

# *Mesurer et Distribuer le temps*

Gérard Berry

Professeur émérite au Collège de France

Membre de l'Académie des sciences

Membre de l'Académie des technologies

et Jacques Thimonier

Architecte des solutions SCPTIME chez

Gorgy Timing puis chez EASii IC

*Les Lundi de la cyber-sécurité, 13 janvier 2025*

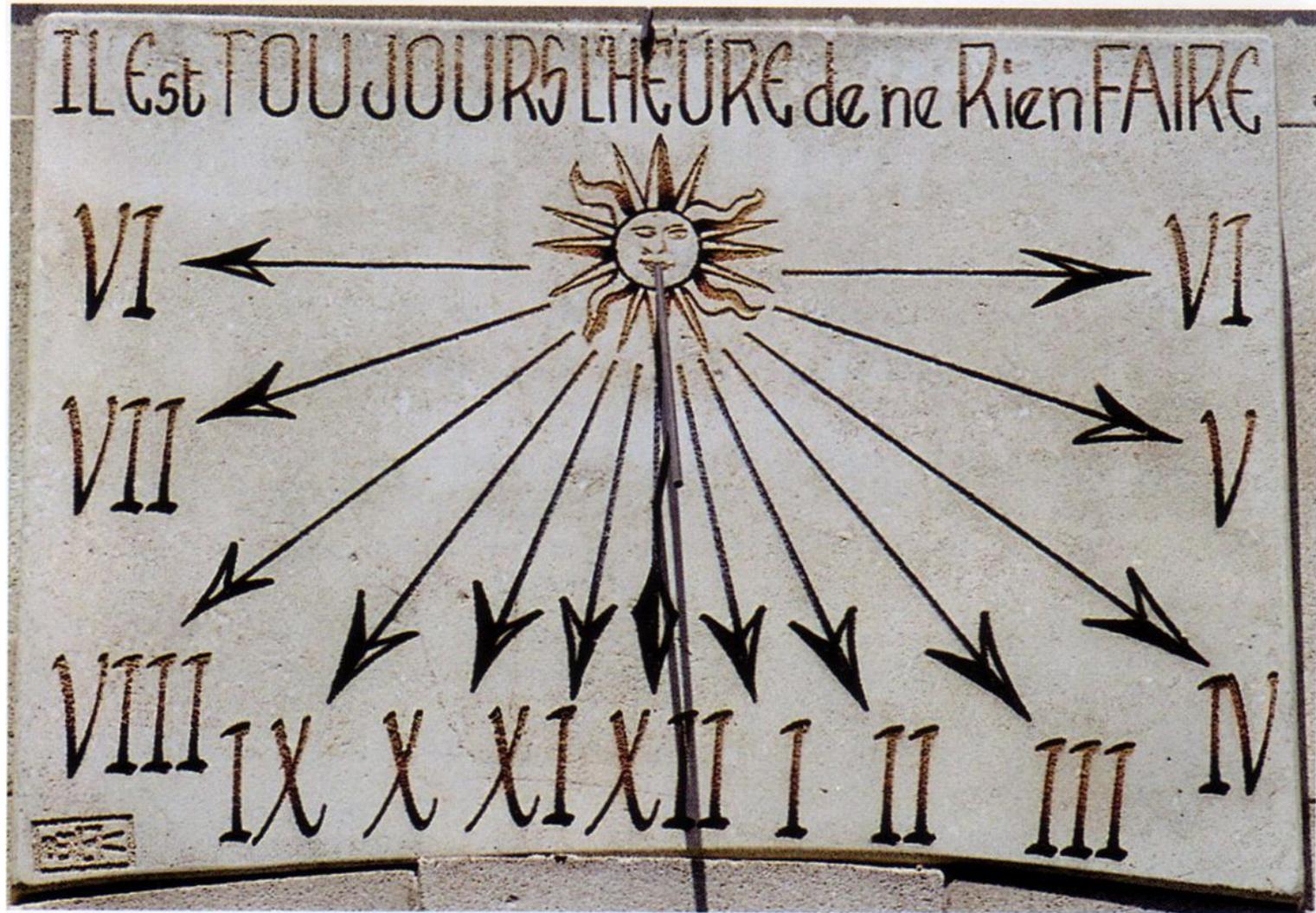
# *Agenda*

1. Bref survol de la mesure du temps
2. Brève histoire de la distribution du temps
3. Le rôle de l'informatique
4. Les dangers actuels liés au temps
5. La solution française SCPTIME

# Mesurer et diffuser l'heure, pourquoi ?

- Avant le 17<sup>e</sup> siècle : la religion, la guerre
- Au 18<sup>e</sup> siècle : pour connaître sa longitude en bateau
  - le sextant demande une précision en secondes (1s = 370m)
- Au 19<sup>e</sup> siècle : pour les trains (horaires, circulation)
- Au 20<sup>e</sup> siècle : pour toute l'organisation sociale
- Au 21<sup>e</sup> siècle : vraiment partout, à la ms ou la  $\mu$ s
  - sciences, géolocalisation, transports, télécommunications (5G MIMO), armées, finance, Internet (qui ignore le temps, c'est pour ça qu'il marche), data centers et BD distribuées, usines, machines, objets connectés, ...
  - les GNSS (GPS, Galileo, Baidu, Glonass) dominant sa distribution, mais n'offrent aucune sécurité

# Mesurer l'heure : oui, mais laquelle ?



Saint Rémy de Provence – heure irrégulière

# *Yantra Mandir, Jaipur, ~1730*

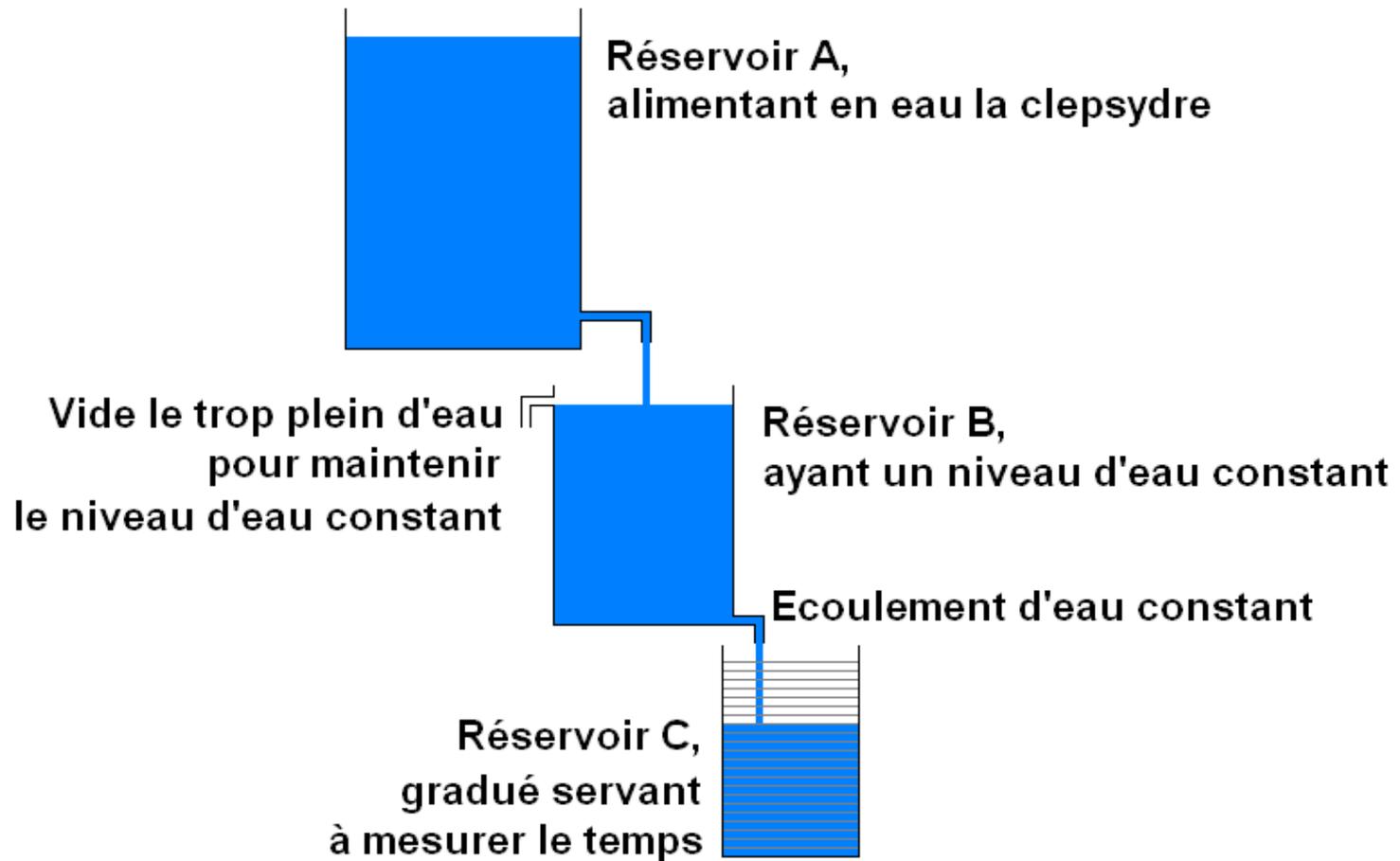


**Brihat Samrat Yantra, 27m de haut !**



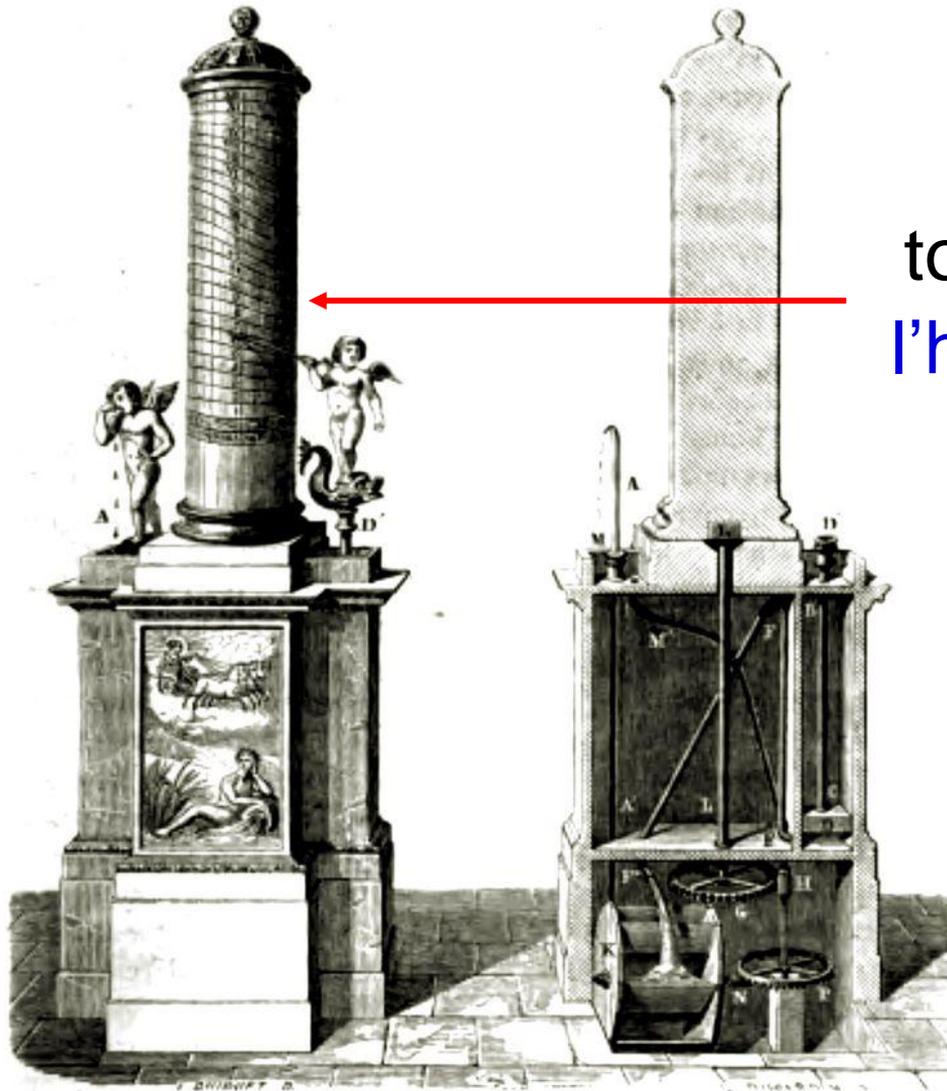
Précision à quelques secondes pour l'heure solaire

# *La clepsydre, le premier dispositif régulé ?*



heure régulière

# La clepsydre de Ctésibios, Athènes, -270

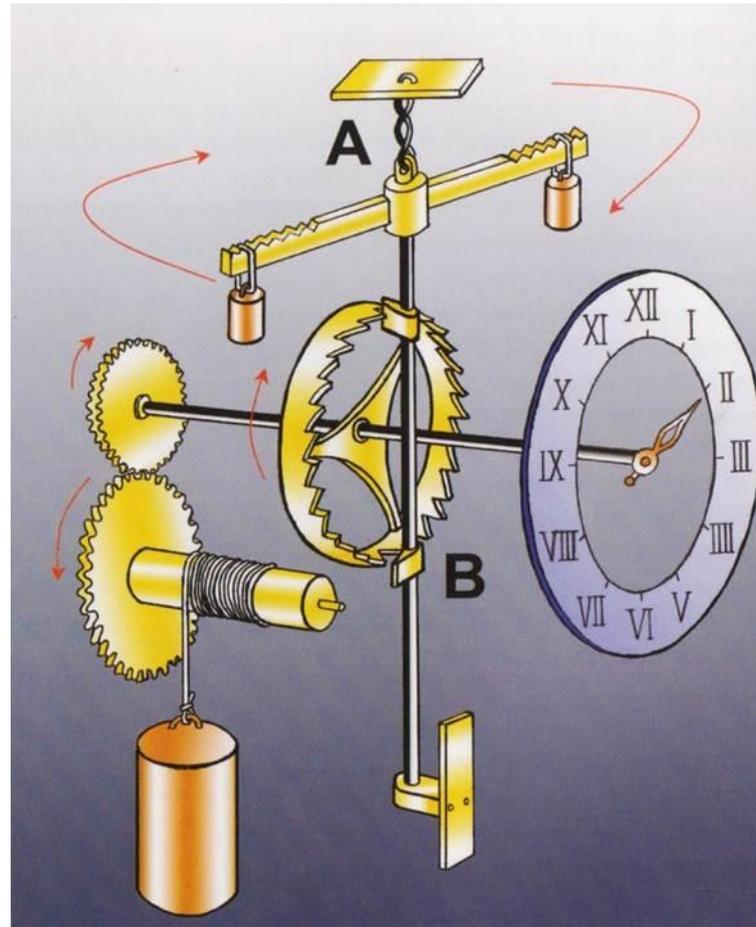


tour rotative montrant  
l'heure solaire du jour

heures régulières  
→ irrégulières !

# Horloges : le temps devient discret !

tic



tac

Horloge à foliot et échappement, prieuré de Dunstable, 1283  
(d'où remonter sa montre !)

Au début, pas forcément de cadran, mais des cloches

# *Des Scilly à John Harrison*

## *Le grand prix de l'amirauté (20 000 livres)*



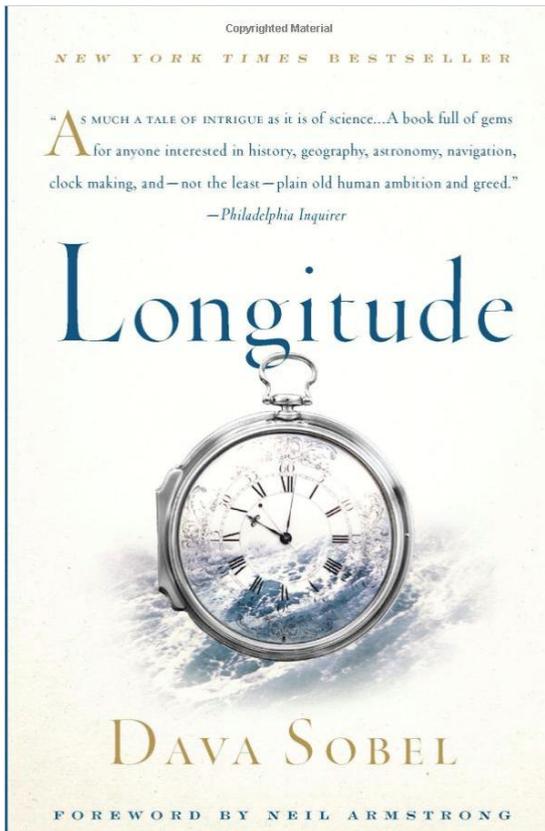
2 novembre 1707, naufrage massif :  
mauvaise estimation de longitude  
(à l'équateur, erreur de 1 s = 370m)

**=> Prix de 20 000 livres !**

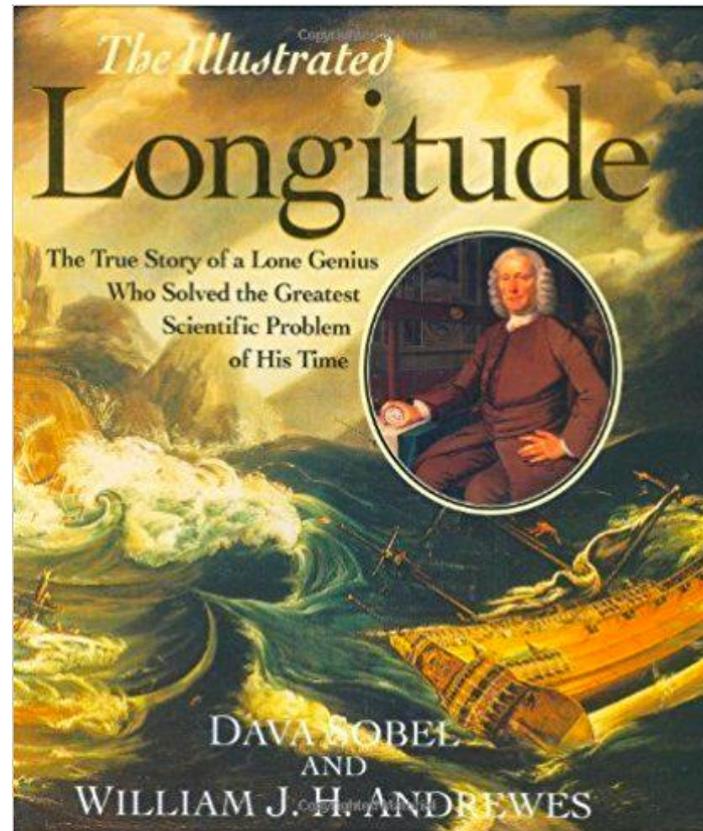


1772 : Chronomètre H4  
1/3 s par jour !

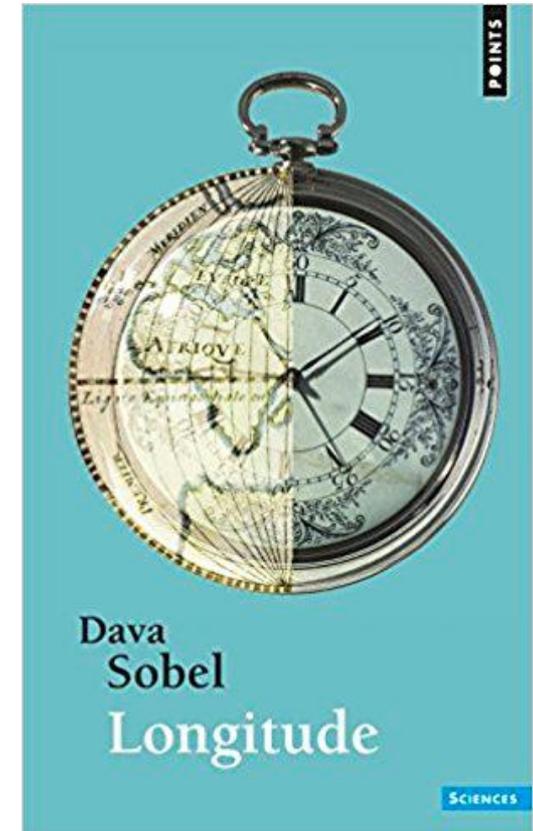
# Un livre exceptionnel



*English*



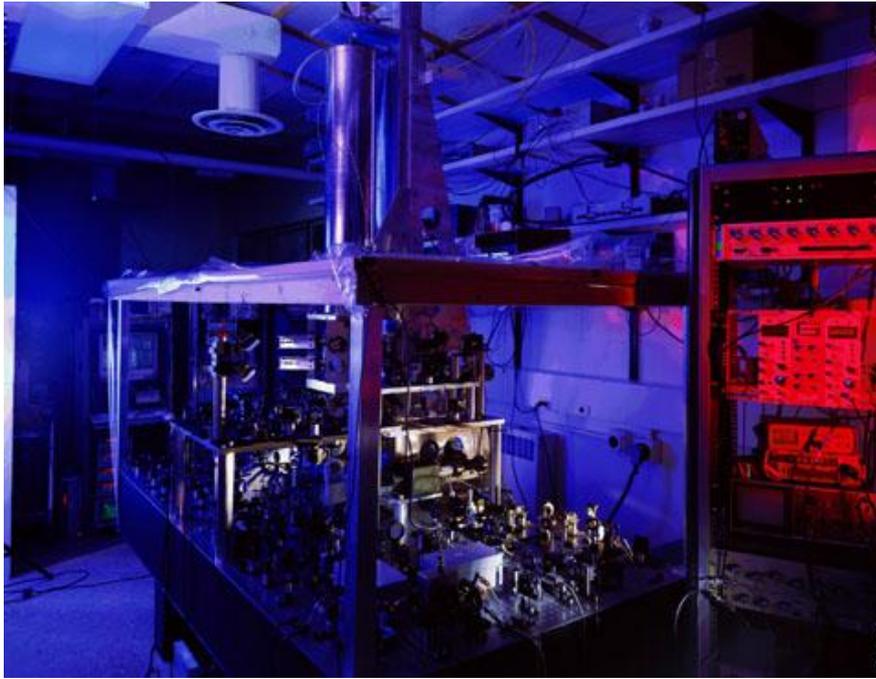
*Illustrated*



*Français*

**Longitude, de Dava Sobel, à dévorer !**

# Horloges atomiques



2005 : fontaine d'atomes  
de césium,  $\sim 5 \cdot 10^{-16}$   
1,5s par 100 millions d'années



2015 : 17 cm<sup>3</sup>, 35g,  
200 mW, 1500 \$  
précision  $\sim 5 \cdot 10^{-11}$   
 $\sim 1,5$  s par millénaire

Physique + informatique : synchronisation mondiale des  
GPS, ordinateurs, téléphones, bases de données, etc.

# *Le rôle central de la vibration*

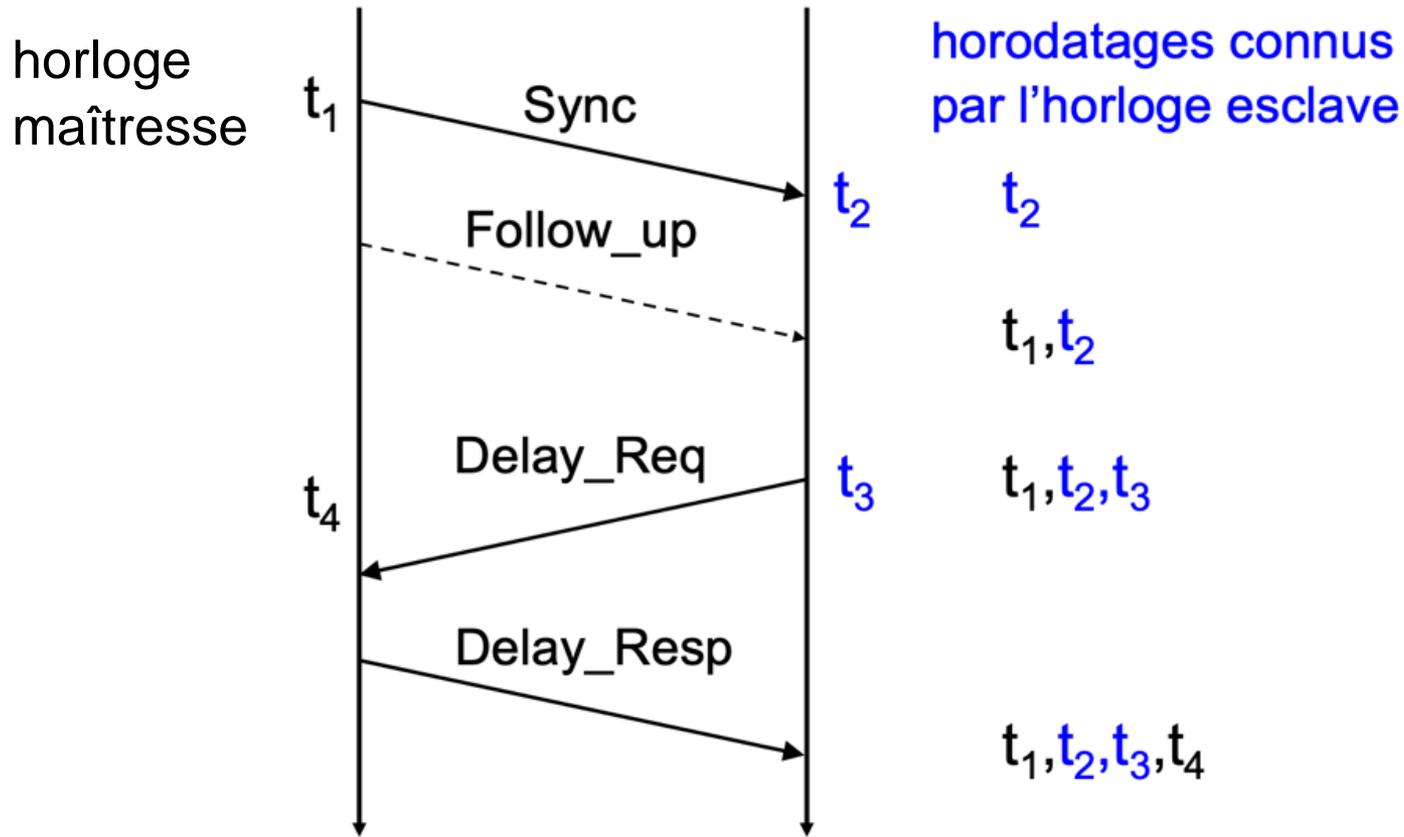
- Toutes les méthodes modernes reposent sur des vibrations de plus en plus rapides
  - anciennes pendules : 1 Hz
  - chronomètre : 5 Hz → 100 Hz
  - horloge atomique au césium : 9 192 631 770 Hz
  - horloge optique au strontium 429 228, ... GHz
  - treillis optiques, précision  $2,5 \cdot 10^{-19}$  s/s
    - ~ 1 seconde sur l'âge de l'univers !

Le problème n'est plus dans les sources de temps

# *Mais de quelle heure parle-t-on ?*

- Longtemps : heure **GMT**, Greenwich Median Time
  - fin du 19<sup>e</sup> et presque tout le 20<sup>e</sup>, presque partout
  - en France sous ce nom seulement en 1923
- 1989, définitions actuelles :
  - **TAI** : temps atomique international, BIPM en France à partir d'horloges atomiques réparties **SYRTE**, Observatoire de Paris
  - **UTC**, temps universel coordonné, remplace GMT, (**TUC** ⇌ **CUT**)
  - maintenant :  $UTC = TAI + 37 \text{ s}$
- **Temps légal français**, en métropole : UTC+1 (hiver), UTC+2 (été)

# Synchroniser deux horloges : PTP, lien de communication symétrique



$$\delta = \frac{(t_2 - t_1) - (t_4 - t_3)}{2}$$

# *Agenda*

1. Bref survol de la mesure du temps
- 2. Brève histoire de la distribution du temps**
3. Le rôle de l'informatique
4. Les dangers actuels liés au temps
5. La solution française SCPTIME

# *Distribuer l'heure : une longue histoire (1)*

- Cadrans solaires, clepsydes : courte distance
- Pour les heures de prières : **cloches, minarets + muezzins**
- Plus tard : **pendules** dans les maisons et églises
- « Midi pétant », 1786 : **canon dans les jardins du Palais royal**, mèche allumée avec une loupe
- Londres, Mr puis Mme Belville, 1836-1940 : **vente aux clients de l'heure de Greenwich dans leur magasin** (avec de bonnes montres synchronisées à l'observatoire au petit matin) !

Mais la notion même d'heure reste très variable...

# *Accident de train aux USA*



1853 : un des conducteurs avait une montre trop lente  
**14 morts → débuts de la signalisation ferroviaire**

# *Les horaires de train en France*

- Chaque ville était à sa propre heure solaire, mais les horaires utilisaient l'heure de Paris
- Jusqu'en 1911 : **trois pendules dans chaque gare**, deux sur la façade, heure locale et heure de Paris, et une sur les quais à **l'heure de Rouen** = Paris-5 mn, pour aider les retardataires.

**Les horaires étaient à l'heure de Paris, mais les trains circulaient à l'heure de Rouen !**

- Grands changements fin 19<sup>e</sup> – début 20<sup>e</sup> :
  - 1884, Washington : proposition de fuseaux horaires
  - 1891 : l'heure de Paris devient légale en France
  - 1911 : la France passe au méridien de Greenwich, appelée **heure de Paris moins 9mn 20s** jusqu'en 1923 !
  - 1929 : fuseaux horaires adoptés presque partout

# *Distribuer l'heure : une longue histoire (2)*

- 1879 : **distribution pneumatique** de l'heure à de nombreuses pendules dans Paris (établissement publics et commerçants) plus de 50 kilomètres de tuyaux. On ne savait pas distribuer l'électricité !
- 1910 : les pendules pneumatiques **s'arrêtent simultanément à 22h 53mn** à cause de la grande crue de la seine qui noie la machine à vapeur du compresseur installé dans l'île Seguin
  - l'usine SUDAC sera reconstruite et alimentera les pendules jusqu'en 1994, de plus en plus loin (900 km de tuyaux)
- 1933 : installation à Paris de l'horloge parlante d'Ernest Esclangon : **au 4<sup>e</sup> top, il sera exactement...**

# 1933 : Horloge parlante, ODÉON 84 00



**Ernest Esclangon**  
(1940 en Angleterre)



1991: l'actrice **Marie-Sylvie Behr**  
donne sa voix à l'horloge atomique  
(en alternance avec un inconnu)  
... Fermée le 1<sup>e</sup> juillet 2022 😞

# L'émetteur d'Allouis, 1939 – ??



1939 : 4x250m → 308m

1973 : 2x350m, **2MW**

France-Inter GO, PO

2020 → ?? : heure atomique

**1000 / 800 KW**, plus de GO / PO

portée plus courte (**pas toute la France métropolitaine**)

synchronise 200 000 horloges à la milliseconde (?)

Mais **très énergivore**, site unique donc **fragile**, ondes **brouillables**

# *Agenda*

1. Bref survol de la mesure du temps
2. Brève histoire de la distribution du temps
- 3. Le rôle de l'informatique**
4. Les dangers actuels liés au temps
5. La solution française SCPTIME

# Trois informatiques vis-à-vis du temps

- Informatique séquentielle classique (Turing) : le temps n'est jamais mentionné explicitement, ce n'est qu'un **coût à minorer**  
→ **théorie de la complexité algorithmique**
- Informatique parallèle asynchrone (Internet) : le temps n'est jamais mentionné explicitement, mais il peut provoquer pleins de problèmes → **théorie des algorithmes asynchrones**
- Informatique parallèle synchrone : **les questions temporelles sont centrales** → réseaux synchrones, langages synchrones  
TTP, FlexRay, Esterel, Lustre, **Scade 6**, Ptolemy, Lingua Franca  
avions (Airbus), trains, voitures, usines, objets connectés, ...

La question du temps est **centrale mais différente**  
pour l'asynchronisme et le synchronisme

# Bugs de temps en informatique embarquée

- 1991, Dharan (Irak) : **28 morts et 98** blessés suite à la chute d'un SCUD sur une caserne américaine, due au système débile de gestion de l'heure des missiles Patriot
- 1996, Ariane 501 : **auto-destruction** due à une perte du temps dans les gyrolasers...
- 2007 : 12 chasseurs F22-Raptor à \$330M pièce vont de Hawaï à Okinawa. À la ligne de changement de date, **tous leurs ordinateurs se plantent** et ne redémarrent pas...  
**Retour sans instruments — il faisait beau, ouf !**
- 31/12/2008 : tous les lecteurs **MP3 Zune** (Microsoft) **vident leurs piles à minuit pile** en bouclant sur deux tests 
- 10/2010 : les **iPhones US** passent à l'heure d'hiver, mais **modifient aussi leurs réveils !**

# *Pourquoi le temps reste essentiel en informatique asynchrone*

Même si Internet ne connaît pas le temps,  
ses utilisateurs le connaissent !

- Mise à l'heure des ordinateurs en continu et sans retour en arrière
- Cloud computing :
  - bases de données réparties et répliquées avec horodatage des données et des réponses (Spanner)
  - calculs coordonnés à distance (make multi-machines, ...)
  - grands calculs numériques
  - etc.

# Synchronisation mondiale des ordinateurs

- Deux protocoles majeurs devenus des standards
  - PTP, pour réseaux à temps de propagation symétriques : 1  $\mu$ s – 1 ns
  - PTP + physique au CERN : 70 ps à 10km !
  - NTP, pour ordinateurs sur internet et réseaux quelconques : ~ 10 ms
- Base : GPS, horloges atomiques, fibres, Internet
  - gros travail des physiciens !
- Objectifs de NTP
  - synchronisation en continu, algorithmes de nature statistique
  - temps jamais décroissant
  - charge faible sur les machines et réseaux
  - simple à administrer
  - sécurité informatique de la gestion du temps : **essentielle, mais faible !**

NTP : un immense travail mondial coopératif,  
un logiciel libre, mais qui reste insuffisant  
(sources non identifiées, transmission en clair)

# *La 5G, très informatique*

- Utilisation interne de PTP pour synchroniser les éléments et pour le MIMO (Multiple Input Multiple Output)

Mais avec quelles sources, et quelle précision ?

- Temps « garanti à la milliseconde » pour les objets connectés

Mais quelles garanties ? Les praticiens disent plutôt 15-20 ms

- La 6G promet une meilleure précision, p. ex. pour les voitures connectées

Mais le succès de la 5G dans les objets connectés semble encore modéré, la transitions étant bien lente...

- Et la concurrence est active, LORA et autres...

# *Agenda*

1. Bref survol de la mesure du temps
2. Brève histoire de la distribution du temps
3. Le rôle de l'informatique
- 4. Les dangers actuels liés au temps**
5. La solution française SCPTIME

# Problème : les GNSS sont très fragiles !

- **Brouilleurs** : interdits en France, mais facile à trouver pour presque rien. Portée en centaines de mètres....
- **Leurreurs** : plus chers mais pas trop : vous fait croire que vous êtes ailleurs, par ex. au sommet de la tour Eiffel
- Problèmes importants aux aéroports de Newark, Marseille, Nantes (**ex. camions ne souhaitant pas être pistés...**)
- La Russie **brouille elle-même** les franges de son territoire pour que les drones des Ukrainiens ne puissent pas s'orienter.

Avions : + 500% brouillages en Q1/Q2/Q3 2024  
1500 vols par jour touchés, enquête sur 2000 équipages :  
impacts sur la sécurité **de très élevés à extrêmes**

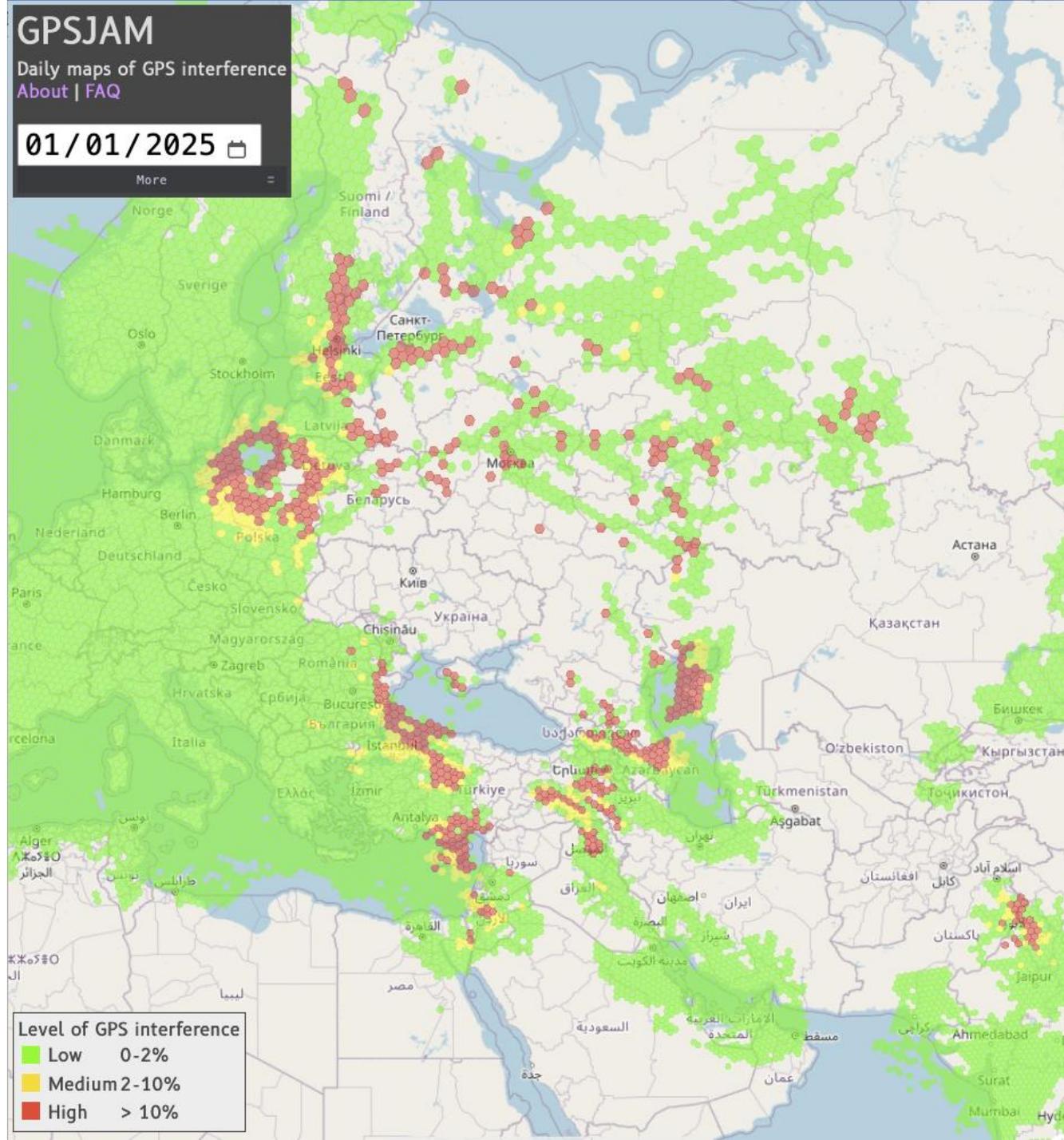
# GPSJAM

Daily maps of GPS interference

[About](#) | [FAQ](#)

01/01/2025 📅

More



**Level of GPS interference**

- Low 0-2%
- Medium 2-10%
- High > 10%

# Une vraie inquiétude aux USA



SPACE-BASED POSITIONING  
NAVIGATION & TIMING  
NATIONAL ADVISORY BOARD

Juillet 2024

- Les dangers des mauvaises diffusions du temps et de la localisation sont **largement ignorés**.
- **Le GPS est en retard** par rapport à Galileo et Baidu.
- Les responsabilités et décisions sont partagées entre beaucoup d'organismes **qui ne coopèrent pas**.
- Aucun moyen de traiter ce sujet **ni même d'en discuter** n'est mis en place.
- ....

<https://www.gps.gov/governance/advisory/recommendations/2024-07-PNTAB-chair-memo.pdf>

<https://globalsecurityreview.com/how-diplomacy-can-save-gps/>

# Quel est l'état de la France ?

- Etat actuel pas très différent de celui des USA
- Grande dépendance des administrations et de l'État au GPS, donc **à l'heure américaine et aux humeurs des USA**
- Mais des entreprises compétentes : **Gorgy Timing** → Bodet, Gorgy Time, etc.
- Des projets déjà très élaborés : **SCPTime**, **TRUSTime**,  
– mais qui étaient dirigés par **Gorgy Timing**...
- Et des utilisateurs actuels ou potentiels : EDF, SNCF, Orange, Défense, **Etat français**...

Ainsi qu'un projet d'école pour ingénieurs

**TTIS = Time Technologies International School**

à La Mure (Isère), initialement avec **Gorgy Timing** et  
l'Université de Grenoble — **quel futur ?**

Christophe Salomon et moi-même étions à son  
Conseil scientifique..

Article dans le Echos du 28/12/2022 et sur leur site :

**Distribuer l'heure exacte, une question  
plus stratégique qu'on ne le croit**

G. Berry, Général P. Guimbert, C. Salomon

[voir sur le site des Echos](#)

**Exactement zéro réaction...**

# *Mais d'autres avancent*

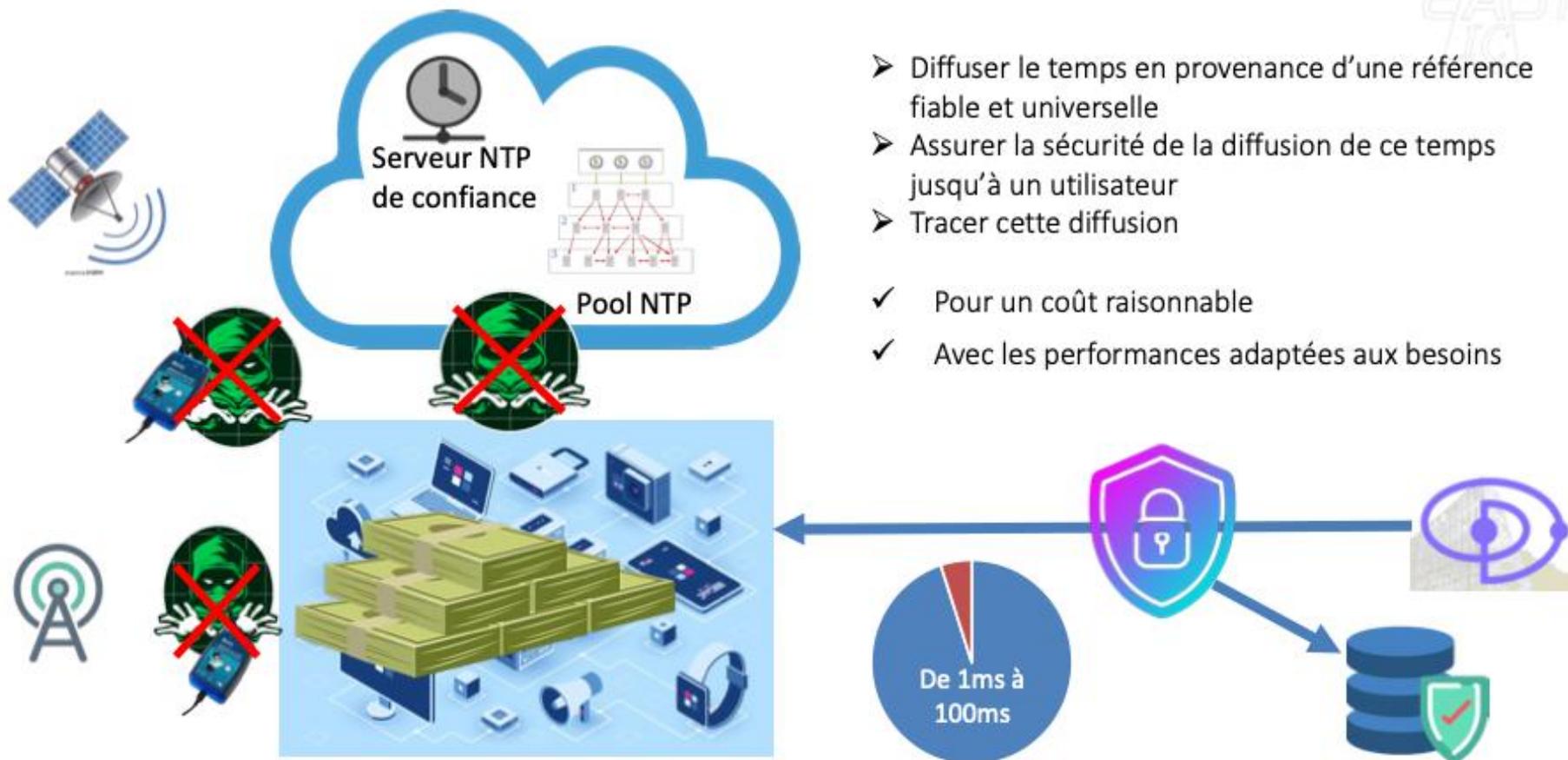
- **Corée du Sud, Arabie Saoudite, Chine** : mise en place de réseaux fibrés et de stations émettrices pour une distribution du temps plus sûre
- **Royaume-Uni** : similaire, mais seulement en étoile depuis un serveur et sur abonnement
- **Russie** : transmission terrestre, mais je n'ai pas de détail

# *Agenda*

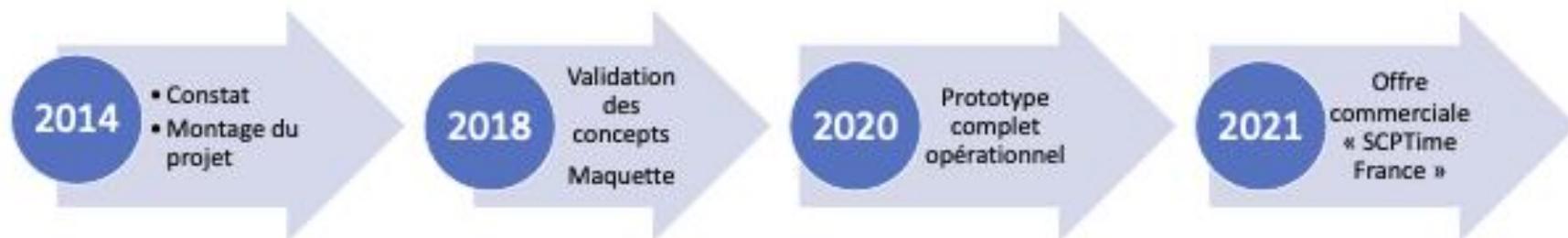
1. Bref survol de la mesure du temps
2. Brève histoire de la distribution du temps
3. Le rôle de l'informatique
4. Les dangers actuels liés au temps
5. **La solution française SCPTIME**

# Jacques Thimonier : SCP Time, les enjeux

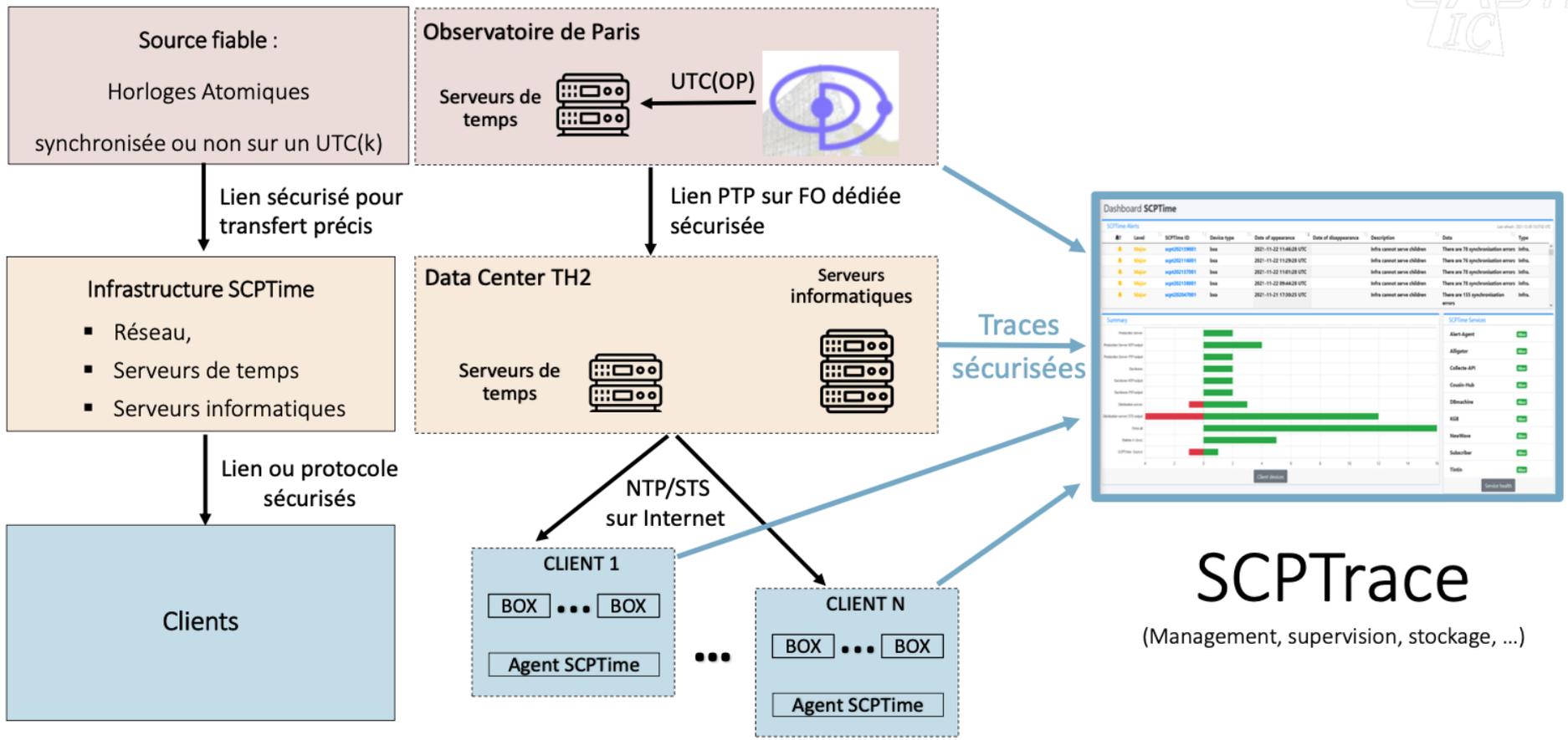
## Les enjeux pour SCPTIME



# Historique



# Etat des lieux



## SCPTTrace

(Management, supervision, stockage, ...)

# Technologies clés

## Un protocole temps sécurisé : STS

- Sous brevet, basé sur NTPv4 avec une composante chiffrée
- Validé par une étude du CEA

## Un système de gestion de base de données avec un module timeseries

- Restitution
- Analyse

## Des protocoles asynchrones avec couche TLS

- Sur des flux distincts des flux temps pour plus de sécurité
- Hautement évolutifs

## Des développements spécifiques en génie logiciel

- Virtualisation
- Conteneurs (docker)
- Des API pour interfacage avec des logiciels externes

# R&D : Où amener de la sécurité ?

## Finalisation de SCPTView

Transfert sécurisé d'un signal d'horloge

En utilisant les techniques de comparaison satellitaire

En s'appuyant sur les protocoles sécurisés SCPTime

Objectif d'exactitude : de l'ordre de  $10^{-8}$ s

## Sécurisation de protocoles réseaux plus précis :

PTP, PTP-WR, ...

Intégration native dans des circuits

Productions d'ASICs compatibles SCPTime

## Sécurisation des transferts de temps entre satellite et le sol

Intégration SCPTime dans des protocoles asymétriques

Synchronisation sécurisée par radio-fréquence

# Conclusion

- Depuis deux millénaires, la mesure du temps, la définition de l'heure et sa diffusion ont été en permanence au premier plan de l'activité scientifique, avec de nombreuses questions difficiles et de merveilleuses inventions.
- Ces questions semblent maintenant résolues avec le GPS, NTP, etc., ce que pensent **la plupart des décideurs politiques** et le public général, alors que la réalité est bien moins claire et bien plus dangereuse, en particulier pour la souveraineté des pays dont la France
- Des pays ont réagi, d'autres pas — dont la France. Pourtant **il existe des solutions françaises bien meilleures que l'existant**, comme **SCPTIME**, qu'il nous semble **indispensable de soutenir et de mettre au premier plan**

# Mes deux pendules préférées



Merci à mon ami Gérard Bellaïche, qui me les a offertes !