

Le temps à l'âge de l'atome

Marc A. Viredaz

25 juin 2005

Plan de la présentation

- Évolution de la définition de la seconde.
- Principe de fonctionnement des horloges atomiques:
 - exemple: étalon de fréquence à fontaine de césium.
- Mesure du temps par moyenne d'un grand nombre d'horloges:
 - temps universel coordonné (UTC).

Temps solaire vrai

Définition:

La durée du jour est divisée en 24 heures de 60 minutes de 60 secondes.

Midi est défini lorsque le soleil est au zénith (plus haut point).

- Spécifique à chaque méridien.
- Correspond à l'angle apparent du soleil.
- Temps donné par un cadran solaire.
- Varie journallement dû à:
 1. la forme elliptique de l'orbite terrestre (période: 1 année),
 2. l'inclinaison de l'axe polaire (période: 6 mois).

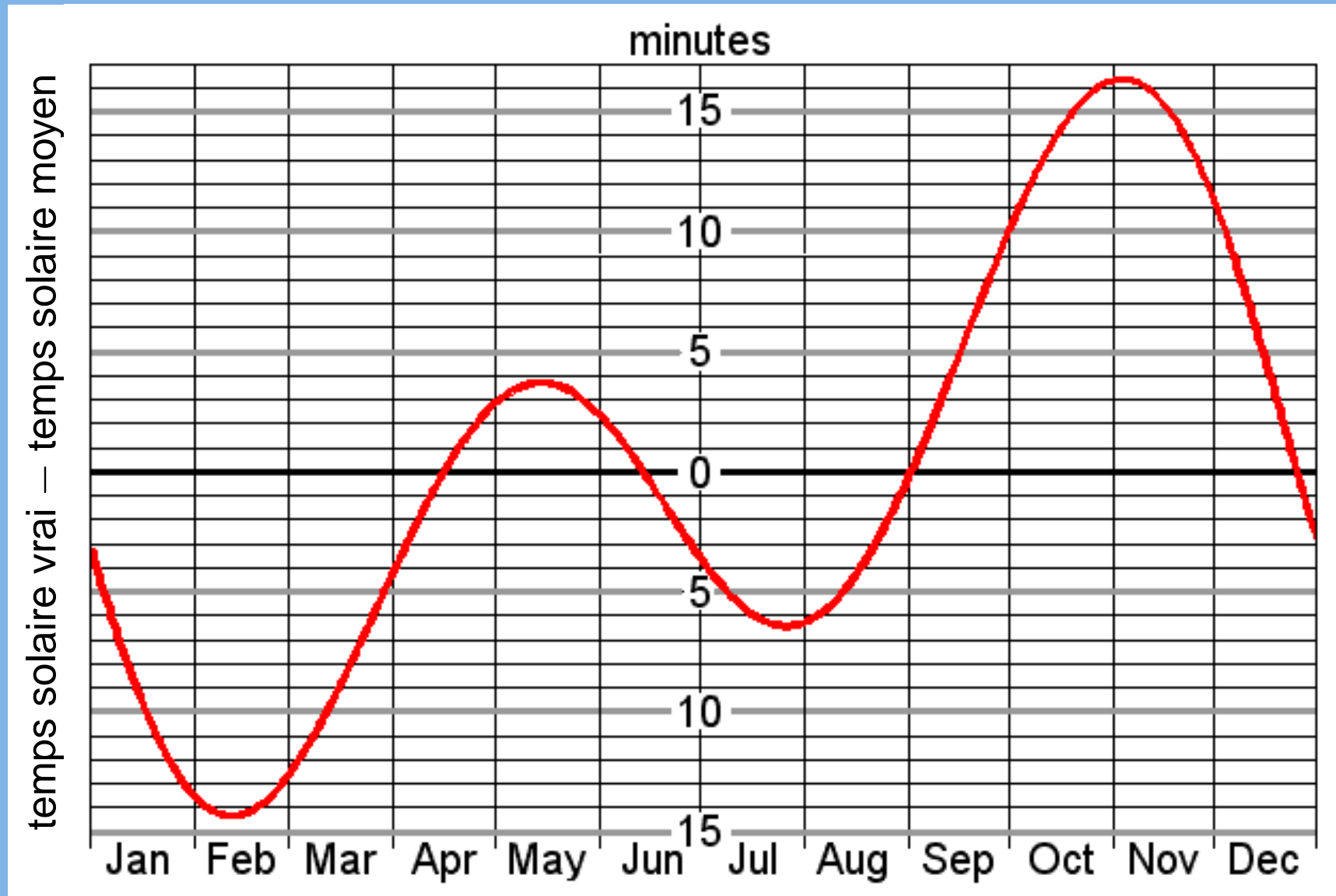
Temps solaire moyen

Définition :

Moyenne du temps solaire vrai sur une année, de sorte que le jour ait une durée constante.

- Spécifique à chaque méridien.
- Différence entre temps solaire vrai et moyen : équation du temps.

L'équation du temps



Temps universel

Définition:

Temps solaire moyen au méridien origine (longitude 0°).

- Adopté comme échelle de temps internationale en 1884 (Conférence Internationale du Méridien, Washington, DC).
- Abrégé UT (*universal time*).
- Aussi appelé GMT (*Greenwich mean time*):
 - pas de définition officielle, utilisation scientifique de GMT déconseillée.
- UT_0 : UT sans correction.
- UT_1 : UT_0 corrigé pour la nutation terrestre (mouvement de l'axe polaire).
- UT_2 : UT_1 corrigé pour les variations saisonnières de rotation (obsolète).

Seconde astronomique

Définition :

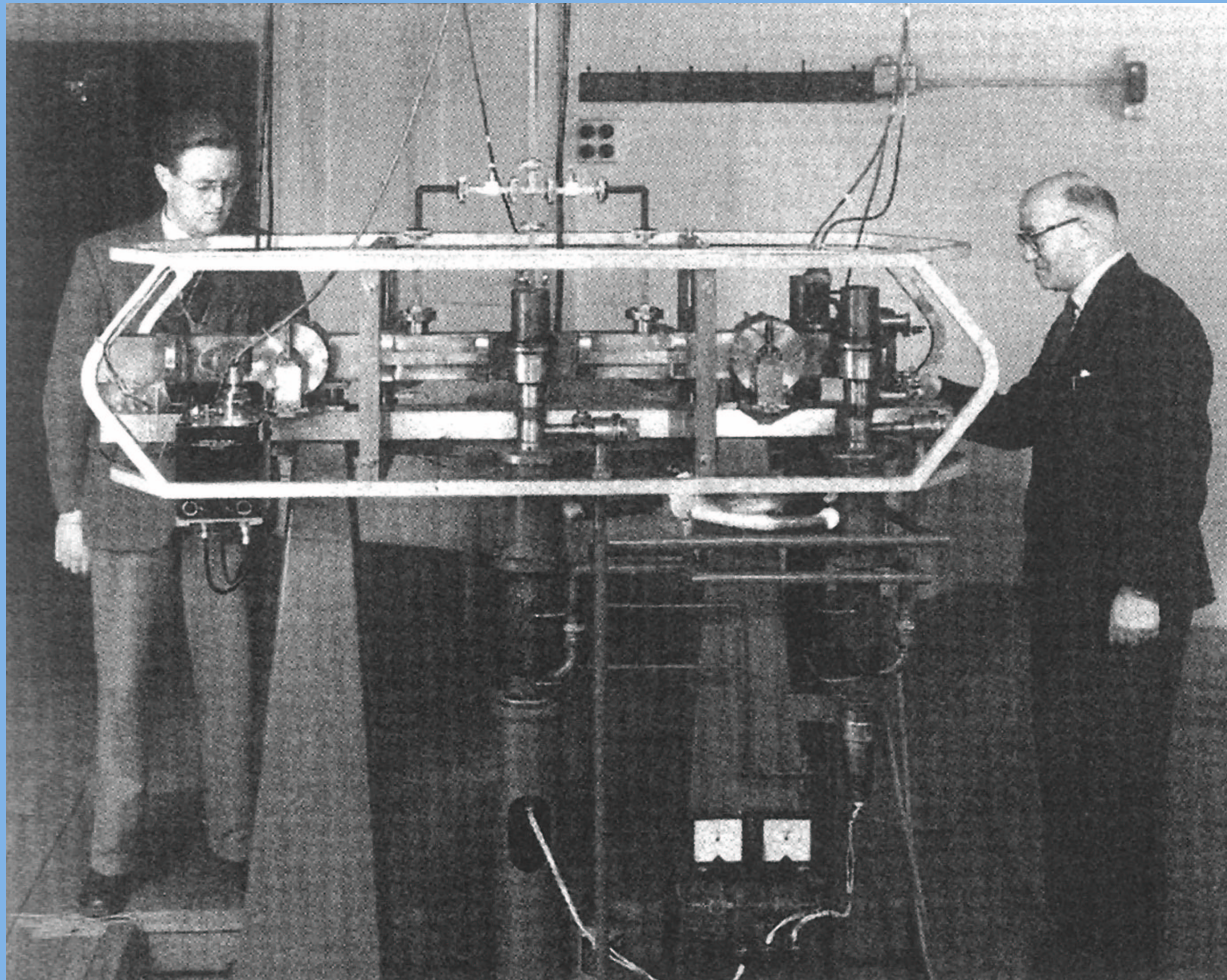
La seconde est la fraction $1/(24 \cdot 60 \cdot 60) = 1/86\,400$ du jour solaire moyen.

- Définition officielle de la seconde jusqu'au début des années 1950.

Problèmes :

- Lente augmentation de la durée du jour solaire moyen d'environ 2 ms (1 ms – 4 ms) par siècle, due à l'attraction de la lune (énergie dissipée par les marées) :
- Instabilités (fluctuations aléatoires) inférieures à 10^{-8} (1 ms par jour).
- Les progrès de la mesure du temps (horloges électriques, à quartz & atomiques) permettent de se rendre compte de ces variations (1955: 1^{ère} horloge atomique).

Première horloge atomique



1^{ère} horloge atomique à dépasser la précision du quartz et à être utilisée comme base de temps. Louis Essen & Jack V. L. Parry, National Physical Laboratory, UK, 1955.

Seconde des éphémérides

Définition de 1956 du système international d'unités (SI):

La seconde est la fraction $1/31\,556\,925.9747$ de l'année tropique pour 1900 janvier 0 à 12 heures de temps des éphémérides.

- Basée sur une définition similaire de l'union astronomique internationale (8^{ème} assemblée générale, 1952).
- Adoptée en 1956 (Comité International des Poids et Mesures, CIPM, rés. 1), ratifiée en 1960 (11^{ème} Conférence Générale des Poids et Mesures, CGPM, rés. 9).
- Extension de la définition "traditionnelle" à l'année 1900 idéalisée.

Problèmes:

- Nécessite de longues observations astronomiques.
- Précision limitée par rapport aux horloges atomiques.

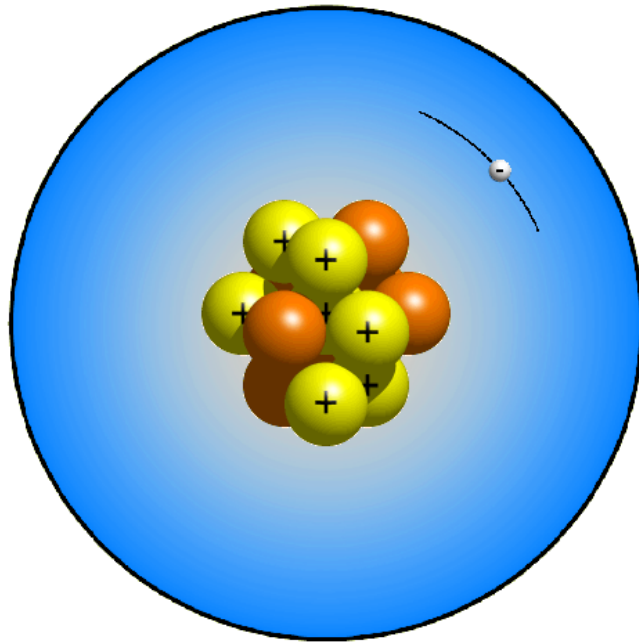
Seconde atomique

Définition de 1967 du système international d'unités (SI):

La seconde est la durée de 9 192 631 770 périodes de la radiation correspondant à la transition entre les deux niveaux hyperfins de l'état fondamental de l'atome de césium 133.

- Définition officielle courante de la seconde, adoptée en 1967 (13^{ème} CGPM, rés. 1).
- Affinée en 1997 par le CIPM: *cette définition se réfère à un atome de césium au repos, à une température de 0 K (zéro absolu, -273.15° C).*
- Aussi appelée seconde du césium.

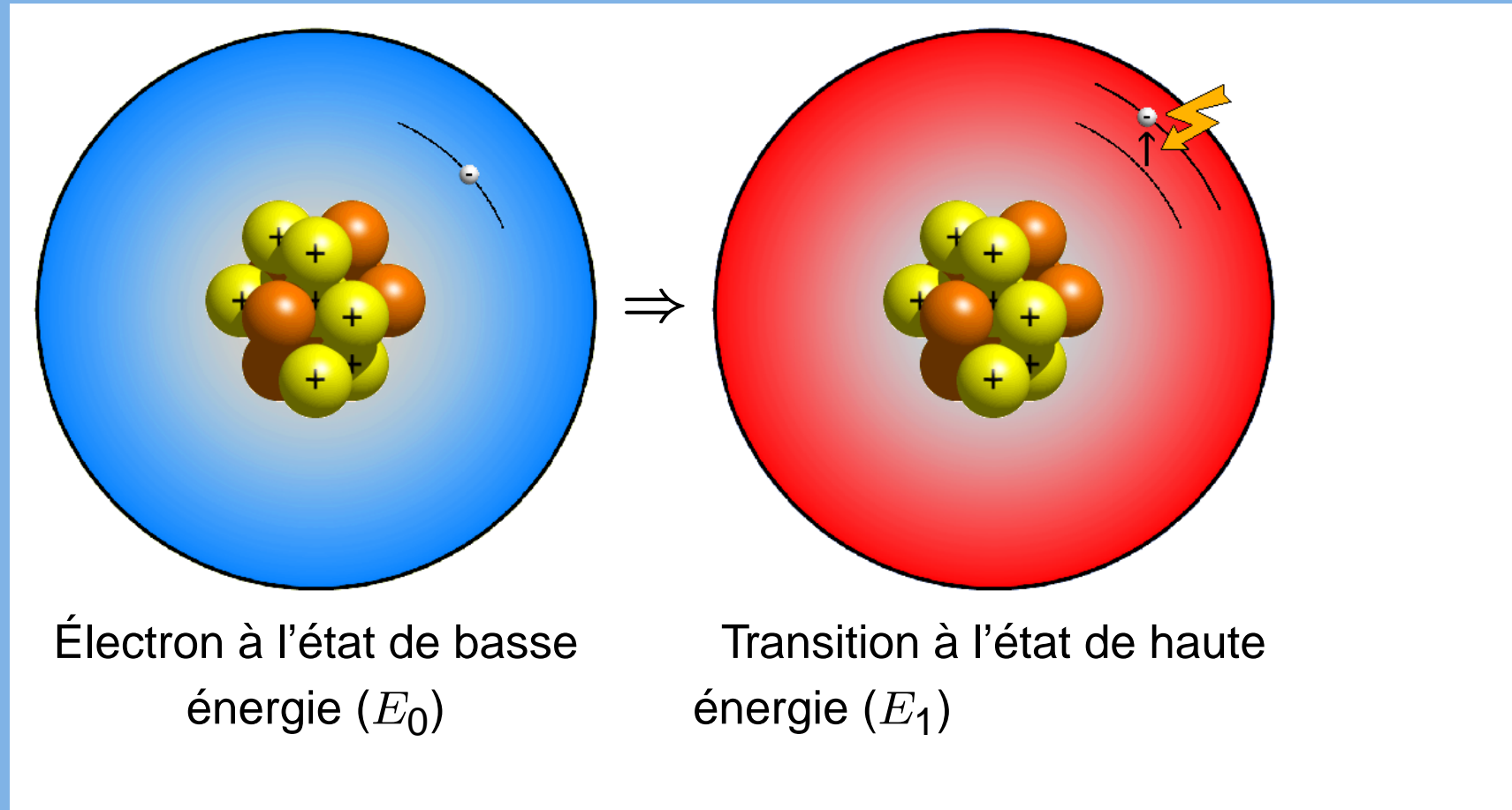
Transition atomique



Électron à l'état de basse
énergie (E_0)

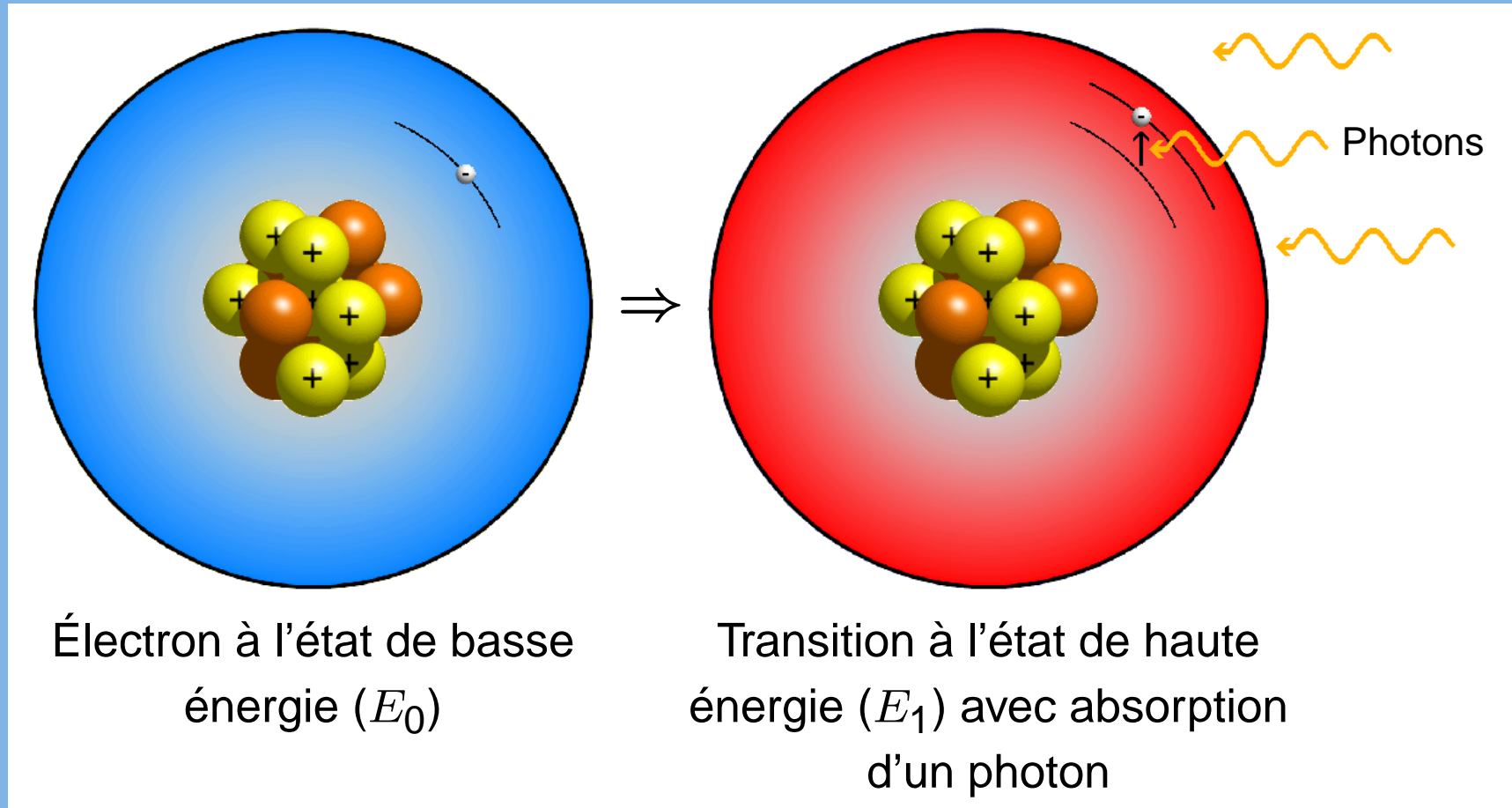
- Chaque électron se trouve à un niveau d'énergie quantique: E_0 , E_1 , E_2 , etc.

Transition atomique



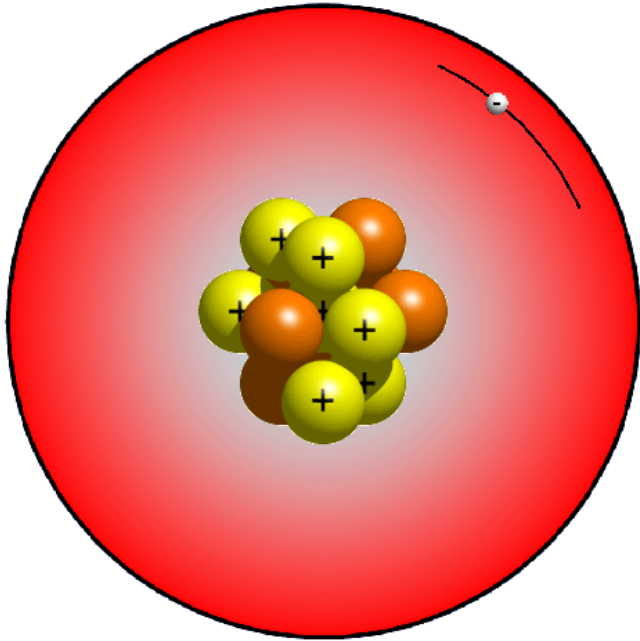
- Chaque électron se trouve à un niveau d'énergie quantique: E_0 , E_1 , E_2 , etc.

Transition atomique



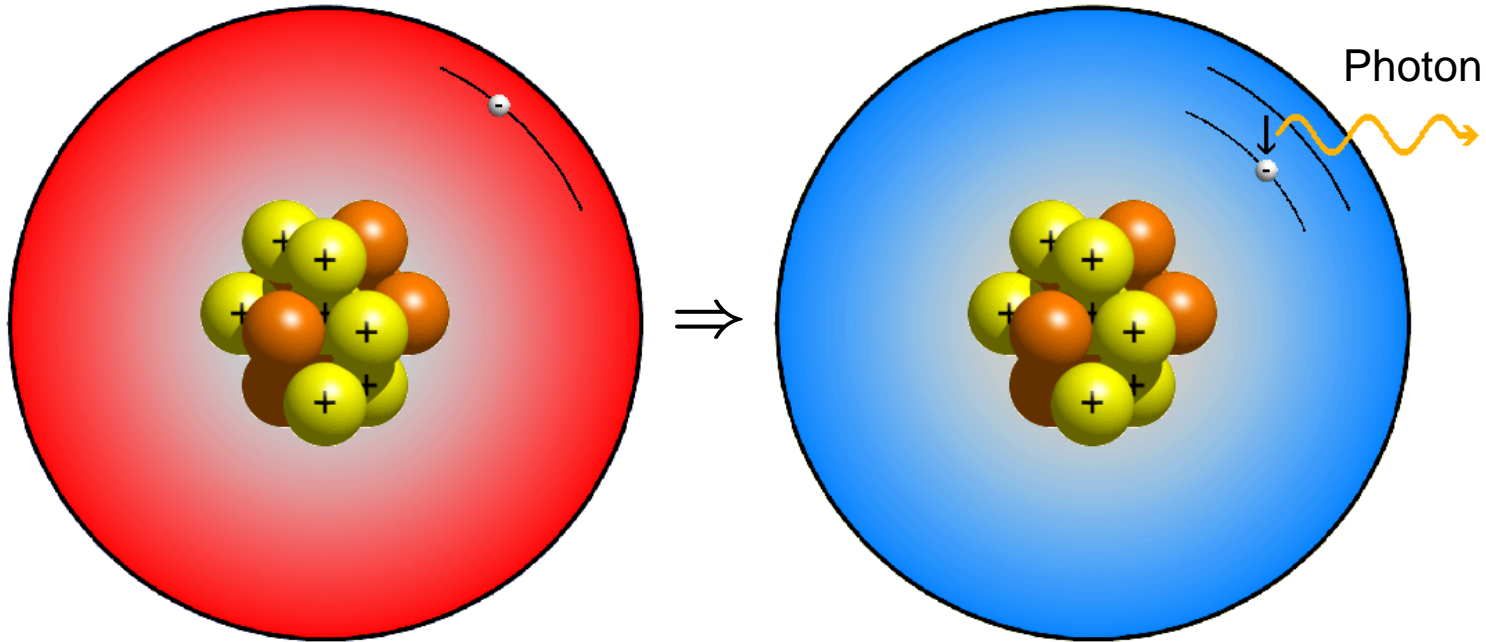
- Chaque électron se trouve à un niveau d'énergie quantique: E_0 , E_1 , E_2 , etc.
- Photon: particule d'une onde électromagnétique (lumière, onde radio, rayon X, ...).

Transition atomique



Électron à l'état de haute
énergie (E_1)

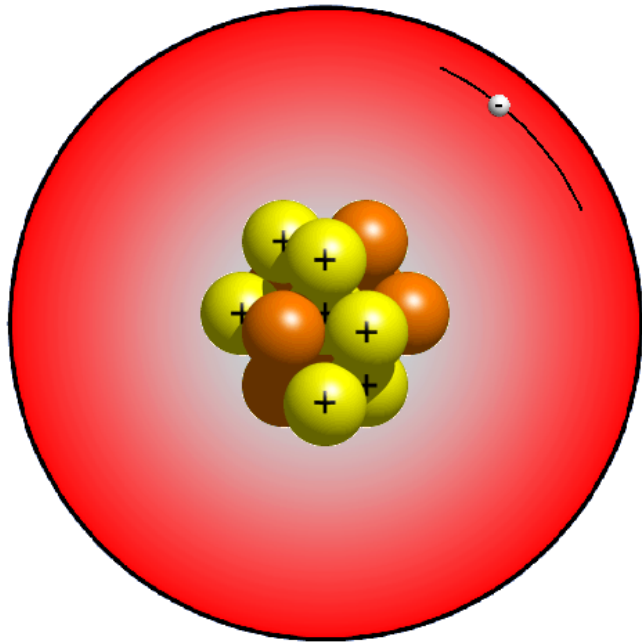
Transition atomique



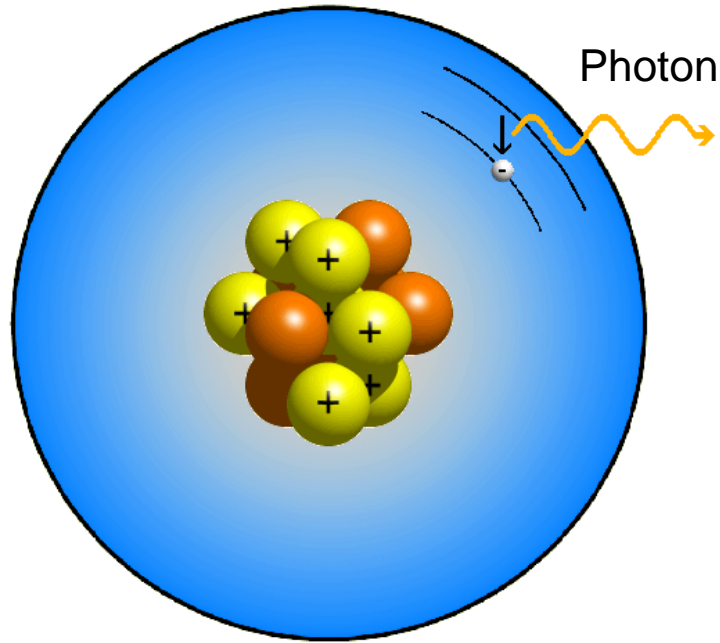
Électron à l'état de haute
énergie (E_1)

Transition à l'état de basse
énergie (E_0) avec émission
d'un photon

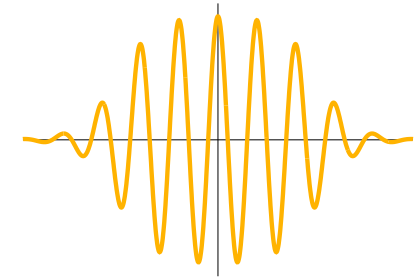
Transition atomique



Électron à l'état de haute énergie (E_1)

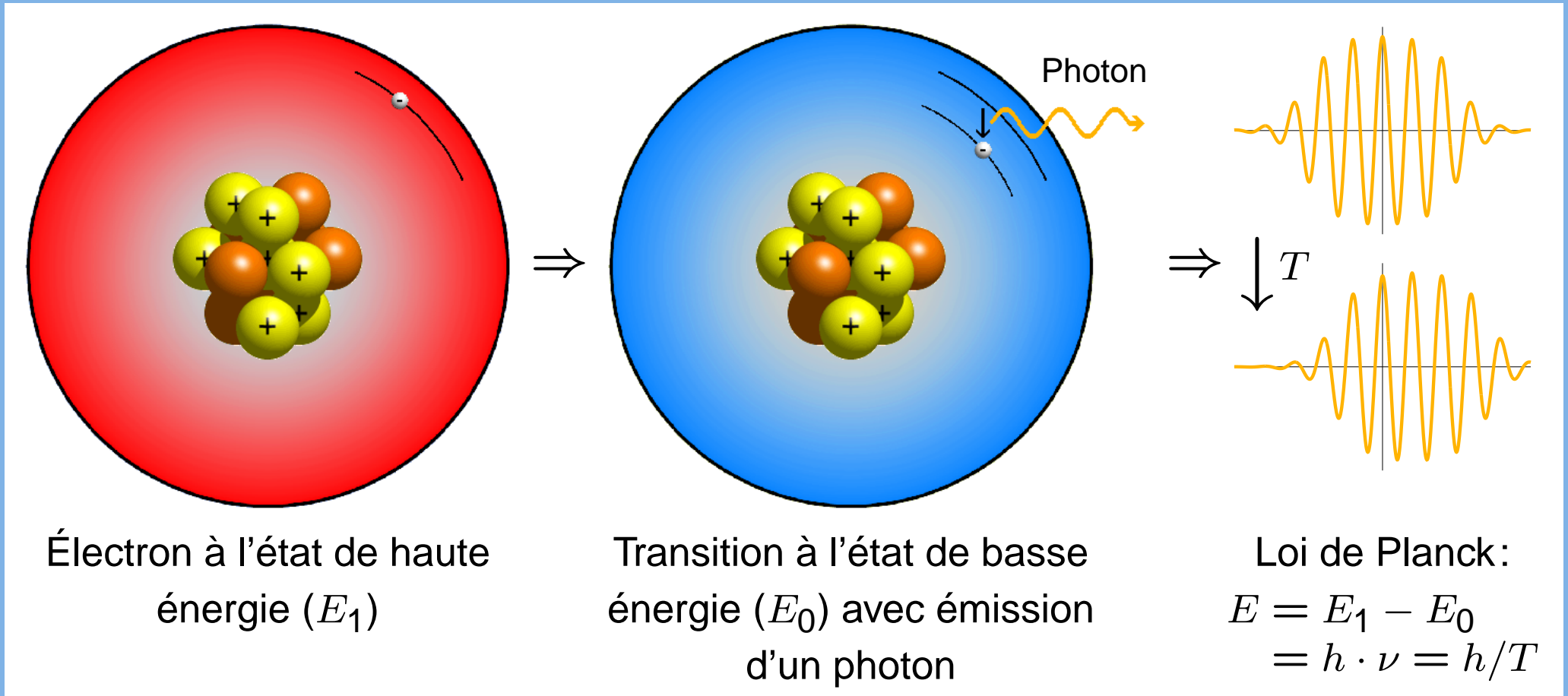


Transition à l'état de basse énergie (E_0) avec émission d'un photon



Loi de Planck:
 $E = E_1 - E_0$
 $= h \cdot \nu = h/T$

Transition atomique



- Niveaux hyperfins de l'atome de césium 133: $9\,192\,631\,770 \cdot T = 1$ seconde.

Horloges atomiques

Deux classes d'horloges atomiques:

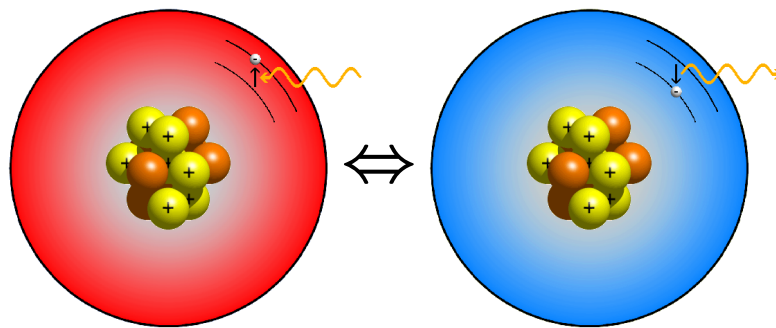
1. horloges atomiques actives ou étalons de fréquence/temps actifs:

- mesure directe de la fréquence associée à une transition (fréquence émise),
- exemple: maser à hydrogène (*micro-wave amplification by stimulated emission of radiation*),

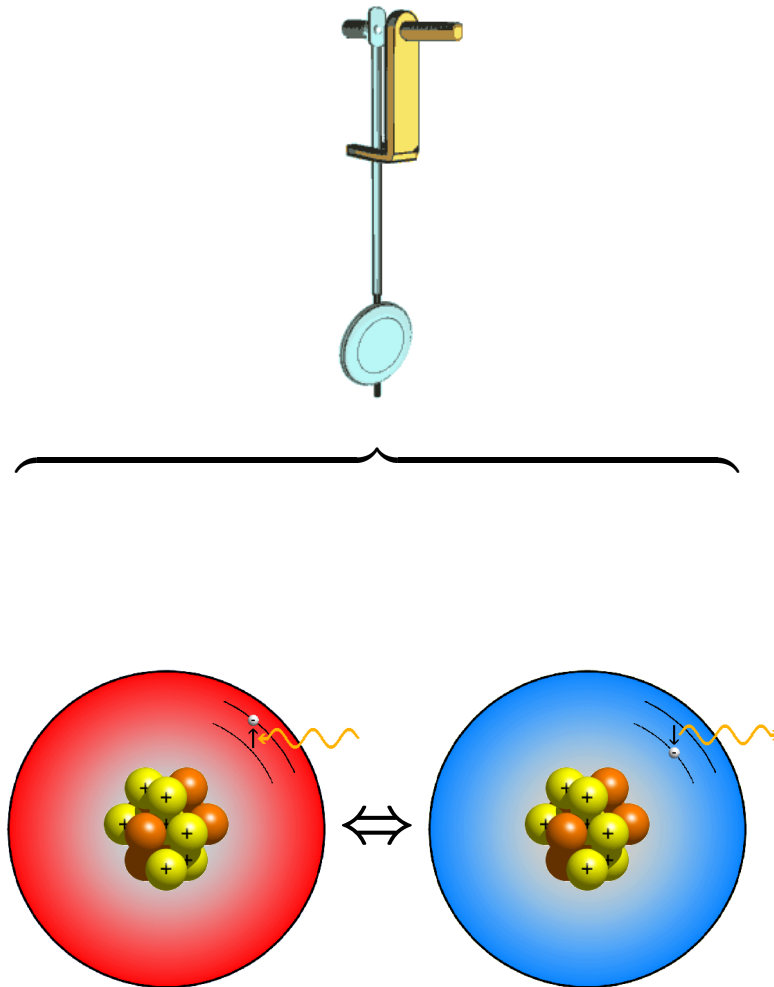
2. horloges atomiques passives ou étalons de fréquence/temps passifs:

- mesure indirecte de la fréquence associée à une transition (fréquence absorbée),
- exemples: horloge à jet de césium, étalon à fontaine de césium, horloge au rubidium.

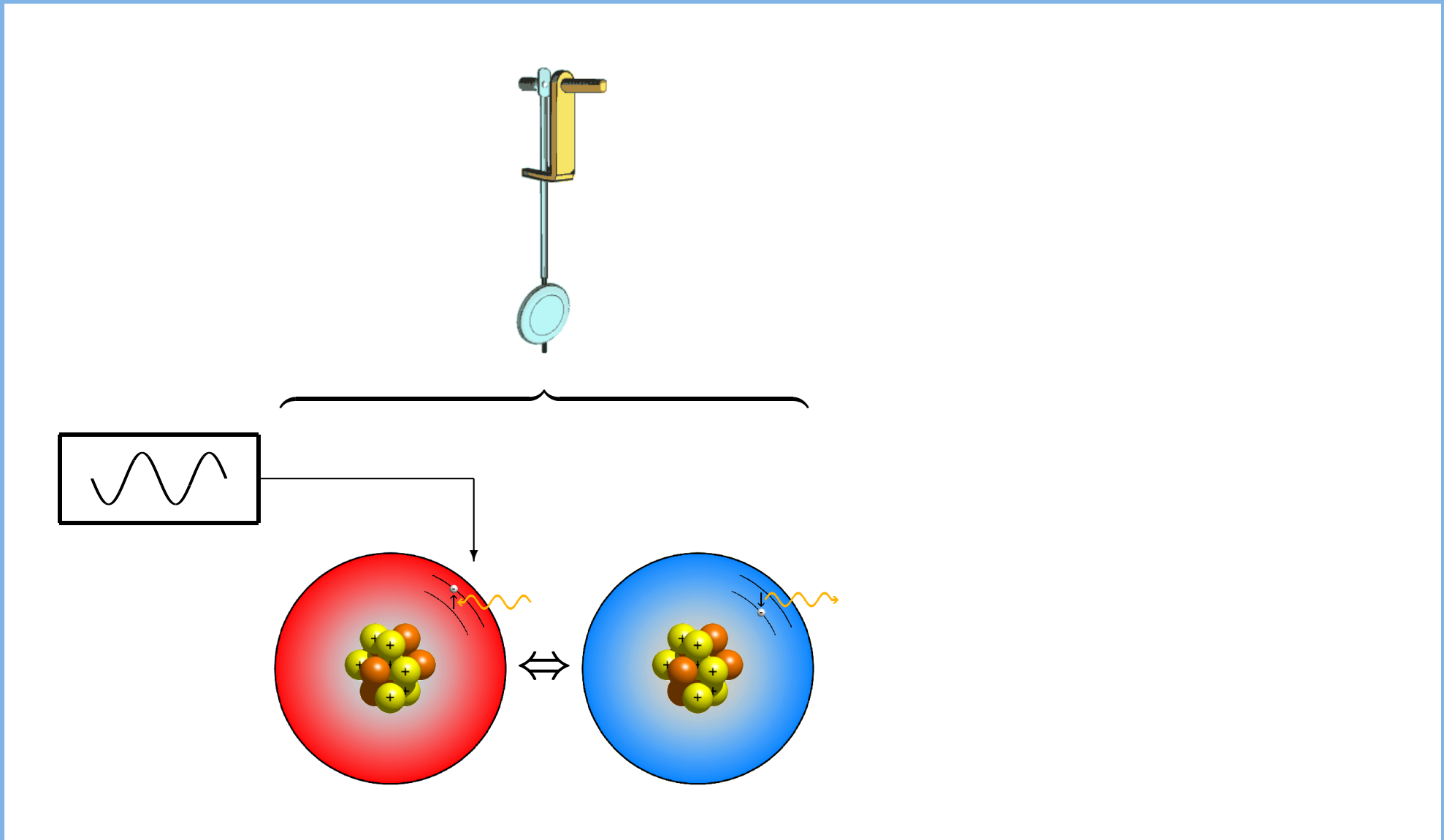
Principe d'une horloge atomique active



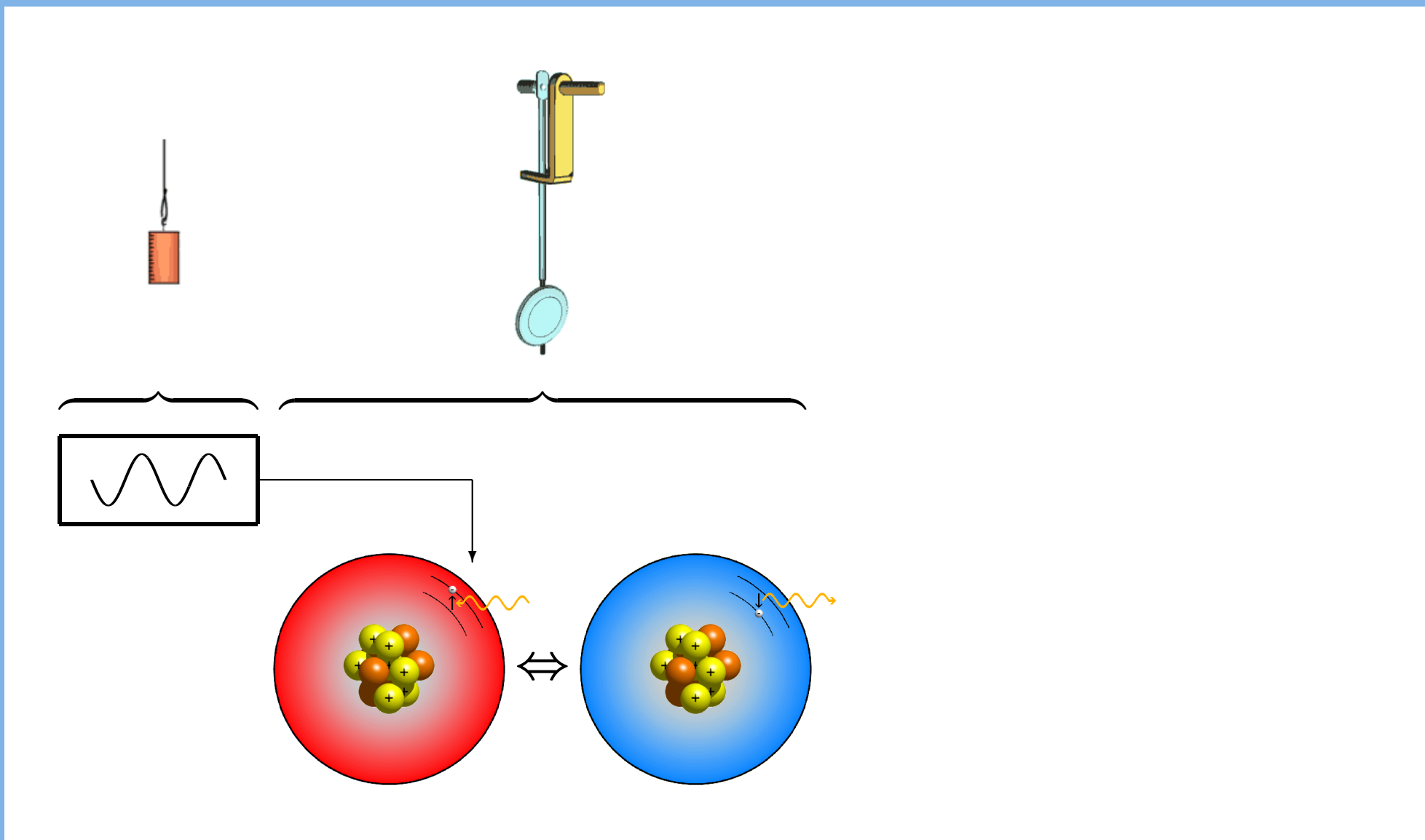
Principe d'une horloge atomique active



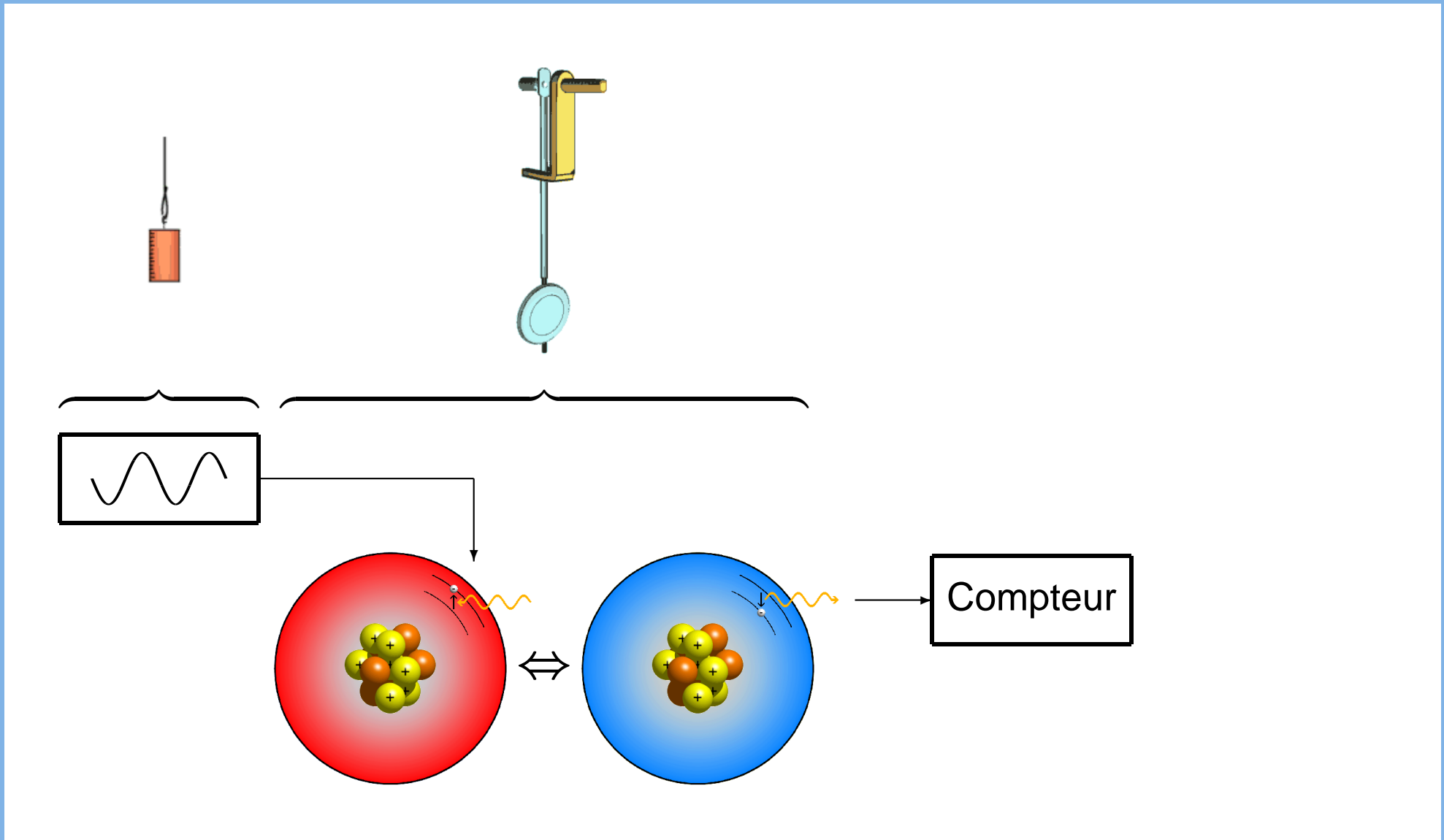
Principe d'une horloge atomique active



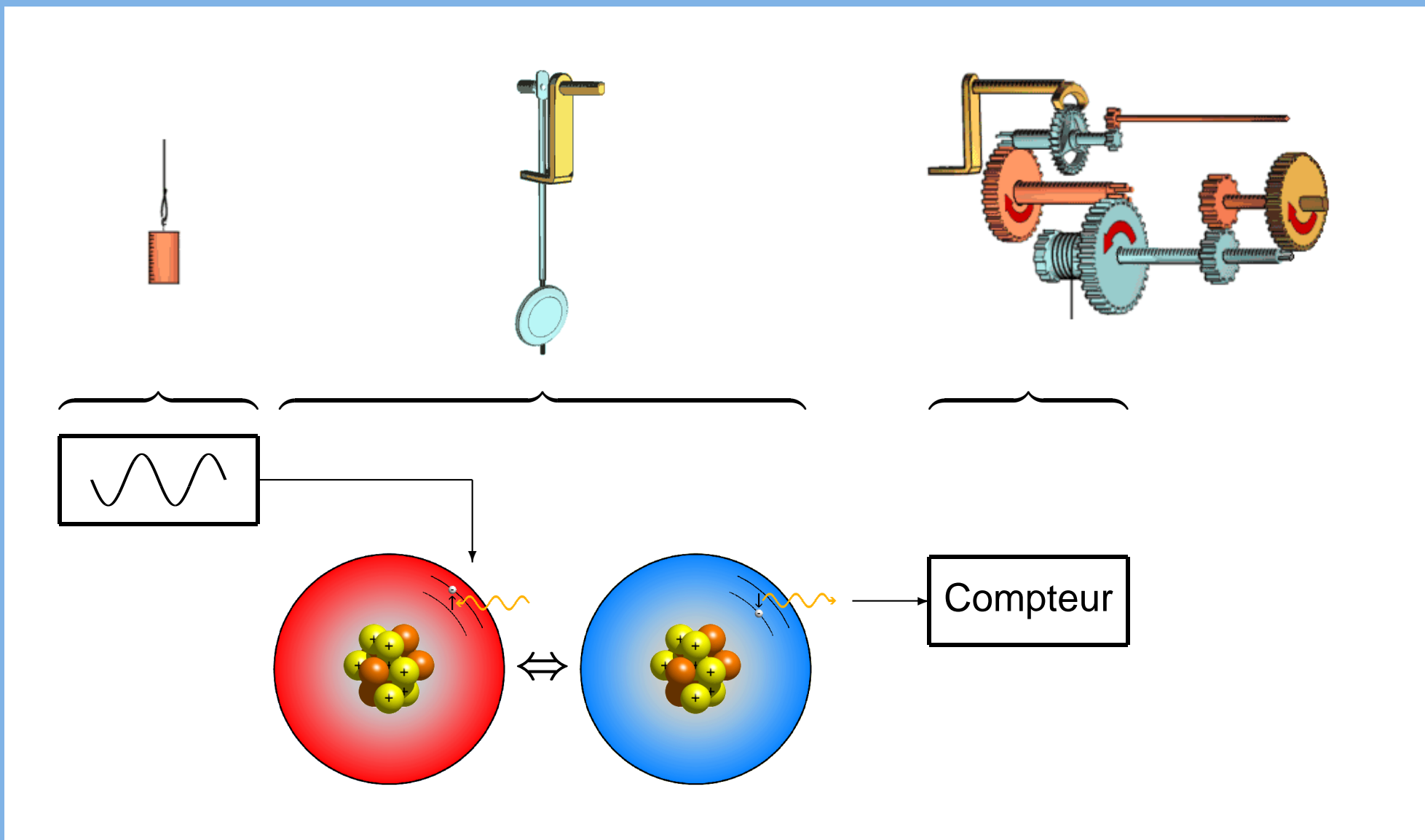
Principe d'une horloge atomique active



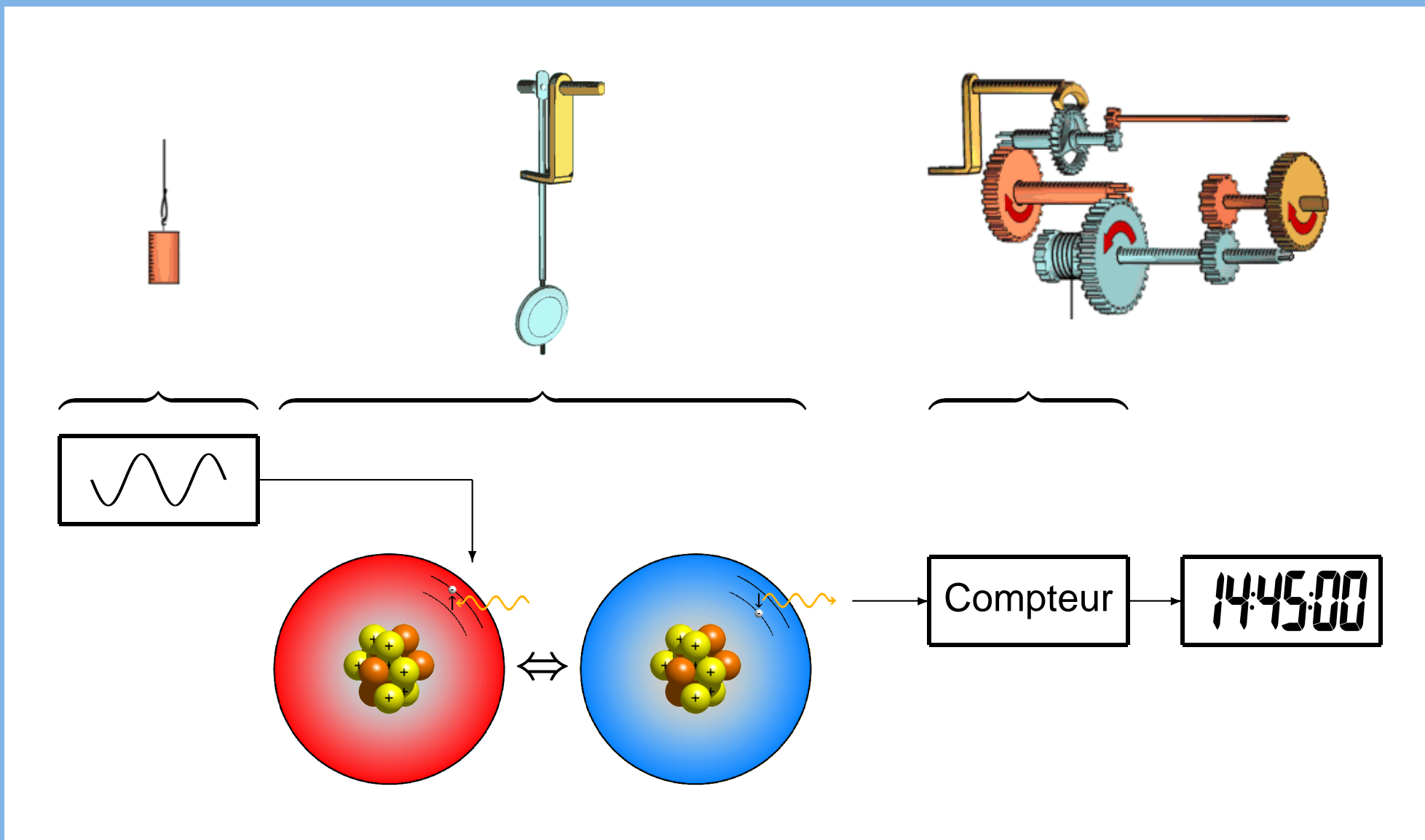
Principe d'une horloge atomique active



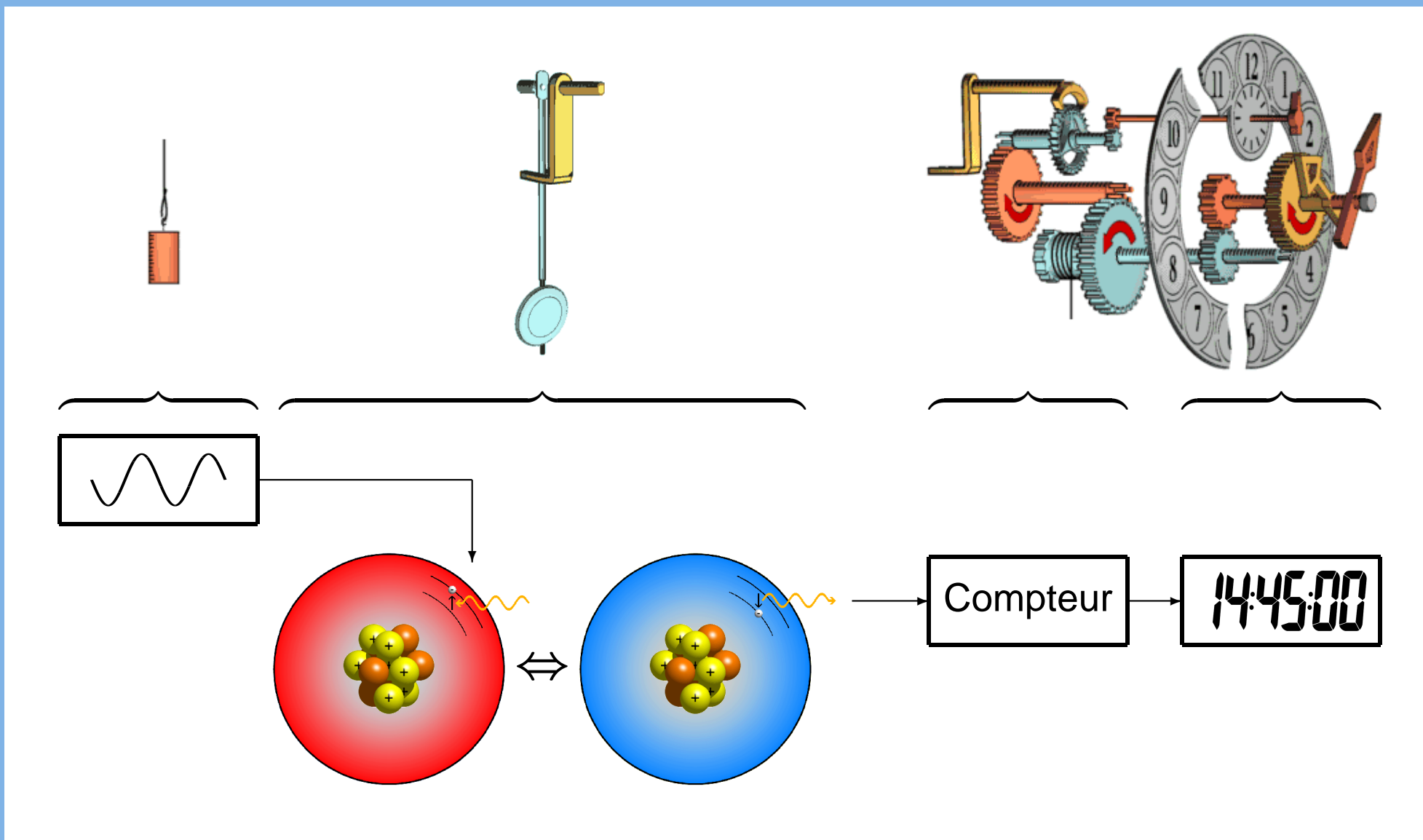
Principe d'une horloge atomique active



Principe d'une horloge atomique active

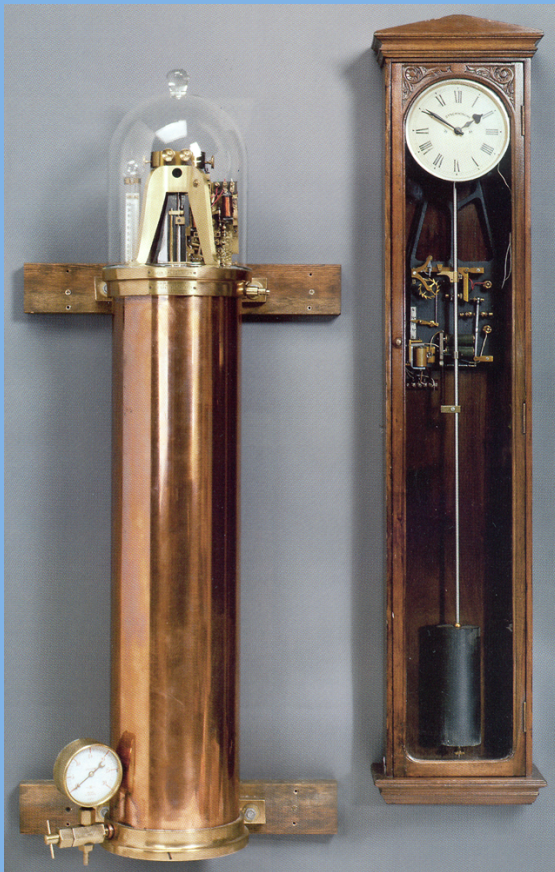


Principe d'une horloge atomique active

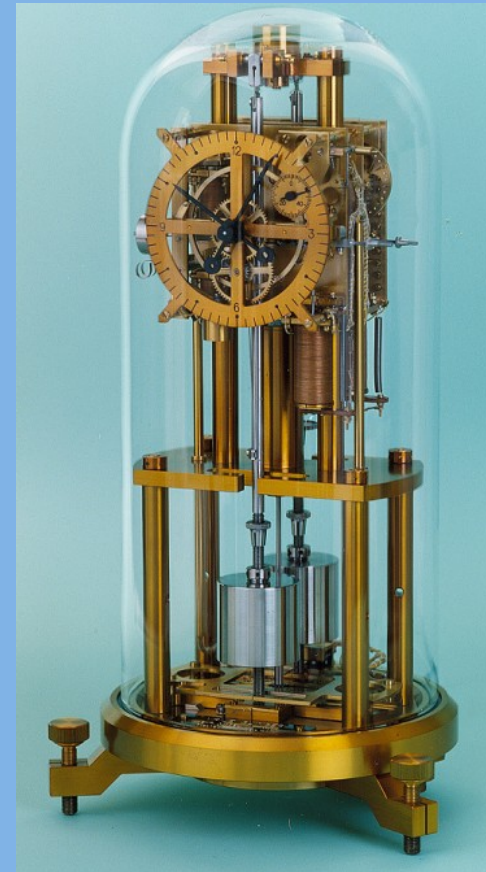


Horloges atomiques passives

- Équivalents mécaniques des horloges atomiques passives: horloges à double balanciers.

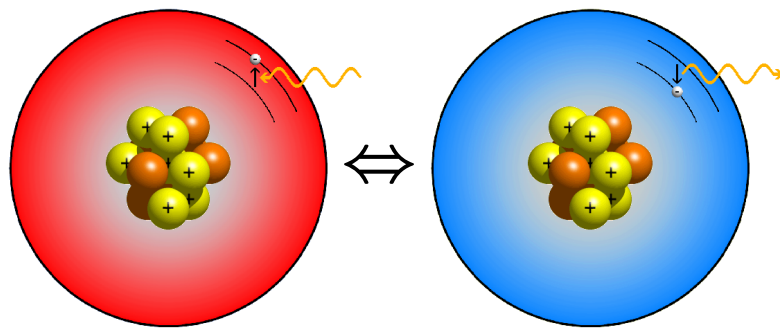


W. H. Shortt, N° 20, Londres, 1927

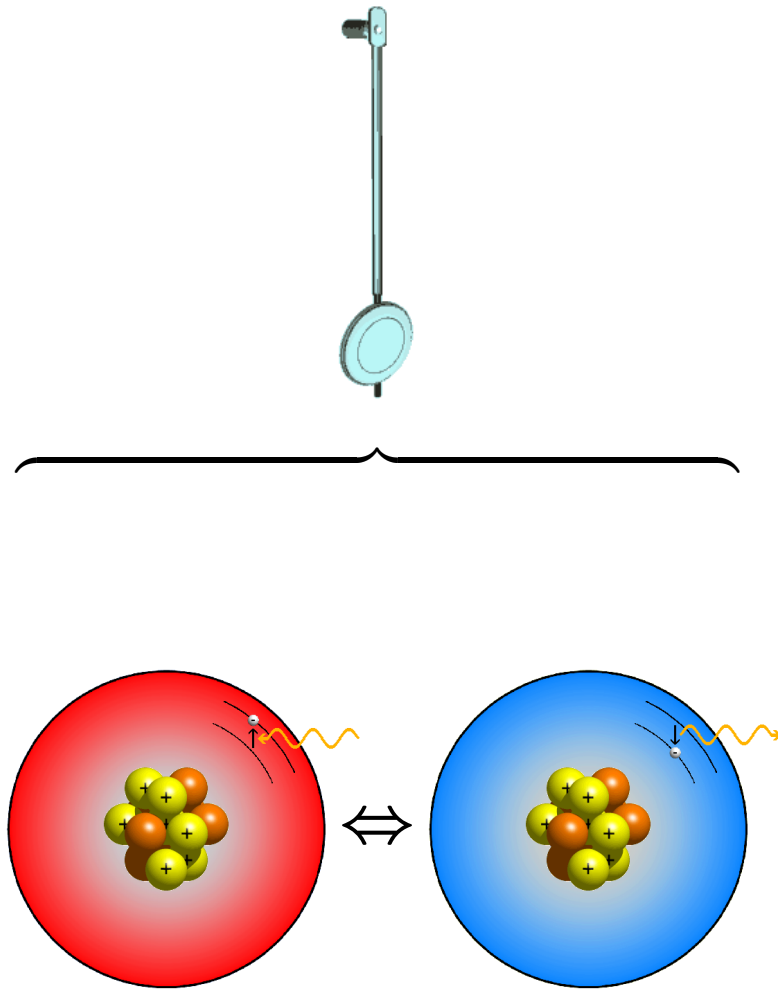


Tatjana van Vark, 1999

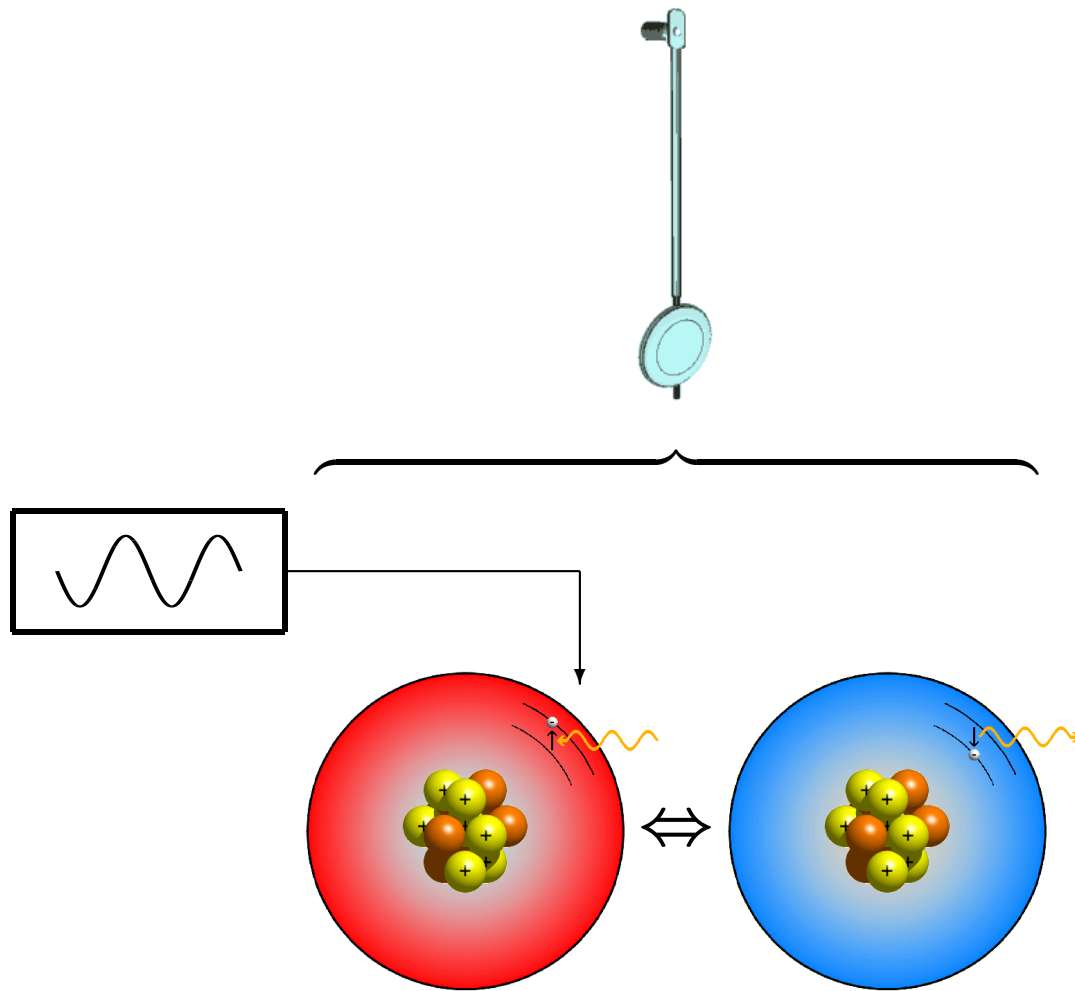
Principe d'une horloge atomique passive



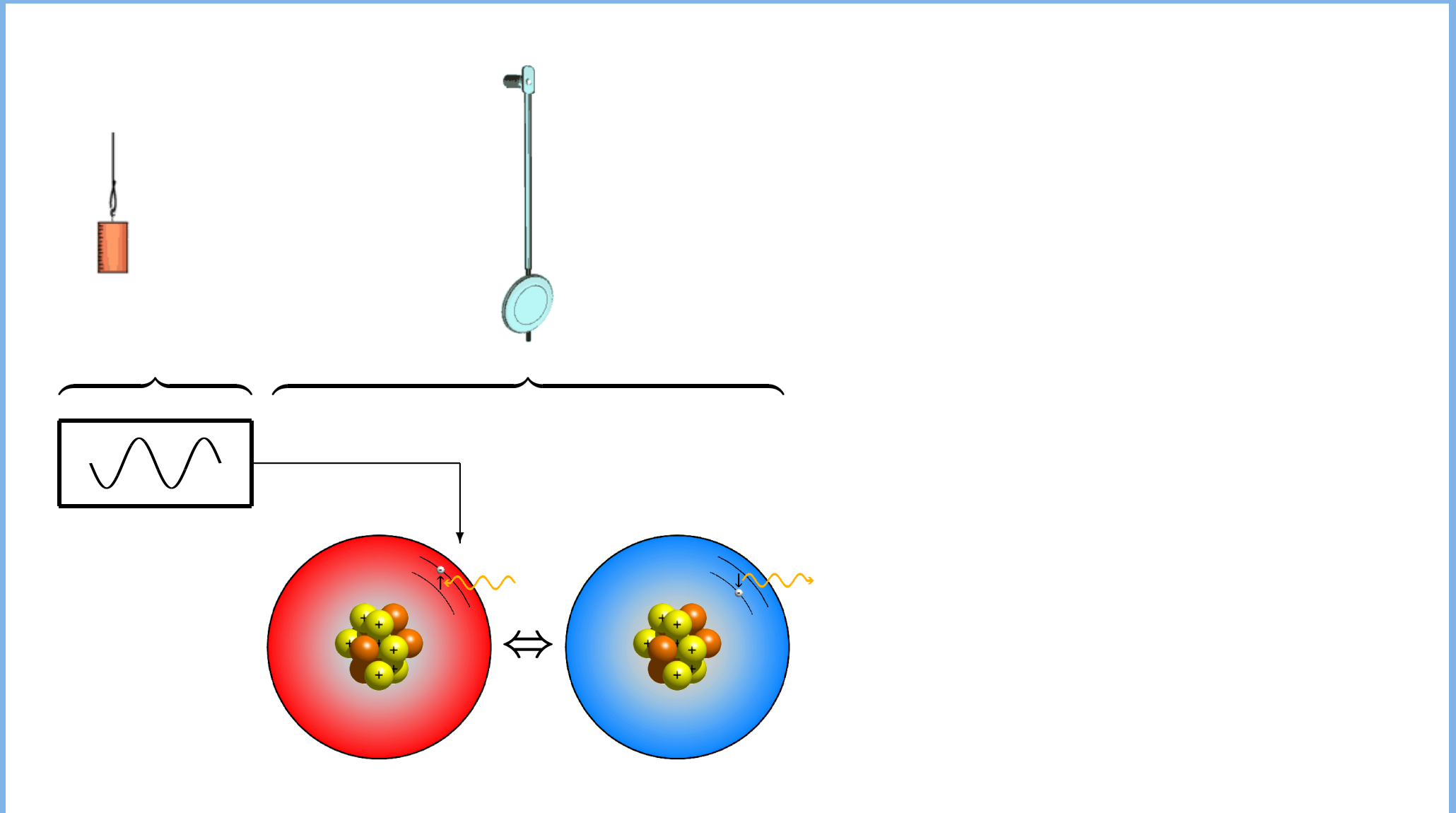
Principe d'une horloge atomique passive



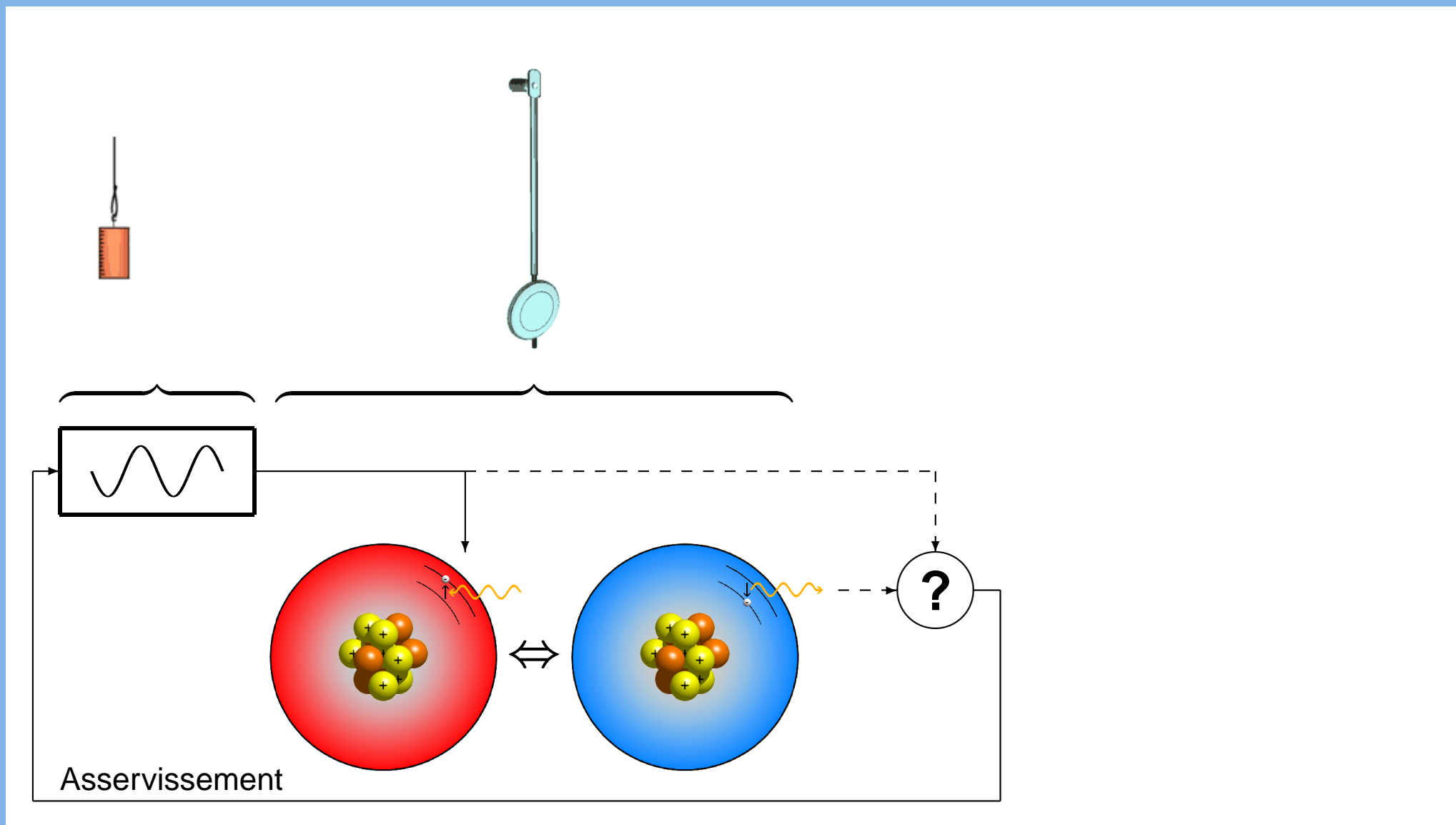
Principe d'une horloge atomique passive



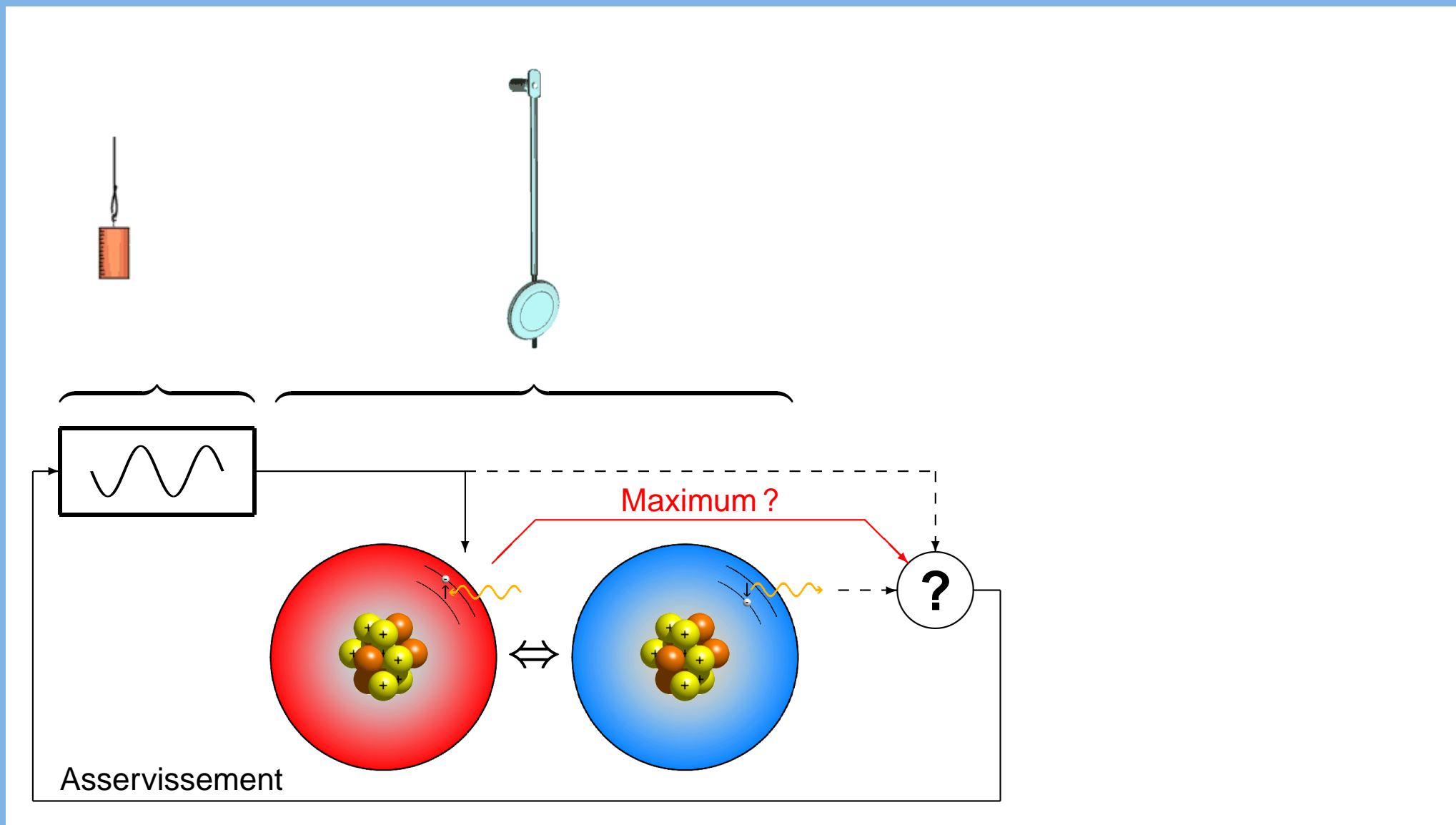
Principe d'une horloge atomique passive



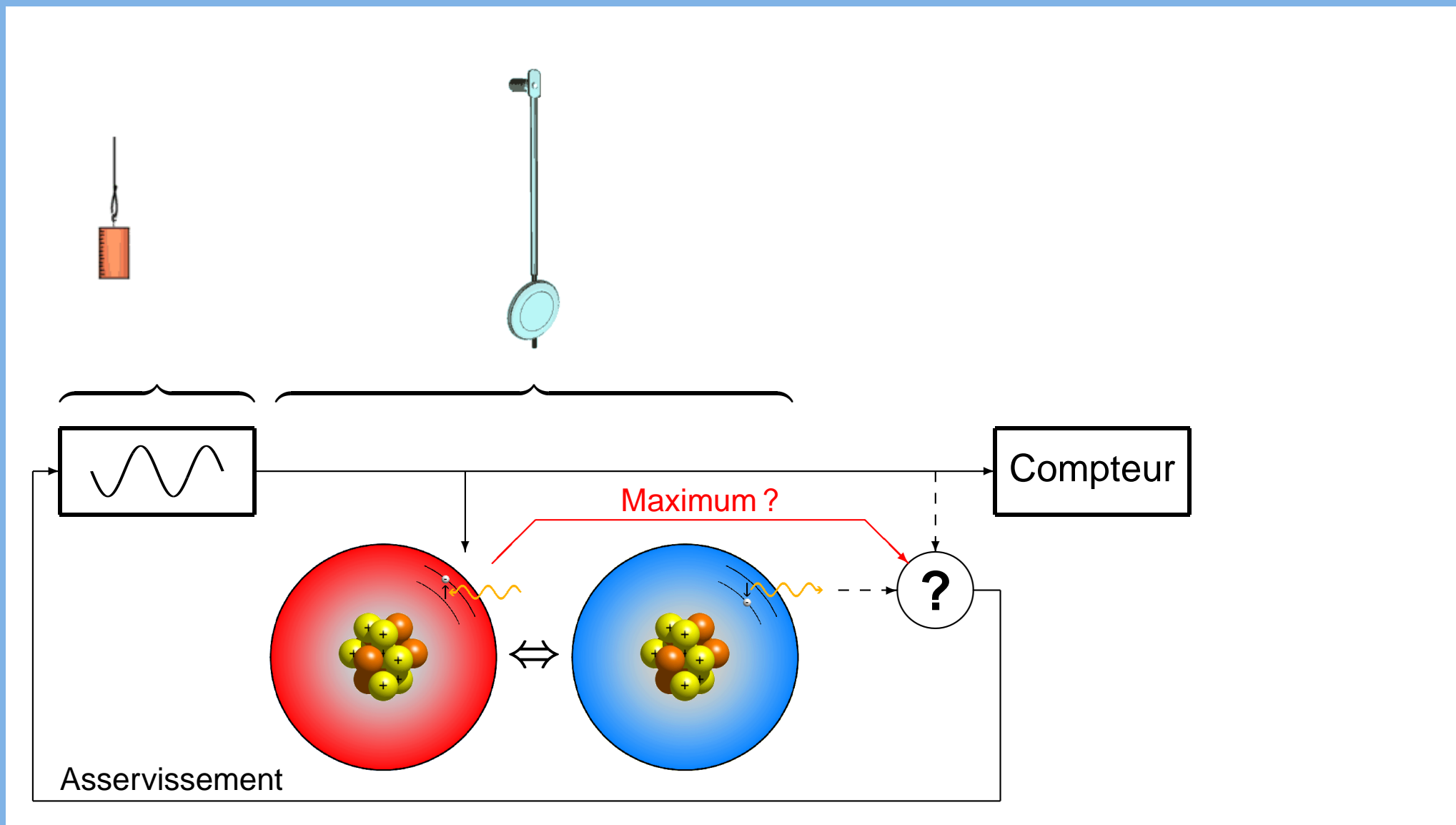
Principe d'une horloge atomique passive



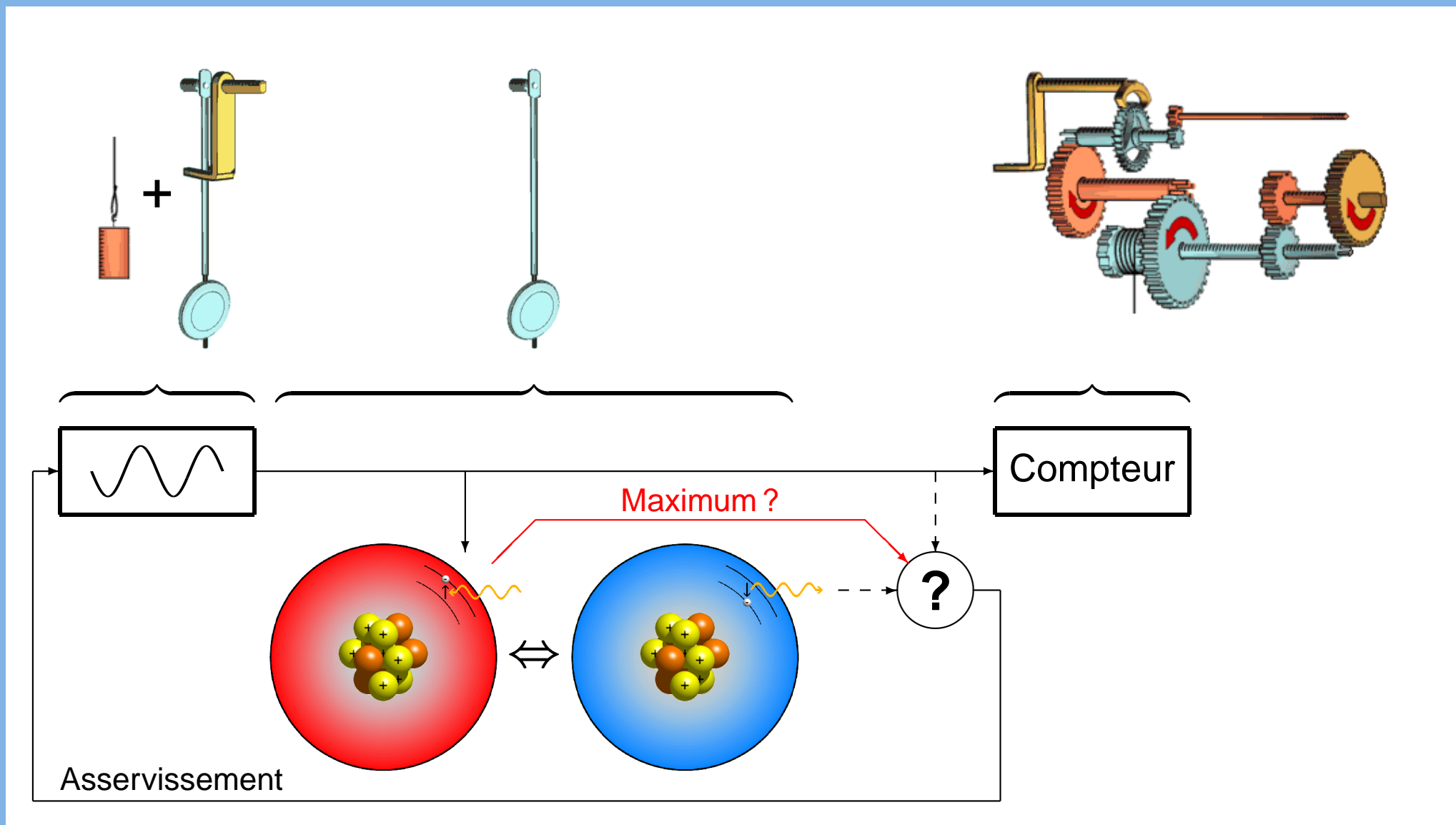
Principe d'une horloge atomique passive



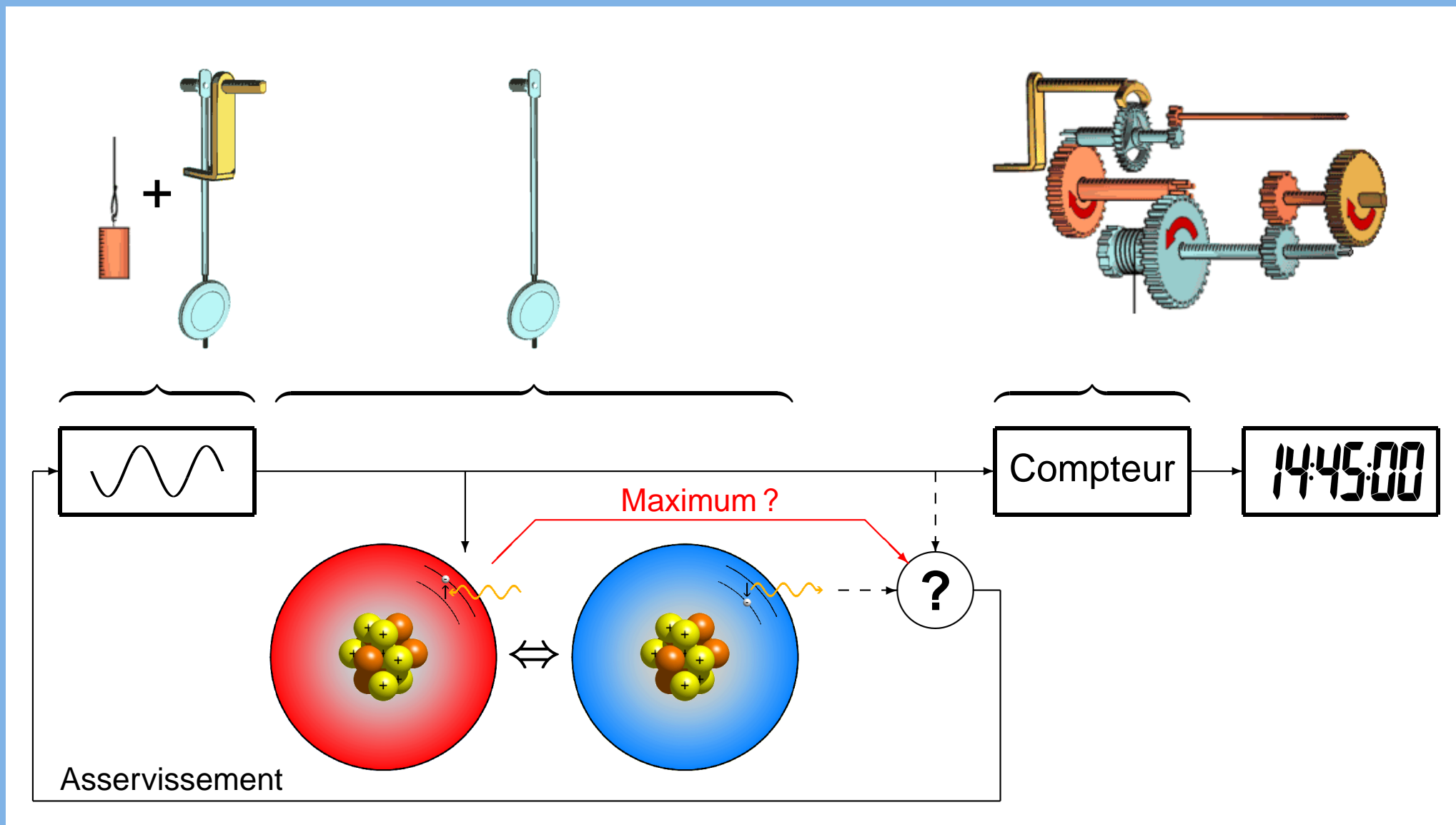
Principe d'une horloge atomique passive



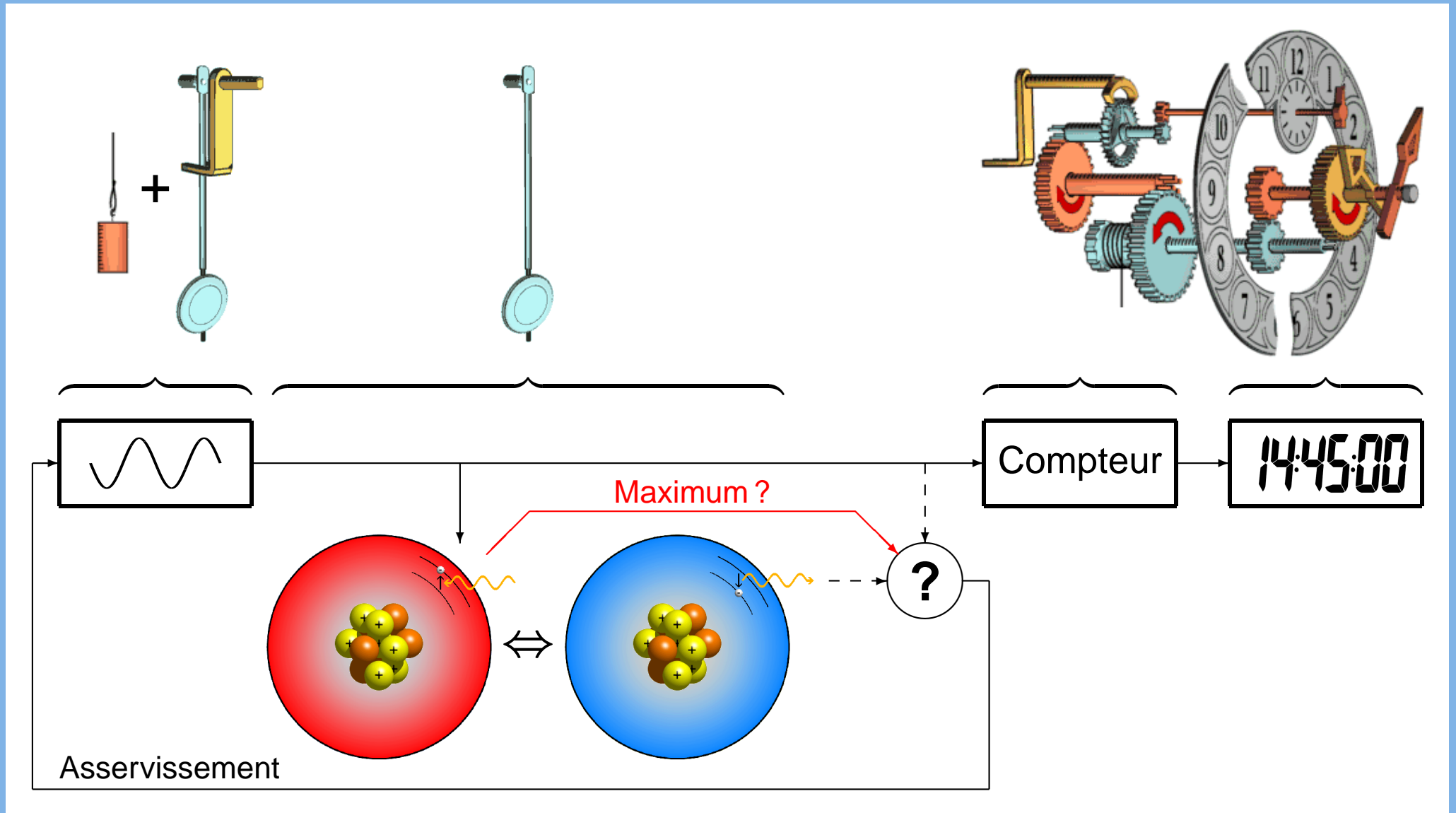
Principe d'une horloge atomique passive



Principe d'une horloge atomique passive

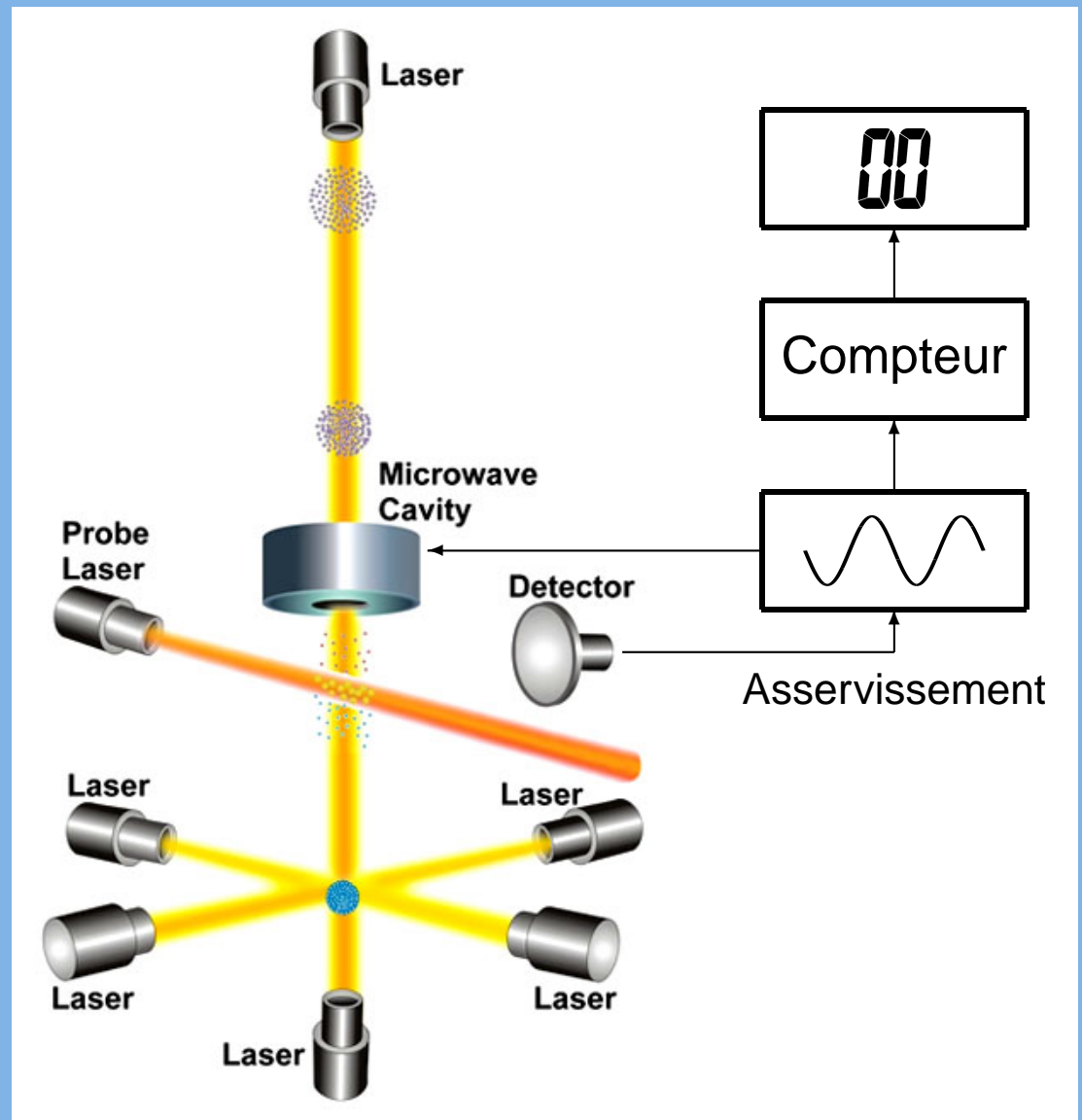


Principe d'une horloge atomique passive



Étalon de fréquence à fontaine de césium

- Environ une dizaine d'étalons à fontaine de césium dans le monde (Boulder, Neuchâtel, Paris, etc.).
- Atomes de césium refroidis à quelque $1/1\,000\,000^{\circ}$ du zéro absolu ($0\text{ K} = 273.15^{\circ}\text{ C}$).
- La vitesse lente des atomes :
 - augmente la durée de la mesure,
 - diminue certains effets néfastes (effet Doppler).



Étalon de fréquence à fontaine de césium

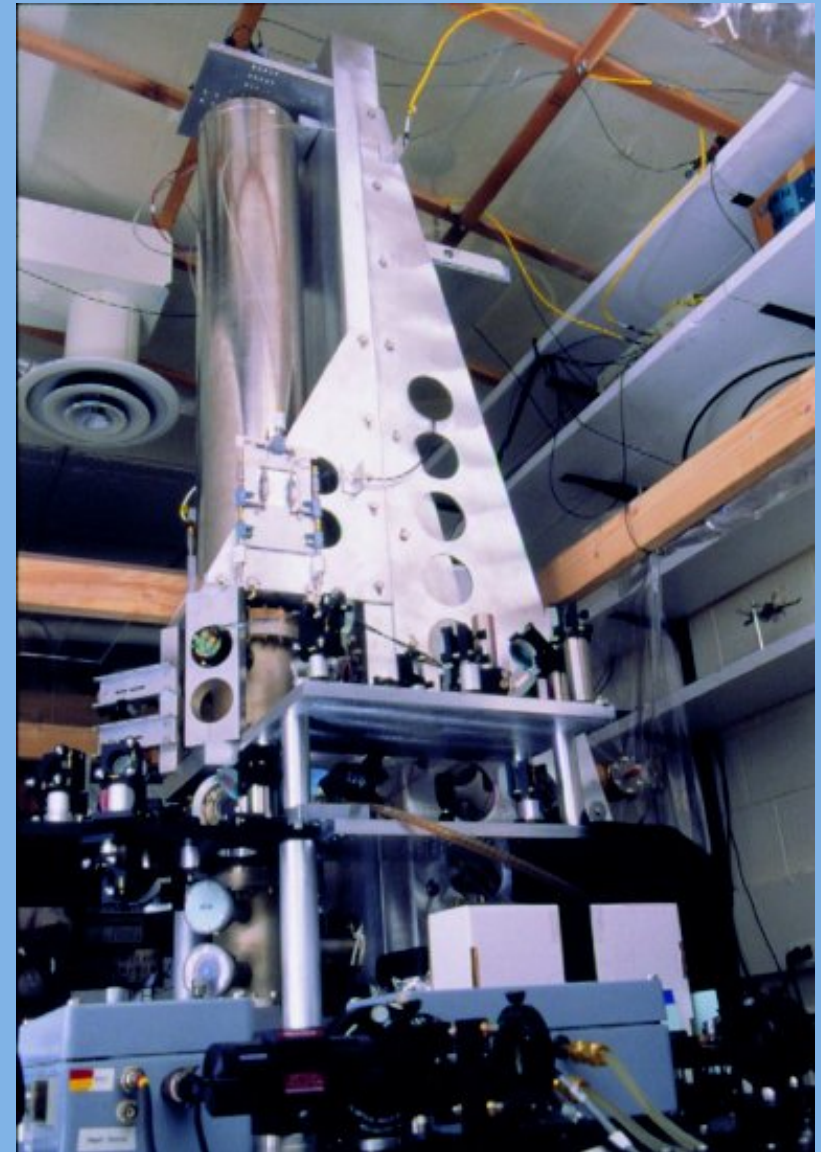
NIST-F1:

- Développé au National Institute of Standards and Technology (NIST), Boulder, CO, 1999.
- Précision de 10^{-15} , équivalent à une erreur de:
 - 1 seconde en 30 000 000 d'années, ou
 - 100 billionièmes de seconde (100 ps) par jour.

Attention: comparaison trompeuse, car cette précision est à court terme.

- Animation:

<http://tf.nist.gov/cesium/fountain.mpg>



Échelles de temps universelles

- But: définir une échelle de temps qui soit:
 - basée sur la seconde du SI (seconde du césium),
 - synchronisée avec la rotation terrestre,
 - universelle.
- Solution: deux échelles de temps:
 1. temps atomique international (TAI):
 - basé sur une moyenne des meilleures horloges atomiques dans le monde,
 2. temps universel coordonné (UTC):
 - synchronisé avec la rotation terrestre par addition (ou soustraction) de secondes intercalaires (depuis 1972),
 - avant 1972, corrections par de plus courtes périodes.
- TAI/UTC gérés par le Bureau International des Poids et Mesures (BIPM), Paris.

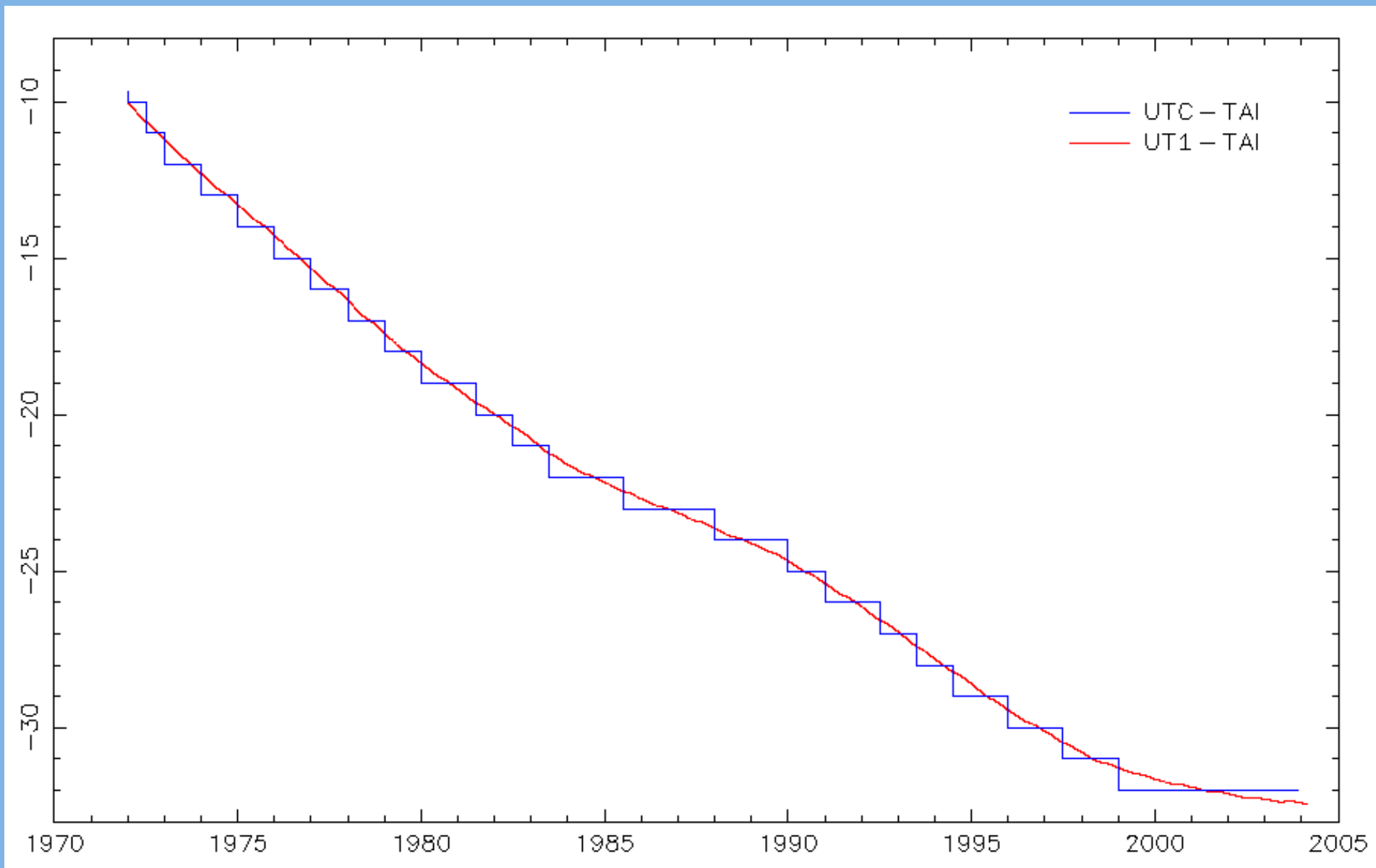
L'abréviation UTC

- En 1970, l'Union Internationale des Télécommunications (UIT) veut adopter une abréviation unique pour toutes les langues.
- Anglophones et francophones n'arrivent pas à se mettre d'accord pour adopter l'un des acronymes correspondants:
 - CUT: *coordinated universal time*,
 - TUC: temps universel coordonné.(La France gère TAI/UTC, les USA fournissent le plus de données.)
- Accord pour utiliser UTC.

Temps universel coordonné (UTC)

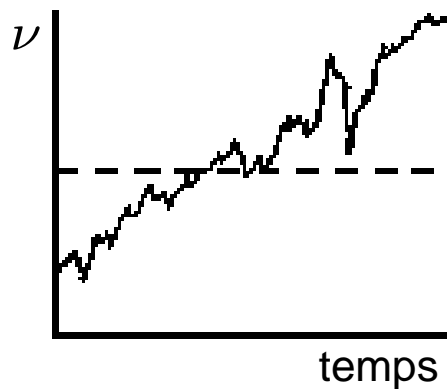
- UTC diffère du TAI d'un nombre entier de secondes intercalaires, de sorte que :
 $|UTC - UT_1| < 0.9 \text{ s.}$
- Synchronisation: $UTC = TAI = UT_1$ au 1^{er} janvier 1958.
- Secondes ajoutées (enlevées) à la dernière minute du 30 juin ou 31 décembre:
23:59:57 .. 23:59:58 .. 23:59:59 .. **23:59:60** .. 00:00:00 .. 00:00:01 UTC.
- Aujourd'hui: $UTC = TAI - 32 \text{ s.}$
- Dernière seconde ajoutée le 31 décembre 1998.
- Pas de seconde ajoutée le 30 juin 2005.
- Addition (soustraction) de secondes intercalaires décidée par l'Observatoire de Paris (IERS EOP), sur la base d'observations dans le monde entier.

Secondes intercalaires

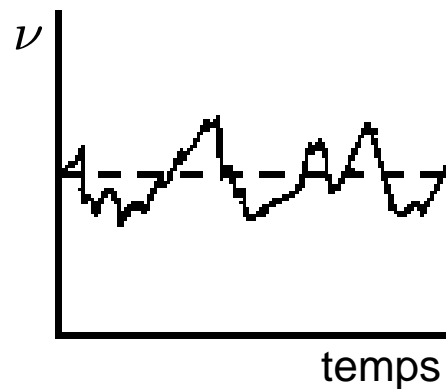


Caractéristiques des horloges

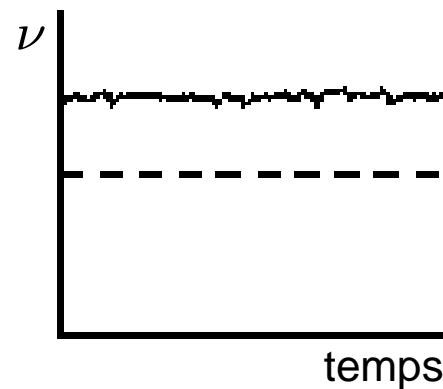
- Précision: l'unité de temps mesurée est la plus proche possible de la seconde.
- Stabilité: les fluctuations temporelles sont les plus faibles possible.



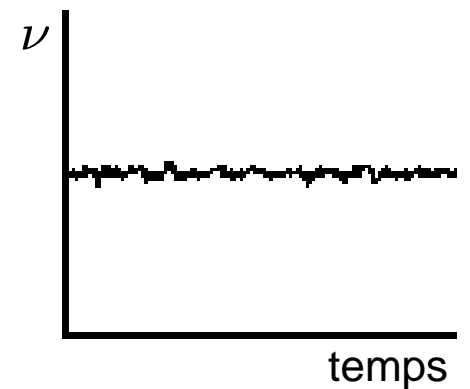
Horloge ni précise
ni stable



Horloge précise
mais pas stable



Horloge stable
mais pas précise



Horloge précise
et stable

Temps atomique international (TAI)

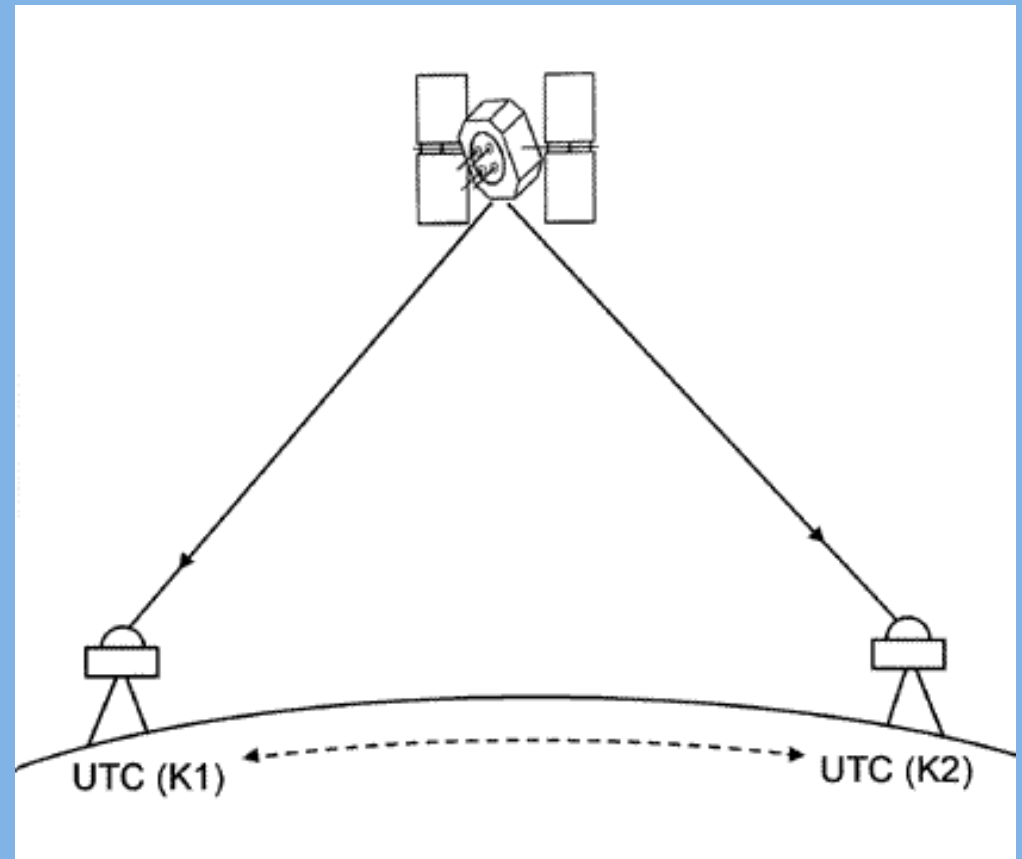
- Deux groupes d'horloges utilisés pour TAI:
 1. une dizaine d'étalons de fréquence principaux (au césium):
 - meilleure précision: calibration de la seconde du SI,
 - étalons à fontaine de césium et à jet de césium,
 2. 250 – 300 horloges atomiques dans une quarantaines de laboratoires:
 - meilleure stabilité: moyenne pondérée donne TAI,
 - horloge à jet de césium, maser à hydrogène, etc.
- Le nombre d'horloges utilisées varie de mois en mois (avril 2005: 8 étalons de fréquence principaux, 281 horloges atomiques dans 46 laboratoires).

Temps atomique international (TAI)

- Seconde du TAI: seconde du SI au géoïde (niveau des mers):
 - horloges en altitude corrigées pour les effets de la relativité générale d'Einstein.
- Horloges comparées à intervalles réguliers (GPS ou TWSTFT).
- Chaque mois:
 - un coefficient est attribué à chaque horloge sur la base de ses performances actuelles et passées,
 - la moyenne pondérée de toutes les horloges donne TAI.

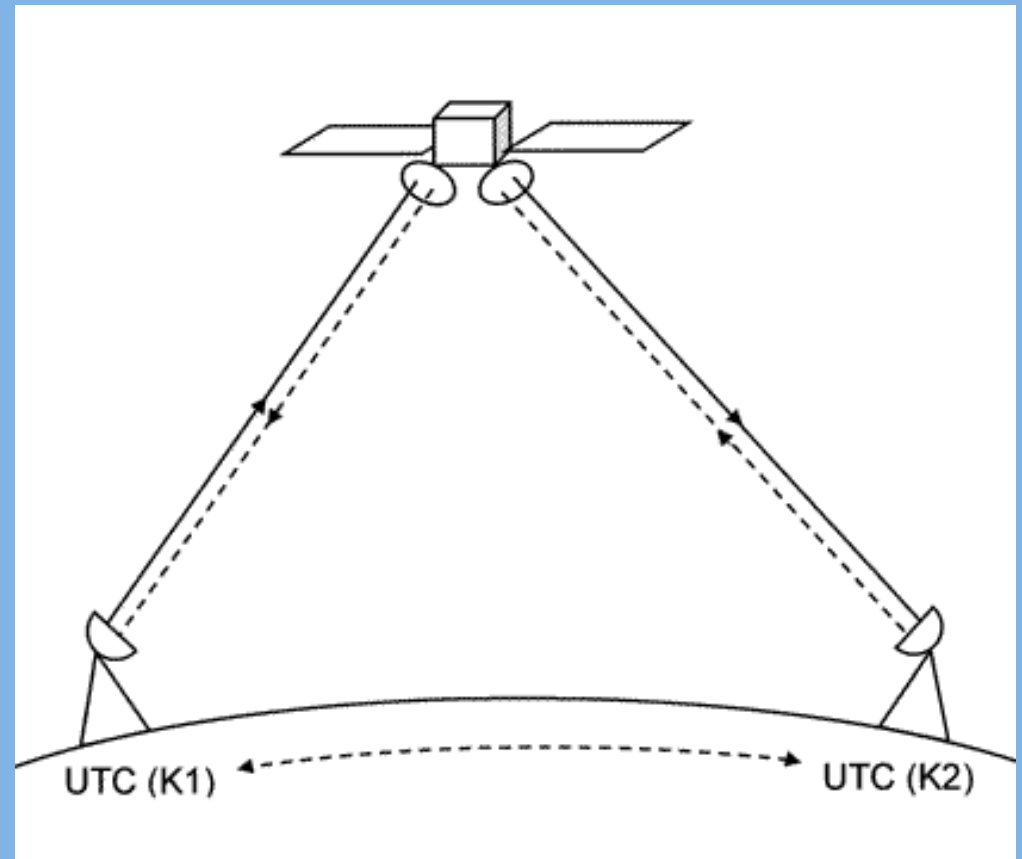
Comparaison par satellite GPS

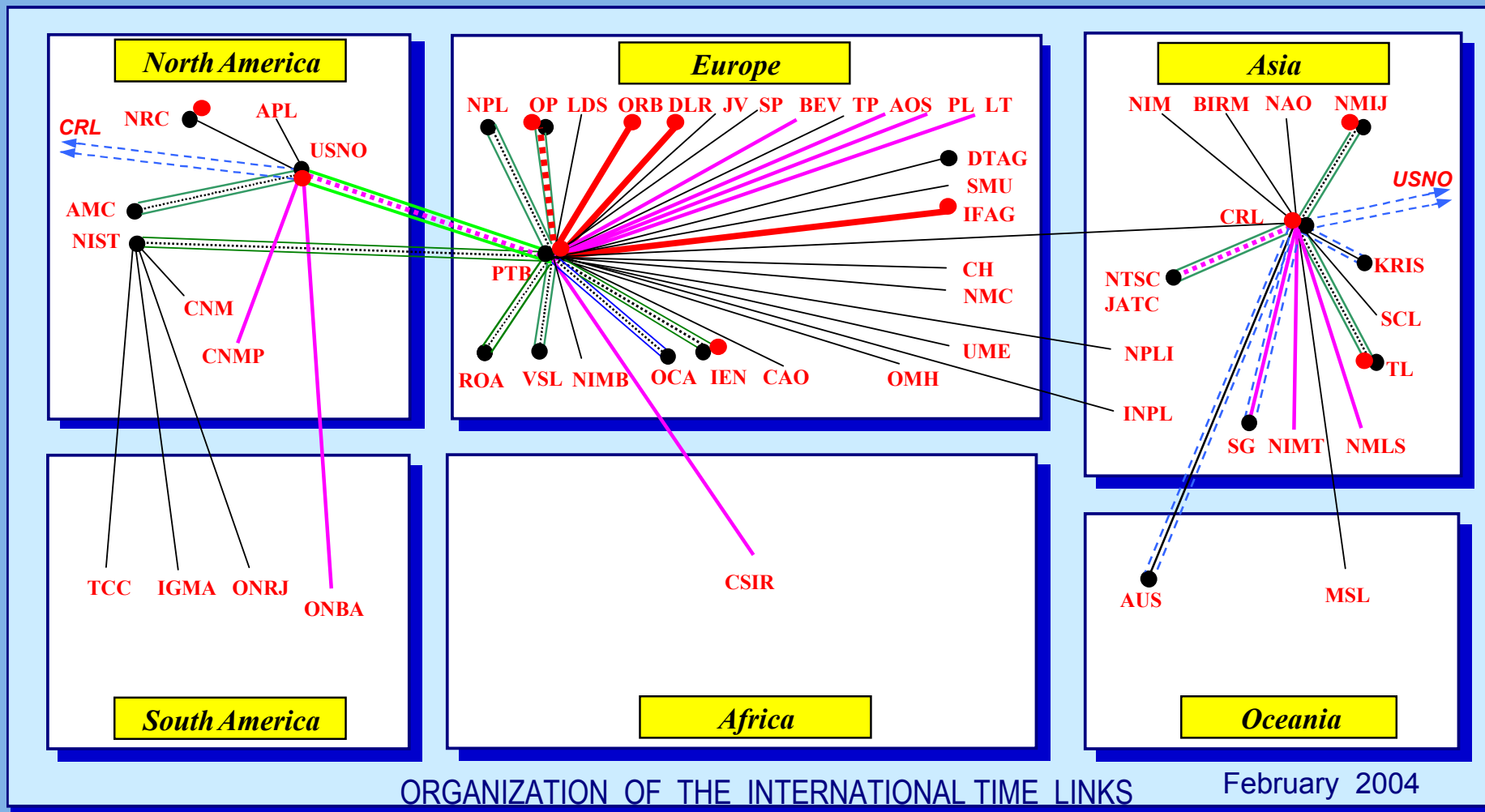
- À un instant prédéterminé, 2 laboratoires mesurent la différence entre leur temps et celui d'un satellite GPS (*global positioning system*).
- Les mesures sont corrigées pour le temps de transmission, l'effet Doppler et les effets de la relativité.
- La différence entre les temps des 2 laboratoires est ainsi obtenue.
- L'imprécision de l'horloge du satellite GPS n'a aucune influence sur la mesure.



Comparaison par la méthode TWSTFT

- À un instant prédéterminé, 2 laboratoires s'envoient mutuellement un signal relayé par un émetteur/récepteur TWSTFT (*two-way satellite time and frequency transfer*) sur un satellite géostationnaire.
- Les temps de transmissions et de relais sont considérés égaux (position précise du satellite non nécessaire).
- La différence entre les délais (émission à réception) mesurés par les 2 laboratoires est le double de leur différence de temps.
- Les mesures sont corrigées pour les effets de la relativité.
- Plus précise que la comparaison par GPS, mais nécessite une infrastructure *ad hoc*.





- | | | | |
|--|---|--|------------------------------------|
| | TWSTFT | | GPS CV single-channel |
| | TWSTFT back-up link | | GPS CV single-channel back-up link |
| | TWSTFT link in preparation | | GPS CV multi-channel |
| | OCA/PTB link not used for computation of TAI | | GPS CV multi-channel back-up link |
| | Laboratory equipped with TWSTFT | | GPS CV Dual frequency link |
| | TWSTFT by Ku band with X band back-up | | GPS CV dual frequency back-up link |
| | Laboratory equipped with Dual Frequency reception | | |



La gestion de TAI/UTC

- TAI/UTC n'est pas connu en temps réel.
- Une cinquantaine de laboratoires (57 en avril 2005) fournissent leur estimation UTC (k) de UTC:
 - p. ex., estimation du METAS: UTC (CH).
- Après la fin du mois, le BIPM publie:
 - toutes les différences UTC – UTC (k) par intervalles de 5 jours,
 - les différences entre UTC et le temps du GPS & du GLONASS (*global navigation satellite system*) par intervalles de 1 jour.

Circulaire T (avril 2005)

CIRCULAR T 208
2005 MAY 12, 17h UTC

ISSN 1143-1393

BUREAU INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES
ORGANISATION INTERGOUVERNEMENTALE DE LA CONVENTION DU METRE
PAVILLON DE BRETEUIL F-92312 SEVRES CEDEX TEL. +33 1 45 07 70 70 FAX. +33 1 45 34 20 21 tai@bipm.org

1 - Coordinated Universal Time UTC and its local realizations UTC(k). Computed values of [UTC-UTC(k)].
From 1999 January 1, 0h UTC, TAI-UTC = 32 s.

Date 2005	0h UTC	MAR 30	APR 4	APR 9	APR 14	APR 19	APR 24	APR 29	Uncertainty/ns		
MJD		53459	53464	53469	53474	53479	53484	53489	uA	uB	u
Laboratory k		[UTC-UTC(k)]/ns									
AOS (Borowiec)		8.2	12.1	17.1	22.7	19.0	16.0	16.8	1.6	5.2	5.4
APL (Laurel)		-18.6	-23.3	-13.6	-2.0	4.6	39.3	26.5	1.6	5.3	5.5
AUS (Sydney)		-541.1	-547.9	-556.5	-561.7	-574.0	-590.8	-608.2	3.2	6.4	7.2
BEV (Wien)		97.8	88.7	80.6	70.6	63.0	58.2	46.3	1.6	5.2	5.4
BIRM (Beijing)		-145.0	-170.1	-192.3	-217.0	-238.1	-260.8	-288.4	2.8	20.4	20.6
CAO (Cagliari)		-2890.4	-2883.7	-2871.8	-2865.4	-2845.1	-2819.2	-2794.1	1.6	7.2	7.4
CH (Bern)		-21.7	-24.4	-24.6	-21.4	-14.6	-9.4	-0.7	0.8	5.2	5.3
CNM (Queretaro)		36.7	44.2	47.2	52.2	52.6	59.5	78.3	5.0	20.3	20.9
CNMP (Panama)		-2514.2	-2543.1	-2584.6	-2629.9	-2655.4	-2690.8	-2721.4	4.0	7.2	8.2
CSIR (Pretoria)		-3393.0	-3468.5	-3548.2	-3628.6	-3718.2	-3800.9	-3891.4	3.0	20.1	20.3

...

- MJD (*Modified Julian Date*): nombre de jours depuis le 17 novembre 1858.

Coefficients des horloges (avril 2005)

Edited by F132 at 13:48:55/05/20/05

BUREAU INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES

INTERNATIONAL ATOMIC TIME

RELATIVE WEIGHTS (IN PERCENT) OF THE CLOCKS
FOR INTERVALS OF ONE MONTH ENDING AT THE GIVEN DATES

(***** DENOTES THAT THE CLOCK WAS NOT USED)

LAB.	CLOCK	53339	53369	53399	53429	53459	53489	.
APL	35 1264	*****	0.000	0.000	0.000	0.000	0.129	
APL	35 1791	*****	0.000	0.000	0.000	0.000	0.087	
APL	35 904	*****	0.000	0.000	0.000	0.000	0.127	
APL	40 3107	*****	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	
APL	40 3108	*****	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	
...								
CH	36 354	0.399	0.461	0.455	0.497	0.463	0.673	
CH	35 771	0.653	0.820	0.980	0.914	0.844	1.008	
CH	40 5701	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	
CH	36 413	*****	*****	*****	*****	0.000	0.000	.
CNM	35 1705	0.984	0.984	0.980	0.996	0.977	0.934	
...								

Exemple pratique

Un physicien à l'EPFL mesure la durée d'une expérience en se basant sur le signal radio de Prangins (UTC (CH)).

- Il commence son expérience le 23 décembre 1998 vers 9 h du matin :
1998-12-23 08:05:10.137638367 UTC (CH).
- L'expérience se termine le 13 janvier 1999 vers 2 h 1/2 de l'après-midi :
1999-01-13 13:32:20.533786423 UTC (CH).
- Le 16 février 1999, le BIPM publie les corrections pour janvier 1999.

(Par simplicité, les aspects liés à la transmission du temps entre Prangins et l'EPFL sont ignorés.)

Exemple pratique

- Correction pour le 23 décembre 1998:

$$209 + 1 \cdot (202 - 209)/5 = 207.6 \text{ ns:}$$

- début de l'expérience:

1998-12-23 08:05:10.1376385746 UTC.

- Correction pour le 13 janvier 1999:

$$186 + 2 \cdot (184 - 186)/5 = 185.2 \text{ ns:}$$

- fin de l'expérience:

1999-01-13 13:32:20.5337866082 UTC.

- Nombre de secondes intercalaires: 1 s

(1^{er} janvier 1999 à 1 h du matin ou minuit UTC).

- Durée de l'expérience:

$$21 \text{ j} + 5 \text{ h} + 27 \text{ m} + 10.3961480336 \text{ s} + 1 \text{ s} = 1\,834\,031.39614803(36) \text{ s.}$$

MJD [UTC-UTC(CH)]/ns

50814 91

50819 90

...

51159 199

51164 206

51169 209 22 déc. 1998

51174 202 27 déc. 1998

51179 208

51184 207

51189 186 11 jan. 1999

51194 184 16 jan. 1999

51199 185

...

Résumé

- Évolution de la définition de la seconde :
 - seconde “traditionnelle” : astronomique et variable,
 - seconde des éphémérides : astronomique et constante,
 - seconde du césium : physique et constante.
- Principe de fonctionnement des horloges atomiques :
 - mesure directe (fréquence émise),
 - mesure indirecte (fréquence absorbée).
- Échelles de temps universelles :
 - TAI : moyenne des meilleures horloges atomiques dans le monde,
 - UTC : synchronisé avec la rotation terrestre par ajout de secondes intercalaires,
 - la mesure la plus précise du temps (TAI/UTC) n’est connue qu’à posteriori.

Conclusion

- Le temps est la grandeur physique mesurée le plus précisément:
 - précision d'une horloge atomique à fontaine de césium: $1 \cdot 10^{-15}$ ou ± 100 billionièmes de seconde (100 ps) par jour (estimation NIST),
 - stabilité du TAI: $2 \cdot 10^{-15}$ ou ± 1 seconde en 15 000 000 d'années (estimation BIPM, Rapport du Directeur, 2003–2004).

Ce fait illustre l'importance de la mesure du temps dans notre société et constitue un hommage aux horlogers de tous les temps.

Bibliographie

- Wayne M. Itano & Norman F. Ramsey. “Accurate Measurement of Time.” *Scientific American*, 269(1):46 – 53, July 1993.
- David W. Allan, Neil Ashby, & Clifford C. Hodge. “The Science of Timekeeping.” Application note 1289, Hewlett-Packard, June 1997.
- David W. Allan, Neil Ashby, & Cliff Hodge. “Fine-Tuning Time in the Space Age.” *IEEE Spectrum*, 35(3):42 – 51, Mar. 1998.
- François Vernotte. “Les échelles de temps modernes.” *Annales françaises des microtechniques et de chronométrie*, 48:43 – 52, 1999.
- Douglas M. Considine & Glenn D. Considine (eds.). *Van Nostrand’s Scientific Encyclopedia*, vol. I & II. Van Nostrand Reinhold, New York, NY (USA), 6th edition, 1983.

Sites WWW

- Bureau International des Poids et Mesures (BIPM):
<http://www.bipm.fr/>
- International Earth Rotation Service (IERS) Earth Orientation Parameters (EOP) Service:
<http://hpiers.obspm.fr/eop-pc/>
- Office Fédéral de Métrologie et d'Accréditation:
<http://www.metas.ch/>
- National Institute of Standards and Technology (NIST) Time and Frequency Division:
<http://tf.nist.gov/>

Ce document peut être téléchargé :

- version pour la projection :

<http://mypage.bluewin.ch/marc.viredaz/temps.pdf>

- version pour l'impression :

<http://mypage.bluewin.ch/marc.viredaz/temps-i.pdf>

ou liens depuis le site de Chronométriphilia :

- http://chronometrophilia.ch/liens_links.htm