathologies rétinienne ou de traumatisme crânien (Meyer et coll., 1971) (voir figure 11.15).

C'est pourquoi il faut se montrer prudent quand on prétend interpréter la chute des fréquences critiques de fusion en termes de fatigue visuelle due au travail.

La médecine du travail devrait faire un meilleur usage de la lumière intermittente pour détecter des lésions rétiniennes de petite dimension ou des troubles fonctionnels (dans les premiers temps d'une intoxication, par exemple, on peut observer une élévation de la courbe, laquelle sera suivie d'une chute quand l'intoxication deviendra plus sévère). Cette technique d'exploration — qui ne modifie pas l'adaptation rétinienne et qui ne nécessite pas d'être utilisée avec une correction optique parfaitement ajustée — est aussi très utile pour le suivi de la récupération fonctionnelle durant et après un traitement (Meyer et coll., 1983) (voir figure 11.16).

### La vision colorée

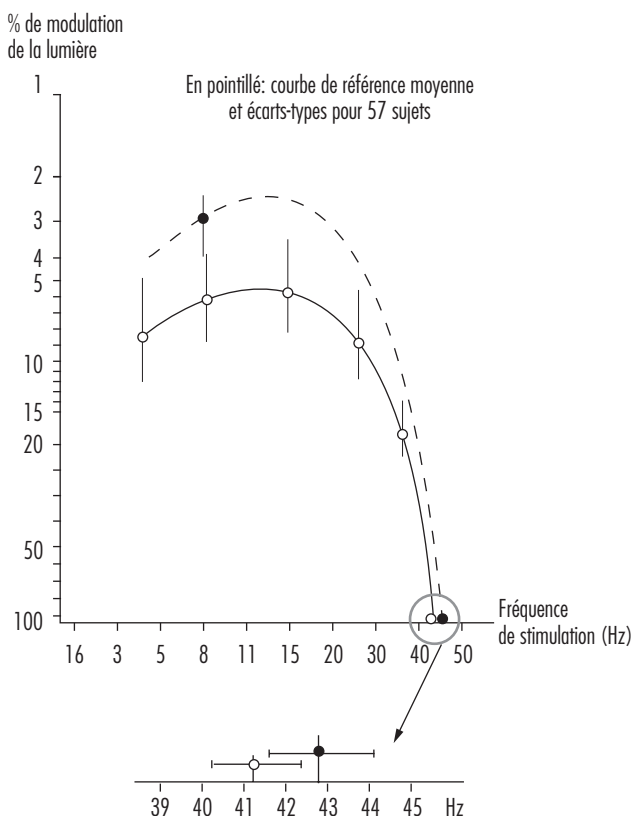
La sensation colorée est liée à l'activité des cônes et n'existe donc qu'en cas d'adaptation photopique ou mésopique. Pour que le système d'analyse des couleurs fonctionne d'une manière satisfaisante, la luminance des objets à percevoir doit être au moins de 10 cd/m<sup>2</sup>. De façon générale, trois sources colorées (couleurs primaires, rouge, vert et bleu) suffisent, par leurs combinaisons, à

reproduire toute une gamme de sensations colorées. On observe, d'autre part, un phénomène d'induction de contraste coloré entre deux couleurs qui se renforcent mutuellement: la paire vert-rouge et la paire jaune-bleu.

Les deux théories de la sensation colorée, la trichromatique et la dichromatique, ne s'excluent pas; la première s'appliquerait à l'étage des cônes et la seconde aux niveaux plus centraux du système visuel.

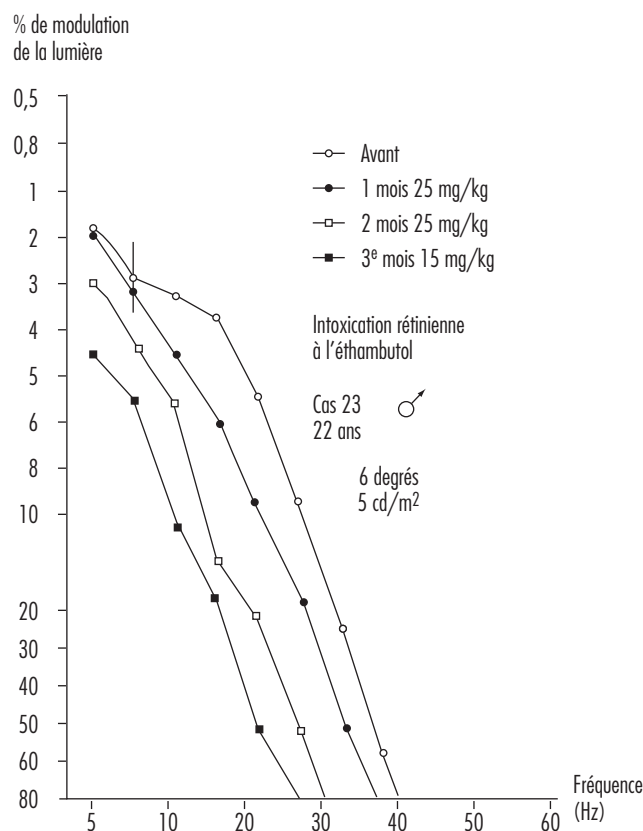
Pour comprendre comment on perçoit les couleurs d'objets se détachant sur un fond lumineux, il faut faire appel à d'autres concepts. Une même couleur peut en effet être produite par différents types de rayonnements; pour reproduire fidèlement une couleur donnée, il faut donc connaître la composition spectrale des sources lumineuses et le spectre de réflectance des pigments. L'indice de rendu des couleurs des éclairagistes permet de sélectionner les tubes fluorescents en fonction des besoins. Notre œil a développé la faculté de détecter de très faibles changements de tonalité d'une surface obtenus par un changement de la composition spectrale de cette surface; les couleurs spectrales (l'œil en distingue plus de 200) recrées

Figure 11.15 • Courbes de fusion critique d'un stimulus lumineux intermittent (courbes de de Lange), liant la fréquence de la stimulation à son amplitude de modulation au seuil. Moyenne et écart-type de 43 patients souffrant d'un traumatisme crânien (courbe pleine) et de 57 sujets témoins (courbe discontinue)



Source: Meyer et coll., 1971.

Figure 11.16 • Courbes de de Lange chez un jeune homme au cours d'un traitement à l'éthambutol. Ce test perceptif permet d'observer l'effet secondaire sur la rétine de ce médicament, en comparant les courbes avant et après traitement



Source: Meyer et coll., 1983.

par des mélanges de lumières monochromatiques ne représentent qu'une petite partie de toutes les sensations colorées possibles.

A l'exception des activités telles que le contrôle de l'aspect des produits et celles des décorateurs, etc., où la couleur doit être correctement identifiée, il convient de ne pas exagérer l'importance des anomalies de la vision colorée en milieu de travail. De plus, y compris chez les électriciens, d'autres repères (la dimension ou la forme, par exemple) peuvent remplacer la couleur.

Les dyschromatopsies peuvent être congénitales ou acquises (dégénérescences). Chez les trichromates anormaux, l'altération peut toucher la sensation fondamentale rouge (type Dalton), la verte ou la bleue (anomalie la plus rare). Chez les dichromates, le système des trois fondamentales est réduit à deux. Dans la deutéranopie, c'est la fondamentale verte qui manque. Dans la protanopie, c'est la disparition de la fondamentale rouge; bien que moins fréquente, cette anomalie, qui s'accompagne d'une perte de luminosité dans la gamme des rouges, mérite que l'on y prête attention dans le milieu de travail, en évitant notamment les affichages rouges, surtout s'ils ne sont pas très bien éclairés. Notons encore que ces insuffisances de la vision colorée peuvent se retrouver, à des degrés divers, chez le sujet dit normal, ce qui renforce encore la nécessité d'utiliser les couleurs avec prudence, par exemple, de ne pas les multiplier. Il faut enfin garder en

mémoire que seuls les gros défauts sont détectés par les appareils de dépistage.

### Les défauts de réfraction

Le *punctum proximum* (Weymouth, 1966) se trouve à la distance la plus courte où peut encore se réaliser la vision nette; le *punctum remotum*, le point le plus éloigné, se situe, chez l'œil emmétrope, à l'infini. Dans la myopie, le *punctum remotum* est situé en avant de la rétine; cet excès de puissance se corrige par des verres concaves. Pour l'œil hyperope ou hypermétrope, le *punctum remotum* se situe en arrière de la rétine; ce défaut de puissance se corrige par des verres convexes (voir figure 11.17).

Dans l'hypermétropie légère, le défaut est corrigé spontanément par l'accommodation et peut être ignoré par l'individu qui en est atteint. Chez les myopes qui ne portent pas leurs lunettes, la perte d'accommodation peut être compensée par le rapprochement du *punctum remotum*.

Dans l'œil idéal, la surface de la cornée devrait être parfaitement sphérique; dans la réalité, les yeux présentent souvent des différences de courbure sur les différents méridiens (c'est l'astigmatisme); la réfraction est plus forte quand la courbure est plus accentuée, de sorte que les rayons issus d'un point lumineux ne forment pas une image ponctuelle sur la rétine. Ces défauts, quand ils sont importants, se corrigent à l'aide de verres cylindriques (voir le diagramme du bas à la figure 11.17); dans l'astigmatisme irrégulier, les lentilles de contact sont recommandées. L'astigmatisme devient particulièrement gênant dans la conduite nocturne ou dans le travail sur écran cathodique, c'est-à-dire dans des conditions où les signaux lumineux se détachent en clair sur un fond sombre, ou lors de l'utilisation d'un microscope binoculaire.

Les lentilles de contact ne devraient pas être portées aux postes de travail où l'air est trop sec, ou dans le cas de formation de poussières (Verriest et Hermans, 1975).

Dans la presbytie, qui est due à la perte d'élasticité du cristallin avec l'âge, c'est l'amplitude d'accommodation qui est réduite, soit la distance qui sépare le *punctum proximum* et le *punctum remotum*; celle-ci (d'environ 10 cm à l'âge de 10 ans) se réduit de plus en plus à mesure que l'on vieillit. La correction est assurée par des verres convergents, à foyer unique ou à foyers multiples; ces derniers corrigent la vue pour des distances toujours plus rapprochées de l'objet (généralement jusqu'à 30 cm), en prenant en compte que les objets les plus proches se perçoivent habituellement dans la partie inférieure du champ visuel, alors que la partie haute des lunettes est réservée à la vision de loin. On propose aujourd'hui des lunettes pour la lecture sur écran qui sont différentes du type décrit ci-dessus. Les verres dits progressifs estompent quasiment les limites entre les zones de correction. Il ne faut toutefois pas oublier que les verres progressifs demandent une accoutumance encore plus grande que pour les autres types de verres à multiples foyers, car leur champ de vision nette est très étroit (Krueger, 1992).

Quand la tâche visuelle réclame l'alternance de la vision de près et de la vision de loin, on recommande des lunettes bifocales ou trifocales et même des verres progressifs. Cependant, il faut savoir que le port de verres à foyers multiples peut modifier profondément la posture de l'opérateur. Ainsi, les opérateurs sur écran dont la presbytie est corrigée par des verres bifocaux habituels auront tendance à renverser la tête en arrière, ce qui pourra engendrer des douleurs à la nuque et aux épaules. Les fabricants conseillent alors différents modèles de verres progressifs. Une solution supplémentaire consiste à placer l'écran plus bas, dans la direction de lecture.

La mise en évidence des défauts de réfraction (qui sont fort nombreux dans la population active) est tributaire des moyens de mesure. Les tables de Snellen accrochées au mur ne donnent pas