

PIERRE ÉTÉVENON

DU RÊVE
A L'ÉVEIL

*Illustrations
de Sylvie Guillou*

Albin Michel

Chapitre V

CARTOGRAPHIE D'UNE NUIT DE SOMMEIL ET DE RÊVE

« La carte n'est pas le territoire. »

A.KORZYBSKI

« Une métaphore est une carte géographique de l'esprit.

L'analogie est la clé de la pensée métaphorique. En fait, notre pensée évolue ainsi ; nous comprenons ce qui nous est étranger par analogie avec ce qui nous est familier. Quand vous recherchez des idées, un excès de pensée logique peut court-circuiter votre processus créatif. La raison est que la phase embryonnaire est gouvernée par une logique différente que l'on peut qualifier de métaphorique, fantastique, diffuse, elliptique et ambiguë.

L'intelligence est notre aptitude à reconnaître des " modèles " qui ensuite gouvernent notre esprit. »

Roger VON OECH

De l'analyse de l'EEG à la cartographie EEG

C'est D. O. Walter qui, en 1963, a introduit *l'analyse spectrale de Fourier** de l'électroencéphalogramme à partir de programmes d'ordinateurs spécialement mis au point [1]. Cette méthode décompose l'EEG en ses diverses fréquences composantes (*figure 18*, axe horizontal de fréquences), chacune possédant une puissance électrique (*figure 18*, axe vertical en décibels) qui est proportionnelle au carré de l'amplitude EEG.

L'analyse de l'EEG a donné lieu à la publication de plus de 800 articles et de nombreux ouvrages [2, 3, 4, 5, 6] et en particulier à de nombreuses applications en pharmacologie clinique et pharmaco-électroencéphalographie [7]. L'analyse spectrale d'un tracé EEG permet d'obtenir des valeurs numériques, des paramètres tels que la puissance électrique ou l'amplitude moyenne (en valeurs absolues en microvolts ou en valeurs relatives en pourcentages), la fréquence moyenne, etc. Ces paramètres décrivent ainsi numériquement, quantitativement, l'EEG analysé sur la période temporelle choisie (depuis 2 secondes, 6 secondes, jusqu'à 2 minutes 30 ou 5 minutes d'EEG selon le cas), et aussi après décomposition dans des bandes de fréquence caractéristiques (delta, thêta, alpha, bêta 1, bêta 2). Cette quantification d'une période donnée d'enregistrement EEG permet d'effectuer ensuite des analyses statistiques afin de comparer entre elles plusieurs périodes enregistrées successivement

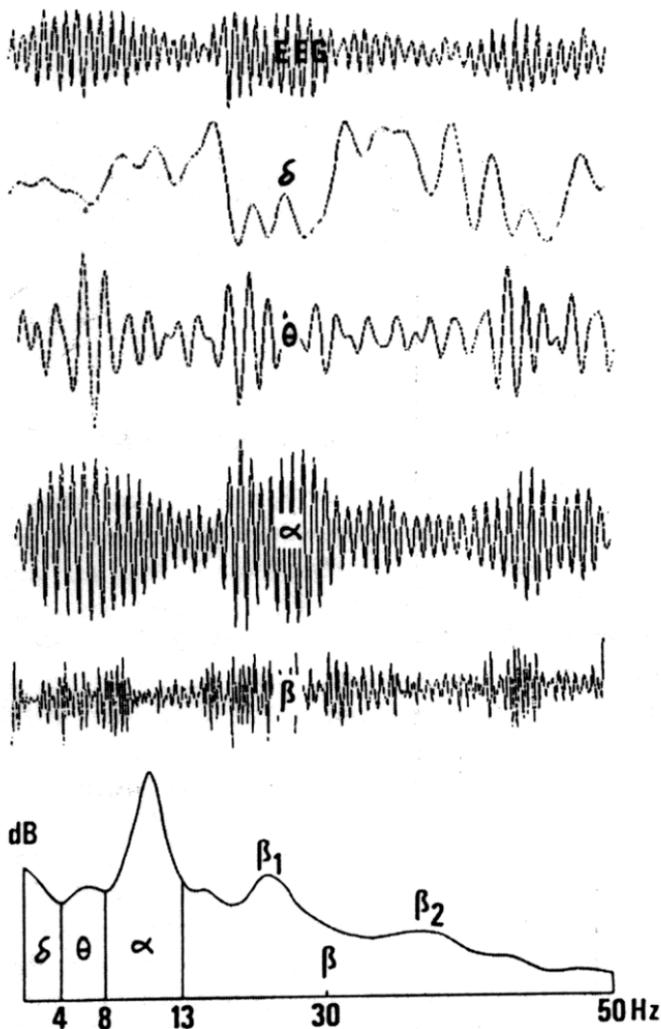


Figure 18 : Analyse spectrale d'un fragment d'EEG d'éveil calme. L'EEG enregistré chez un sujet relaxé, les yeux fermés, donne lieu au calcul du spectre de puissance (en bas de la figure). L'intensité spectrale est définie verticalement en décibels (dB) en fonction des fréquences (en Hertz : Hz) de l'axe horizontal. L'EEG est décomposable en activités électriques dans des bandes de fréquences qui correspondent à des portions du spectre de puissance (delta, thêta, alpha, bêta).

chez un même sujet (yeux fermés, yeux ouverts, calcul mental, tâche visuo-spatiale, tâches motrices) ou chez un groupe de sujets ou de malades.

Si l'analyse spectrale est effectuée simultanément sur 16 dérivations EEG ou plus, enregistrées en même temps sur le scalp, à partir des valeurs d'analyses spectrales de ces 16 tracés EEG, il est alors possible d'obtenir, par calcul informatisé, des images d'activités électriques cérébrales des cartes EEG [II-31, 8, 9, 10, 11]. C'est ainsi que la figure 19 présente la position des 16 électrodes d'enregistrement EEG (de A à P), sur le scalp vu du dessus, pour le sujet que nous avons présenté dans le dernier chapitre et qui fut enregistré en contrôle, avant la nuit de sommeil, 5 minutes yeux ouverts, en état d'éveil actif [11] et 5 minutes yeux fermés, en état d'éveil calme.

Pour chaque enregistrement effectué, les valeurs expérimentales des puissances électriques et des amplitudes moyennes (racines carrées des puissances) pour chaque dérivation* d'EEG furent calculées par analyse spectrale [6, 9]. Ces valeurs sont indiquées sur la *figure 19* pour l'exemple de l'enregistrement effectué les yeux fermés. Elles présentent des valeurs différentes pour chaque position d'électrode sauf sur les électrodes centrales (C et G). Le minimum d'amplitude apparaît en temporal gauche (69 microvolts pour l'électrode placée en J) et le maximum d'amplitude en occipital gauche (169 microvolts pour l'électrode placée en A) qui correspond au tracé EEG de la *figure 18* présentant l'activité alpha la plus importante. Précisons que la « référence* » utilisée était la moyenne d'un « montage référentiel » de 16 électrodes enregistrées simultanément (référence dite moyenne commune), cela afin d'obtenir une meilleure définition et précision des cartes EEG [12]. Remarquons alors qu'il existe une différence de 100 microvolts d'amplitude EEG entre le maximum occipital gauche (en A) et en temporal gauche (en J). Si nous décidons de subdiviser cet écart en dix échelons de 10 microvolts chacun, un programme d'ordinateur spécialement élaboré peut permettre à partir de ces 16 valeurs expérimentales (*figure 19*) de tracer des « lignes iso-amplitude » qui délimitent les 10 zones ainsi définies entre le maximum et le minimum d'amplitude

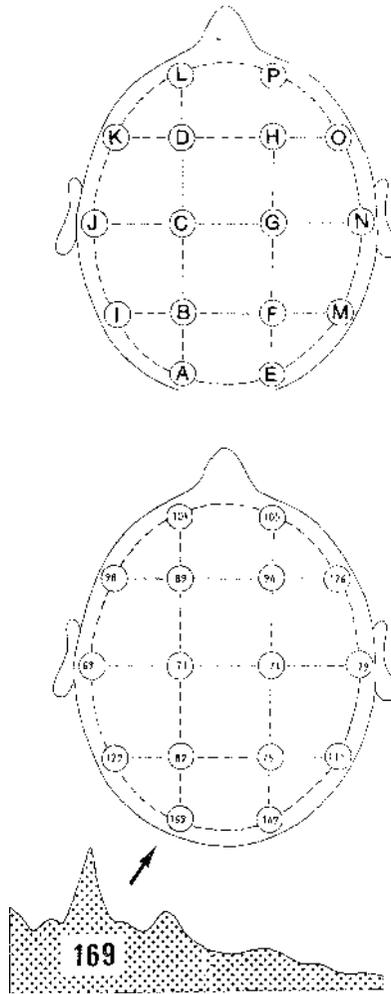


Figure 19 : Valeurs numériques d'amplitudes de l'EEG d'un enregistrement de veille calme, yeux fermés. Le positionnement des électrodes est repéré par des lettres sur le schéma du haut. Après analyse spectrale, les amplitudes moyennes d'un enregistrement de cinq minutes varient entre $169 \mu V$ en occipital gauche (A) et $69 \mu V$ en temporal gauche (1), le minimum correspond à une aire auditive activée (en J) et le maximum à une aire visuelle (en A) désactivée (rythme alpha occipital les yeux fermés).

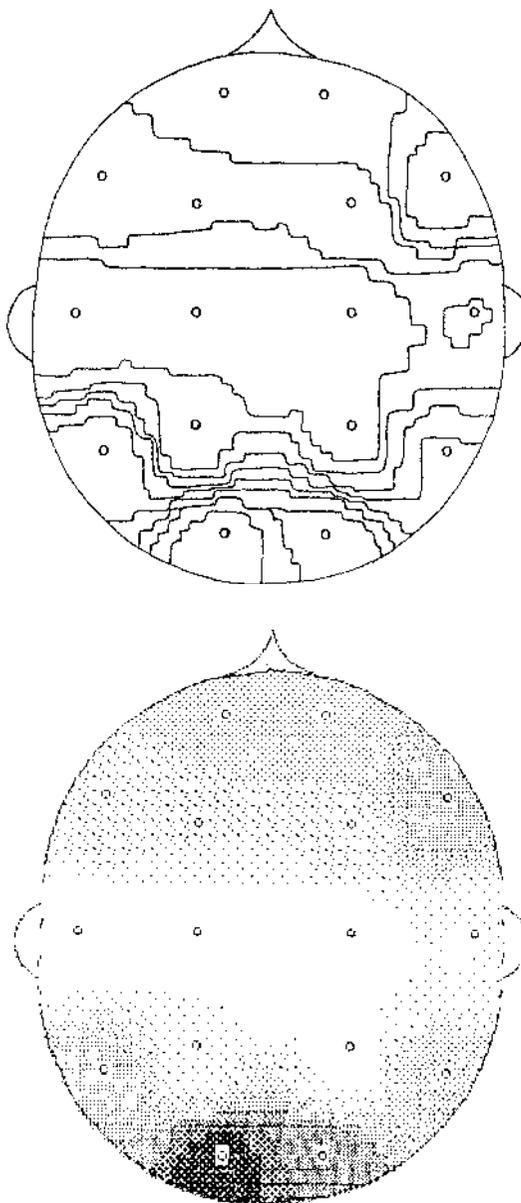


Figure 20 : Courbes de niveaux iso-amplitudes (en haut) et carte EEG d'éveil calme (en bas) obtenues à partir des seize mesures d'amplitudes de la figure précédente.

EEG. C'est ce que représente la carte du haut de la figure 20.

Une fois qu'ont été obtenues par calcul (calcul d'interpolation [11]) ces courbes de niveaux, il n'y a plus qu'à les « remplir » par des pointillés plus ou moins denses (ou des gammes de couleurs selon le spectre lumineux, du bleu au rouge) pour obtenir une carte EEG d'amplitudes de l'enregistrement du sujet yeux fermés en attention diffuse. Remarquons que le minimum correspond au blanc sur la carte et le maximum au noir, ce qui correspond bien (pour le blanc) aux plus faibles valeurs d'amplitudes en temporal gauche (aire auditive activée) et aux plus fortes valeurs occipitales (aire visuelle inactivée les yeux fermés) gauche (pour le noir).

Activation et inactivation cérébrales

Les cartes EEG sont caractéristiques des activités électriques spontanées qu'elles quantifient et représentent sous forme imagée. De telles cartes existent en météorologie et en géophysique où l'étude de sismographes placés sur le terrain, tous les 200 mètres par exemple, sur les nœuds d'un réseau perpendiculaire (comme les rues de Manhattan à New York), permet d'obtenir les réponses des diverses couches du sol à l'explosion d'une cartouche de dynamite placée au centre du réseau. La prospection des puits de pétrole au Sahara utilise ce genre de méthode. Nous avons du reste transposé certains des programmes utilisés en géophysique dans l'application que nous avons introduite en France de la cartographie EEG [8, 12].

La cartographie EEG permet d'étudier l'activation et l'inactivation (ou la désactivation, la « relaxation ») des aires corticales du cerveau en fonction de leur traduction électrique EEG à la surface du scalp. Cela est bien établi à partir des travaux de Freeman [13], Nunez [14] et Livanov [15], en particulier (voir [II-31] pour une revue générale sur la question, avec 152 références), qui font suite à la revue de 1972 de Petsche et Shaw [16].

L'activation d'une aire cérébrale se caractérise par une diminution d'amplitude et une augmentation de fréquence

de l'EEG de l'aire correspondante. Inversement, l'inactivation d'une aire cérébrale se caractérise par l'augmentation d'amplitude et la diminution de fréquence de l'EEG de l'aire correspondante. Cette observation empirique et expérimentale tout d'abord s'explique maintenant par des « modèles d'EEG » [14] qui tiennent compte des propriétés intégratives des neurones. Ce sont les courants électriques spontanés enregistrés dans l'écorce cérébrale, aux multiples points de contact entre les corps cellulaires des neurones (synapses), qui sont à l'origine de l'EEG. Le cerveau humain est composé de 50 milliards de neurones. La richesse des interconnexions de ces neurones est telle qu'un chiffre de 500 000 milliards de synapses identifiables peut être avancé [II-27]. Or,

« le cortex cérébral apparaît, au premier stade de son développement, comme composé de colonnes verticales élémentaires, toutes semblables, contenant un nombre défini de neurones (110 cellules nerveuses). Ces neurones migrent et se distribuent en micro-colonnes répétitives de 30 microns de diamètre [17]. »

Toujours selon Paillard [II-27]

« Ces microcolonnes se groupent en faisceaux composant des colonnes de 300 microns de diamètre en moyenne, que l'on identifie maintenant dans toutes les aires corticales sensorielles, motrices ou associatives [18] [...] C'est de la combinatoire de ces modules et de leurs interconnexions que résulterait le fonctionnement intégré du néo-cortex. On estime désormais que, pour un cerveau humain de 1 000 cm³, composant un manteau superficiel de 2 500 microns d'épaisseur et couvrant une surface de 4 000 cm², le chiffre de 600 millions de micro-colonnes peut être avancé... »

« Ces nouvelles conceptions révolutionnaires de l'organisation cérébrale réactualisent, de façon spectaculaire, une vue néo-localisationniste qui stimule

actuellement les recherches contemporaines en direction à la fois du décryptage de la logique câblée de ces éléments modulaires et de l'identification des opérations fonctionnelles réalisées par ces modules. Elles ouvrent l'espoir d'un accès aux fonctions restées mystérieuses des secteurs associatifs du cortex cérébral et d'une identification des supports nerveux des opérations mentales [19]. »

D'après ces travaux et les hypothèses nombreuses de modularité de l'organisation du néo-cortex [II-21, II-22, II-23, II-27, 17, 18, 19], ainsi que des différents modèles d'EEG qui ont été proposés [20, 21, 22], il semble tout à fait plausible qu'il existe un « comportement global électrophysiologique » d'assemblées modulaires de neurones constituants, qui puisse être objectivé par des activations et désactivations en cartographie EEG. Ainsi, les contributions simultanées de milliers de potentiels électriques qui ne s'additionnent pas seulement, mais s'organisent en activités globales caractéristiques du fonctionnement d'une aire particulière, peuvent être enregistrées à la surface du cerveau, sous forme d'EEG diffusé et recueilli sur le scalp. Nous avons proposé récemment un modèle de modulation radio-électrique d'électroencéphalogramme [6, 23] qui sépare l'éveil calme (modulé en amplitude) de l'éveil actif (modulé en fréquence). Nous avons appliqué ce modèle aux tracés de sommeil paradoxal enregistrés chez le rat [24] et tout dernièrement à des tracés d'activité alpha enregistrés chez l'homme. Tous ces travaux vont dans le sens d'un « langage EEG » des aires cérébrales qui était déjà recherché par Max Dondey à Paris dans les années 1960, à la suite des travaux du Pr Fessard au Collège de France [25].

Du point de vue psycho-physiologique et non plus théorique, les travaux de pionniers comme Grey Walter [I-6], D. O. Walter [1], Jasper [I-9] et Mountcastle [26] ont montré que l'activation cérébrale d'une aire donnée présente des critères électrophysiologiques tout à fait remarquables et caractéristiques (EEG, potentiels évoqués). Les processus d'attention ont été spécialement étudiés depuis Weber et Jung, qui en 1940 définissaient à la fois l'attention focalisée

et l'attention diffuse, comparées à deux faisceaux d'une même torche électrique focalisés selon un cône étroit ou un cône large. Jung écrivit en 1941 [27] :

« La conscience est considérée comme une fonction sélective et restrictive pour limiter l'expérience psychique actuelle parmi les nombreux phénomènes psychiques potentiels qui restent inconscients. L'attention est une aide coordinatrice de la perception consciente et doit être comparée à une source lumineuse ponctuelle qui illumine les détails du champ inconscient et obscur du monde interne et externe. » (Weber et Jung, 1940.)

Ces principes et ces travaux s'illustrent bien à partir des récentes cartographies EEG [28, 29]. Nous avons pu, par exemple, observer chez un groupe de 20 sujets jeunes (10 hommes, 10 femmes) l'activation cérébrale produite par une tâche d'attention visuelle (regarder une reproduction de *la Vénus* de Botticelli [10, 11]), ainsi que par une tâche de calcul mental [II-3 1] qui augmente la fréquence du rythme alpha sur l'aire temporo-pariétale gauche particulièrement active pendant le calcul mental, en diminuant les amplitudes de l'EEG sur les deux hémisphères (activation diffuse globale).

Mais voyons maintenant comment cette méthode s'applique à l'enregistrement que nous avons effectué d'une nuit de sommeil avec cartographie EEG. Et d'abord les deux situations de veille avant endormissement.

Tracés et cartes de veille calme et de veille active

La *figure 21* présente deux exemples des tracés EEG enregistrés chez notre sujet les yeux fermés, en éveil calme et les yeux ouverts, en éveil actif.

Nous remarquerons sur les aires occipitales (A et E) le rythme alpha important qui se manifeste en éveil calme, sous forme de bouffées d'activité alpha dont la fréquence est autour de 10 cycles par seconde. A l'ouverture des yeux, le rythme alpha disparaît sur les tracés et est remplacé par une

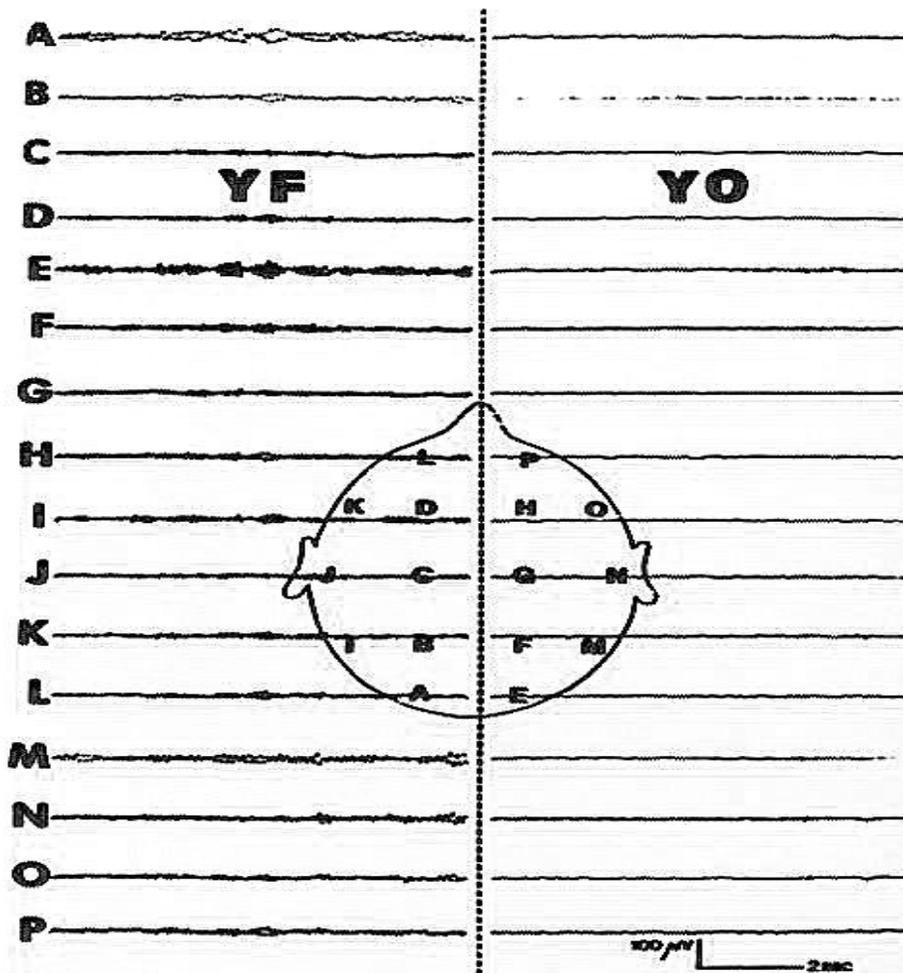


Figure 21 : Exemple de tracés EEG d'éveil calme, yeux fermés (YF) et d'éveil actif, yeux ouverts (YO). Le rythme alpha d'éveil calme occipital dominant sur les aires occipitales (A et E) a disparu visuellement sur les tracés pendant l'éveil actif, bien qu'il persiste mais divisé par un facteur 6 (figure suivante : les aires d'amplitudes les plus élevées [les plus inactives] et les plus faibles [les plus actives] ont été surlignées). (D'après Étévenon et Guillou [V-35].)

activité bêta de fréquences rapides et de faibles amplitudes bien caractéristique. Les cartes EEG correspondantes de ces deux types de tracés sont données en exemple sur la *figure 22*.

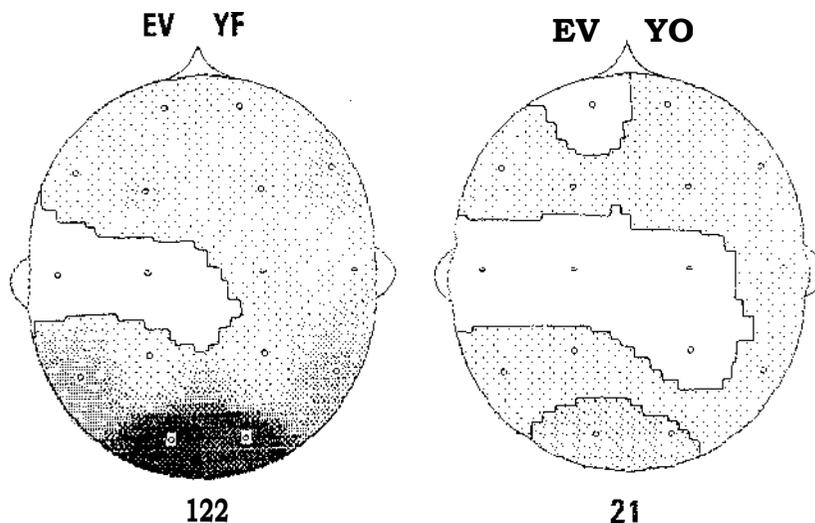


Figure 22 : La carte EEG de l'éveil calme (EV, YF) montre un maximum de 122 μ V en occipital gauche et un minimum en temporal gauche. La carte EEG de l'éveil actif (EV, YO) montre une diminution de l'amplitude occipitale qui n'est plus que de 21 μ V (activation cérébrale à l'ouverture des yeux avec disparition de l'activité alpha). (D'après Étévenon et Guillou [V-35].)

Ces deux cartes d'amplitudes EEG montrent deux zones « blanches » activées qui restent les mêmes dans les deux situations. L'aire temporo-centrale gauche est en effet la plus faible en amplitude EEG. Elle correspond à une activation auditive, car la porte de la cabine EEG avait été ouverte et le sujet entendait de loin le bruit du laboratoire d'enregistrement. Dans la situation de veille calme, le rythme alpha culmine (à 122 microvolts en occipital gauche) et est six fois plus faible (21 microvolts) sur cette même région, après l'ouverture des yeux.

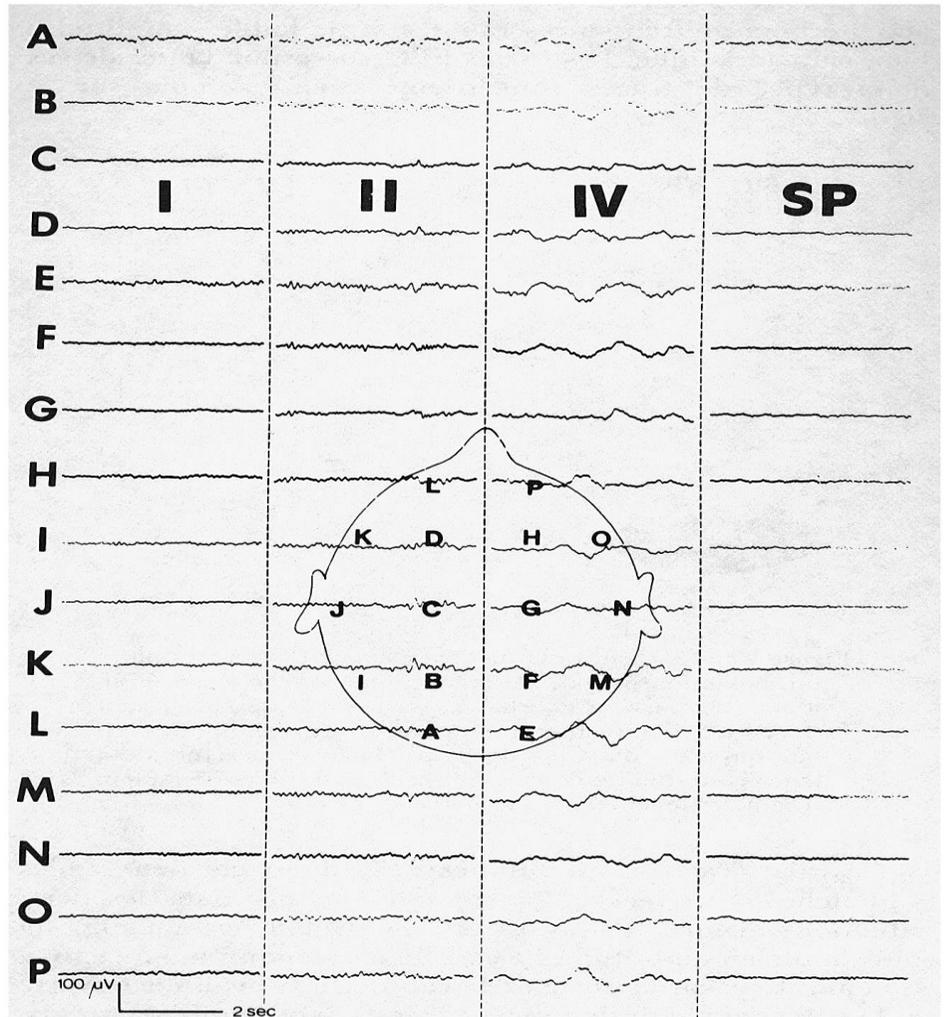


Figure 23 : Exemple de tracés des principaux stades de sommeil. Au stade I d'endormissement et de sommeil léger succède le stade II de sommeil confirmé puis les stades III et IV de sommeil profond. Le sommeil paradoxal (SP) apparaît en fin de cycle de sommeil après un bref retour au stade II. (D'après Étévenon et Guillou [V-35].)

Tracés et cartes des stades de sommeil

Nous présentons tout d'abord des exemples de tracés enregistrés sur 16 dérivation EEG au cours de la nuit de sommeil.

Sur la *figure 23* on voit combien le stade I de sommeil léger et le stade de sommeil paradoxal (SP) ressemblent au stade d'éveil actif, les yeux ouverts (*figure 21*). On voit aussi l'augmentation des amplitudes en stade II et les figures EEG particulières du stade II (fuseaux et brefs complexes K).

Les ondes lentes du stade IV sont très caractéristiques du sommeil profond. Il y a très peu de références publiées sur des enregistrements de nuit de sommeil effectués avec 16 dérivation EEG. Cela n'est pas surprenant, puisqu'il faut pour cela deux polygraphes d'enregistrements, le personnel adéquat et un travail ultérieur très important. Mary Brazier a publié en 1949 une étude à propos d'enregistrements de 9 dérivation EEG, effectués pendant le sommeil [I- 11]. Il a fallu attendre 32 ans avant que Findji *et al.* étudient la distribution topographique sur le scalp des ondes lentes et leur maturation selon l'âge, chez 27 sujets [30]. Seulement, cette dernière étude a demandé des années de labeur avant de donner naissance à une publication. Enfin, c'est en 1982 que Buchsbaum *et al.* [3 1] ont publié la première étude de cartographie pendant le sommeil, à partir d'enregistrements de 16 dérivation EEG, lors d'une sieste diurne imposée à 4 sujets, de midi à 6 heures du soir.

Mary Brazier avait la première montré que les fuseaux de sommeil du stade II sont observés près du vertex, au sommet du crâne [I-11, 32]. Findji *et al.* [30] ont montré que l'amplitude des ondes lentes delta diminue avec l'âge (avec un « montage référentiel » semblable à celui que nous avons utilisé dans la présente étude). Ils ont encore constaté que, selon la référence choisie, les résultats diffèrent et c'est le cas en ce qui concerne les premières cartes de sommeil publiées par Buchsbaum [31] (qui utilise une référence d'électrode placée sur les oreilles et non un montage référentiel). Ce dernier a observé des activités d'ondes lentes plus importantes au vertex* pour les stades de sommeil lent [III, IV]

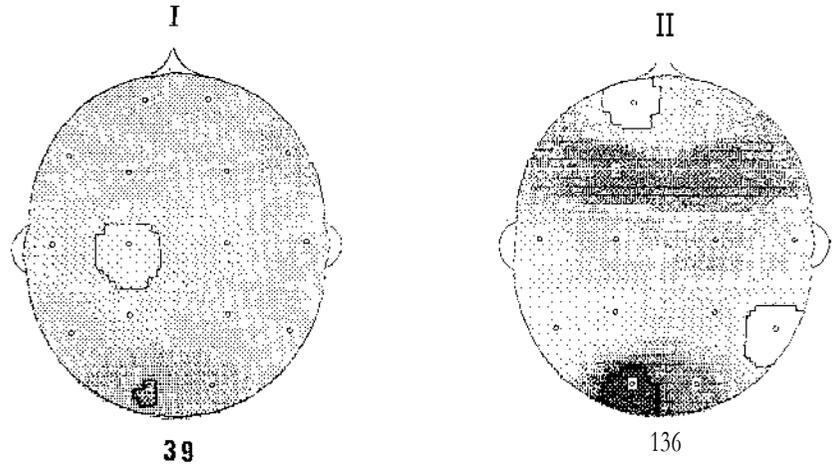


Figure 24 : Carte EEG d'amplitude du stade I (avant le premier récit de rêve) qui montre de faibles amplitudes sur l'aire temporo-centrale gauche (activation) et carte EEG d'amplitude du stade II qui montre sur les régions prémotrices frontales les amplitudes élevées des fuseaux de sommeil. (D'après Étévenon et Guillou [V-35].)

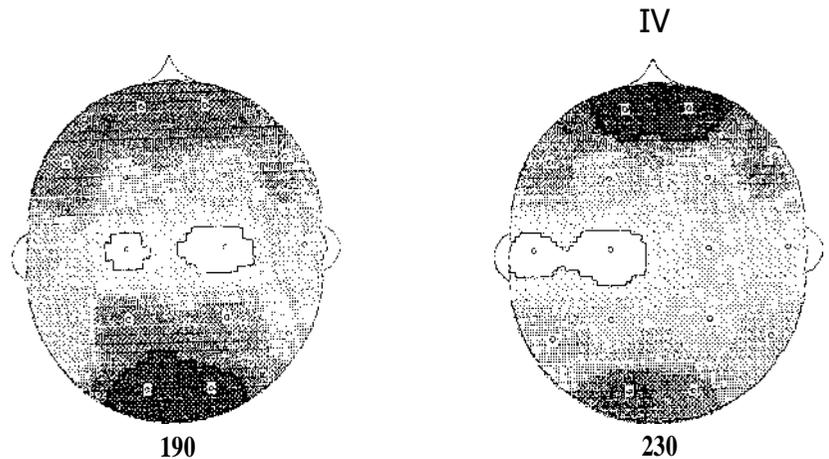


Figure 25 : Cartes EEG de deux séquences successives de sommeil profond en stade IV. Les grandes amplitudes oscillent entre les régions occipitales (à gauche) et les régions frontales (à droite). (D'après Étévenon et Guillou [V-35].)

tandis que Findji [30] et nos propres travaux [33, 34, 35], rapportés ici, vont dans le sens d'ondes lentes plus importantes en frontal et occipital pour les stades III et IV de sommeil. La *figure 24* donne des exemples de cartes EEG recueillies pendant les stades I, II de sommeil chez notre sujet.

Le stade I est faible en activité électrique, avec une amplitude maximale (de 39 microvolts) en occipital gauche. Il existe toujours une activation temporo-centrale gauche, avec une aire centrale gauche de faible amplitude. Cette carte fut enregistrée avant le premier réveil du sujet suivi d'un récit de rêve flou de « trame » et de « chalet de montagne ».

La carte du stade II est typique des « fuseaux de sommeil » et des figures EEG dites « complexes K » (ces figures ressemblent à un K sur les tracés EEG) qui ont deux localisations particulières d'amplitudes élevées : en occipital postérieur (136 microvolts à gauche sur notre exemple), et sur les régions frontales des aires prémotrices (qui correspondent à des préprogrammes moteurs et des anticipations de mouvements). Nous nous sommes aperçu que ces cartes EEG caractérisaient topographiquement le stade II.

La *figure 25* donne l'exemple des cartes EEG de deux tracés successifs, de 6 secondes d'EEG chacun, séparés par un intervalle de 20 secondes (une page de tracé EEG) de stade IV de sommeil à ondes lentes. Ce qui apparaît sur cette figure, outre les valeurs, très importantes, des amplitudes en occipital (190 microvolts) ou en frontal (230 microvolts), c'est qu'en un laps de temps très bref de 20 secondes, le cerveau varie topographiquement. En effet, pendant le sommeil profond en stade IV, il existe une alternance rapide d'ondes lentes qui oscillent et basculent des aires occipitales vers les régions frontales pour revenir ensuite aux aires occipitales aussi rapidement.

Enfin la *figure 26* nous montre deux exemples de cartes EEG d'amplitudes (toujours calculées à partir de 6 secondes de tracés) obtenues en stades de sommeil paradoxal, avant le deuxième réveil (SI? 1) et le troisième réveil (SI? 2). Nous remarquerons tout d'abord les faibles valeurs des amplitudes maximales en occipital gauche par rapport aux cartes

types des stades non-REM (II, IV) précédents (62 microvolts pour SP 1 et 38 microvolts pour SP 2). La carte SP 1 fut enregistrée avant le récit de rêve de « la gare de Lyon » et présente trois territoires cérébraux « activés » de (faibles amplitudes) : en temporal gauche (bruits de gare ?) et en central gauche (région rolandique gauche : aire de projection de la main droite, main qui tenait la valise dans le rêve ?) enfin en pariétal droit (vision en rêve de la gare, activant une région postérieure droite liée à l'imagerie ?).

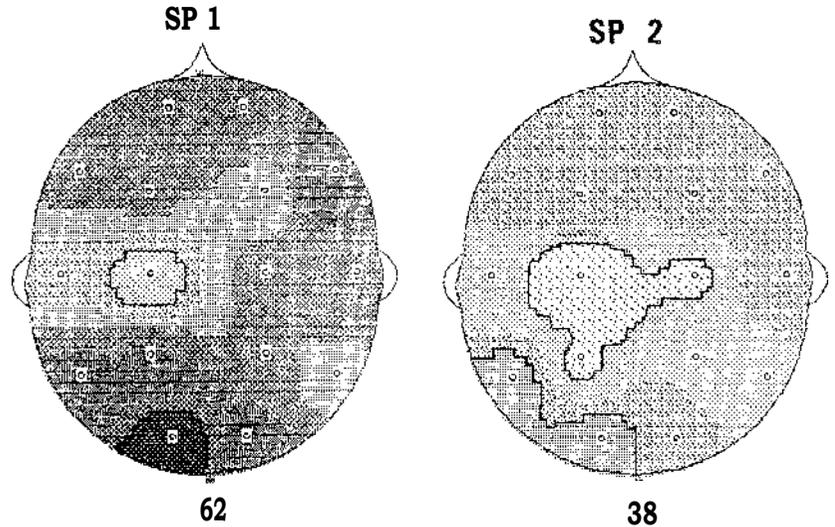


Figure 26 : Cartes EEG d'amplitudes des deux périodes de sommeil paradoxal enregistrées à la fin du deuxième cycle de sommeil (SP 1) précédant le deuxième récit de rêve (visuel et kinesthésique) ainsi qu'à la fin du troisième cycle de sommeil (SP 2) précédant le dernier récit de rêve (visuel et auditif). Les valeurs faibles d'amplitudes témoignent de l'activation corticale au niveau des aires visuelles, sensori-motrices et auditives. (D'après Étévenon et Guillou [V-35].)

La deuxième carte SP 2 qui fut obtenue avant le troisième réveil précédant le récit du « rêve du téléphone » montre une activation plus grande que la carte SP 1 avec une diminution d'amplitudes de MEG (38 microvolts pour la valeur, la plus forte en occipito-pariétal gauche). Les valeurs les

plus « activées » sont en centro-pariétal gauche (aire de projection de la main droite, tenant le téléphone, et aire de la compréhension de la parole, dite aire de Wernicke).

Il ressort de ces exemples que la cartographie EEG permet d'explorer le fonctionnement du cerveau pendant la veille ou le sommeil. L'expérience rapportée ici doit bien sûr être validée par d'autres chercheurs et dans d'autres laboratoires. Cependant, l'exemple présenté constitue une « étude longitudinale » effectuée chez un même sujet qui avait été enregistré une dizaine de fois au laboratoire sur près de dix ans. Elle n'est donc valable que parce qu'elle représente en elle-même la possibilité d'être validée statistiquement [34, 35]. Dans l'état actuel de cette recherche pilote, il n'est pas possible d'établir définitivement une quelconque relation de cause à effet entre aire activée et modalité sensorielle du récit de rêve., mais la voie est ouverte.

Un continuum entre l'éveil et le sommeil

En effet, 500 cartes ont été recueillies et quantifiées en temps réel sur système micro-informatique (Cartovar, Alvar) puis traitées ensuite sur mini-ordinateur (Hewlett Packard Analyseur de Fourier et système 1000) pour analyses statistiques ultérieures, avant de pouvoir filmer une *cartographie EEG dynamique* de cartes successives en couleurs visualisées sur ordinateur [33]. Nous avons tout d'abord édité les 500 cartes repérées selon les différents stades de sommeil, puis choisi entre 10 à 30 cartes types pour chaque stade de sommeil (I, II, III, IV, SP) et les deux stades de veille (YO, YF). Nous avons ainsi retenu 136 cartes au total qui ont été éditées différemment pour les amplitudes de FEEG (non filtré entre 0 et 30 Hz) et celles des activités lentes delta et thêta (entre 0 et 8 Hz), alpha (entre 8 et 12 Hz), bêta (entre 12 et 30 Hz). Nous avons tout d'abord vérifié et publié [34, 35] que les amplitudes de l'EEG (entre 0 et 30 Hz) dont nous venons de donner des exemples de cartes types étaient corrélées aux amplitudes de l'alpha pour l'éveil calme (YF), et à celles du bêta pour les stades d'éveil actif (YO) et aussi les stades I, ainsi que de sommeil paradoxal, corrélées enfin aux amplitudes du delta pour le sommeil non-REM (II, III,

IV). A partir de ces résultats nous avons cherché les moyennes (et dispersions statistiques autour de ces moyennes) des valeurs maximales de l'EEG, selon chacun des six états de veille et de sommeil. Les résultats sont exprimés sur la *figure 27*.

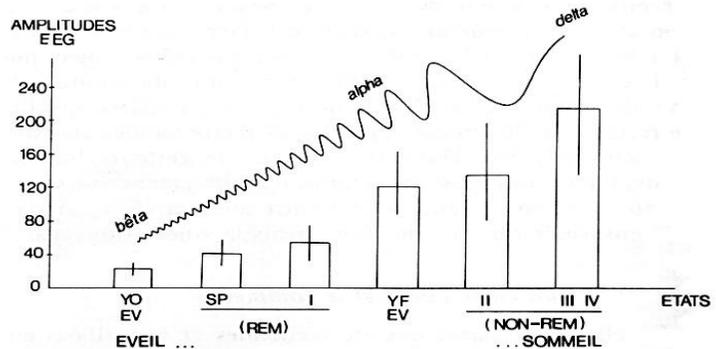


Figure 27 : Classement des états de veille et de sommeil selon les amplitudes croissantes de l'EEG (valeurs de l'aire occipitale calculées d'après les cartes EEG moyennes de chaque état). Le sommeil paradoxal (SP) et le stade I (« éveil interne ») sont encadrés par l'éveil actif (EV, YO) et l'éveil calme (EV, YF). En diagonale est représentée la forme de l'EEG qui varie de l'activation (éveil) à l'inactivation (sommeil) caractérisée par les grandes ondes lentes des stades III et IV. (D'après Étévenon et Guillou [V-35].)

Les amplitudes de l'EEG (occipitale) croissent régulièrement selon les états de veille et de sommeil, dans l'ordre suivant éveil actif (YO, EV), SP, I, éveil calme (YF, EV), II, III et IV. Les valeurs des amplitudes moyennes des cartes EEG correspondantes sont celles de l'aire occipitale gauche, qui présente chez notre sujet la plus grande « relaxation » quel que soit l'état de vigilance considéré. Ce graphique confirme les précédents travaux de Johnson [36, 37] qui a étudié particu-

II

lièrement (par analyse spectrale comme nous l'avons fait) l'EEG de sujets « petit alpha » ou « grand alpha » pendant l'éveil et pendant les différents états de sommeil. Johnson *et al.*, en 1967, n'avaient pas situé la place des amplitudes EEG (calculées entre 0,2 et 20 Hz) de l'éveil actif par rapport aux autres stades, ce que nous avons fait, montrant bien que le stade I et le stade SP sont encadrés par les deux états d'éveil (YO, YF). Le stade d'éveil calme, yeux fermés, permet d'aller vers le sommeil (stade II) par l'endormissement (stade I) qui s'accompagne souvent d'images fugaces hypnagogiques [38]. Nous retrouverons encore mieux cette différenciation sur notre prochain graphique.

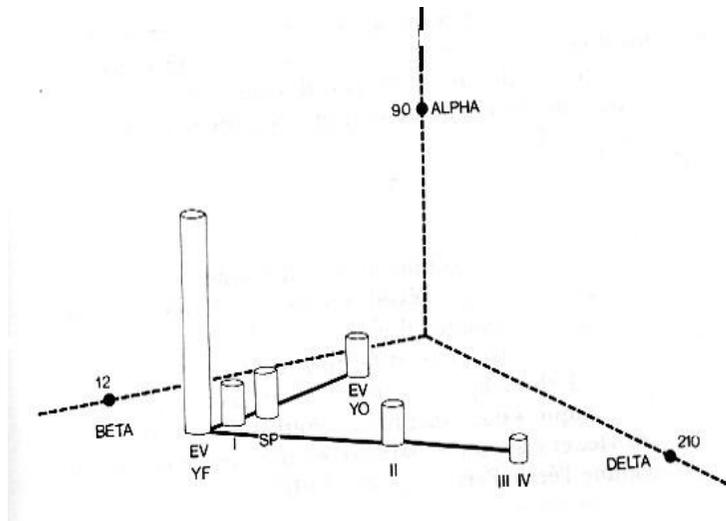


Figure 28 : Analyse en trois dimensions (perspective cavalière), selon les valeurs d'amplitudes moyennes des activités occipitales alpha, bêta, delta) des deux états de veille (EV, YO ; EV, YF) et des quatre états de sommeil (I, SP, II, III et IV). L'éveil calme, yeux fermés, est le pivot d'un axe de vigilance et d'un axe de sommeil. (D'après Étévenot et Guillou [V-35].)

Une analyse à trois dimensions

La *figure 28* représente une perspective cavalière à trois dimensions, selon des axes perpendiculaires entre eux : valeurs moyennes maximales des amplitudes des activités alpha, bêta et delta, pour les six états de vigilance étudiés au cours de la nuit de sommeil chez notre sujet. Ces amplitudes moyennes de l'EEG d'un état donné sont représentées par une colonne, positionnée sur le graphique selon les trois coordonnées calculées (alpha, bêta, delta). Deux axes se dégagent. Un premier « axe de vigilance » qui part de l'éveil actif, yeux ouverts (EV, YO) et aboutit à l'éveil calme, yeux fermés (EV, YF) en croisant la colonne de l'état de sommeil paradoxal et celle du stade I de sommeil léger. Le deuxième « axe de sommeil » part de l'éveil calme et aboutit au stade III-IV de sommeil profond en croisant la colonne de l'état du stade II.

Du rêve à l'éveil

Nous voyons alors comment l'éveil calme yeux fermés permet de rentrer dans « l'éveil interne » de la rêverie et de l'assoupissement du sommeil léger (stade I, *figures 27 et 28*). Nous voyons combien cet état est proche, à partir des seules données EEG, des amplitudes du sommeil paradoxal, de cet « éveil archaïque » qui constitue la moitié des premiers mois de notre vie, et qui voit apparaître en premier le sourire du bébé comme l'écrit Petre-Quadens [39]

« L'apparition du stade "d", ou phase paradoxal du sommeil, se fait soit spontanément, soit à la suite d'une stimulation quelconque.

Il peut aussi s'amorcer en plein état de veille. L'enfant présente subitement des menus et fréquents mouvements oculaires survenant en salves et une mimique faciale riche en expressions variées. La respiration devient rapide et irrégulière. C'est dans cette phase que nous voyons pour la première fois apparaître le sourire. »

Les premiers qui ont décrit le sourire lors du sommeil paradoxal chez l'enfant sont Tcheng et Laroche en 1965 [40] qui ont observé un nouveau-né pendant les deux premiers mois de sa vie, sans arrêt, 24 heures sur 24. Ce sourire est présent dès la naissance, bien avant qu'il puisse être induit à l'état d'éveil par le visage de la mère. Sur 52 sourires observés chez des nouveau-nés à terme par Petre-Quadens, « aucun n'a été observé dans une phase autre que celle où chez l'adulte on a décrit le rêve ». C'est alors que cet auteur pose une question importante [39]

« Il est remarquable que l'induction du sourire à l'état de veille par l'image de la mère, vers l'âge de un mois, coïncide avec la réduction du sommeil paradoxal.

Par conséquent, il n'est pas exclu que les phénomènes plastiques, dont on admet qu'ils sont le support des phénomènes hallucinatoires, font, au cours de la différenciation de la phase paradoxale et du stade " a " (stade d'endormissement avant sommeil calme), progressivement irruption dans la veille. »

Nous retrouvons ici, en écho, la question de Johnson [IV-39]

« Il est actuellement admis que le rêve n'est pas la cause du sommeil REM mais est-il possible que l'activité mentale complexe qui apparaît pendant cet état ne soit pas due aux caractéristiques de quasi-éveil du système nerveux pendant le REM? »

Johnson reformule son hypothèse dans la phrase suivante qui provoque la réflexion :

« Des efforts ont été faits pour rechercher si les 90- 100 minutes du cycle REM continuaient pendant la période de veille (Globus, 1966 [41] ; Othmer *et al.*, 1969 [42]). Peut-être une question plus intrigante serait : Comment se fait-il que l'éveil interrompt régulièrement notre sommeil ? »

En réalité, cette question de l'émergence du paradoxal dans l'éveil ou de l'immersion de l'éveil dans le sommeil, qui apparaîtrait alors comme du paradoxal, est un problème qui n'est pas toujours résolu. Kripke et Sonnenschein ont en 1978 publié un article à propos d'un rythme biologique des fantasmes diurnes [43]. Dans cette étude, les imaginations, la rêverie, les fantasmes les plus intenses étaient associés avec un rythme alpha continu et un minimum de mouvements oculaires, c'est-à-dire avec l'« éveil calme » dont nous venons de parler, selon une imagerie interne qui se manifesterait périodiquement (16 cycles par jour) toutes les 100 minutes.

Le problème se déplaçait alors : le cycle de sommeil de nuit devenait-il de jour un cycle d'éveil calme, les yeux ouverts ? Nos fantasmes diurnes ne seraient-ils que des résurgences de nos rêves périodiques de nuit ?

J'ai rencontré Kripke en 1984 au Congrès mondial de biologie psychiatrique de Philadelphie, et je lui ai demandé s'il avait progressé dans sa recherche. Il m'a dit que la situation était plus complexe maintenant qu'il y a neuf ans, lors de son premier article [43], car le cycle de 90- 100 minutes est sans doute généré par un système de multi-oscillateurs où les divers facteurs comportementaux, physiologiques et hormonaux jouent un rôle adaptatif de l'individu en société, au sein de son environnement. L'observation initiale de Kripke, d'images hypnagogiques qui apparaissent toutes les 90 minutes environ, était sans doute liée aux conditions expérimentales du petit groupe de sujets étudiés. Actuellement, ce rythme de 90-100 minutes a été observé pour l'occurrence du rêve, la vitesse d'écoulement de l'urine, les illusions visuelles, les mouvements de l'estomac, etc. [44], sans que l'on puisse considérer qu'il existe un dénominateur commun entre ces rythmes de même périodicité [41]. Il a aussi été trouvé un cycle d'alternance de l'activité électrique cérébrale entre les deux hémisphères, cycle encore remis en question dernièrement par Kripke [45]. Disons nettement qu'actuellement on ne sait pas qui est le premier : du rêve ou de l'éveil, de la fantaisie ou de l'attention. N'est-ce pas plutôt alors un retour au problème de « l'oeuf et de la poule »? Une amie à Boston en 1965 m'avait répondu que

cette question était strictement « un problème d'oiseaux » (oiseux sans doute).

Cependant, est-ce qu'un retour vers l'électro-physiologie des structures sous-corticales ne serait pas susceptible d'éclairer notre lanterne et de décider qui rêve et qui est éveillé ? Une importante publication de Bancaud, Talairach et Bordas-Ferrer fut faite à ce propos en 1968 [46]. Ces pionniers et promoteurs (au Centre hospitalier Sainte-Anne) de la stéréo-encéphalographie ont enregistré « 120 tracés de sommeil chez 70 sujets porteurs d'électrodes à demeure, laissées en place pendant 10 à 15 jours » chez des malades épileptiques dont il s'agissait d'étudier les crises, par cette investigation tri-dimensionnelle du fonctionnement électrique cérébral, et ensuite d'orienter, de guider le geste du neuro-chirurgien, à même de décider ou non de l'intervention opératoire. Pendant la phase (stade IA) d'endormissement, il apparaît des fuseaux de sommeil dans le système limbique (dans une structure de l'hippocampe dite de la « corne d'Ammon ») et cela s'accroît en (stade IB de) sommeil léger. Des « pointes » rapides apparaissent avec des bouffées de fuseaux de sommeil en stade II dans le système limbique, mais aussi dans un noyau d'afférences visuelles du thalamus (le « pulvinar »). Les stades III et IV présentent sur le cortex des grandes ondes lentes delta, mais il apparaît aussi dans les structures limbiques un rythme proche de l'alpha (7-8 cycles par seconde), alors que disparaissent les fuseaux. Enfin, « le sommeil paradoxal se distingue très nettement de la phase IV, mais surtout des premières phases du sommeil » [46]. Les ondes lentes du stade IV sont remplacées dans le système limbique par une activité rapide avec « survenue d'oscillations rythmiques dont la fréquence et la morphologie sont, chez l'homme, très caractéristiques de ce stade de sommeil ». Il apparaît donc, pendant le sommeil paradoxal, « une activité rapide à divers étages cortico-sous-corticaux, alors que la corne d'Ammon devient le siège d'oscillations rythmiques lentes de 6 à 7 cycles par seconde ». Or nous avons analysé les trois états de veille, de sommeil lent et de sommeil paradoxal chez le rat, à partir d'enregistrements analogues effectués au niveau du cortex et du système limbique (hippocampes droit et gauche). Nous

avons procédé à des analyses sur ordinateur (méthode dite de « régression spectrale ») afin de rechercher quelle région déclenchait l'éveil (5 Hz de fréquence particulière), le sommeil à ondes lentes (0,5 Hz) et le sommeil paradoxal (8 Hz). Nous avons trouvé que l'éveil actif chez le rat était d'origine corticale et non limbique, mais que l'activité des ondes lentes persistait, bien que très atténuée, en éveil et en paradoxal. Par contre, nous avons montré un état tout à fait particulier du fonctionnement cérébral pendant le sommeil paradoxal de l'animal : la très grande intensité du rythme thêta (autour de 8 Hz) s'observe sur les quatre électrodes enregistrées (deux cortex visuels occipitaux et deux hippocampes dans le système limbique) et peut s'expliquer par un « système résonnant de quatre voies bouclées sur elles-mêmes et présentant de multiples relations entre elles » [6, 24]. Ce qui signifierait pendant le sommeil paradoxal un éveil limbique très important, propagé au cortex avec entraînement et persistance de cette rythmicité entre le cortex et le système limbique. Nous n'avons pas enregistré les structures profondes du tronc cérébral et nous ne pouvons qu'émettre l'hypothèse du déclenchement de cette « activité électrique synchrone » qui engage système limbique et cortex, à partir sans doute d'un déclenchement (rhombencéphalique) de la formation réticulée bulbo-pontine pendant le sommeil paradoxal. Remarquons cependant que ce rythme EEG « thêta limbique » chez le rat a été retrouvé chez l'homme pendant le sommeil paradoxal par Bancaud et coll. [46] ce qui irait bien dans le sens de l'hypothèse d'une maturation du système limbique chez le nouveau-né, avec les mimiques de sourire et un clavier d'émotions initiales [III-5, 39, 40], avant même que ne mature le néo-cortex et les aires d'intégration polysensorielles.

C'est en ce sens que nous achèverons cette mise au point, par une dernière citation de Snyder [47] qui a proposé pour le sommeil paradoxal un rôle de « sentinelle » de l'éveil. Snyder a observé chez l'opossum un pourcentage de 20 % de sommeil paradoxal, ce qui est semblable au taux nocturne observé chez l'homme. Ce taux élevé est en faveur d'une fonction de « guet » du sommeil paradoxal, qui prépare l'organisme à des réveils périodiques (de « guet »), afin

que les épisodes de sommeil paradoxal ne mettent pas l'organisme en plus grand péril. Ainsi, l'opossum pourrait en rêve réagir contre un ennemi imaginaire et [47]

« Il apparaît logique que l'activation préparatoire du cerveau au cours du sommeil prenne la forme d'une réalité hallucinatoire identique à celle que l'animal est susceptible de rencontrer dans sa vie éveillée. »

Enfin, dans sa conclusion, Snyder [47] réunit (en quelque sorte) les hypothèses opposées de Meddis [IV-3, IV-4, IV-5] et Walker [IV-8] d'une part, et de Roffwarg [IV-10] et Jouvet d'autre part [IV-25], en ces termes qui laissent rêveur :

« Bien que la perception soit, chez un nouveau-né ou chez l'opossum, vraisemblablement tout à fait différente de la nôtre, il n'y a pas lieu a priori de nier qu'un même degré de conscience perceptive puisse se produire pendant le sommeil. Même si cet état de conscience perceptive doit, au milieu du sommeil, être plus ou moins complexe, organisé, intégré, avec d'autres fonctions du cerveau à divers stades de développement, sans doute l'essence de l'être, en tant que phénomène biologique, n'a pas forcément de connexions avec d'autres fonctions mentales en dehors de l'activation perceptive. Cette conception du rêve, en tant qu'état essentiel de perception hallucinatoire, irait au-devant de la question de savoir quand elle a commencé dans l'histoire ontogénétique et phylogénétique. Exactement comme cela doit commencer dans l'existence intra-utérine de chaque individu, on peut prétendre qu'il remonte à l'apparition progressive de la phase PMO, à l'époque reculée des reptiles ou à l'histoire des premiers mammifères pour se développer et se transformer au cours de l'évolution du système nerveux central. »

RÉSUMÉ DU CHAPITRE V

L'analyse mathématique de l'EEG a bénéficié de l'avènement des ordinateurs comme des programmes informatiques. Le baron Fourier, à l'époque de Napoléon, trouva une méthode (dite des séries de Fourier) pour analyser les mouvements des cordes vibrantes, méthode basée sur une décomposition en ondes sinusoïdales pures (appelées « harmoniques »). Un faisceau de lumière blanche, décomposé par un prisme optique en un spectre coloré, transforme le faisceau initial en une somme d'ondes monochromatiques (d'une seule couleur chacune, de fréquence unique). Chacune des vibrations lumineuses composantes possède alors une intensité donnée. Il est possible de mesurer l'intensité lumineuse pour chaque rayonnement du spectre coloré, et d'obtenir ainsi la « courbe d'intensité spectrale » du faisceau de lumière blanche. Norbert Wiener, le père de la cybernétique, généralisa l'application de l'analyse harmonique de Fourier aux signaux aléatoires (du type « bruit »). Cela permit d'appliquer cette méthode d'« analyse harmonique généralisée » à toutes sortes de signaux et en particulier à l'électro-encéphalogramme. Mais il fallut attendre 1963 avant que D. O. Walter, aux États-Unis, utilise un programme informatique *d'analyse spectrale de l'EEG** pour que celle-ci puisse être réalisée rapidement et devienne ensuite la méthode la plus couramment appliquée. L'EEG est un signal électrique complexe qui évolue au cours du temps. L'analyse spectrale le transforme en un « spectre de puissance » dont la surface est égale à la puissance électrique du signal EEG (pour la durée d'analyse choisie). Ce « spectre » fournit encore « l'intensité spectrale » de l'EEG analysé, en fonction de ses diverses composantes

de fréquences (ou bandes de fréquence). De là, il est possible de calculer des amplitudes moyennes et des fréquences moyennes de l'EEG, pour toutes les fréquences composantes ou selon les bandes de fréquences utilisées en électroencéphalographie (delta, alpha, bêta). L'analyse spectrale de l'EEG peut être effectuée sur un seul signal EEG ou sur plusieurs EEG enregistrés simultanément. A partir de 16 EEG enregistrés simultanément, l'analyse spectrale permet d'obtenir des mesures qui permettront ensuite d'établir des *cartes EEG**. L'intérêt de cette méthode est la possibilité d'étudier plusieurs enregistrements successifs chez un même sujet, ou encore des groupes homogènes de sujets (ou de malades) enregistrés dans les mêmes conditions. Les mesures effectuées permettent d'obtenir des calculs de moyennes, de dispersions, et d'appliquer des statistiques pour valider les différences observées dans les diverses comparaisons effectuées. L'obtention d'une carte EEG s'effectue par détermination de « courbes de niveaux » entre le maximum et le minimum d'une série de valeurs expérimentales. Ces « courbes de niveaux » (obtenues par interpolation) sont ensuite imagées par des surfaces différentes, faites de « gammes de gris » (entre le « blanc » pour le minimum et le « noir » pour le maximum) ou par des couleurs (qui suivent le spectre coloré : du rouge pour le minimum au bleu pour le maximum d'amplitudes).

Les cartes EEG sont caractéristiques des activités électriques spontanées qu'elles quantifient et représentent sous forme imagée. Elles permettent d'étudier les activations et inactivations cérébrales locales, les « éveils » et les « sommeils », d'une aire corticale, ou d'une autre. L'activation cérébrale se caractérise par une diminution d'amplitude et une augmentation de fréquence de l'EEG de l'aire correspondante, sur la carte EEG. Inversement, l'inactivation d'une aire cérébrale se caractérise par l'augmentation d'amplitude et la diminution de fréquence de l'EEG de l'aire inactivée. Des « modèles d'EEG » permettent d'explicitier de telles hypothèses, fondées au départ sur des observations expérimentales. L'EEG serait l'expression d'un « comportement global électrophysiologique ». Ces travaux vont dans le sens d'un « langage EEG » des aires cérébrales, qui « communiqueraient » l'une avec l'autre par modulation d'amplitude ou modulation de fréquence, comme nous l'avons proposé. L'éveil calme (yeux fermés) serait modulé en amplitude et l'éveil actif (yeux ouverts) modulé en fré-

quence. L'attention focalisée et l'attention diffuse ont été comparées à deux faisceaux d'une même torche électrique, faisceaux focalisés selon un cône étroit et un cône large, et dont le balayage pourrait être rapide ou lent. Cette métaphore s'illustre bien, à partir de cartographies EEG. Nous donnons comme exemple les cartographies d'un sujet que nous avons enregistré au cours d'une nuit de sommeil.

Les cartes EEG de l'éveil actif ressemblent à celles du stade I et du sommeil paradoxal. Elles sont très faibles en amplitudes et quatre fois plus faibles que les valeurs de l'éveil calme. Les cartes du stade II de sommeil montrent des amplitudes élevées sur les aires prémotrices frontales (fuseaux de sommeil) et sur les aires occipitales. Les cartes du sommeil profond (stade III et IV) montrent des maxima d'amplitudes de l'EEG qui oscillent rapidement entre les aires frontales et les aires occipitales. Les 500 cartes qui furent obtenues peuvent être moyennées entre elles, stade par stade, et comparées statistiquement pour les valeurs les plus élevées des aires postérieures occipitales. Les cartes EEG du stade I obtenues avant le premier récit de rêve, et celle des deux stades de sommeil paradoxal, avant les 2^e et 3^e récits de rêves, ont été spécialement étudiées. Il semble que les modalités sensorielles activées et décrites dans les récits de rêves (audition, vision, tact) correspondent peut-être aux « activités locales » observées sur les cartes EEG correspondantes, qui précèdent les réveils.

Enfin, nous avons montré qu'il *existe une continuité de l'EEG, de l'éveil au sommeil*. Les valeurs d'amplitudes (de l'aire occipitale) croissent selon l'ordre suivant : éveil actif, sommeil paradoxal, I, éveil calme, II, III et IV. Notre hypothèse d'éveil interne (pour SP et I) semble validée, puisque ces stades de « sommeil actif » sont encadrés par les deux stades d'éveil « externe » (actif et calme). Les six états de veille et de sommeil peuvent encore être classés selon un graphique tridimensionnel (alpha, bêta, delta). L'éveil calme, yeux fermés, semble le pivot d'un angle constitué d'un axe de vigilance (éveil actif, SP, I, éveil calme) et d'un « axe de sommeil » (éveil calme, II, III et IV).

Cela permet de présenter une discussion où la question est posée (depuis les premiers travaux de Johnson et Kripke) de savoir si l'éveil peut faire irruption périodiquement dans la nuit de sommeil. ou inversement. si le sommeil paradoxal et le stade I

alors sources de fantasmes, de rêveries, d'inattention... Quel est le premier : le rêve ou l'éveil ? Est-ce que la réponse à ces questions ne nous serait pas donnée par l'étude des structures sous-corticales ? Il apparaît, en effet, pendant le sommeil paradoxal, une activité rythmique du système limbique très particulière. Serait-ce un « éveil limbique » mis en jeu par les structures profondes du cerveau reptilien (locus coeruleus de la formation réticulée bulbo-pontine) qui « activent » le sommeil paradoxal ? Cela irait dans le sens de l'hypothèse de Snyder qui propose un « rôle de sentinelle » au sommeil paradoxal, qui aurait alors une fonction de « guet » préparant l'organisme à des réveils périodiques. Il se pourrait donc que le sommeil paradoxal (et le rêve) permette une activité de conscience perceptive, un « état essentiel de perception hallucinatoire » qui pourrait commencer dans l'utérus, avec les premiers mouvements du bébé en sommeil activé, mais en fait, remonterait bien avant, jusqu'à l'époque reculée des reptiles à sang froid qui sont nos très lointains ancêtres.

RÉFÉRENCES DU CHAPITRE V

- [1] D. O. Walter, « Spectral Analysis For Electroencephalograms : Mathematical Determination Of Neurophysiological Relationships From Records Of Limited Duration », *Exp. Neurol.*, 8, 155-181, 1963.
- [2] A. Rémond, éd., *Handbook Of Electroencephalography And Clinical Neurophysiology*, Elsevier, Amsterdam, 1972 (11 fascicules).
- [3] A. Rémond, éd., *EEG Informatics. A Didactic Review Of Methods And Applications Of EEG Data Processings*, Elsevier, Amsterdam, 1977.
- [4] G. Dolce, H. Künkel, éd., *CEAN : Computerized EEG Analysis*, G. Fisher Verlag, Stuttgart, 1975.
- [5] E. R. John, R. Thatcher, éd., *Neurometrics*, vol. 2, L. Erlbaum, Hillsdale, 1977.
- [6] P. Étévenon, *Étude méthodologique de l'électroencéphalographie quantitative. Application à quelques exemples*, thèse de doctorat d'État sciences naturelles, Paris VI, 1977. Publié en 1978 sous le titre : *L'Électroencéphalographie sur ordinateur. Analyse quantitative et statistique*, Copédith, Paris, 1978.
- [7] W. Herrmann, *Electroencephalography In Drug Research*, G. Fischer, Stuttgart, 1982.
- [8] B. Pidoux, P. Étévenon, D. Campistron, P. Péron-Magnan, J.-C. Bisserbe, G. Verdeaux, P. Deniker, « Topo-électroencéphalographie quantitative par ordinateur (TEQO) », *Rev. EEG Neurophysiol. clin.*, 13, 27-34, 1983.
- [9] P. Étévenon, J. Gaches, C. Debouzy, B. Gueguen, P. Péron-Magnan, « EEG Cartography I. By Means Of Mini Or Micro-

- Computers. Reliability And Interest Of This Electrical Non-Invasive Brain Imagery », *Neuropsychobiology*, 13, 1A2, 69-73, 1985.
- [10] P. Étévenon, D. Tortrat, C. Benkelfat, « EEG Cartography II. By Means Of Statistical Group Studies. Activation By Visual Attention », *Neuropsychobiology*, 13, 141-146, 1985.
- [11] P. Étévenon, D. Tortrat, S. Guillou, B. Wendling, « Cartographie EEG au cours d'une tâche visuo-spatiale. Cartes moyennes et statistiques de groupes », *Rev. EEG Neurophysiol.*, 15, 139-147, 1985.
- [12] D. O. Walter, P. Étévenon, B. Pidoux, D. Tortrat, S. Guillou, « Computerized Topo-EEG Spectral Maps Difficulties And Perspectives », *Neuropsychobiology*, 11, 264-272, 1984.
- [13] W. F. Freeman, *Mass Action In The Nervous System*, Academic Press, New York, 1975.
- [14] P. Nunez, *Electric Fields In The Brain : The Neurophysics Of EEG*, Oxford Univ. Press, New York, 1981.
- [15] M. N. Livanov, *Spatial Organization Of Cerebral Processes*, Wiley, New York, 1977.
- [16] H. Petsche, J. C. Shaw, « EEG Topography », vol. 5B in A. Rémond, éd. : *Handbook Of Electroencephalography And Clinical Neurophysiology*, Elsevier, Amsterdam, 1972.
- [17] P. Rakic, « Mode Of Cell Migration To The Superficial Layers Of Fetal Monkey Neocortex », *J. Comp. Neurol.*, 145, 61-84, 1972.
- [18] V. Mountcastle, « An Organizing Principle For Cerebral Function : The Unit Module And The Distributed System », 7-50 in G. Edelman, V. Mountcastle, éd. : *The Mindful Brain*, MIT Press, Cambridge, 1978.
- [19] J. A. Fodor, *The Modularity Of Mind*, MIT Press, Cambridge, Mass., 1983.
- [20] O. Creutzfeld, « Electrical Activity From The Neuron To the EEG And EMG », vol. 5, partie C : « The Neuronal Generation of The EEG », in A. Rémond, éd., *Handbook of Electroencephalography And Clinical Neurophysiology*, Elsevier, Amsterdam, 1974.
- [21] R. Elul, « The Genesis Of EEG », *Int. Rev. Neurobiol.*, 15, 227-272, 1972.
- [22] E. Niedermeyer, F. Lopes Da Silva, éd., *Electroencephalography*, Urban and Schwarzenbert, Baltimore, 1982.

RÉFÉRENCES

- [23] P. Étévenon, F. Giannella, F. Abarnou, « Modèle d'EEG par modulation radioélectrique d'amplitude et de phase, conséquences sur l'aspect morphologique du signal », *Rev. EEG Neurophysiol.*, 10, 1, 69-80, 1980.
- [24] P. Étévenon, F. Giannella, « Waking And Sleeping States In The Rat From An EEG Data Analysis Point Of View », *Waking And Sleeping*, 4,33-45, 1980.
- [25] A. E. Fessard, Mechanisms Of Nervous Integration And Conscious Experience », 200-236 in J. F. Delafresnaye, éd., *Brain Mechanisms And Consciousness*, Blackwell, Oxford, Masson, Paris, 1954.
- [26] V. B. Mountcastle, Sleep, « Wakefulness And The Conscious State », in V. B. Mountcastle, éd., *Medical Physiology*, 14e éd., Mosby, Saint-Louis, 1980.
- [27] R. Jung, « Correlation Of Bioelectrical And Autonomic Phenomena With Alterations Of Consciousness And Arousal In Man », 310-344 in J. F. Delafresnaye, éd., *Brain Mechanisms And Consciousness*, Blackwell, Oxford, Masson, Paris, 1954.
- [28] F. H. Duffy, « Brain Electrical Activity Mapping (BEAM) Computerized Access To Complex Brain Functions », *Int. J. Neurosci.*, 13, 55-65, 1981.
- [29] F. H. Duffy, *Topographic Mapping Of Brain Electrical Activity*, Butterworths, Boston, 1986.
- [30] F. Findji, P. Catani, C. Liard, « Topographical Distribution Of Delta Rhythms During Sleep : Evolution With Age », *Electroenceph. clin. Neurophysiol.*, 51, 659-665, 1981.
- [31] M. S. Buchsbaum, W. B. Mendelson, W. C. Duncan, R. Coppola, J. Kelsoe, J. C. Gillin, Topographic Cortical Mapping Of EEG Sleep Stages During Daytime Maps In Normal Subjects », *Sleep*, 5, 3, 248-255, 1982.
- [32] M. A. B. Brazier, « The Electroencephalogram Of Man », 269-292 in M. A. B. Brazier : *The Electrical Activity Of The Nervous System*, Pitman Medical Pub., London, 1968.
- [33] P. Étévenon, S. Guillou, B. Wendling, M. Ghanem, *Cartographie d'une nuit de sommeil avec trois réveils provoqués. Étude statistique des stades de sommeil*, communication audiovisuelle présentée le 4 juin 1985 lors de la réunion de la Société d'EEG et de neurophysiologie clinique, à Tours, sur le thème : « Sommeil humain normal et pathologique ». Film : *La Caverne de Platon. Cartographie d'une nuit de sommeil et de rêve*, 16 mm

- couleurs, 26 minutes, son optique, coproduction : CNRS Audiovisuel, INSERM, Spécia, BIOCOM, 1986. Document filmique, *Cartographie dynamique de l'éveil, du sommeil et du rêve*, 16 mm couleurs, 4 minutes, coproduction : CNRS Audiovisuel, INSERM, Spécia, BIOCOM, 1986.
- [34] P. Étévenon, « EEG Cartography Of A Night Of Sleep : Correlations », Lucid Dreaming Symposium, Charlottesville, USA, 1985, in *Lucidity Letter*, 5, 1, 119-128, 1986.
- [35] P. Étévenon, S. Guillou, « EEG Cartography Of A Night Of Sleep And Dreams. A Longitudinal Study With Provoked Awakenings », *Neuropsychobiology*, 16, 2 Sc 3, 146-151, 1986.
- [36] L. C. Johnson, C. Nute, M. T. Austin, A. Lubin, « Spectral Analysis Of The EEG During Waking And Sleeping », *Electroenceph. clin. Neurophysiol*, 23, 80, 1967.
- [37] L. C. Johnson, A. Lubin, P. Naitoh, C. Nute, M. Austin, « Spectral Analysis Of The EEG Of Dominant And Non-Dominant Alpha Subjects During Waking And Sleeping », *Electroenceph. clin. Neurophysiol.*, 26, 361-370, 1969.
- [38] W. Kuhlo, D. Lehmann, « Das Einschlafen und seine neurophysiologische Korrelate », *Arch. Psychiatr. Nervenkr.*, 205, 687-716, 1964.
- [39] O. Petre-Quadens, « Ontogenèse du rêve chez le nouveau-né humain », 109-121 in P. Wertheimer, éd., *Rêve et Conscience*, PUF, Paris, 1968.
- [40] F. Tcheng, J. L. Laroche, « Phase de sommeil et sourires spontanés », *Acta Psychologica*, 24, 1-28, 1965.
- [41] G. G. Globus, « Rapid Eye Movement Cycle In Real Time », *Arch. Gen. Psychiat.*, 15, 654-659, 1966.
- [42] E. Othmer, P. Hayden, R. Segelbaum, Encephalic Cycles During Sleep And Wakefulness In Humans : A 24-hour Pattern », *Science*, 164, 447-449, 1969.
- [43] D. F. Kripke, D. Sonnenschein, « A Biologic Rhythm In Waking Fantasy », 321-332 in K. S. Pope, J. L. Singer, éd., *The Stream Of Consciousness*, Plenum, New York, 1978.
- [44] D. F. Kripke, « Ultradian Rhythms In Behavior And Physiology », 313-343 in F. M. Brown, R. C. Graeber, éd., *Rhythmic Aspects Of Behavior*, Erlbaum, Hillsdale, 1982.
- [45] D. H. Kripke, P. A. Fleck, D. J. Mullaney, M. L. Levy, « Behavioral Analogs Of The REM - Non REM Cycle », *Adv. Biol. Psychiat.*, 11, 72-79, 1983.

RÉFÉRENCES

- [46] J. Bancaud, J. Talairach, M. Bordas-Ferrer, « Activité électrique cortico sous-corticale au cours du sommeil de nuit chez l'homme », 123-156 *in* P. Wertheimer, éd., *Rêve et Conscience*, PUF, Paris, 1968.
- [47] F. Snyder, « Quelques hypothèses au sujet de la contribution du sommeil avec mouvements oculaires rapides à la survivance des mammifères », 37-50 *in* P. Wertheimer, éd., *Rêve et Conscience*, PUF, Paris, 1968.