

## **DETECTION DU TEMPS**

**Domaine de la perception des évolutions  
Moyens matériels de détection**

« La mesure du temps consiste à comparer  
la vitesse de certains travaux »  
*(G. Berger)*





### **3.1. DOMAINE DE LA PERCEPTION DES EVOLUTIONS**

Le temps n'est qu'une déformation sensorielle de ce que l'on peut appeler la trame évolutive ou trame causale. Le défaut d'une telle déformation est qu'elle s'exprime logiquement : expression mathématique du rapport entre la trajectoire d'un mobile que l'on observe et la trajectoire propre de l'observateur ou de l'instrument servant de référence, ce qui a amené Einstein à concevoir une géométrie quadri-dimensionnelle abstraitement logique mais antinaturelle : l'ordre ou succession, alias « pile stratigraphique », n'est qu'une projection lacuneuse de la trame causale, comme nous l'avons déjà exposé.

La perception temporelle que nous assimilons à la perception des évolutions dépend des facteurs suivants :

#### **a) Acquisition d'information**

Supposons trois événements B, D et F perçus directement par un observateur. Si cet observateur est capable de supprimer B, il constatera que D et F ne peuvent pas exister. Si D est supprimé, il constatera que F ne peut pas exister mais, par contre, que B peut exister. B D F forment dans l'ordre une suite causale. L'observateur acquiert non seulement une information sur l'existence propre de ces trois événements mais encore une information sur l'interdépendance orientée de ces trois événements, c'est-à-dire sur la séquence causale prise dans son ensemble. Le fait que l'observateur ne soit pas capable d'acquérir une information sur les liaisons existant entre les trois événements ne lui permettrait qu'une information sur l'existence de trois événements-objets apparemment pour lui sans correspondance.

Il peut acquérir l'information sur la séquence causale soit par l'expérience matérielle (suppression de l'un ou l'autre des événements) soit par intuition ou raisonnement logique (suppression abstraite).

## **b) Stockage d'information**

Seul l'observateur doué de mémoire (naturelle ou artificielle) est capable de stocker l'information d'une séquence causale. Nous avons déjà défini ce que nous entendions par mémoire : un accumulateur d'information. L'événement stocké est appelé souvenir. Lorsque l'ordre de stockage correspond à l'ordre de la séquence causale, il est constitué par ce que nous avons appelé une « pile stratigraphique ».

Pour nous, il n'y a pas de doute que la reconstitution intuitive ou instinctive de la pile stratigraphique s'identifie à la perception de l'écoulement du temps, lequel n'est qu'une perspective ou une projection imparfaite de la séquence causale.

Dans l'exemple précédent, l'observateur n'a pu acquérir et stocker d'information sur la séquence causale que par trois événements B D F. Sa mémoire ne lui permettra que de reconstituer dans l'ordre stratigraphique B, D et F, mais il ne pourra répéter la séquence causale elle-même.

En effet, supposons que des événements A, C, E viennent s'intercaler entre les précédents pour former la séquence réelle et complète A B C D E F. Seuls les événements B, D, et F ont été perçus; ils seront seuls restitués par la mémoire. Ceci revient à dire que la pile stratigraphique est une reconstitution incomplète et irréaliste du « passé ». Par déduction, la mémoire permet de déterminer l'ordre temporel ou causal mais elle ne peut le reconstituer matériellement.

## **c) Perception du rythme**

Supposons maintenant que l'observateur qui stocke des informations sur la séquence causale A B C D E F stocke parallèlement (ou simultanément) des informations sur une autre séquence indépendante de la première mais composée d'événements X, X, X, X, X, X tous identiques entre eux. S'il compte par exemple qu'à chaque fois que s'accomplit un événement de la première séquence il s'en produit deux dans la deuxième,

il percevra facilement un rapport numérique entre ces deux séquences égal à  $\frac{1}{2}$ . Ce rapport est un rythme défini entre la première séquence composée d'événements quelconques et la deuxième composée d'événements identiques.

Si, au contraire, il compte un nombre différent d'événements X entre A et B, B et C, C et D, etc., la première séquence est dite arythmique par rapport à la deuxième. S'il emploie la séquence des X comme référence générale, il constatera que des séquences différentes se produisant parallèlement à la séquence de référence auront des étendues relatives différentes : il aura alors la perception de la durée relative.

S'il utilise un événement-origine zéro dans sa séquence de référence, cela lui permettra de situer les séquences observées et lui donnera la notion de l'avant, du pendant et de l'après. Cela lui permettra également de situer des événements observés isolés.

Tout ceci n'est évidemment possible que parce qu'il stocke des informations sur l'aspect répétitif de la séquence de référence que sa mémoire lui permet de restituer conjointement avec les séquences ou événements observés.

La pile stratigraphique générale ainsi construite est donc une collection d'événements en relation causale ou sans aucune relation causale mais disposés dans un ordre donné par rapport à une séquence rythmique de référence.

La perception directe de l'ordre stratigraphique ainsi défini permet de dire arbitrairement si tel événement est plus ancien, simultané ou plus récent que tel autre. Mais elle est la plupart du temps conventionnelle et intermittente quant à l'enchaînement naturel des causes.

Au-delà de cette perception existe, comme nous l'avons vu, la trame réelle des événements qui est d'ordre causal et qui ne se révèle que par un trompe-l'œil donnant cette sensation d'écoulement continu. De plus, tout observateur est lui-même constitué par un système complexe en voie d'évolution causale. Si l'on admet que tout s'écoule inexorablement dans une direction donnée, tout point ou axe de référence choisi est par

définition arbitraire. La perception humaine de l'orientation généralisée de la durée est trompeuse car elle va dans le sens des événements qui composent la vie de l'observateur.

Si l'observateur était un objet parfaitement immobile et éternel, il percevrait probablement non pas un fleuve continu d'événements coulant dans le même sens mais une trame ou un réseau complexe d'événements composant un ensemble structuré dans l'espace.

### **3.2. MOYENS MATERIELS DE DETECTION : LES HORLOGES**

Qu'entendrons-nous par détecter le temps et plus exactement détecter et mesurer « l'écoulement du temps » ? Pour résumer ce qui vient d'être dit au paragraphe précédent : la matière (et l'univers matériel) est discontinue car formée d'événements c'est-à-dire de grains matériels mesurables relativement par trois coordonnées de référence. Elle forme une trame architecturale dont chaque élément est en interdépendance orientée avec ses voisins : l'événement B est conditionné par l'événement A mais est indépendant de l'événement C qui, lui par contre, dépend de la séquence A B. Cette trame n'est perçue que par intermittence, mais dans laquelle on compte des événements identiques dont la répétition amène l'observateur doué de mémoire à comparer des vitesses d'accomplissement variables entre des séquences causales parallèles.

Le moyen de comparaison entre une séquence répétitive et une autre qui ne l'est pas permet de détecter la vitesse de cette dernière. La vitesse est en fait l'expression du temps : comparaison entre la matérialisation d'un enchaînement causal par rapport à un autre enchaînement causal pris comme référence.

Tout système matériel capable d'effectuer cette comparaison est un détecteur temporel.

#### **a) Détecteurs physiologiques (perception du premier ordre)**

Tout être vivant, depuis l'unicellulaire jusqu'aux mammifères les plus évolués et l'homme, peut avoir la faculté de détecter le temps.

Une simple cellule évolue irréversiblement depuis l'instant de sa naissance vers l'instant de sa mort. Il en est de même pour tout groupe de cellules si complexe soit-il.

La vie d'un être vivant est donc un enchaînement causal à sens unique de la naissance à la mort. Cet enchaînement est lui-même inséré dans la trame de l'univers matériel ou trame causale universelle.

La faculté de détecter le temps par un être vivant est directement liée à sa capacité de recevoir des informations sur des événements extérieurs à sa propre séquence évolutive et de stocker ces informations. Si l'être vivant reçoit et stocke des informations extérieures sur des séquences de nature répétitive, il perçoit directement l'écoulement du temps.

Les séquences répétitives les plus sensibles aux détecteurs physiologiques sont l'alternance annuelle ou saisonnière due à la rotation de la terre sur son axe et l'alternance annuelle diurne due à la rotation de la terre autour du soleil. La rotation de la lune autour de la terre entraîne également des séquences répétitives d'ordre microgravimétrique qui sont perçues par une certaine classe de détecteurs physiologiques : effet des marées. Ces rythmes astronomiques règlent sur la terre pratiquement toutes les séquences d'événements formant la biosphère. Tout animal, toute plante y est de ce fait sensible et les événements qui composent la trame de toute vie y sont assujettis.

Le temps physiologique ou biologique est à l'échelle comprise entre le diurne (perception de la lumière solaire) et l'annuel (perception des saisons). L'échelle de l'heure et de la seconde d'une part et l'échelle du siècle et du millénaire d'autre part ne sont pas perçues au niveau physiologique de l'être vivant.

Notons cependant que certains organismes peuvent interrompre momentanément leur propre évolution et supprimer par la même occasion la perception temporelle. Ainsi certaines algues et spores peuvent « s'enkyster » durant des années et reprendre leur évolution après un laps de temps au cours duquel elles ne peuvent pas percevoir le temps car leur propre évolution s'est arrêtée sans qu'il y ait mort ou destruction. Ceci

corrobore notre affirmation que la perception du temps n'est possible que par comparaison entre un rythme extérieur et la propre évolution de l'individu. Si celle-ci s'arrête, la perception temporelle disparaît.

On peut également citer le cas de l'hibernation annuelle de nombreux mammifères : il y a non pas suppression de l'évolution mais ralentissement. Ce ralentissement provoque la perception d'un temps apparemment beaucoup plus rapide que pendant le reste de l'année. Le cas est le même pour un homme qui se réveille après un sommeil profond sans rêves : il a l'impression qu'il vient de s'endormir et que tout le temps où il a dormi s'est télescopé en quelques minutes.

## **b) Détecteurs psychiques (perception du second ordre)**

Nous venons de voir que l'ensemble des événements et des unités de la biosphère est capable de percevoir les rythmes astronomiques. La détection psychique est, elle, le privilège d'une part très spéciale des tissus vivants, à savoir les cellules nerveuses. Seuls les êtres vivants pourvus d'un réseau de cellules nerveuses sont capables de la perception psychique du temps.

La perception physiologique est une perception passive, subie. La perception psychique est, elle, cognitive, consciente car c'est à son niveau que fonctionne la mémoire, élément essentiel de la conscience temporelle. La faculté de certains neurones à garder la trace d'événements successifs d'une séquence constitue la détection psychique temporelle. Le détecteur physiologique reçoit l'information sur la succession des événements; le détecteur psychique a la capacité de stocker cette information.

L'être vivant doté d'un système nerveux et donc d'une mémoire perçoit l'écoulement du temps par toutes les cellules vivantes qui le composent. Seul son tissu nerveux lui donne la conscience de l'écoulement du temps par stockage des événements antérieurs. La détection psychique n'est pas indépendante de la détection physiologique : au contraire, c'est son moyen d'information de base. Le détecteur physiologique perçoit des successions d'événements comparés instinctivement à un rythme saisonnier ou journalier.

Le détecteur psychique ou conscience connaît les espaces qui séparent les événements d'une séquence : le psychique crée la notion de durée, selon ce que nous avons déjà dit (espace d'événements). Il aura la connaissance des intervalles séparant des événements rythmiques extérieurs et la connaissance des intervalles entre des événements formant la séquence de son existence propre. Grâce à la faculté mémorielle, la comparaison des deux séquences lui permettra de constater que sa séquence propre apparaît irrégulière spatialement par rapport à la séquence rythmique de référence. C'est ainsi que certaines heures ou certaines journées nous apparaissent plus longues ou plus courtes alors que, par définition, chaque heure ou chaque journée représente une durée égale basée sur le rythme sidéral.

La sensation consciente ou subconsciente de l'inégalité des durées est étroitement liée au degré d'attention. Si celui-ci est fort, la durée se dilate; s'il est faible, la durée se contracte.

Ainsi le temps de l'attente, de l'ennui apparaît plus long. Le temps de l'activité, de la jouissance, de la joie apparaît court. Le temps de la douleur apparaît long car l'esprit cherche à s'évader de la sensation douloureuse en s'accrochant au plus grand nombre possible de sensations étrangères : il s'ensuit un renforcement du degré d'attention et par conséquent une dilatation du temps.

Chez les êtres très évolués, l'attention peut se porter sur plusieurs plans à la fois : c'est ce que G. Bachelard appelle la superposition temporelle. La conscience enregistre les trames causales directement observables (passé-présent) : c'est le cogito 1. Elle projette simultanément des trames causales non observables par exemple dans le futur : cogito 2. Enfin le cogito 3 est une intégration à un plan élevé des événements directement observés ou stockés en mémoire et des événements inobservables révélés par l'imagination.

Par exemple, la feinte ou le mensonge sont des exemples de superpositions temporelles. Deux trames se superposent : celle de la vie réelle, régulière, et celle de la feinte dont le tissu est souvent lacuneux et accidenté au niveau de la conscience.

Saint Augustin a également parlé de directions divergentes à partir d'un événement du présent : direction de l'observation, de l'attention et de l'intention. Sa théorie se ramène à celle de la superposition temporelle.

### **c) Les horloges : moyens matériels de mesurer les durées**

La pensée humaine (en temps que détecteur psychique) a toujours été préoccupée par le phénomène de la durée. La succession des états de conscience comparée à la succession des rythmes sidéraux a amené l'homme à constater une certaine irrégularité relative.

Se méfiant instinctivement, mais avec juste raison, des séquences d'événements qui composent son existence propre, l'homme ou plus exactement la société humaine a postulé que les rythmes diurnes-annuels étaient immuables. Ces rythmes sont les étalons de référence auxquels non seulement se rapporte la vie humaine mais encore qui permettent, à tort ou à raison, la mesure relative de l'accomplissement de séquences extérieures : biologiques, physiques, historiques, etc.

Les rythmes diurnes-annuels, perceptibles par les animaux doués de systèmes nerveux dont l'homme lui-même, ont révélé à ce dernier la notion de vitesse mesurable. Ils sont cependant insuffisants pour mesurer les durées de séquences inférieures au cycle diurne ou supérieures au cycle annuel. L'homme a donc été amené à inventer des systèmes rythmiques lui servant à mesurer des durées infra-diurnes d'une part et des systèmes rythmiques supra-annuels d'autre part.

Ces rythmes artificiels, fruits de l'imagination créatrice de l'espèce humaine, constituent ce que nous appelons les horloges.

## Horloges simples

Les plus utilisées par les anciens furent celles qui se basent sur le principe de l'écoulement des fluides telles que le sablier et la clepsydre : un récipient d'une capacité donnée est rempli un nombre régulier de fois par journée à travers un orifice de dimension fixe. Ceci permet de mesurer des vitesses : par exemple, le cheval A parcourra une certaine distance pendant qu'un sablier de référence se remplira, alors que le cheval B parcourra une distance différente pendant que le même sablier se remplira : on dira alors que le cheval A ne galope pas à la même vitesse que le cheval B; cette vitesse qui est le produit entre le remplissage du sablier et un segment d'espace se mesure ainsi par comparaison.

En utilisant des sabliers ou clepsydes suffisamment grands avec des orifices très étroits, on peut faire d'ailleurs coïncider le remplissage du récipient avec le rythme diurne et éventuellement le rythme annuel. A la précision des mesures près, l'homme a constaté l'immutabilité relative des rythmes sidéraux comparée à l'écoulement des fluides.

Il semble cependant que les sabliers et clepsydes aient plutôt été utilisés dans l'Histoire pour diviser le cycle diurne. La précision de ces systèmes était aléatoire dans les macro-échelles de temps supérieures au cycle diurne. En effet, l'imprécision dans la mesure de l'écoulement des fluides croît avec la taille du récipient utilisé du fait que l'accroissement d'une capacité entraîne un accroissement de l'erreur sur sa mesure provoqué par des « arte facte » peu facile à éliminer par les techniques anciennes de fabrication des récipients.

Ce système a ainsi un inconvénient grave : c'est que, chaque fois que le récipient est rempli, il faut soit le vider soit le renverser, opération nécessitant une certaine durée, variable avec la dextérité de l'observateur; ce qui, évidemment, introduit un facteur d'imprécision lorsqu'on veut compter un nombre fixe de remplissage entre le lever et le coucher du soleil par exemple. Les inventions successives de la roue, du levier puis de l'engrenage ont permis à l'homme de ralentir considérablement certains mouvements mécaniques dont notamment la chute des corps. La descente freinée d'un poids le long d'une règle graduée est à l'origine de la première horloge mécanique.

Citons également le feu comme système de mesure des durées infra-diurnes. L'application la plus connue est la combustion d'un cierge pendant la journée d'un monastère : ce cierge était marqué à intervalles égaux; lorsqu'il se consumait, sa taille se rétrécissait d'une marque à l'autre, donnant ainsi aux moines des repères de durée fixes sur lesquels ils basaient leur activité diurne.

Le cadran solaire ou « gnomon » utilise la mesure de la position du soleil au-dessus de l'horizon au cours d'une journée par le truchement d'une ombre projetée sur une aire graduée en secteurs égaux. D'autre part, les anciens avaient remarqué que la longueur de l'ombre projetée à mi-distance entre le lever et le coucher du soleil variait périodiquement entre l'été et l'hiver. La division en douze segments de la longueur de l'ombre à midi entre son extension maximum de décembre et minimum de juin est à l'origine des mois du calendrier gréco-romain. L'inconvénient du système est évidemment l'absence de soleil ! c'est-à-dire pendant la nuit ou au cours de journées pluvieuses.

La mesure de la hauteur d'une étoile par rapport à l'horizon pendant la période nocturne au moyen d'une équerre mobile appartient au même principe que le cadran solaire, c'est-à-dire la mesure directe du mouvement astronomique. Dans les deux cas, il n'y a possibilité de mesure que lorsque le ciel est dégagé.

## **L'horloge de Huyghens**

Huyghens inventa le premier système précis d'horloge en combinant le pendule et la chute ralentie d'un poids. La fréquence des oscillations est fonction de la longueur du pendule et est indépendante des forces nécessaires pour le mouvoir : le mouvement pendulaire est donc extrêmement précis dans ses durées successives. Dans l'horloge de Huyghens, le mouvement pendulaire règle l'avancement des rouages cependant que ce même mouvement est entretenu par les mêmes rouages transmettant l'énergie accumulée dans les poids. L'échappement est un dispositif qui libère le pendule des rouages à intervalles égaux exactement

proportionnels à la longueur du pendule. Un cliquet permet de remonter les poids à volonté sans arrêter le mécanisme. L'horloge de Huyghens a été perfectionnée jusqu'à nos jours et son principe est encore appliqué dans les chronomètres modernes. Les principaux perfectionnements ont porté sur la source d'énergie (ressorts spirales, oscillations entretenues électriquement), sur la forme du pendule (pendule-spirale), la régularité de l'échappement, la compensation des effets thermiques, magnétiques, l'isolation, la réduction progressive des frottements par l'emploi des pierres, etc.

### **Horloges à quartz**

Les oscillations du pendule de masse sont remplacées par les vibrations d'un cristal de quartz créant des interruptions de courant électrique, couplé avec un amplificateur. La vibration ou oscillation du cristal est entretenue par l'énergie électrique : batteries.

L'avantage du système est une fréquence élevée : 100.000 Hz contre 0,5 Hz pour un pendule de masse. D'où une différence énorme entre l'échelle des temps diurnes et l'échelle des temps correspondant aux périodes de vibration du quartz. Ainsi l'irrégularité inhérente aux oscillations d'un pendule de masse passe inaperçue statistiquement dans le cas des vibrations du quartz par rapport à la durée diurne. De plus les variations de pesanteur, dues notamment aux marées et à la position variable de l'horloge par rapport à la verticale, sont sans influence sur la période du quartz. Une horloge à quartz comprend :

- un quartz cristallisé + amplificateur alimenté par des batteries,
- un démultiplicateur de fréquence,
- des aiguilles et un contact mus par un moteur synchrone.

Normalement un quartz vibrant correspondrait à un balancier d'un mètre qui, lancé librement, ne perdrait la moitié de son amplitude qu'au bout d'un mois (au lieu d'un jour). Les effets d'inertie sont donc inférieurs dans le cas du quartz, d'où une utilisation d'énergie très faible.

Le principe de fonctionnement est celui de l'effet dit piézo-électrique : une lame taillée dans un cristal et soumise à un champ électrique subit des efforts mécaniques et inversement des déformations développent sur elle des charges électriques. L'ensemble lame + électrodes se comporte donc comme un circuit électrique très peu amorti : il s'agit d'un résonateur ou oscillateur.

Le type de taille et l'orientation de la lame dans le cristal originel déterminent la fréquence du résonateur (barreaux, anneaux, etc.).

## Etalons atomiques

Les horloges à quartz, si elles représentent un progrès sur les horloges à pendules du fait de leur résonance élevée sont néanmoins sujettes comme ces dernières à une dégradation ou dérive due à la consommation unilatérale d'énergie et à l'usure ou érosion. Pour tenter d'échapper à la dérive et à l'érosion, on a cherché à s'appuyer sur un phénomène physique considéré comme invariant : émission ou absorption de rayonnement accompagnant un chargement de niveau énergétique dans un corps simple. Autrement dit, il s'agit de transposer dans l'échelle des vibrations hertziennes des phénomènes spectroscopiques bien connus dans l'échelle des vibrations lumineuses.

Quatre types de résonances peuvent être envisagés ainsi :

- précession nucléaire dans un champ magnétique; inconvénient : la fréquence est trop dépendante des variations du champ,
- résonances quadripolaires dans les solides provoquées par des champs électromagnétiques (champs induits),
- rotations moléculaires mises en évidence par absorption,
- micromorphologie et topologiques des jets ou trajectoires atomiques ou moléculaires.

Les réalisations d'horloges-étalons ont d'abord utilisé les phénomènes

d'absorption. Les instruments actuels se basent sur les trajectoires atomiques, notamment les jets atomiques de césium (Kusch, Rabi - 1940).

On cherche à mesurer un repère de fréquence par une raie du spectre hertzien créée par changement de niveau énergétique (champs électriques ou magnétiques perturbés ou inversés). Pour obtenir une résonance aiguë, on doit réduire le plus possible la largeur de la raie. Cette largeur se trouve en fait accrue :

- par effet Doppler, si les particules se déplacent parallèlement aux ondes sur lesquelles elles agissent,
- par collision entre particules, dépendant de la pression,
- par collision avec les parois de l'enceinte,
- par saturation, les particules en résonance n'étant qu'en nombre limité.

Il s'agit en fait d'effectuer, au moyen du phénomène de résonance choisi, une comparaison de fréquence avec des étalons de références classiques. Cette opération peut s'effectuer selon trois possibilités :

- Résonateur : appareil passif. Sa résonance est entretenue par un oscillateur auxiliaire de mesure. Lorsque le mouvement de ce dernier égale celui du résonateur, on compare le mouvement de l'oscillateur à un étalon de référence habituel.
- Oscillateur à fréquence asservie par un servomécanisme. La démultiplication de la fréquence du résonateur atomique ou moléculaire est réalisée par un quartz vibrant en harmonique et excitant le résonateur.
- Générateur : la résonance fournit un courant à fréquence très élevée, utilisée pour les mesures relatives.

L'inversion du tétraèdre que forme la molécule d'ammoniac produit notamment une raie spectrale [sur la fréquence 23.870.129 KHz ( $\lambda = 1,26$  cm dans le vide)]. Un quartz vibrant excite en harmonique un guide allongé contenant le gaz ammoniac; on applique périodiquement un léger balancement de fréquence au quartz. L'absorption produite à chaque passage par la valeur de résonance fait naître un faible courant électrique qui, amplifié, actionne un mécanisme de correction de fréquence. Cependant l'effet Doppler élargissant la raie spectrale limite la précision dans l'échelle des micro-temps.

- Résonateur à jet atomique de césium (émission) : une enceinte thermique laisse échapper un mince jet d'atome de césium; celui-ci passe dans un premier aimant qui le concentre et trie les atomes suivant leur moment magnétique. Puis il traverse deux cavités résonantes excitées en phase par le courant à régler sur la résonance : entre ces deux cavités règne un champ magnétique perpendiculaire au jet. Un deuxième aimant analogue au premier effectue à nouveau un tri des atomes de césium de sorte que seuls les atomes en résonance atteignent le détecteur. Celui-ci les renvoie ionisés positivement vers une plaque ionisée négativement. Du fait de l'orientation du champ magnétique dans lequel se situent les cavités en résonance, l'effet Doppler disparaît. L'intérêt de l'utilisation du césium est l'écartement des raies auxiliaires et leur faible largeur évitant toute confusion. La méthode du « pompage optique » de Kastler repose sur le même principe général, sauf que les changements de niveaux d'énergie sont provoqués par des effets photoniques et non magnétiques ou inversement des modifications de la lumière émise par un corps excité dans le domaine hertzien mettant en évidence des changements de niveaux d'énergie.

- Principe du MASER ( Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation) : jet moléculaire d'ammoniac. Les molécules d'ammoniac sont concentrées et triées par une lentille électrostatique (focalisateur) qui les dirige vers une cavité résonante allongée. Dans l'axe de cette cavité se propage une onde dont la fréquence égale celle de la raie d'ammoniac. Les oscillations s'entretiennent par égalité d'énergie avec celle cédée par les molécules d'ammoniac provenant du focalisateur. Il n'y a donc pas besoin de courant extérieur. Seul intervient l'échappement des molécules d'ammoniac. Du fait de l'absence d'effet Doppler, la largeur de la raie de résonance se trouve très réduite.

D'une manière générale, la comparaison des micro-fréquences des horloges à quartz et atomiques avec le temps astronomique révèle une certaine irrégularité relative de ce dernier (ou réciproquement ?).

## Horloges-Fossiles

Il ne s'agit plus ici de machines à proprement parler mais de classification de phénomènes observés par leurs fossiles ou leurs traces : en fait c'est la représentation de la pile stratigraphique, appelée communément « ordre chronologique ».

La mesure des durées n'est possible que dans une séquence cyclique d'événements dont une ou plusieurs phases ont pu être mesurée par rapport aux cycles astronomiques ou mécaniques.

Ainsi, par exemple, le botaniste observe à la fin de chaque année qu'une nouvelle couche de faisceaux libéro-ligneux se forme autour d'un tronc d'arbre : il sait par observation qu'il s'agit d'une conséquence de la montée de la sève à chaque printemps. Lorsqu'il examine la section transversale d'un tronc, il peut calculer l'âge cumulé de l'arbre en années successives, chacune représentée par un cercle concentrique.

- Les variations saisonnières observées dans les sédiments détritiques des lacs glaciaires se matérialisent par des alternances de minéraux argileux et détritiques, chaque changement correspondant à une demi-année :

Au printemps, la fonte des glaces entraîne une certaine quantité de particules rocheuses qui sont fragmentées et lessivées par la force des courants : seuls résistent les minéraux durs et chimiquement stables, tels que les quartz par exemple; ils viennent alors se sédimenter avec les résidus argileux de la dégradation chimique dans le bassin récepteur. On a alors une couche néoformée composée de grains de quartz emballés dans du matériel argileux.

La période d'été correspond à un ralentissement des eaux transporteuses : il s'ensuit un appauvrissement en éléments clastiques; au moment du gel au début de l'hiver, seuls flocculent encore et se déposent les minéraux argileux. Pendant l'hiver, arrêt total du processus sédimentaire. Au printemps suivant, recommence brusquement la sédimentation clastique. Les couches ainsi formées en alternance sont appelées varves. Chaque varve a une épaisseur de l'ordre du millimètre ou inférieure. Lorsqu'une formation sédimentaire ou lithope est composée de varves, on peut calculer

sa durée de dépôt en années cumulées par comptage des varves.

Si tous les bassins sédimentaires connus, même les plus anciens, étaient ainsi composés de varves, on pourrait calculer les durées de leurs dépôts en nombre d'années et ainsi tenter d'en déduire l'âge par rapport à notre époque. Malheureusement les dépôts de varves sont des phénomènes peu fréquents comparés à l'énorme masse des dépôts sédimentaires connus.

Les sédimentologues observent cependant des alternances, des cycles, des répétitions dont les durées sont probablement en dehors de l'échelle observable ou sont l'expression de cycles relativement courts, peut-être de l'ordre du siècle ou du millénaire : ces cycles ne sont actuellement pas directement mesurables par rapport aux cycles astronomiques.

L'échelle stratigraphique n'est pas à proprement parler une échelle mais une classification ordinale. La base de la stratigraphie est la paléontologie qui permet de déterminer l'ancienneté relative des faunes et des flores et d'en déduire ensuite l'ordre relatif de dépôt des couches sédimentaires qui les contiennent.

Les divisions stratigraphiques obtenues sont en fait un « manteau d'Arlequin ». Ainsi les divisions du début de l'ère primaire ont été basées sur les zones à trilobites; celles de la fin du primaire sur les flores; celles de l'ère secondaire sur les zones à céphalopodes; celles du tertiaire sur les zones à mammifères. Des subdivisions plus fines sont obtenues par surimposition de micropaléofaunes (foraminifères, planctons) et de micropaléoflores (spores, graines).

Les corrélations entre ces différents phylums sont encore sujettes à de nombreuses controverses.

La biostratigraphie donne un ordre chronologique imparfait mais qui n'est en aucune façon une horloge car aucune durée n'y est actuellement mesurable par comparaison avec le temps sidéral. De plus elle ne s'applique qu'aux dépôts fossilifères qui sont en minorité par rapport à la masse des sédiments azoïques existant dans la croûte terrestre.

## Horloges radio-isotopiques

La transformation des noyaux d'éléments atomique est un phénomène progressif observable en laboratoire. Certaines particules nucléaires ont une durée de vie très brève, à l'échelle de la seconde ou au-dessous. D'autres au contraire ont une durée de vie très longue, à l'échelle astronomique et au-dessus.

Le choix de certains éléments à noyaux instables sur de grandes durées et faisant partie des constituants minéraux de dépôts anciens permet de calculer la durée séparant la formation du dépôt de l'époque actuelle et de la comparer avec le cycle astronomique.

Exemple : la durée de vie de l'isotope 14 du carbone est de 5.600 ans (trajectoire calculée en laboratoire). Son dosage dans un fossile contenant des éléments carbonés (os, bois, graisse, coquille) permet de connaître l'âge du support par rapport au système de référence du cycle annuel : nombre d'années séparant l'instant de l'observation de l'instant où est construite la substance organique. On arrive en principe à un taux d'erreur avoisinant 5%.

Certains éléments instables ont des durées de vie beaucoup plus longues, pouvant atteindre et dépasser le milliard d'années. Là encore la précision des mesures de trajectoires en laboratoires permet d'extrapoler des durées immenses hors de l'échelle humaine. Leur dosage dans des roches-supports permet de calculer la durée en unités annuelles séparant l'instant de l'observation de l'instant où se forment les minéraux constituant la roche. La méthode la plus employée actuellement est le dosage du potassium-argon dans certains minéraux tels que les micas. L'unité de temps utilisée est le million d'années (M.A.). Une autre méthode est basée sur la mesure des auréoles d'altération du zircon, auréoles contenant des substances radioactives qui se développent au fur et à mesure du vieillissement du cristal; mais la précision est moins bonne que dans le dosage du K-Ar.

Cependant il existe un facteur d'incertitude sur l'âge réel de mise en place des roches originelles car généralement les mesures s'effectuent à l'intérieur de minéraux qui se sont souvent développés longtemps après la cristallisation de la roche primitive, notamment lorsqu'il y a eu métamorphisme postérieur, ce qui est assez fréquent dans les roches les plus anciennes.

En résumé, la détection du temps à partir des rythmes diurnes annuels a conduit l'homme à concevoir des systèmes et des machines permettant de répéter et de diviser ces rythmes, de les multiplier d'autre part.

- Les horloges qui sont des **diviseurs** du rythme astronomique sont, comme nous venons de le voir, les sabliers et clepsydres, les pendules mécaniques, les oscillateurs à quartz, les oscillateurs atomiques. La plus petite division atteinte en l'état actuel de la technique est de l'ordre de :

$10^{-14}$  seconde (0,000000000000001 seconde)

la seconde étant elle-même la quatre-vingt-six mille quatre-centième partie du jour sidéral (vingt-quatre heures).

- Les horloges qui sont des **multiplicateurs** du rythme diurne annuel sont les horloges radioactives appliquées au domaine archéologique et géologique. Le plus grand multiple observé dans la lithosphère est de l'ordre de dix milliards d'années ( $10^{15}$  secondes).

Le tableau de la page suivante est une échelle des durées terriennes mesurées à partir d'un intervalle de référence de **1 seconde** :

## Echelle des durées terriennes à partir de l'intervalle de 1 seconde

SECONDES	UNITES DE MESURE	EVENEMENTS- REPERES	HORLOGES
$31536 \times 10^{15}$		Naissance de la Terre	Radio-isotopes
$31536 \times 10^{14}$	1 milliard d'années		
$31536 \times 10^{11}$	1 million d'années	Âges géologiques	
$31536 \times 10^8$	1 millénaire		Horloges à quartz et mécaniques
$31536 \times 10^5$	1 siècle	Durée de la vie humaine	
$31536 \times 10^3$	1 an	Révolution de la Terre	
86400	1 jour	Rotation de la Terre	Sabliers et clepsydres
3600	1 heure		
60	1 minute		
<b>1</b>	<b>1 seconde</b>		
$1 \times 10^{-3}$	1 milliseconde		
$1 \times 10^{-6}$	1 microseconde	Fréquence du quartz	Oscillateurs atomiques
$1 \times 10^{-9}$	1 nanoseconde		
$1 \times 10^{-10}$		Résonance du césium	
$1 \times 10^{-14}$		Durée de vie du méson $\pi$	