

# L'eau rдинateur

**JEAN-PAUL DELAHAYE**

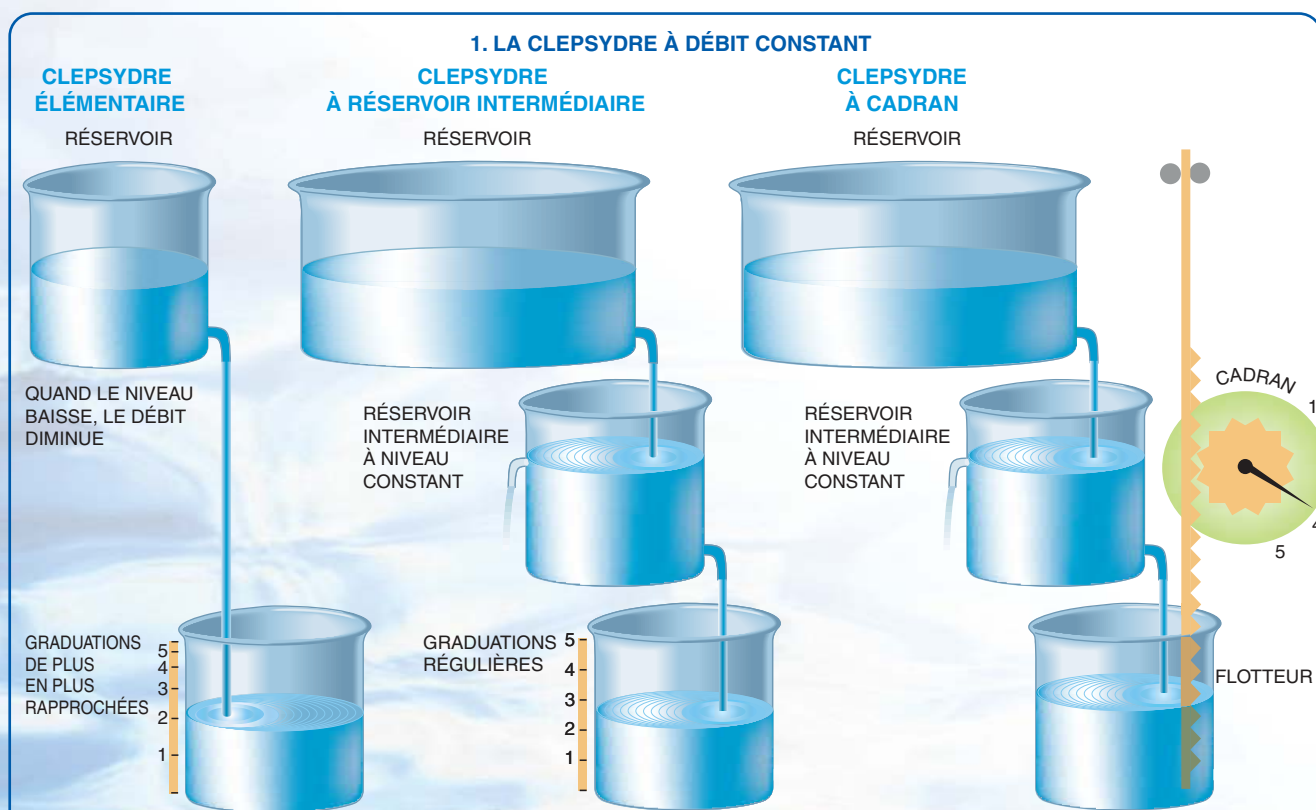
**Galilée aurait apprécié la précision et l'inventivité des machines hydrauliques de Bernard Gitton, horloge et eaurдинateur. Il aurait aussi admiré la beauté des instruments.**

Certains objets techniques, supplantés par d'autres, cessent de progresser, sont abandonnés, et finissent par être oubliés. Tel est le cas des machines à calculer à engrenages et des règles à calcul à graduations logarithmiques omniprésentes dans les années 1960 ; rendues obsolètes dans les années 1970 par le triomphe des calculatrices électroniques, elles ont disparu.

Heureusement quelques passionnés ou artistes fascinés par la beauté d'un savoir-faire précieux maintiennent vivante une technique ancestrale qu'ils font même progresser. Il en est ainsi des clepsydras (du grec «qui vole l'eau»). Ces instruments primitifs de mesure du temps fonctionnent à l'aide de liquides. Elles étaient déjà connues des Égyptiens et les Grecs les prisaient lorsque la lumière du jour n'était plus présente ou trop faible pour

éclairer les cadrans solaires. Avec les sabliers, elles seules pouvaient mesurer les petites durées.

La clepsydra qui au départ était un simple récipient percé se déversant dans un autre muni d'une graduation connut divers perfectionnements. En particulier, vers 270 avant notre ère, le physicien grec Ctésibios eut une idée pour uniformiser l'écoulement du liquide : plutôt que de laisser se vider le réservoir de la



Vers 1610, Galilée dans son ouvrage sur *La chute des corps* où il décrit ses expériences avec une boule en bronze roulant sur un plan incliné précise : «Quant à la mesure du temps, nous la fimes à l'aide d'un grand seau plein d'eau d'où sortait, par un fin tuyau soudé sur le fond, un mince filet d'eau reçu dans un petit verre durant tout le temps de la descente de la boule. Les quantités d'eau recueillies étaient pesées chaque fois sur une balance très exacte donnant par la différence et proportion de leurs poids la différence et proportion des temps.» La vitesse d'évacuation de l'eau dépend de la hauteur d'eau au-dessus du robinet : pour que cette vitesse ne diminue pas quand le réservoir se vide, on insère un réservoir intermédiaire préservant un débit constant dans le récipient de mesure.

En haut, à gauche: Feuilles de l'Agora. American School of classical studies.

clepsydre dont le débit se ralentit à mesure que le niveau baisse (car la vitesse de sortie de l'eau diminue avec la hauteur d'eau), il proposa de le maintenir rempli à l'aide d'un écoulement plus fort et d'un système de trop-plein. La quantité d'eau s'écoulant de ce récipient toujours plein est alors constante et le volume de l'eau qui s'écoule dans un cylindre récepteur gradué donne une mesure assez fidèle des durées (voir la figure 1).

Bernard Gitton, héritier moderne de cet art millénaire, a conçu et mis au point une horloge merveilleuse d'un nouveau type qui fonctionne uniquement grâce à l'écoulement d'un liquide coloré. Son horloge rivalise en précision avec les pendules de nos parents (mais pas avec les horloges à quartz, produits récents de l'électronique).

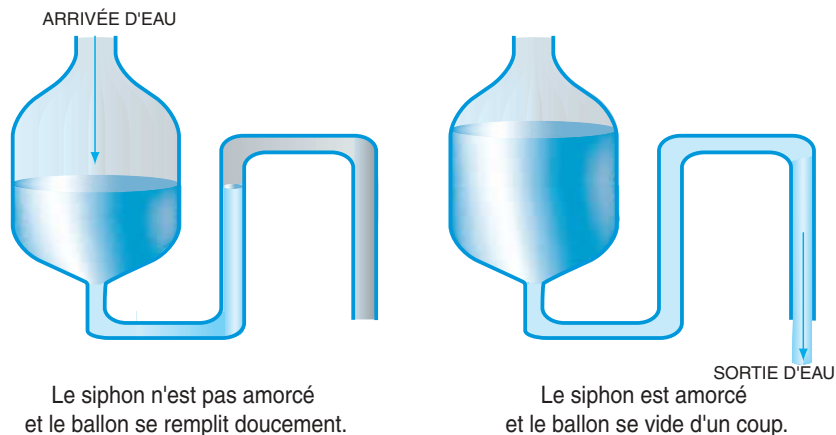
### L'HORLOGERIE CLASSIQUE

Dans une horloge, il faut stocker de l'énergie et la faire circuler pour alimenter un mécanisme, le régulateur, qui découpe le temps en unités égales. Ces unités sont décomptées pour commander l'affichage des minutes et des heures selon des conventions établies.

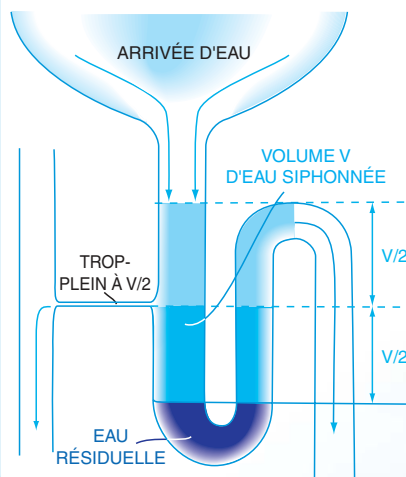
Dans les horloges mécaniques anciennes, l'énergie est stockée par un poids qui descend, suspendu à une corde. On utilisa ensuite des ressorts tendus puis, plus récemment, des piles électriques. Le régulateur dans les premières horloges mécaniques du XIII<sup>e</sup> siècle était un système inertiel, le foliot : c'est une tige horizontale massive qui ralentit la chute du poids en oscillant autour d'un axe vertical dans un sens puis dans un autre. Trop gourmand en énergie et s'usant rapidement, ce régulateur a été remplacé par le balancier. L'idée provient de Galilée qui l'utilisa dans certaines de ses expériences, mais la première horloge à balancier a été construite par Huygens vers 1650. Le ressort spiral des horloges mécaniques dès le XV<sup>e</sup> siècle ou le cristal de quartz, plus récemment, sont des régulateurs plus commodes que le balancier lorsque les instruments doivent voyager. Les montres seront toutes équipées du ressort spiral jusqu'au milieu du XX<sup>e</sup> siècle ainsi que les horloges marines qui résolurent l'important problème des longitudes au XVIII<sup>e</sup> siècle : pour évaluer la longitude sur la sphère terrestre (indispensable à la navigation loin des côtes) mesurer la hauteur du Soleil et le Nord ne suffisent pas, il faut disposer d'une évaluation précise du temps. Au XVIII<sup>e</sup> siècle, la précision des horloges marines atteint une minute par an.

Dans l'horlogerie classique, le décompte des battements du régulateur se fait grâce à des engrenages soigneusement

## 2. FONCTIONNEMENT GÉNÉRAL D'UN SIPHON

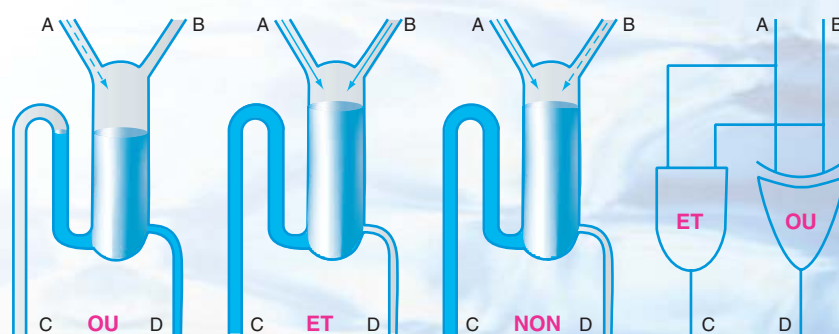


## 3. LE SIPHON TOLÉRANT



Un volume d'eau ( $V/2$ ) approximativement constant est délivré à chaque battement du balancier. Même si la quantité d'eau n'est pas absolument constante, le déclenchement du siphon de doublement de la période se fait au bout de deux battements. En effet, si le déversement de la première cuillère a été trop important (mais inférieur à  $V$ ), le tuyau de trop-plein évacue l'eau supplémentaire. Lorsque la seconde cuillère se déverse, pourvu qu'elle ajoute un volume d'eau moins  $V/2$ , elle déclenchera le siphon. Le siphon opère ainsi après deux apports d'eau. Si le second déversement est supérieur à  $V/2$ , le siphon suivant ajuste la quantité d'eau à  $V$ .

## 4. LE SIPHON RÉALISE DES PORTES ET, OU ET NON



Le circuit hydraulique de gauche permet de réaliser à la fois une porte logique OU, une porte logique ET et une porte NON. L'eau arrive par les entrées A et B. Si une seule des deux entrées est alimentée, l'eau s'écoule par la sortie D de faible diamètre. En revanche, si les deux entrées sont alimentées, le siphon se met à fonctionner et toute l'eau (ou presque) s'écoule par la sortie C. La sortie D réalise donc le OU logique (il s'agit du OU exclusif aussi appelé XOR : rien si ni A ni B, ou si A en même temps que B, et quelque chose si A ou B, mais pas les deux). La sortie C, qui ne fonctionne que lorsque l'eau s'écoule à la fois par A et B, réalise un ET logique. Pour obtenir un NON, on fait s'écouler de manière continue de l'eau par A, la sortie D sera alors la négation de l'entrée B, car elle débitera si l'entrée B ne coule pas et elle ne coulera pas si l'entrée B coule.

agencés qu'on apprit à miniaturiser pour les horloges de salon, les réveils et les montres qui devinrent de plus en plus petites et de plus en plus plates, jusqu'à pouvoir être logées sur des bagues. Dans les montres à quartz, le décompte des battements nécessite un circuit électronique.

Les conventions d'affichage sont le plus souvent celles du cadran à 12 secteurs pour les heures et 60 pour les minutes de nos bonnes vieilles pendules (ce cadran s'est imposé à partir du XV<sup>e</sup> siècle), ou celles implicites de l'affichage numérique pour certaines horloges électroniques modernes. D'autres conventions sont possibles : dans les horloges à billes, le nombre de billes visibles indique l'heure et les minutes et c'est l'une de ces conventions à l'aide de ballons remplis que Bernard Gitton a adoptée pour sa clepsydre.

### UNE CLEPSYDRE DE PRÉCISION

Alors que tout fut mécanique entre le XIII<sup>e</sup> siècle et le XX<sup>e</sup> siècle et que tout est devenu électrique et électronique aujourd'hui, l'horloge de Bernard Gitton fonctionne uniquement par la circulation d'un liquide.

Comme pour les clepsydras élémentaires, le stockage de l'énergie est réalisé par un réservoir de liquide placé en haut de l'horloge. Le régulateur est un balancier dont le mouvement est entretenu par l'écoulement du liquide provenant du réservoir. Cet écoulement n'a pas besoin d'être rigoureusement constant, car c'est la régularité du balancier qui assure la précision générale de l'horloge. Les variations de température induisent des changements de viscosité, et les impuretés provoquent des dépôts qui diminuent la vitesse d'écoulement : aussi il est impossible de maintenir longtemps un débit constant avec une précision de plus de quelques centièmes. C'est pourquoi les clepsydras anciennes, qui devaient sans cesse être remises à l'heure, ont été abandonnées dès que l'art de la mécanique s'est perfectionné, donnant naissance aux horloges à engrenages.

Cependant dans l'horloge de Bernard Gitton, l'eau ne sert pas uniquement à stocker et à transporter l'énergie pour l'entretien du mouvement du balancier, elle sert aussi à calculer l'heure et à l'afficher. Tout se fait grâce à un réseau de siphons permettant, d'une part, de décompter les oscillations du balancier et, d'autre part, de remplir deux colonnes indicatrices, l'une des minutes, l'autre des heures, selon une convention de remplissage immédiatement compréhensible.

Une première cascade de siphons se déversant les uns dans les autres rem-

plit, toutes les deux minutes, un ballon qui déclenche (par aspiration lorsqu'il se vide) un autre ballon se déversant dans la colonne des minutes dont le niveau s'élève alors. Les siphons ont été conçus de façon à fonctionner régulièrement à partir des mouvements du balancier. Le débit du réservoir peut varier de plus ou moins 30 pour cent sans que le système des siphons en soit perturbé.

Lorsque la colonne des minutes est pleine, elle se vide (par siphon) et déclenche par aspiration d'air un autre siphon qui provoque le remplissage d'une des boules marquant les heures. Au bout de 12 heures, un dernier siphon vide tous les ballons marquant les heures, ce qui remet l'horloge à zéro et lui permet donc de fonctionner indéfiniment sans intervention humaine. Des détails sont donnés sur la figure 5.

### DIFFICULTÉS

On n'imagine mal toutes les difficultés que le schéma théorique que je viens de décrire oppose lorsqu'on veut le mettre en œuvre. D'abord il faut déterminer le bon liquide. Si vous utilisez de l'eau, celle-ci sera rapidement envahie par des algues microscopiques qui la rendront trouble, en modifieront la viscosité, et finalement, empêcheront le bon fonctionnement de l'horloge. Dans l'Antiquité, les clepsydras étaient utilisées pour mesurer le temps des plaidoiries dans les joutes oratoires ; une tricherie, dénoncée par Platon, consistait à placer un peu de miel dans la clepsydre, ce qui en diminuant la fluidité du liquide augmentait le temps de parole de l'orateur bavard et indélicat. La solution (*sic*) trouvée par Bernard Gitton est un mélange d'eau et d'alcool méthylique.

Une autre difficulté est due à l'impossibilité de fermer le circuit du liquide, comme on le fait pour le système de refroidissement d'une centrale nucléaire ou d'une voiture, car alors les prises d'air nécessaires à la bonne marche des siphons ne fonctionneraient plus. Certaines parties du circuit sont donc en contact avec l'air ambiant. Une évaporation en résulte, obligeant à compléter périodiquement les niveaux comme on ajoute de l'huile dans un moteur à explosion.

L'horloge réalisée en verre pour des raisons esthétiques et pour que son fonctionnement soit apparent ne peut pas l'être avec une grande précision, car la science des artisans verriers n'est pas millimétrique. Les divers tubes et ballons sont donc tous assez approximatifs. Cependant la conception des chaînes de siphons et l'introduction de déversoirs judicieusement positionnés font que l'horloge s'autorégule : pas plus la précision limitée des circuits que les variations inévitables de

la fluidité des écoulements ne remettent en cause l'exactitude globale de l'horloge : celle-ci n'est limitée que par la régularité du balancier, et elle est donc finalement de quelques secondes par jour.

À vrai dire, comme les horloges sont conçues pour être exposées dans le monde entier loin de leur concepteur, un système électronique de mise à l'heure et d'ajustement des niveaux a été caché dans l'horloge pour en permettre le maintien en bon état sans intervention humaine trop fréquente. Ce système électronique n'est en rien essentiel au fonctionnement de l'horloge, il se substitue simplement à un opérateur humain qui de temps en temps réglerait l'horloge et en ajusterait les niveaux.

Les *Horloges à voir couler le temps* de Bernard Gitton sont construites à l'unité et restent hors de portée de la bourse des particuliers. Il y en a maintenant dans le monde entier, de toutes tailles. La plus grande, exposée au *Children Museum* d'Indianapolis aux États-Unis, est haute



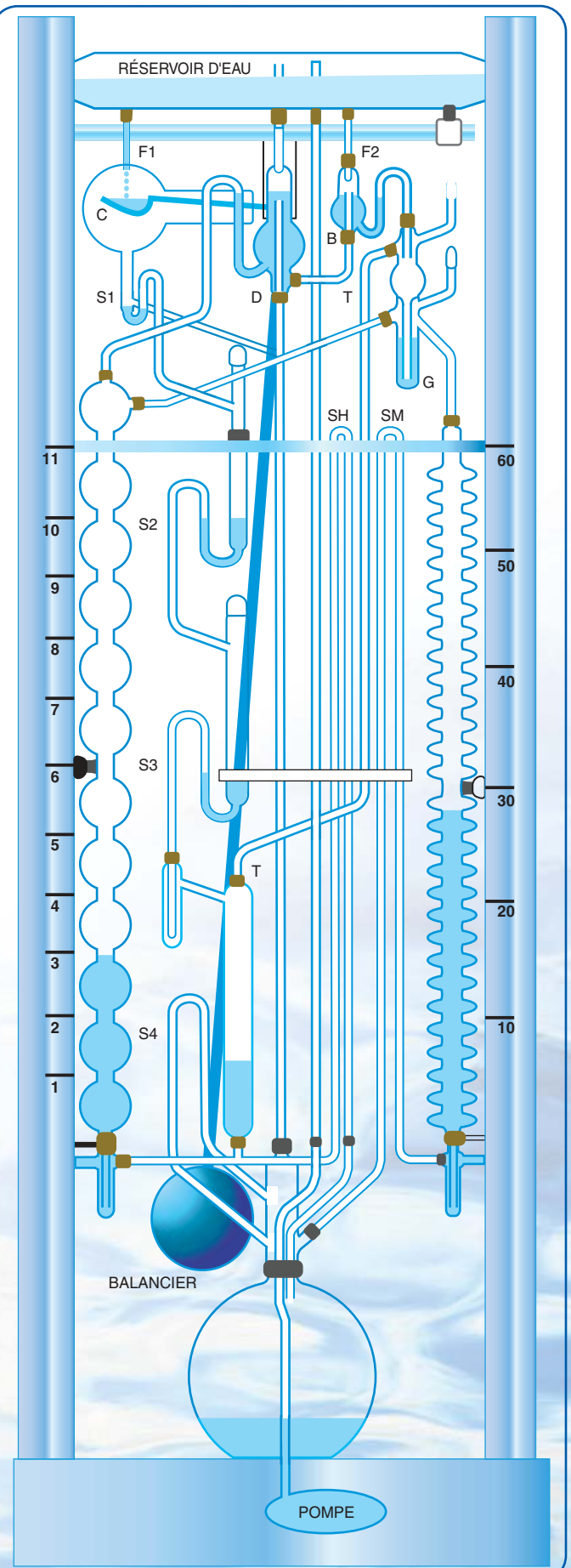
de 8 mètres. Les plus petites ne dépassent pas 1,3 mètre. Bernard Gitton s'est interdit d'ajouter des circuits d'eau ou des ballons qui n'auraient qu'une fonction décorative. Malgré cette rigueur dans la conception, ou grâce à elle, ces horloges hydrauliques sont élégantes et constituent des œuvres d'art d'une grande pureté (voir la photographie ci-contre) : les curieux s'arrêtent souvent devant elles durant de longues minutes pour déchiffrer le fonctionnement du liquide coloré qui s'agite dans cet alambic où chacun voit s'opérer sous ses yeux le miracle de la distillation du temps.

### LE CALCUL LIQUIDE : L'EAURDINATEUR

Ce que font tous les siphons de l'horloge de Bernard Gitton est un calcul : le calcul de l'heure à partir d'un battement de balancier. Dès lors qu'un calcul de ce type est possible, on imagine qu'on doit pouvoir en faire de plus complexes de nature arithmétique. Depuis que Turing a proposé son modèle général abstrait de calculateur (la machine de Turing), on sait que quelques mécanismes élémentaires de calcul combinés judicieusement autorisent en théorie la réalisation de tout calcul. Mais comme le faisait judicieusement remarquer le joueur de base-ball américain Yogi Berra : «En théorie il n'y a pas de différence entre la théorie et la pratique, mais en pratique il y en a une!». Bernard Gitton s'est donc amusé à réaliser ce qu'il a

#### 5. L'HORLOGE À EAU DE BERNARD GITTON

L'eau est stockée dans le réservoir du haut. Elle alimente deux circuits : par F1 le réseau de siphons qui compte les oscillations du balancier (placé derrière le système hydraulique) ; par F2 le ballon B qui remplit la colonne de minutes à droite et dont le trop-plein remplit le ballon D pour l'alimentation de la colonne des heures. Suivons l'écoulement qui part de F1. L'eau remplit une cuillère C solidaire du balancier. La cuillère alimentée en permanence se vide en position basse, et ainsi le travail de l'eau entretient le mouvement du balancier (et le fait même démarrer s'il est à l'arrêt). La période du balancier est de 2,222 secondes. Quand le balancier est à droite, le contenu de la cuillère se déverse dans le ballon du siphon S1. Celui-ci ne siphonne que lorsqu'il a reçu le contenu de deux cuillères. Un système de trop-plein permet d'évacuer l'eau si la première cuillère en contenait un peu trop (voir les détails sur la figure 3). Le siphon S1, qui se déclenche ainsi toutes les 4,444 secondes, remplit progressivement le siphon S2, qui se déclenche lorsque qu'il aura été rempli 3 fois, donc toutes les 13,332 secondes. Le siphon S3 qui reçoit l'eau de S2 se déclenche quand il a reçu 3 fois le contenu de S2, et de même, S4 se déclenche quand il a reçu 3 fois le contenu de S3, c'est-à-dire toutes les  $2,222 \times 2 \times 3 \times 3 \times 3 = 120$  secondes. L'appel d'air créé par le fonctionnement du siphon S4 dans le tube T déclenche toutes les deux minutes le siphon du ballon B qui s'est rempli (mais est resté à niveau constant une fois rempli grâce au trop-plein qui alimente le ballon D). L'eau du ballon B fait déborder G (qui était rempli au départ), ce qui provoque une arrivée d'eau constante dans la colonne des minutes de l'horloge et fait monter le niveau de cette colonne de deux minutes. Quand la colonne des minutes est pleine, le siphon SM se déclenche, ce qui a pour effet, d'une part, de vider cette colonne et, d'autre part, par appel d'air de déclencher le siphon associé au ballon D dont le contenu descend dans la colonne des heures marquant le passage de l'heure. Quand la colonne des heures est pleine, le siphon SH la vide remettant l'horloge à zéro. Une pompe électrique permet à l'eau descendue de remonter dans le réservoir d'alimentation, mais bien sûr cette pompe n'est en rien essentielle au fonctionnement de l'horloge dont le réservoir pourrait être alimenté à la main périodiquement si on voulait se dispenser de l'utilisation de l'électricité.



dénoté un *eurdinateur*. C'est un appareil qui réalise des additions binaires avec de l'eau, et qui donne donc la preuve qu'une bonne maîtrise des flux hydrauliques et quelques siphons judicieusement agencés peuvent calculer et faire à peu près l'équivalent que ce que Blaise Pascal avait fait faire aux engrenages, en 1642, avec sa machine arithmétique. Les portes ET et les portes OU sont réalisées par un même mécanisme de double siphon dont on déduit un mécanisme (voir la figure 4) pour les inverseurs (portes NON).

Une version verticale de l'eurdinateur est exposée au Musée des techniques de Vienne en Autriche, mais une version horizontale et monumentale a aussi été imaginée, qui pour l'instant n'a jamais encore été réalisée : une municipalité curieuse de mathématiques et soucieuse de l'éducation scientifique des bambins se promenant dans les espaces verts qu'elle aménage et entretient, entreprendra-t-elle un jour la fabrication de ce bassin à additionner ?

Avec un peu de patience ne pourrait-on construire sur le même principe une calculatrice quatre opérations, et, pourquoi pas, un petit ordinateur programmable ? Ces hypothétiques machines seraient malheureusement d'une désespérante lenteur, nous ramenant au temps des calculateurs mécaniques de Babbage avec lesquels il fallait plusieurs dizaines de

secondes pour opérer une multiplication. Néanmoins, qui veut essayer ?

Il est à peu près certain que, malgré le soin apporté à ces réalisations, jamais «l'hydrau-informatique» ne sera en mesure de rattraper la science du calcul électronique. L'art de faire compter et calculer les objets du monde physique après avoir essayé pendant des siècles d'utiliser les écoulements (d'eau et de sable) a adopté il y a sept siècles les roues dentées (horloges et machines à calculer mécaniques). Depuis le milieu du XX<sup>e</sup> siècle, cet art en est venu aux courants électriques, stade du développement actuel. Peut-être que demain la science électronique du calcul évoluera en une science et un art aux bases optiques ou quantiques, projets sur lesquels on travaille dans les laboratoires.

L'évolution passée semble avoir suivi un chemin nécessaire, pourtant avant de dire que rien d'autre que cette histoire n'était possible (l'eau, puis les engrenages, puis l'électricité), n'oublions pas que notre cerveau, lui, est un calculateur moléculaire : la nature n'a pas choisi les mêmes technologies que nous, et d'ailleurs aujourd'hui nous ne savons pas copier sa «technologie moléculaire» de calcul encore imparfaitement comprise. De même que le XIX<sup>e</sup> siècle était aveugle aux perspectives qu'offrait l'électricité comme moyen de calcul, peut-être sommes-nous aveugles à des formes

technologiques nouvelles qui permettraient de calculer mieux et plus vite que l'électricité ? Des esprits rêveurs et obstinés comme celui de Bernard Gitton en perfectionnant une technologie vieille de plusieurs millénaires nous aident à garder l'esprit ouvert.

## LES HORLOGES IRRÉGULIÈRES

Cet esprit rêveur a conduit Bernard Gitton à explorer et réaliser récemment l'idée amusante de l'horloge aléatoire (qui est électronique cette fois).

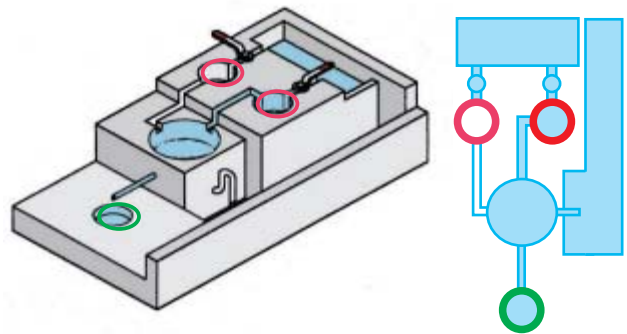
Aujourd'hui nous sommes habitués à disposer d'instruments de mesure du temps très précis qui emprisonnent nos vies, et nous avons donc du mal à croire que chez les Romains l'heure avait une durée variable qui dépendait des saisons. En effet, l'heure était alors définie comme la 12<sup>e</sup> partie du jour pendant le jour, et comme la 12<sup>e</sup> partie de la nuit lorsque le Soleil était couché, et bien sûr donc, elle varierait d'une saison à l'autre et d'un lieu à l'autre. Ne disposant pas de moyens fiables de mesurer les courtes durées de temps, la référence au Soleil était inévitable. Cette définition variable de l'heure compliquait la mise au point et le réglage des cadrans solaires et des clepsydres. Puisqu'il était plus régulier et semblait le seul à qui on puisse se fier, le temps du Soleil s'imposait au temps de l'eau et du sable. Ce n'est

### 6. L'EAURDINATEUR ET SES PORTES LOGIQUES

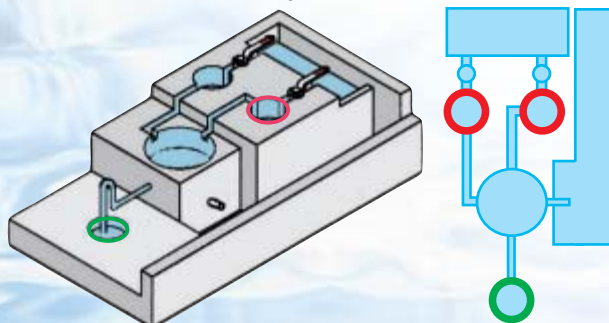
Les portes élémentaires utilisées dans l'eurdinateur sont représentées sur les schémas, les bassins rouges indiquant l'état des entrées, le bassin vert inférieur, l'état de la sortie. Le fonctionnement des portes ET, OU et NON avec trop-plein et siphons est identique à celui présenté sur la figure 4.

#### PORTE OU EXCLUSIF

Le bassin inférieur contient de l'eau si l'une des deux vannes est ouverte.

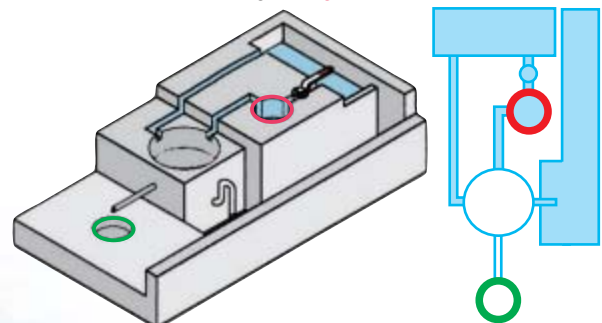


#### PORTE ET

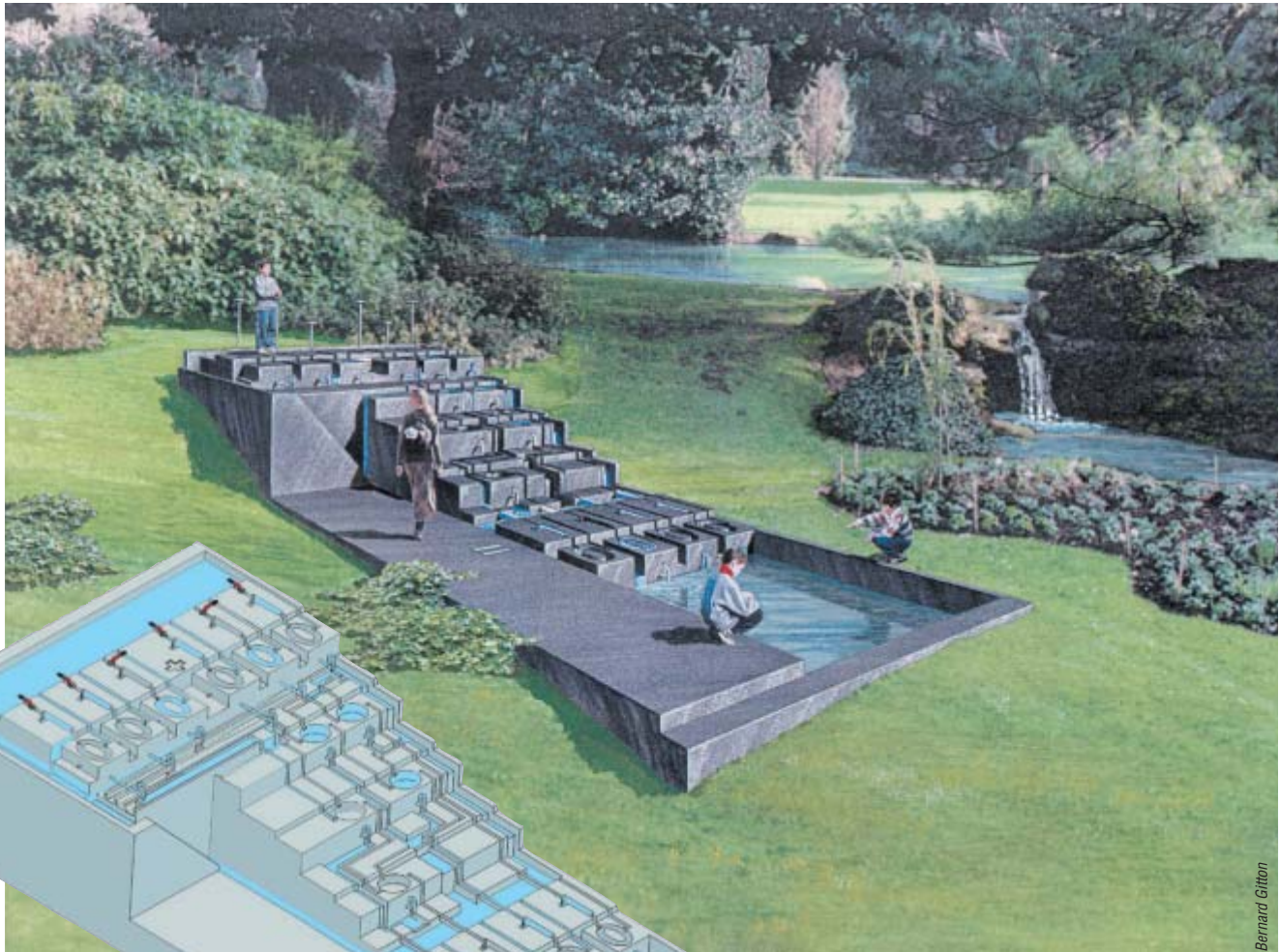


Le bassin inférieur ne contient de l'eau que si les deux vannes sont ouvertes.

#### PORTE NON



Le bassin inférieur est vide si la vanne est ouverte.



Bernard Gitton

**7. PROJET D'EURDINATEUR HYDRAULIQUE** additionnant trois chiffres binaires (aquarelle en haut et schéma à gauche).

qu'au XIV<sup>e</sup> siècle lorsque le temps mécanique sera maîtrisé qu'on s'appuiera sur lui pour définir l'heure comme la 24<sup>e</sup> partie d'une journée complète: on abandonnera les heures du Soleil pour les *heures égales* dont nous ne savons plus nous passer et dont nous ignorons qu'elles sont une invention récente. Pour réintroduire un peu de cet agrément qu'apporte l'incertitude d'un temps fluctuant, Bernard Gitton a récemment réalisé des horloges irrégulières dont le principe est le suivant. Toutes les minutes (de vraies minutes déterminées par un cristal de quartz), un générateur pseudo-aléatoire électronique décide avec une probabilité de 50 pour cent de faire avancer l'horloge de deux minutes ou de ne pas la faire avancer. En moyenne, l'horloge avance donc de 30 fois deux minutes par heure, soit une heure, mais ce résultat est seulement obtenu en moyenne et il se peut très bien que l'horloge avance de 58 minutes ou de 62 minutes ou même que le mouvement s'écarte encore plus de l'heure exacte. Des réglages permettent de changer les paramètres d'incertitude de l'horloge. Une telle horloge dérive

du temps officiel d'une manière imprévisible redonnant un peu de charme et de surprises aux rendez-vous et à l'organisation des journées.

Sur le même principe, l'électronique nous permet aujourd'hui sans grande difficulté de concevoir des horloges au sens des anciens (12 heures exactement de nuit, et 12 heures exactement de jour) ou des horloges qui fluctuent aléatoirement, mais sans jamais s'écarter trop

de l'heure exacte (par exemple, jamais plus de dix minutes). On peut aussi imaginer des horloges à multiples cadrans qui à chaque instant vont proposer plusieurs heures différentes vous permettant de choisir votre préférée.

Pour une meilleure hygiène de vie, on peut encore penser à des horloges qui ralentiraient pendant les repas et qui rattraperaient le retard durant le temps de travail (une idée pour la prochaine campagne présidentielle?), ou qui reliées à un thermomètre extérieur prolongeraient les nuits trop froides, etc. À chacun d'imaginer son horloge!

**Daniel BOORSTIN, *Les découvreurs. Livre 1: le temps*, Seghers, Paris, 1986.**

**Bernard GITTON, *Time, like an ever flowing stream*, in *Horological Journal*, pp. 18-20, juin 1989.**

**Jean MATRICON, *Julien Roumette. L'invention du temps*, Cité des Sciences et de l'Industrie, Presses Pocket, Paris, 1991.**

**Derek ROBERTS, *Guide du collectionneur***

**d'horloges**, éditions de l'Olympe, 1999.

**Bernard GITTON, *Le temps aléatoire, mode d'emploi*, Éditions Ateliers Bernard Gitton, (49350 Les Rosiers, Val de Loire France) 2001.**

**David M. MACMILLAN, *Delightful Machines. Bernard Gitton's Liquid Science*: <http://www.marcdatabase.com/~lemur/dm-gitton.html>**