

Physique ultra-rapide : *du mouvement des atomes à celui des volants de badminton*



Eric Collet

Institut de Physique de Rennes

Université de Rennes - CNRS

Partie 1

Physique et Badminton



PARIS 2024



Physique du badminton

Le badminton se pratique avec une raquette et un volant qui se propage dans un fluide appelé "air"

- Le volant, ses trajectoires, sa vitesse
- Gauchers et droitiers
- Effet Magnus sur les slices



New Journal of Physics
The physics of badminton

Articles à lire

Left- versus right-handed badminton slice shots: opposite spinning of the chiral shuttlecock and Magnus effect

Eric Collet

Institut de Physique de Rennes,
Univ. Rennes – CNRS France

Comptes Rendus

Physique

Caroline Cohen¹, Baptiste Darbois Texier¹, David Quéré² and Christophe Clanet¹

¹ LadHyX, UMR 7646 du CNRS, Ecole Polytechnique, 91128 Palaiseau Cedex, France

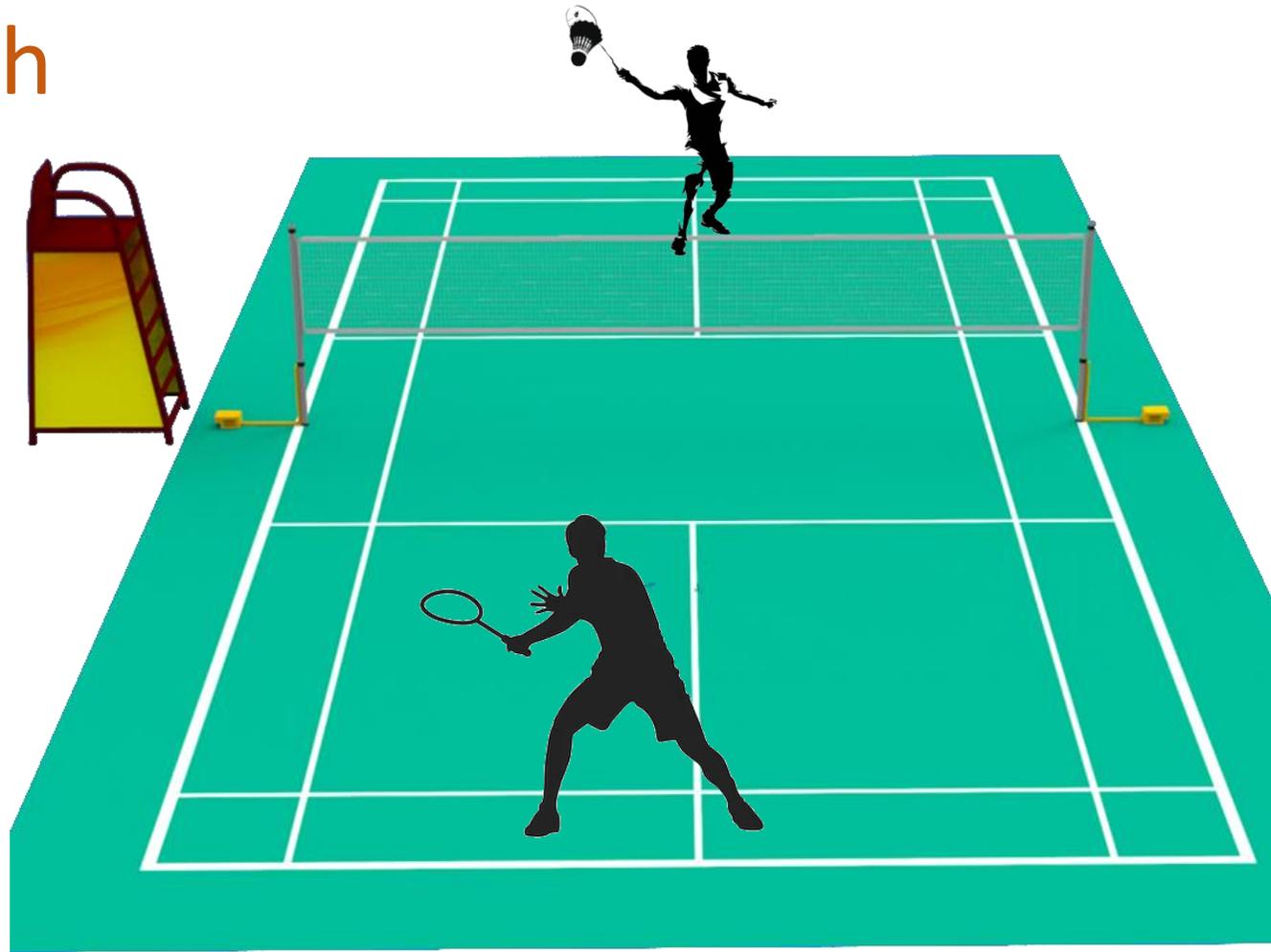
² PMMH, UMR 7636 du CNRS, ESPCI, 75005 Paris, France

Le badminton : sport le plus rapide du monde

Records du monde de smash

438 km/h (F) P. Tan,
565 km/h (H) S. Rankireddy

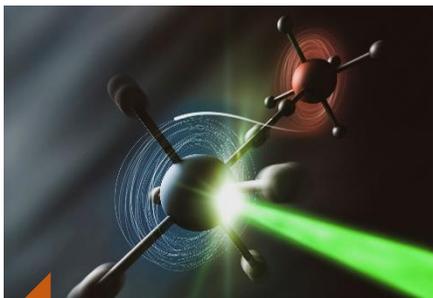
15 m en 0,1 s



Etudes ultra-rapides :

chaque processus physique a son échelle de temps intrinsèque

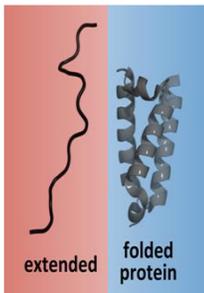
Atomes



Processeur



Protéine



Volant



Pulsation



5000 m



← temps

100 fs : 10^{-13} s

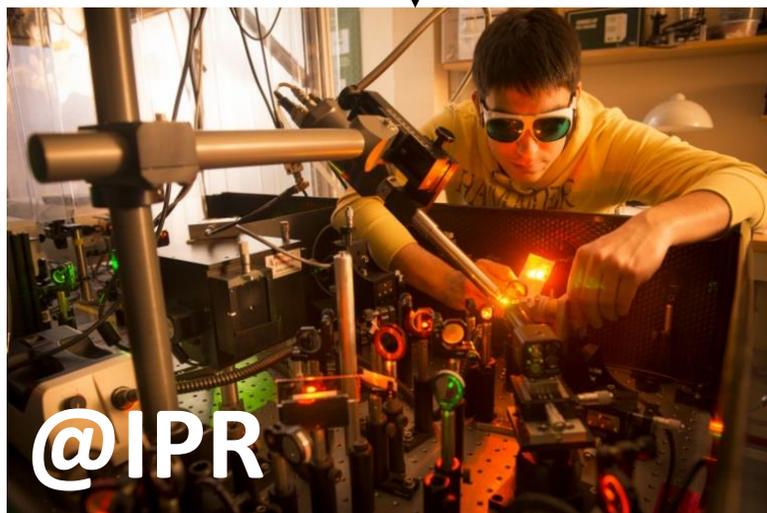
1 ns : 10^{-9} s

1 μ s : 10^{-6} s

1 ms : 10^{-3} s

1 s : 10^0 s

1000 s : 10^3 s



une image
toutes les
250 μ s

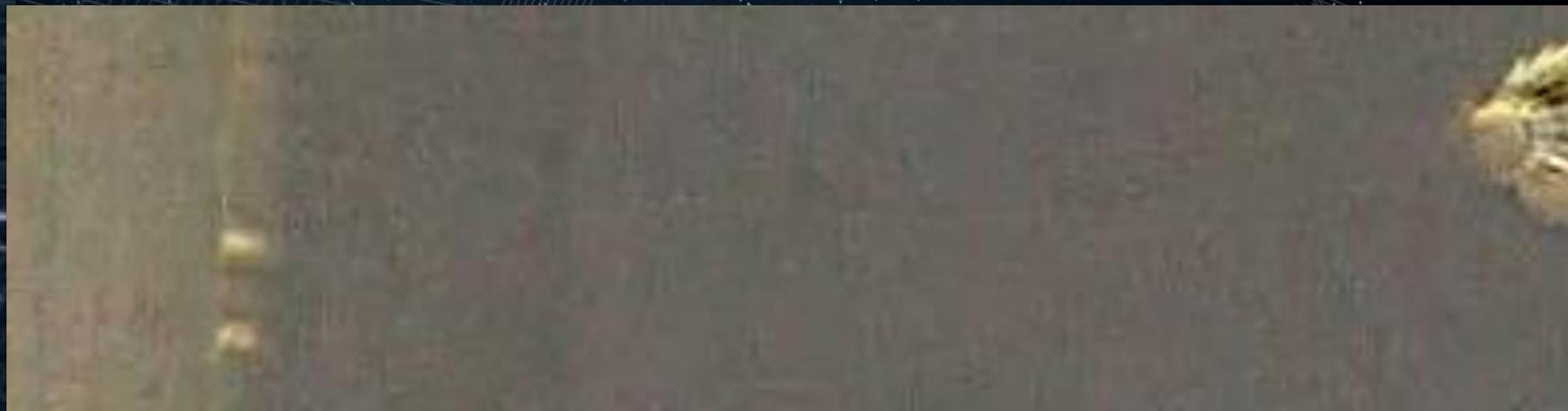
Physique et Badminton

$$d\left(E_t + \frac{1}{2}mv^2\right) = 0$$



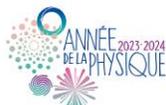
Société Française
de Physique

Eric Collet



Institut de Physique de Rennes

Univ Rennes- CNRS



Université
de Rennes



Le volant : un projectile très particulier

5 grammes :

- un bouchon en liège → centre de gravité G
- 16 plumes → Force de trainée

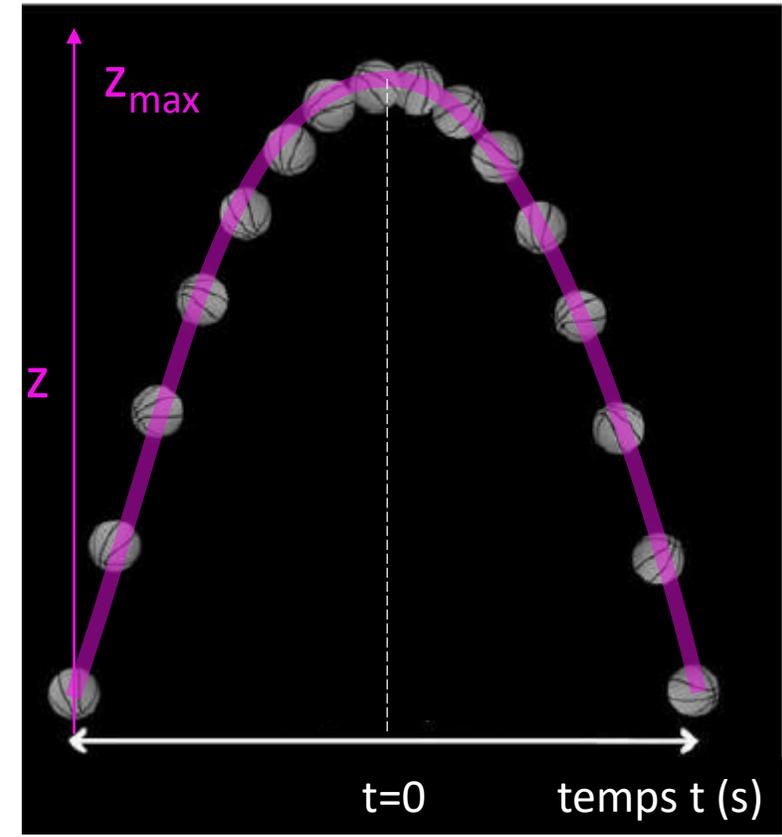
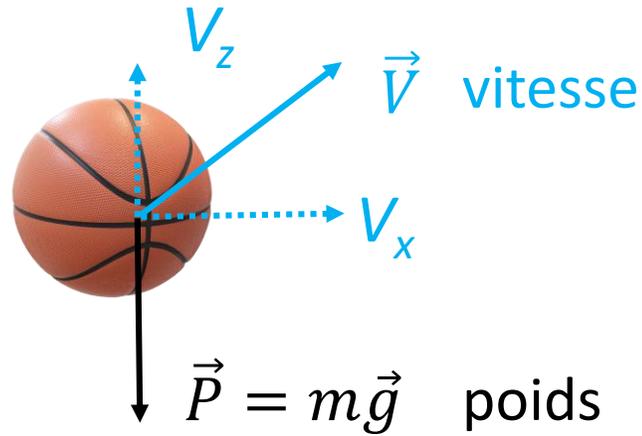


Accélération, vitesse, décélération

Trajectoires et forces

Principe fondamental de la dynamique

$$\sum \vec{F}_i = m\vec{a}$$



$$m \frac{d\vec{V}}{dt} = \vec{P}$$

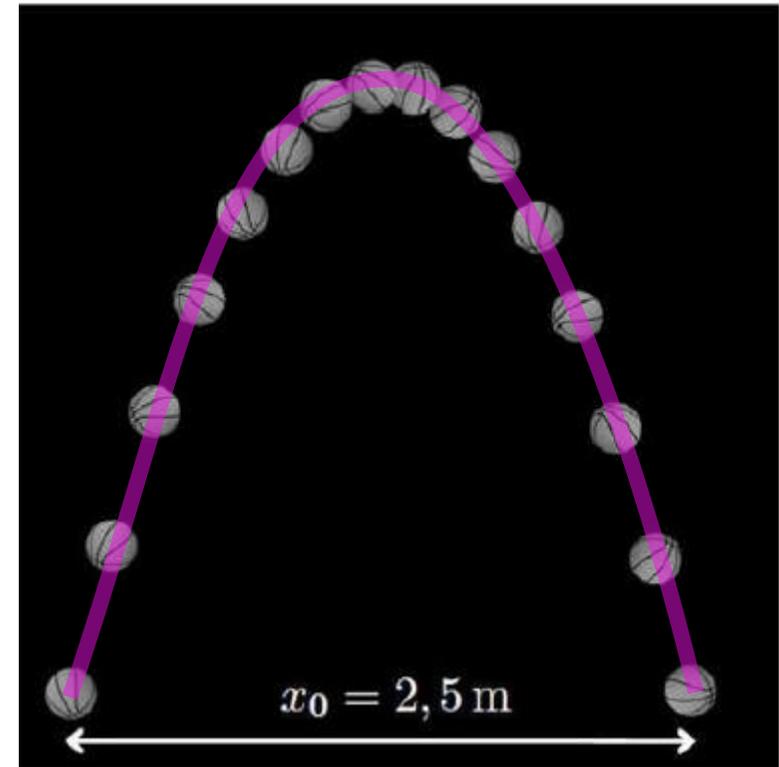
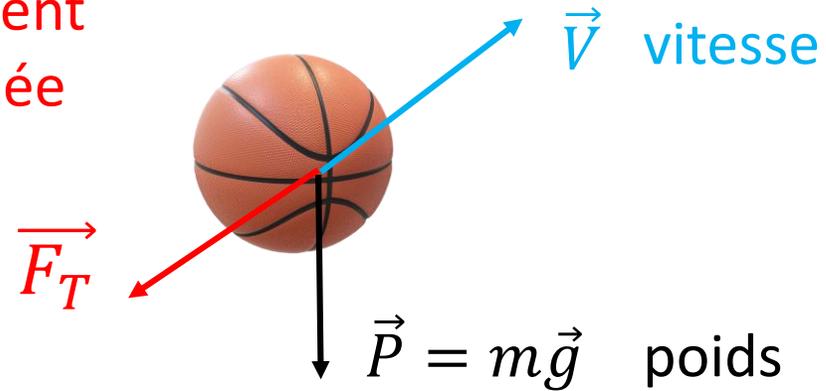
inertie poids

$$z = z_{\max} - \frac{1}{2}gt^2$$

Trajectoire
parabolique

Trajectoires et forces dans l'air

Frottement
Ou traînée



Ballon de basket

- inertie et poids importants
 - traînée faible.
- Trajectoire parabolique

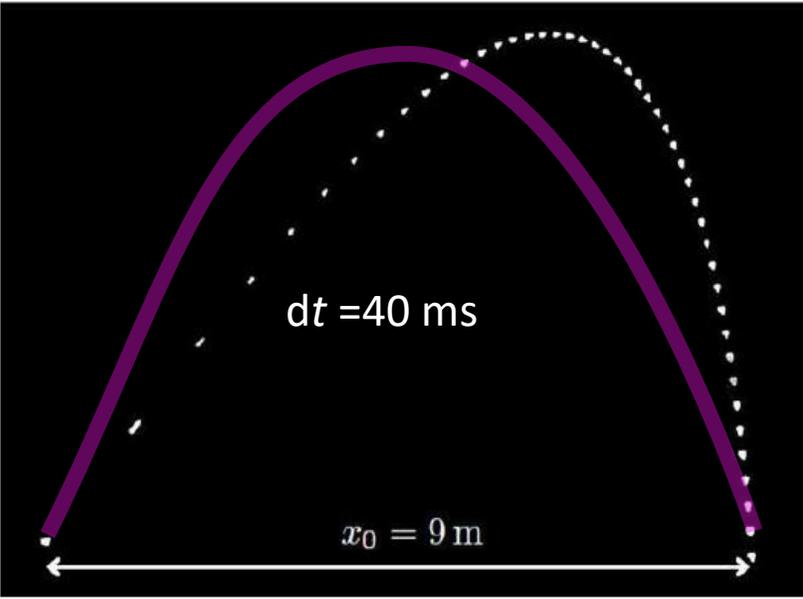
$$m \frac{d\vec{V}}{dt} = \vec{P} - \vec{F}_T$$

inertie poids Trainée

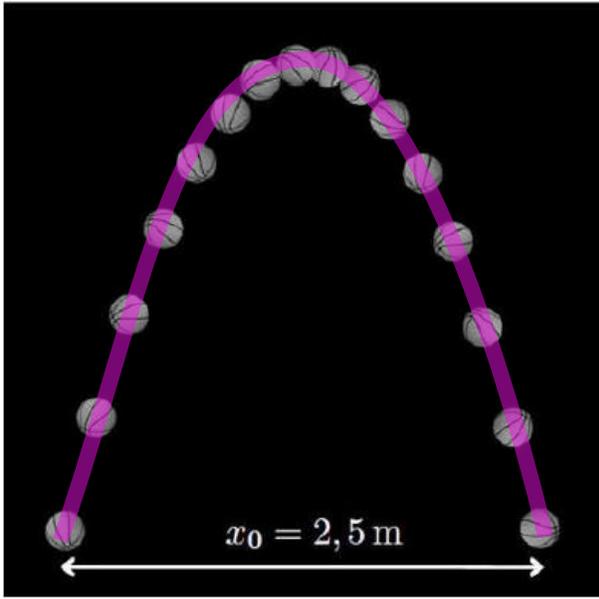
$$m \frac{d\vec{V}}{dt} = m\vec{g} - C.V\vec{V}$$

Volant de badminton : la force de traînée est importante

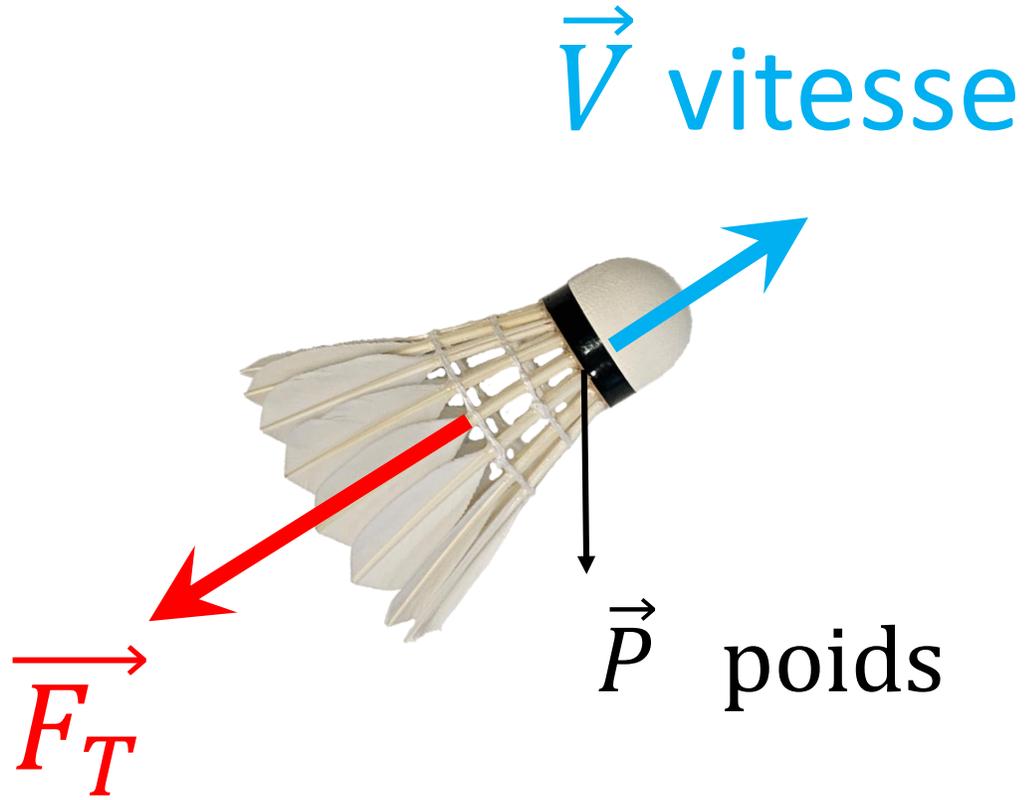
la trajectoire n'est pas une parabole



(a) Chronophotographie d'un volant et illustration du "mur aérodynamique"



(b) Chronophotographie d'un ballon
Cohen *et al.* [2014]

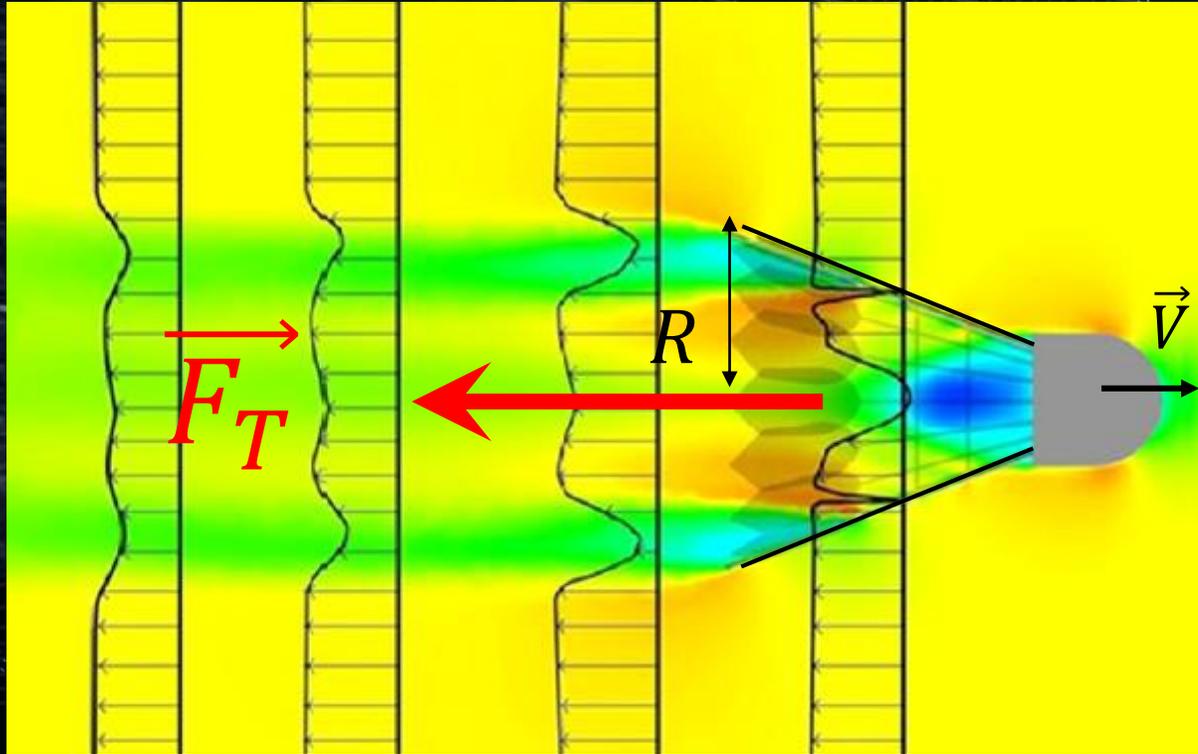


$$m \frac{d\vec{V}}{dt} = m\vec{g} - \vec{F}_T$$

inertie poids Trainée importante

Force de Trainée

$$\frac{d}{dt} \left(E_{\text{pot.}} + \frac{1}{2} m v^2 \right) = 0$$



$$F_T = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 C_T V^2$$

- ρ : densité de l'air
- πR^2 : surface du volant
- C_T : coefficient de trainée
- V^2 : (vitesse)²

Aerodynamics of badminton shuttlecocks
Aekaansh Verma, Ajinkya Desai, Sanjay Mittal * *Journal of Fluids and Structures* 41 (2013) 89–98

effet de frottement avec l'air



Université de Rennes



Differents regimes:

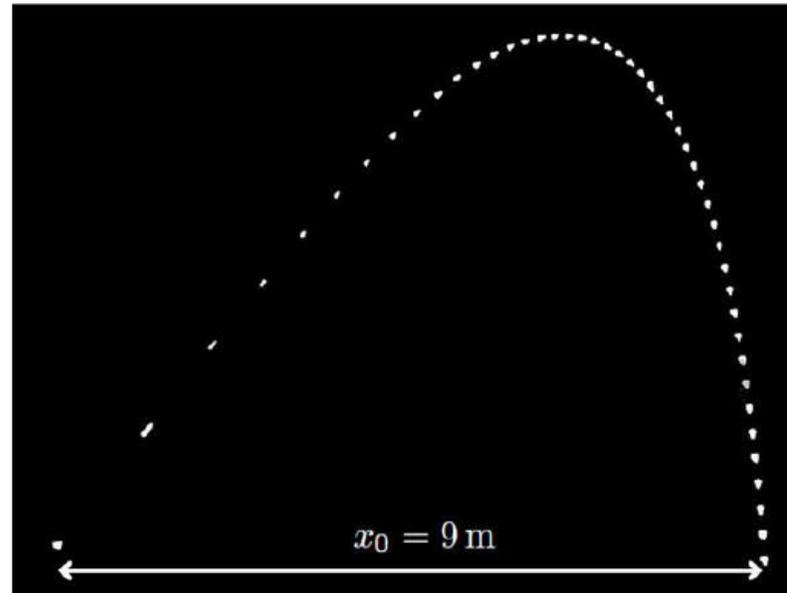
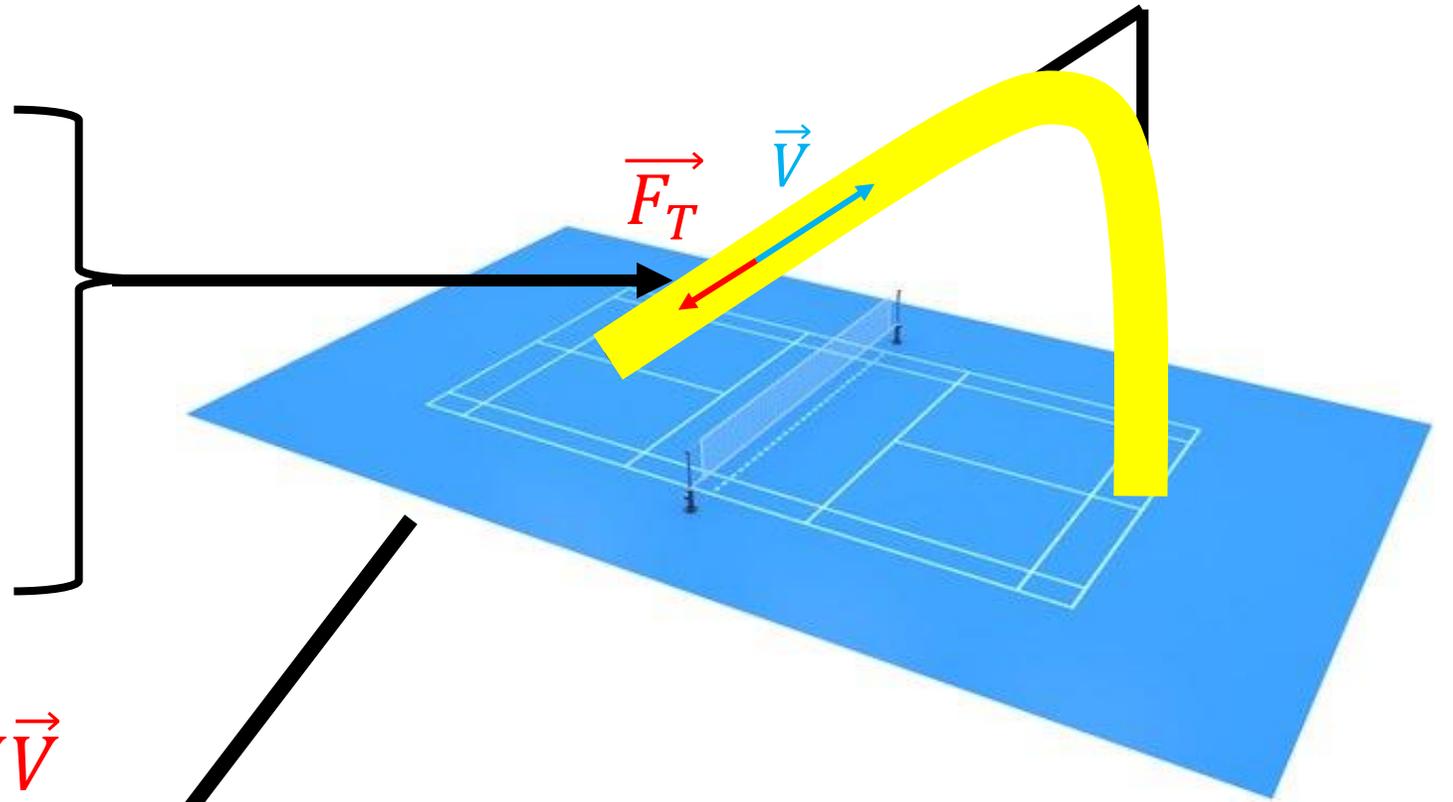
Après la frappe :

- haute Vitesse
 - trainée importante
- poids négligeable

$$m \frac{d\vec{V}}{dt} = m \cancel{\vec{g}} - \frac{1}{2} \rho \pi R^2 C_T V \vec{V}$$

inertie \times poids

Trainée



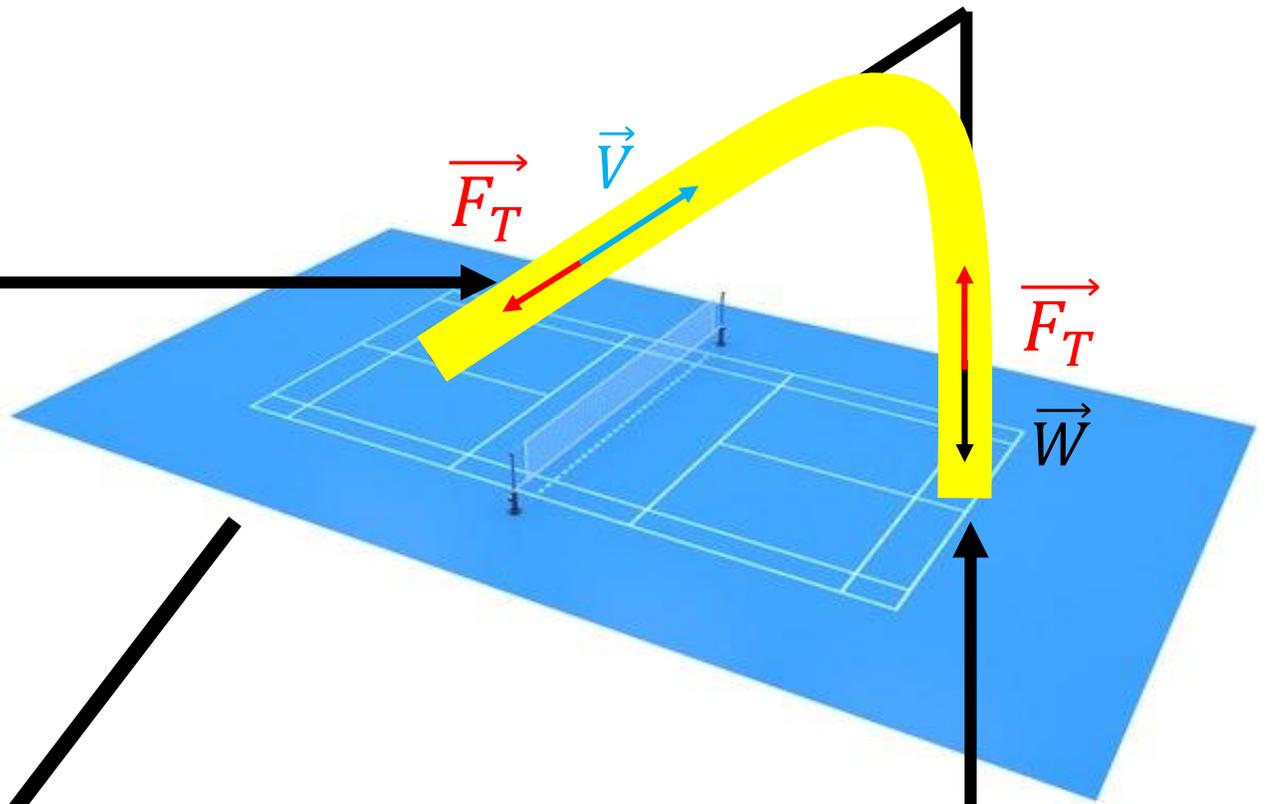
Differents regimes:

Après la frappe :

- haute Vitesse
- trainée importante
- poids négligeable

$$m \frac{d\vec{V}}{dt} = m \vec{g} - \frac{1}{2} \rho \pi R^2 C_T V \vec{V}$$

inertie ~~X~~ poids Trainée



Fin de trajectoire : vitesse constante
La force de trainée est égale au poids

$$m \frac{d\vec{V}}{dt} = m \vec{g} - \frac{1}{2} \rho \pi R^2 C_T V \vec{V}$$

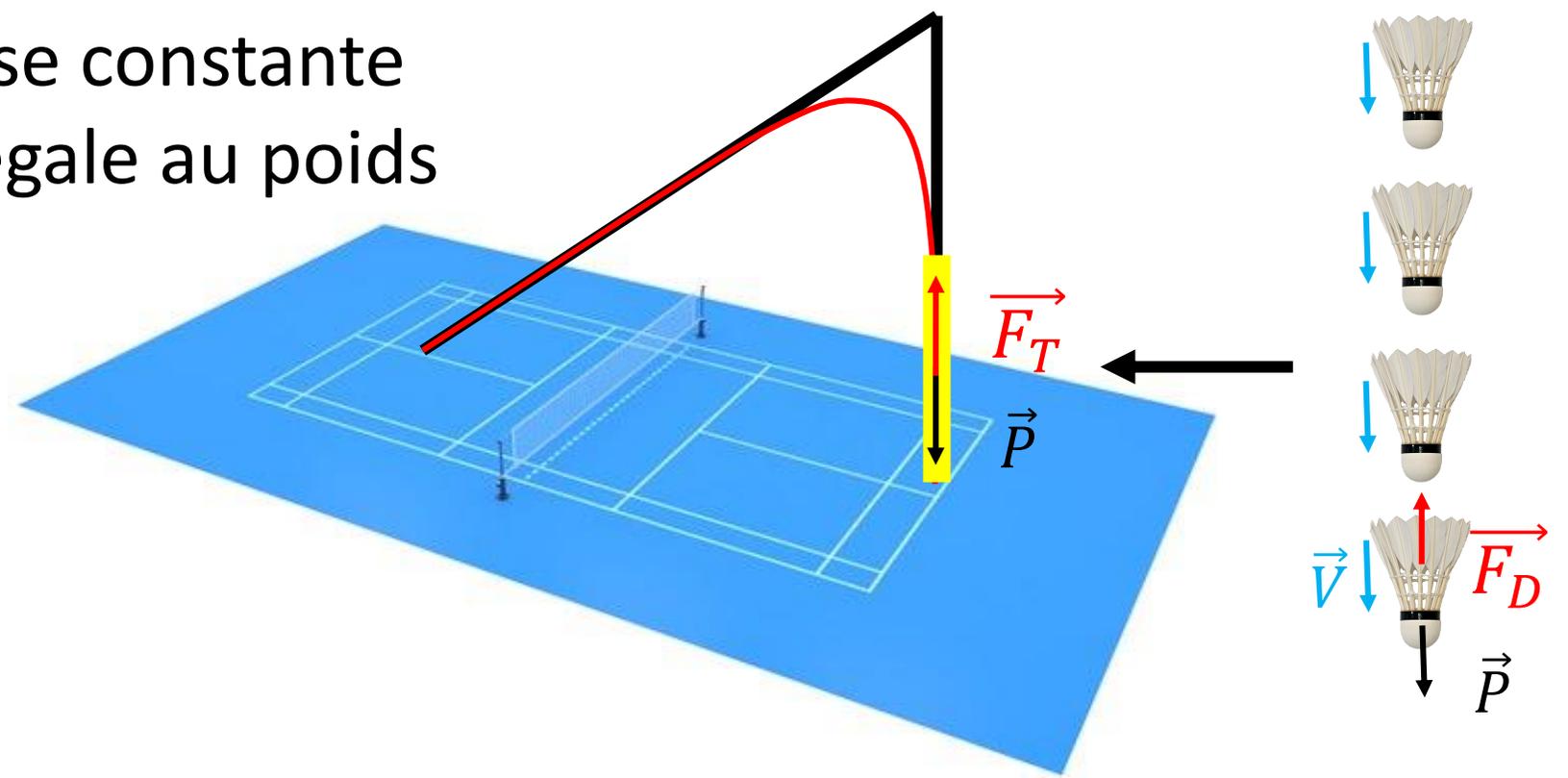
~~X~~ inertie poids Trainée

Fin de trajectoire : vitesse constante
La force de trainée est égale au poids

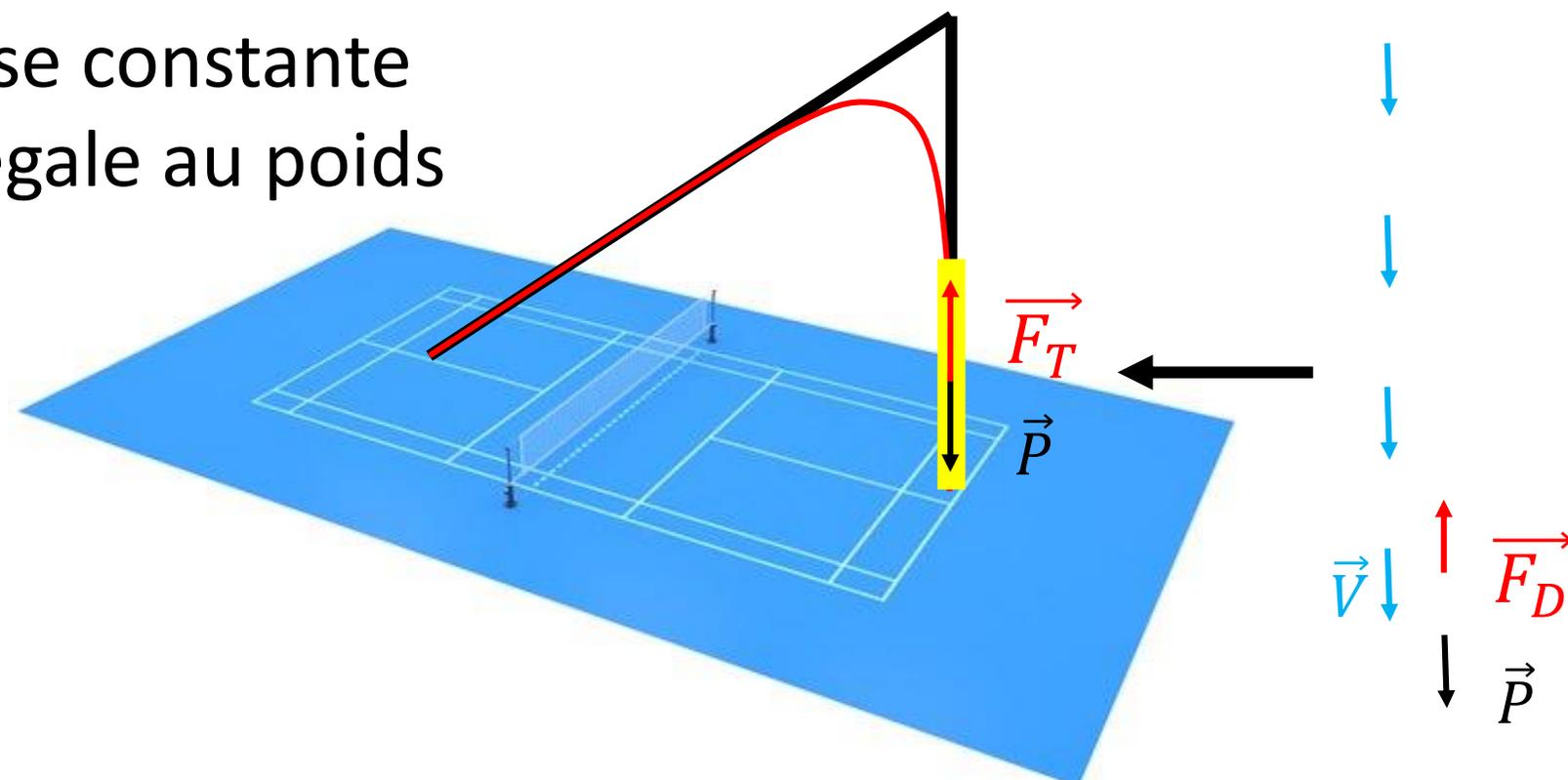
$$\frac{1}{2} \rho \pi R^2 C_T V^2 = mg$$

trainée

poids



Fin de trajectoire : vitesse constante
La force de trainée est égale au poids



$$\frac{1}{2} \rho \pi R^2 C_T V^2 = mg$$

trainée poids

$$V = \sqrt{\frac{2mg}{\rho \pi R^2 C_T}}$$

m : masse du volant
 g : accélération de la pesanteur

ρ : densité de l'air
 πR^2 : surface du volant
 C_T : coefficient de trainée

$$V \approx 24 \text{ km/h}$$

Differents regimes:

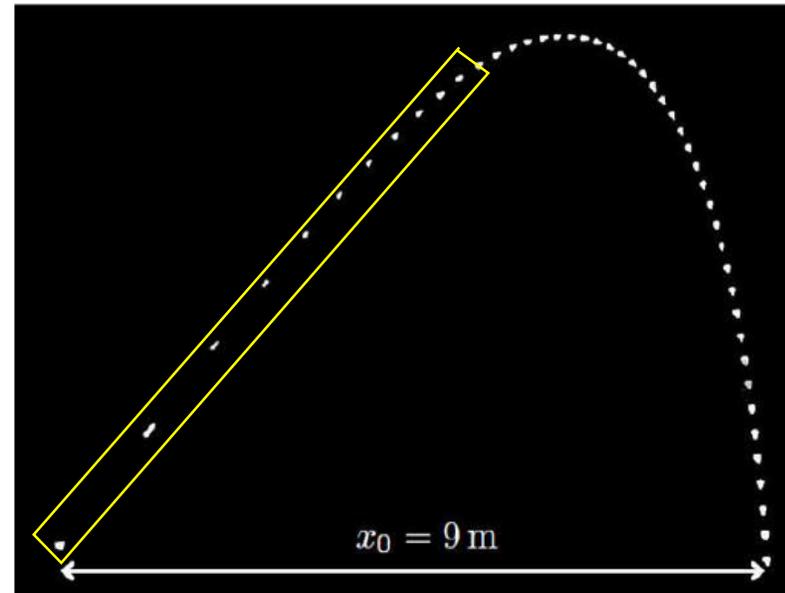
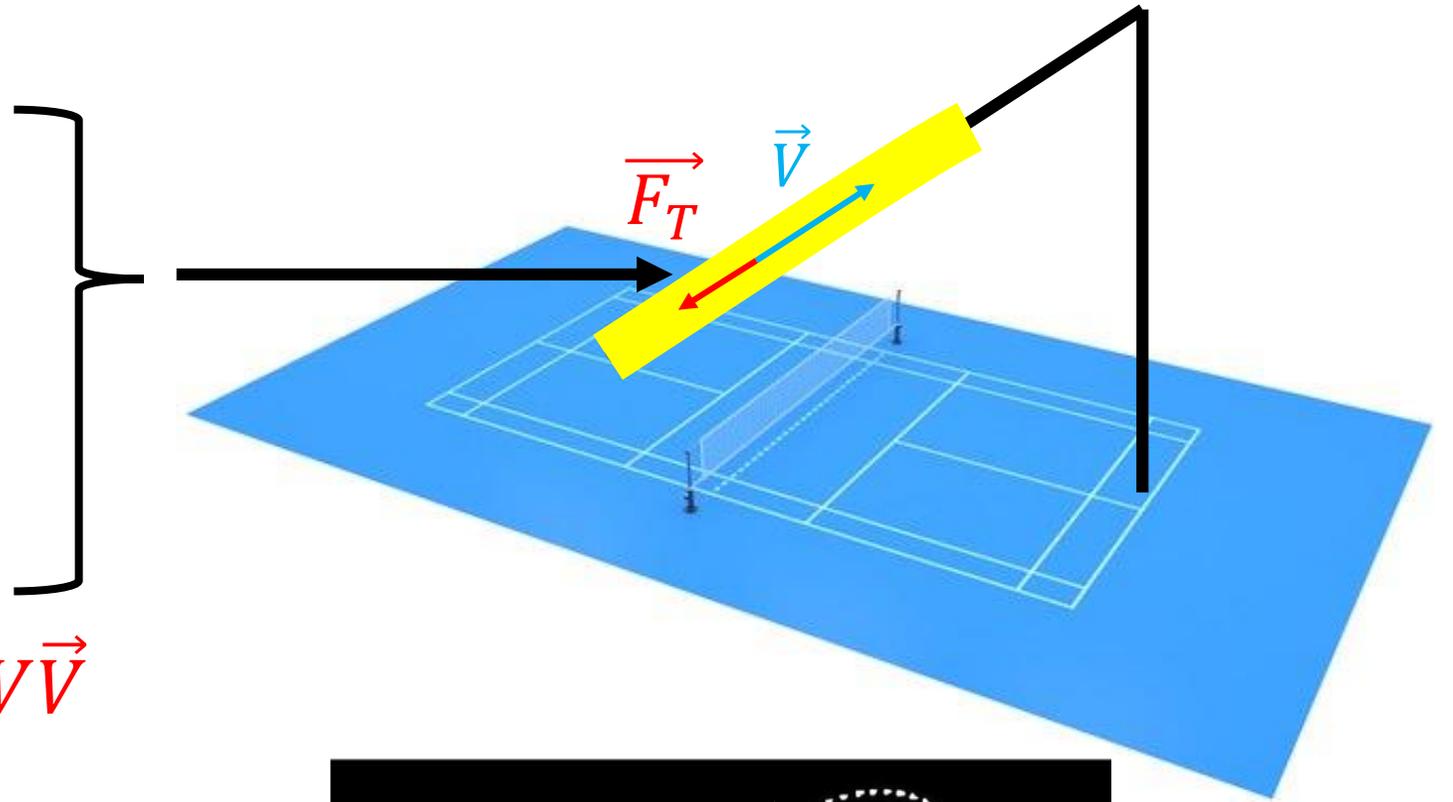
Après la frappe :

- haute Vitesse
- trainée importante
- poids négligeable

$$m \frac{d\vec{V}}{dt} = \cancel{m\vec{g}} - \frac{1}{2} \rho \pi R^2 C_T V \vec{V}$$

inertie ~~poids~~ Trainée

Régime de vitesse de frappe élevée :
trajectoire est une ligne droite,
la particule décélère



La vitesse diminue de façon exponentielle
le long de la trajectoire
avec la distance parcourue d

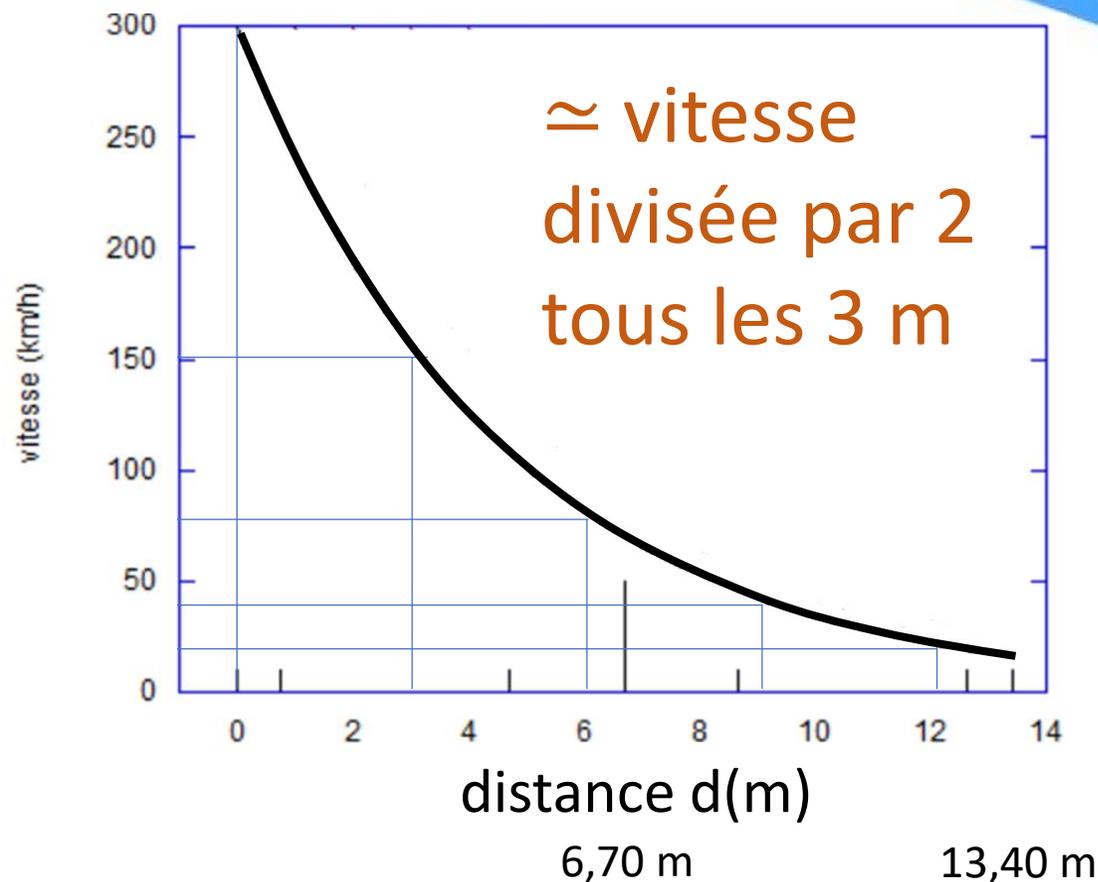
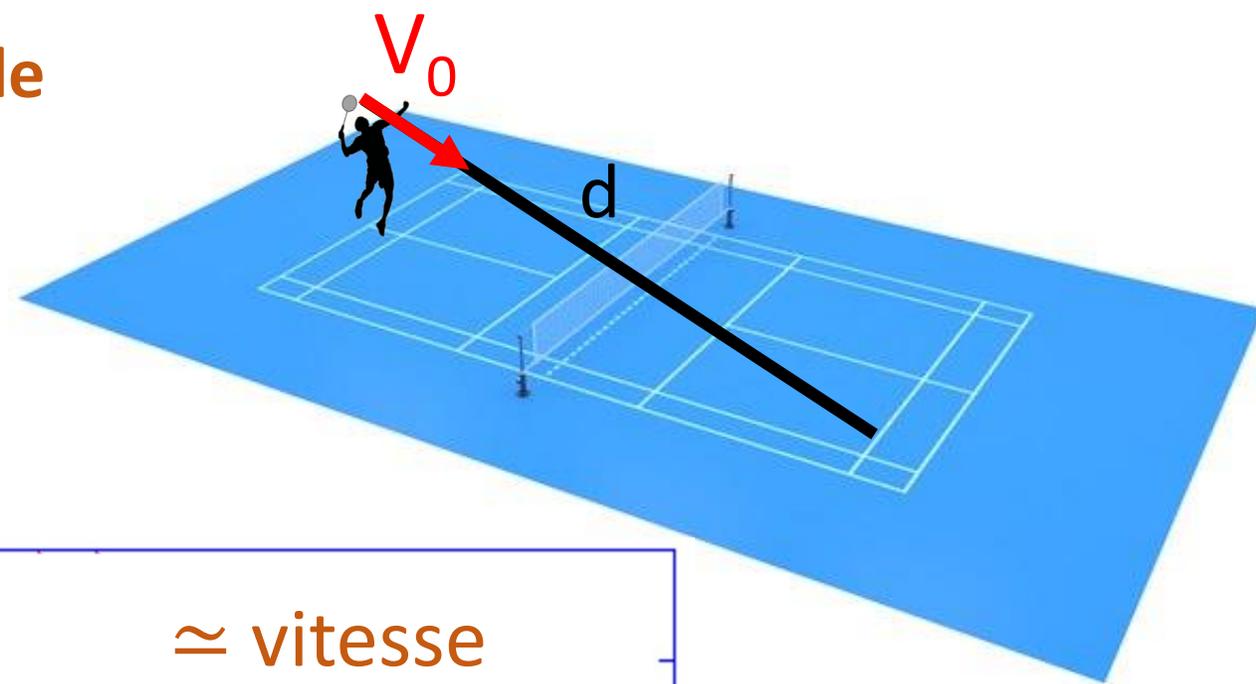
$$V(d) = V_0 \exp\left(-\frac{d}{L}\right)$$

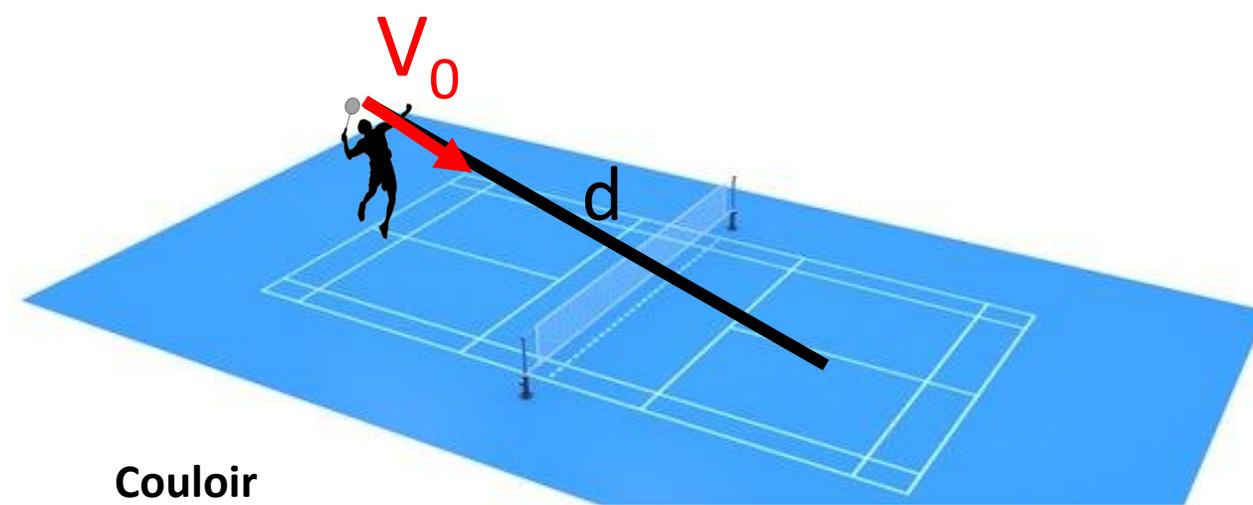
longueur caractéristique :

$$L = \frac{2m}{\rho\pi R^2 C_T}$$

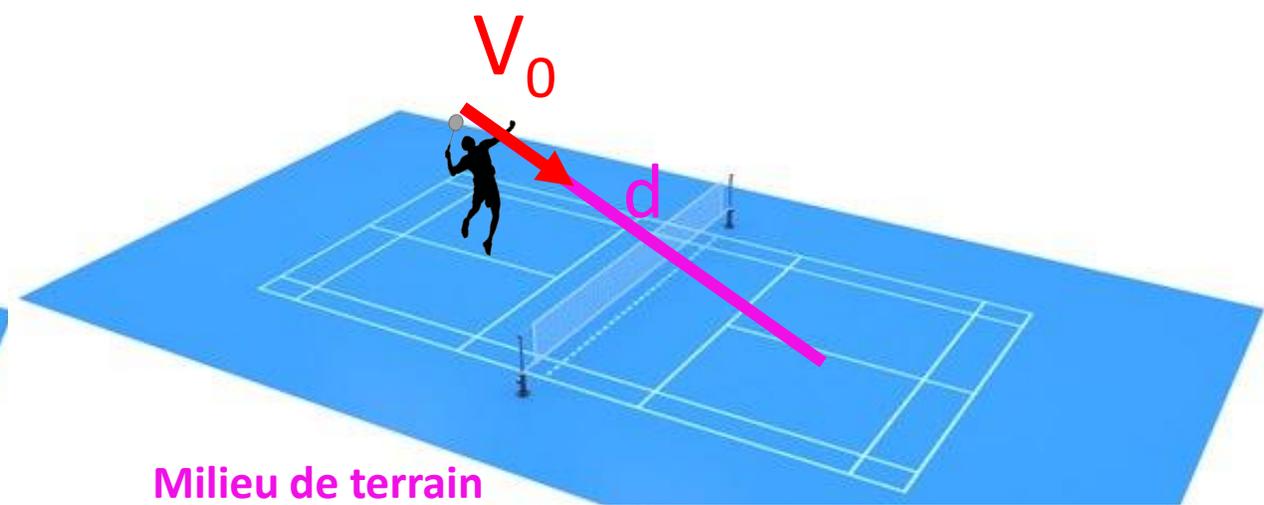
Tous les $L = 4.6 \text{ m}$

La Vitesse diminue
d'un facteur 2.7





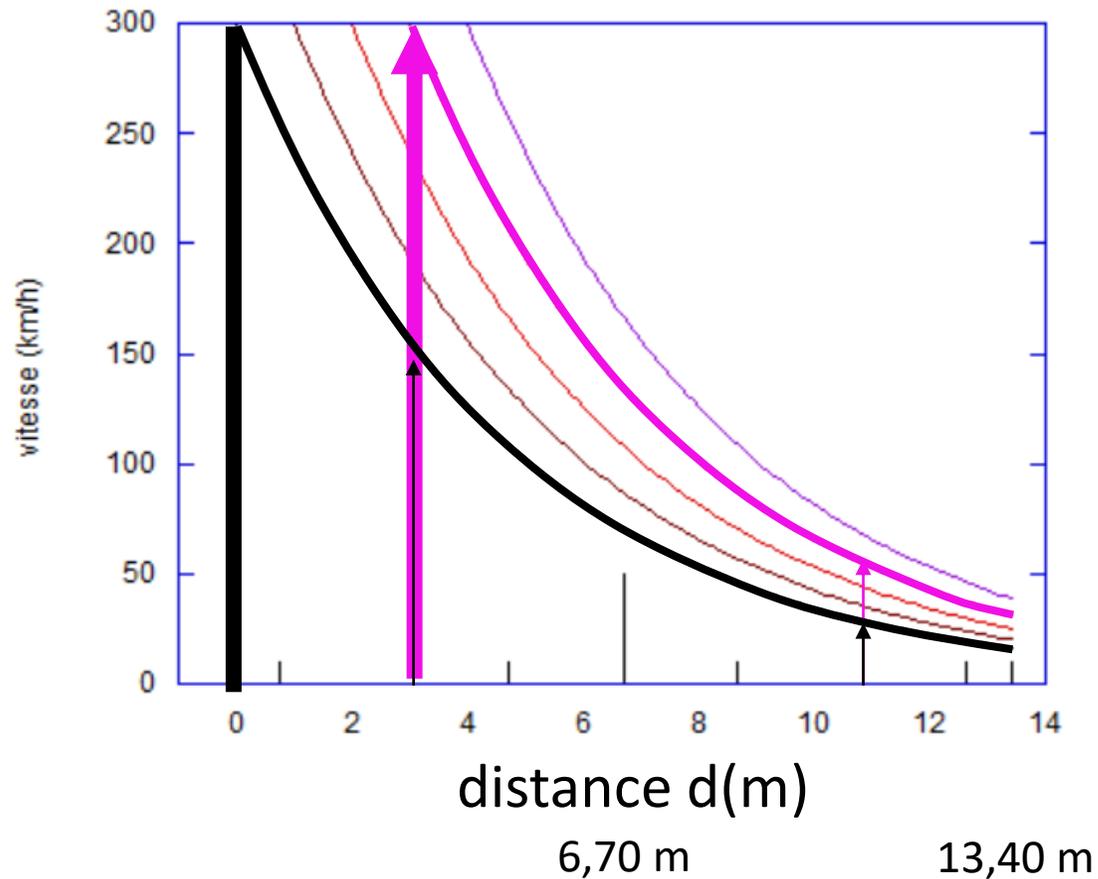
Coulair



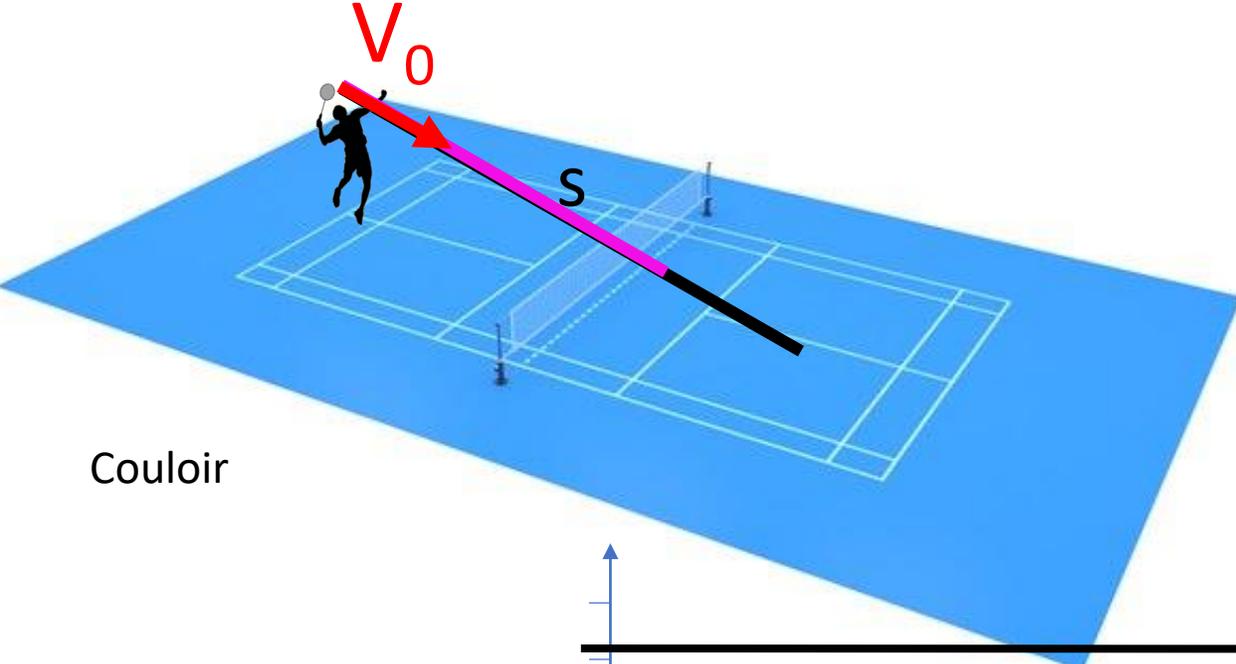
Milieu de terrain

$$V(d) = V_0 \exp\left(-\frac{d}{L}\right)$$

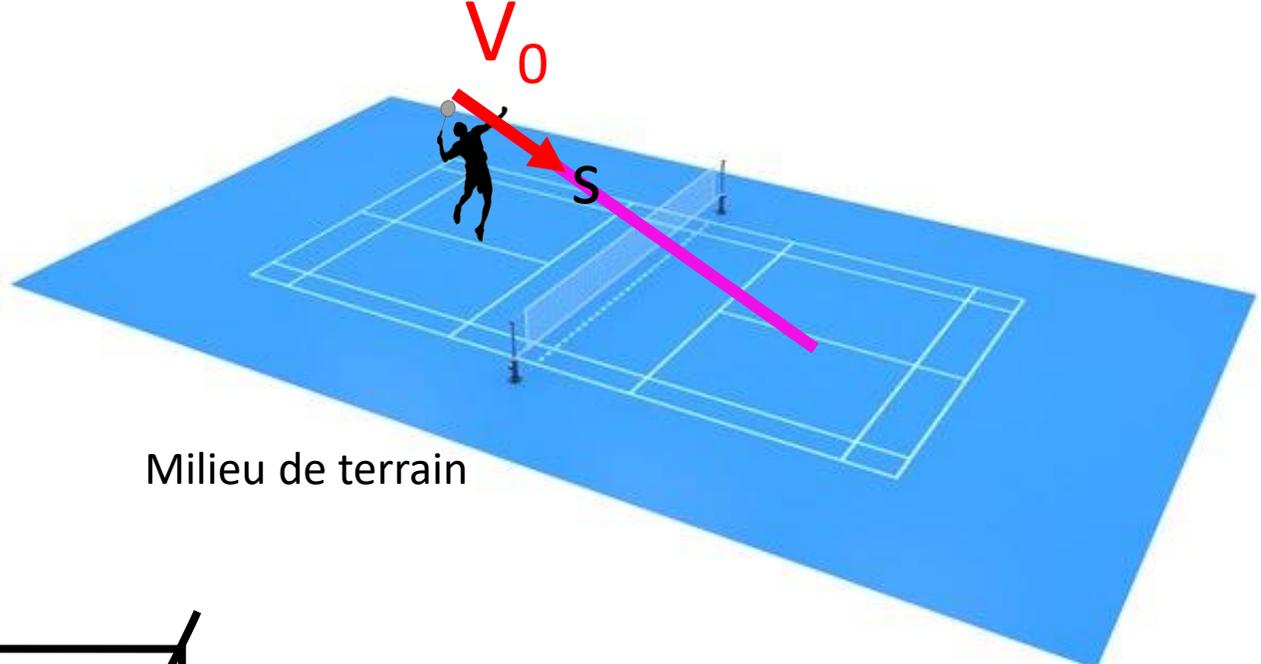
Smash du milieu de terrain
 Vitesse beaucoup plus élevée
 en moyenne sur le trajet



En approximant
 la trajectoire
 comme linéaire



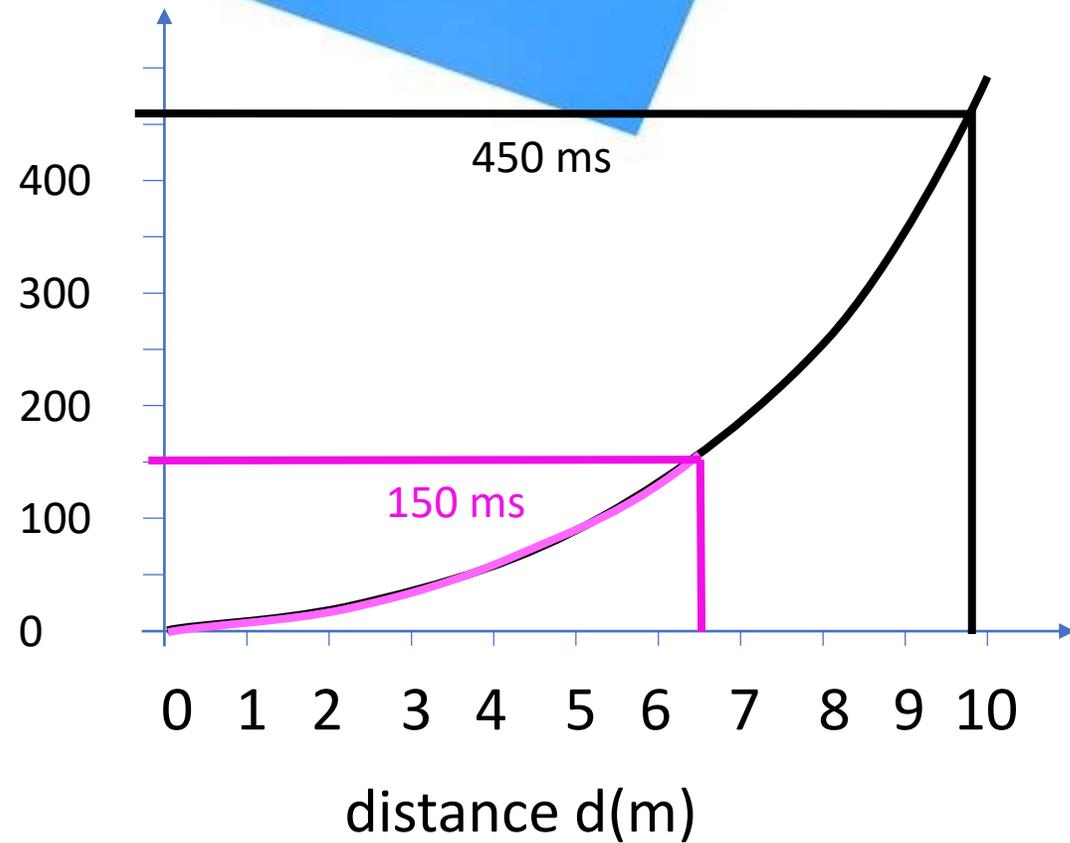
Couloir



Milieu de terrain

Exemple de trajectoire

Temps (ms)



Il faut 2 fois plus de temps pour les 3,25 derniers mètres que pour les 6,5 premiers

Smash du milieu de terrain
Temps de parcours divisé par 3!

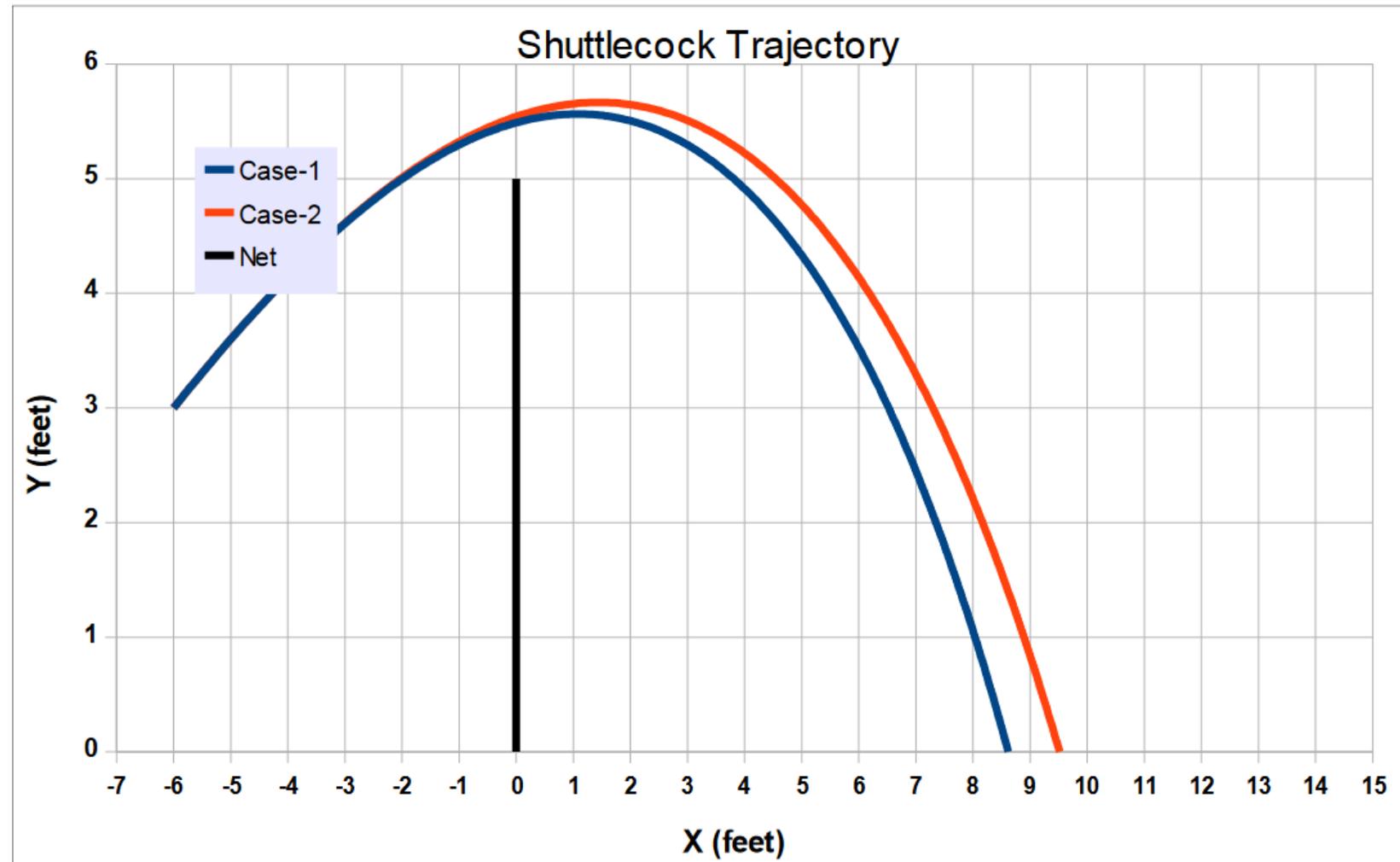
Conditions extérieures

sur la force de trainée

$$F_T = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 C_T V^2$$

La densité de l'air ρ dépend de la température, la pression (altitude), du taux d'humidité...

<u>Local conditions</u>	case 1	case 2
Temperature (C)	22.0	29.0
Rel. Humidity	20%	65%
Altitude (feet)	0	3021



Conditions extérieures

sur la force de trainée

$$F_T = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 C_T V^2$$

Indices de vitesse :

→ différents forces de trainées

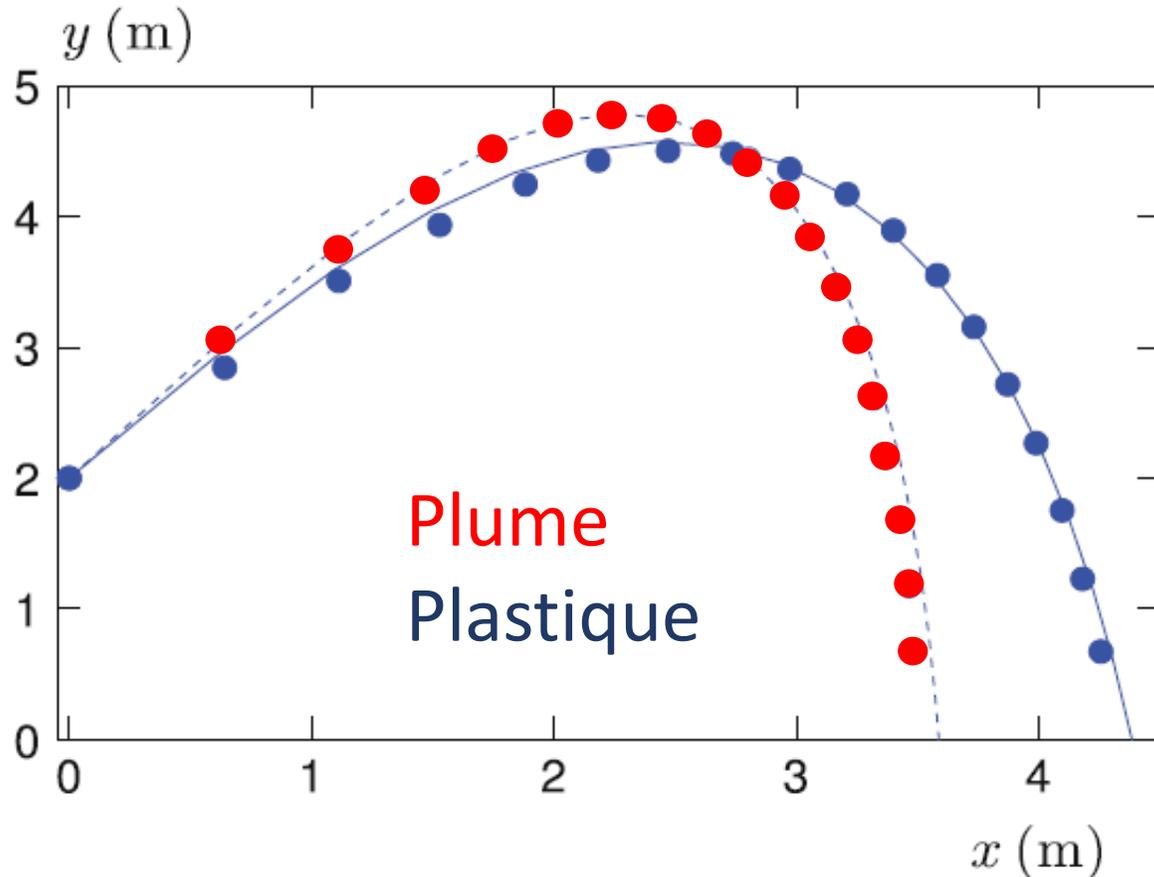
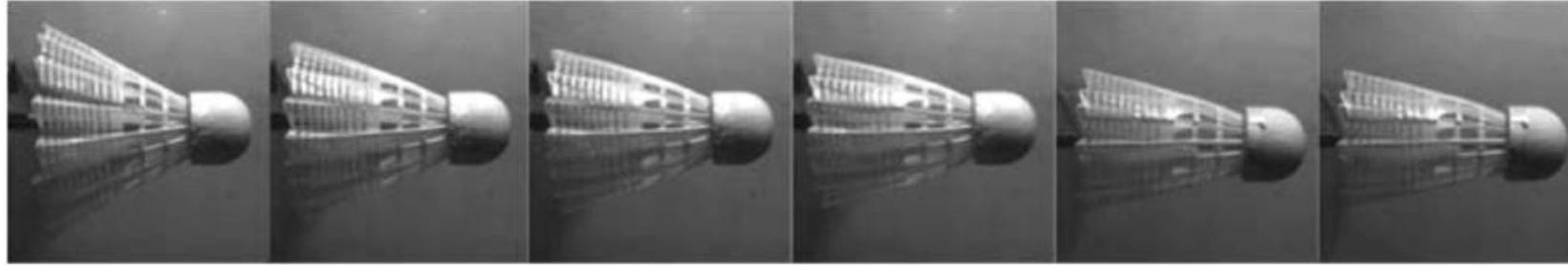
- 74 : très lent (haute altitude)
- 75 : lent (température > 33°C)
- 76 : assez lent (entre 27 – 33°C)
- **77 : moyen, niveau de la mer, 22-27°C**
- 78 : assez rapide (18- 22°C)
- 79 : rapide (température < 18°)

Volant plume vs volant plastique

$$\frac{d\mathbf{p}}{dt} = \mathbf{F}(\mathbf{r}, \mathbf{p}, t)$$



Déformation du volant plastique à haute vitesse



Le rayon R du volant diminue avec la vitesse

$$F_T = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 C_T V^2$$

ρ : densité de l'air

πR^2 : surface du volant

C_T : coefficient de trainé

V : vitesse

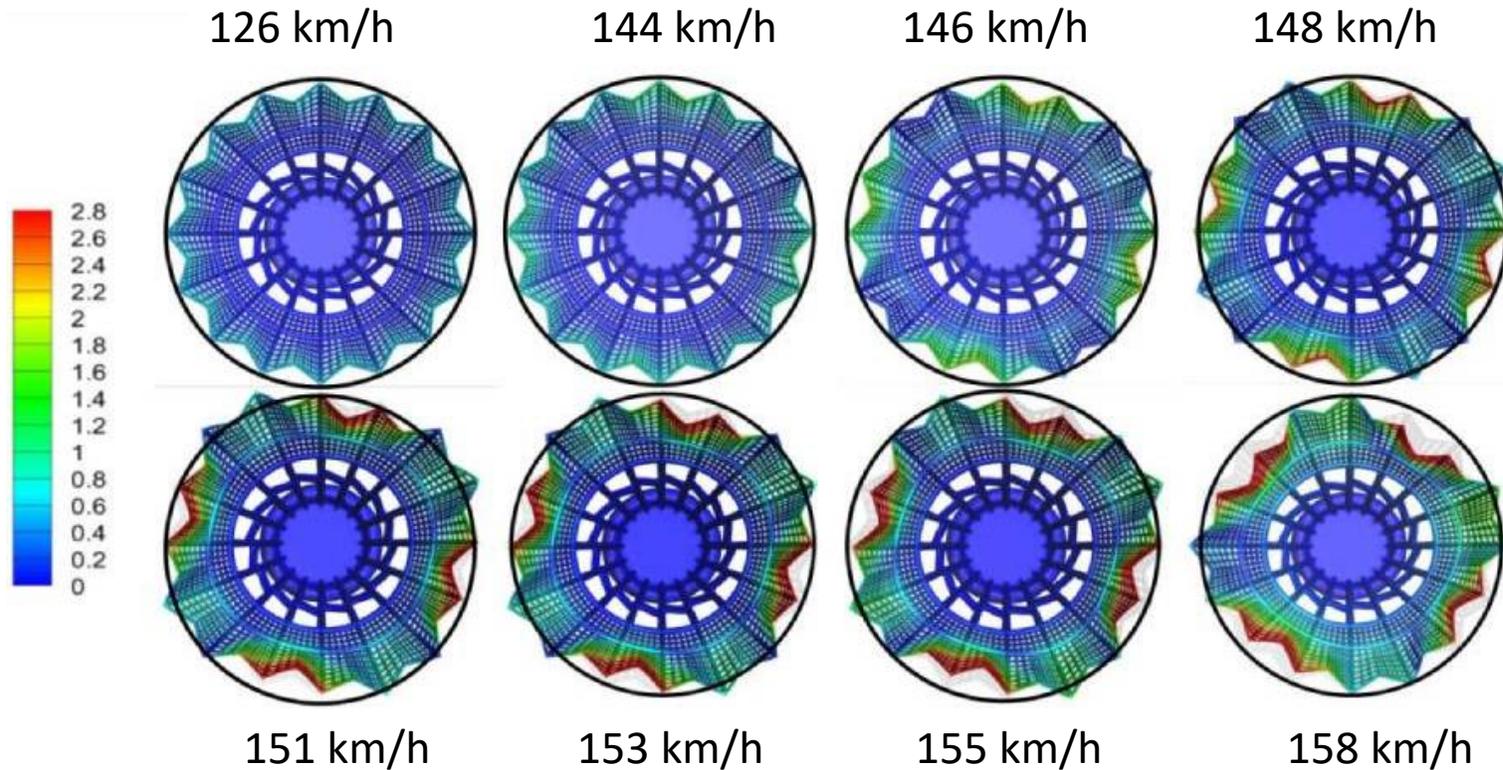
New Journal of Physics
The physics of badminton

Caroline Cohen¹, Baptiste Darbois Texier¹, David Quéré² and Christophe Clanet¹

¹ LadHyX, UMR 7646 du CNRS, Ecole Polytechnique, 91128 Palaiseau Cedex, France

² PMMH, UMR 7636 du CNRS, ESPCI, 75005 Paris, France

Volant plume vs plastique : déformation à haute vitesse



Sur une faible variation de vitesse
(144 vs 148 km/h)

la forme du volant change

Et donc

- sa force de traînée
- sa trajectoire :

→ **Contrôle du plastique difficile**

Computational analysis of the fluid–structure interactions of a synthetic badminton shuttlecock  **FREE**

Darshankumar Zala (दर्शनकुमार जाला)  ; Harish Dechiraju (हरीश देचिराजू)  ; Sanjay Mittal (संजय मित्तल)  

 Check for updates

Accélération



$$\sum \vec{F} = m\vec{a}$$



Poids

$$\vec{P} = m\vec{a} = m\vec{g}$$

masse $m = 5 \text{ grammes}$

accélération $g = 10 \text{ m/s}^2$

Accélération du volant



Accélération

Vitesse initiale $\vec{v}_i = 40 \text{ km/h} = 11 \text{ m/s}$  \vec{v}_i

Vitesse finale $\vec{v}_f = 160 \text{ km/h} = 44 \text{ m/s}$  \vec{v}_f



Accélération

Vitesse initiale $\vec{v}_i = 40 \text{ km/h} = 11 \text{ m/s}$

Vitesse finale $\vec{v}_f = 160 \text{ km/h} = 44 \text{ m/s}$

Variation de Vitesse $200 \text{ km/h} = 55 \text{ m/s}$

Durant $1.1 \text{ ms} = 0.0011 \text{ s}$

Accélération

$$a = \frac{55 \text{ m/s}}{0.0011 \text{ s}} = 50\,000 \text{ m/s}^2 \quad 5\,000 \text{ g}$$



Accélérations

$$\vec{v}_i = 40 \text{ km/h}$$

$$\vec{v}_f = 160 \text{ km/h}$$

Accélération $a = 5000\text{ g}$
équivalent à
un poids de 25 kg!





0

t (ms)

1.08

2.16

3.24

4.32

État
initial



Sous
charge



Après
charge



5 gr de plumes

25 kg dans la raquette





my FFbAD
www.myffbad.fr

QUANSPORT

Bat

FFB
Fédération Française de Badminton

ASI

GENE

Gerflor

FERAD

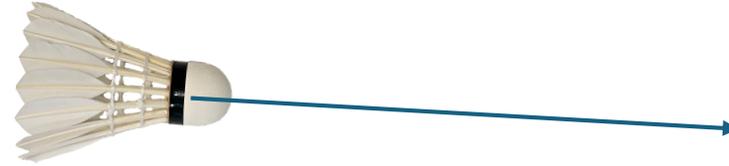
Gerflor

Le retournement du volant

$$\frac{d}{dt} \left(E_{\text{pot}} + \frac{1}{2} m v^2 \right) = 0$$



Société Française
de Physique



Université
de Rennes





New Journal of Physics

The physics of badminton

Caroline Cohen¹, Baptiste Darbois Texier¹, David Quéré² and Christophe Clanet¹

¹ LadHyX, UMR 7646 du CNRS, Ecole Polytechnique, 91128 Palaiseau Cedex, France

² PMMH, UMR 7636 du CNRS, ESPCI, 75005 Paris, France

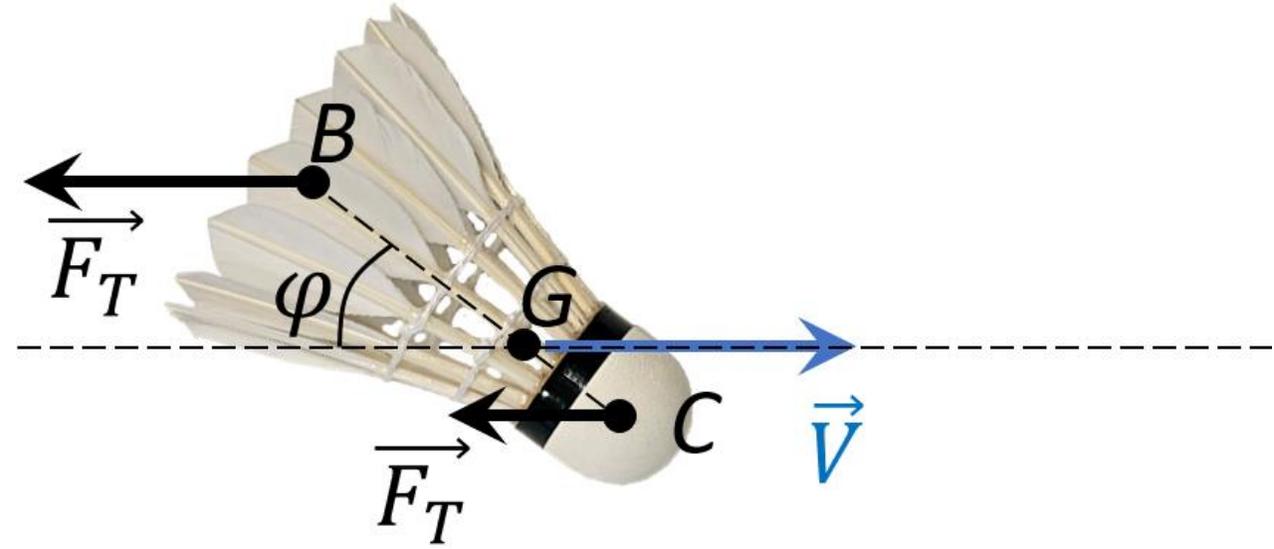
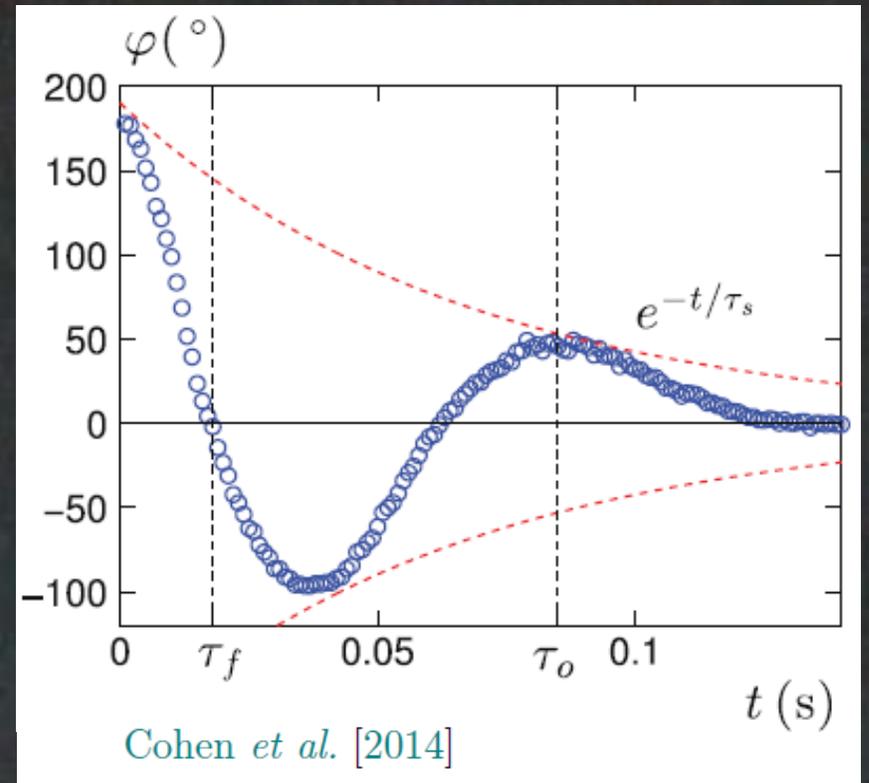


Figure 3. Chronophotographies of shuttlecocks after an impact with a racket, showing the time evolution of the angle φ between the shuttlecock orientation and its velocity U . White lines indicate 50 cm. The time interval between each position is 6.5 ms, the shuttlecock initial velocity is $U_0 \approx 10.4 \text{ m s}^{-1}$ and its initial angular velocity is $\dot{\varphi}_0 = 28 \text{ rad s}^{-1}$.

Temps de
stabilisation

$$\tau \propto \frac{1}{V}$$





 **YONEX**

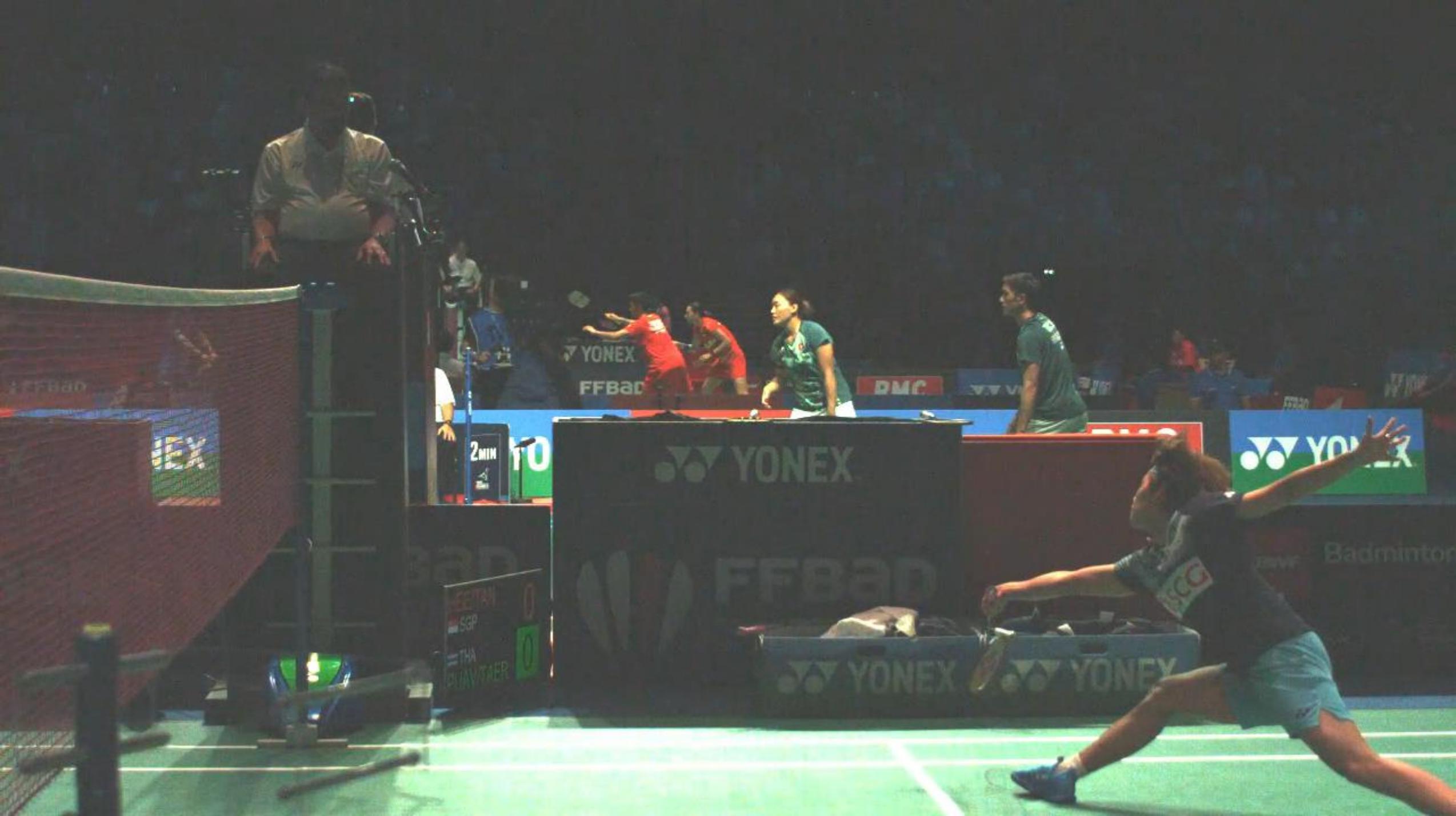
 **BWF**
BADMINTON WORLD FEDERATION

 **FFBaD**
FEDERASI BOLA BATAK INDONESIA

 **YONEX**

 **YONEX**

 **HSC**



Referee

FFBAD
YONEX

DMC

YONEX

2 MIN

HEETAN 0
SGP 0
THA 0
PUNYTAER 0

YONEX

FFBAD

YONEX

YONEX

Badminton

Force centrifuge



Déformation du volant avec la force centrifuge

0 rps

83 rps

125 rps

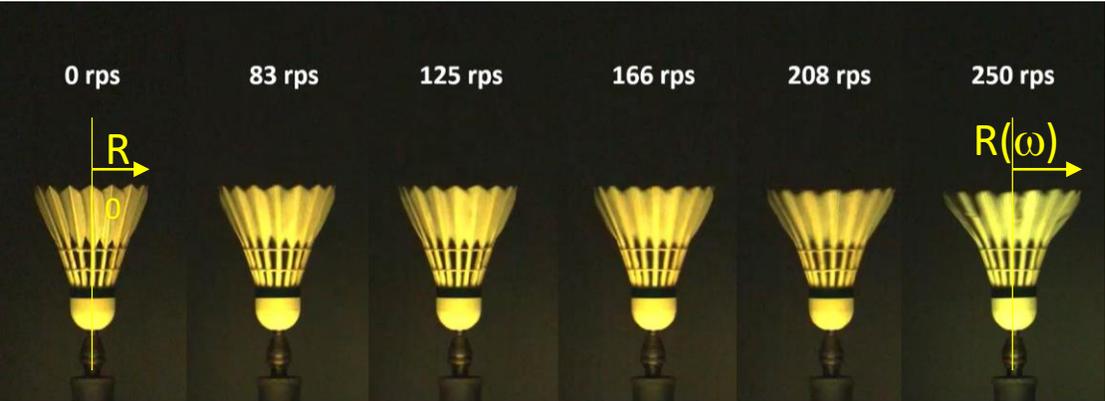
166 rps

208 rps

250 rps



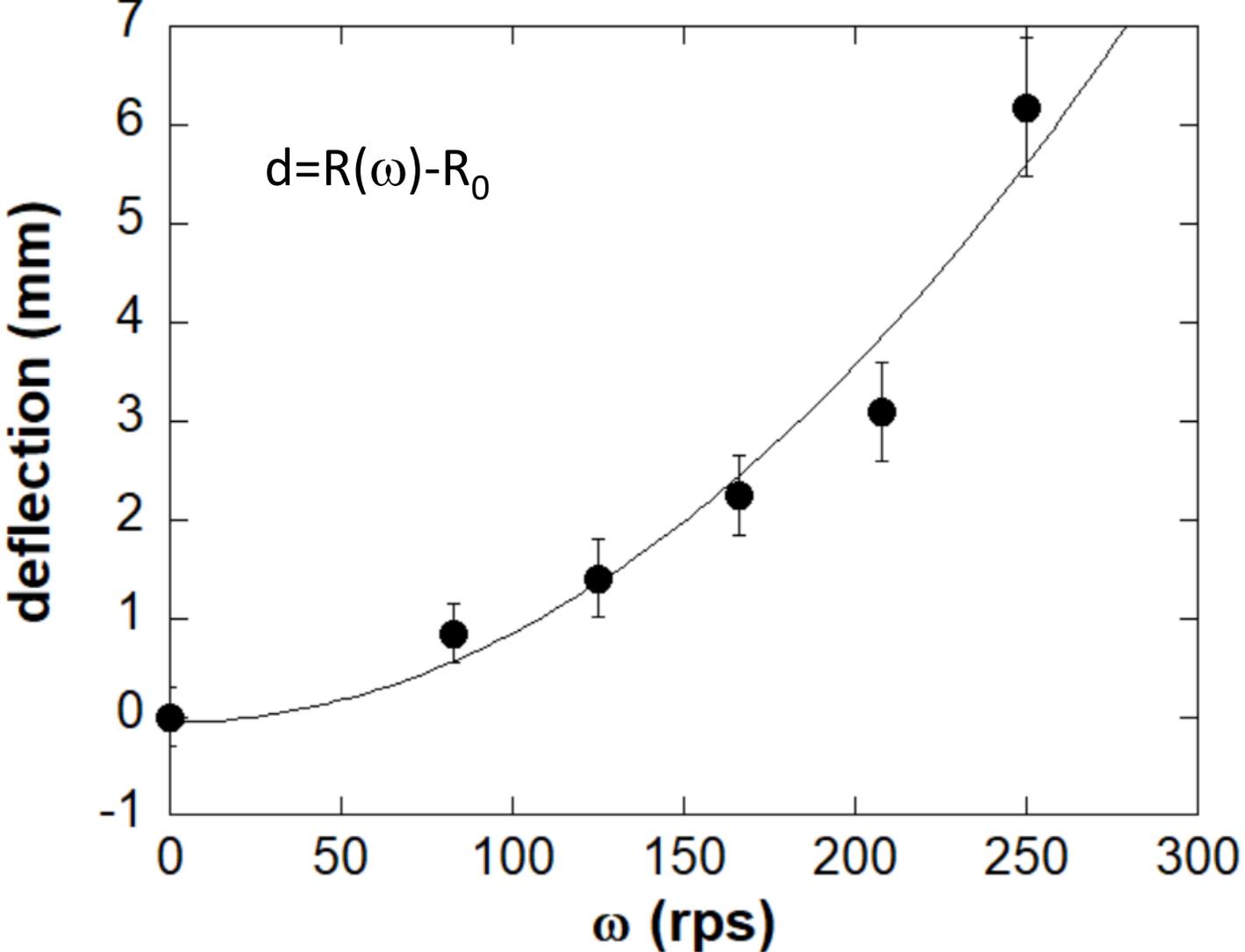
Déformation du volant avec la force centrifuge



$a_c = R\omega^2$,
 $\omega = 785 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$
(125 rps)

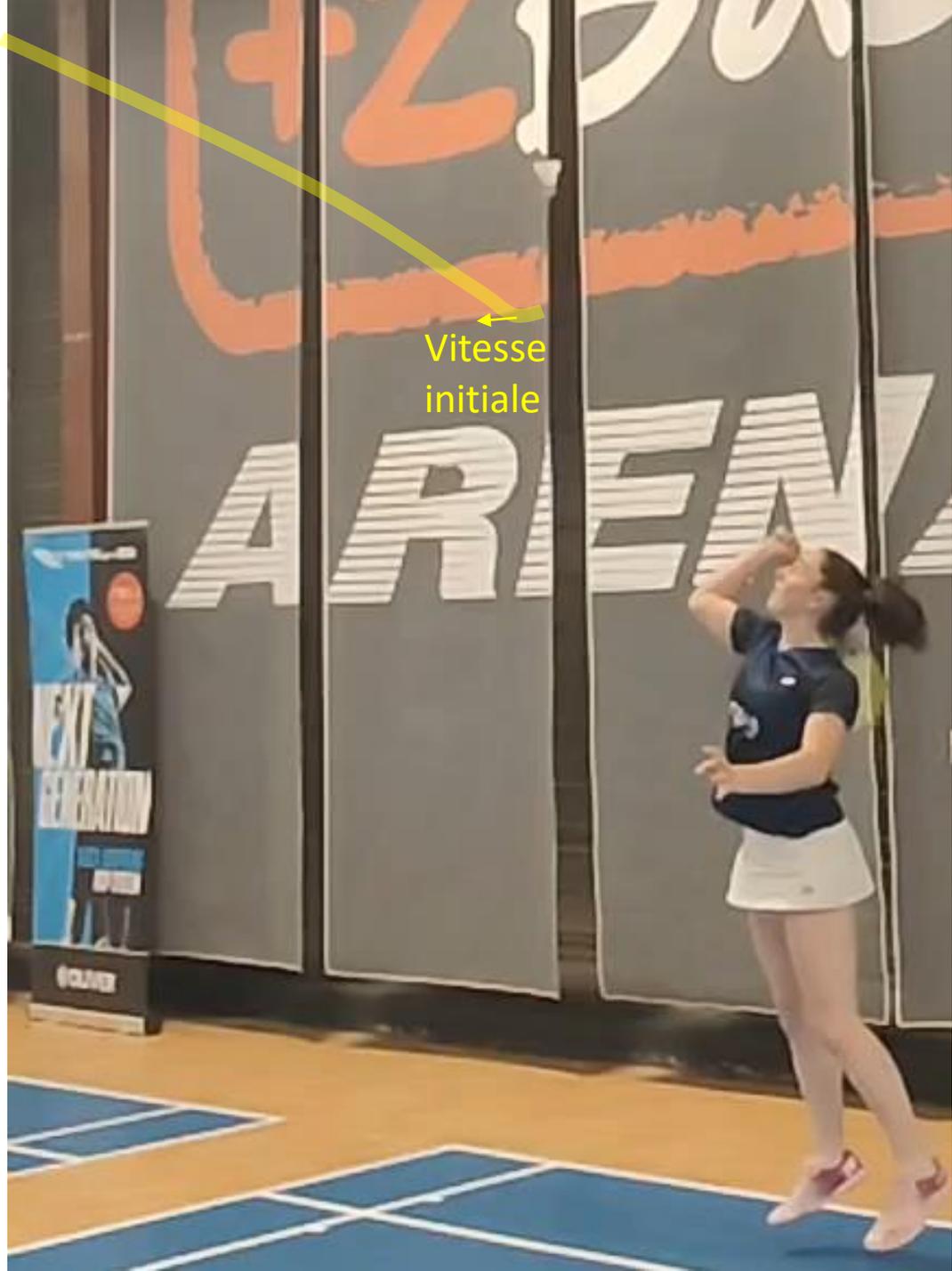
$R = 0.0335$

Acceleration
 $a_c = 2000 \text{ g} !$



L'effet Magnus

*Lève le volant
après un slice*



L'effet Magnus dans le sport

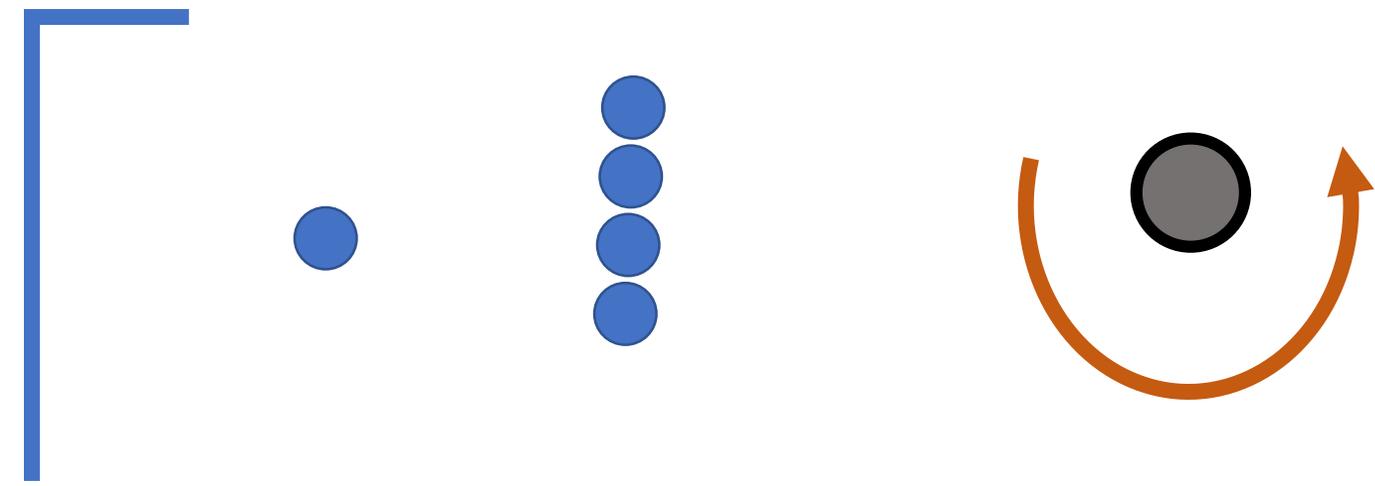
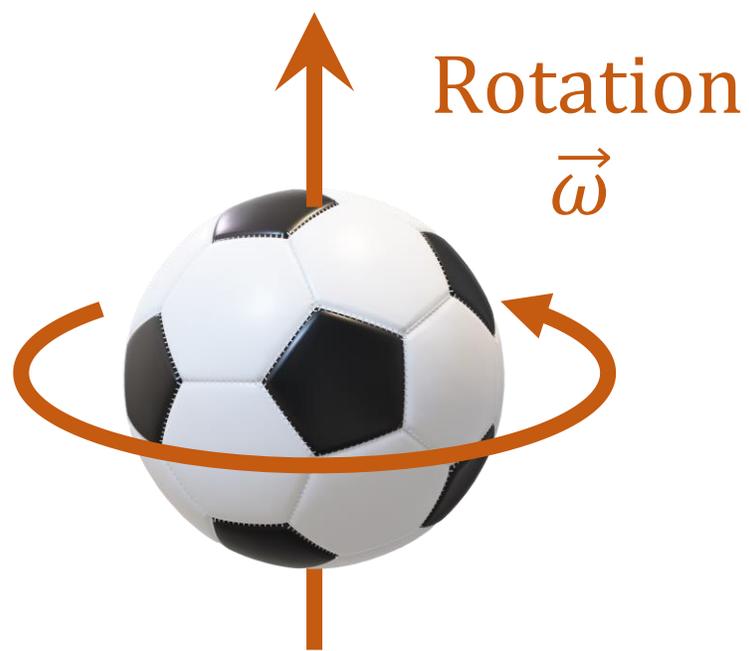


Coup franc
de
Roberto
Carlos

(1997)

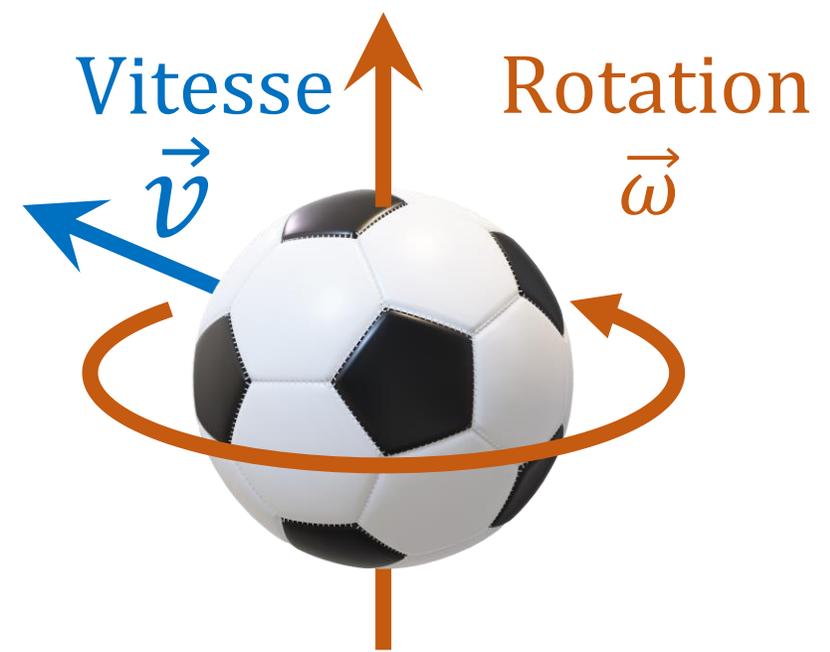
L'effet Magnus:

Une balle en rotation ($\vec{\omega}$)

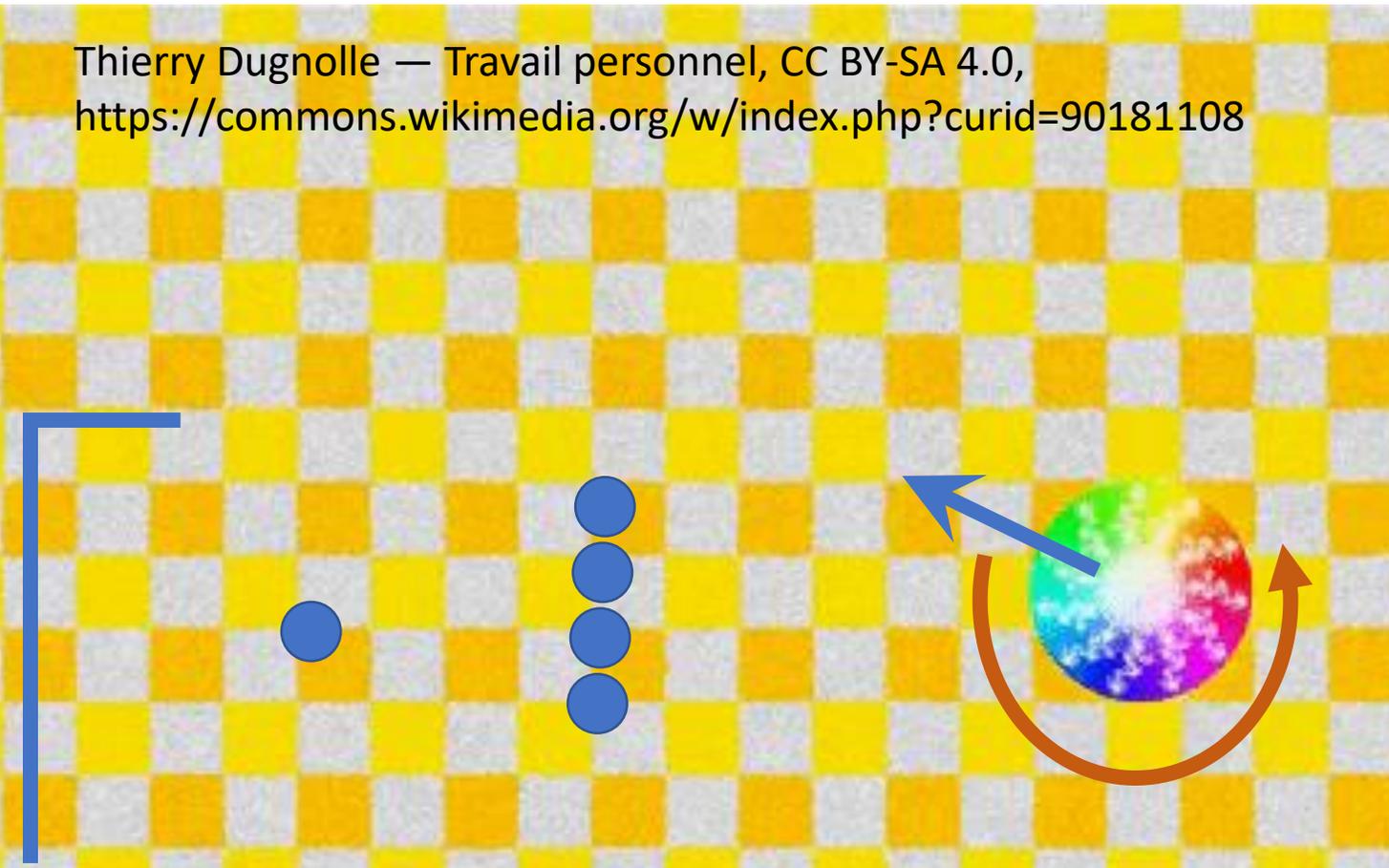


The Magnus effect:

Une balle en rotation ($\vec{\omega}$) à une vitesse (\vec{v}) dans l'air

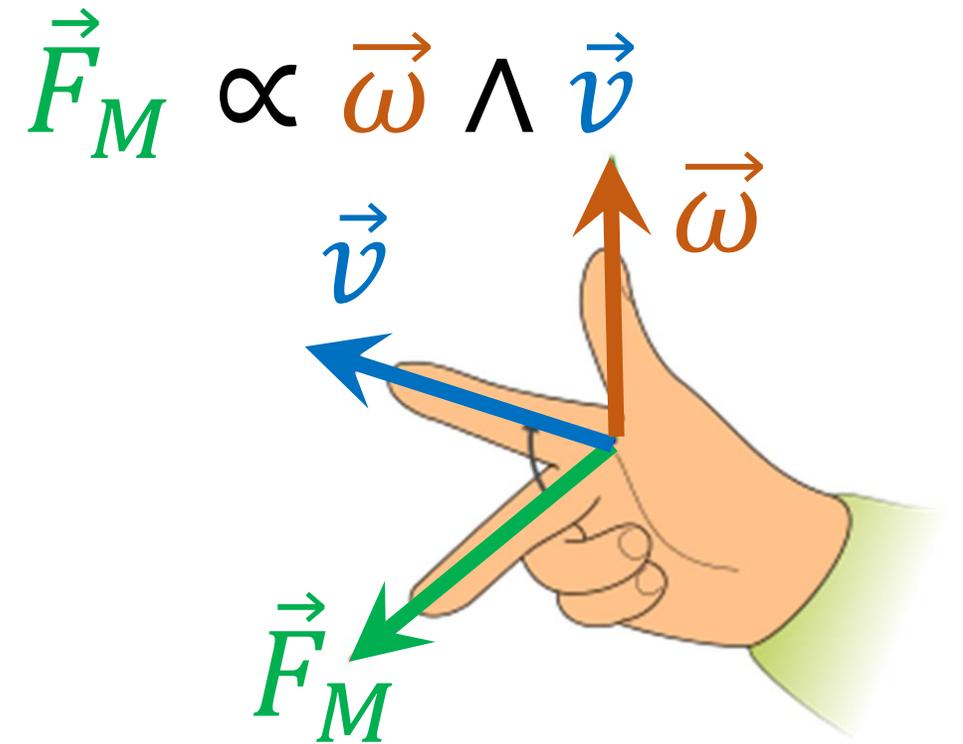
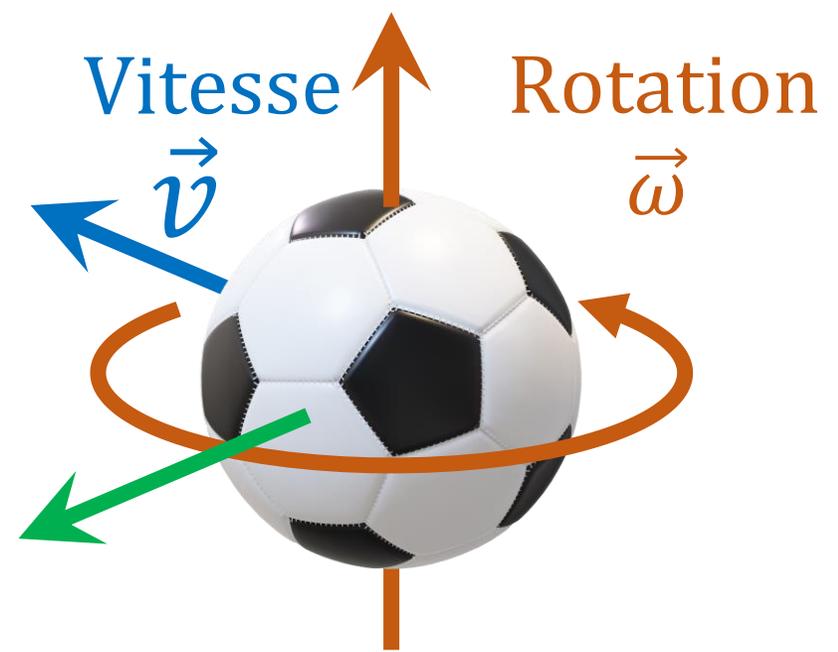


Thierry Dugnolle — Travail personnel, CC BY-SA 4.0,
<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=90181108>



The Magnus effect:

Une balle en rotation ($\vec{\omega}$) à une vitesse (\vec{v}) dans l'air subit une force de Magnus (\vec{F}_M)

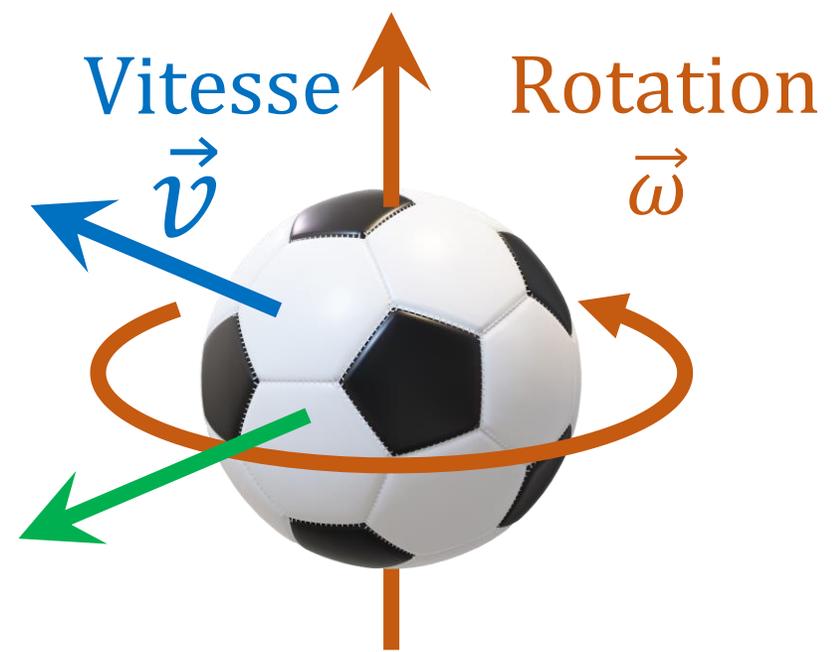


Thierry Dugnolle — Travail personnel, CC BY-SA 4.0,
<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=90181108>

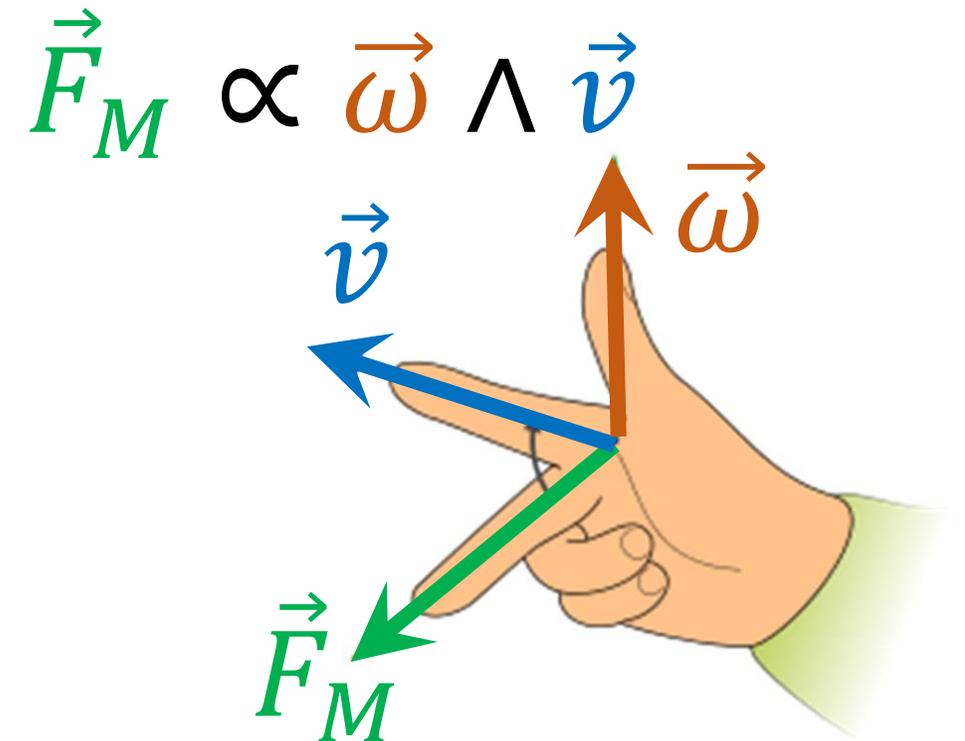
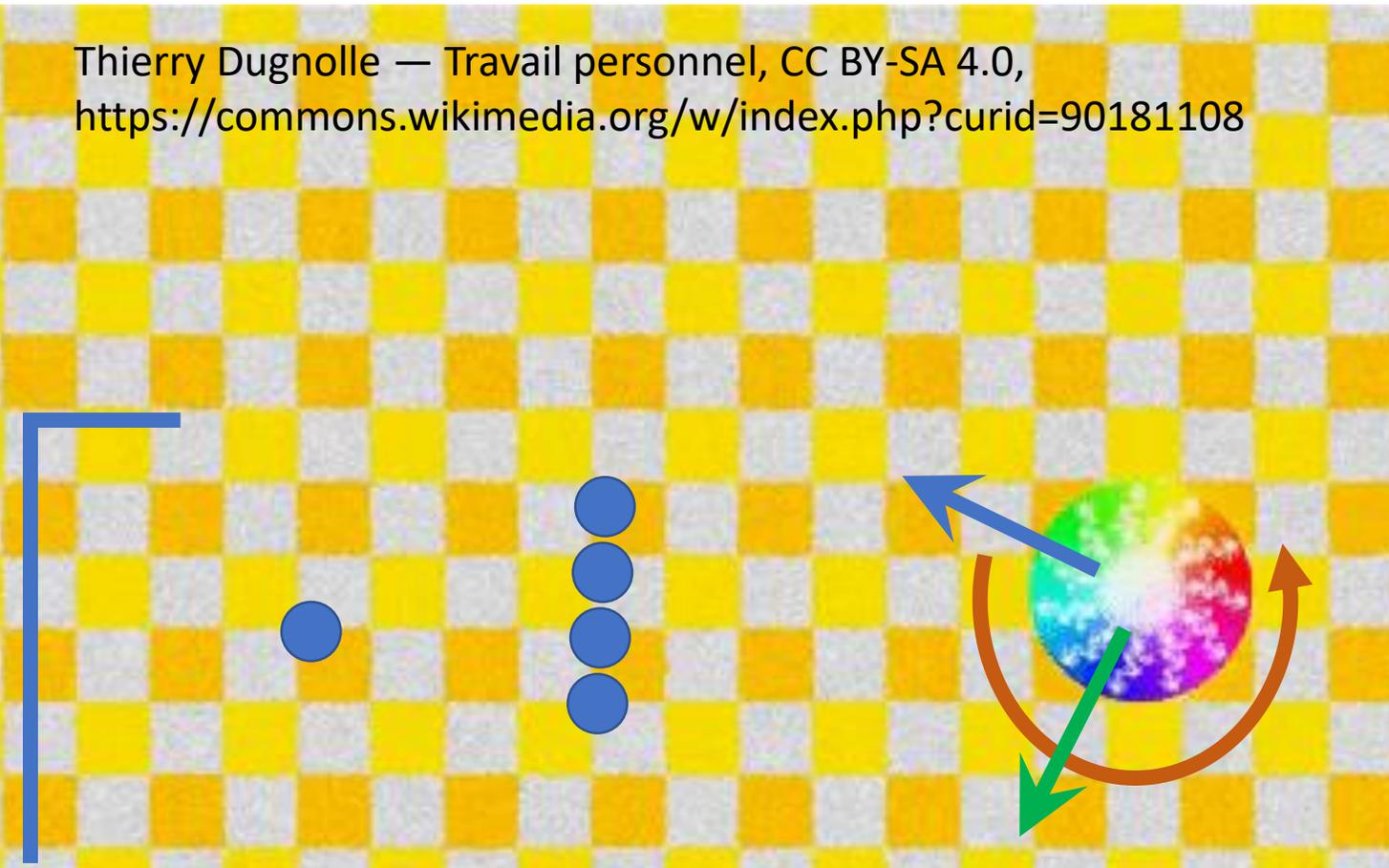


The Magnus effect:

Une balle en rotation ($\vec{\omega}$) à une vitesse (\vec{v}) dans l'air subit une force de Magnus (\vec{F}_M)



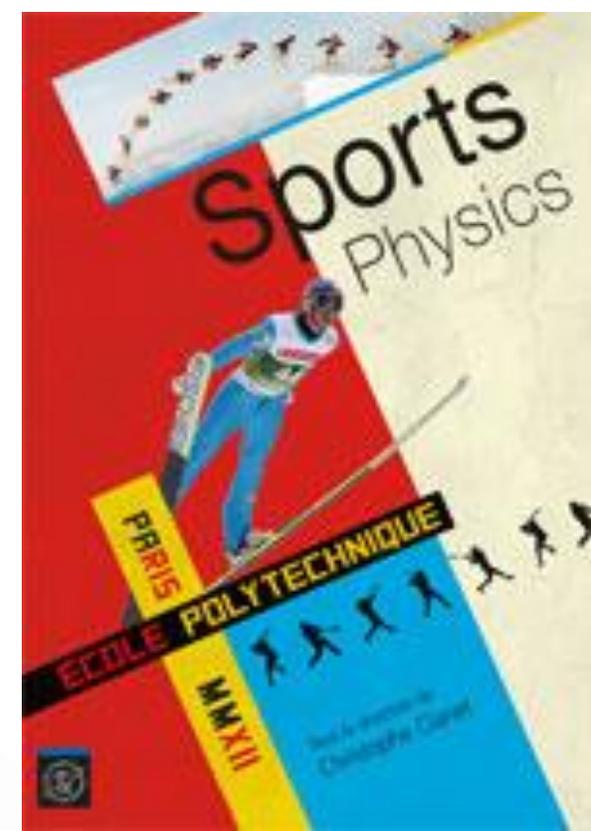
Thierry Dugnolle — Travail personnel, CC BY-SA 4.0,
<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=90181108>



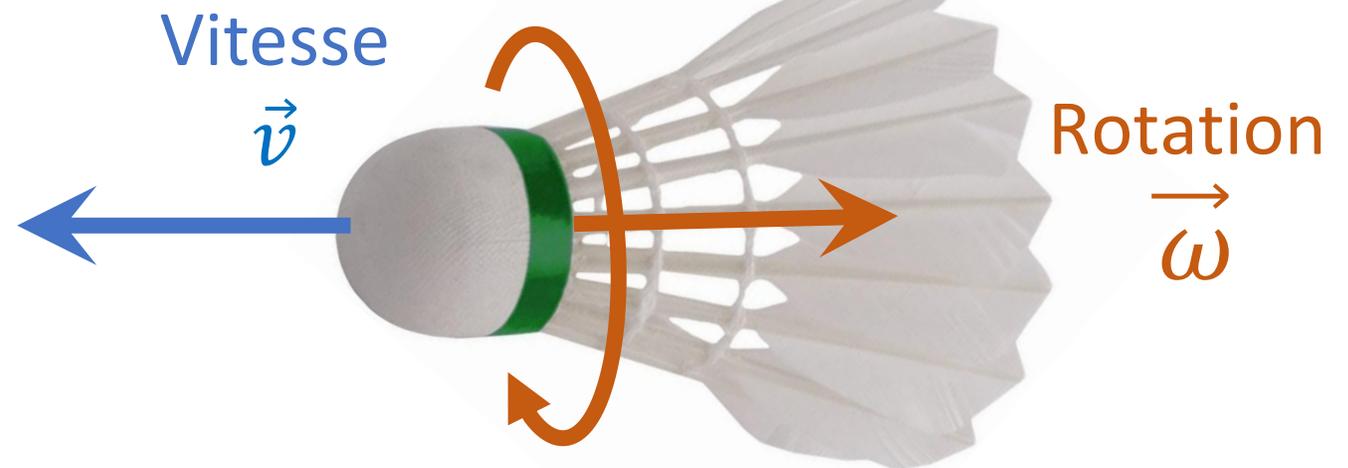
L'effet Magnus dans la littérature:

"présent au golf, au ping-pong, au baseball, au football ou encore au tennis.

En revanche il n'existe pas au badminton
car le volant s'aligne dans la direction de la vitesse"



$$\vec{F}_M \propto \vec{\omega} \wedge \vec{V} = \vec{0}$$



***Effet Magnus
au badminton***

c'est

+2

B

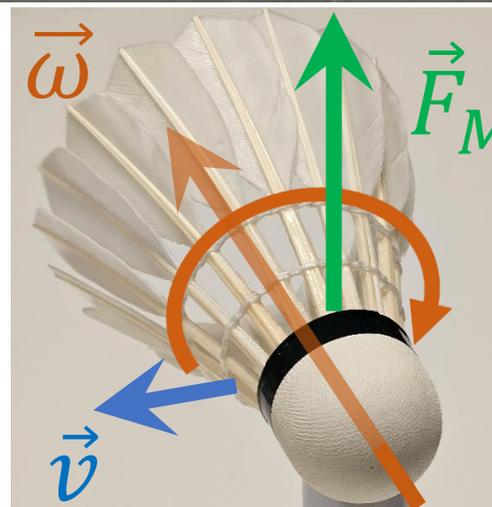
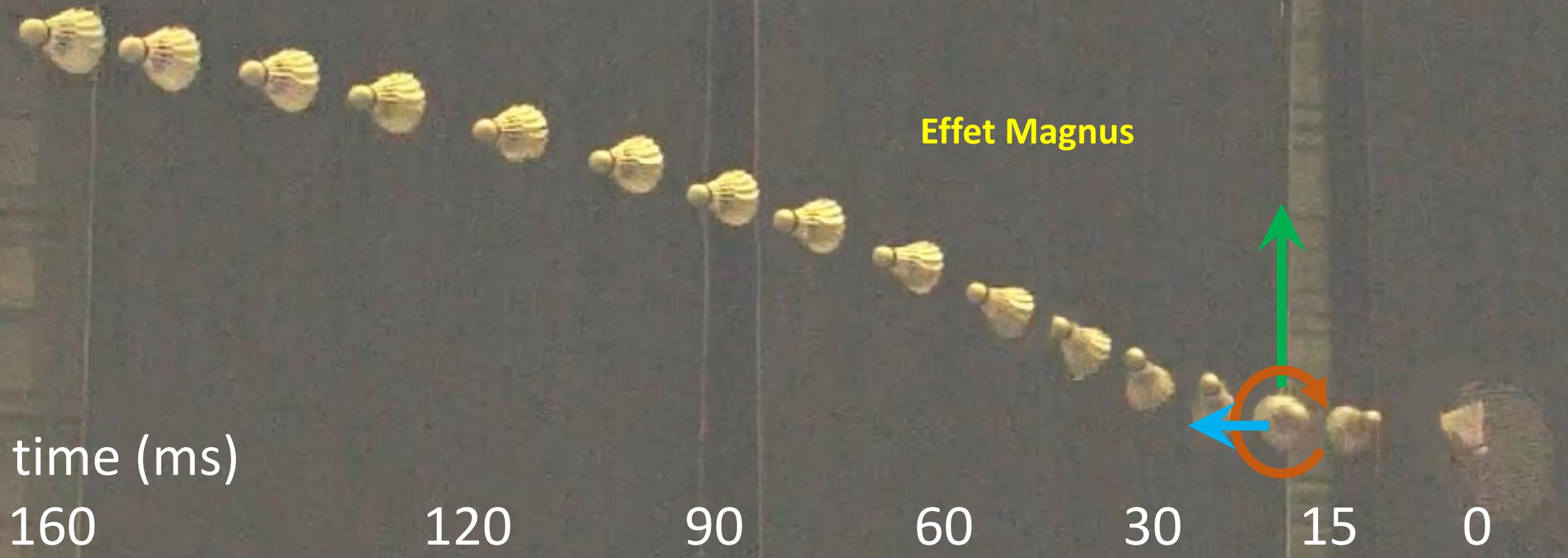
A person is visible in the bottom right corner of the image, holding a badminton racket and looking upwards. The background is a dark, textured wall with vertical lines, possibly a court wall.

c'est

+2

B

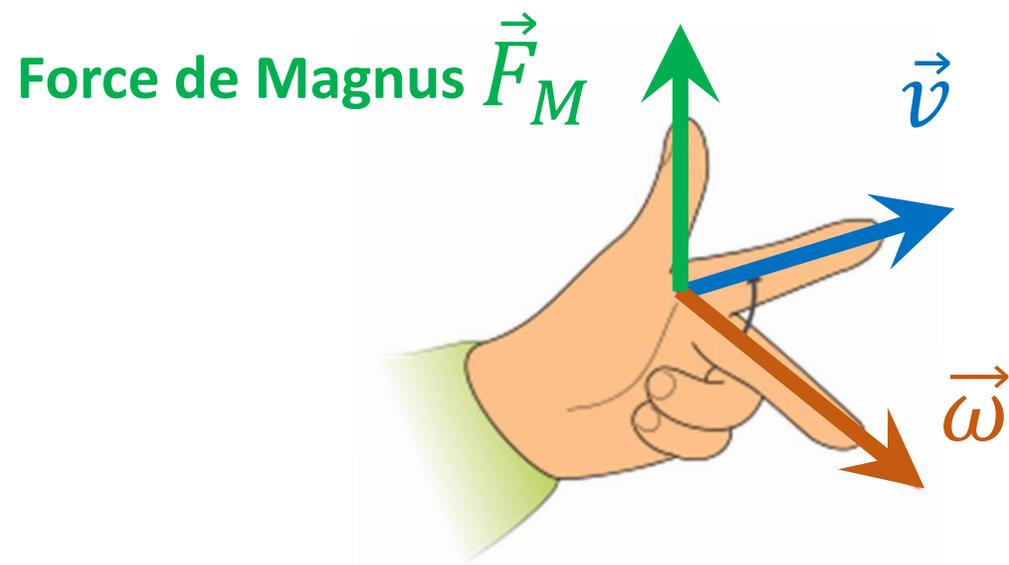
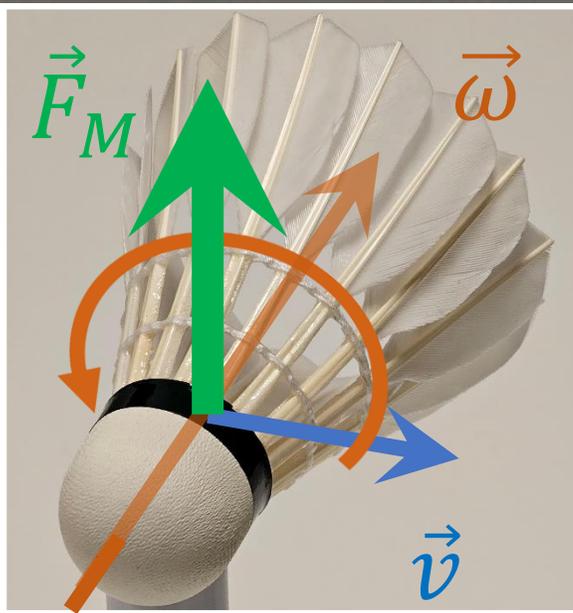
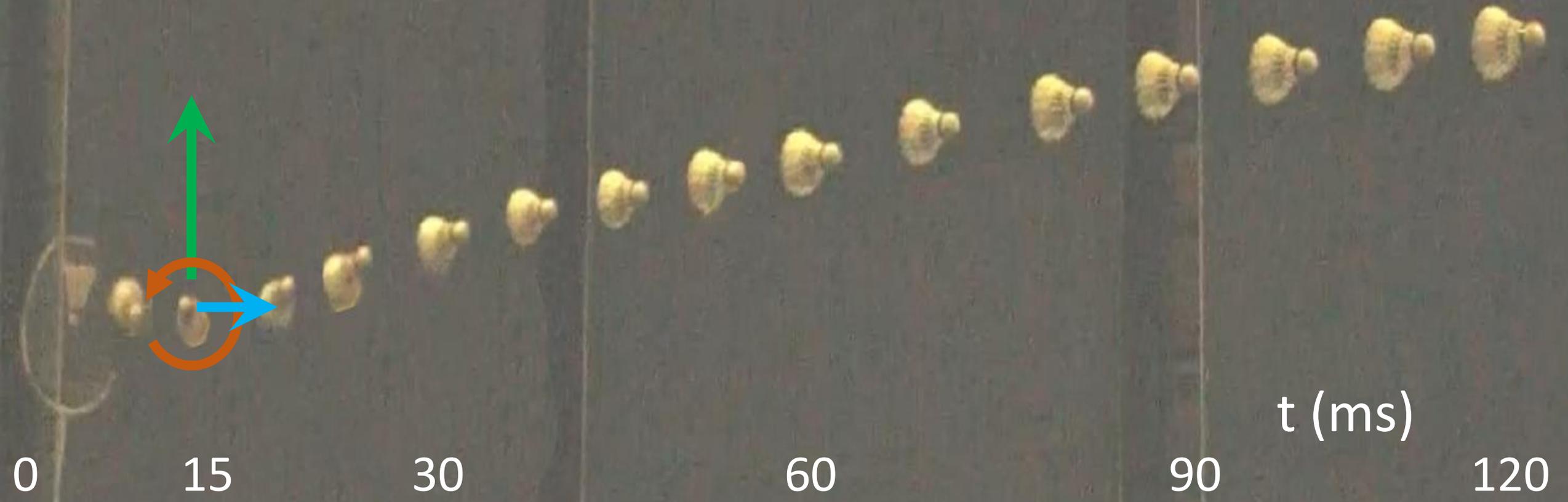


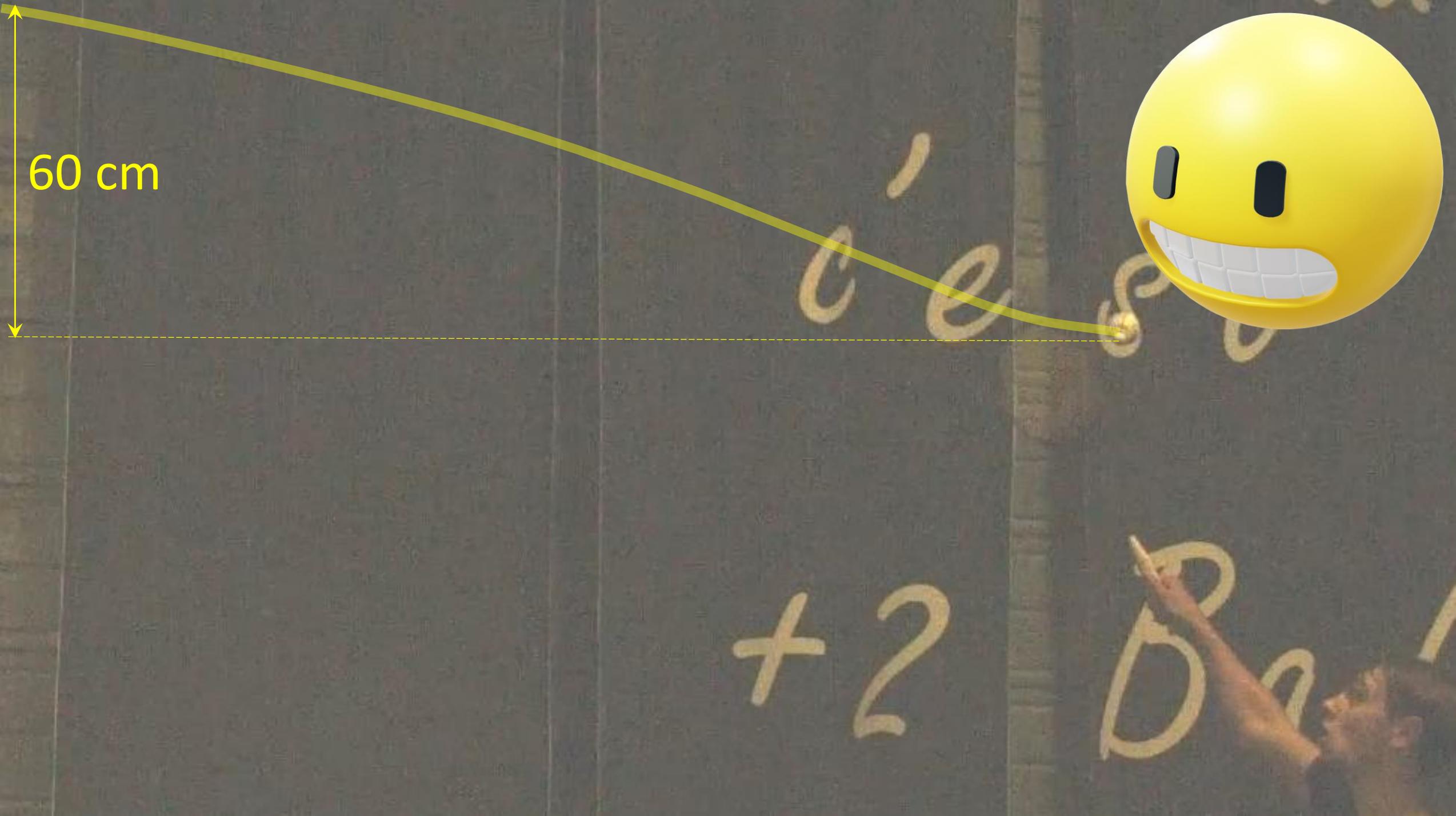


les perdants

se plaignent.

Si le volant lève pour les droitiers
Qu'en est-il pour les gauchers comme
Faustine Noël ?





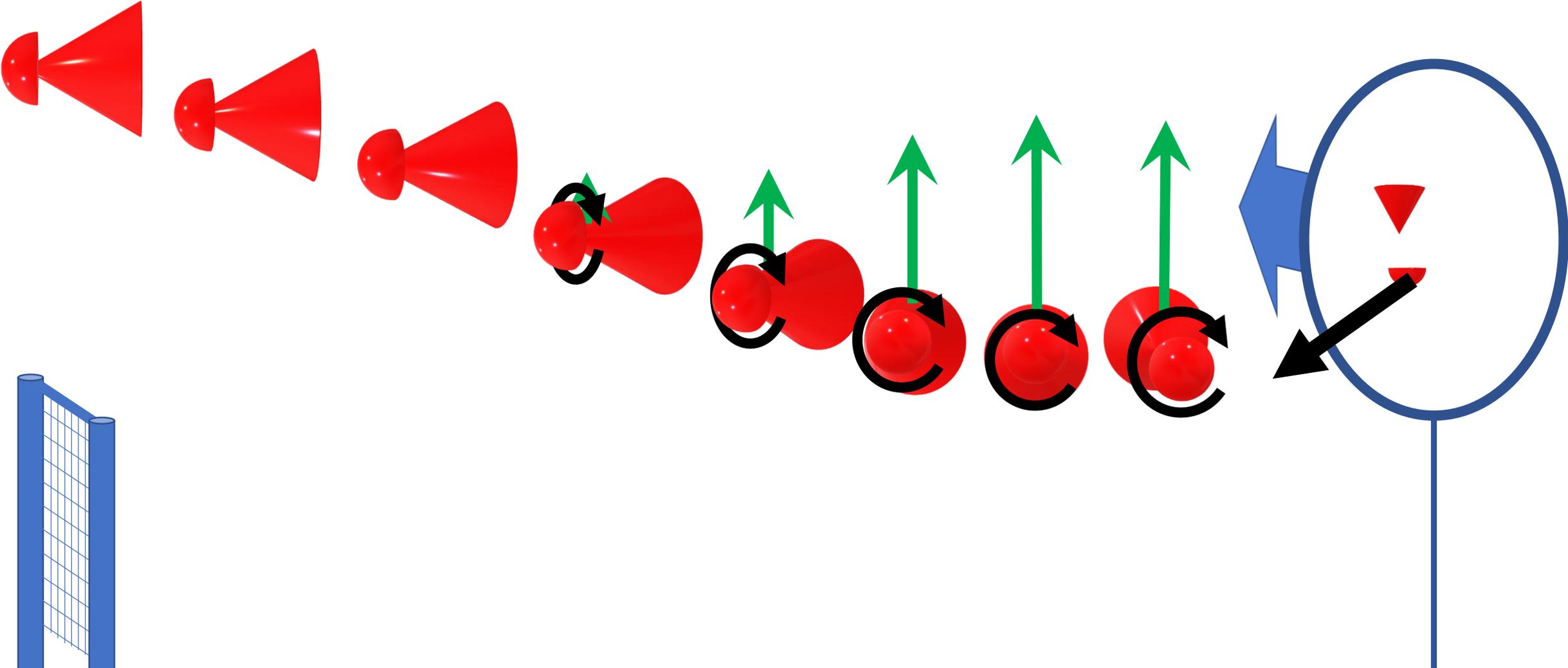
60 cm

c'e

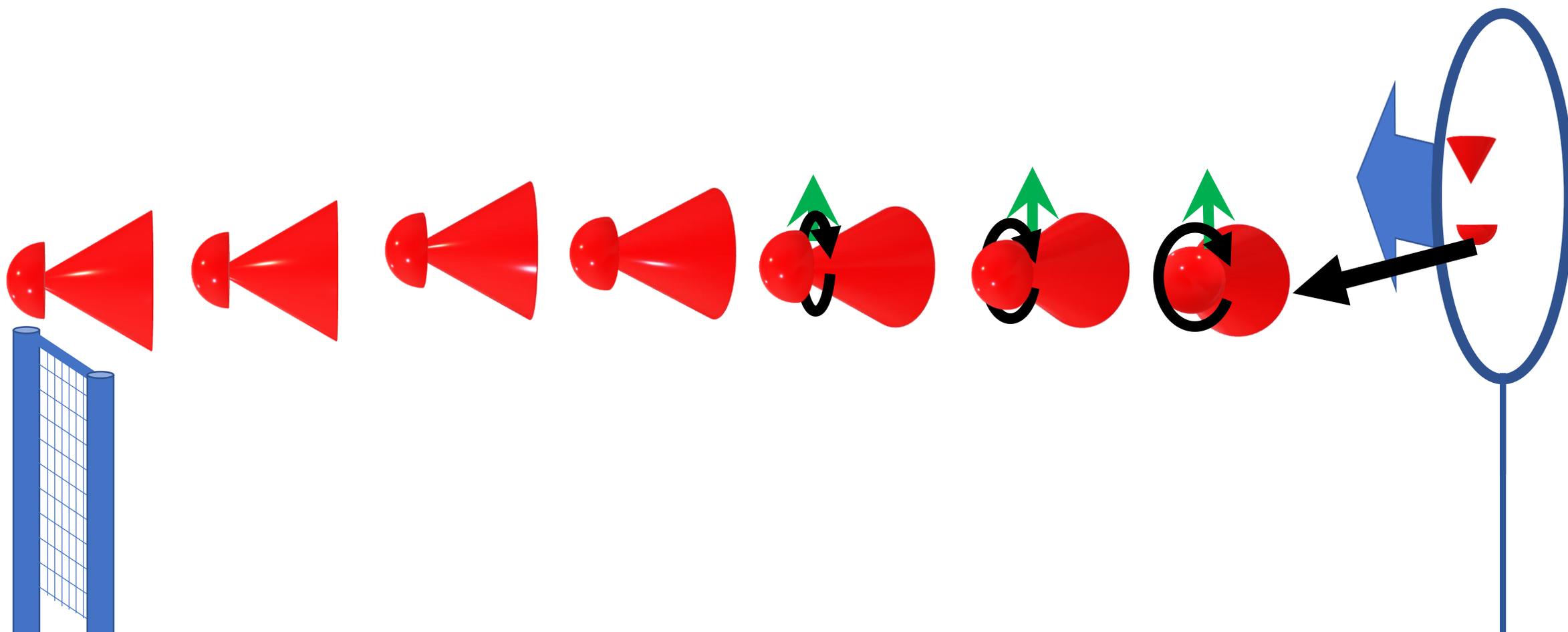
+2

Ba

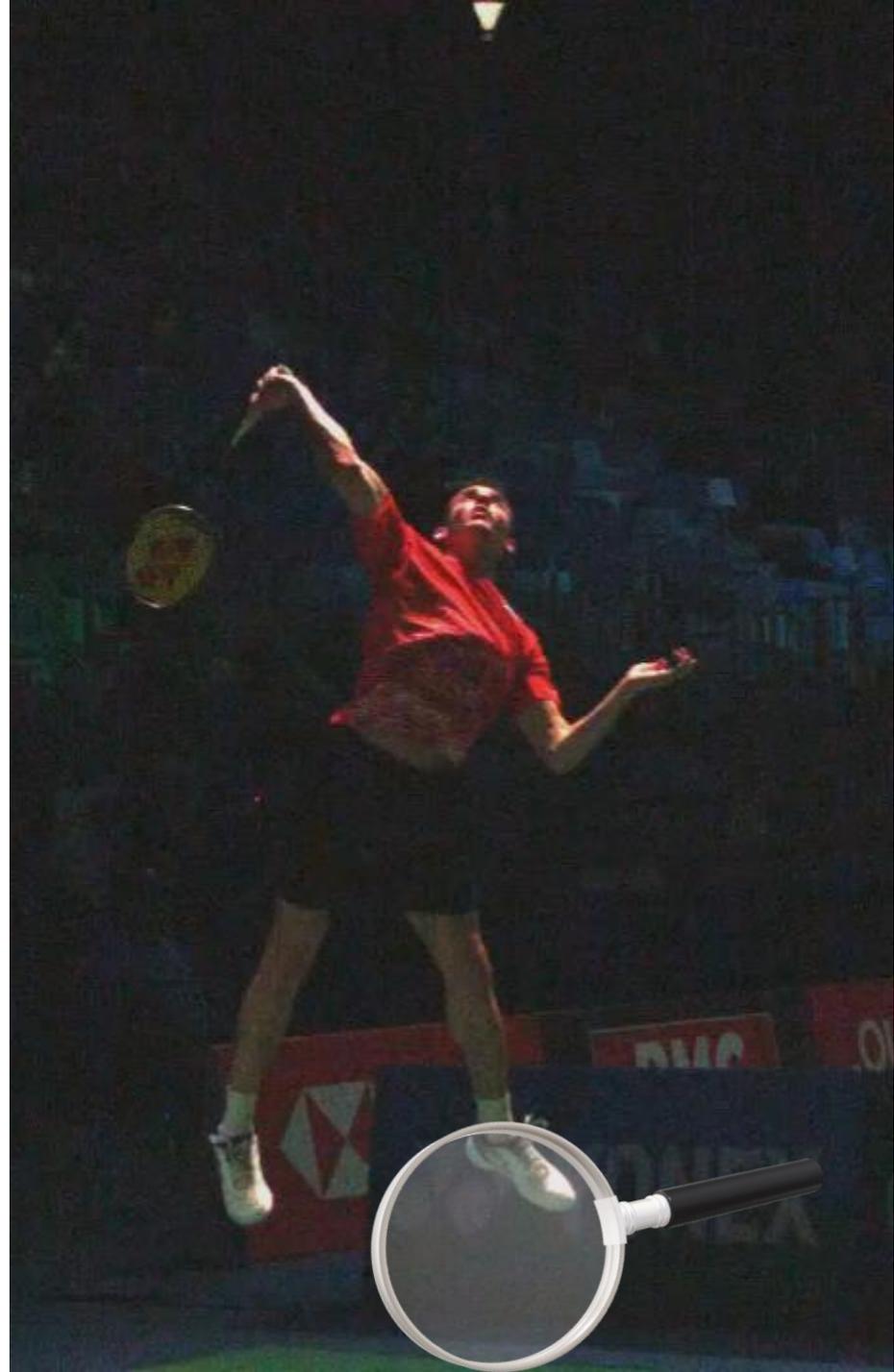
Composante transverse importante = effet Magnus important



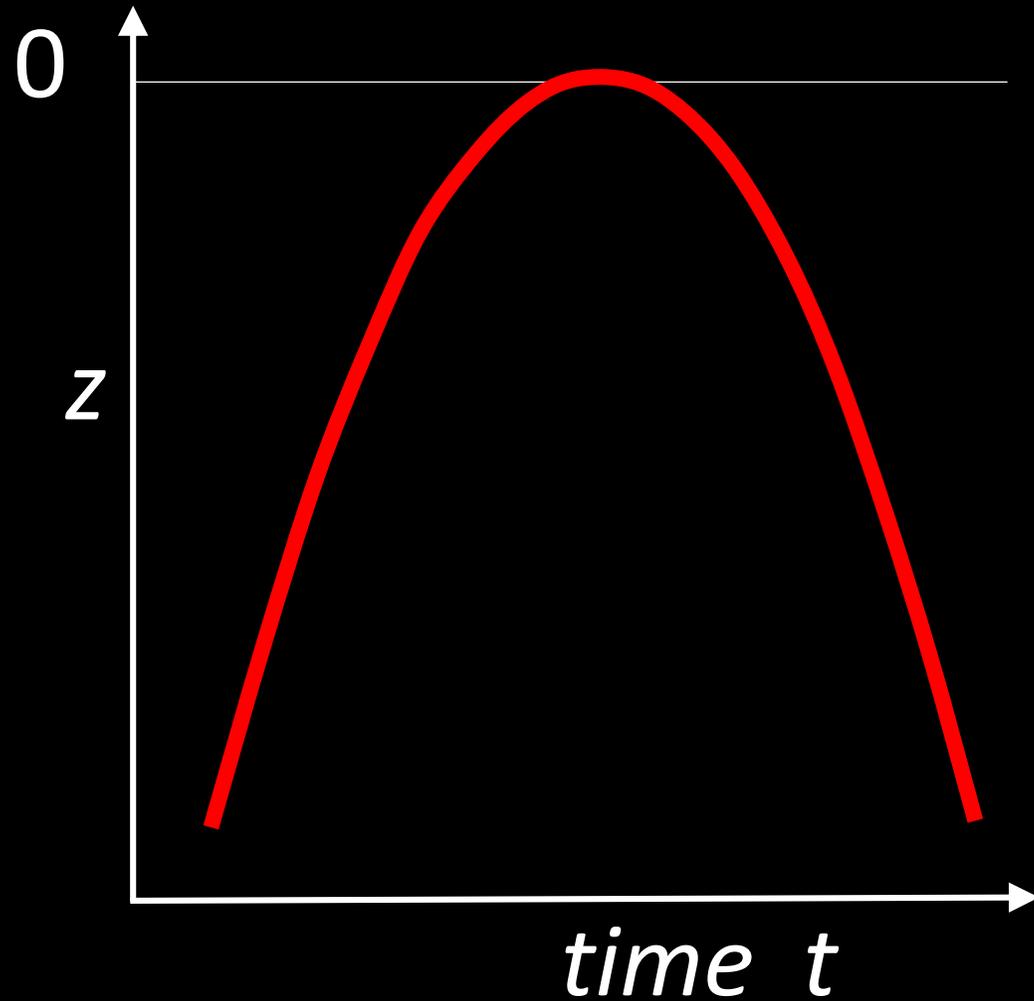
Composante transverse optimisée : effet Magnus limité



Défier la gravité



La gravité \vec{g}
accélère les corps



HALL/MACPH 3
HEE/TAN 9

BMV

ASIAN
WORLD
FEDERATION

FFBad
Fédération Française
de Badminton

YONEX

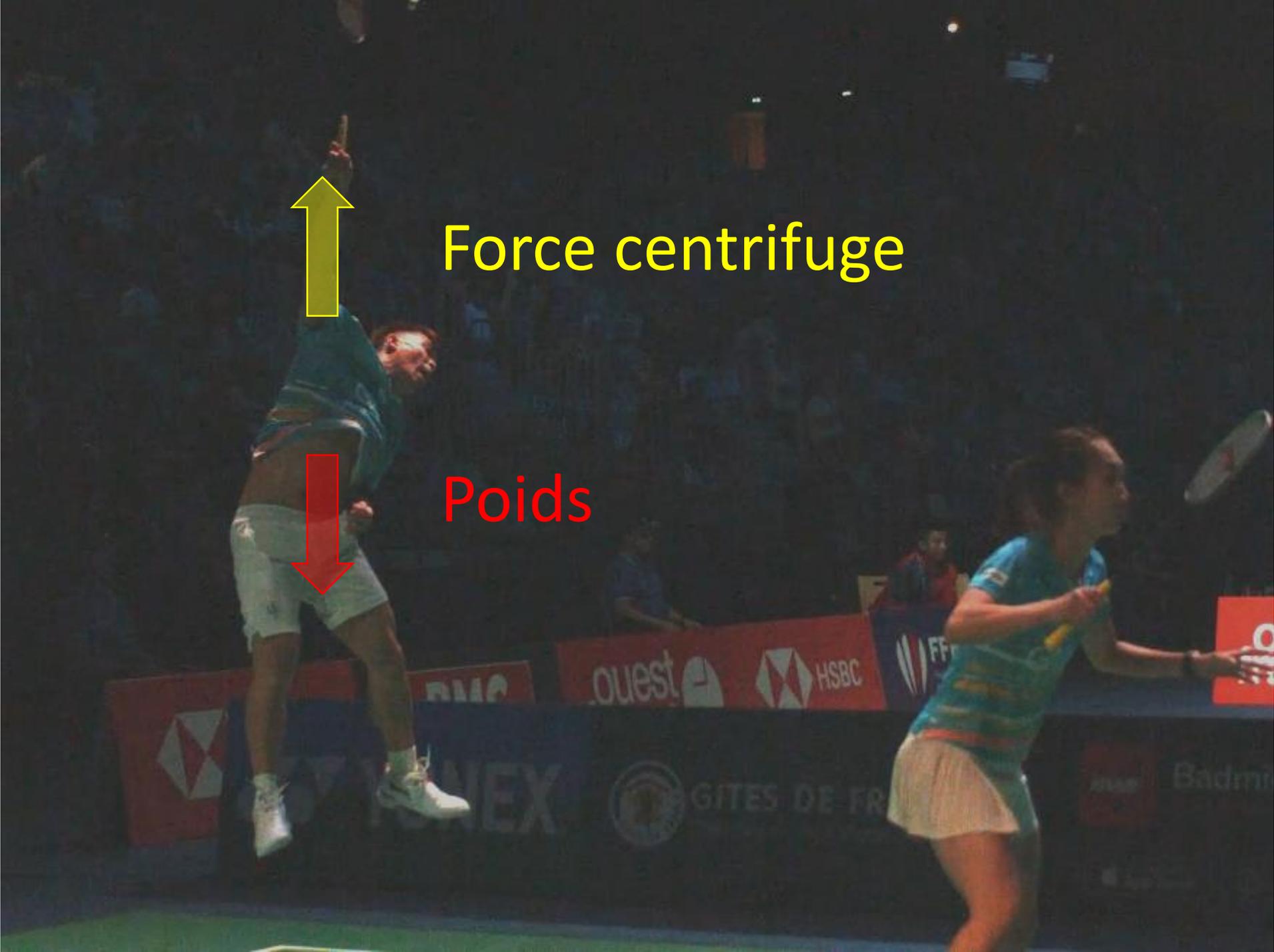
HSBC

4
HALL/MACPH 3
HEE/TAN 9

YONEX



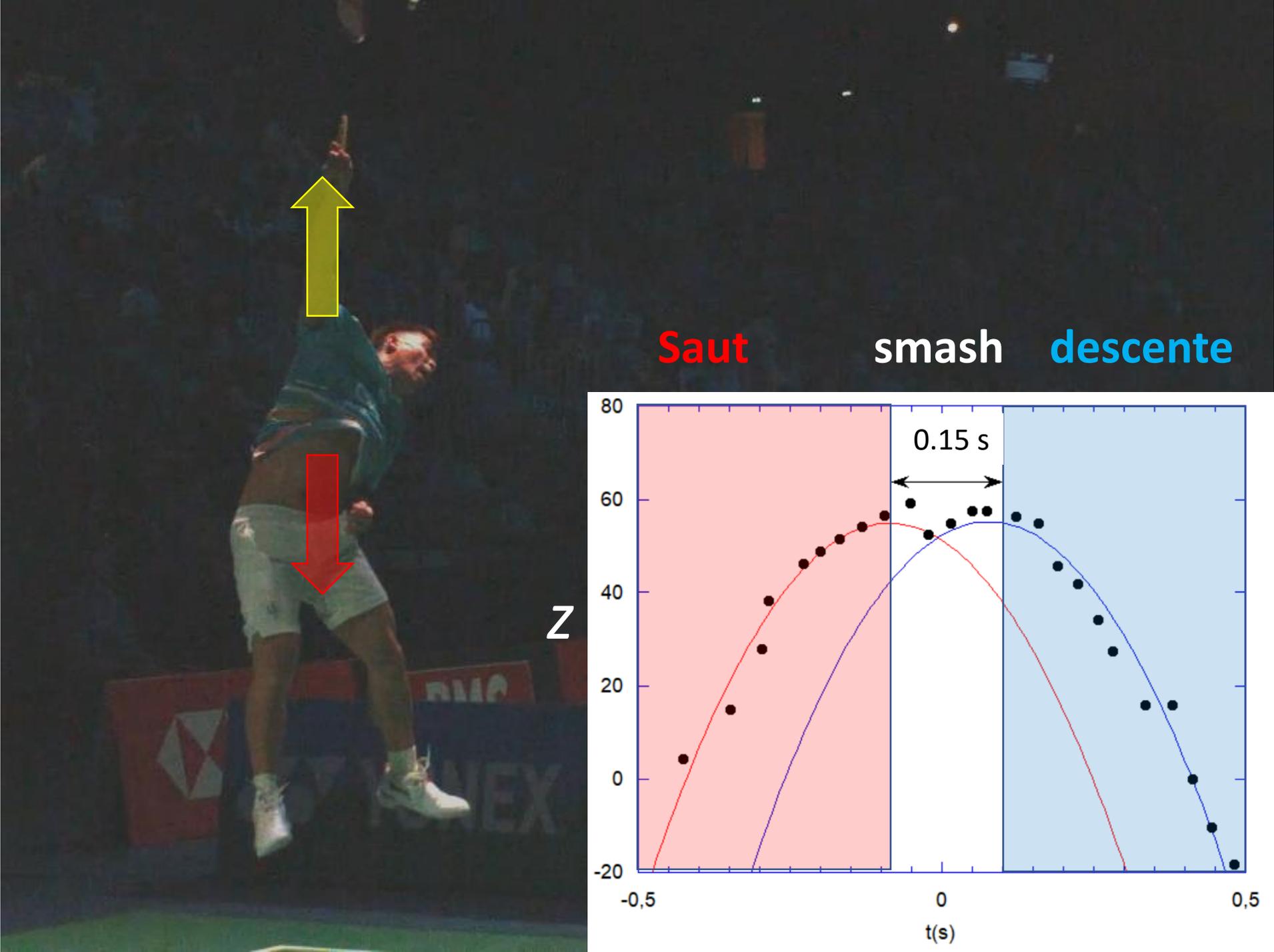


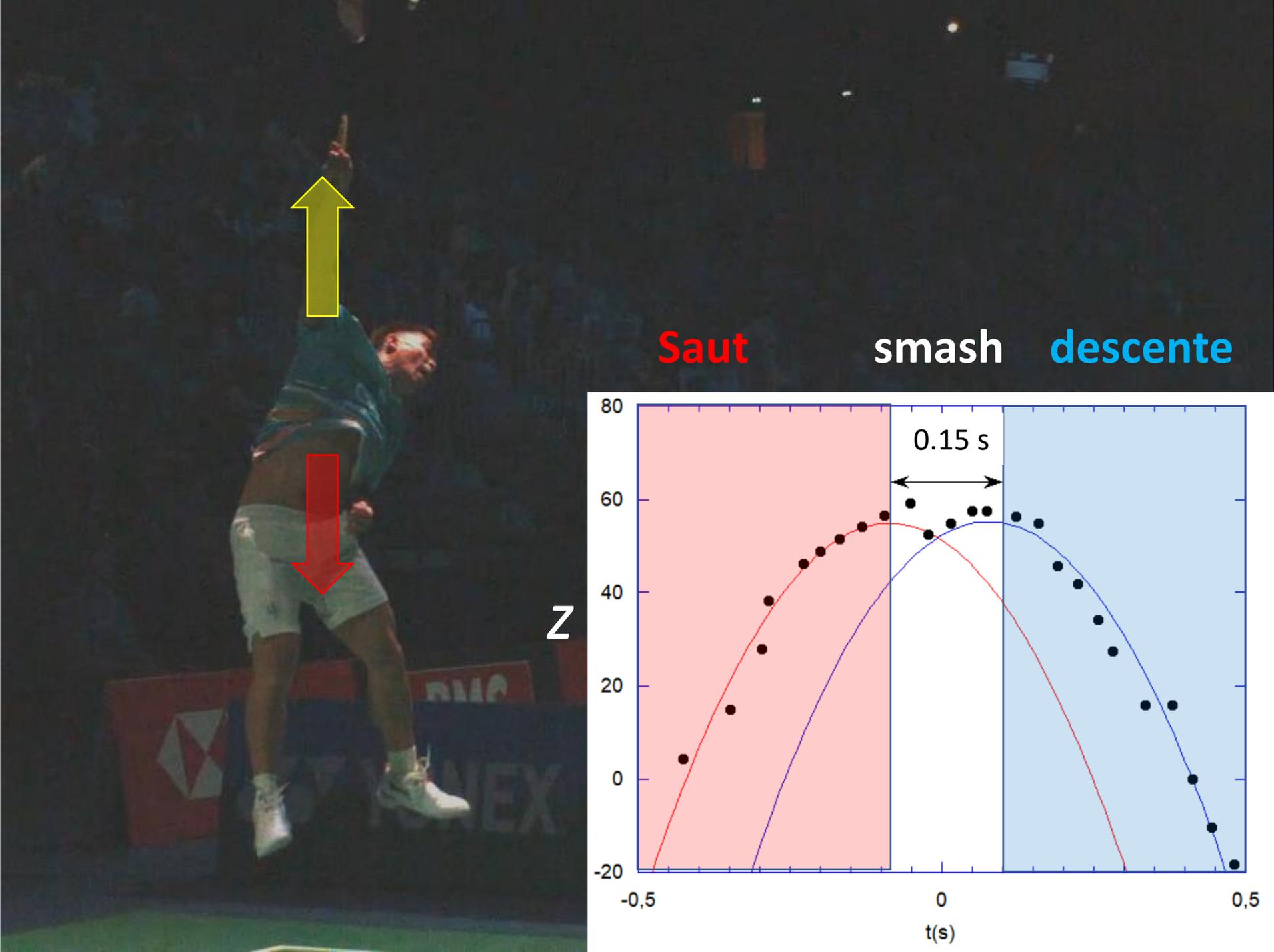


Force centrifuge



Poids





Saut

smash

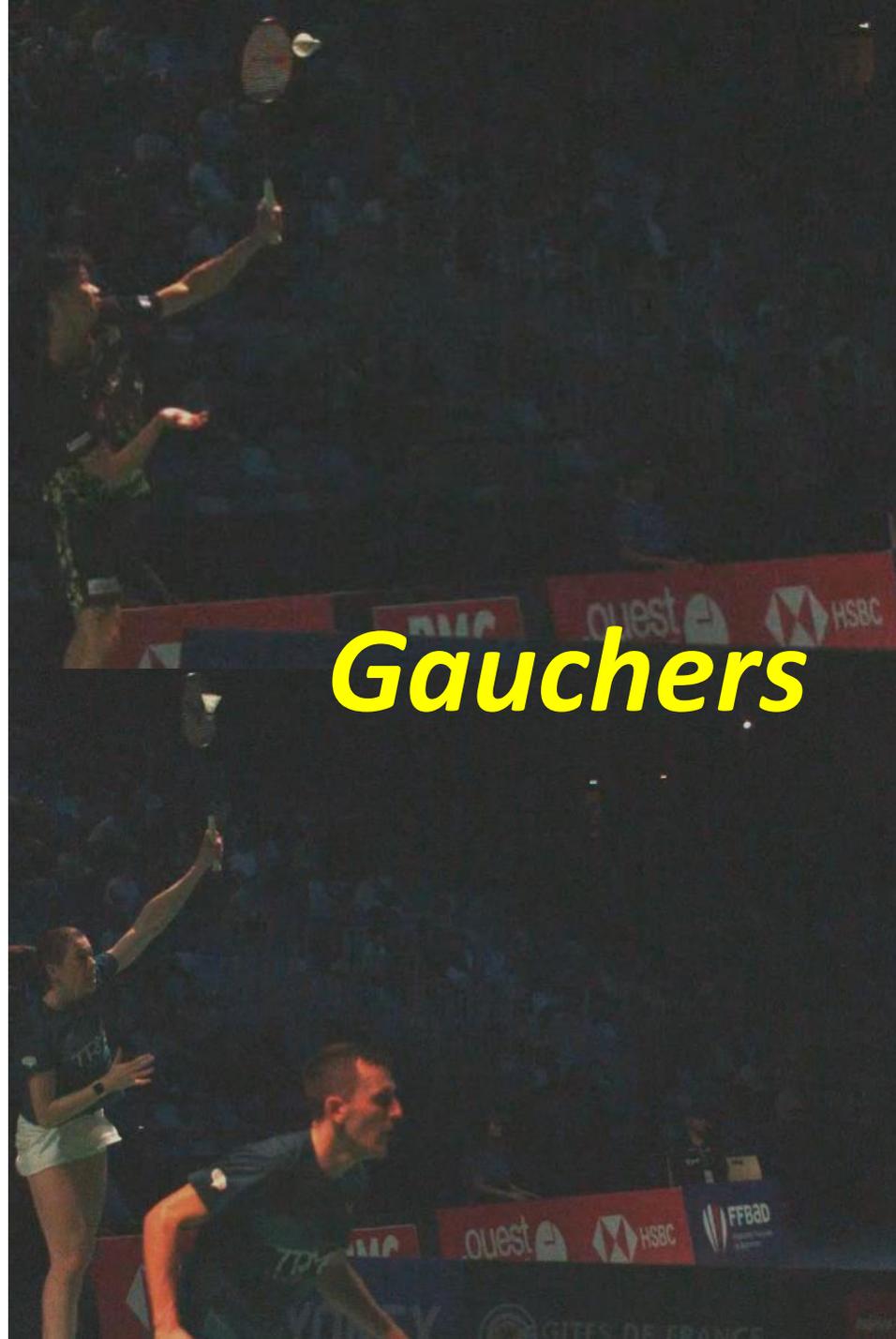
descente

z

$t(s)$

0.15 s



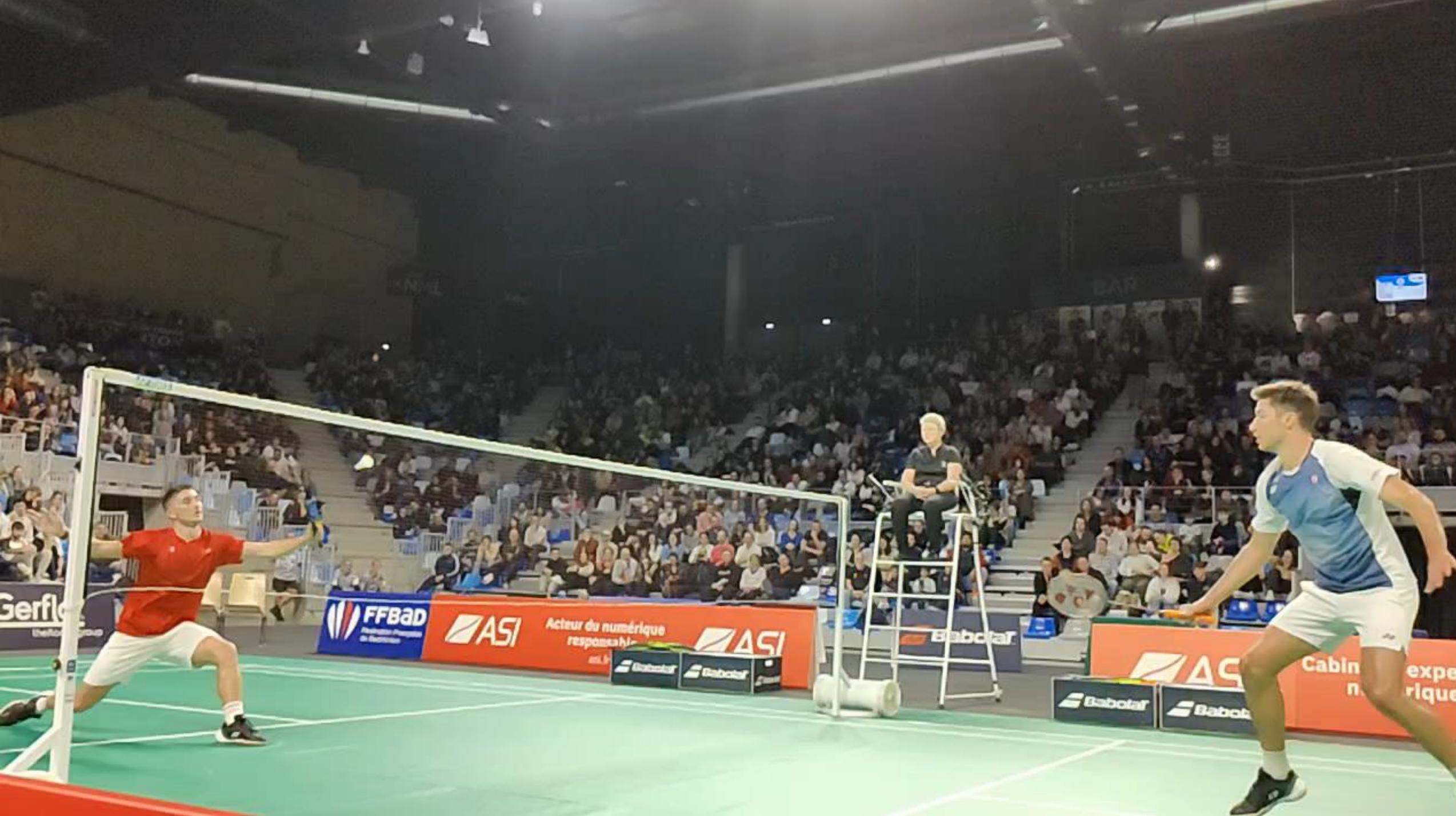


Gauchers

vs

droitiers





Dissymétrie :

le volant de badminton



Plumes d'ailes gauches

Implantées en hélice gauche

dans le bouchon

Symétrie du volant :

Invariant par rotation de

1 tour

Plumes d'ailes gauches implantées en hélice gauche

n

axes n

16

8

4

2

1



Dissymétrie :

le volant de badminton est un objet **chiral**

Ne se superpose pas à son image dans un miroir



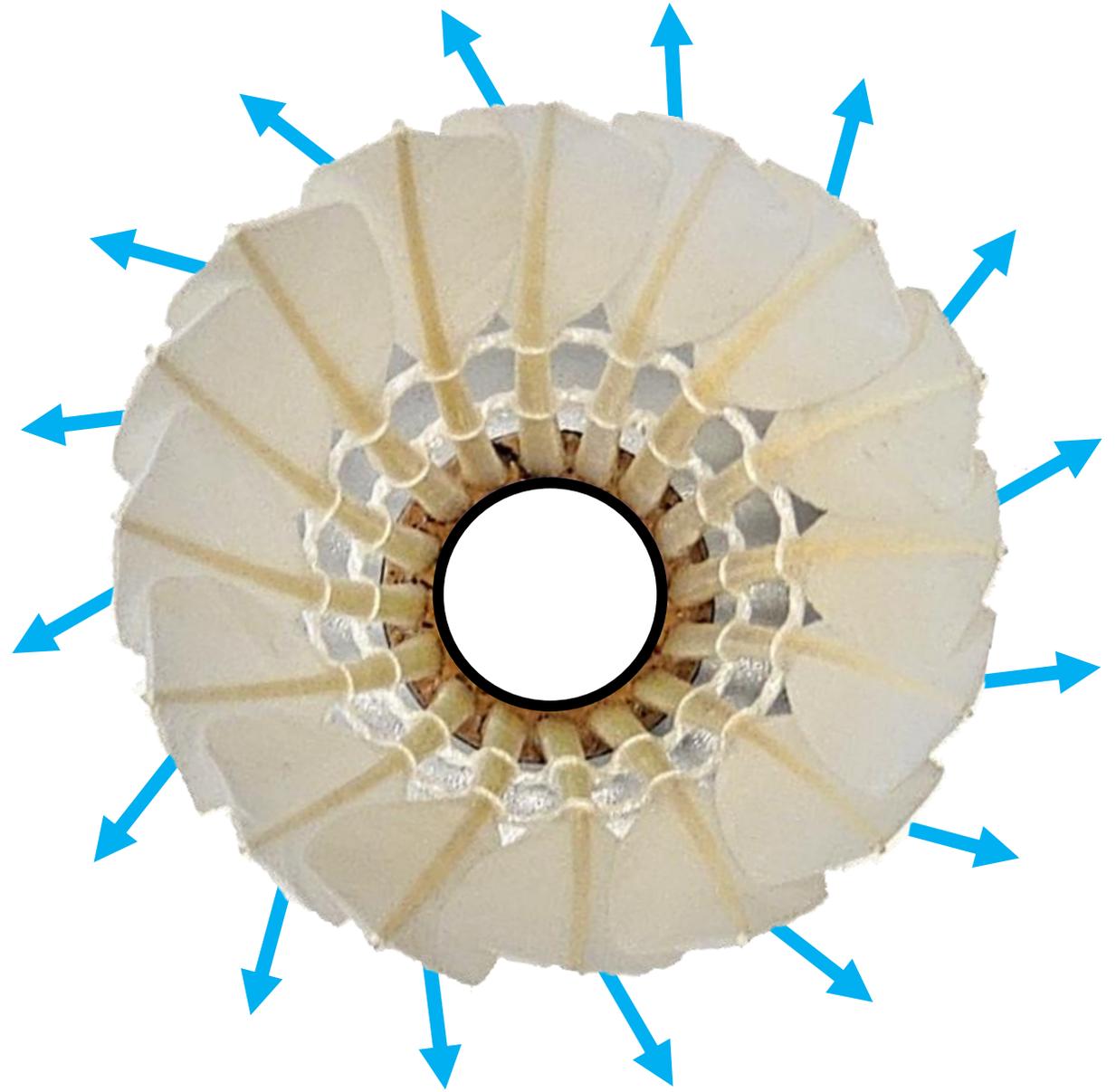
Dissymétrie :

le volant de badminton est un objet **chiral**

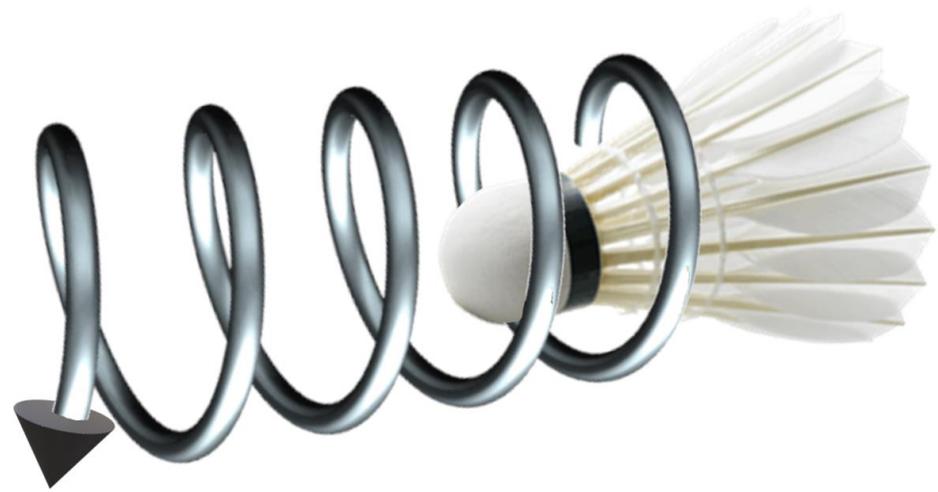
Ne se superpose pas à son image dans un miroir



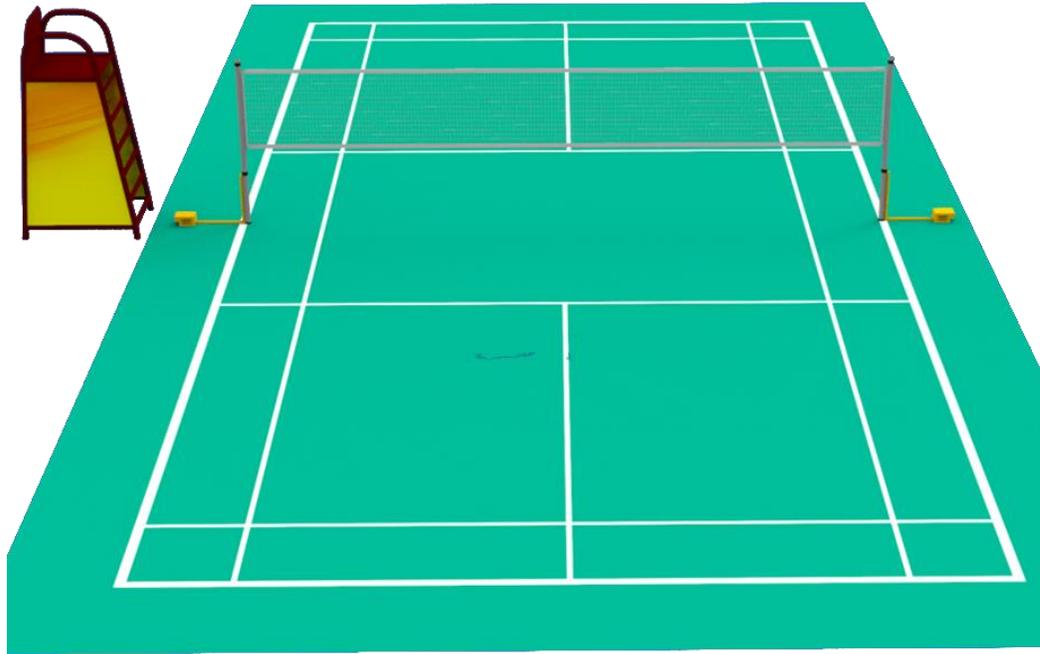
Flux d'air :



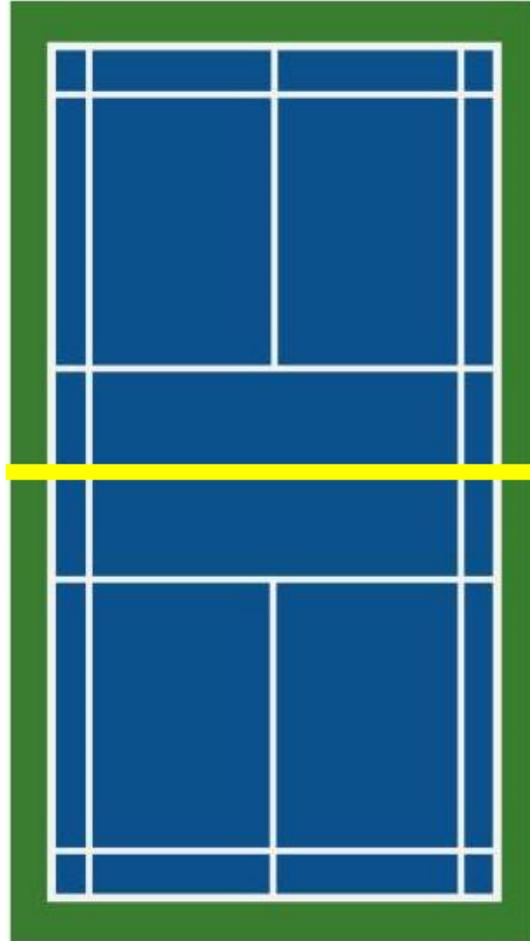
Trajectoire hélicoïdale
en rotation anti-horaire



Symétrie du terrain

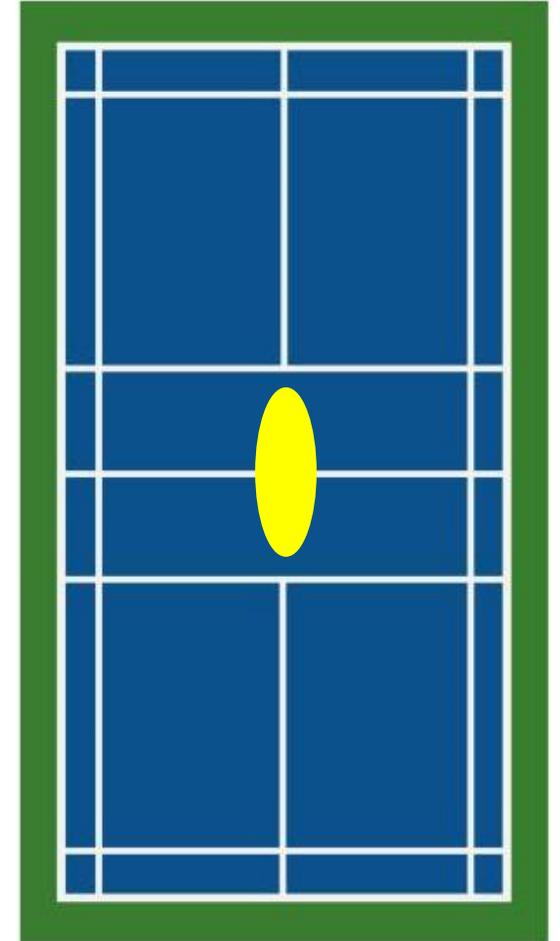


miroir m

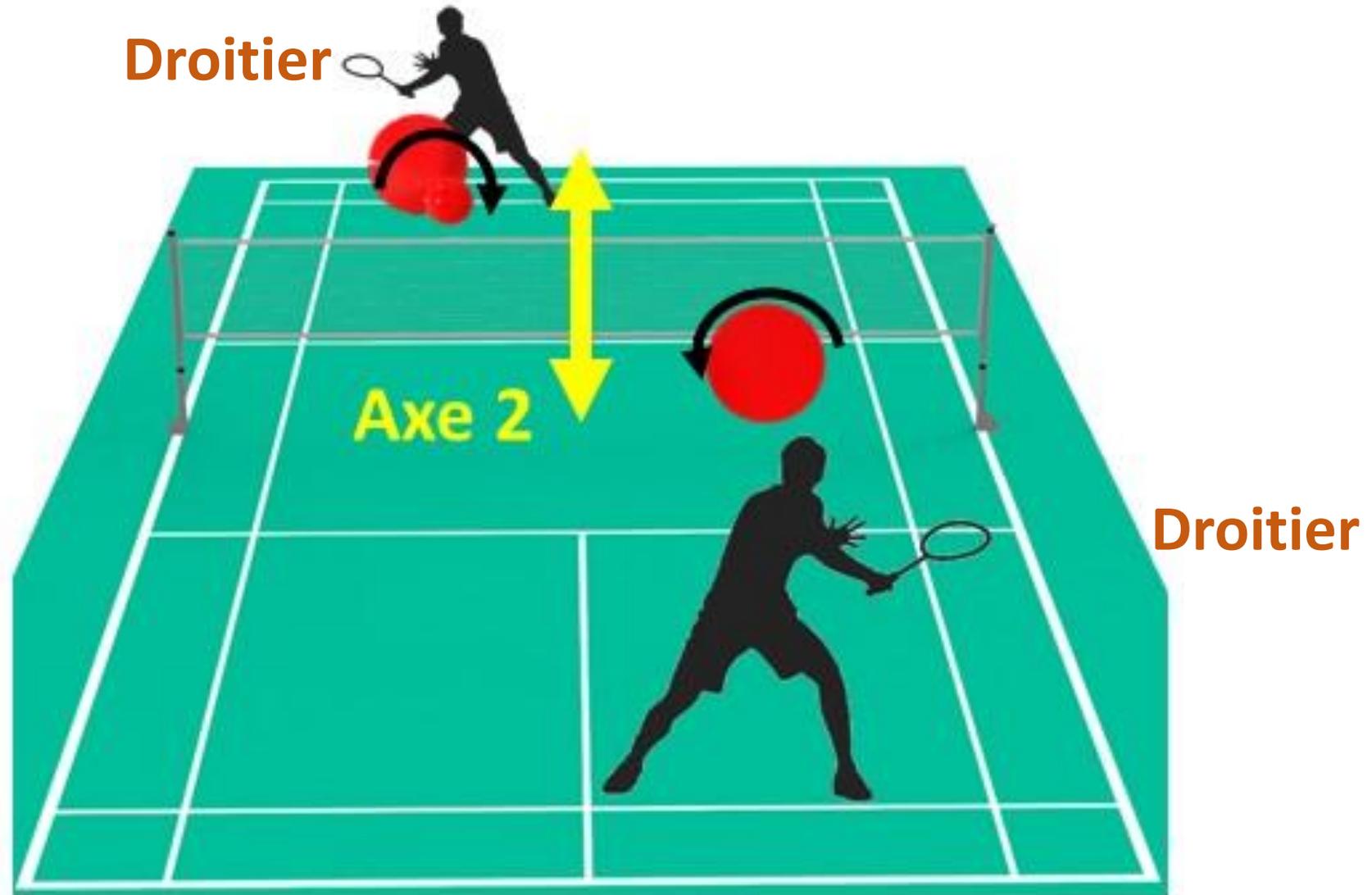


axe 2

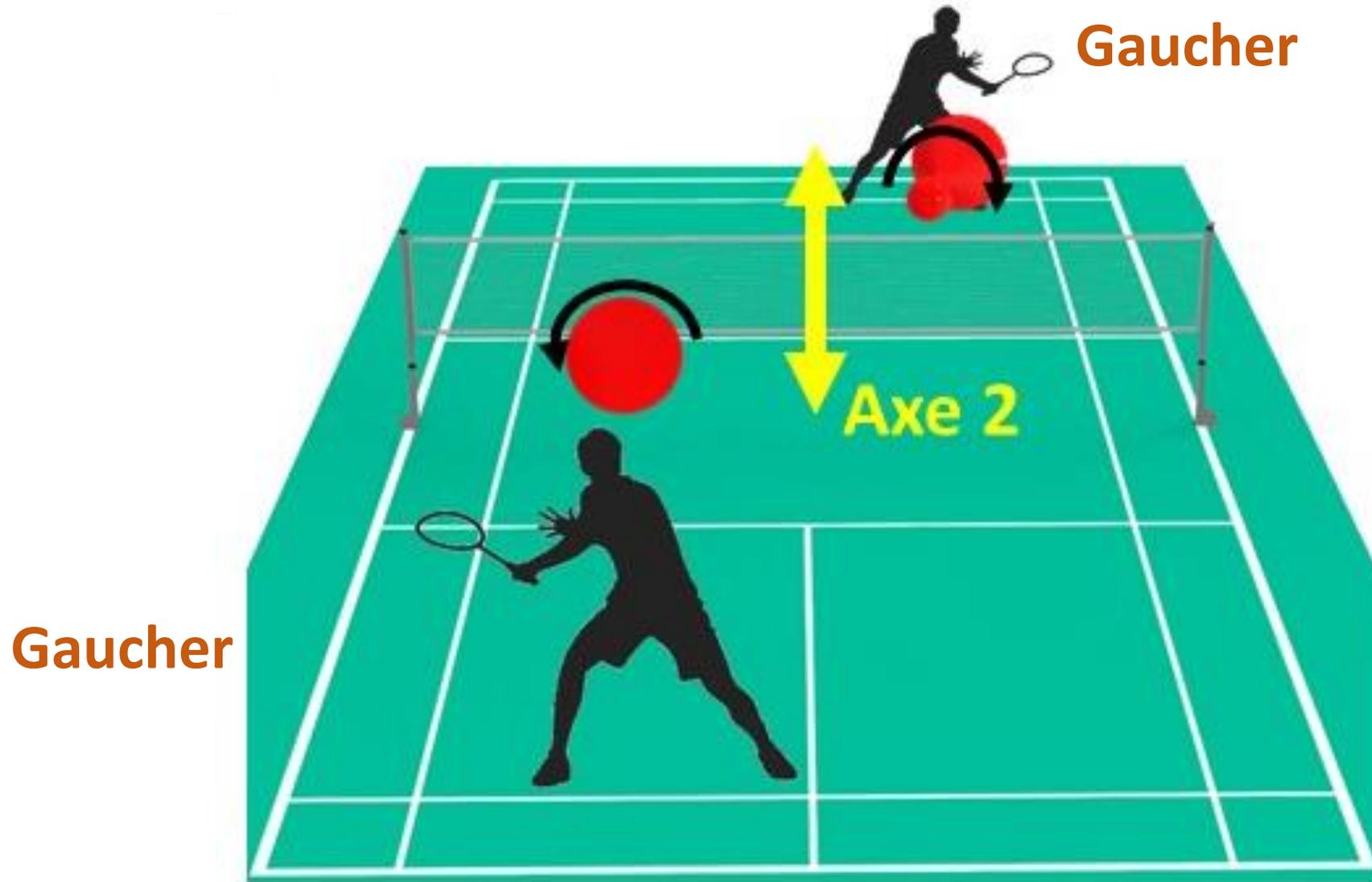
$$\frac{1 \text{ tour}}{2}$$



Symétrie d'ordre 2 sur le terrain:



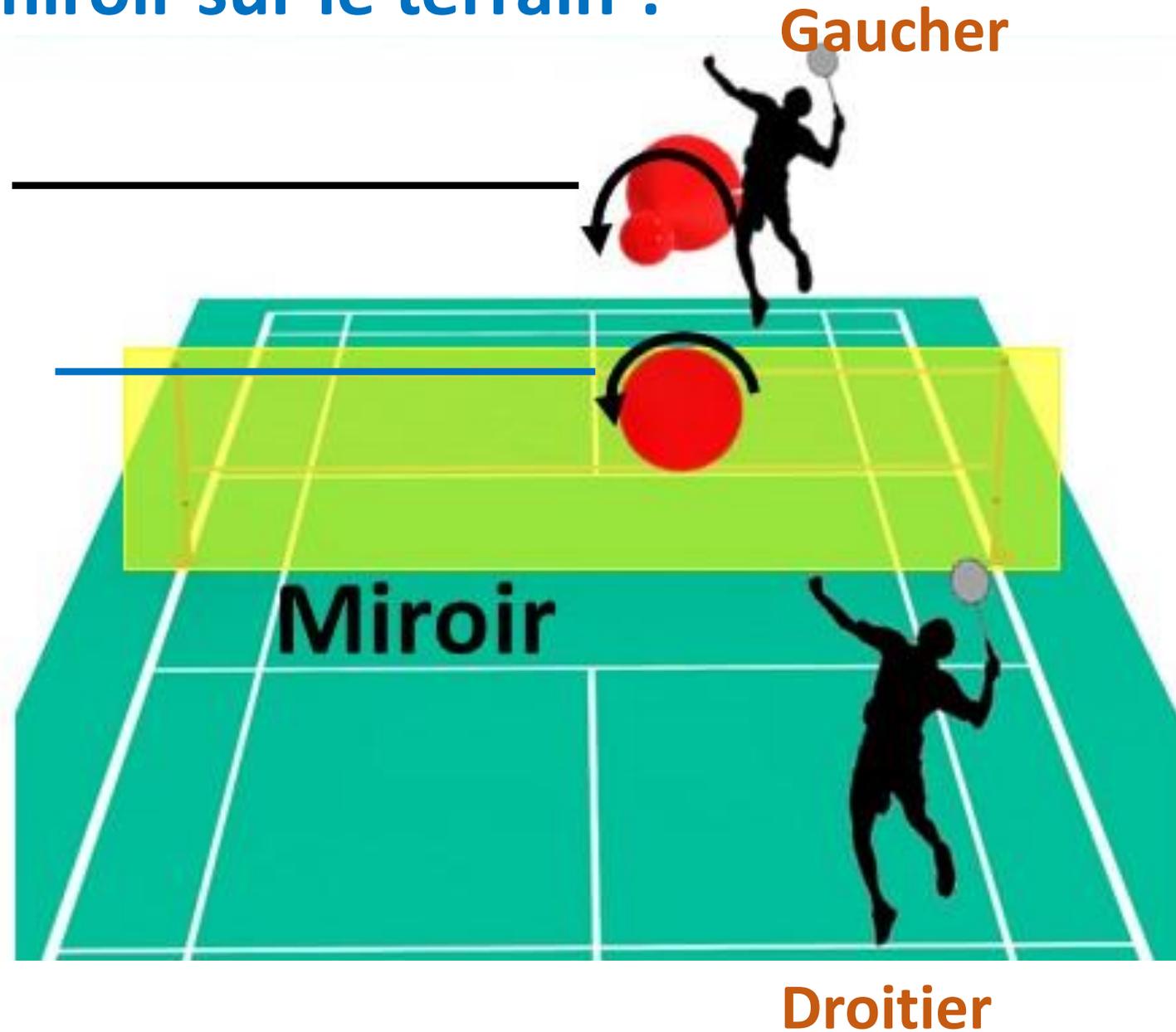
Symétrie d'ordre 2 sur le terrain:



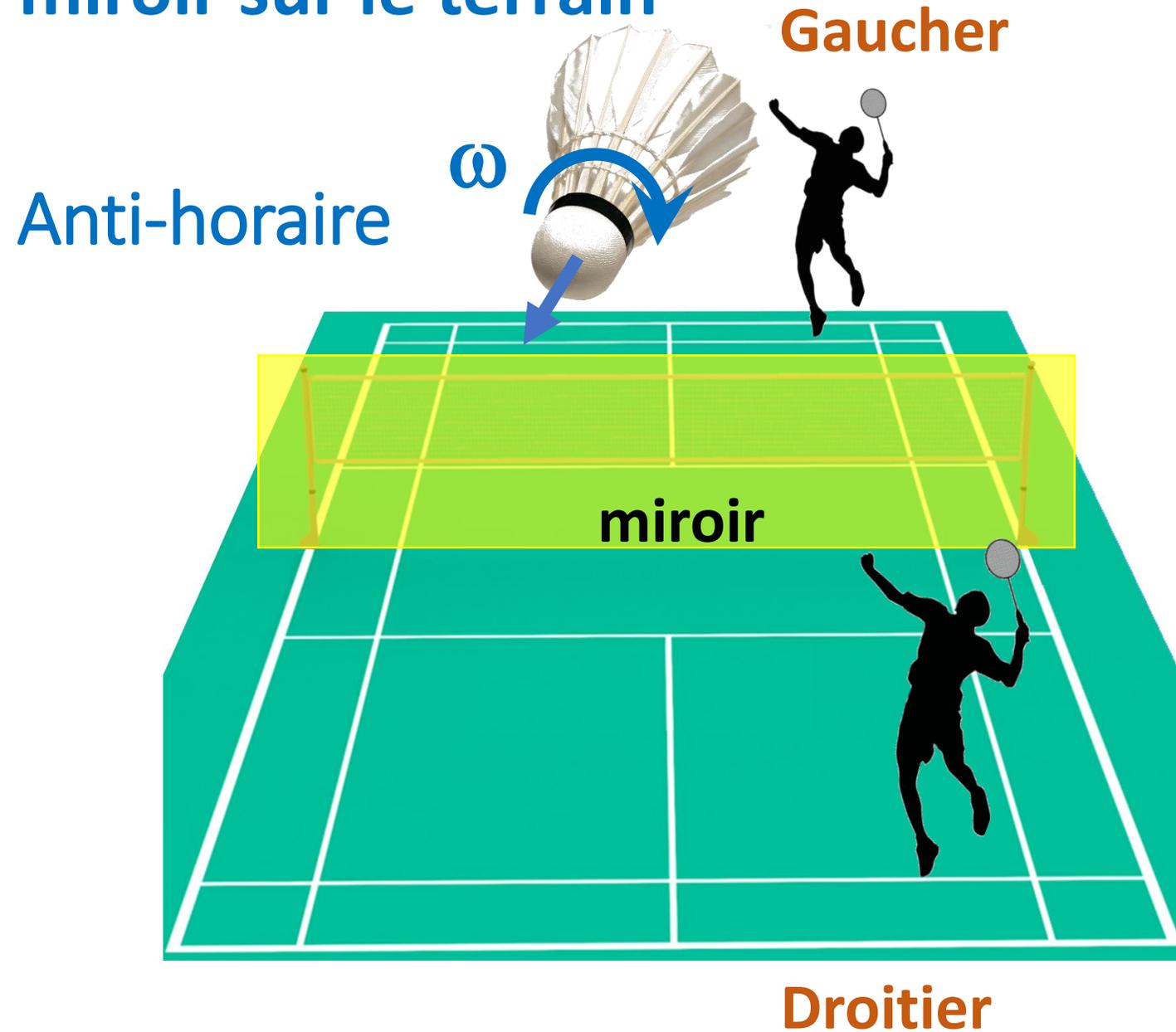
Symétrie miroir sur le terrain ?

Horaire !

Anti-horaire



Pas de symétrie miroir sur le terrain

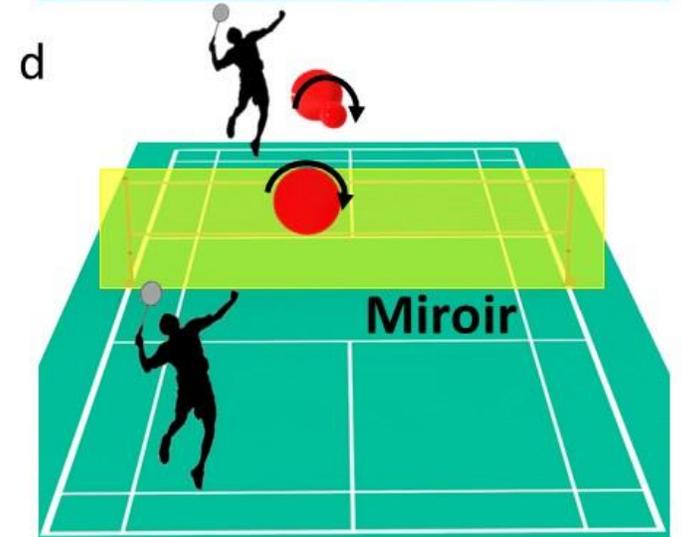
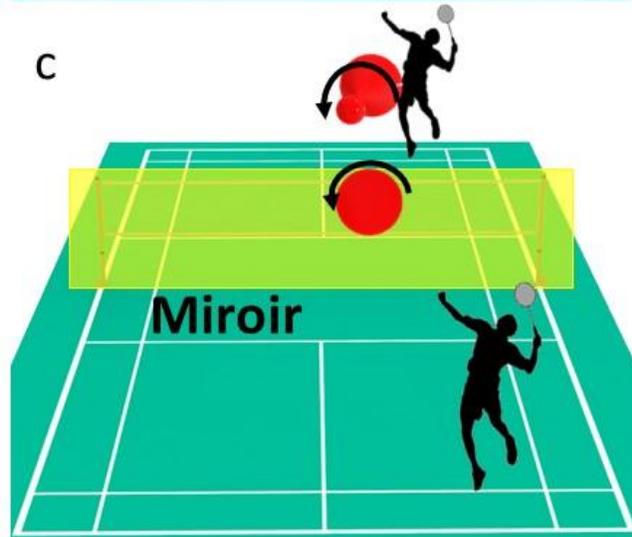
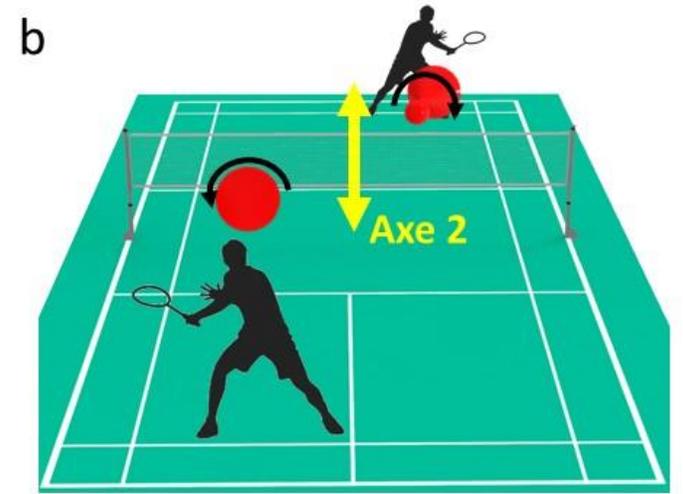
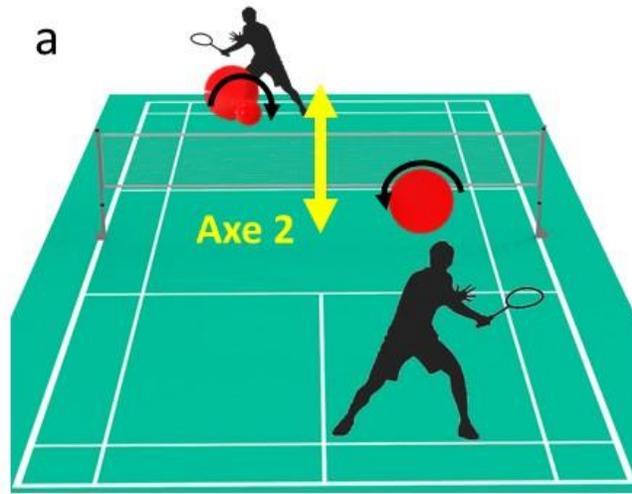


Symétrie droitier-droitier

ou gaucher-gaucher

Théorie des groupes

	E	2	m	m'		
A ₁	1	1	1	1	z	x ² , y ² , z ²
A ₂	1	1	-1	-1	R _z	xy
B ₁	1	-1	1	-1	R _{y, x}	xz
B ₂	1	-1	-1	1	R _{x, y}	yz



Différence entre gaucher et droitier ?

Slice de gaucher

Sens horaire

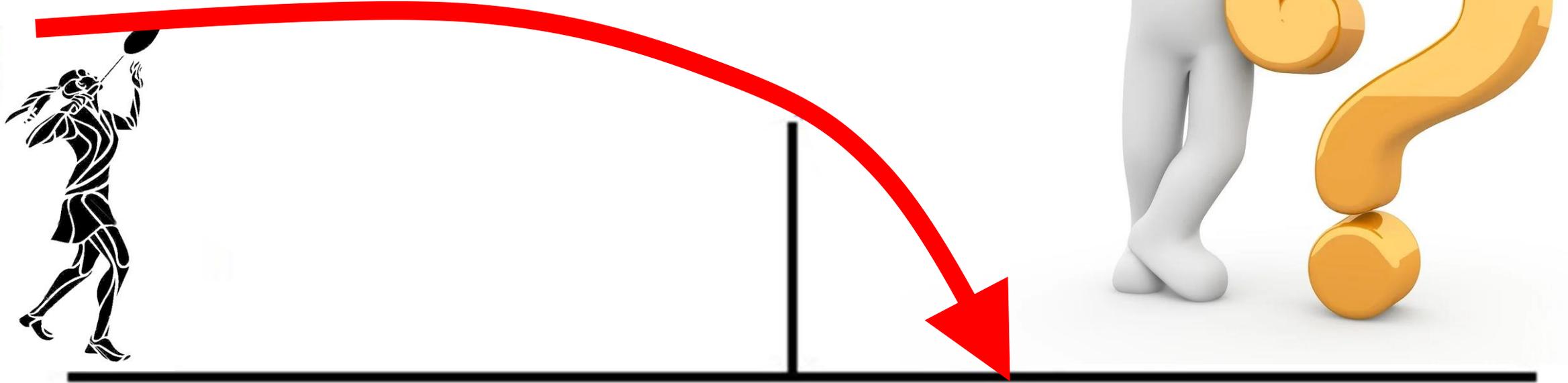


Slice de droitier

Sens anti-horaire



Slices de **gaucher** vs **droitier**



Quelle différence?

Slice droitier

'
est

Rotation anti-horaire & décélération

Rotation
horaire

stop



Slice gaucher

stop

rotation

anti-horaire

Slice gaucher

Rotation
horaire

stop

rotation
anti-horaire

Slice gaucher



Droitier

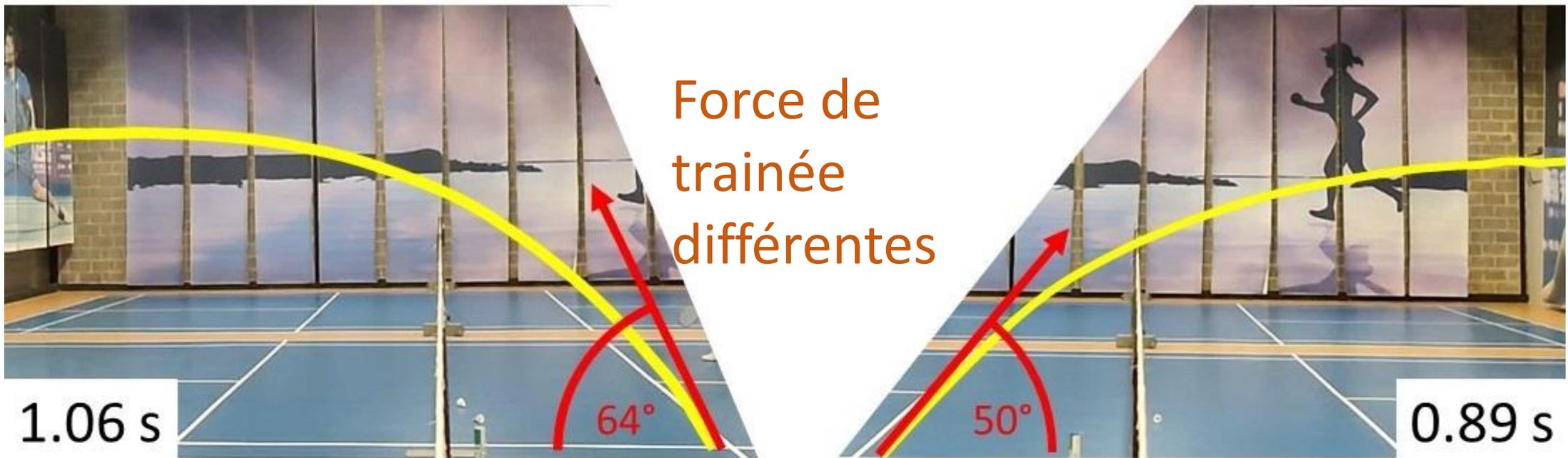
o i e s t

Droitier

Gaucher

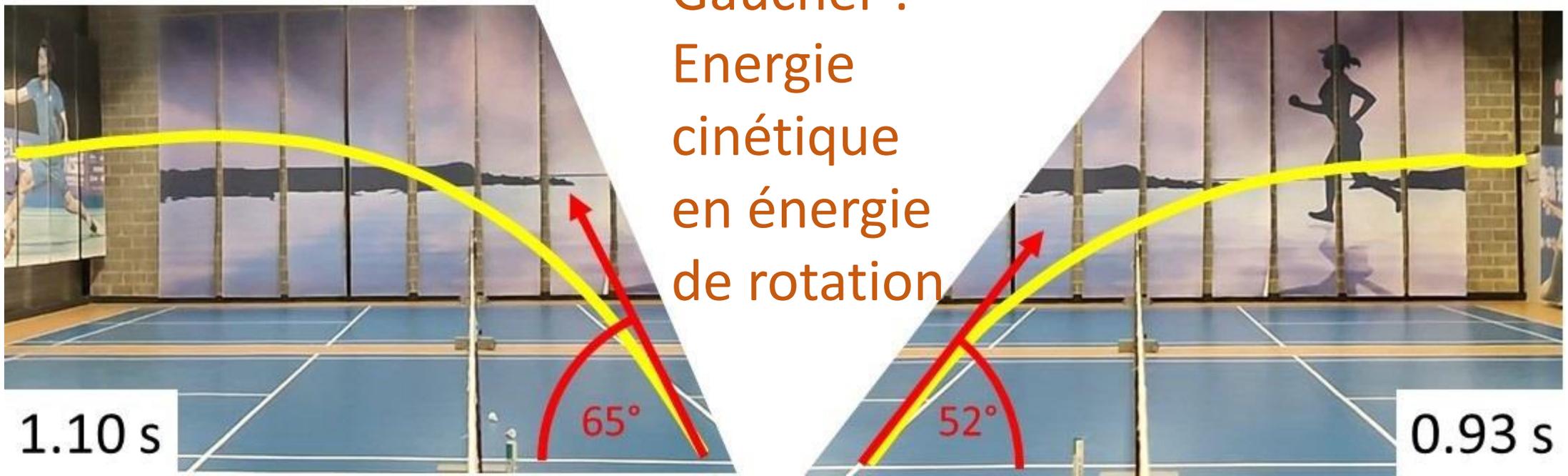
Gaucher

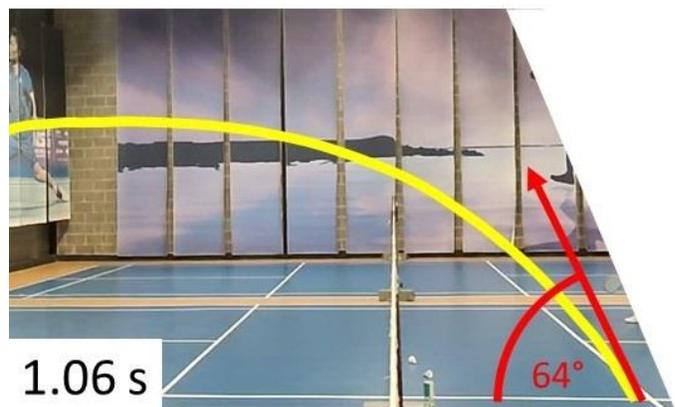
p e r d a n t s



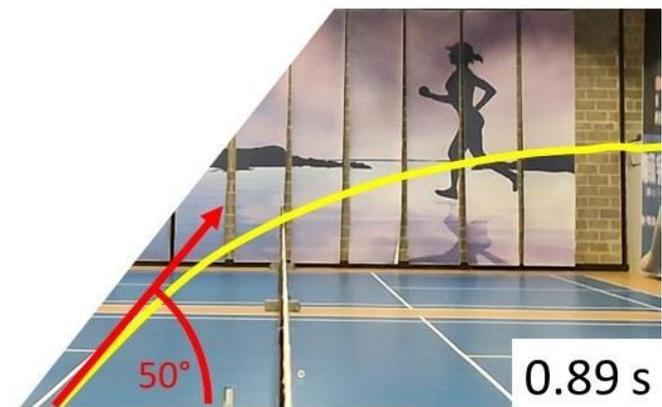
Gaucher

Droitier

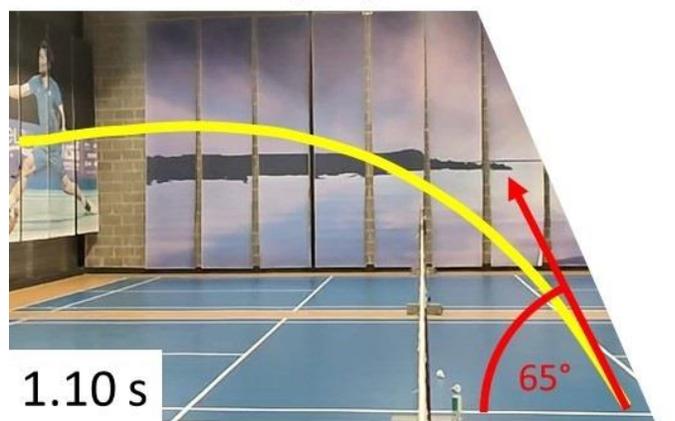




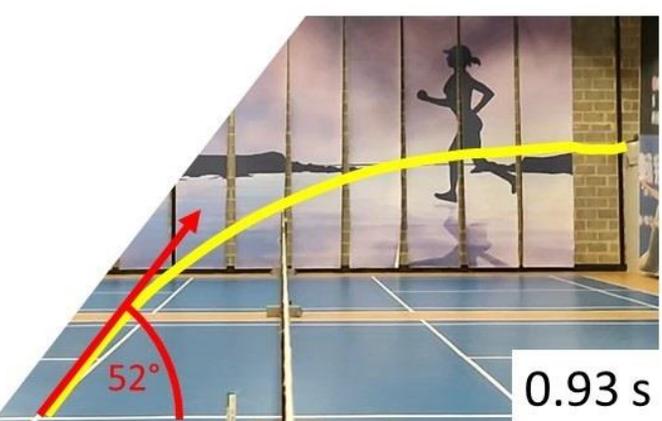
Left-handed player



Right-handed player



1.10 s



0.93 s

Vol légèrement plus long pour gauchers
 Mais :
 angle de chute plus élevé et vitesse plus faible



Pour en savoir plus

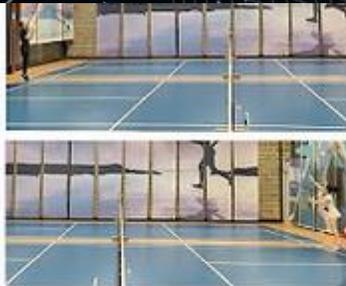
Chaîne YouTube



YouTube · Eric Collet
Physique du Badminton



Différence entre
Gauchers
et
Droitiers



Physique du
Badminton

Eric Collet

Publique

4 vidéos 134 vues Dernière modification le 13 mars...



Tout lire

Aléatoire



Vidéo 1 : Gauchers et droitiers différents au badminton, à cause du volant

Eric Collet • 1,2 k vues • il y a 2 mois



Vidéo 2 : Effet Magnus au Badminton sur les slices

Eric Collet • 179 vues • il y a 2 mois



Vidéo 3 : un volant de badminton subit des accélérations de 5000 g durant l'impact avec la raquette

Eric Collet • 209 vues • il y a 2 mois



Video 4 Suspended badminton players suspended in the air during smash shot

Eric Collet • 3,3 k vues • il y a 2 semaines



Université
de Rennes





Physique ultra-rapide :

*du mouvement des atomes
à celui des volants de badminton*



Eric Collet

Institut de Physique de Rennes

Université de Rennes - CNRS

Partie 2

Mouvement des

atomes

Institut de Physique de Rennes



Contrôler les matériaux par la lumière

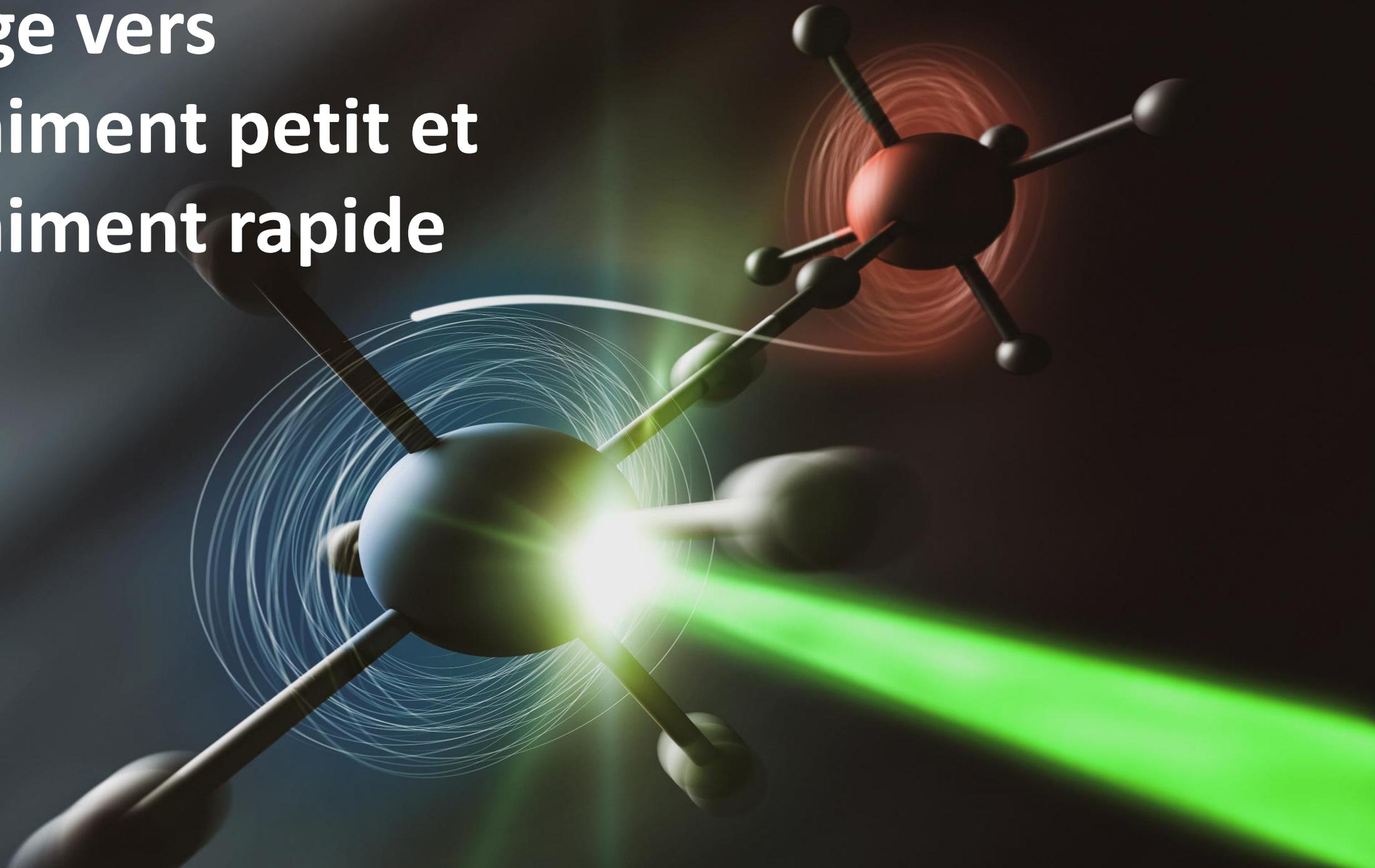


Transformation d'un cristal:

- couleur
- volume
- magnétisme
- Conductivité ...

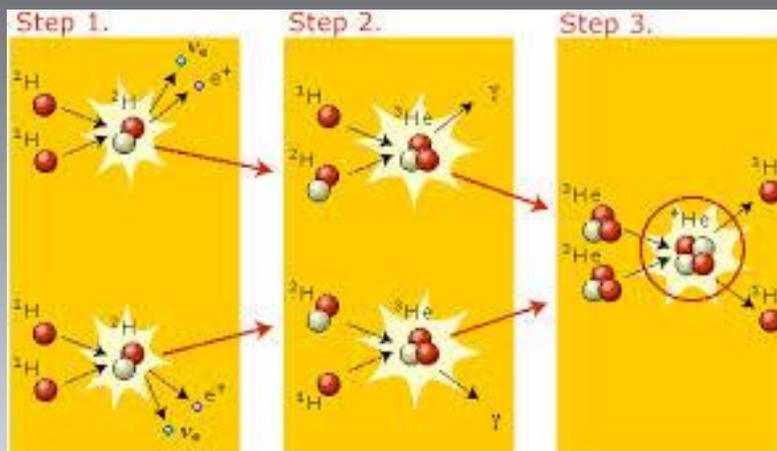
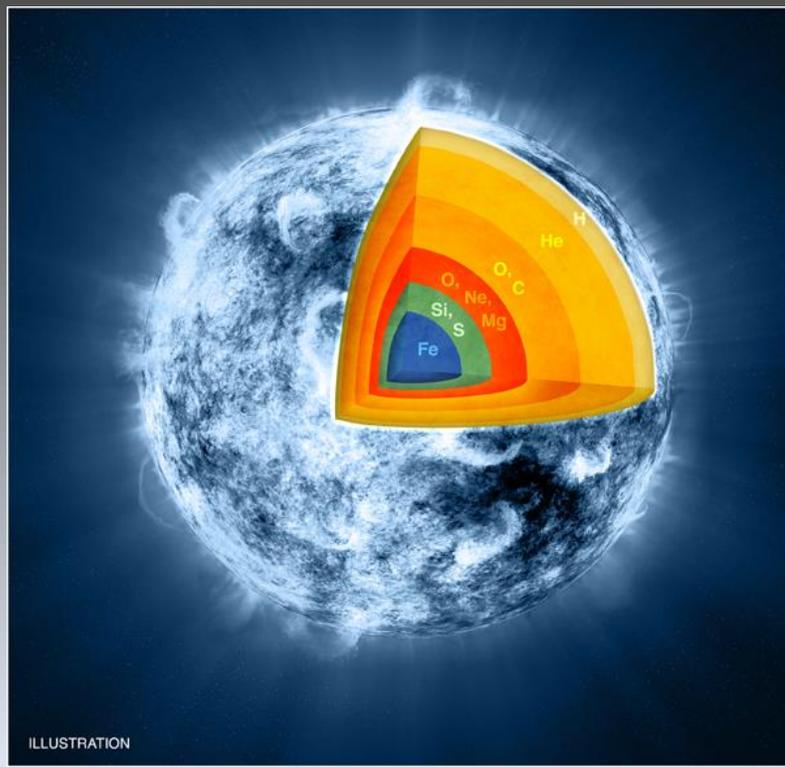
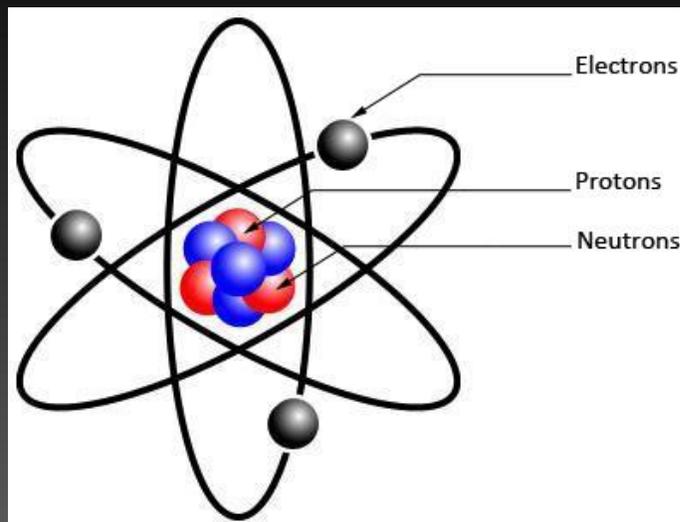
Comprendre ces phénomènes et les maîtriser → **photonique**

Voyage vers l'infiniment petit et l'infiniment rapide



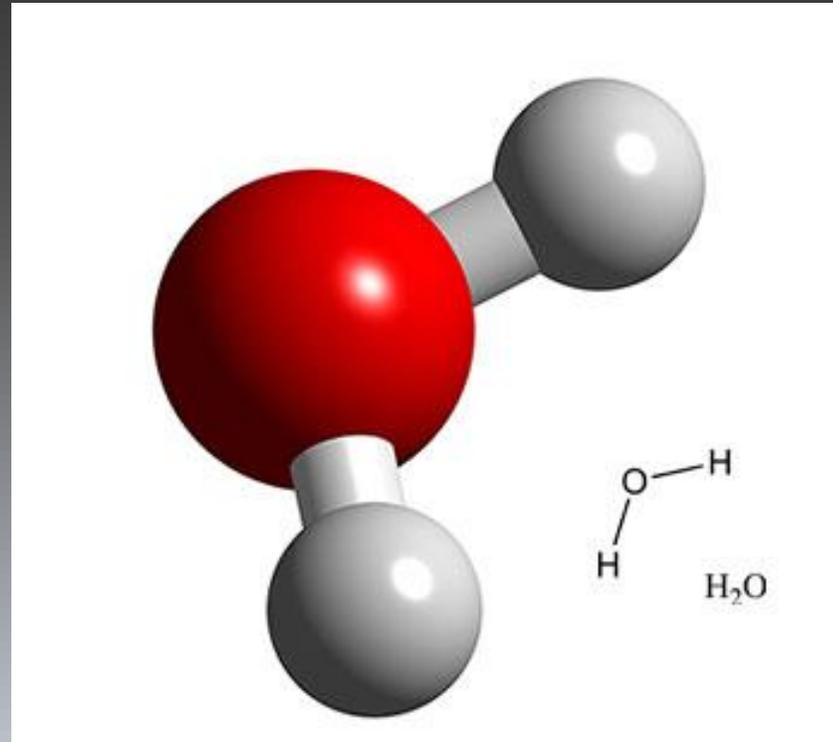
La matière constituée d'atomes

Les atomes se forment
dans les étoiles



La matière constituée d'atomes

eau

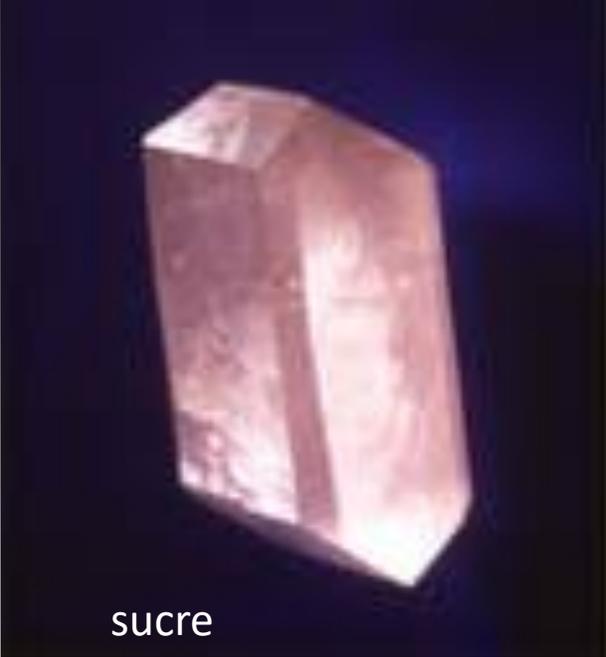


Structure de la matière : la cristallographie = science des cristaux



Pierres angulaires

Antiquité, Strabon
(64 av JC, géographe grec)
nomme *krystallos* (glace)
le quartz
un minéral transparent



sucre



hématite



sel

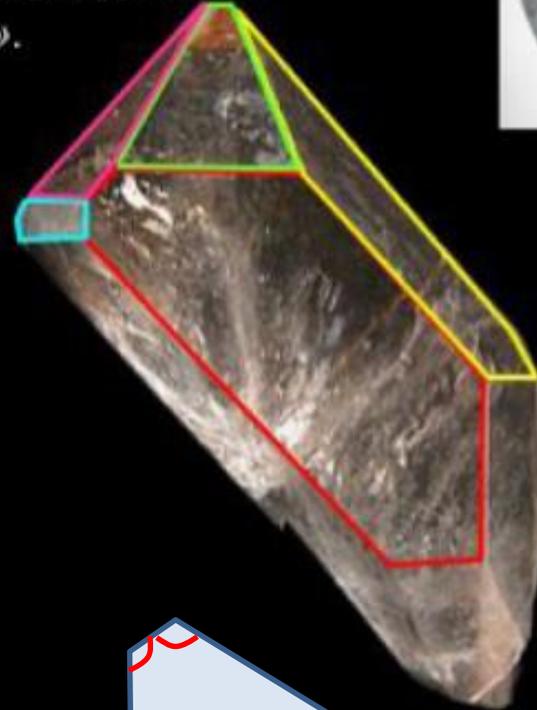


Quartz

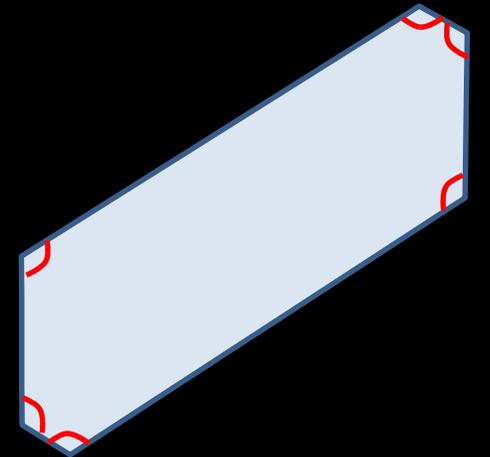
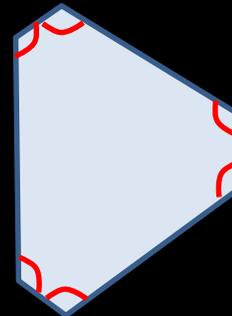
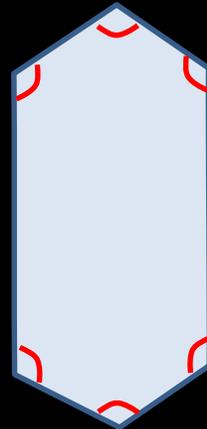
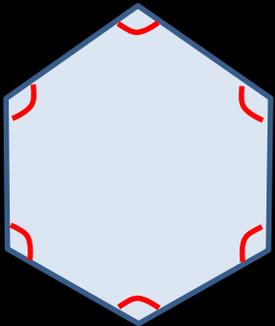
Qu'est-ce qu'un cristal?

Loi de constance des angles dièdres (Sténo, 1669) :

« Quelle que soit la forme du cristal et la taille relative de ses faces, les angles dièdres qu'elles forment sont constants pour une même espèce minérale ».



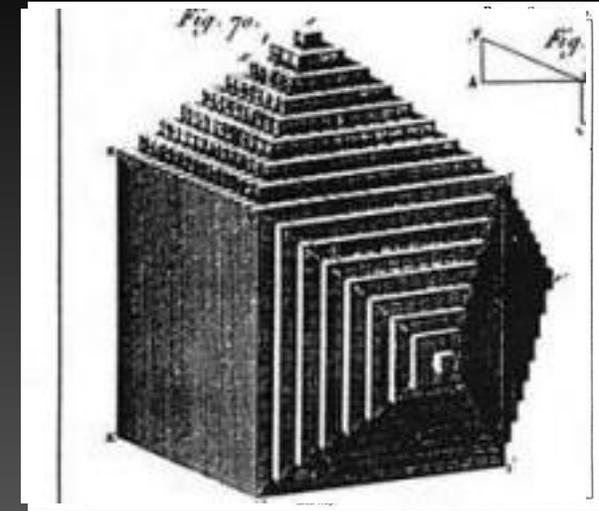
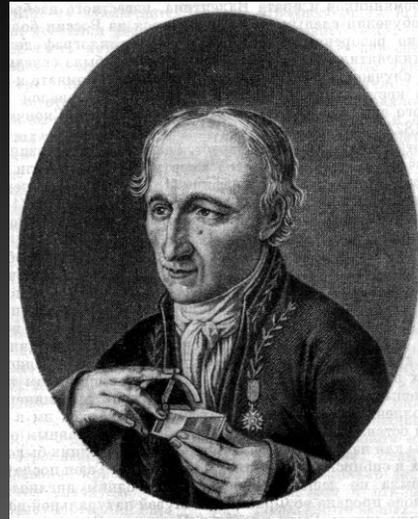
120°



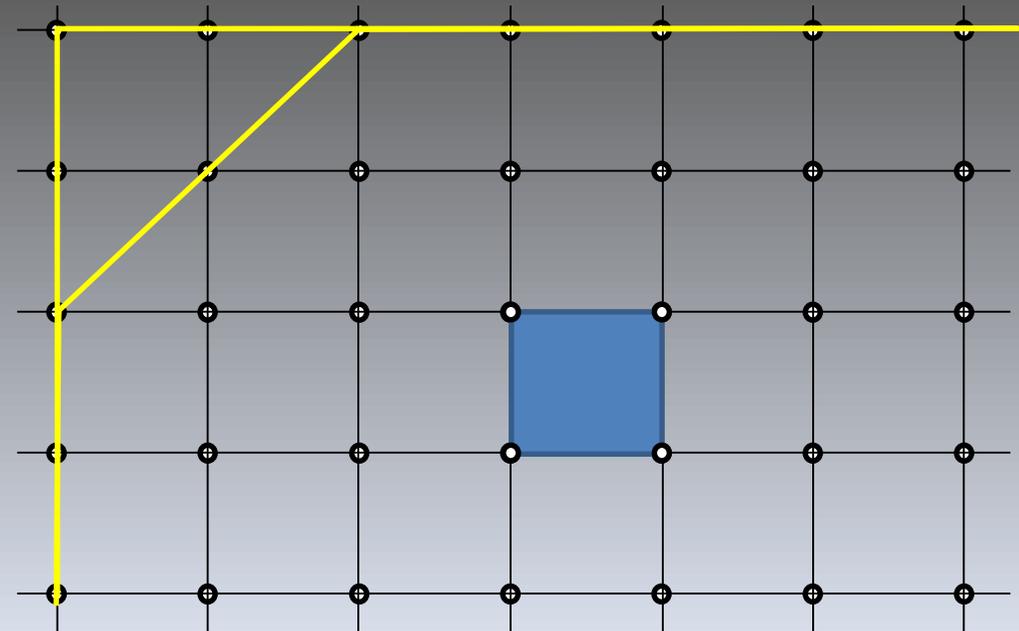
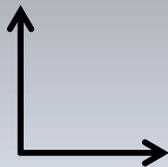
Comprendre la forme des cristaux

René Just Haüy (1743 – 1822)

La forme extérieure d'un cristal reflète sa structure intérieure périodique : empilement de "**molécules intégrantes**"



Théorie microscopique expliquant des observations macroscopiques





Cristaux :
briques $< 1\text{nm}$



Connaître la structure
atomique de la matière

1895

La découverte des rayons X

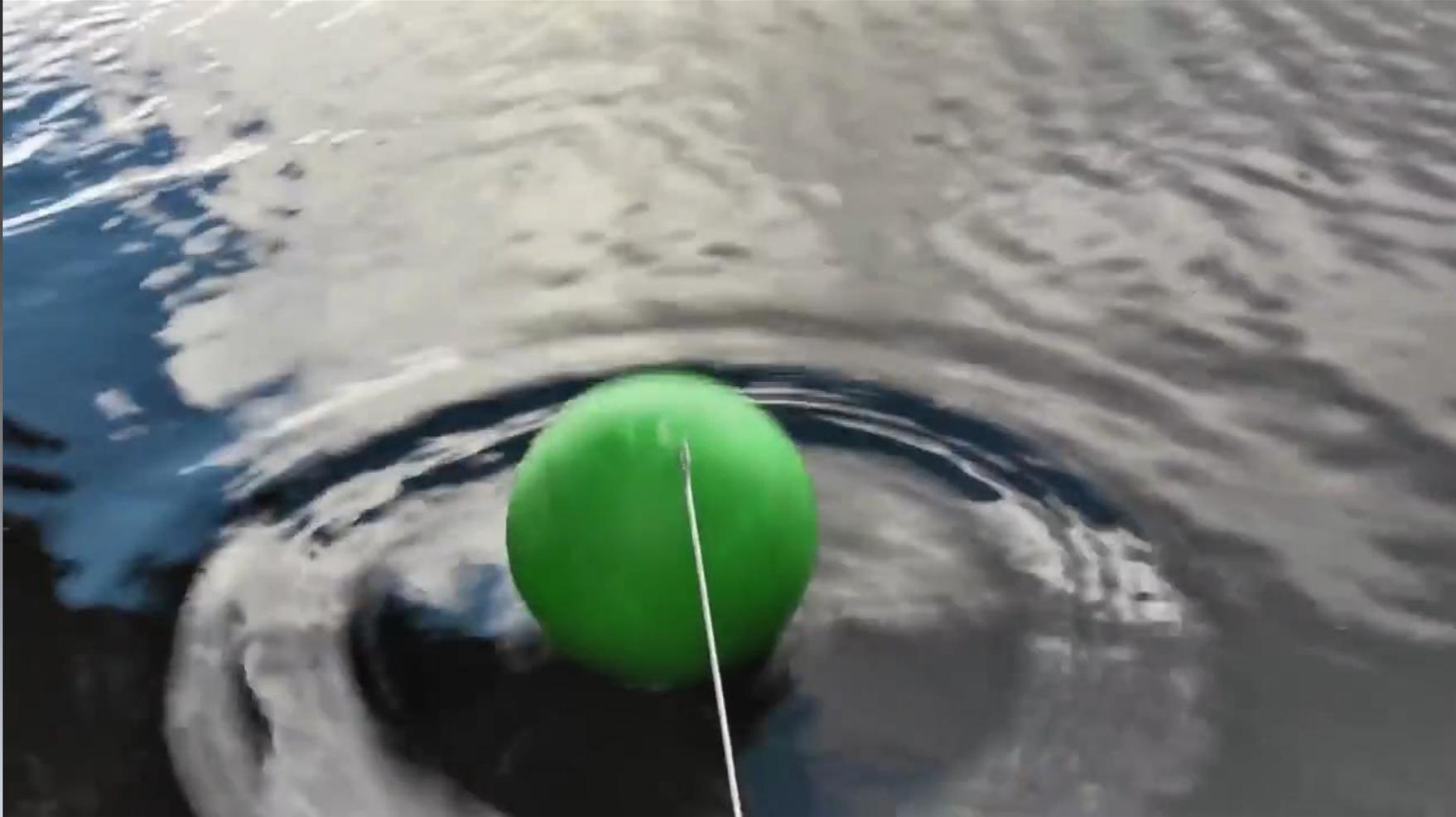
Wilhelm Röntgen (1845 – 1923)

Prix Nobel de physique en 1901

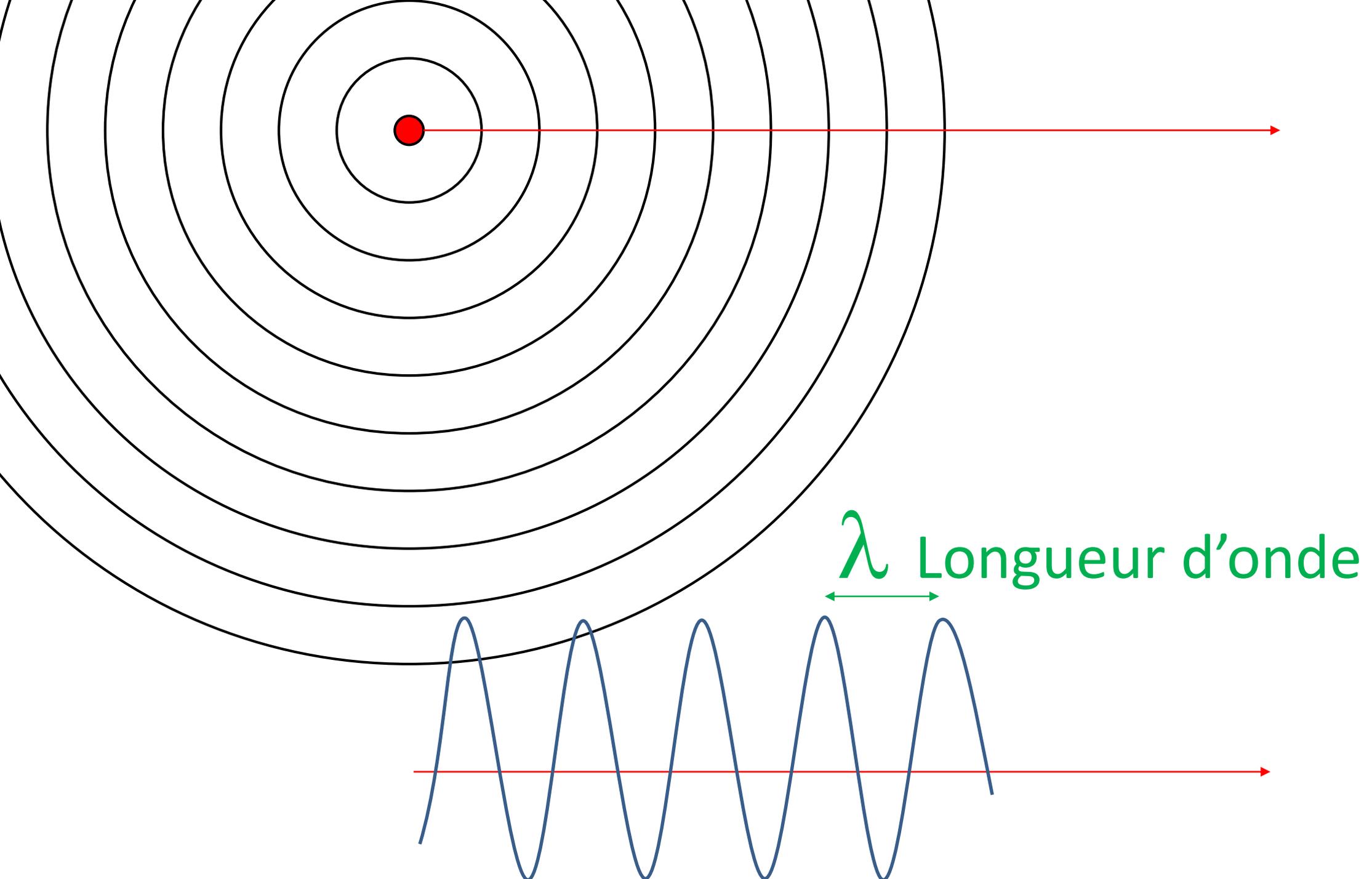
Etudie les rayons cathodiques
Découvre un rayonnement
invisible, pénétrant et énigmatique
qu'il appelle les rayons X.

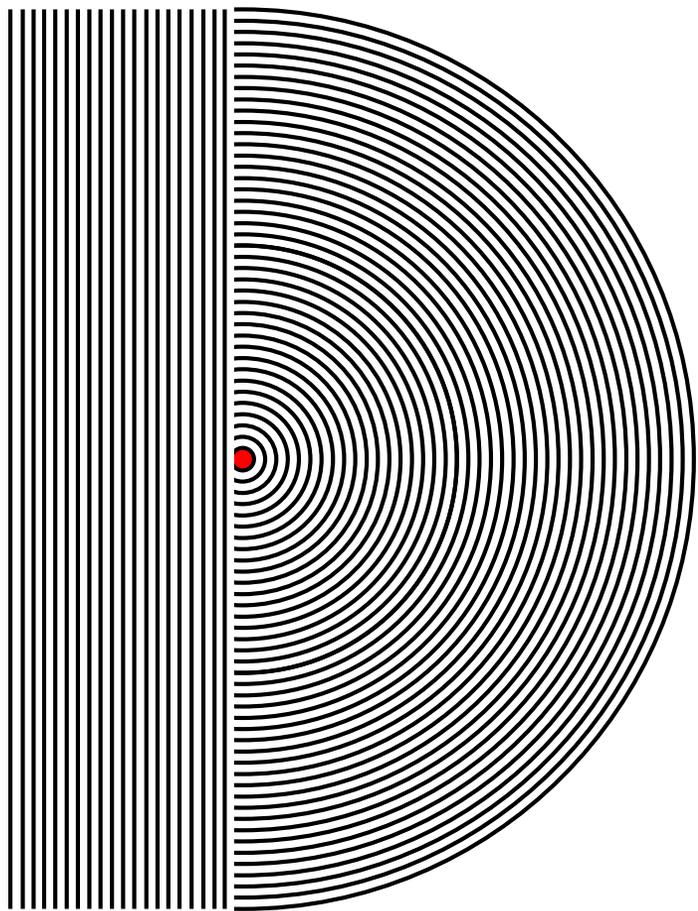


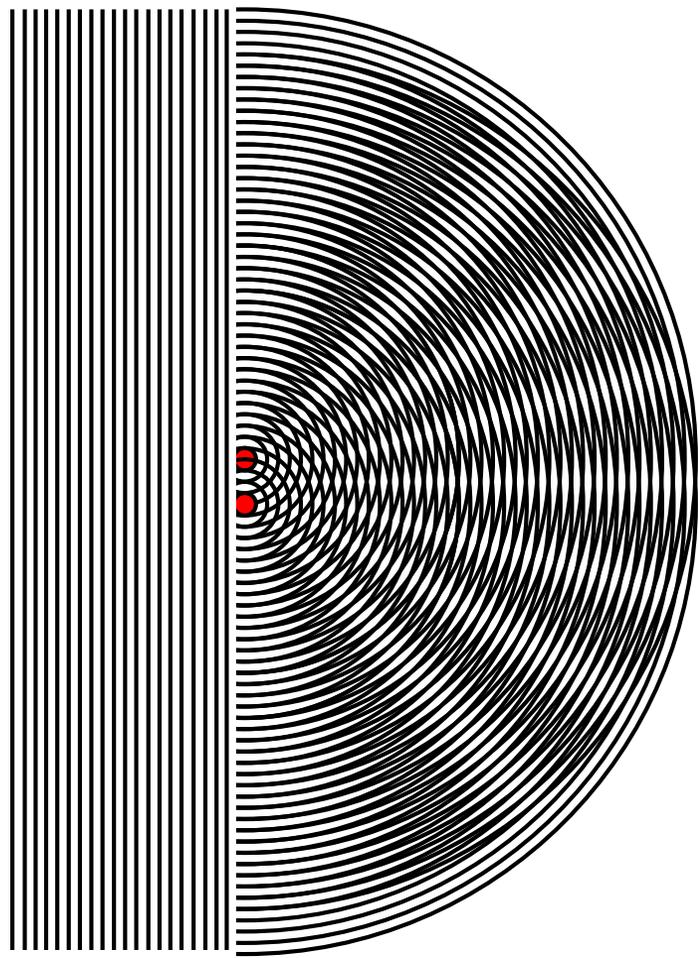
Rayon X sont des ondes : interférence



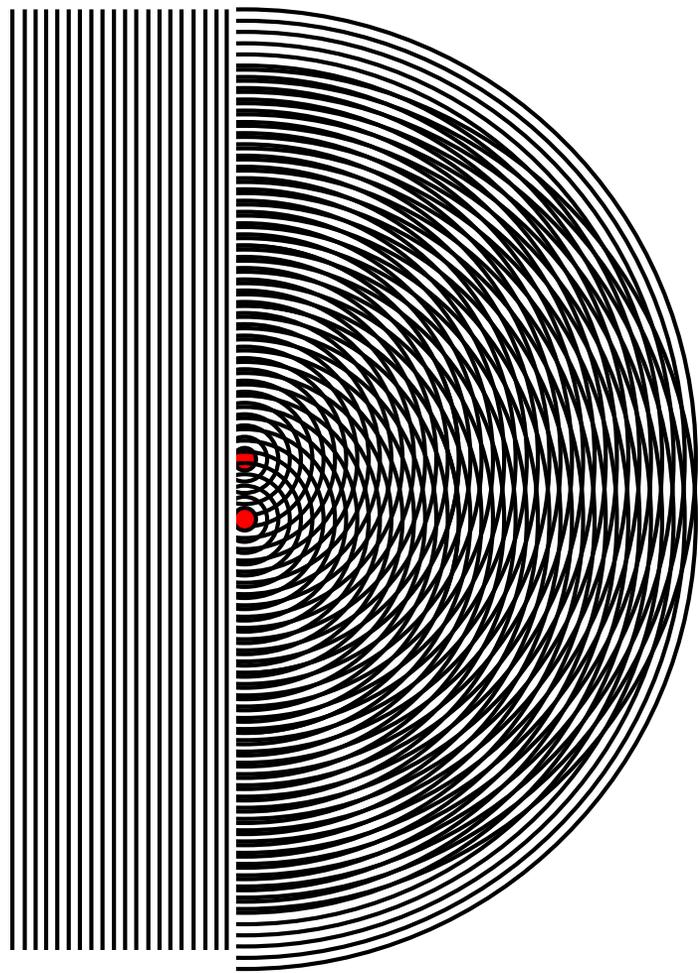
<https://www.youtube.com/watch?v=luv6hY6zsd0>



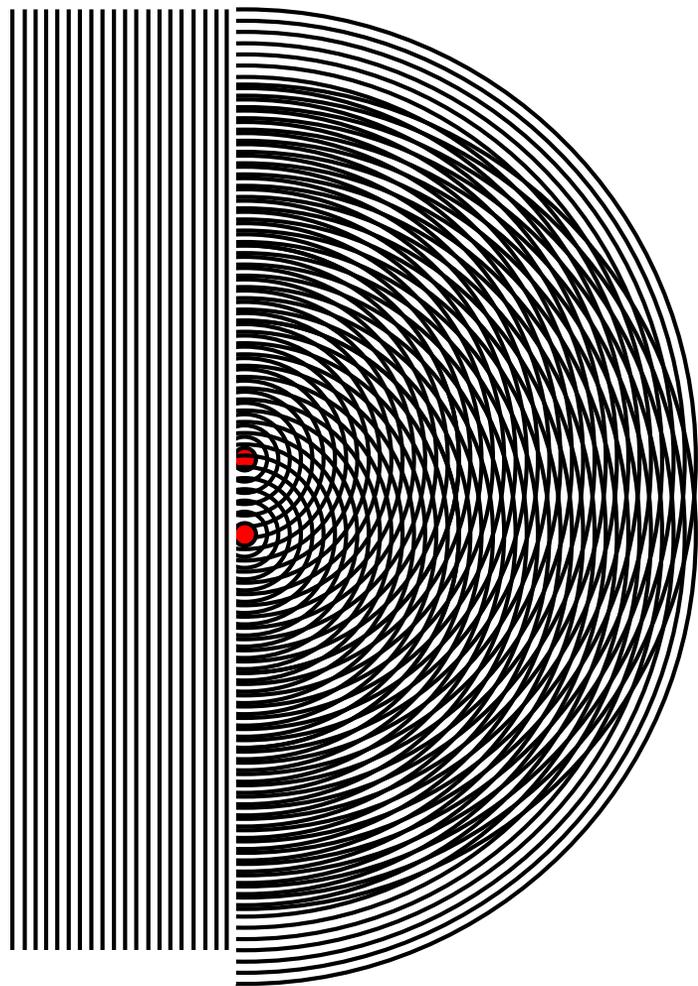




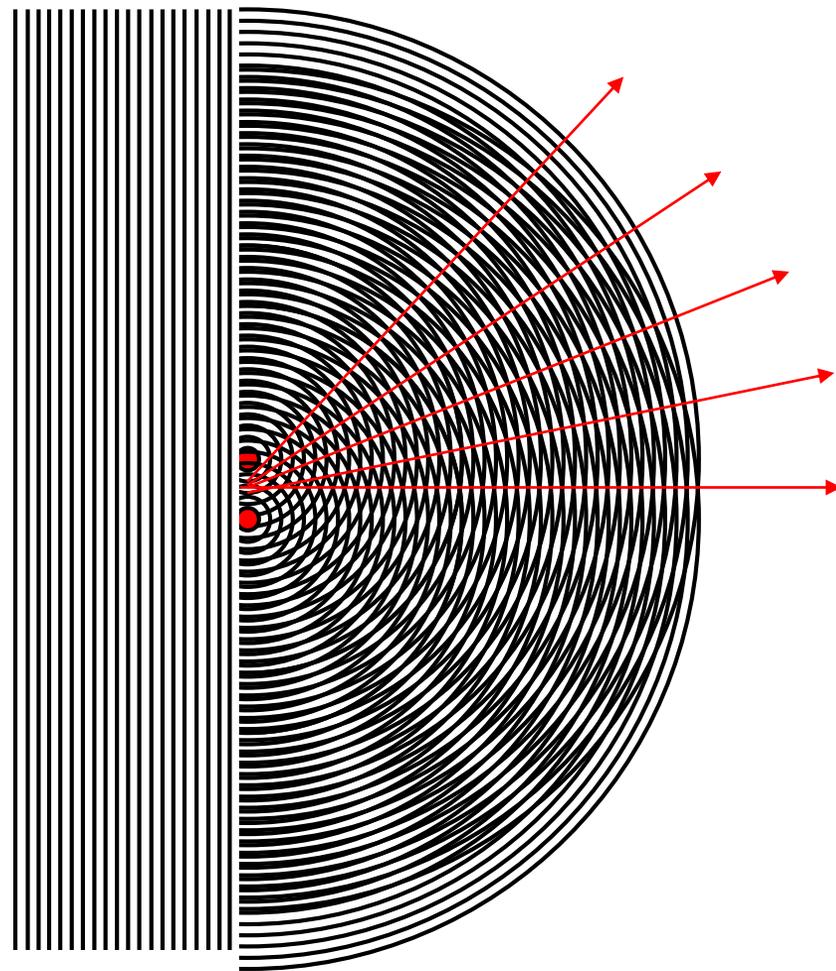
d distance entre les
objets qui diffusent l'onde



d distance entre les
objets qui diffusent l'onde



d distance entre les
objets qui diffusent l'onde

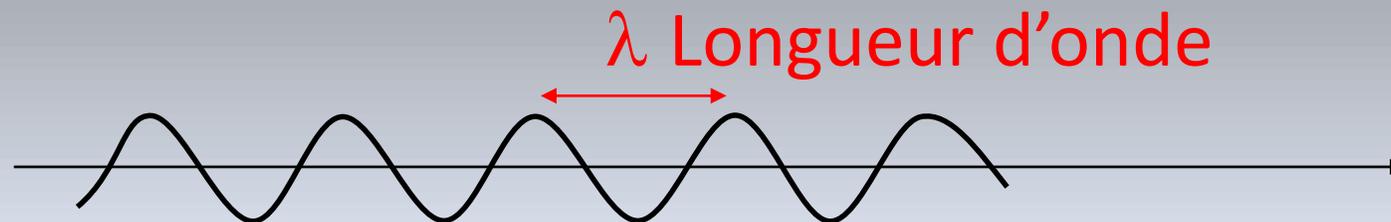
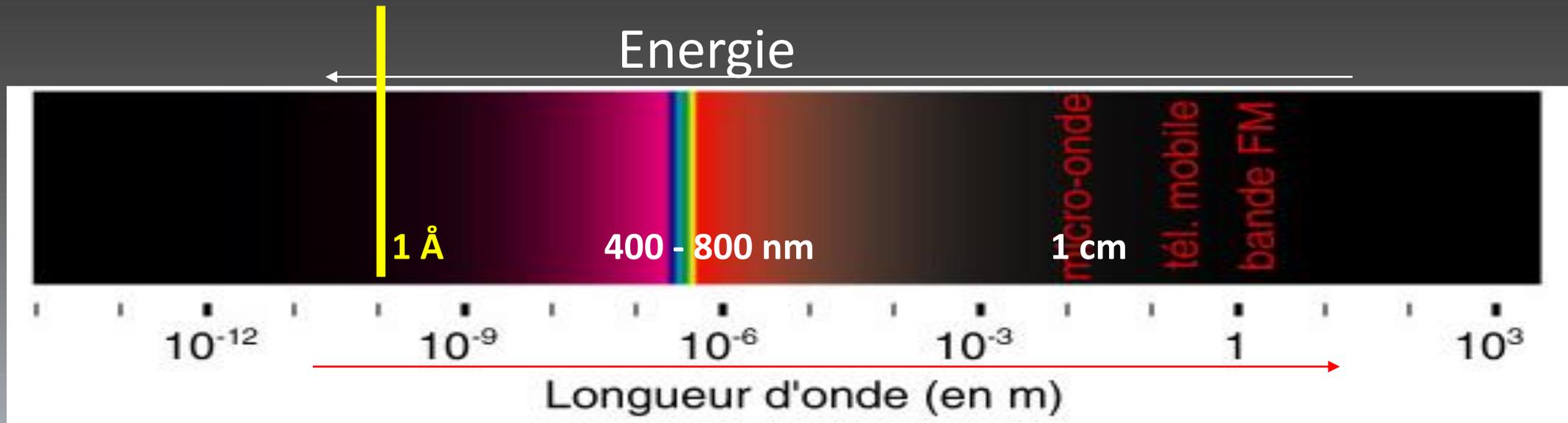
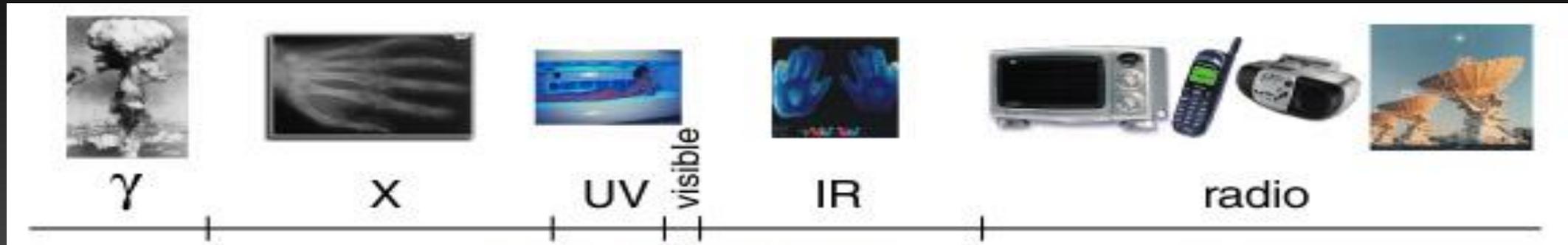


fractionne l'onde en
différents faisceaux

Phénomène de
diffraction :

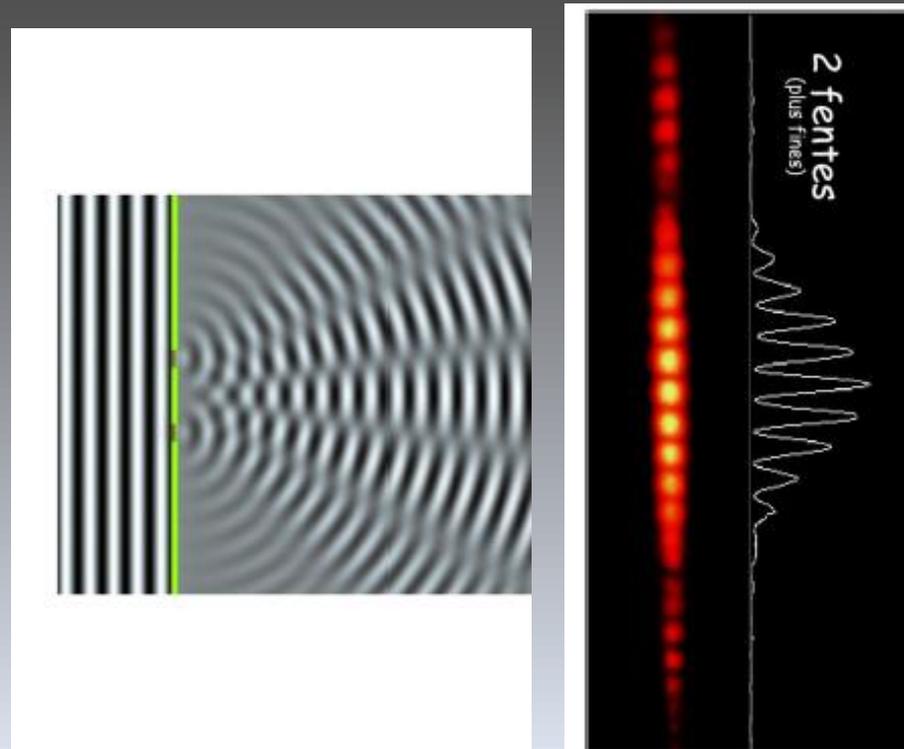
$$\lambda < d$$

La lumière : onde électromagnétique



Diffraction de
la lumière visible ($\lambda=532 \text{ nm}=0,5 \mu\text{m}$)
par un réseau de fentes ($d=20 \mu\text{m}$)

$$\lambda < d$$



Diffraction des rayons X?

$$\lambda < d$$

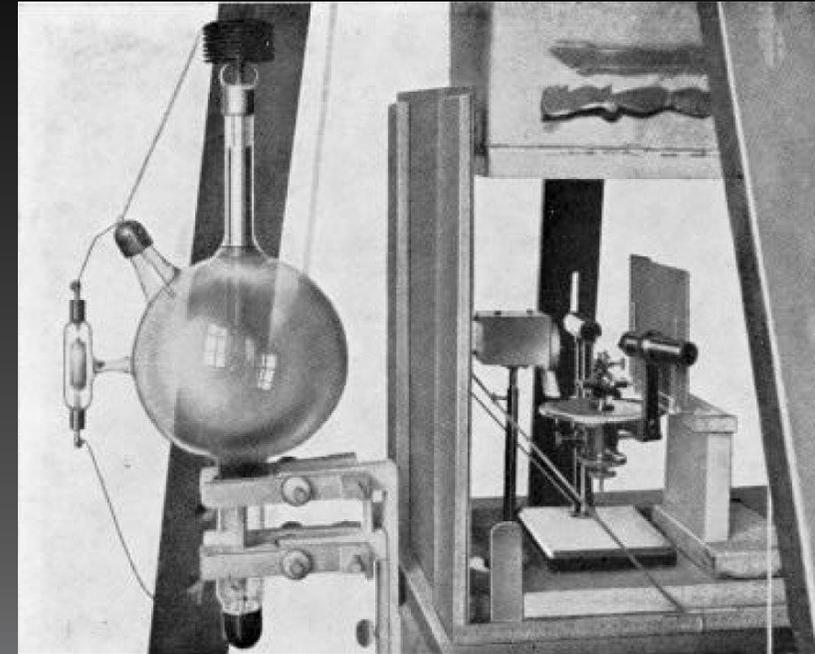
1912 la diffraction des rayons X



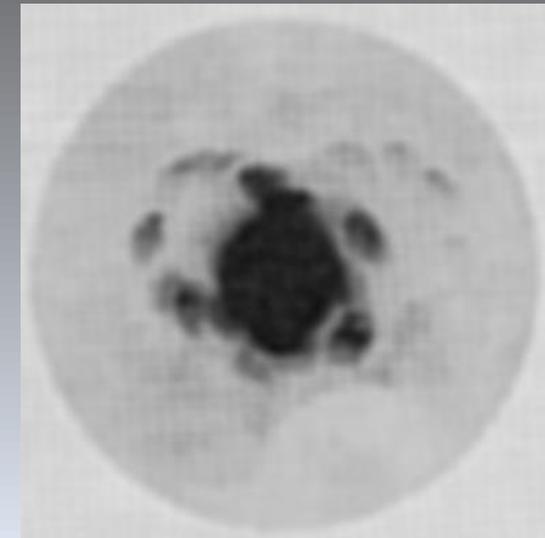
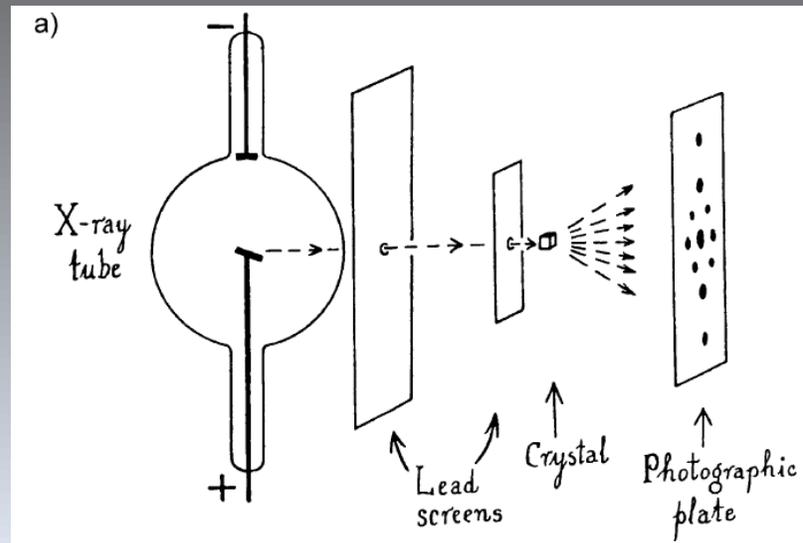
Max Von Laue (1879-1960)

Prix Nobel de Physique en 1914:

Découverte de la diffraction des rayons X par les cristaux

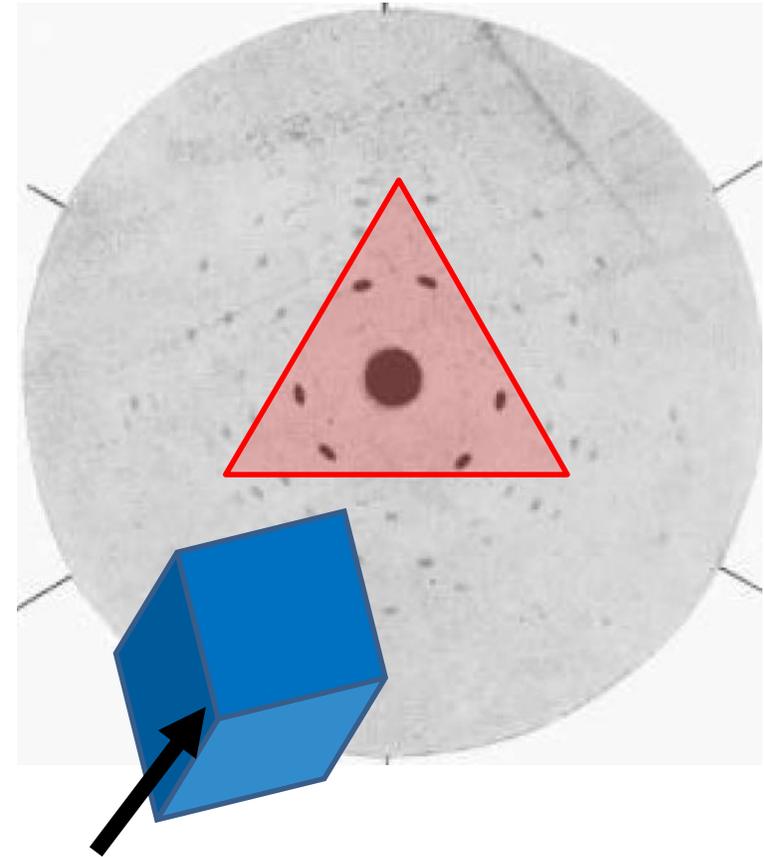
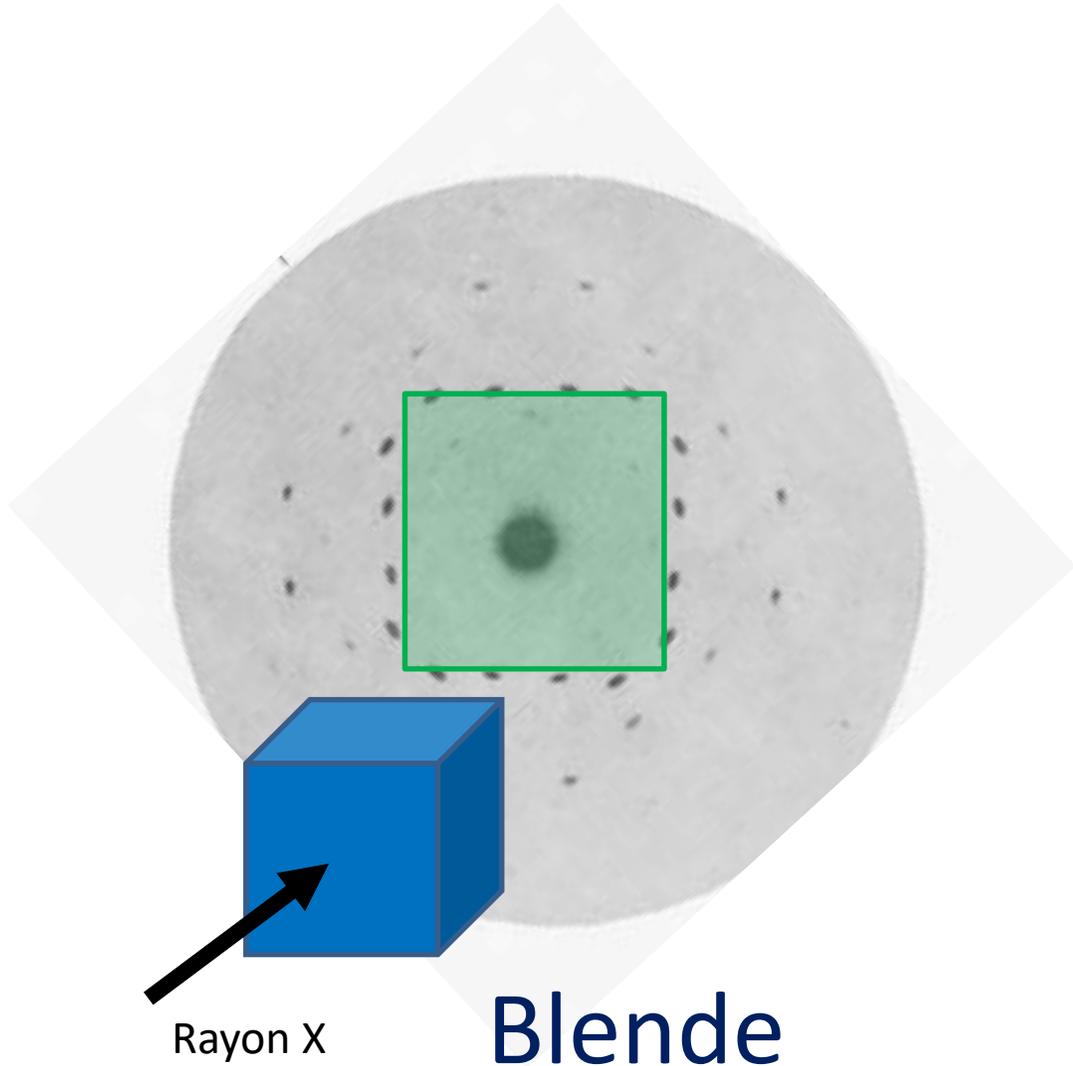


Le sulfate cuivrique
 $\text{CuSO}_4(\text{H}_2\text{O})_5$



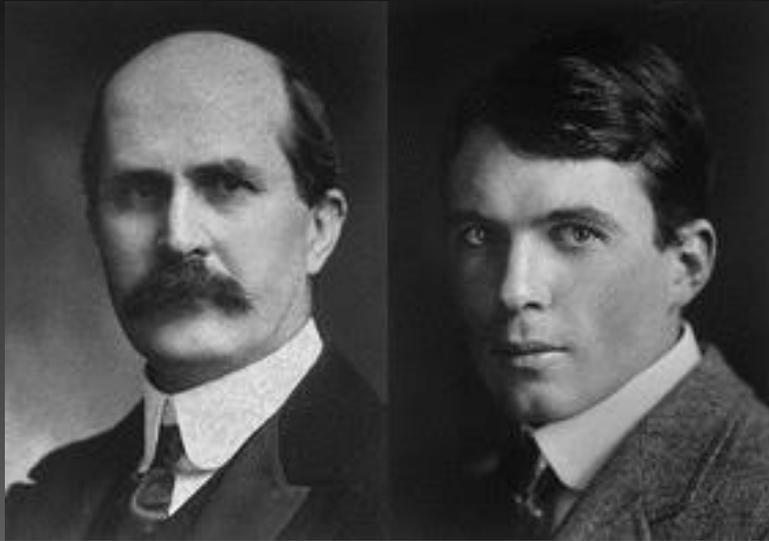
Le principe de Curie :

Les symétries des causes sont incluses dans celles des effets



Laue, Friedrich & Knipping 1912

Les premières structures de la matière à l'échelle atomique



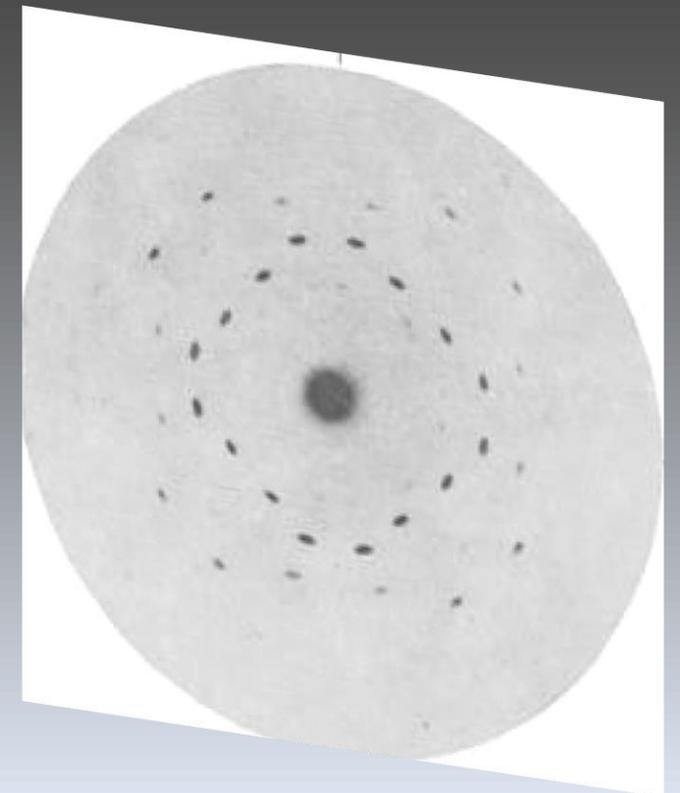
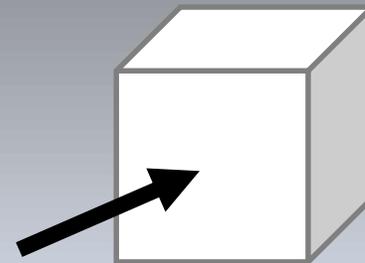
William Henry Bragg (1862-1942)

William Lawrence Bragg (1890-1971)

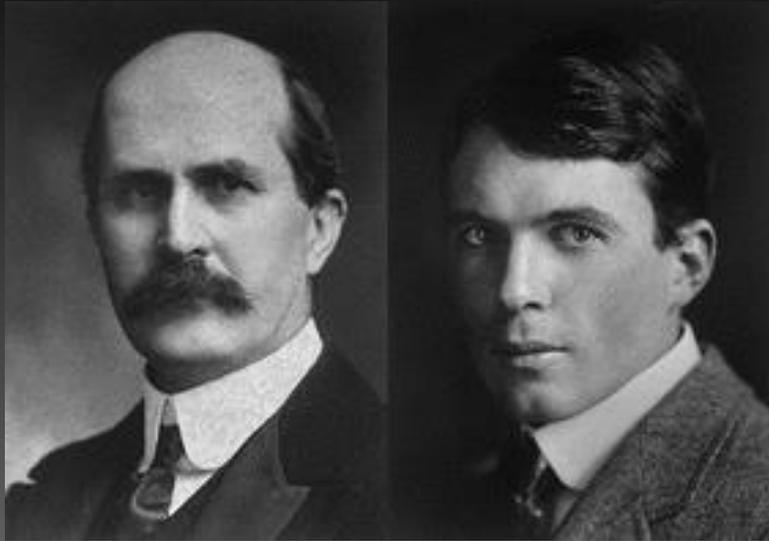
Premières analyse des structures cristallines à l'aide des rayons X

Prix Nobel de Physique en 1915

Partir de la mesure
pour voir comment les
atomes s'organisent



Les première structure de la matière à l'échelle atomique



Sel
NaCl



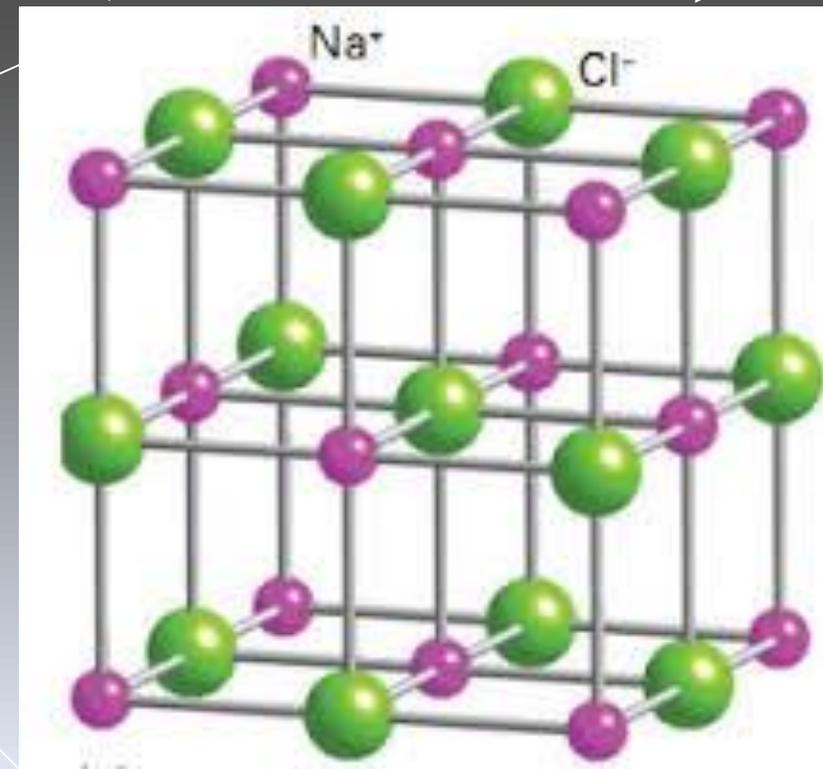
1mm



Zoom
x10 000 000

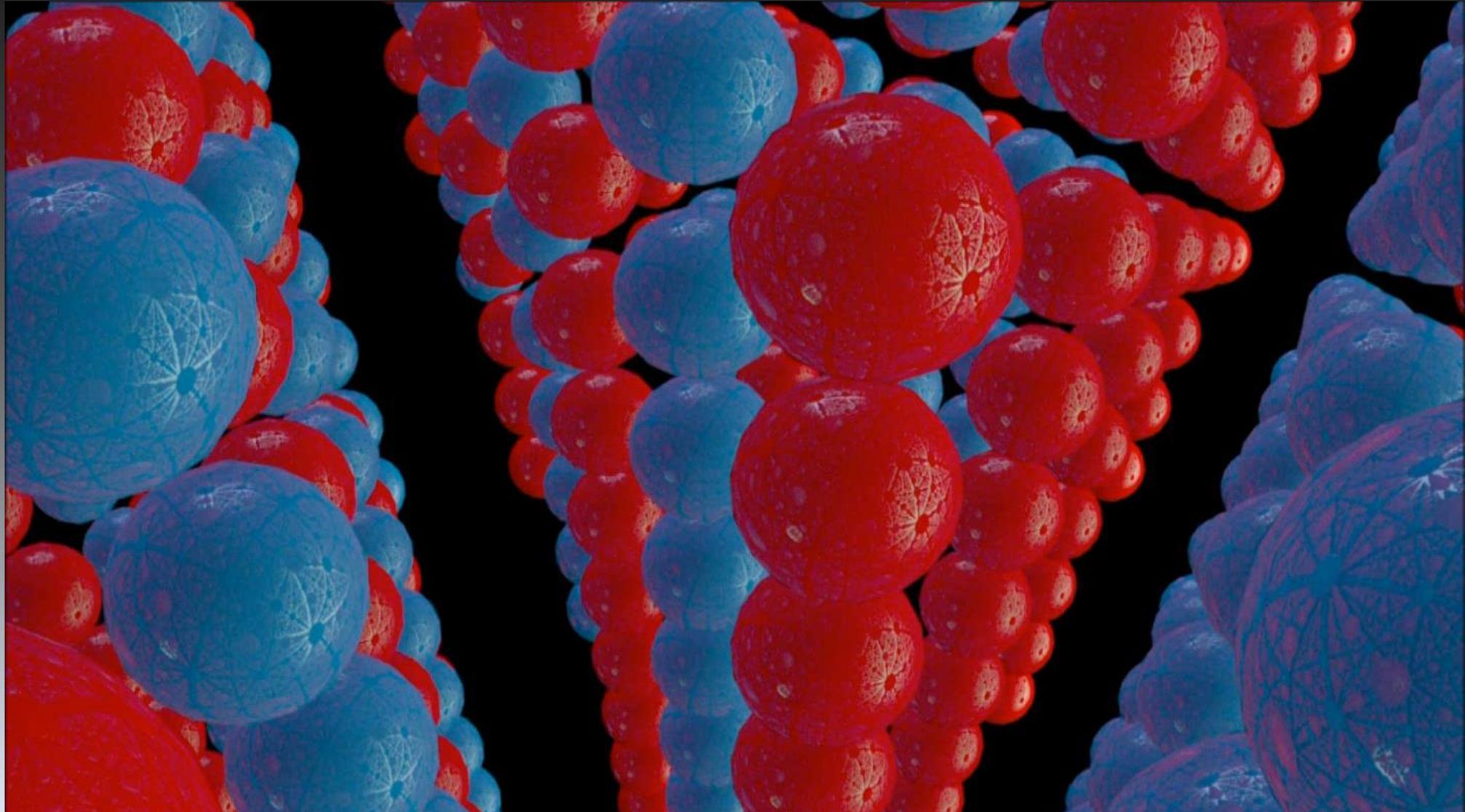
5 Å

0.000 000 5 mm



La cristallographie

International
Union of
Crystallography

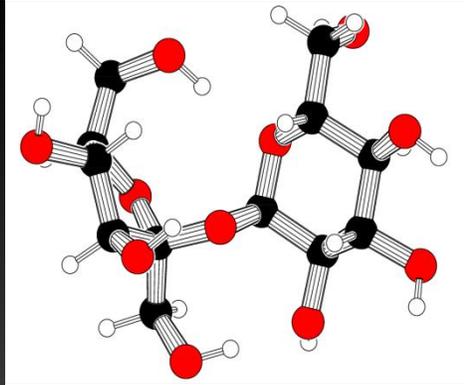


Des cristaux tels des boules à facettes

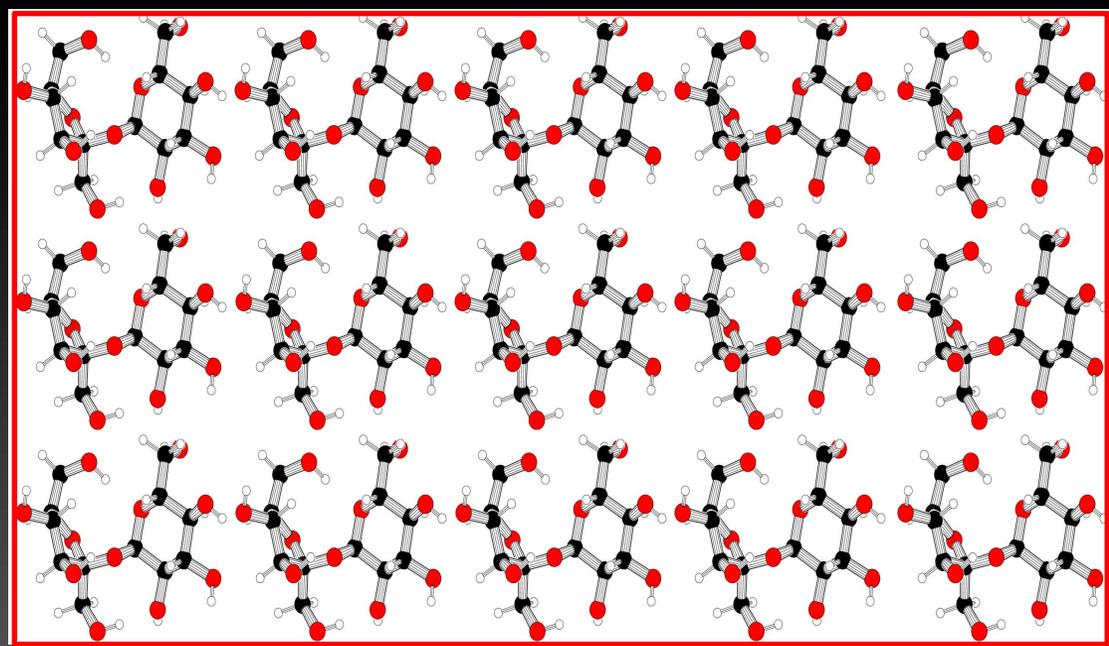




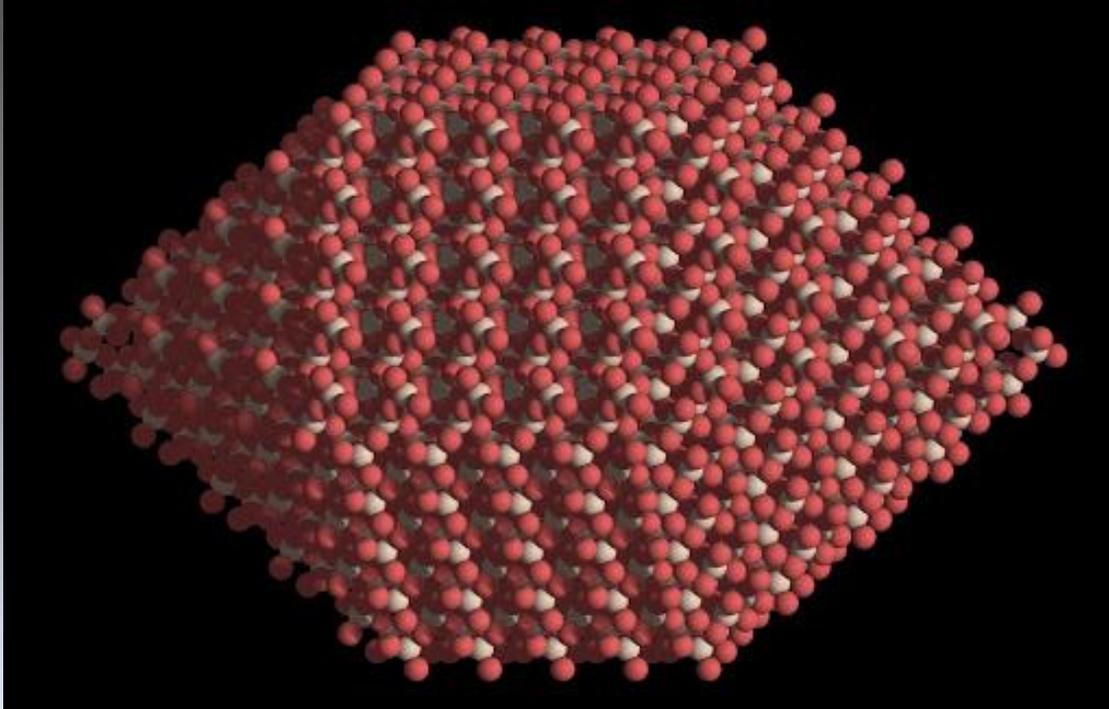
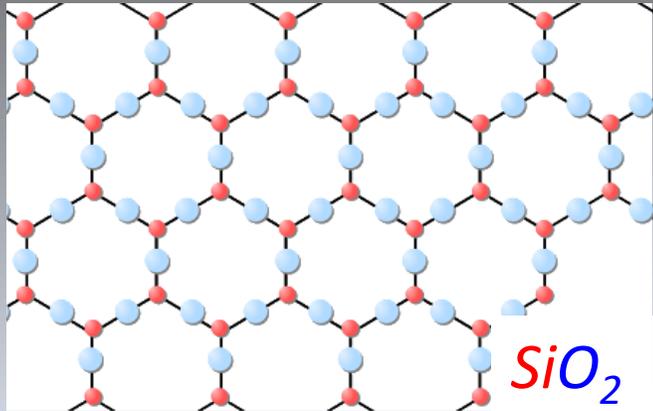
sucre



Saccharose

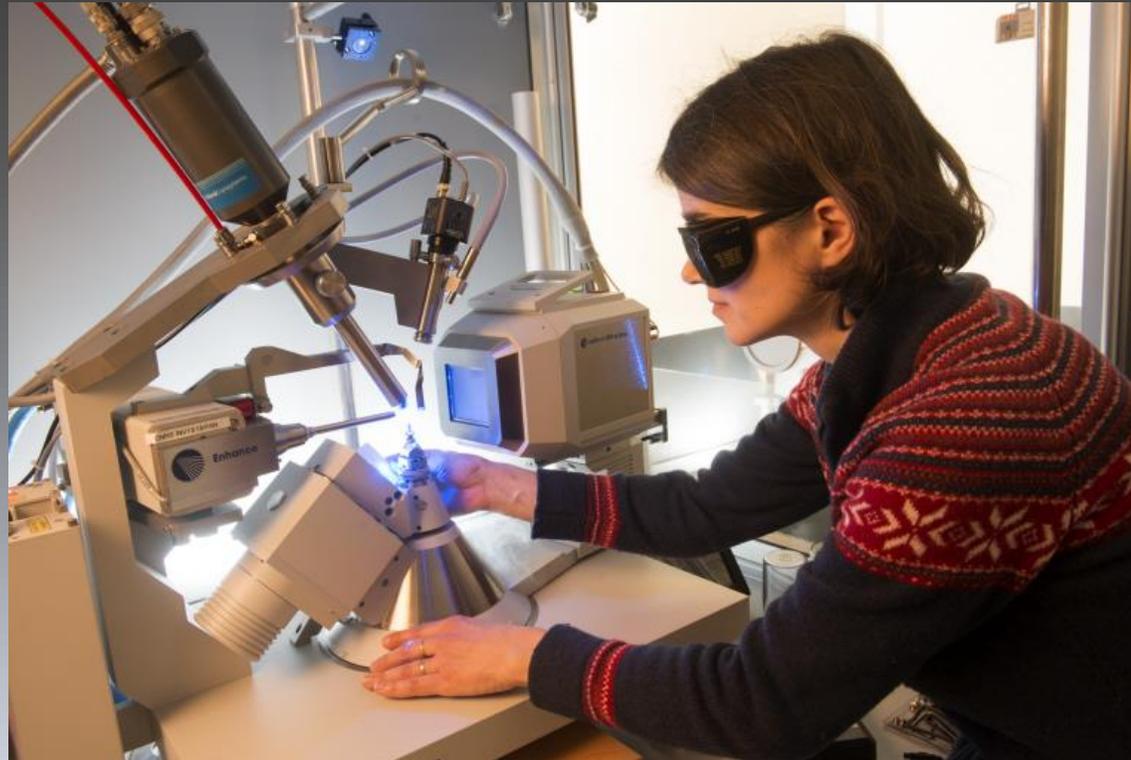


Quartz

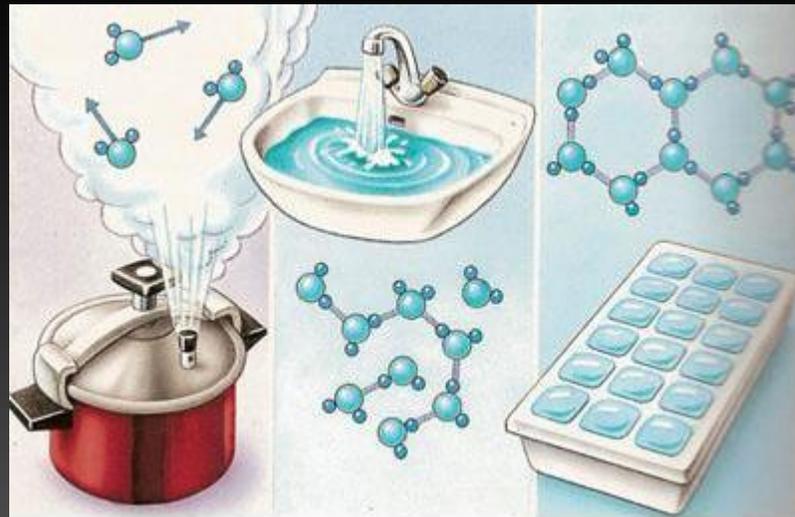
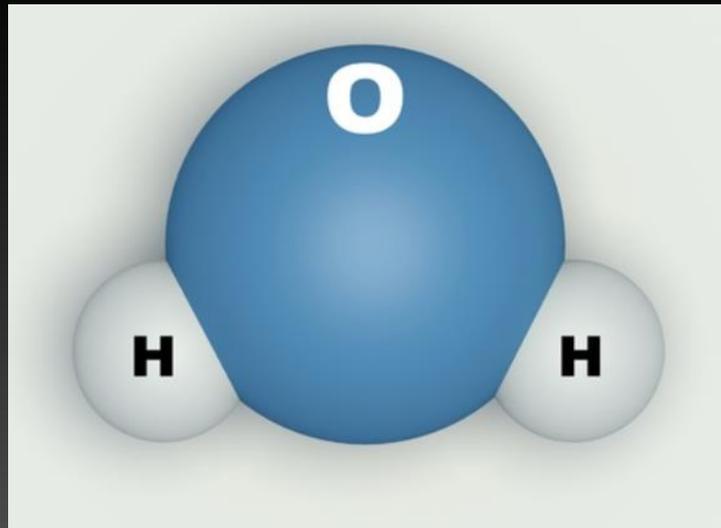


La cristallographie moderne

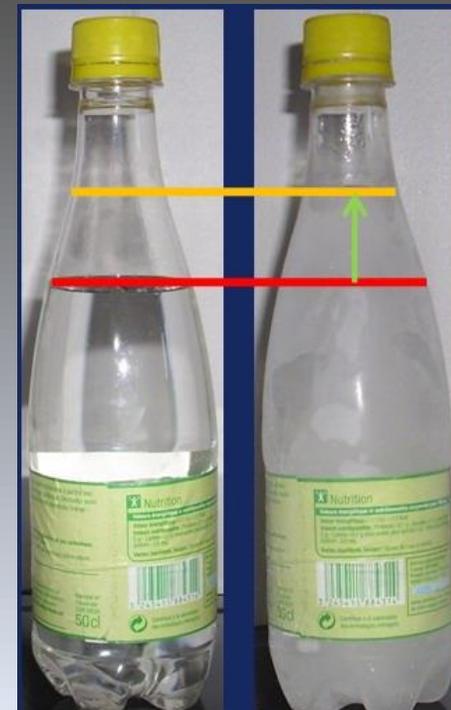
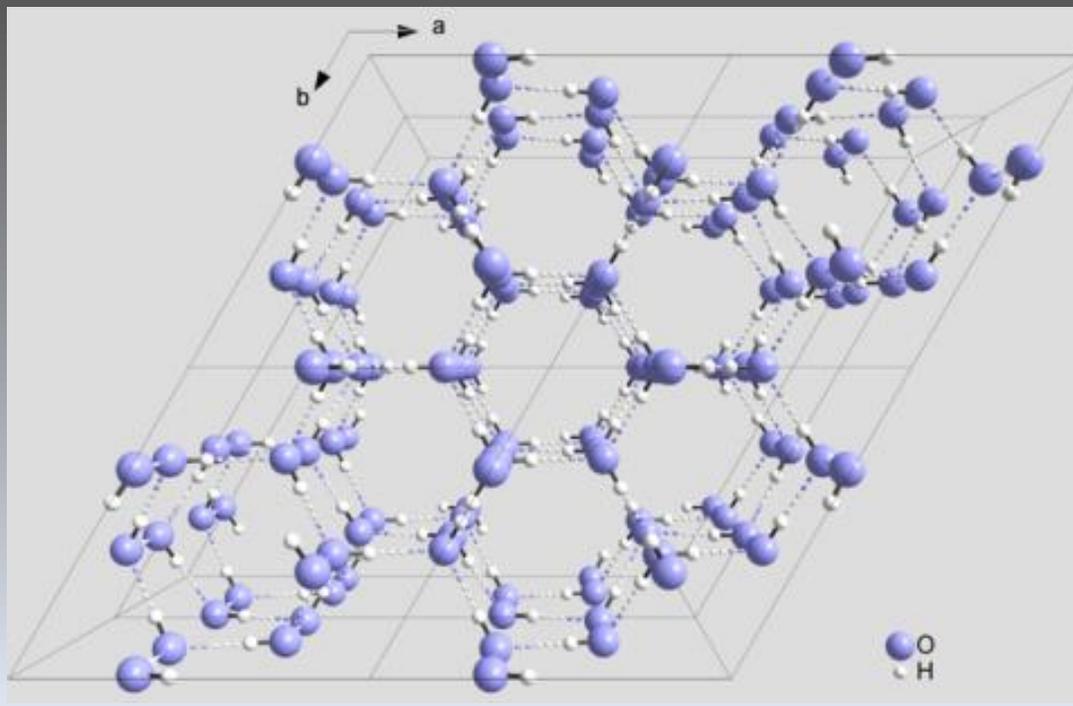
relation structure / propriété / fonction



L'eau



Glace

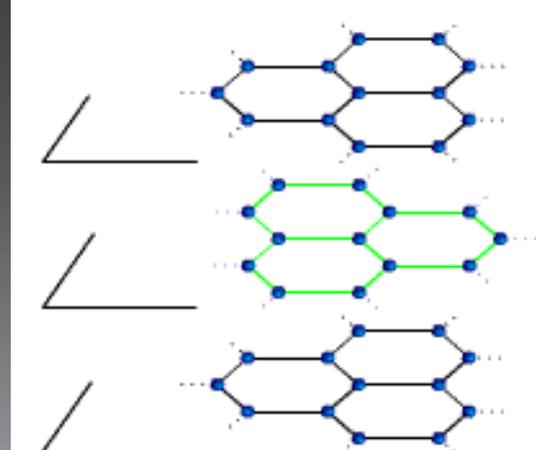
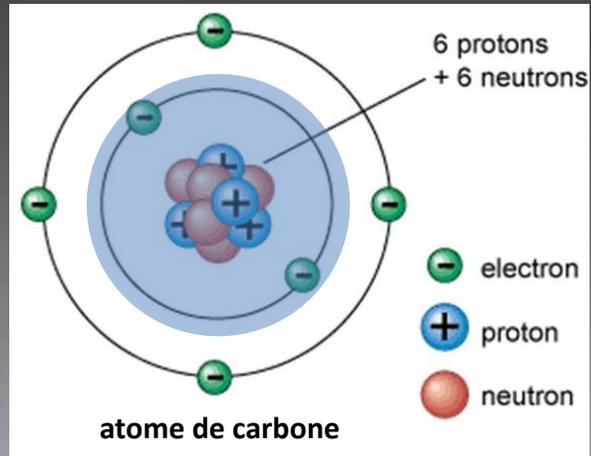
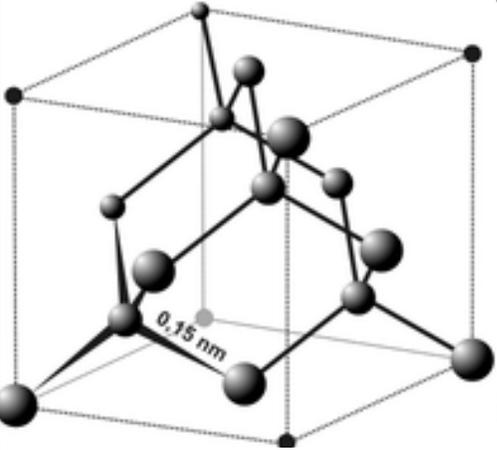


Diamant

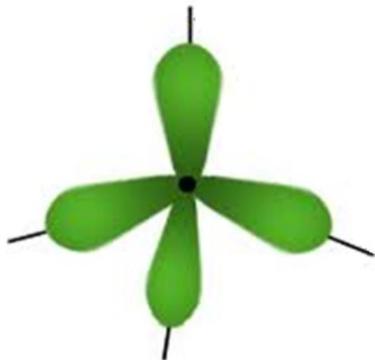
Graphite



Quel point commun?

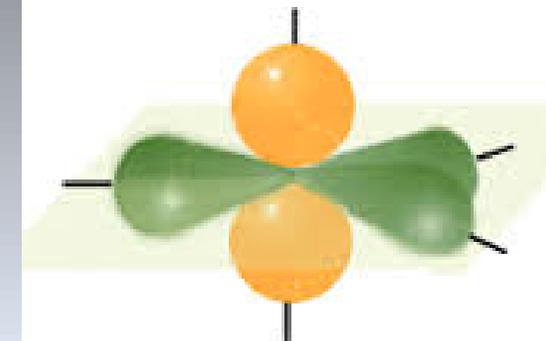


Comprendre la fonction :
Etudier la structure



Liaison 3D fortes
Électron liés

Liaison 2D
des é libres



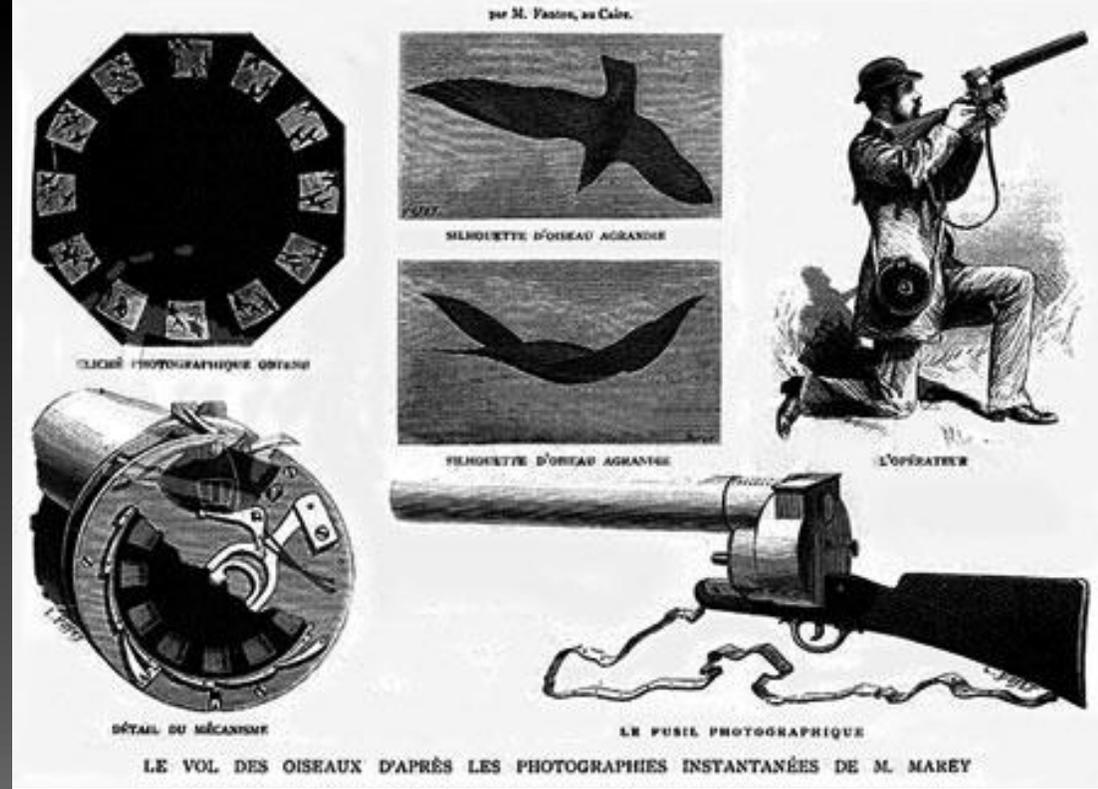
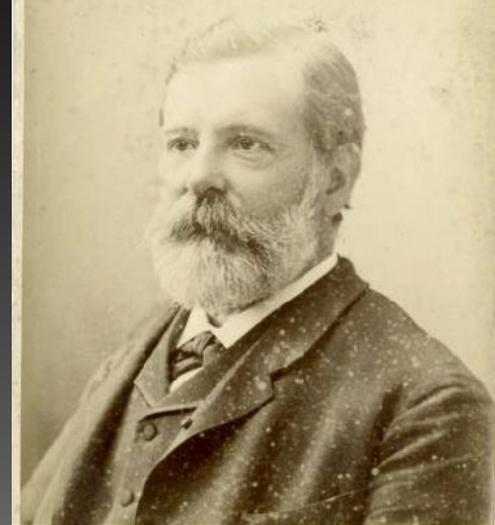
**Comment étudier
la dynamique?
(l'évolution dans le temps)**

Décomposer un mouvement : quelle échelle de temps? manège, humains, opéra



Décomposer les mouvements Pour comprendre les processus

Etienne-Jules Marrey
physiologiste français



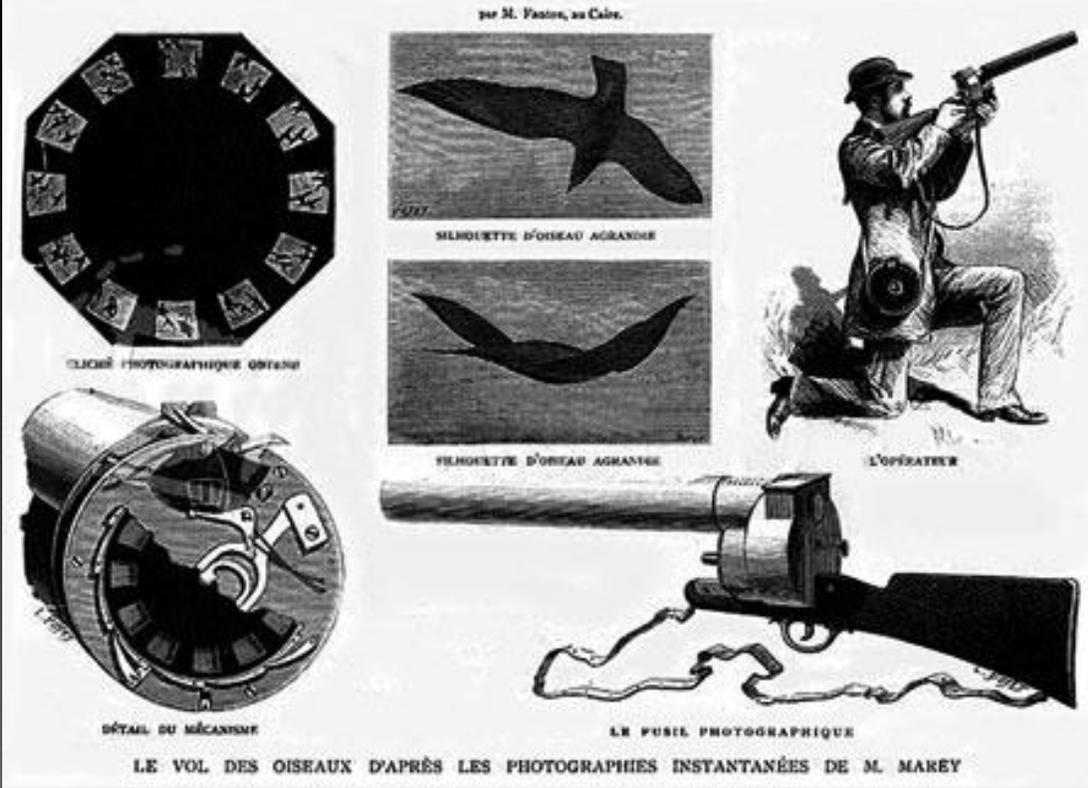
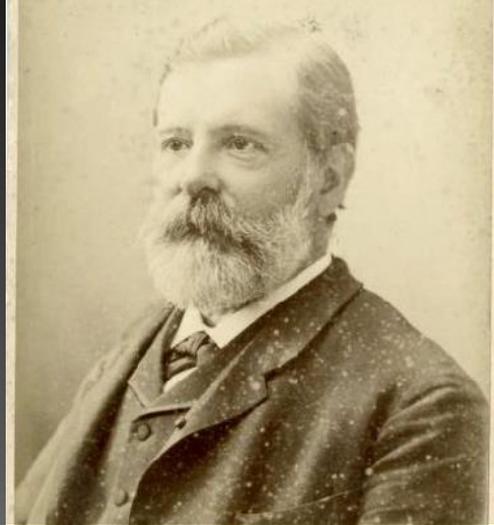
plaque sensible circulaire

Fusil photographique



Décomposer les mouvements Pour comprendre les processus

Etienne-Jules Marey
physiologiste français



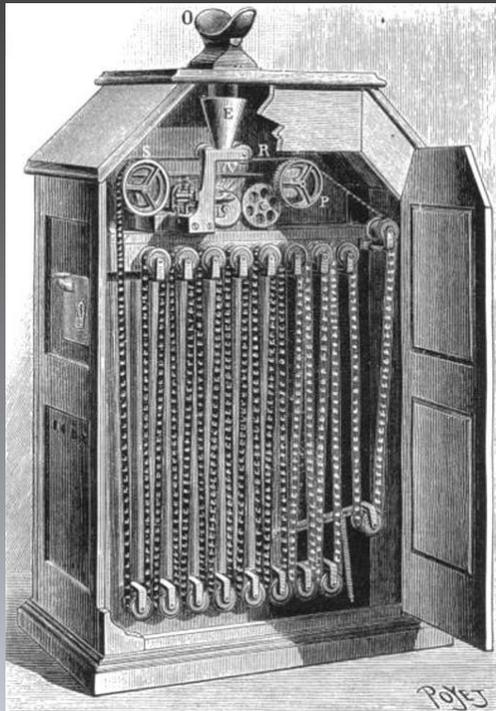
chronophotographie
d'un vol de héron

1895

"Movements"

1891 Thomas Edison

Met au point :
la première caméra argentique
le kinétoscope



Fred Ott's
Sneeze

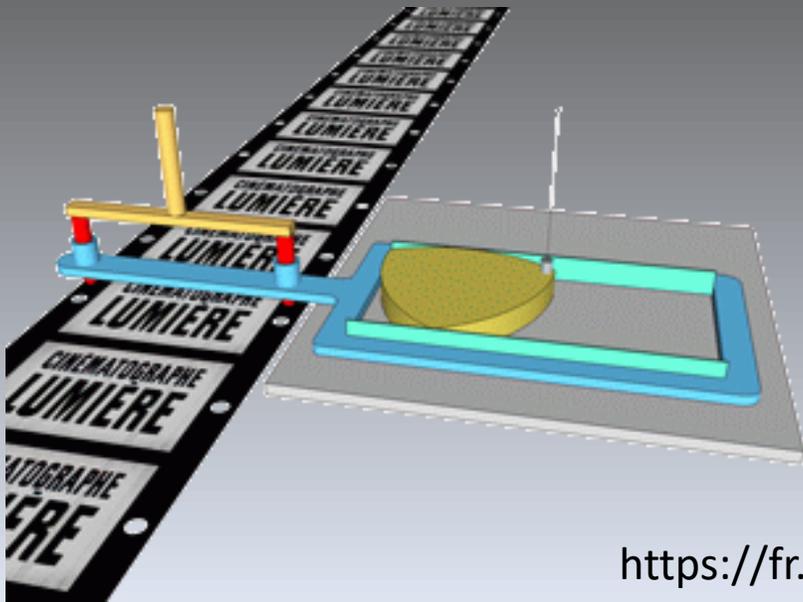


Par Joram van Hartingsveldt — Travail personnel, CC BY-SA 3.0,
<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=924146>

1895

L'invention du cinéma

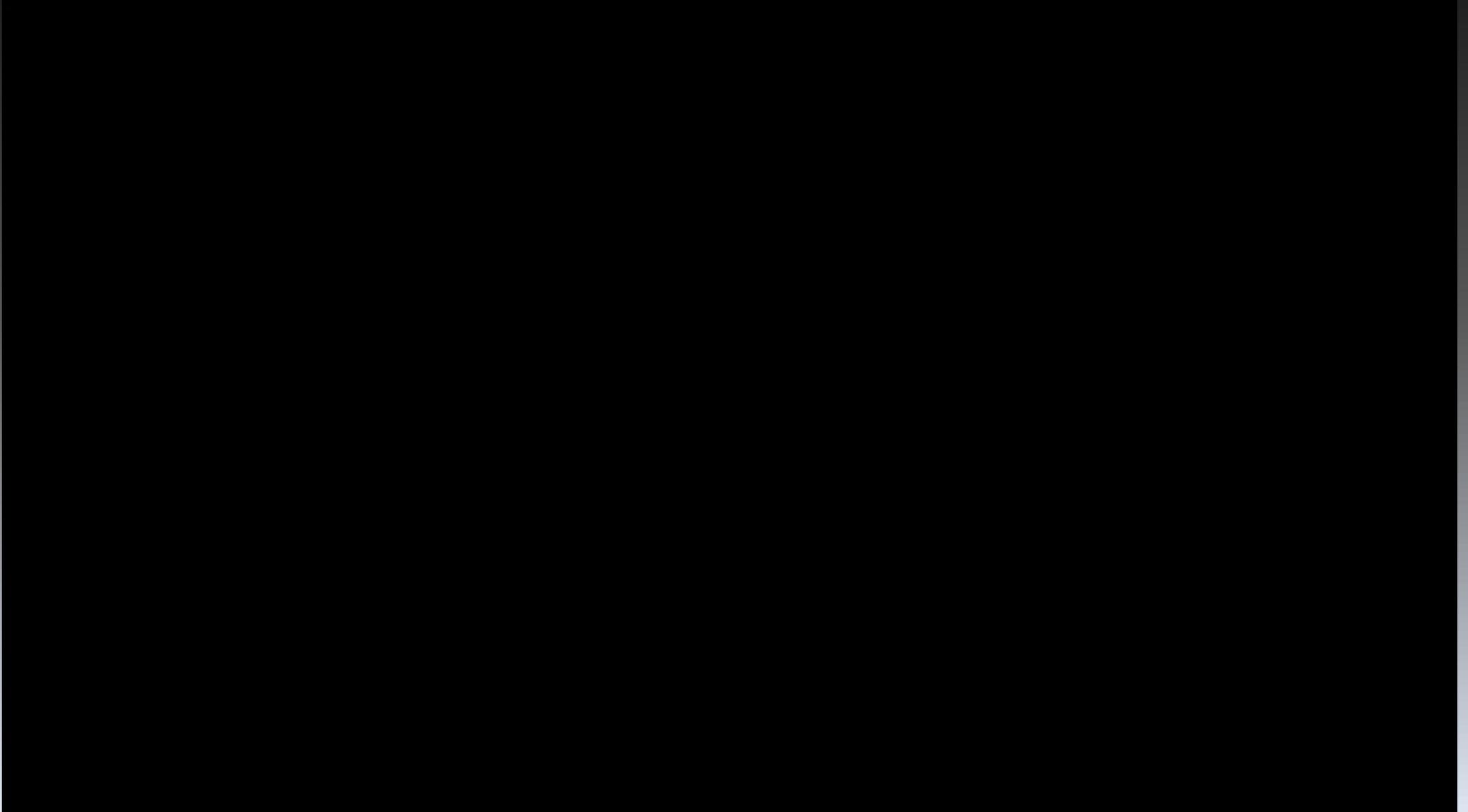
1895 Les frères Lumière déposent le brevet du cinématographe : filmer et projeter



https://fr.wikipedia.org/wiki/Auguste_et_Louis_Lumi%C3%A8re

"La Sortie de l'usine Lumière à Lyon"

film réalisé par **Louis Lumière**, sorti en **1895**, considéré comme le premier film du cinéma



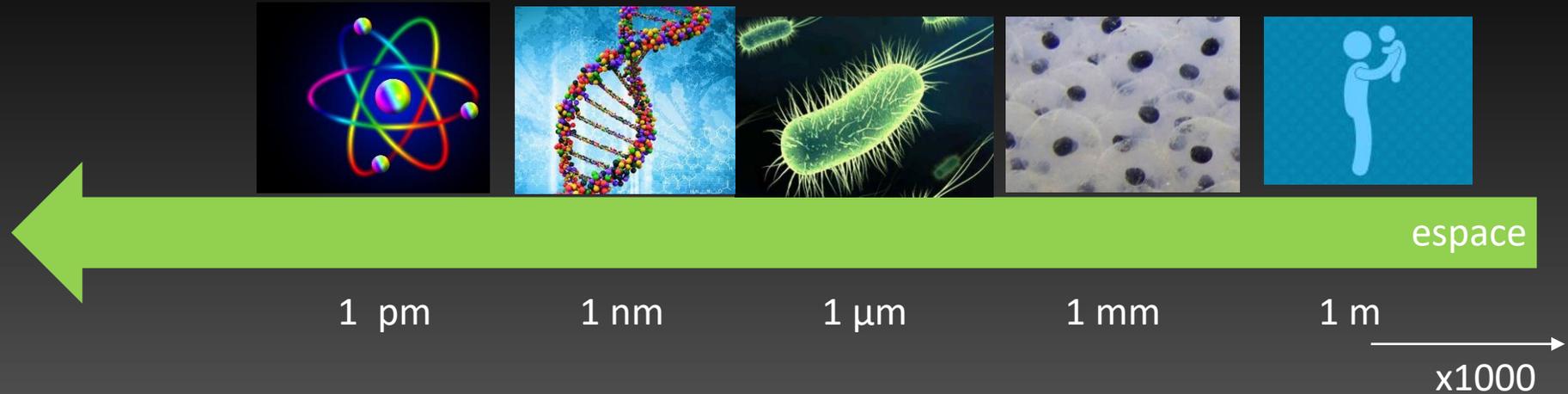
Mesures stroboscopiques



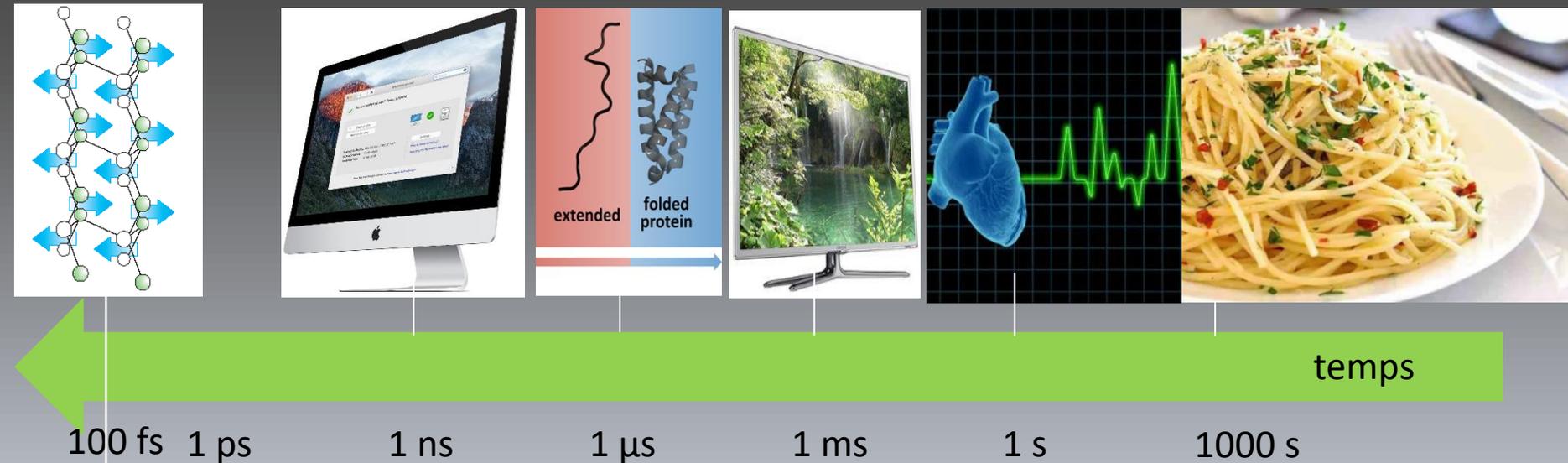
Vidéo ici <https://www.youtube.com/watch?v=yr3ngmRuGUc>

Comment voir bouger les atomes en temps réel ?

échelle d'espace



Échelle de temps?



Mouvement atomiques $\approx 0,000\ 000\ 000\ 000\ 010\ \text{s}$
Soit dix fois un milliardième de microseconde

Utiliser la lumière : stroboscopes

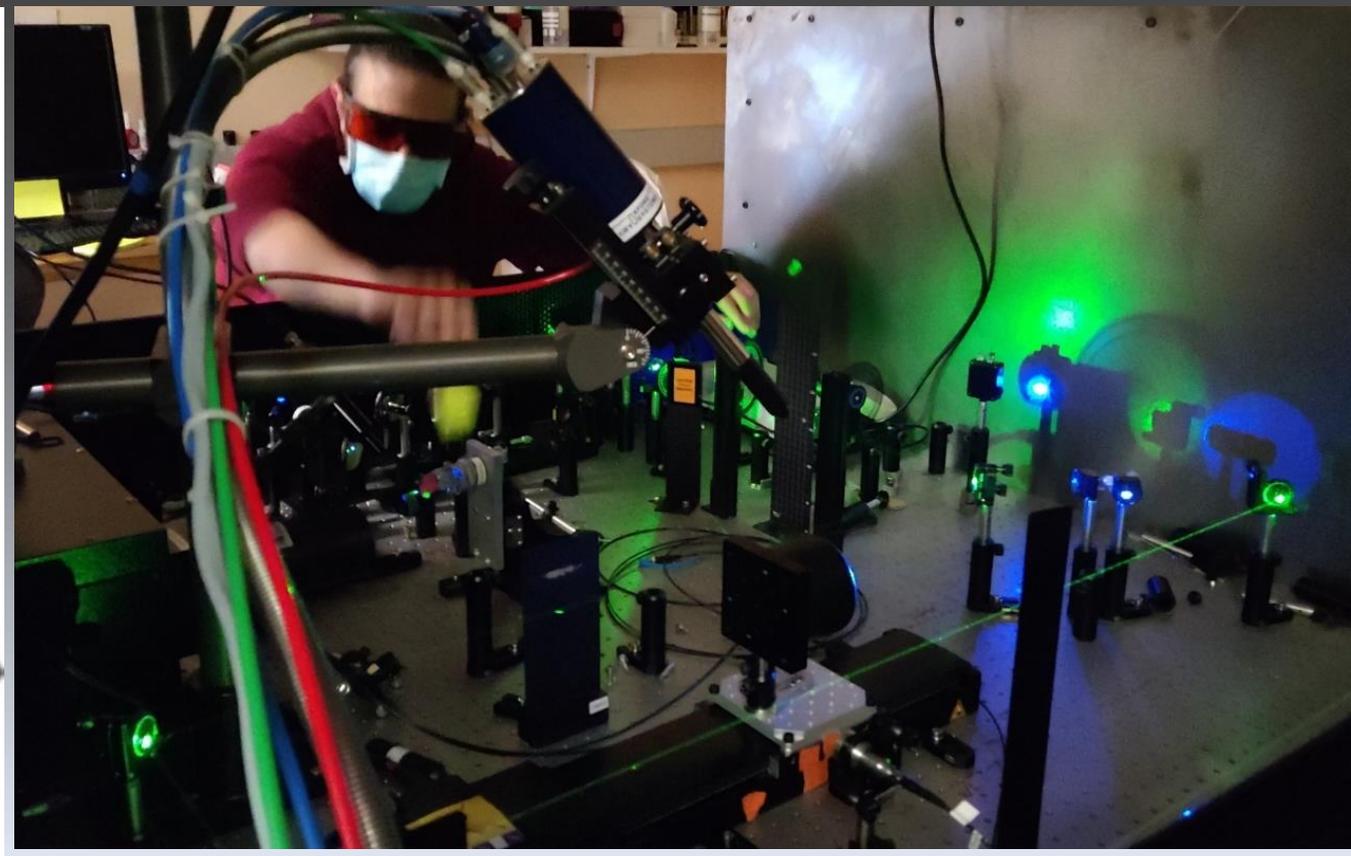
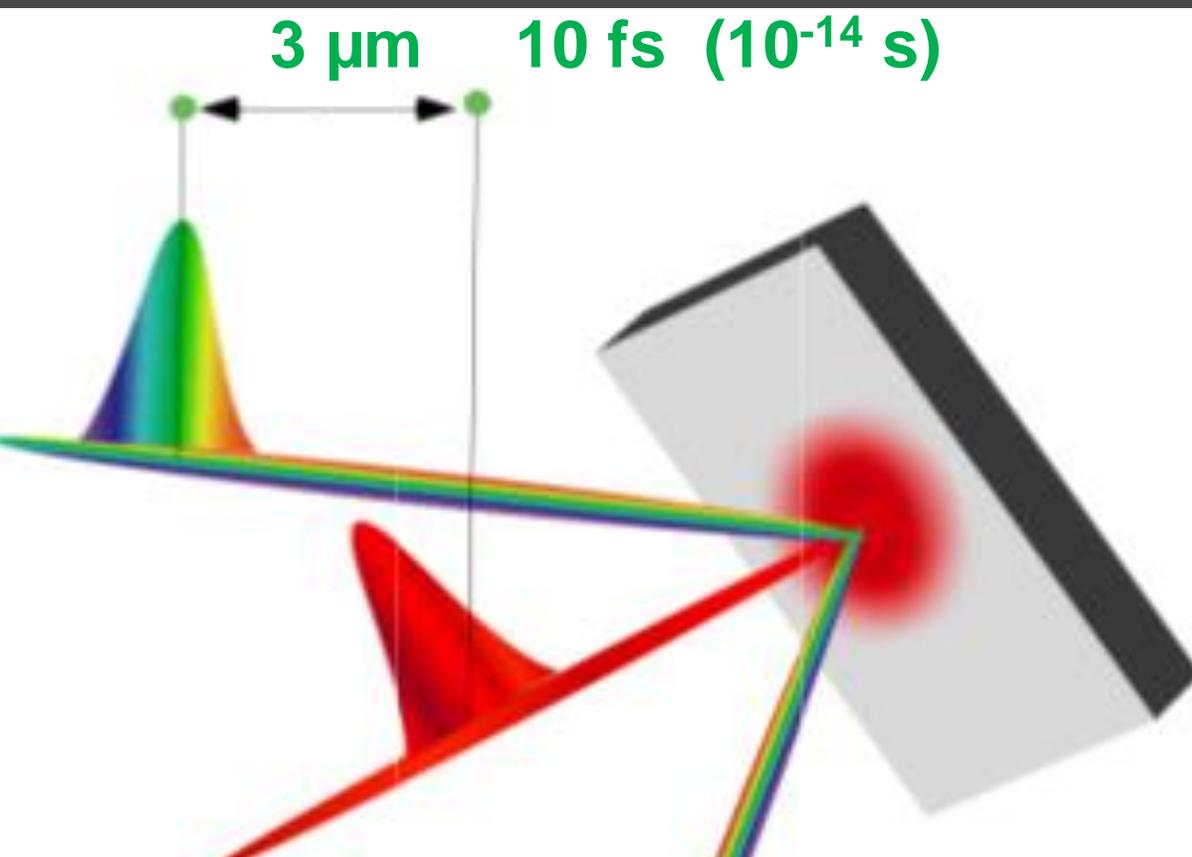
<https://www.youtube.com/watch?v=BwNpadDLmTA&feature=youtu.be>



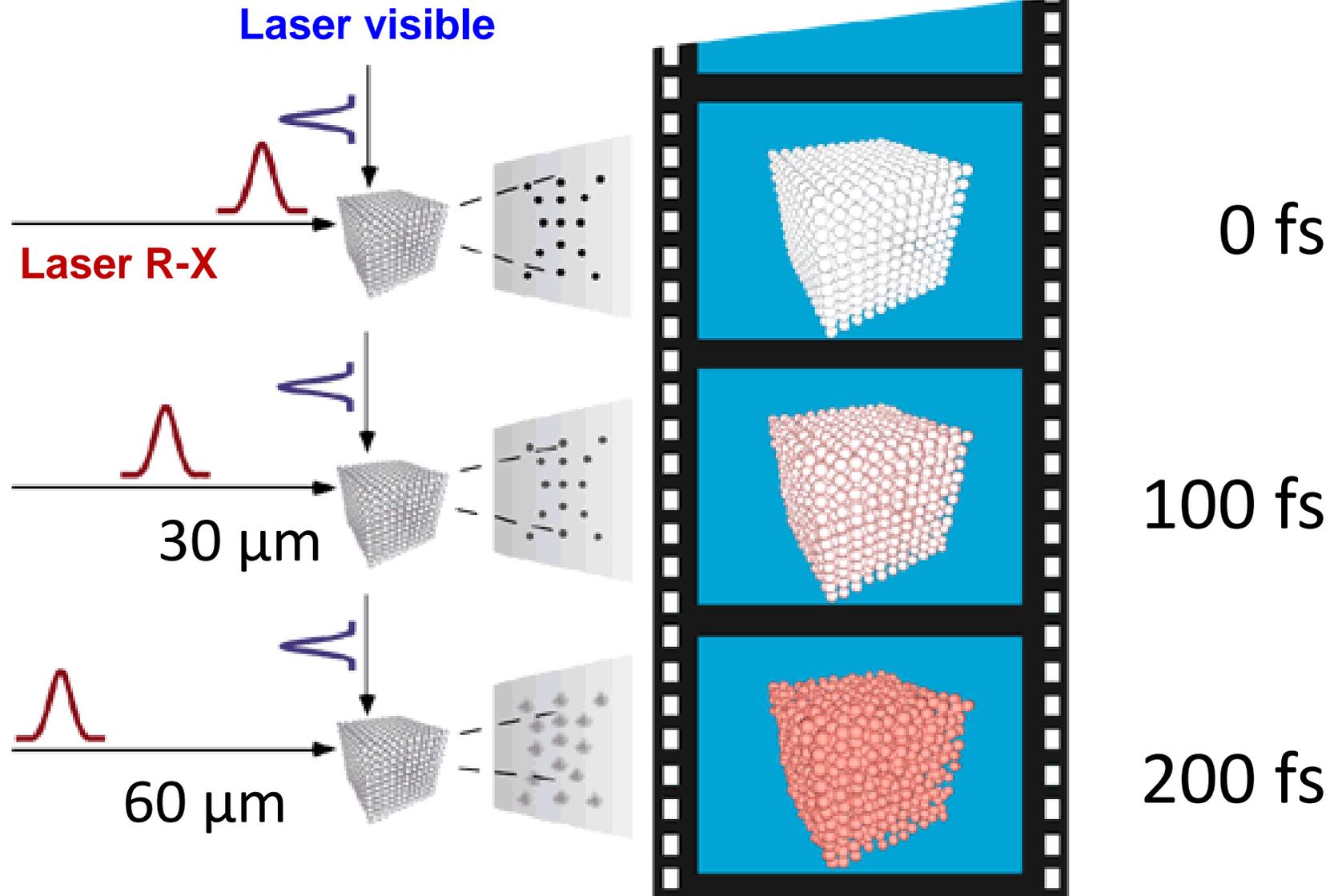
Flash laser femtosecondes

$c \approx 300\,000 \text{ km/s}$

Mesurer le temps avec la lumière



Filmer les atomes



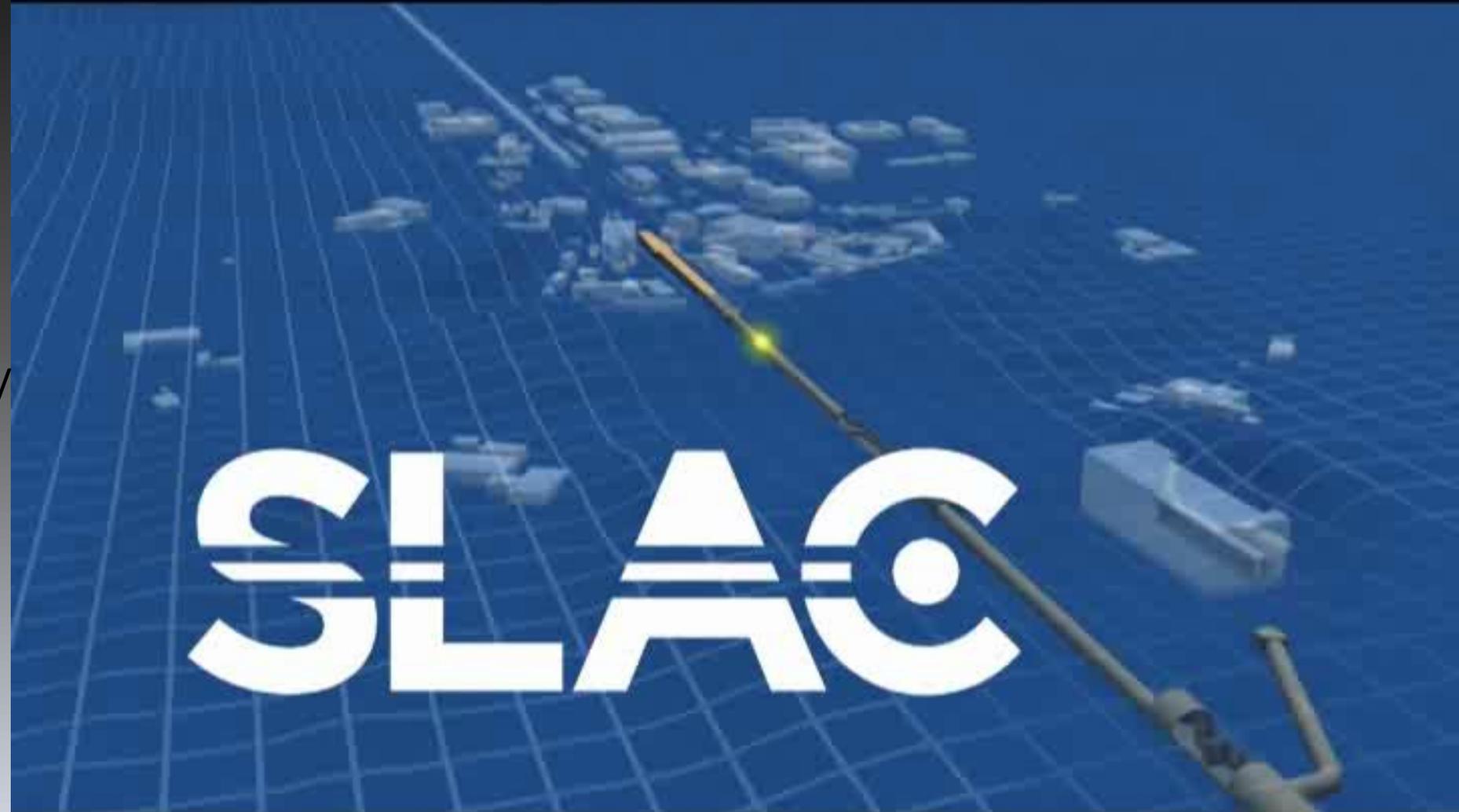
Les X-FEL **(X-ray Free Electron Laser)**

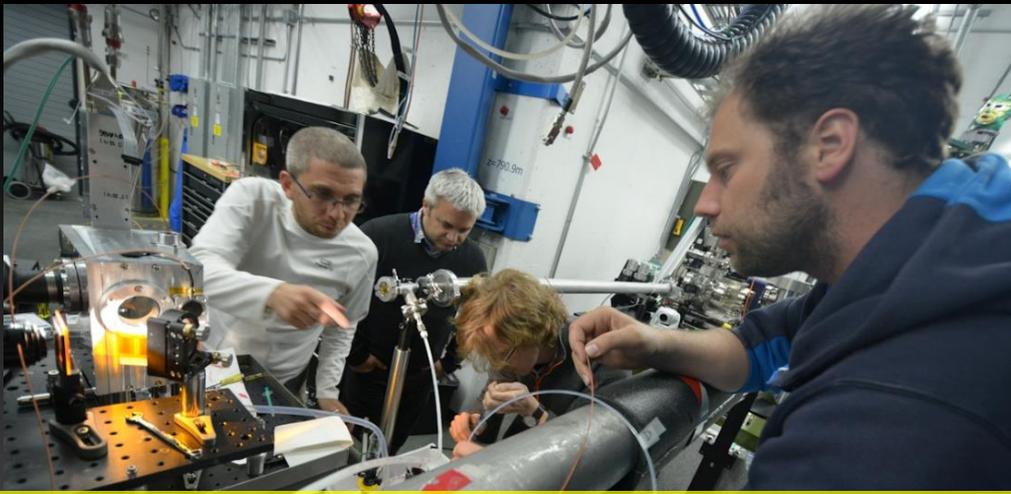
**des très grandes
infrastructures de recherche
internationales**

Les X-FEL : des laser à rayon X ultra-brefs LCLS, SACLA, EuroXFEL, SwissFEL...

Linac Coherent
Light Source :
LCLS, USA

<https://lcls.slac.stanford.edu/>



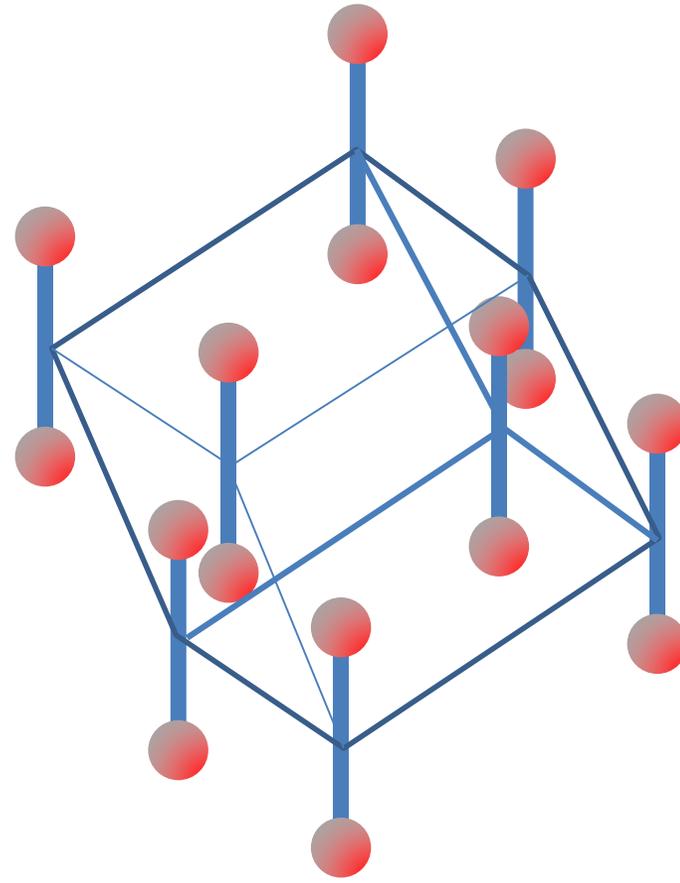


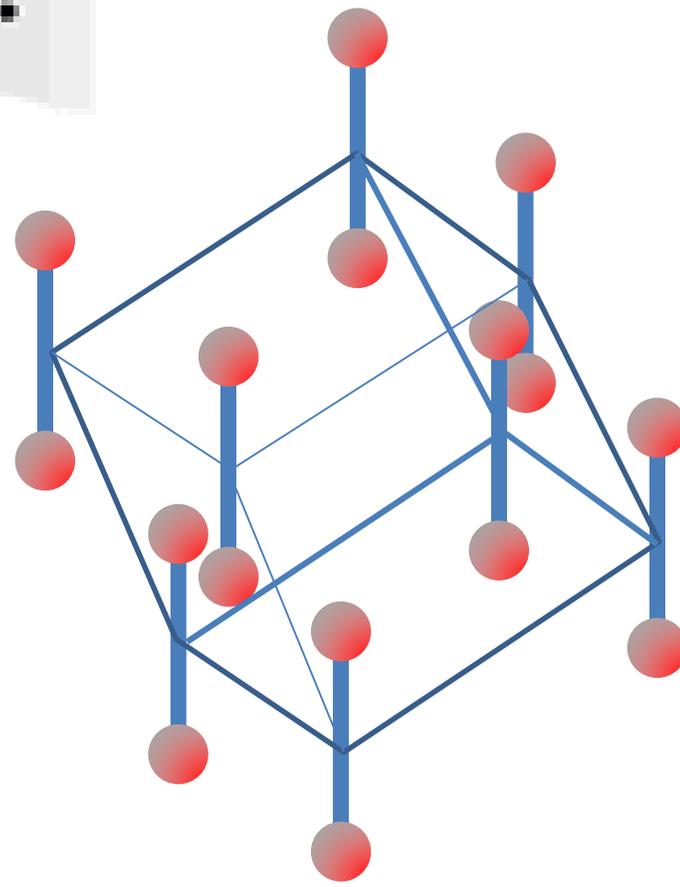
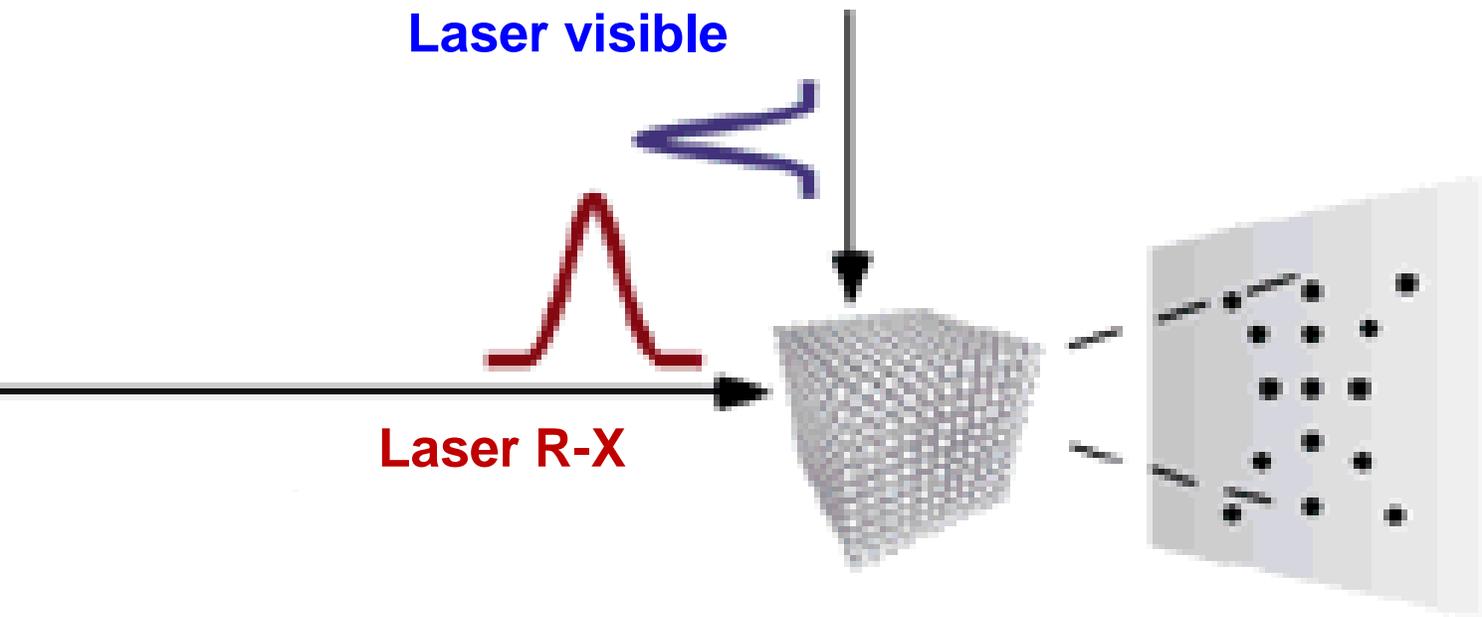
Expédition et campagne de mesures : 7 à 15 jours 24H/24 (équipe)
2 ans de préparation, 1 et d'analyse de données

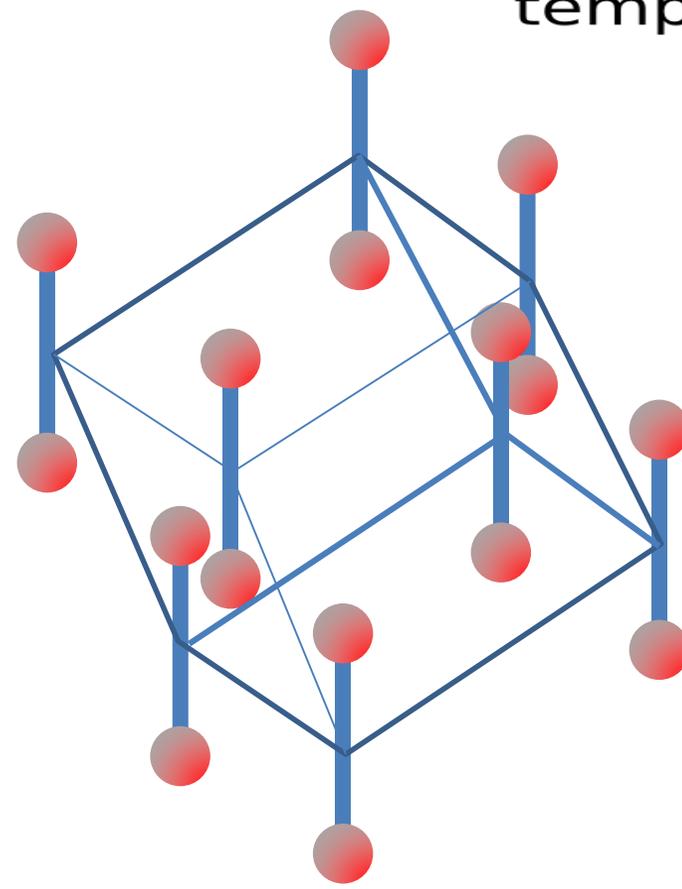
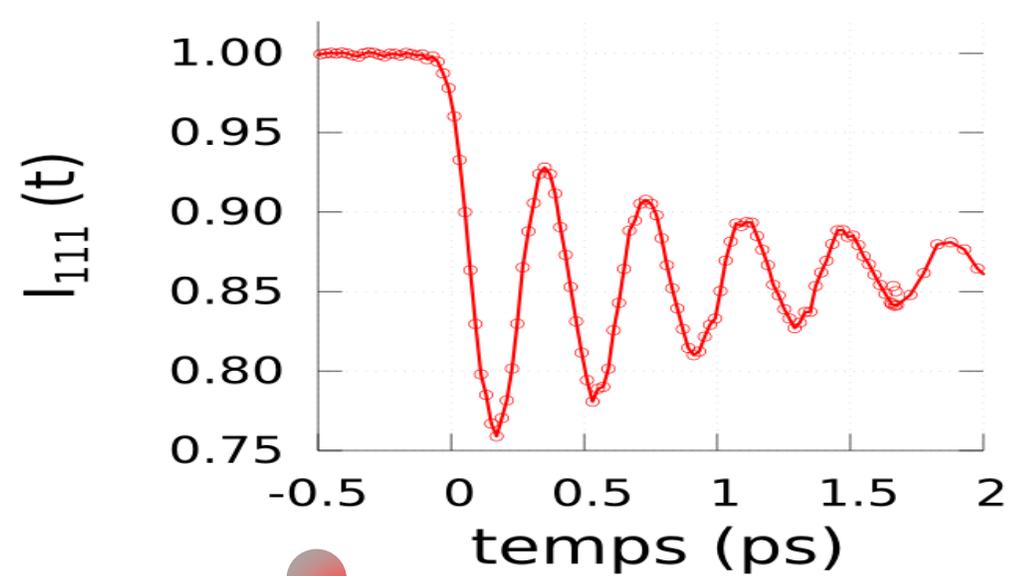
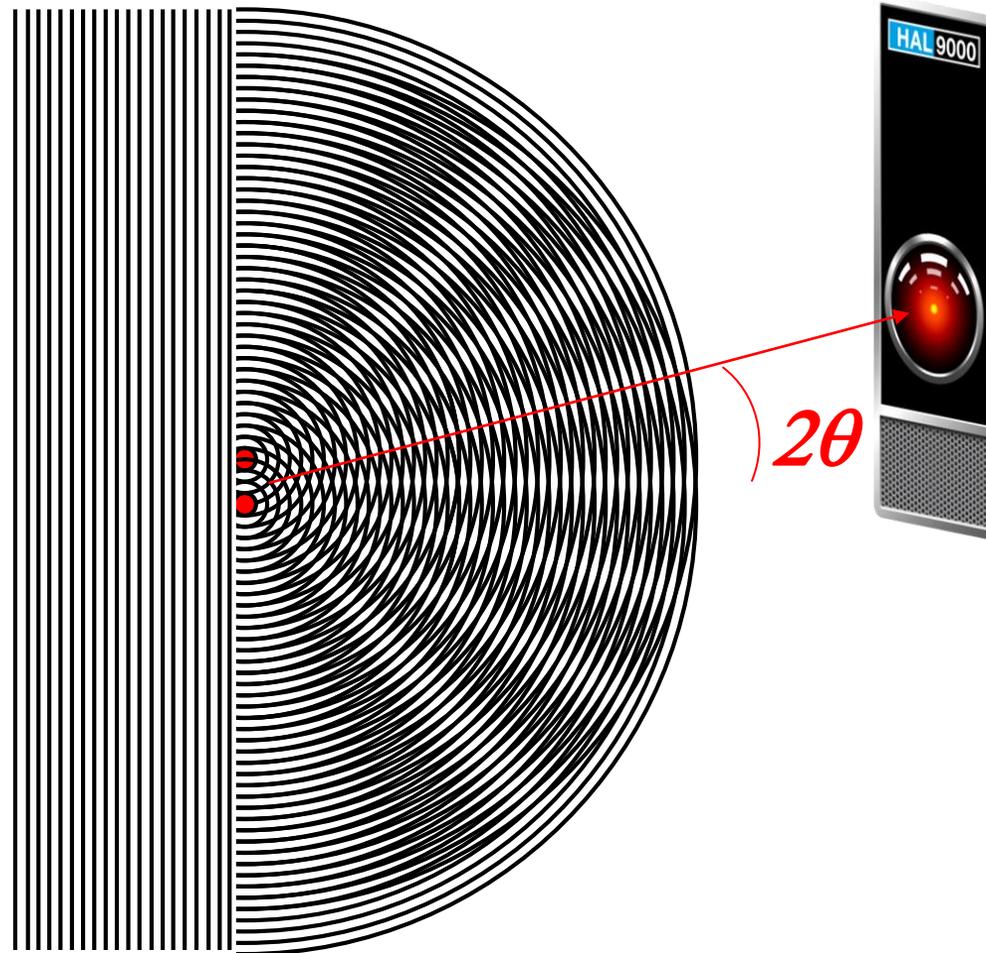


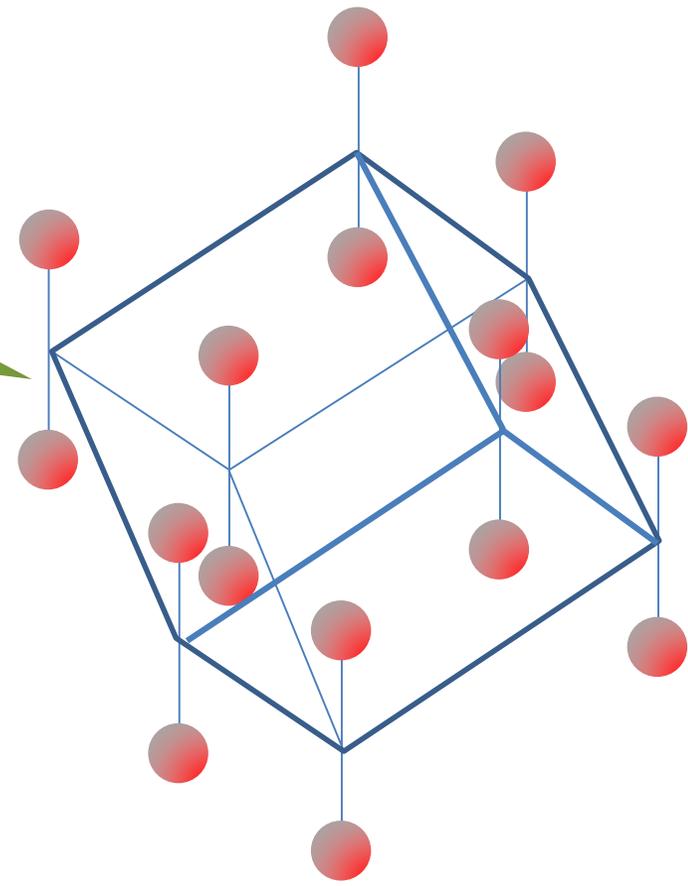
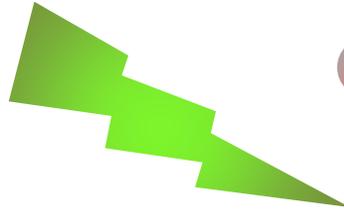
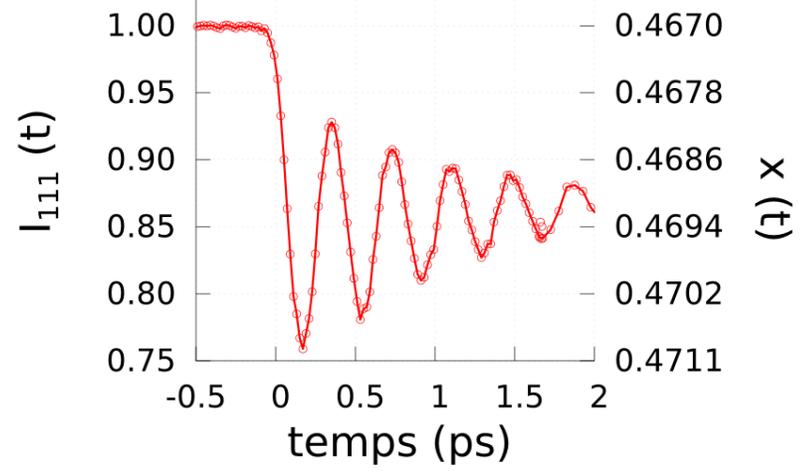
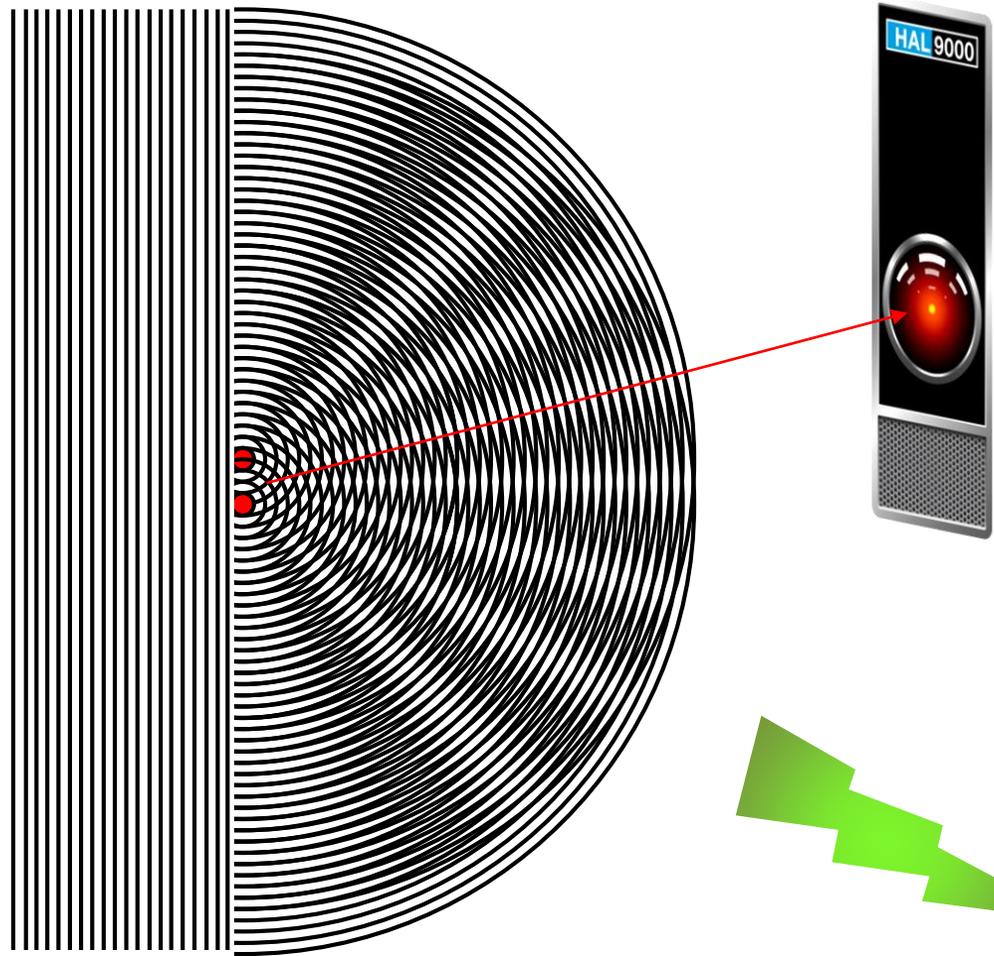


Cristal de Bismuth









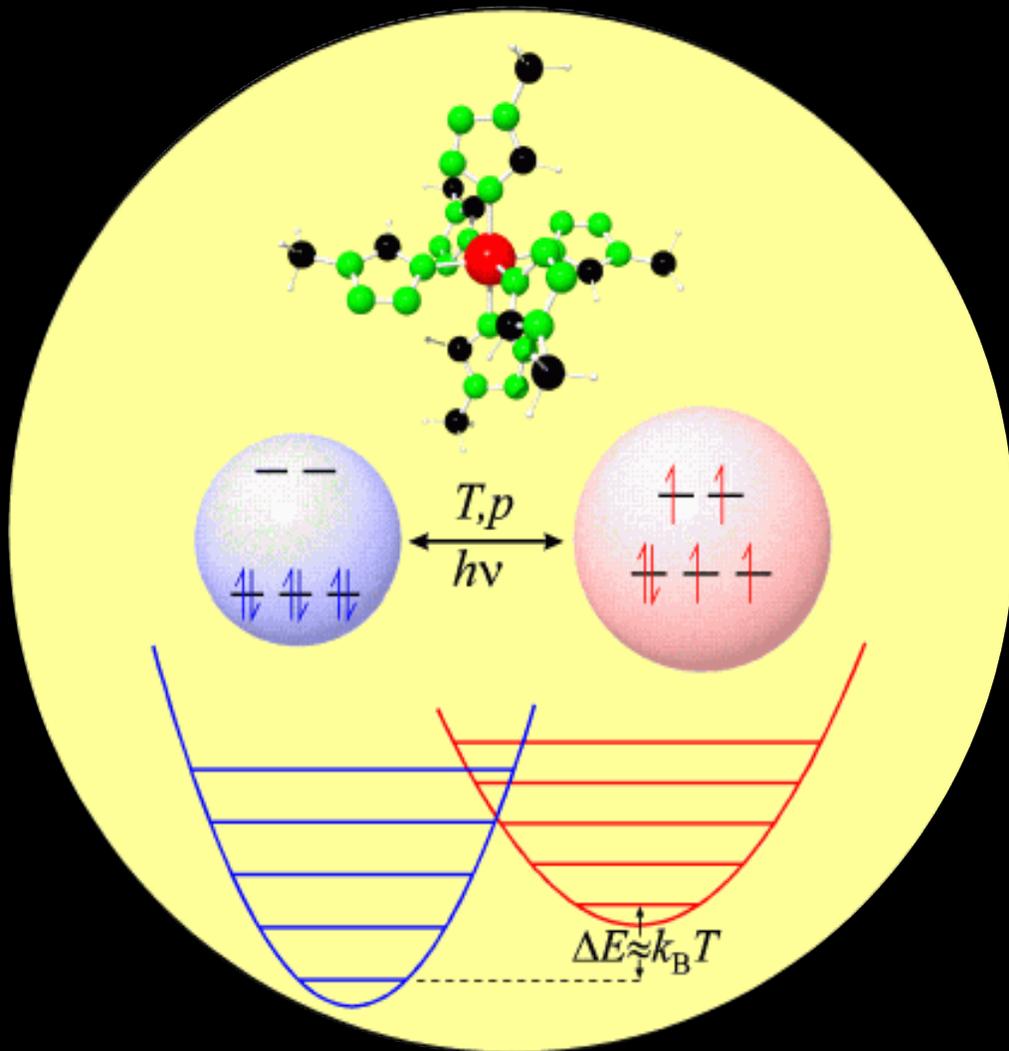
300 fs

On filme les atomes en temps réel!

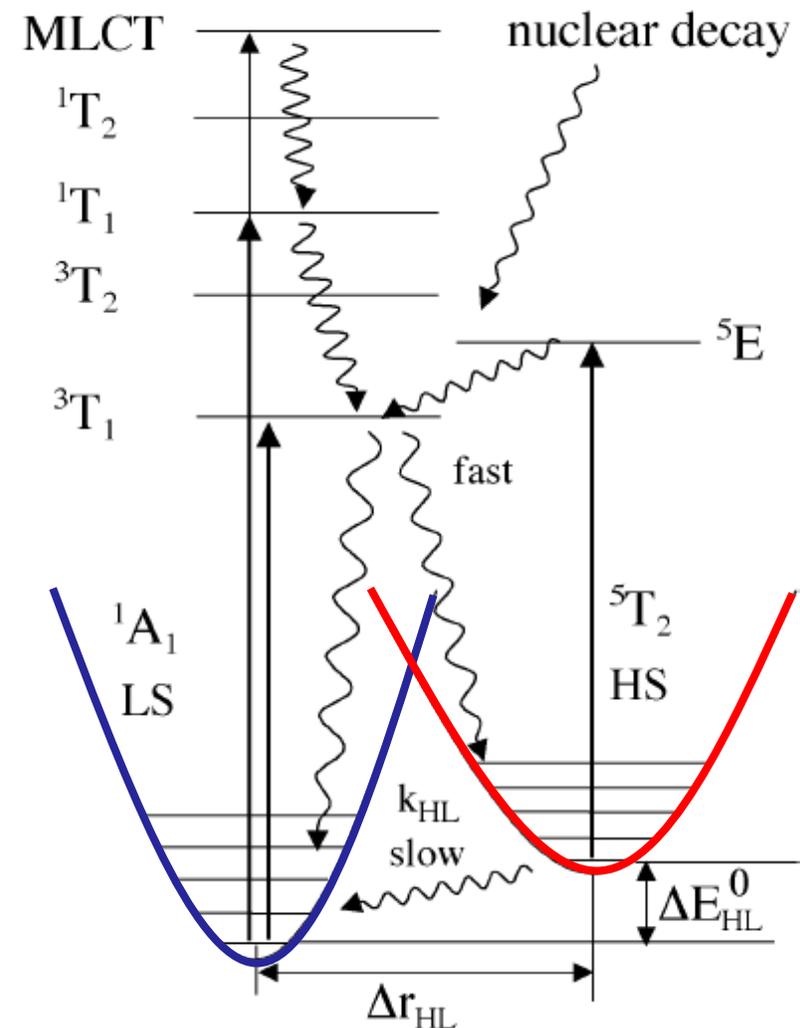
Transfert d'énergie
lumière → électrons → atomes

Changement d'état de spin photoinduit

Low Spin
S=0



High Spin
S=2



A. Hauser, *Chem. Phys. Let.* 1986

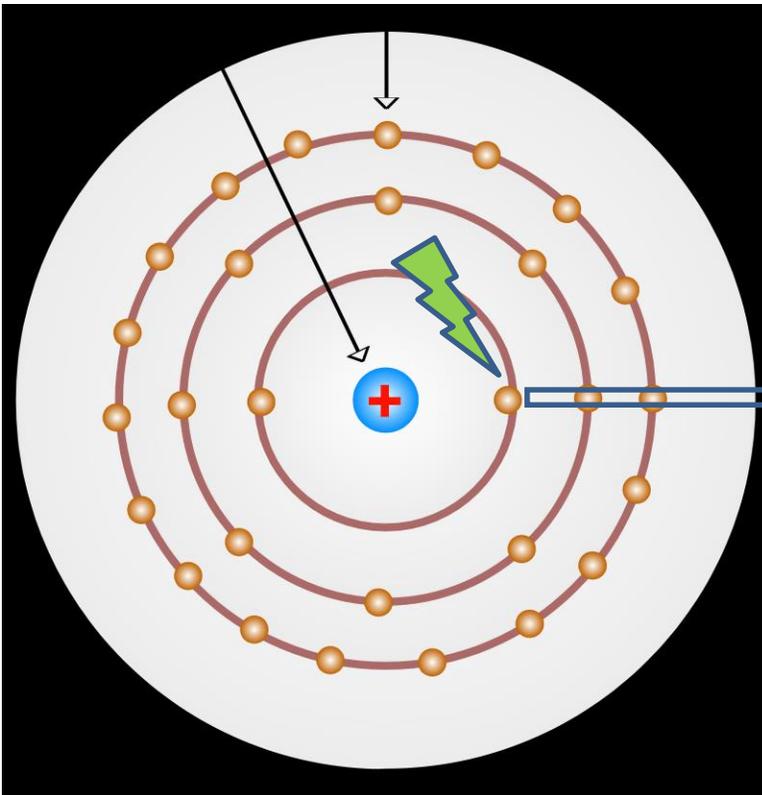
L'absorption des rayons X par les atomes constituant la matière

Le modèle atomique de Bohr

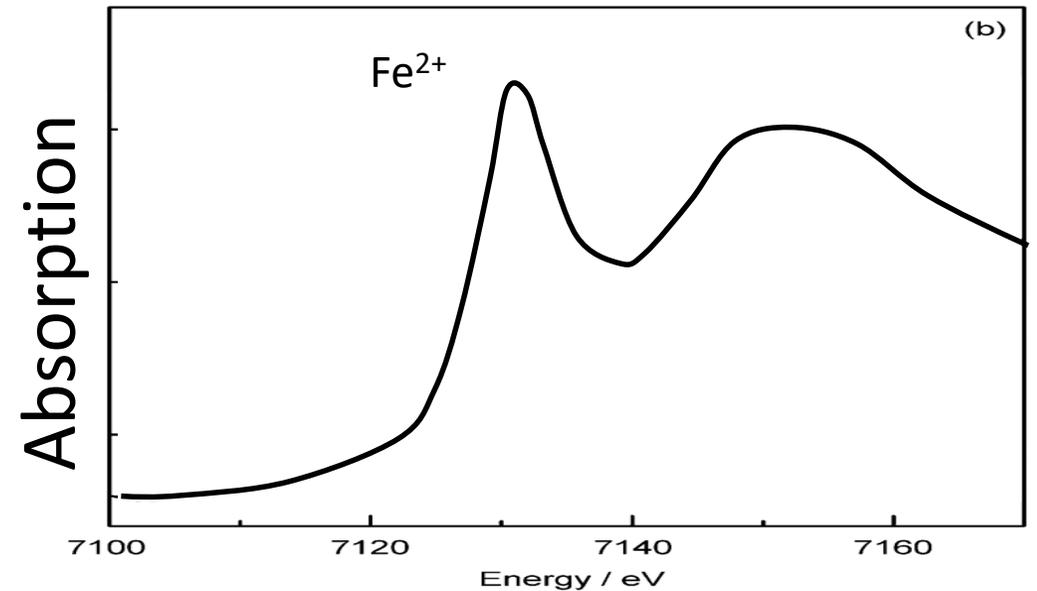
noyau



électrons



L'énergie
d'absorption
dépend :
- de l'atome



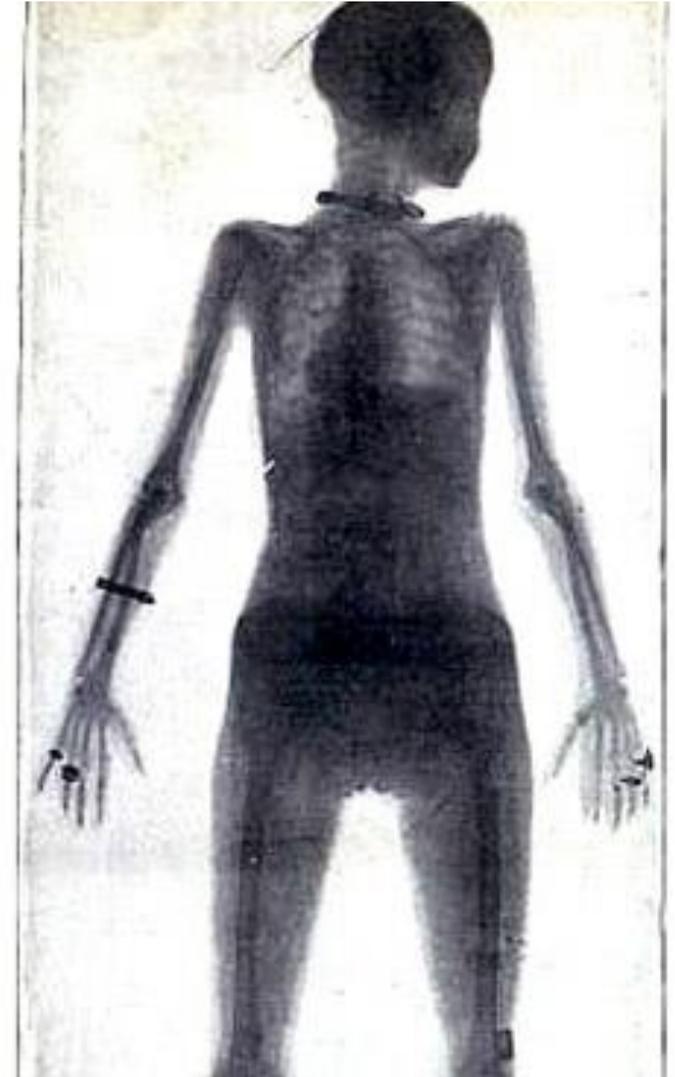
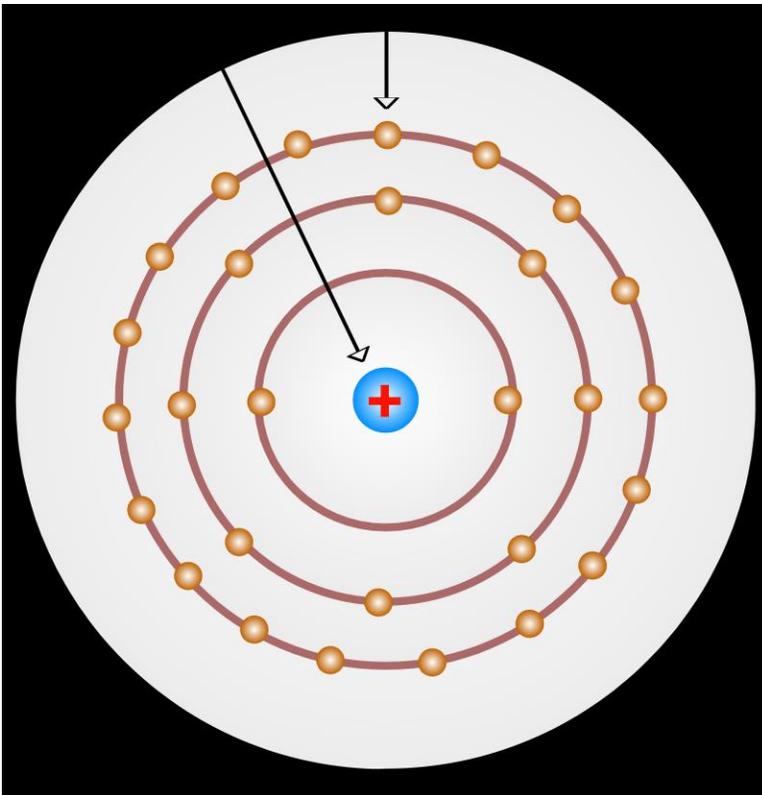
L'absorption des rayons X par les atomes constituant la matière

Le modèle atomique de Bohr

noyau



électrons



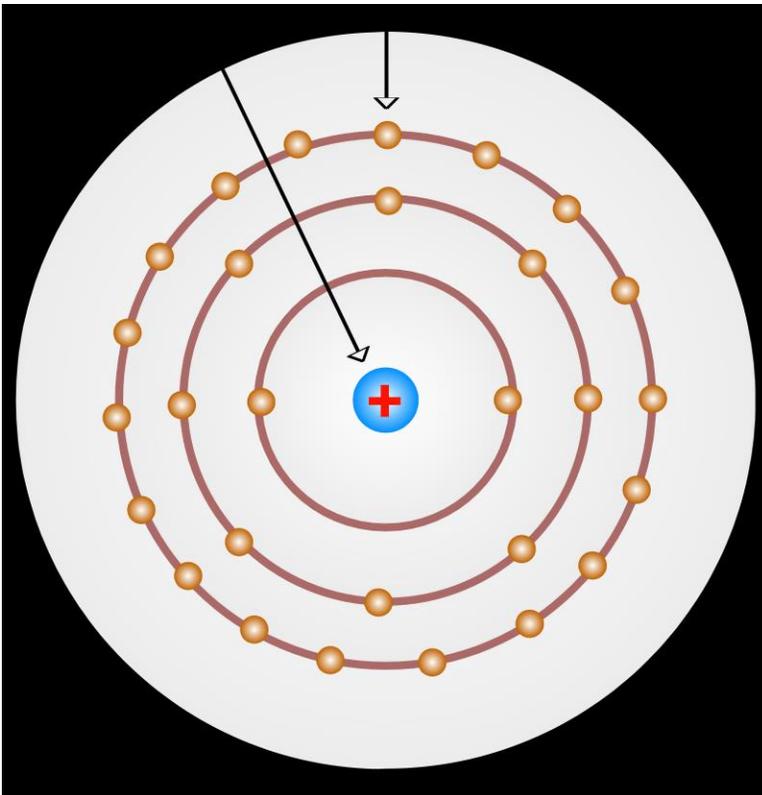
L'absorption des rayons X par les atomes constituant la matière

Le modèle atomique de Bohr

noyau

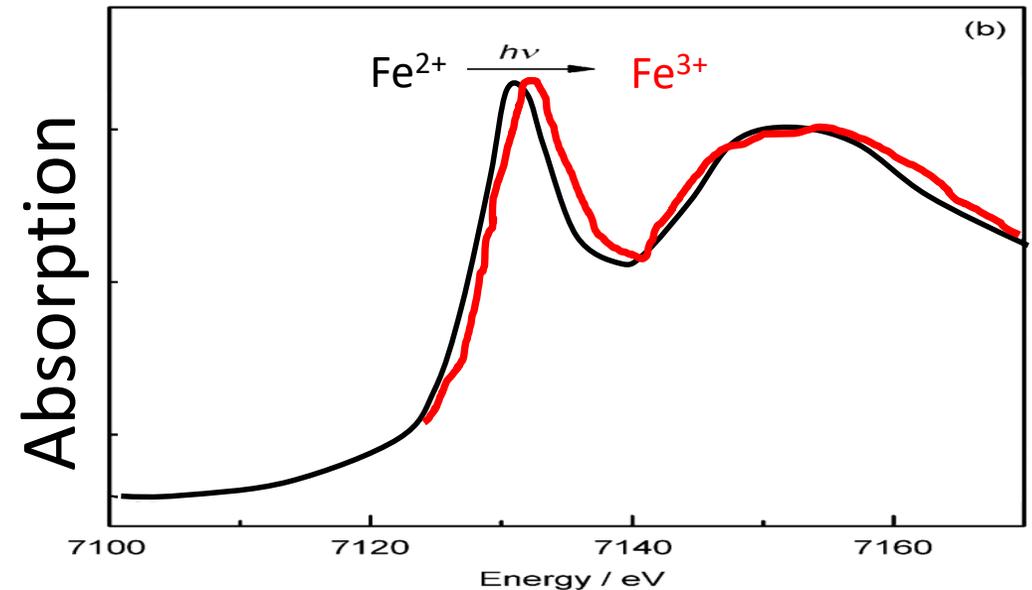


électrons



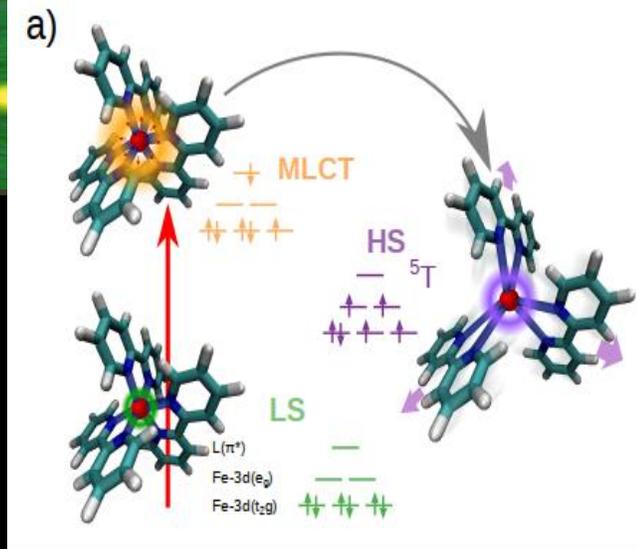
L'énergie
d'absorption
dépend :

- de l'atome
- de son état
d'oxydation



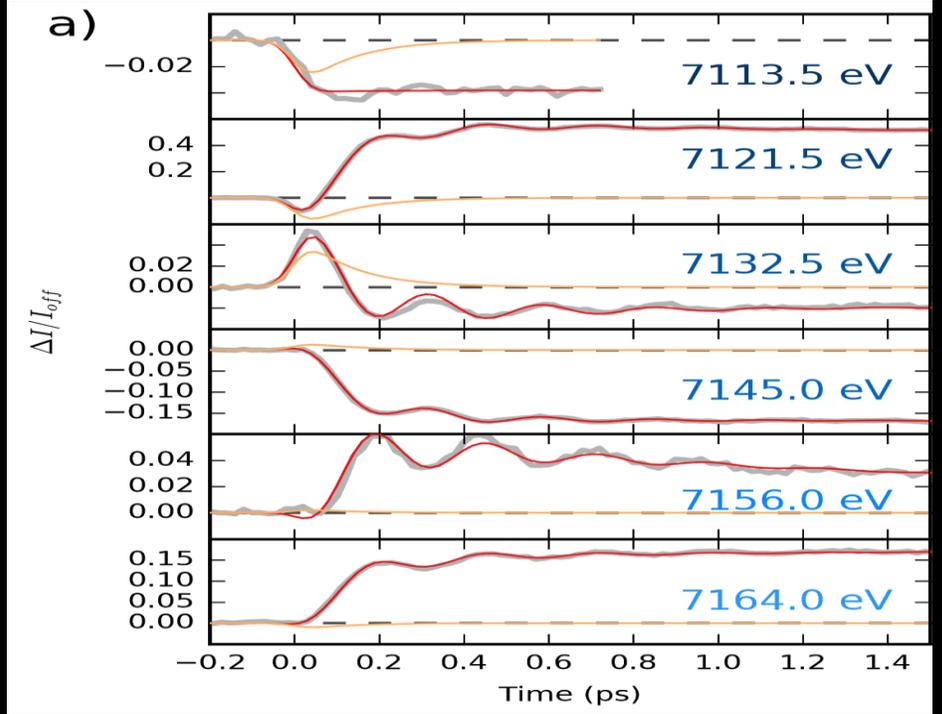
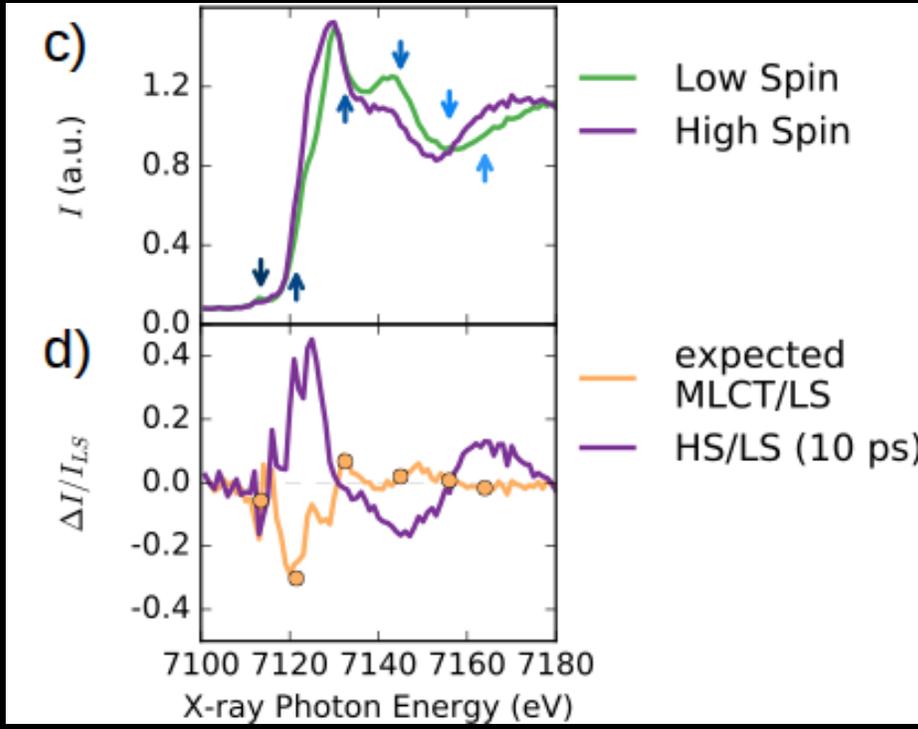
Etude du $\text{Fe}(\text{bpy})_3$ par spectroscopie des rayons X

Changements d'absorption des rayons X au seuil K du Fer

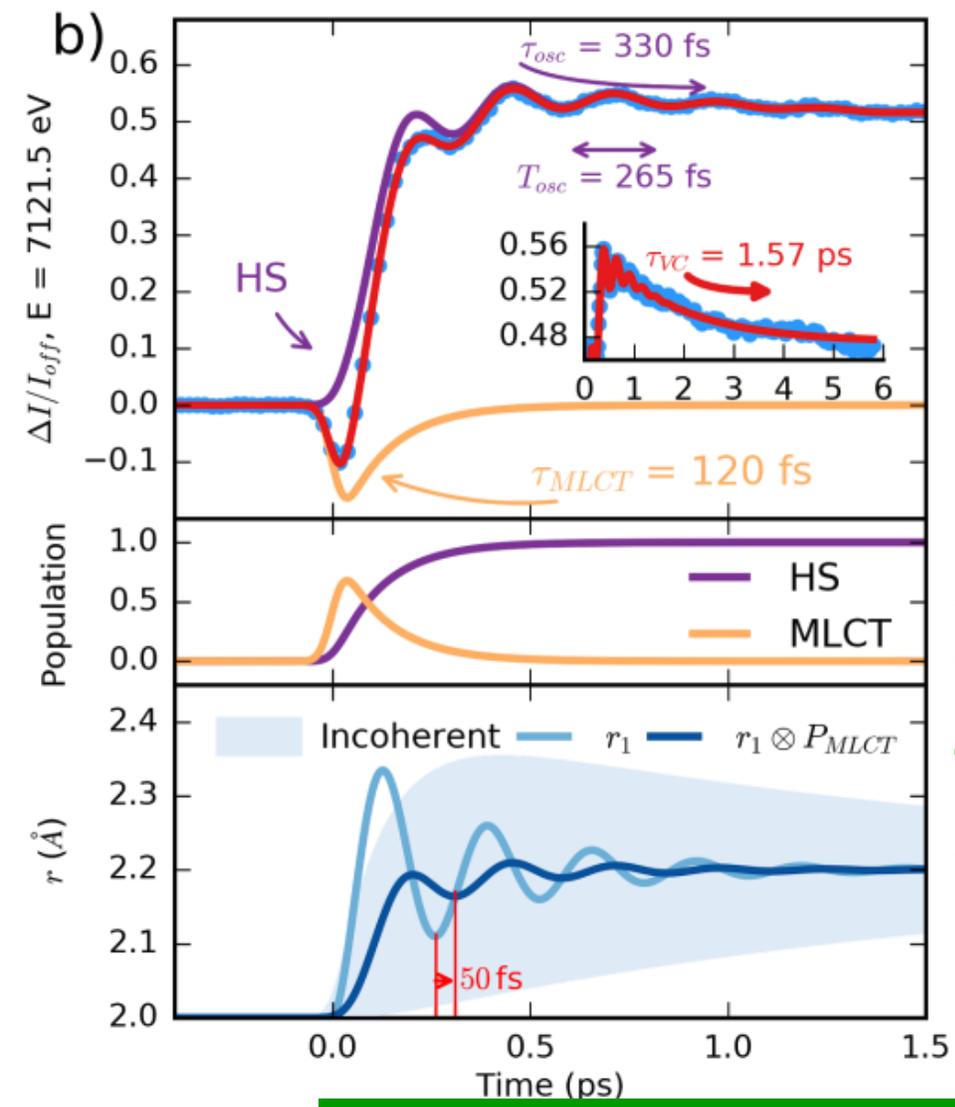
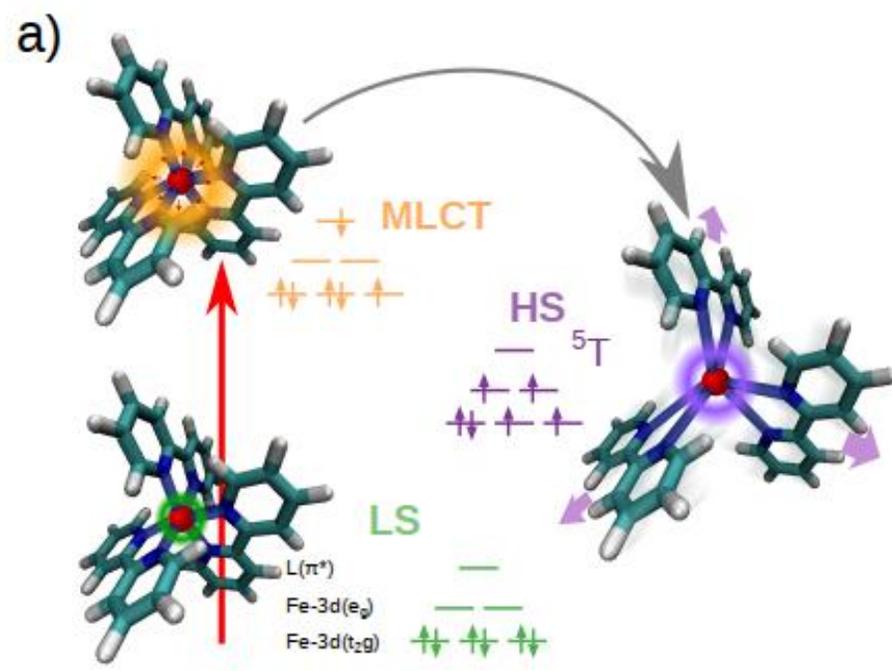


Deux états identifiés :
MLCT et Haut Spin

Evolution temporelle



Etude du $\text{Fe}(\text{bpy})_3$ par spectroscopie des rayons X

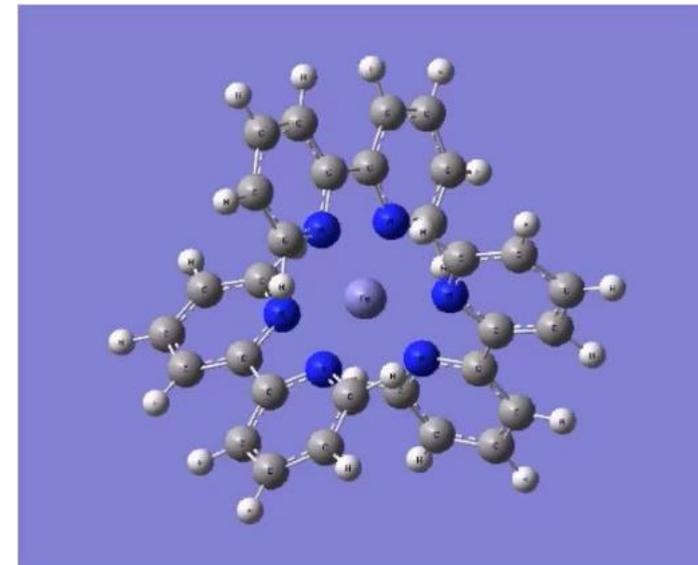


L'états MLCT vit 120 fs

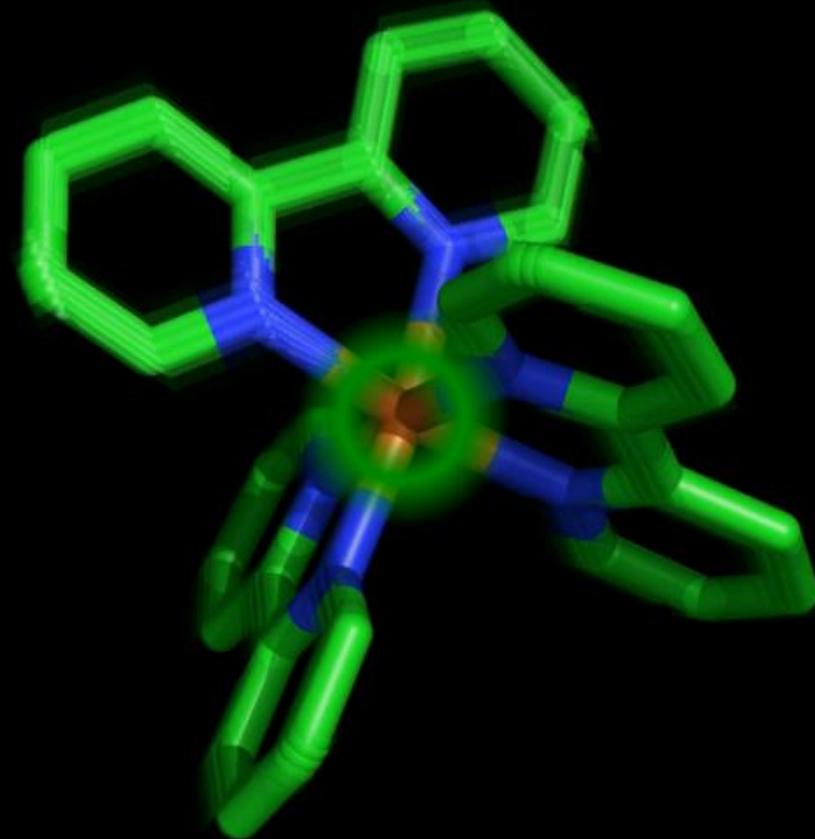
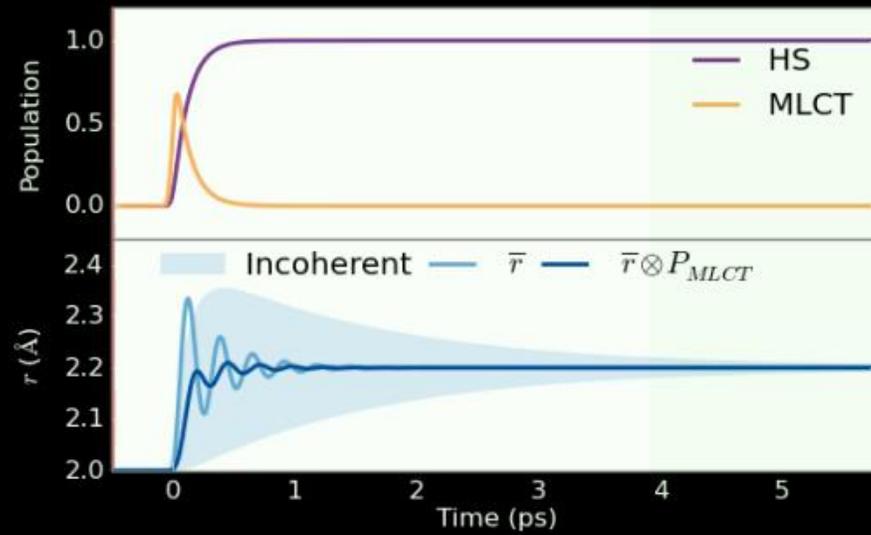
Les vibrations sont liées au mode de respiration de la molécule

$T_{osc} = 268 \text{ fs}, \nu = 124 \text{ cm}^{-1}$

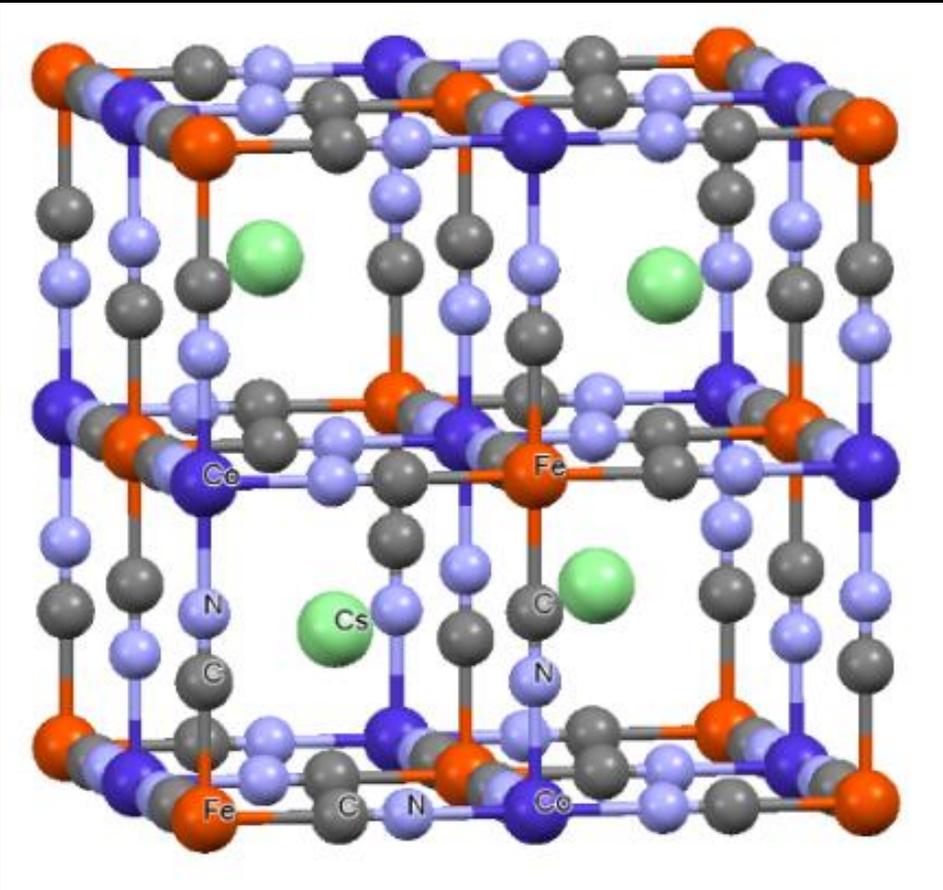
Changement de la force des liaisons



Film moléculaire

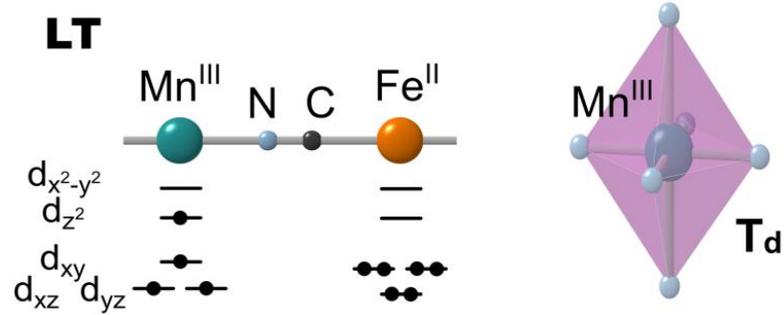


Analogue du bleu de Prusse

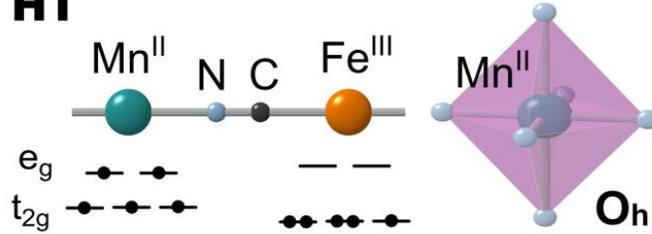


Brisure de symétrie et magnétisme

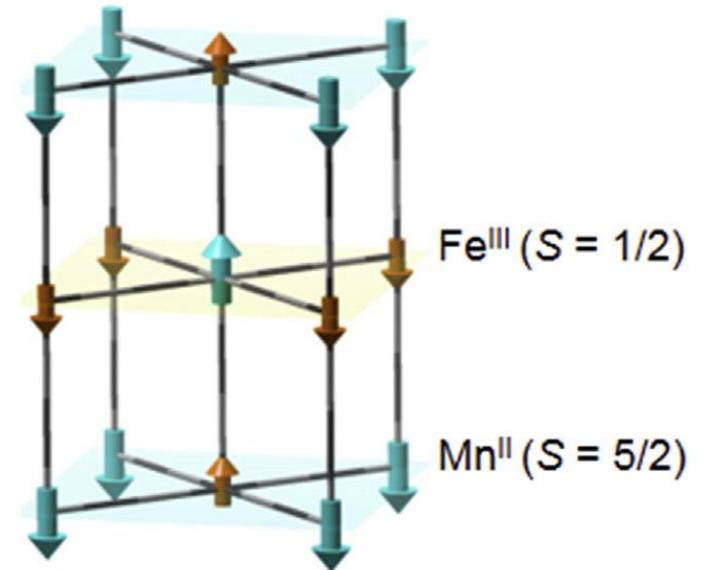
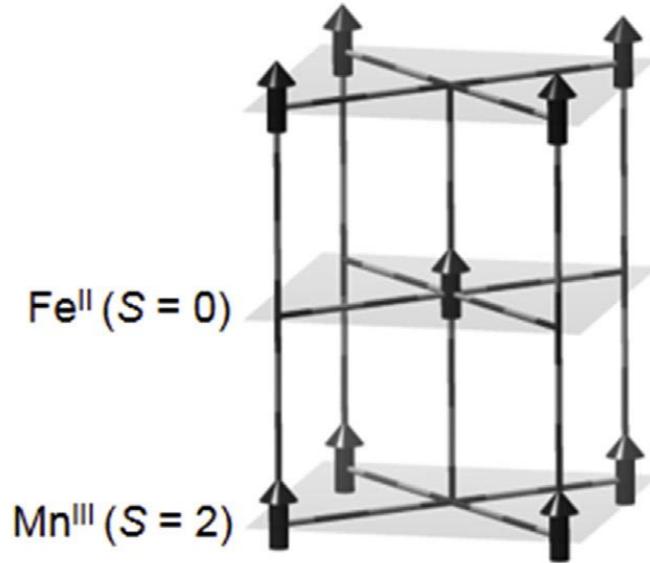
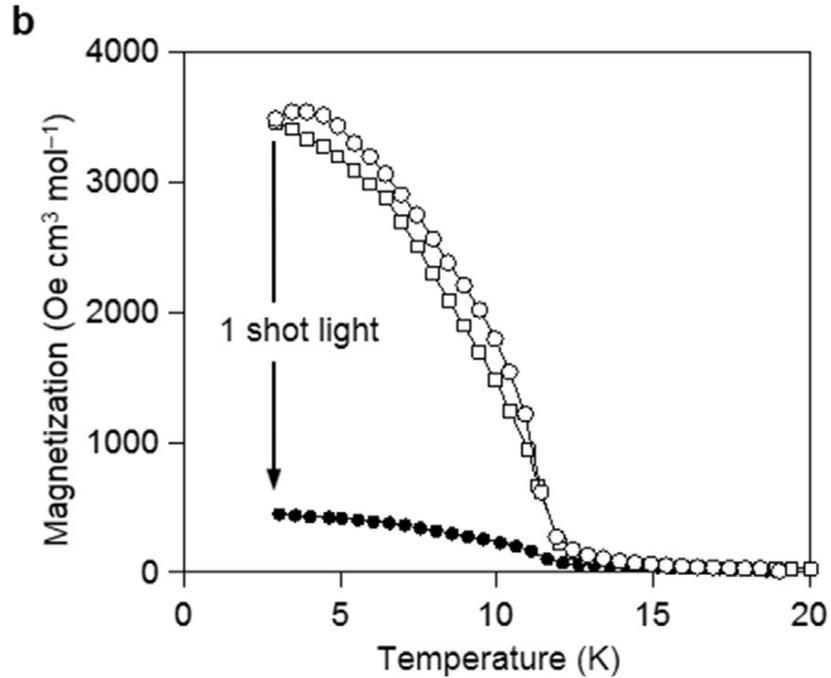
LT



HT



Transfert d'électron
 $\text{Mn}^{\text{II}}\text{Fe}^{\text{III}} \rightarrow \text{Mn}^{\text{III}}\text{Fe}^{\text{II}}$
Contrôle de l'ordre magnétique



Fundamentaux: théorie de Landau

chaque densité de probabilité s'écrit $\rho = \rho_0 + \eta \Delta \rho$

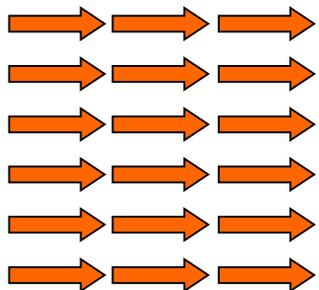
ρ_0 changement isosymétrique

η parameter d'ordre (brisure de symétrie $\Delta \rho$)

Exemple: densité de spins



phase A



$$P_{\uparrow}=1 \quad P_{\downarrow}=0$$

$$\eta \neq 0$$

Sur un site i:

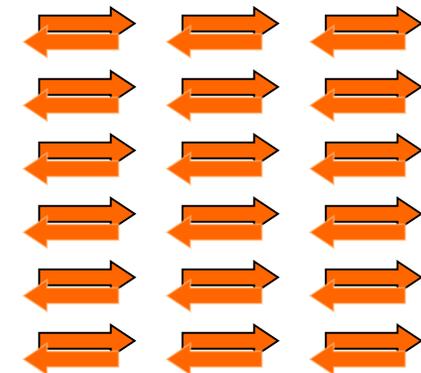
$$\text{or} \quad P_{\uparrow}=P_{\downarrow}=1/2$$

Le parameter d'ordre mesurant la difference de symétrie s'écrit :

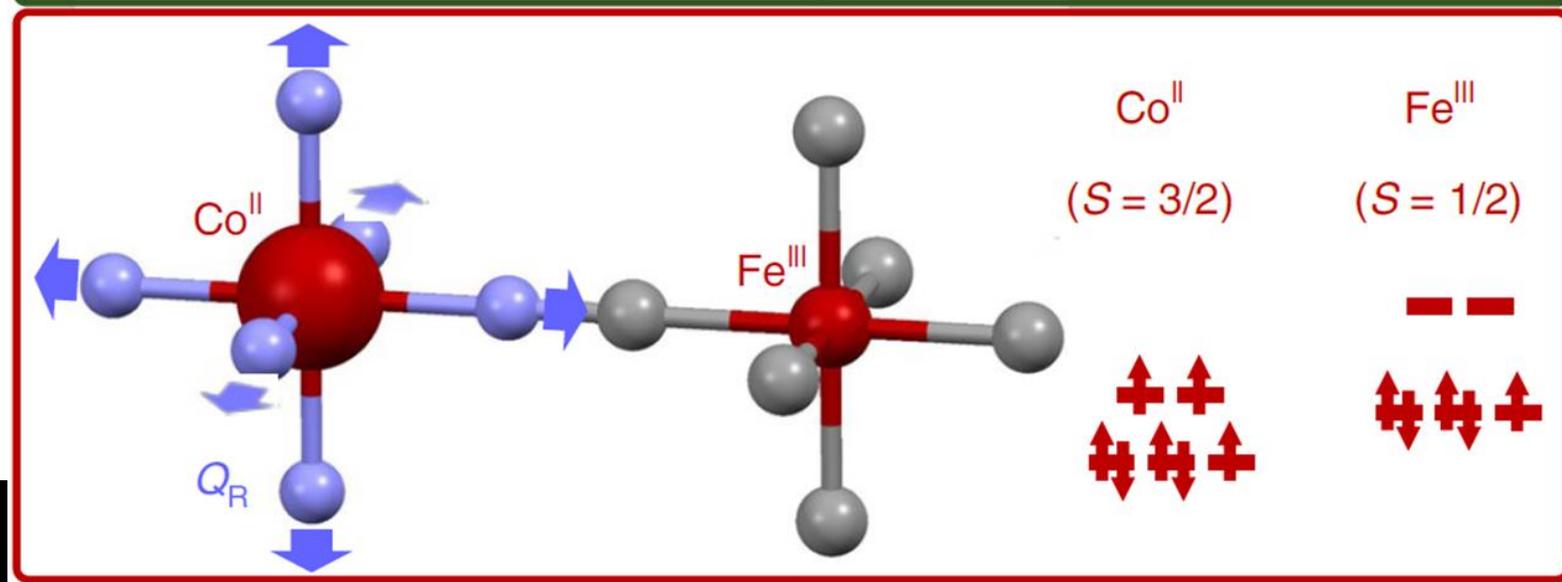
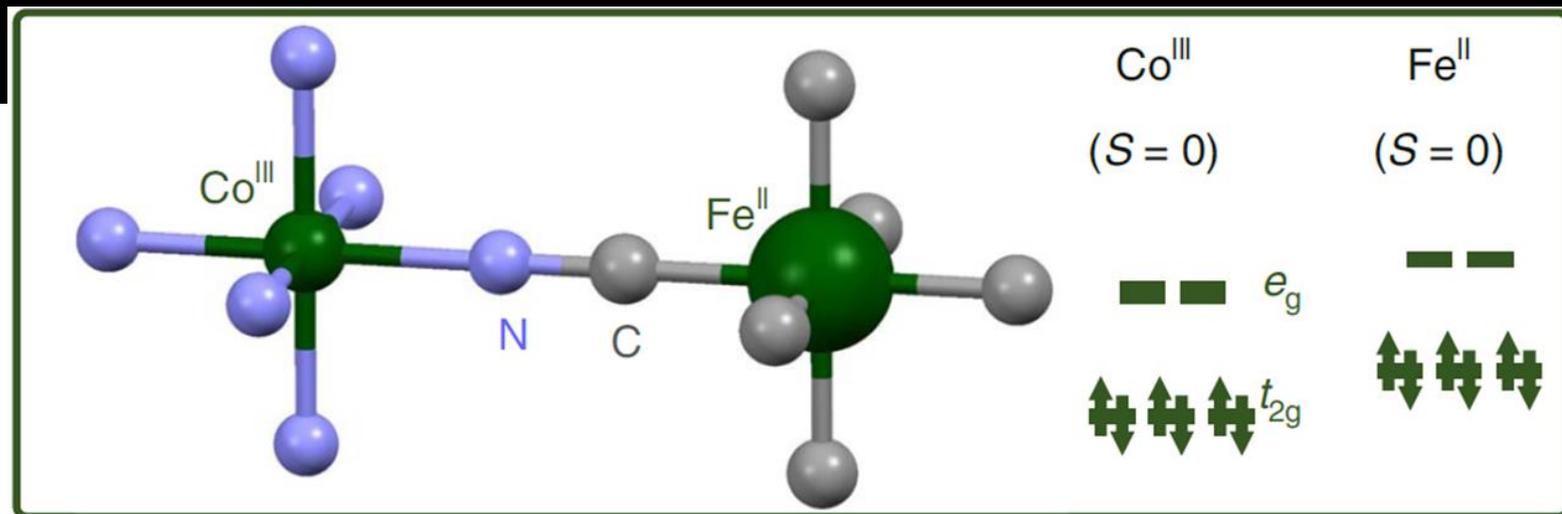
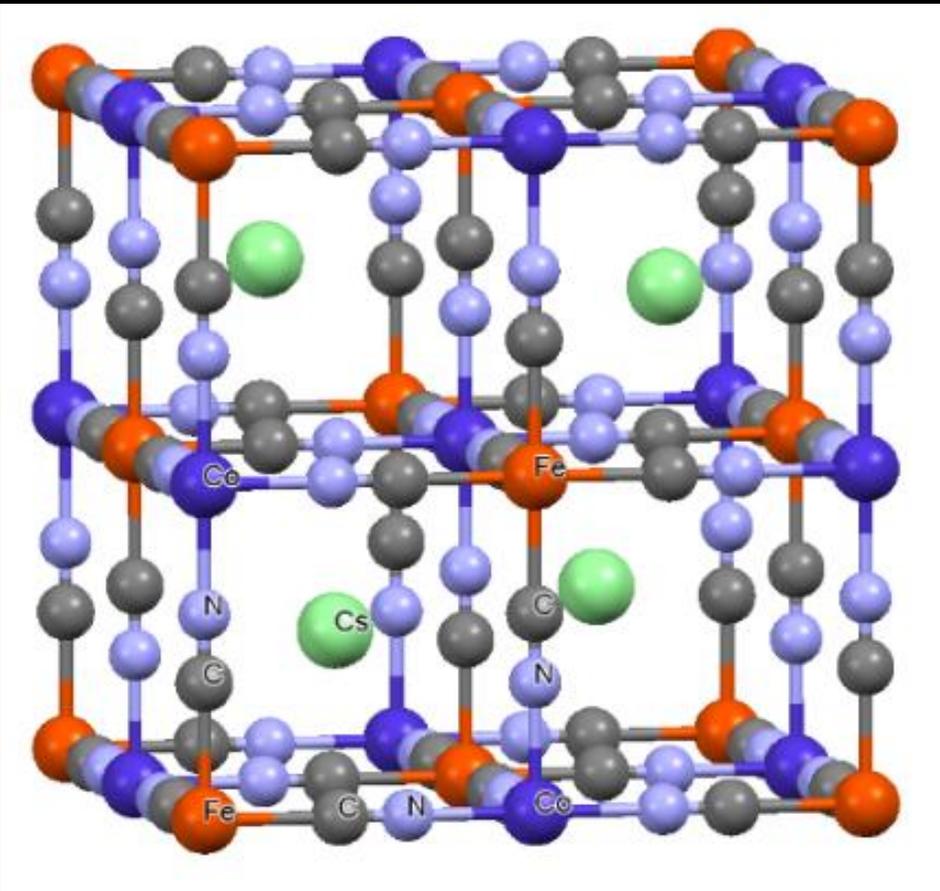
$$\eta = P_{\uparrow} - P_{\downarrow}$$

$$\eta = 0$$

phase B



Analogue du bleu de Prusse



Transfert d'électron : diamagnétique ou magnétique

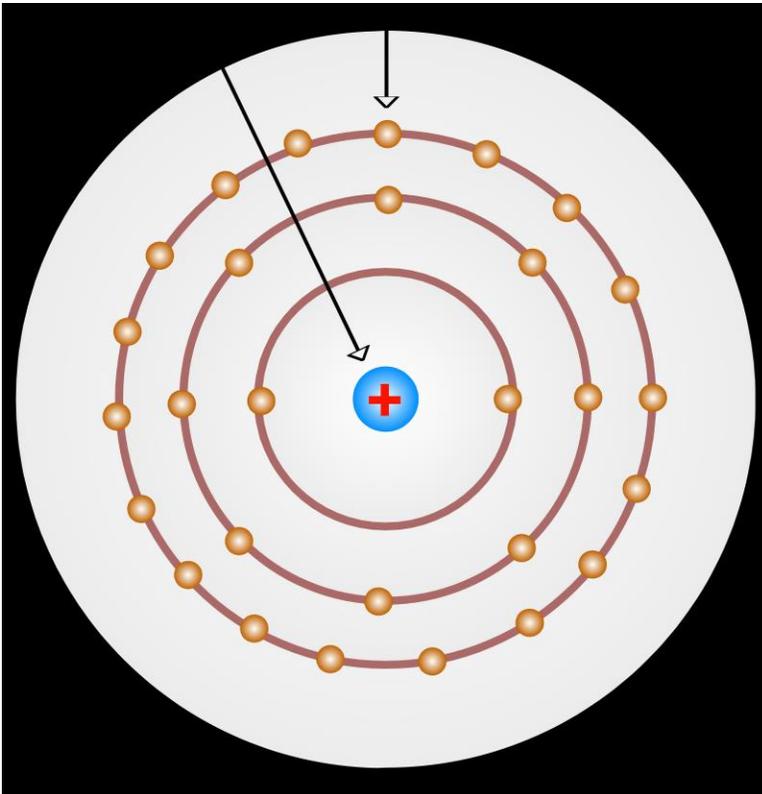
L'absorption des rayons X par les atomes constituant la matière

Le modèle atomique de Bohr

noyau

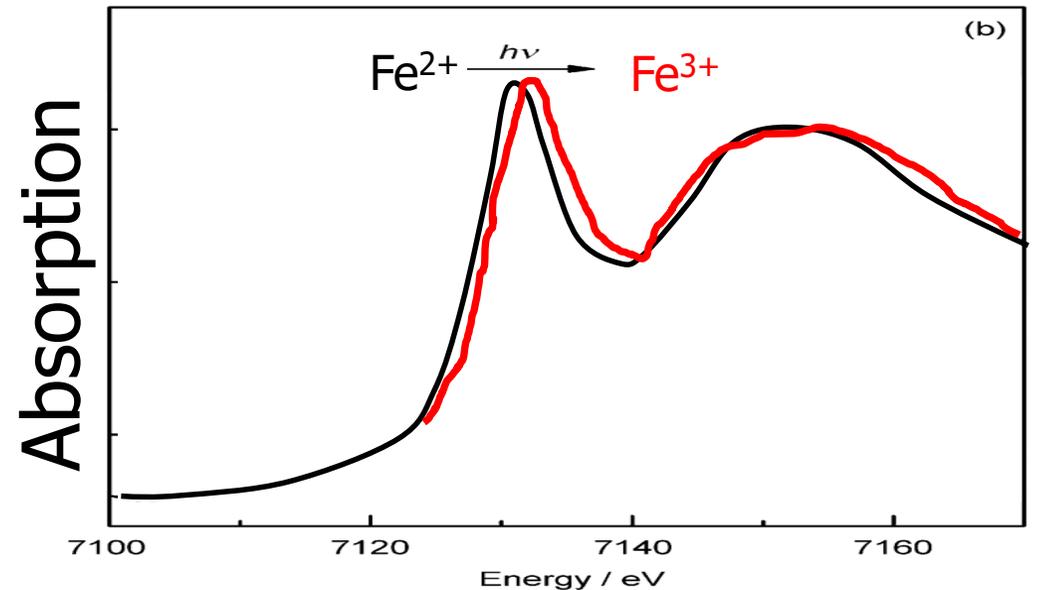
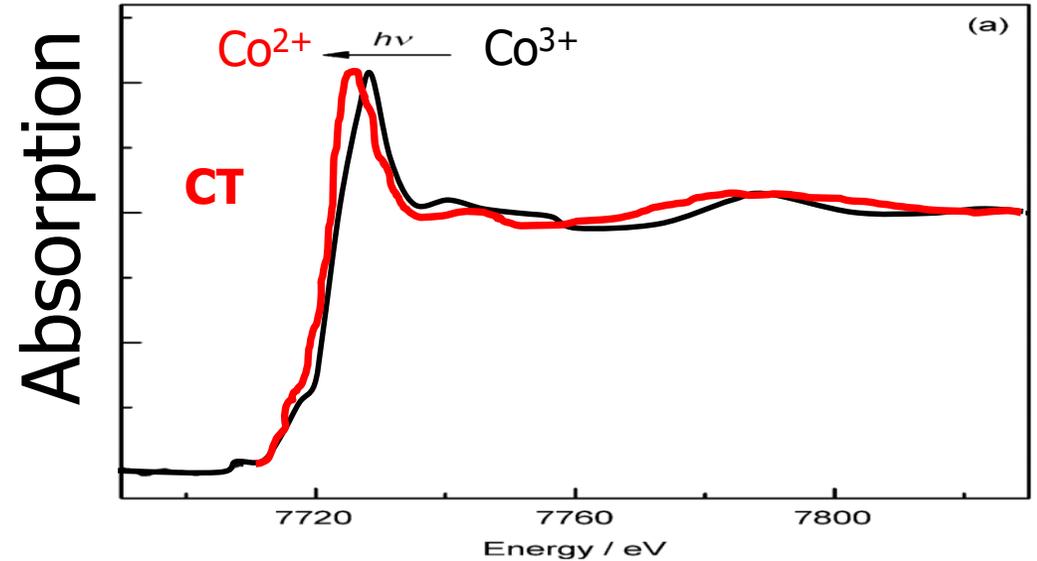


électrons



L'énergie d'absorption dépend :

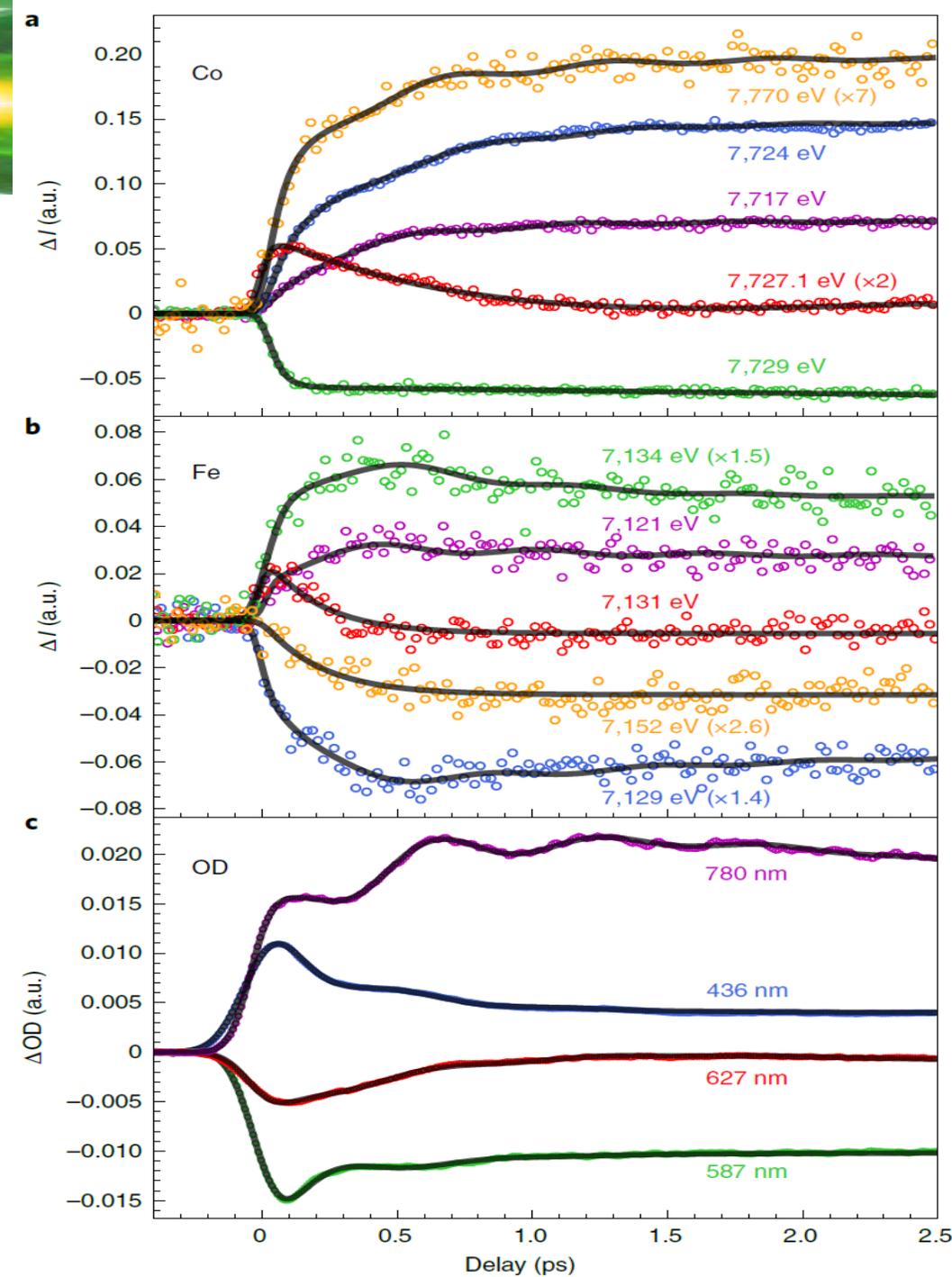
- de l'atome
- de son état d'oxydation



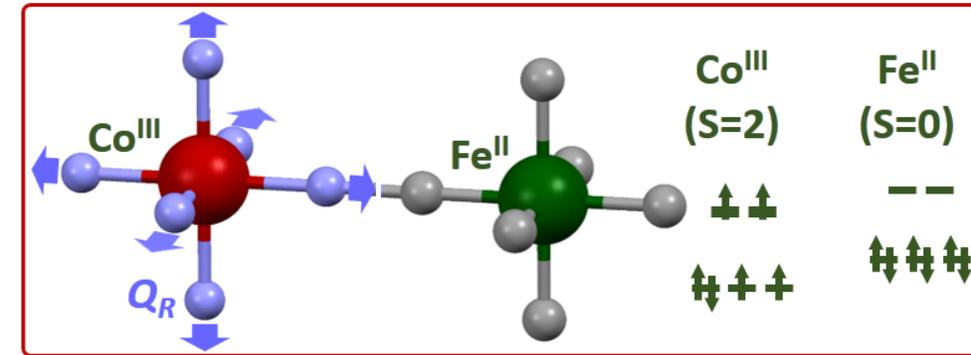
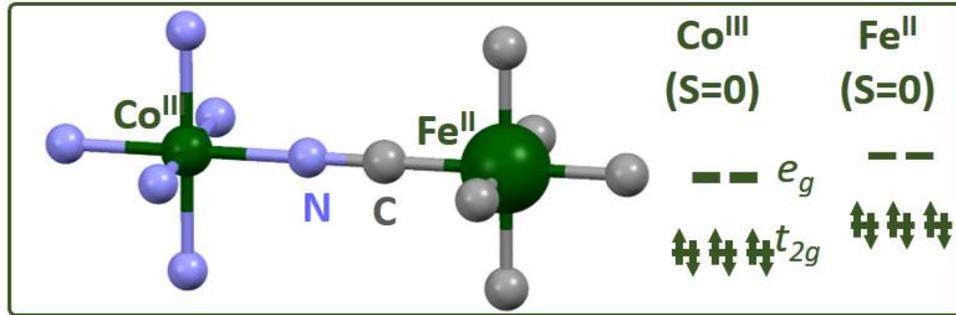
CoFe photoswitching étudié par absorption des rayons X

- Distorsion autour du Co: 50(10) fs
- Transfert de charge : 200 fs
- Dynamique structurale

$$1 \text{ fs} = 10^{-15} \text{ s}$$



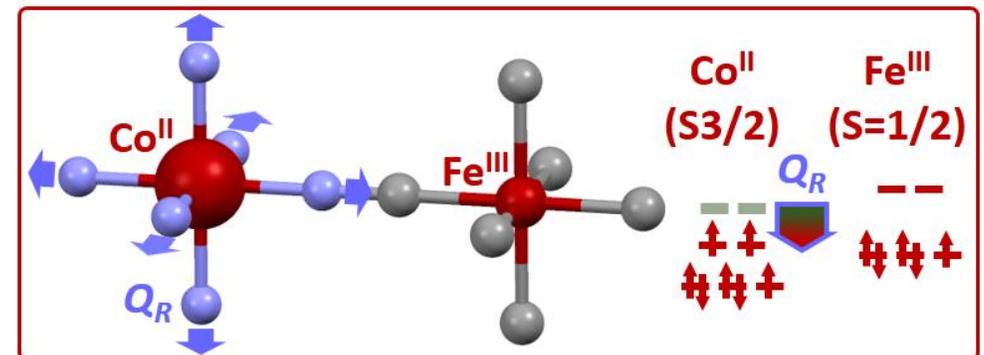
L'œuf ou la poule?



La lumière déplace les atomes en 50 fs

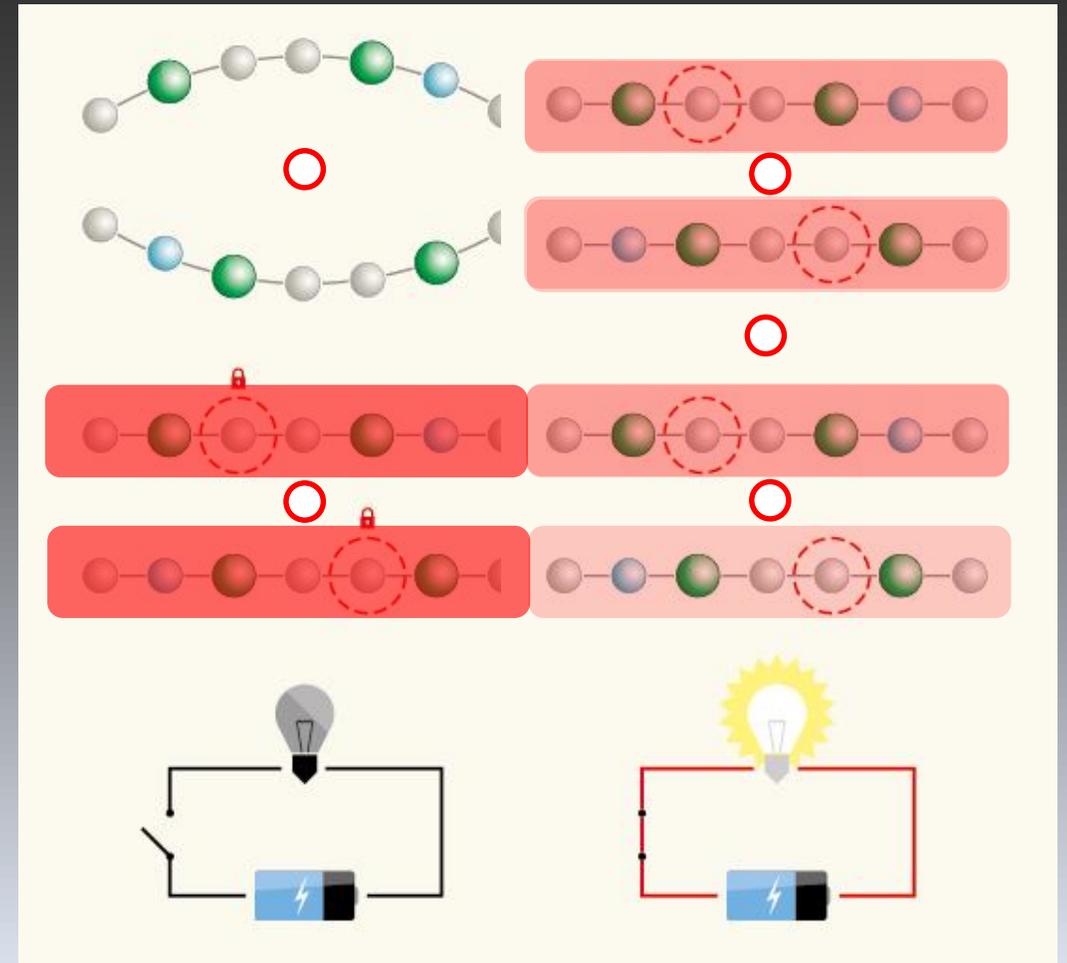
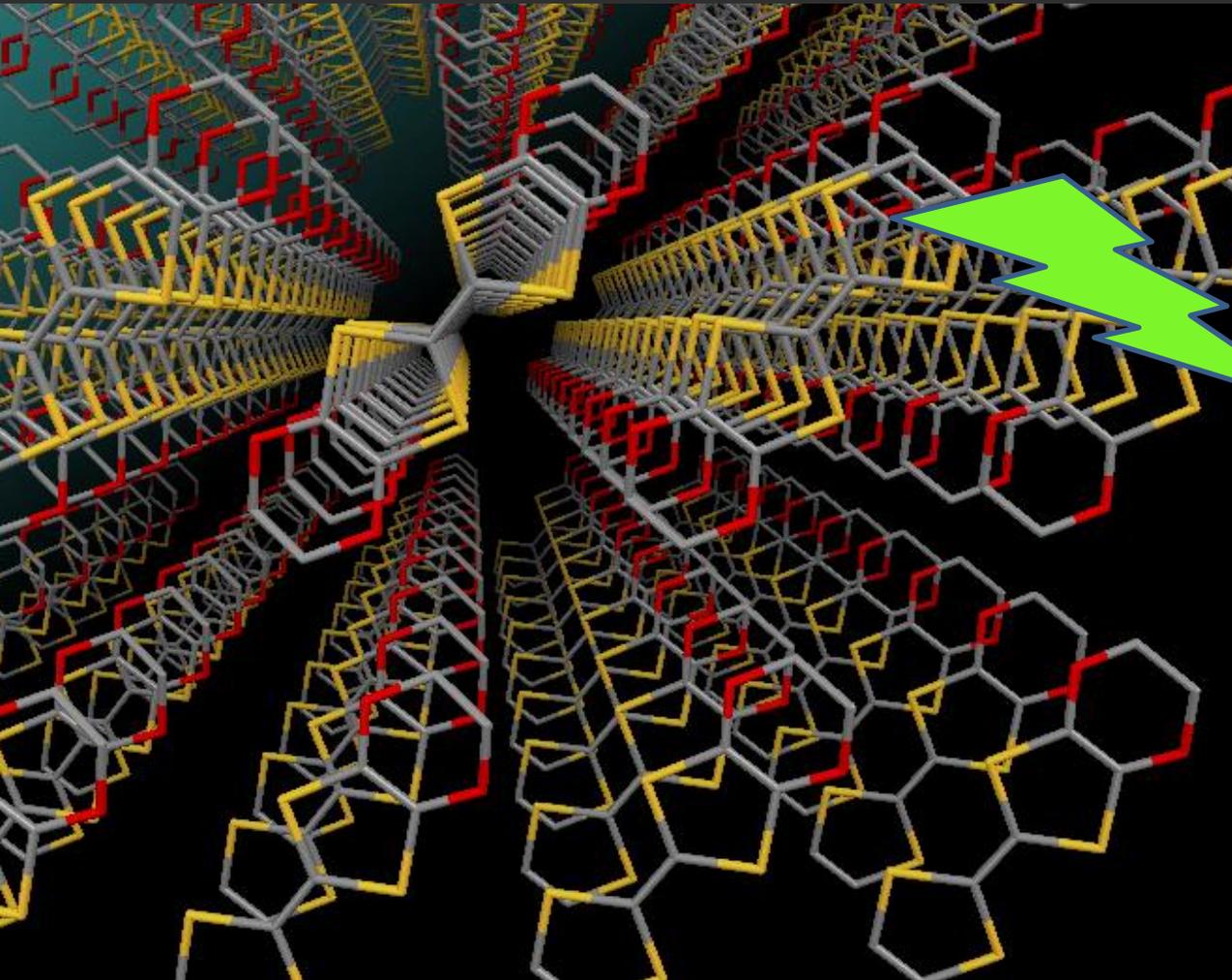
Ce déplacement des atomes induit le transfert d'électron

STICT



Transition isolant-conducteur électrique

Structure et symétrie



Cristallographie et science des matériaux

Dents, os

Minéraux

Matériaux

Laser

Supraconducteurs

Médecine

Patrimoine

Art

Bijoux

Cosmétique

Nourriture

Alimentaire

Energie verte

Spatial

Biologie

Médecine

Contrôle ultra-rapide et hors équilibre des matériaux par la lumière

nouveaux états
nouveau processus
nouvelles applications

