

# Physique & Fiction

## de Gulliver à Star Wars

Mardi 22 Janvier 2019



- Cours 1 : Physique & Dimensions*
- Cours 2 : Des Schtroumpfs à Gargantua*
- Cours 3 : Les pouvoirs de Superman**
- Cours 4 : L'énergie dans Star Wars*
- Cours 5 : De Dante à Edgar Allan Poe*



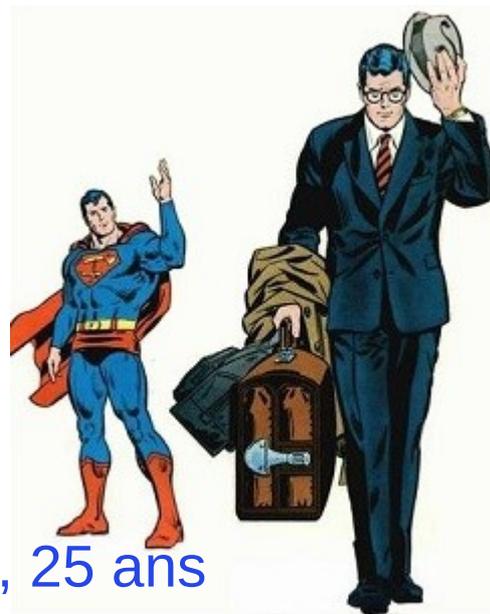
## 3- Les pouvoirs de Superman

Anatomie d'un Super-Héros ordinaire...

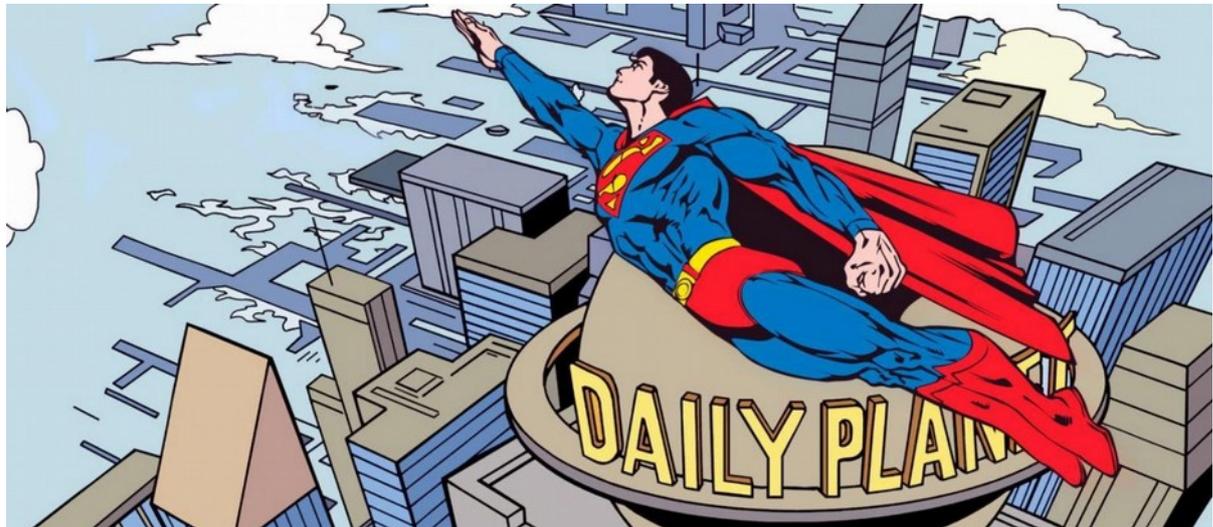


- 1 – Les origines : la planète Krypton
- 2 – La force de Superman, sa course, son vol
- 3 – Les super-sens décortiqués

# Introduction



Clark Joseph Kent « Kal-El », 25 ans  
Taille : 1,90m - Poids : 110 kg  
Journaliste au *Daily Planet*



# Introduction : des pouvoirs changeants...



« Golden Age » 1930-1950

Super-Force : voitures, trains, bateaux...

Super-vitesse : train express

De grands sauts : 200m !

Super-résistance

Super-sens : ouïe, vision



# Introduction : des pouvoirs changeants...

«Silver/Bronze Age » → 1970 - 1985

Super-Force : voitures, trains, bateaux → **Planètes !**

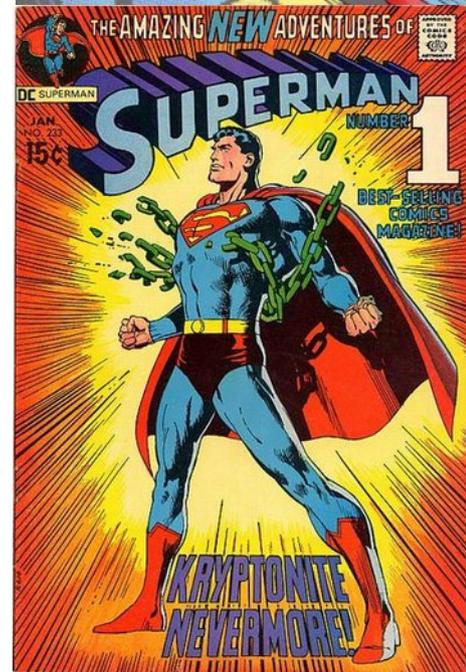
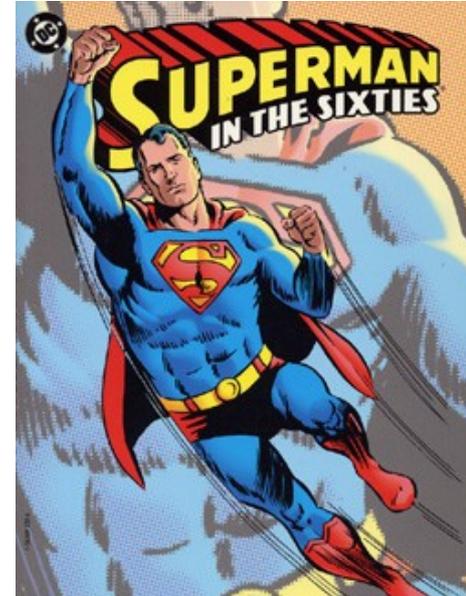
Super-vitesse : train express → **plus vite que la lumière**

De grands sauts : 200m → **Il peut voler !**

Invulnérabilité → **explosion atomique !**

Super-sens : ouïe, vision → vision atomique, X, télescopique

Hypnotisme, ventriloquisme, régénérescence...



# Introduction : des pouvoirs changeants...

«Silver/Bronze Age » → 1970 - 1985

Super-Force : voitures, trains, bateaux → **Planètes !**

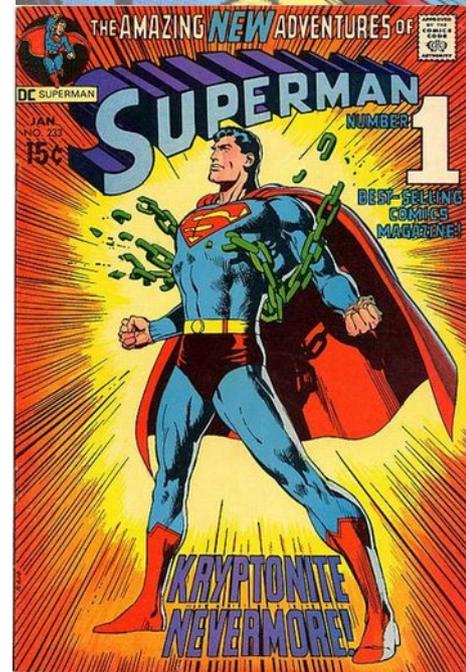
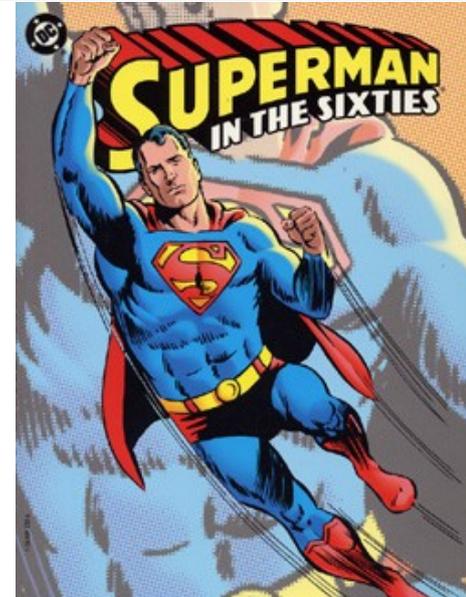
Super-vitesse : train express → **plus vite que la lumière**

De grands sauts : 200m → **Il peut voler !**

Invulnérabilité → **explosion atomique !**

Super-sens : ouïe, vision → vision atomique, X, télescopique

Hypnotisme, ventriloquisme, régénérescence...



# Introduction : des pouvoirs changeants...

«Silver/Bronze Age » → 1970 - 1985

Super-Force : voitures, trains, bateaux → **Planètes !**

Super-vitesse : train express → **plus vite que la lumière**

De grands sauts : 200m → **Il peut voler !**

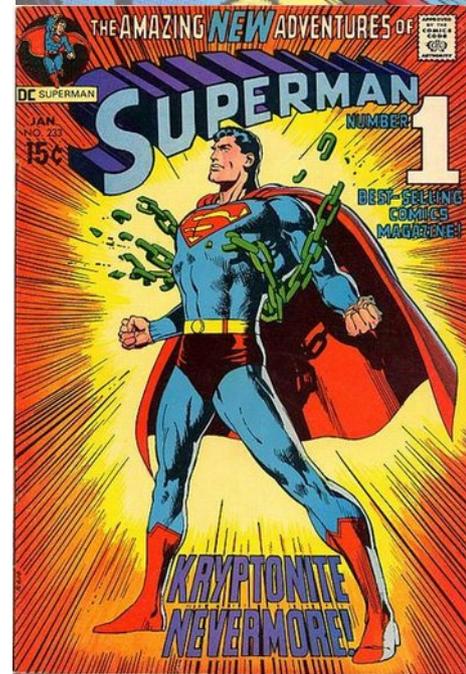
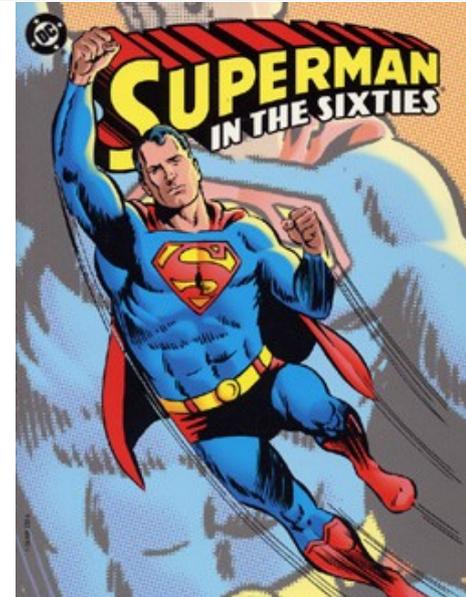
Invulnérabilité → **explosion atomique !**

Super-sens : ouïe, vision → vision atomique, X, télescopique

Hypnotisme, ventriloquisme, régénérescence...



Gotlib, Rubrique-à-Brac Taume 2



# Introduction : des pouvoirs changeants...

«Crisis on Infinite Earths » 1985 → « Modern Age »

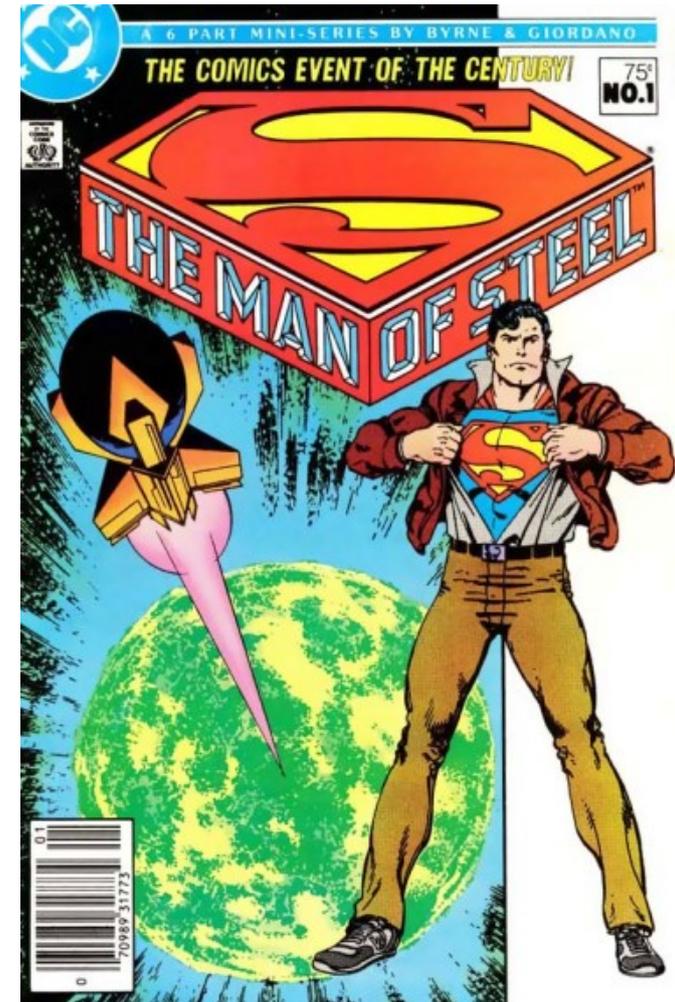
Super-Force : voitures, trains, bateaux → ~~Planètes!~~

Super-vitesse : train express → ~~plus vite que la lumière~~

De grands sauts : 200m → **Il peut voler !**

Invulnérabilité → ~~explosion atomique!~~

Super-sens : ouïe, vision



# Introduction : des pouvoirs changeants...



« Golden Age » 1930-1950

Super-Force : voitures, trains, bateaux...

Super-vitesse : train express

De grands sauts : 200m !

Super-résistance

Super-sens : ouïe, vision



Un Super-Hercule « raisonnable »



## 3- Les pouvoirs de Superman

Anatomie d'un Super-Héros ordinaire...



- 1 – Les origines : la planète Krypton
- 2 – La force de Superman, sa course, son vol
- 3 – Les super-sens décortiqués

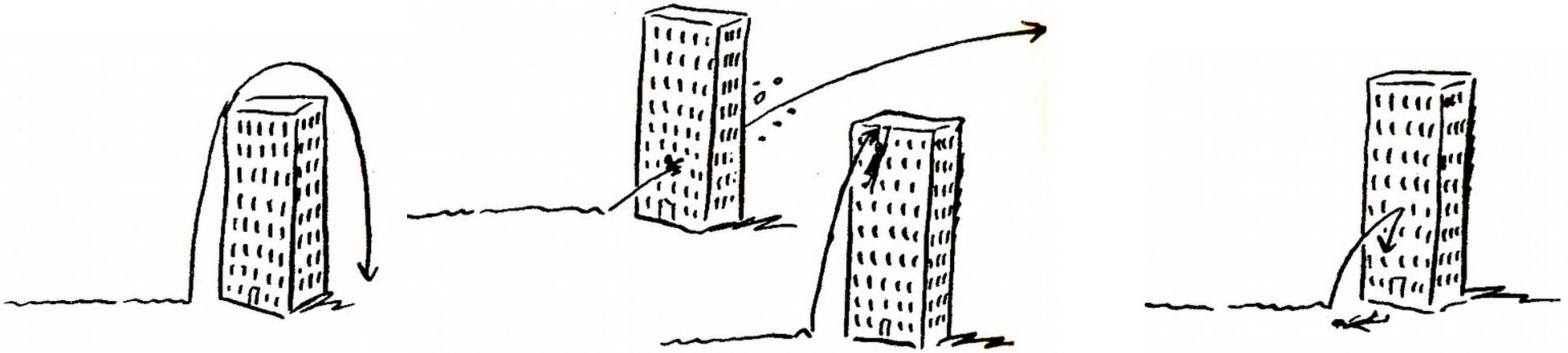
# I. Les origines : Krypton



bonds de 200m, sauts ~bâtiments de 20 étages ~60m

# I. Les origines : Krypton

---



Plus l'impulsion initiale est grande, plus le saut est long/haut

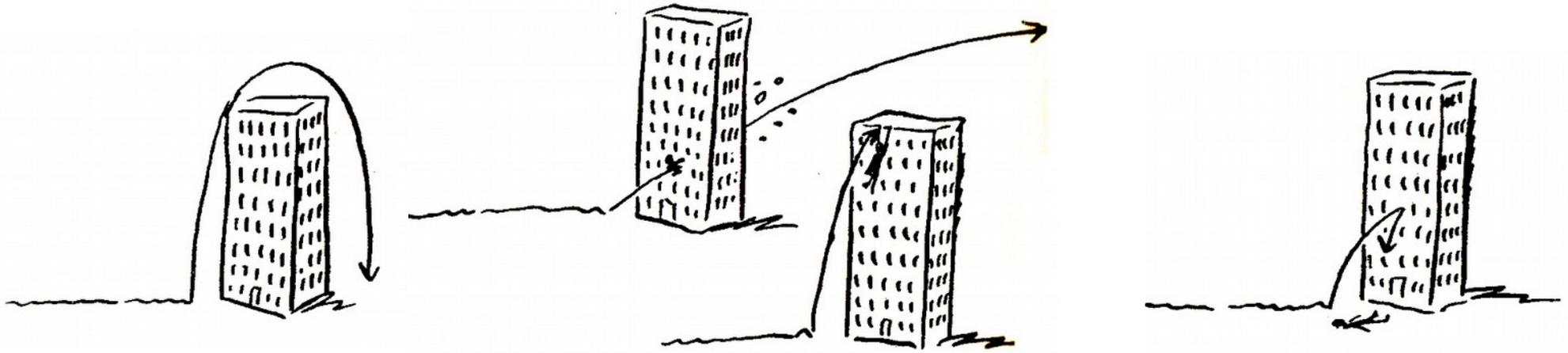
$$E_p = mgh = E_c = \frac{1}{2}mv^2$$
$$\Rightarrow v^2 = 2gh$$

Avec  $h \sim 60\text{m} \rightarrow v \sim 35 \text{ m/s}$

Ce qui donne une accélération d'environ  $300 \text{ m/s}^2$  sur  $0,1\text{-}0,2\text{s}$



# I. Les origines : Krypton



Plus l'impulsion initiale est grande, plus le saut est long/haut

$$E_p = mgh = E_c = \frac{1}{2}mv^2$$
$$\Rightarrow v^2 = 2gh$$

$$F = ma \rightarrow 110 \times 300 \text{ m/s}^2 = 33000 \text{ N} = m g_{\text{Krypton}}$$

$$\rightarrow g_{\text{Krypton}} \sim 300 \text{ m/s}^2 \sim 30 \times g_{\text{Terre}}$$



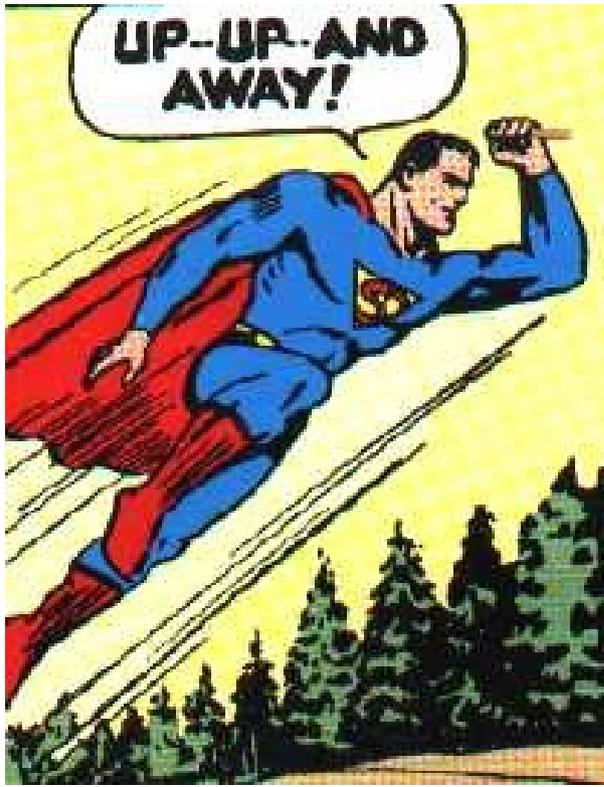
# I. Les origines : Krypton

---



Des bonds de cabri sur la Lune

# I. Les origines : Krypton



Athlète terrestre

Saut en longueur  $\sim 7\text{m} \rightarrow \sim 200\text{m}/30$

Saut en hauteur  $\sim 2\text{m} \rightarrow 60\text{m}/30$

Une gravité 30x plus forte?



# I. Les origines : Krypton



$$F = G \cdot \frac{m_1 \cdot m_2}{d^2}$$

$F = mg$ , avec

$$g = \frac{GM}{R^2}$$

Avec  $M \propto \rho \times R^3$

$$\Rightarrow g \propto \rho R$$

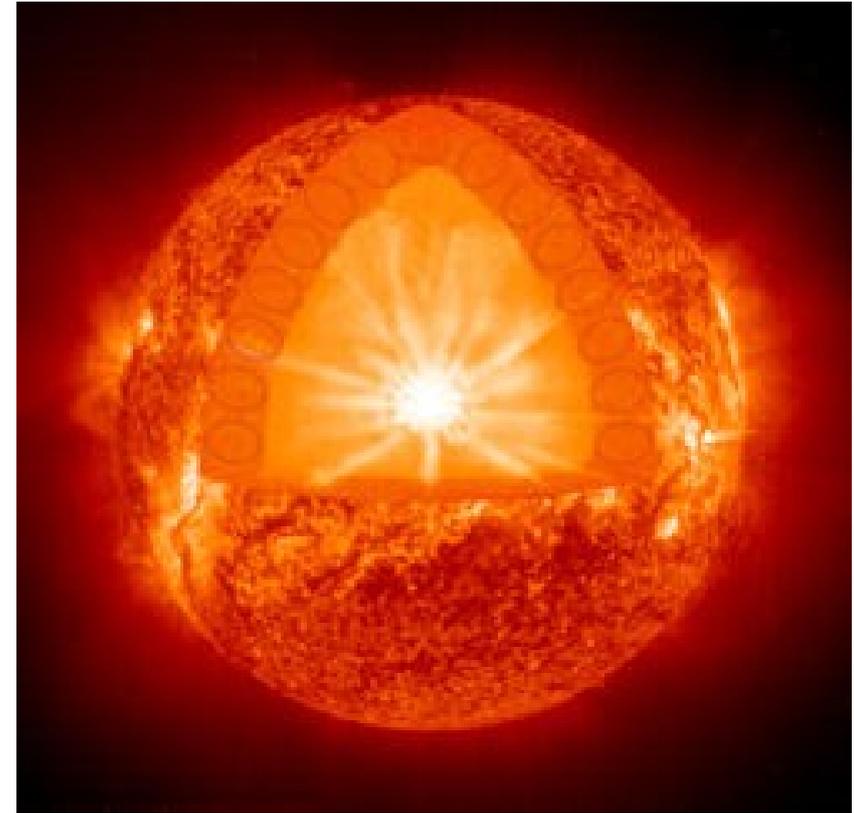
# I. Les origines : Krypton

Une densité 30x plus grande ?

$$g = \frac{GM}{R^2} \text{ avec } M \propto \rho \times R^3 \Rightarrow g \propto \rho R$$



Terre  $\sim 5\text{g/cm}^3$

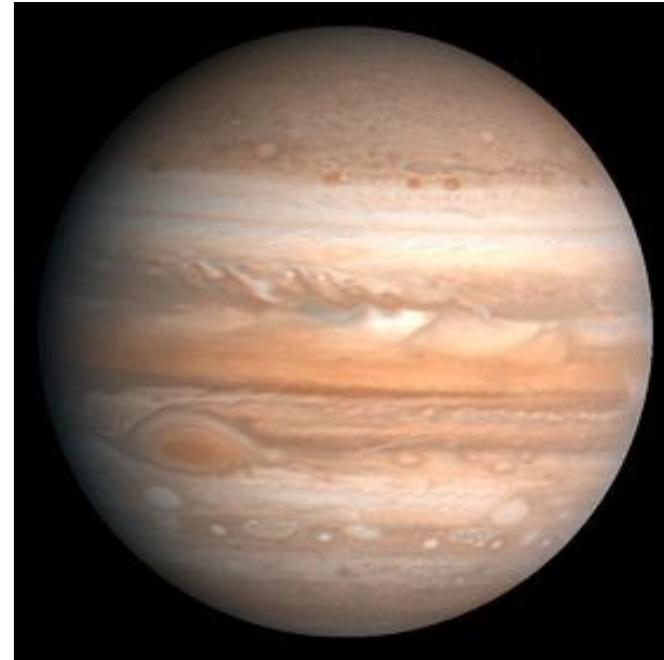
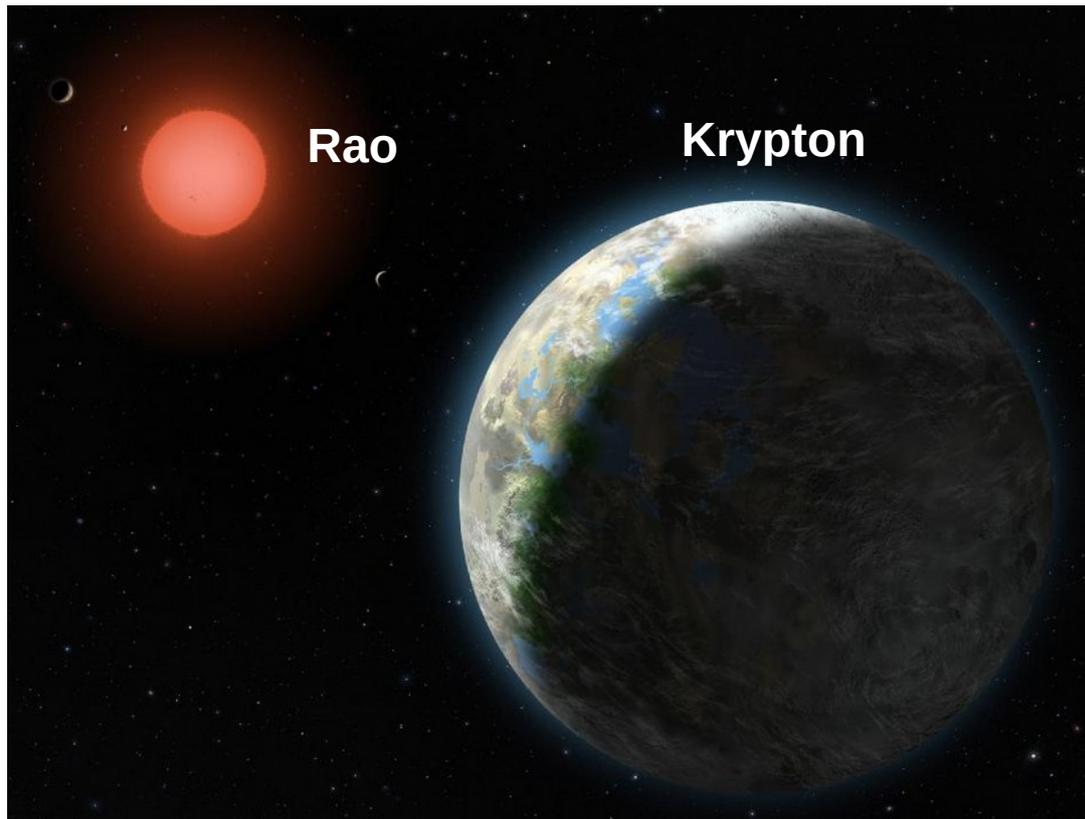


Noyau du Soleil  $\sim 150\text{ g/cm}^3$

Matière « normale » la plus dense Osmium/Iridium/Platine  $\sim 20\text{ g/cm}^3$

# I. Les origines : Krypton

$$\Rightarrow g \propto \rho R$$



Un rayon 30x plus grand  $\rightarrow$  3x Jupiter, 1/12 de la masse du Soleil  
soit Masse  $\sim$  27000 x celle de la Terre...

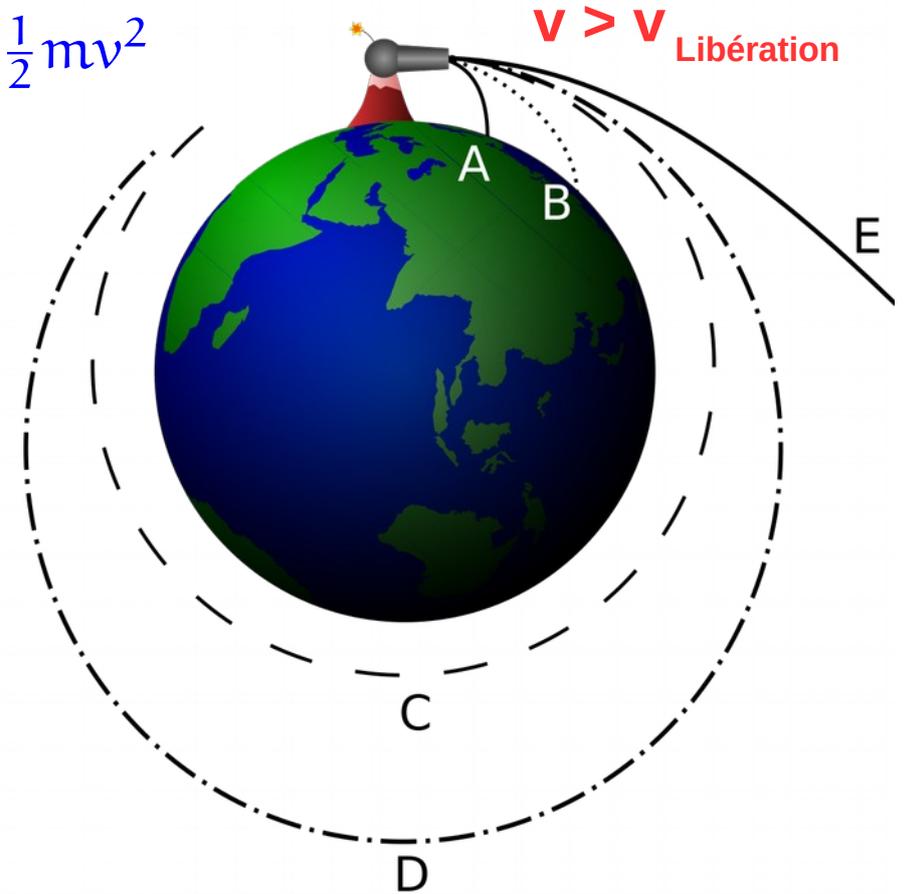
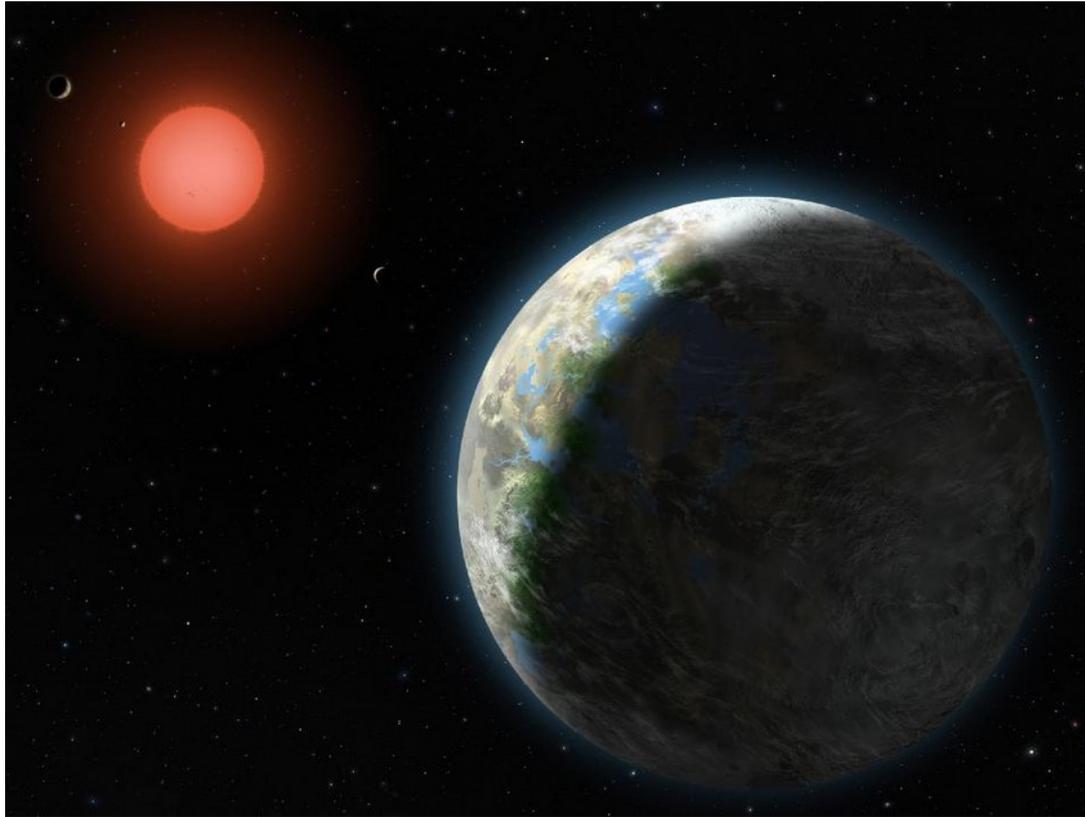


# I. Les origines : Krypton

Vitesse de Libération

$$v = \sqrt{\frac{2GM}{R}} = \sqrt{2g \cdot R}$$

$$E_p = \frac{GMm}{R}, E_c = \frac{1}{2}mv^2$$



27000x plus massif, R 30x plus grand  $\rightarrow v_{\text{libération}}$  30x plus grande

# I. Les origines : Krypton

## Vitesse de Libération

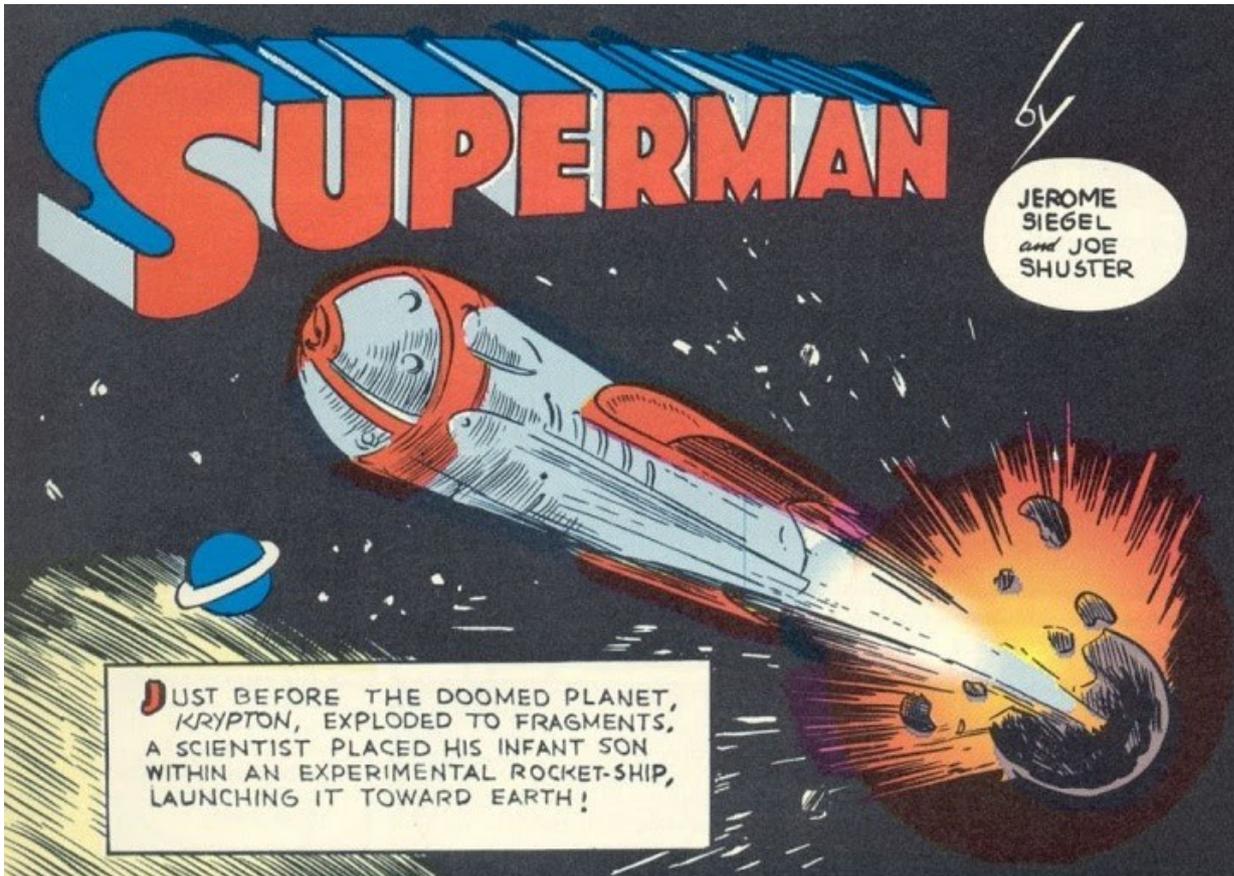
27000x plus massif, R 30x plus grand →  $v_{\text{libération}}$  30x plus grande



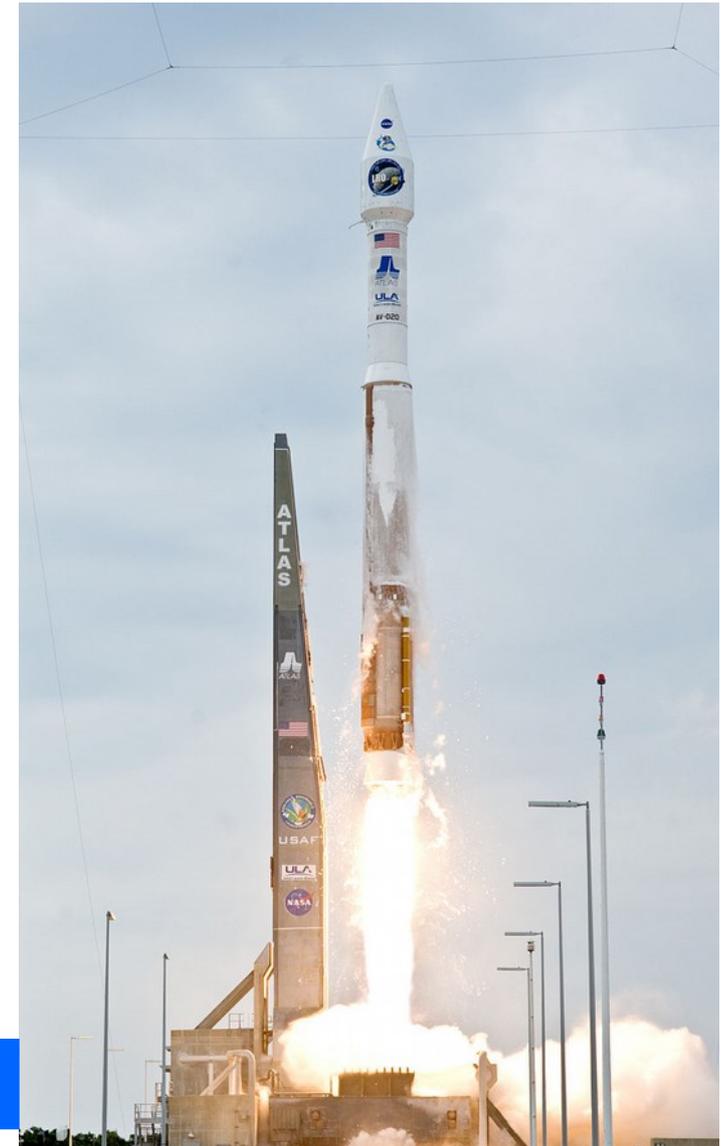
# I. Les origines : Krypton

## Vitesse de Libération

$v_{\text{libération}} \sim 30x \text{ plus grande} \sim 34 \text{ km/s} !$



ATLAS V (2006)  $\sim 16\text{km/s}$



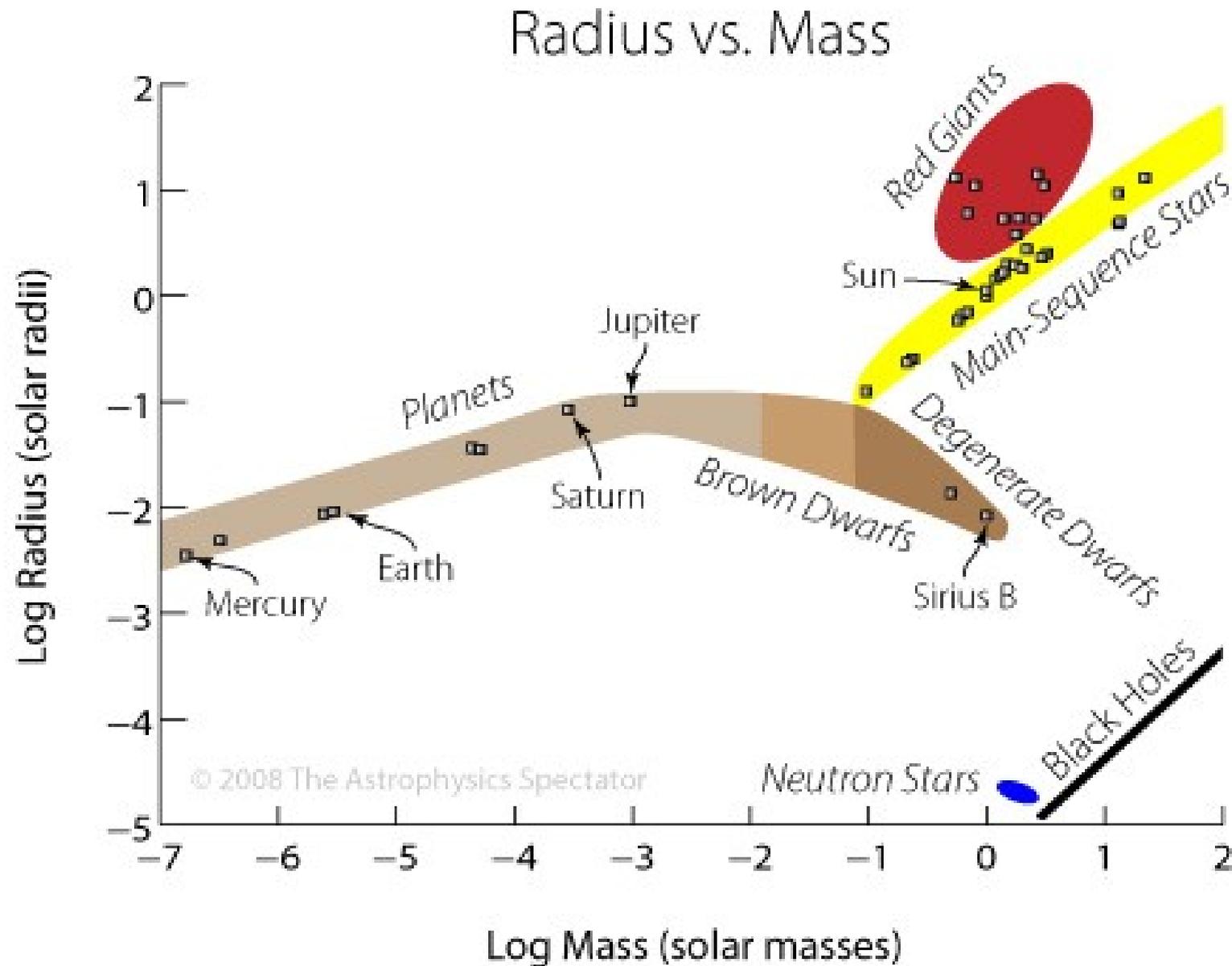
# I. Les origines : Krypton



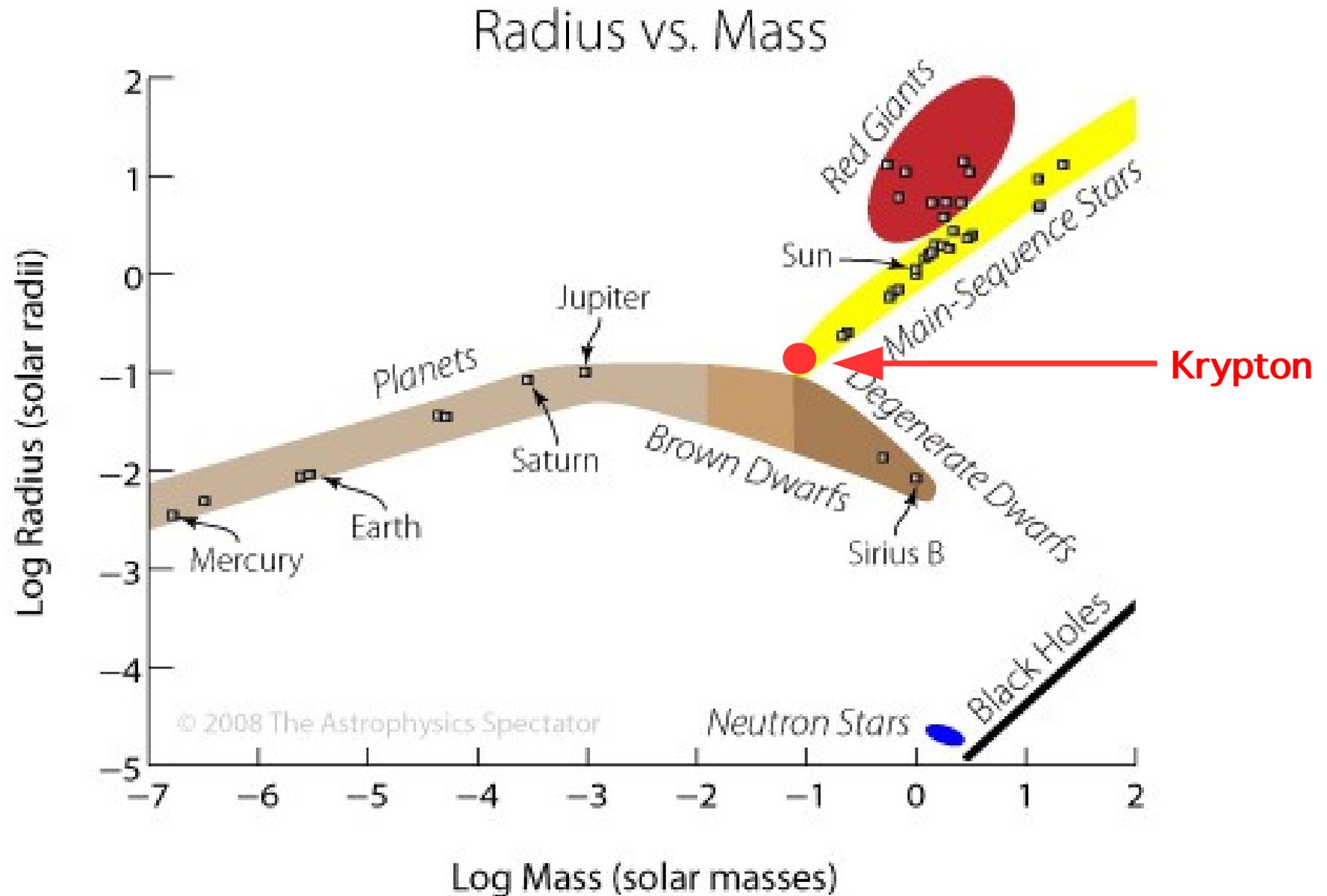
Un climat froid ?



# I. Les origines : Krypton



# I. Les origines : Krypton



# I. Les origines : Krypton



# I. Les origines : Krypton



# I. Les origines : Krypton

---

Que se passe-t-il sous l'action de la gravité ?

Gravité

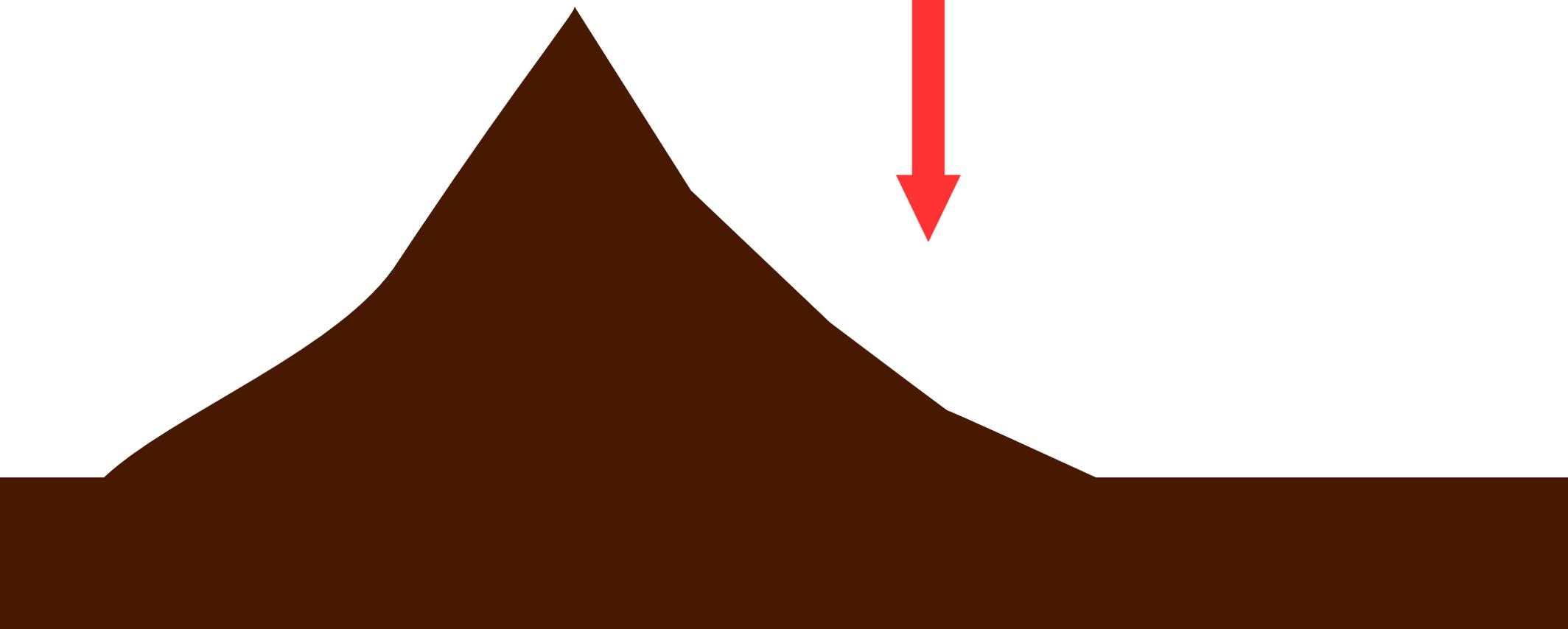


# I. Les origines : Krypton

---

Que se passe-t-il sous l'action de la gravité ?

Gravité



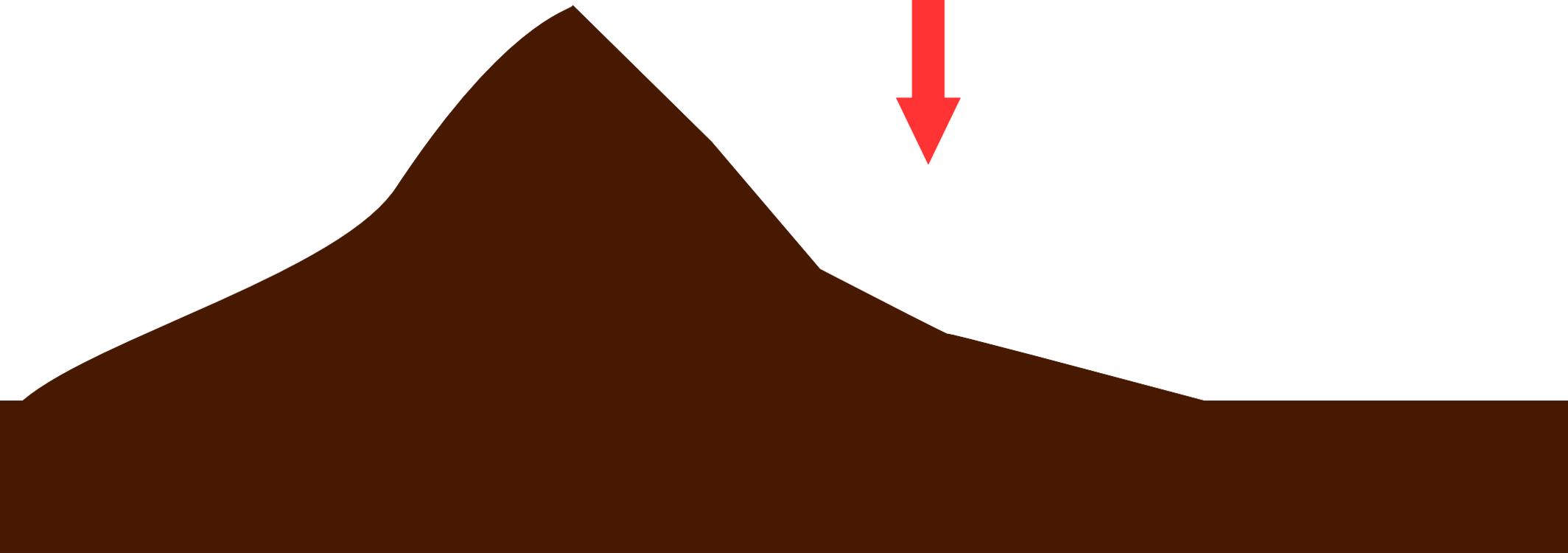
# I. Les origines : Krypton

---

Que se passe-t-il sous l'action de la gravité ?

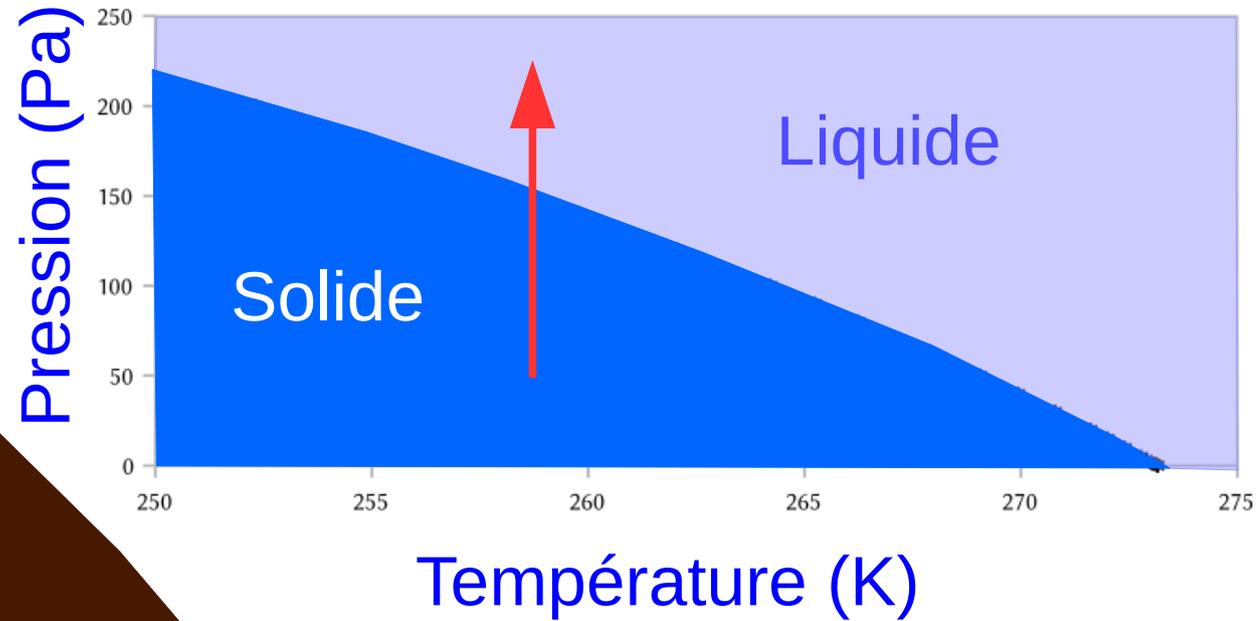
...la montagne s'affaisse ! Pourquoi ?

Gravité



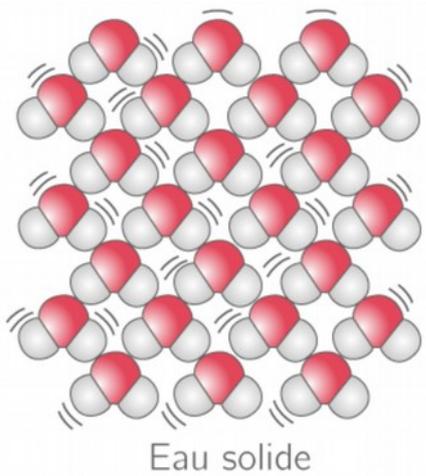
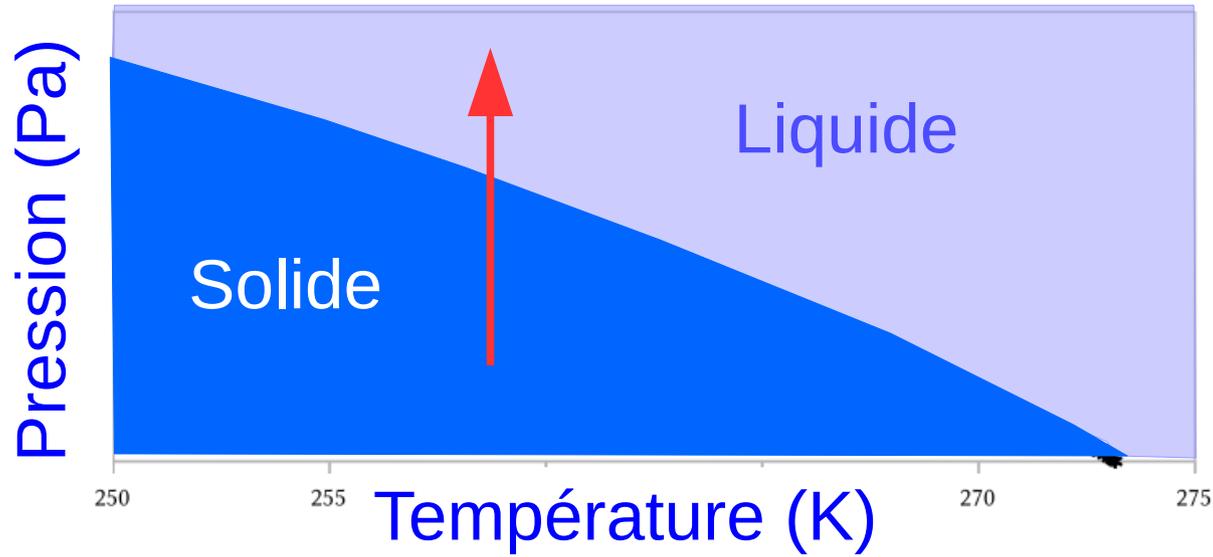
# I. Les origines : Krypton

Exemple de l'Eau

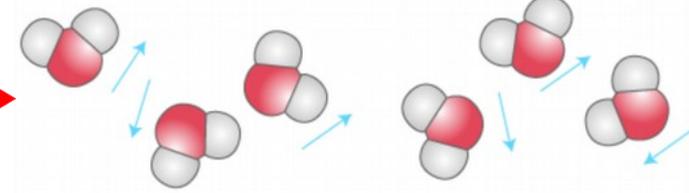
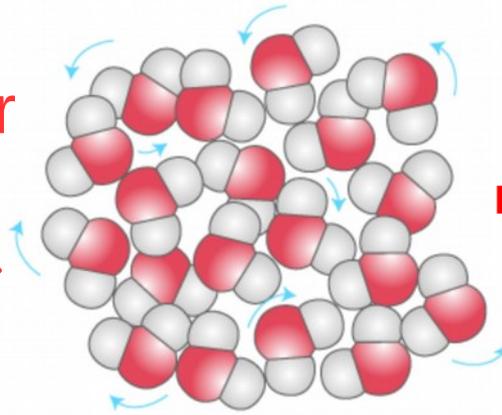


# I. Les origines : Krypton

## Exemple de l'Eau



« Chaleur  
Latente »



= Energie par unité de masse



# I. Les origines : Krypton

**Modélisons la montagne par une sphère de rayon R (1 seule dimension!)**

Paramètres :  $R \rightarrow [H] = [R] = L$

Gravité  $[g] = L.T^{-2}$

Chaleur latente de fusion de la roche :  $[L_f] = E/M = M.L^2.T^{-2}/M = L^2.T^{-2}$

Masse volumique  $[\rho] = M.L^{-3}$

1 - La seule masse « M » est dans  $\rho$

→ H est indépendant de  $\rho$  !

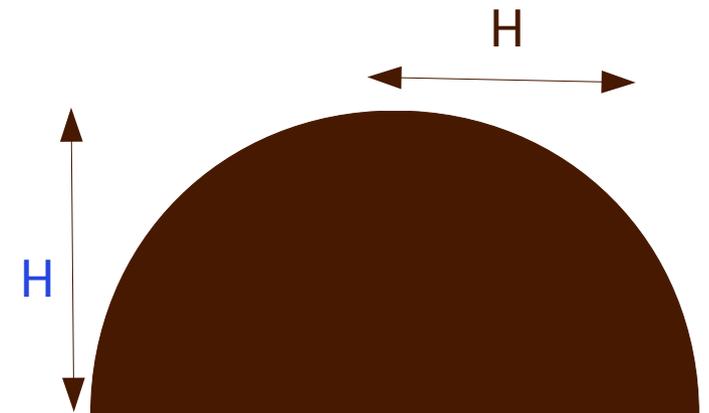
→ Il reste H, g,  $L_f \rightarrow$  **3 paramètres, 2 dimensions**

2 - On peut construire 1 nombre sans dimensions

$$\Rightarrow [H] = L = L_f^x . g^y = (L^2.T^{-2})^x . (L.T^{-2})^y$$

$$\Rightarrow L = L^{2x+y} . T^{-2(x+y)} \rightarrow x = -y = 1$$

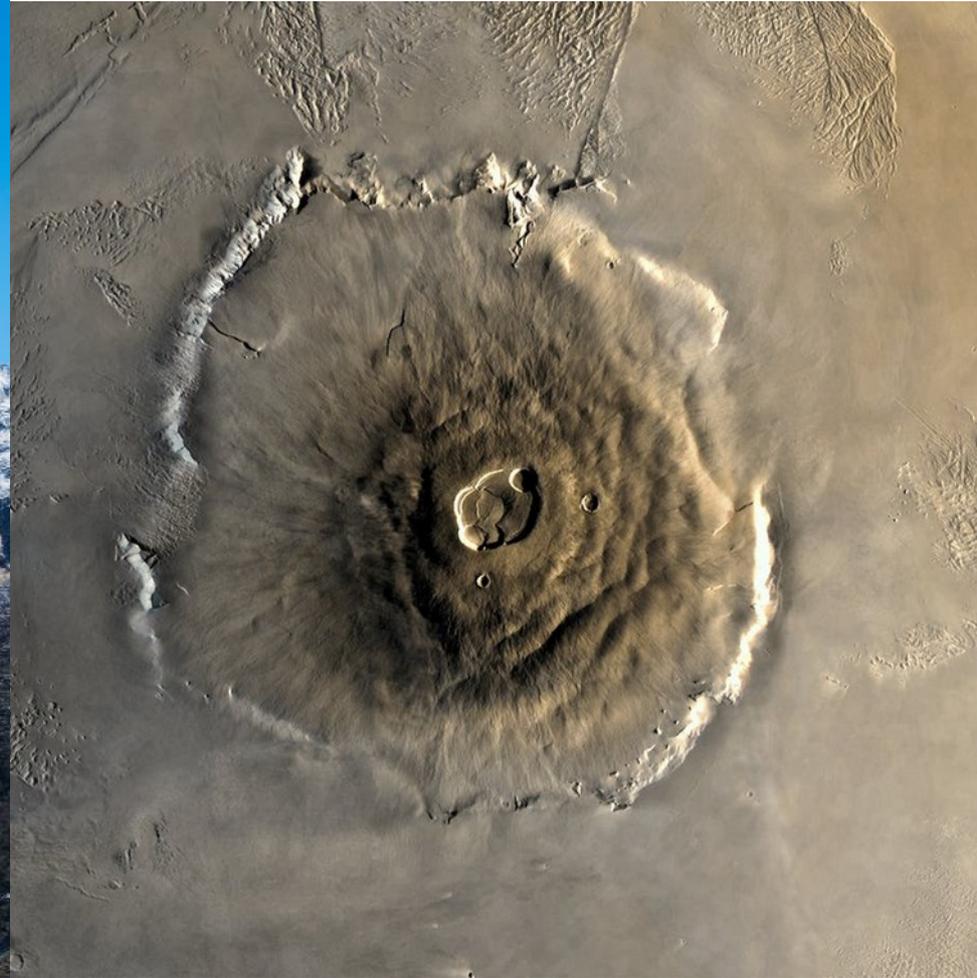
$$H_{\max} = \text{constante} \times \frac{L_f}{g} \propto \frac{1}{g}$$



# I. Les origines : Krypton



Mont Everest ~ 8 km



Sur Mars : gravité /3  
→ Olympus Mons - 22 km !



# I. Les origines : Krypton

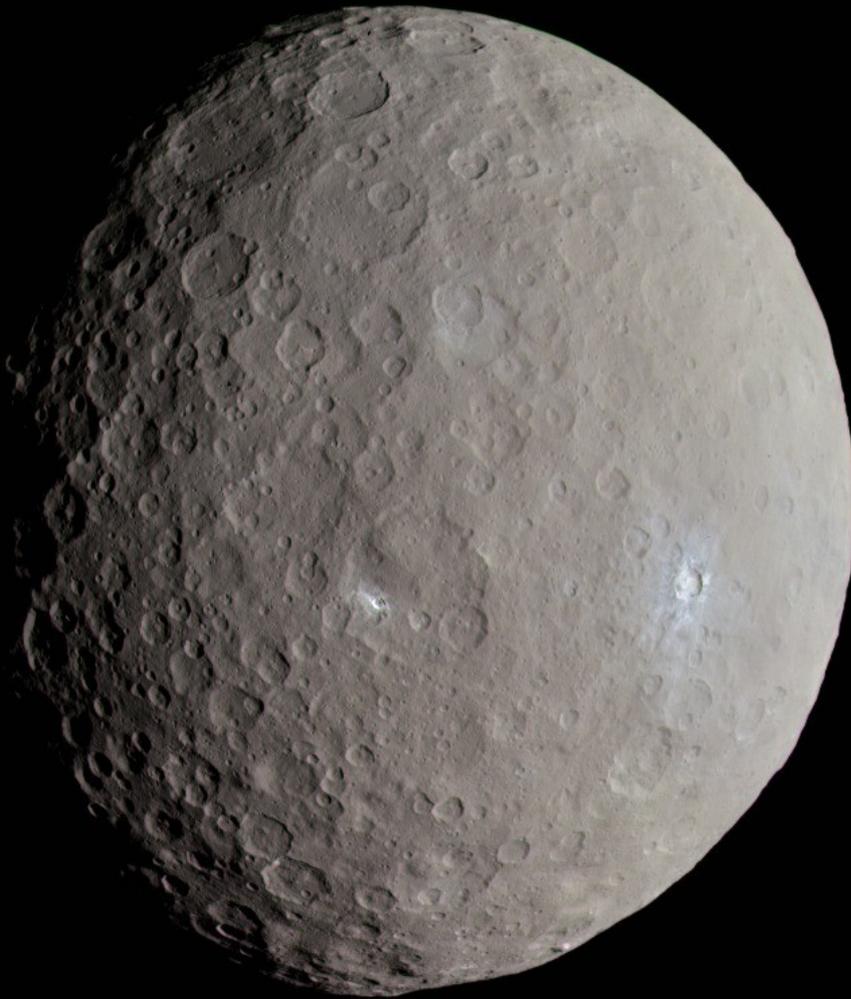
Sur Krypton,  $H_{\max} \sim 15-30x$  plus petite !



Sur Krypton : gravité x 30  
→ Gold Volcano ~ 200-300m ?



# I. Les origines : Krypton



Cérès  
Diamètre ~500km



Eros  
33 km x 11 km x 11 km



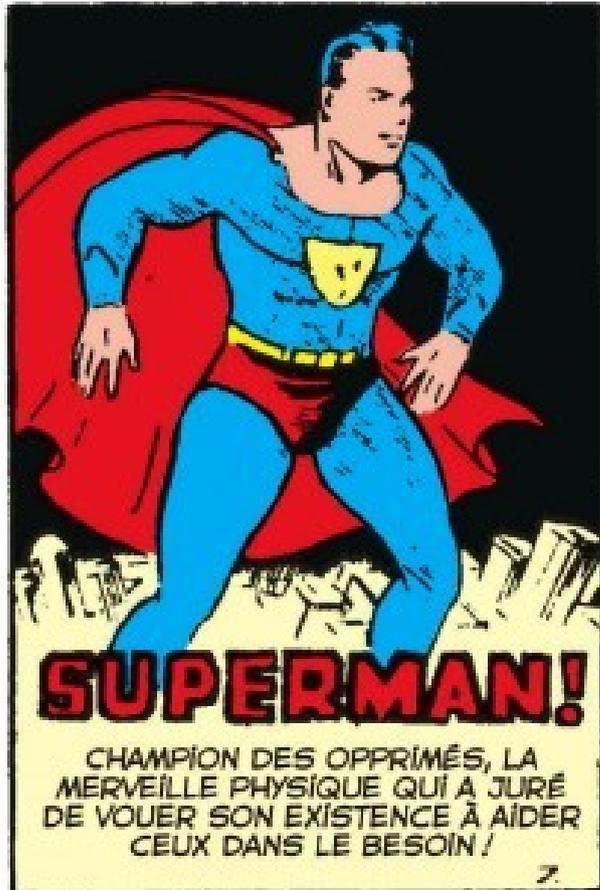
## 3- Les pouvoirs de Superman

Anatomie d'un Super-Héros ordinaire...



- 1 – Les origines : la planète Krypton
- 2 – La force de Superman, sa course, son vol
- 3 – Les super-sens décortiqués

## II. Sa force



### EXPLICATION SCIENTIFIQUE DE LA FORCE ÉTONNANTE DE CLARK KENT.

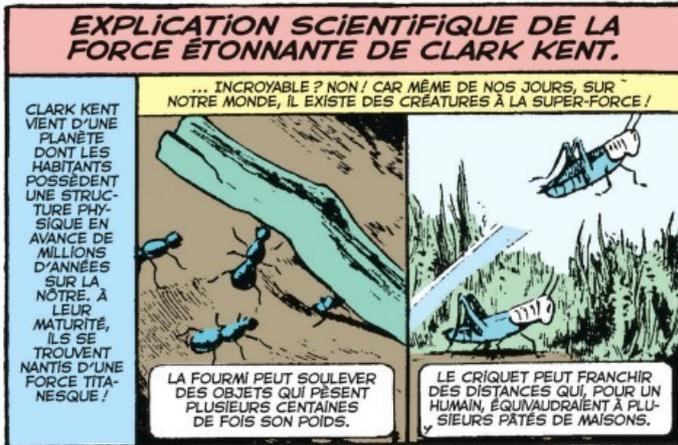
... INCROYABLE ? NON ! CAR MÊME DE NOS JOURS, SUR NOTRE MONDE, IL EXISTE DES CRÉATURES À LA SUPER-FORCE !

CLARK KENT VIENT D'UNE PLANÈTE DONT LES HABITANTS POSSÈDENT UNE STRUCTURE PHYSIQUE EN AVANCE DE MILLIONS D'ANNÉES SUR LA NÔTRE. À LEUR MATURITÉ, ILS SE TROUVENT NANTIS D'UNE FORCE TITANESQUE !

LA FOURMI PEUT SOULEVER DES OBJETS QUI PÈSENT PLUSIEURS CENTAINES DE FOIS SON POIDS.

LE CRIGUET PEUT FRANCHIR DES DISTANCES QUI, POUR UN HUMAIN, ÉQUIVAUDRAIENT À PLUSIEURS PÂTÉS DE MAISONS.

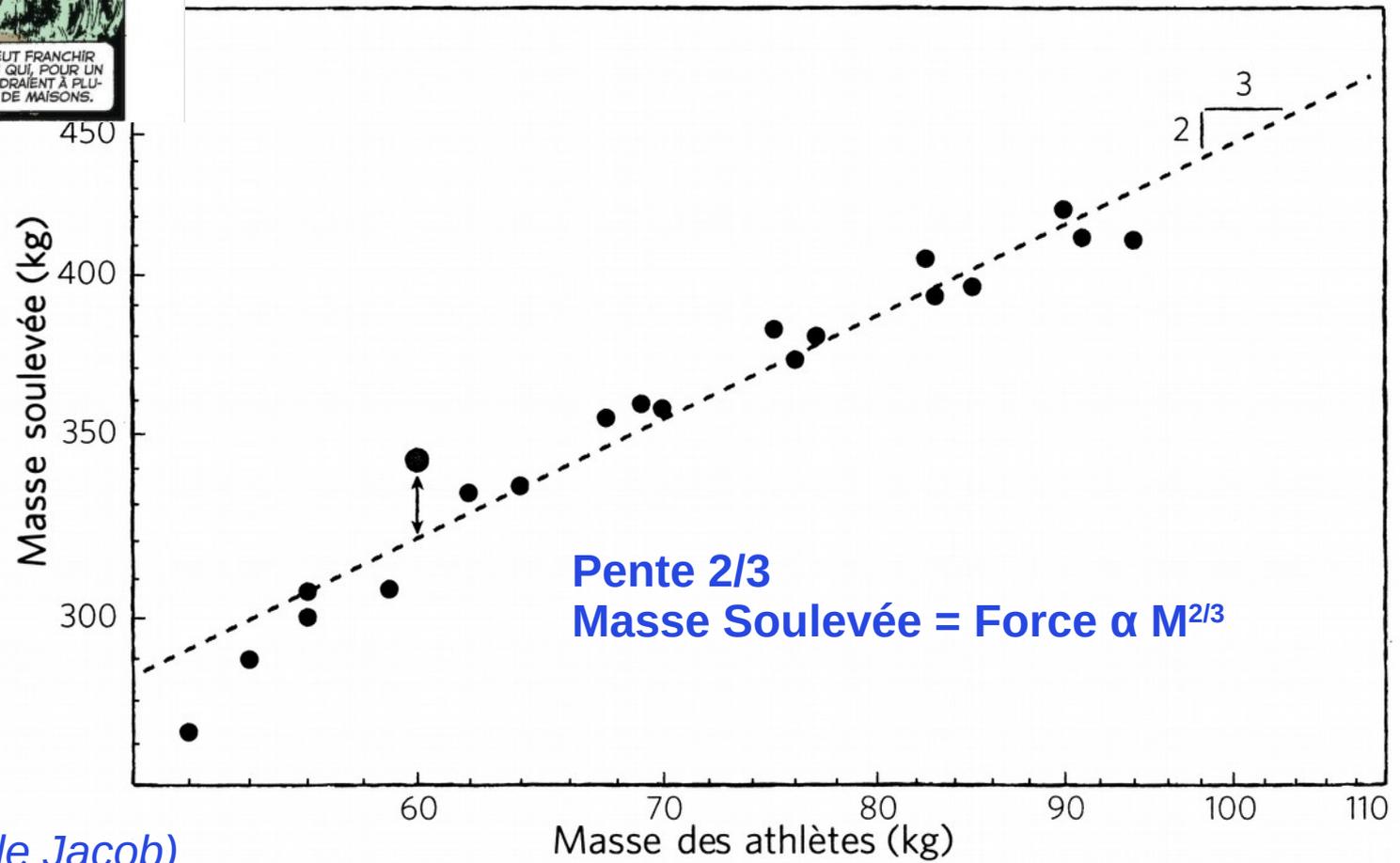
# II. Sa force



Force  $\propto$  Section des Muscles  $\propto L^2$

$\rightarrow F/\text{Masse} \propto 1/L$

$\rightarrow F \propto M^{2/3}$

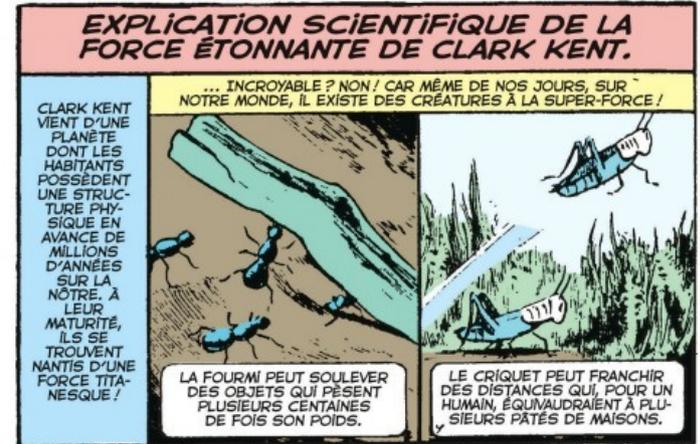
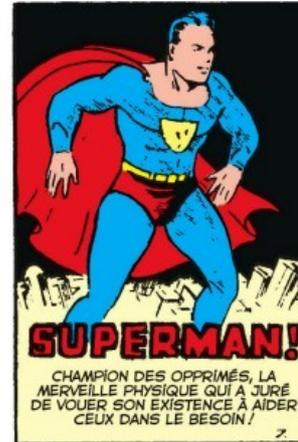


T. Séon  
« Les lois d'échelle » (Odile Jacob)

# II. Sa force



$F/M \propto 1/L$  et  $F \propto M^{2/3}$



Echelle 1/2 → 2x plus fort



Echelle 1/10 → 10x plus fort

## II. Sa force

---

Ou alors...



Sur Krypton...

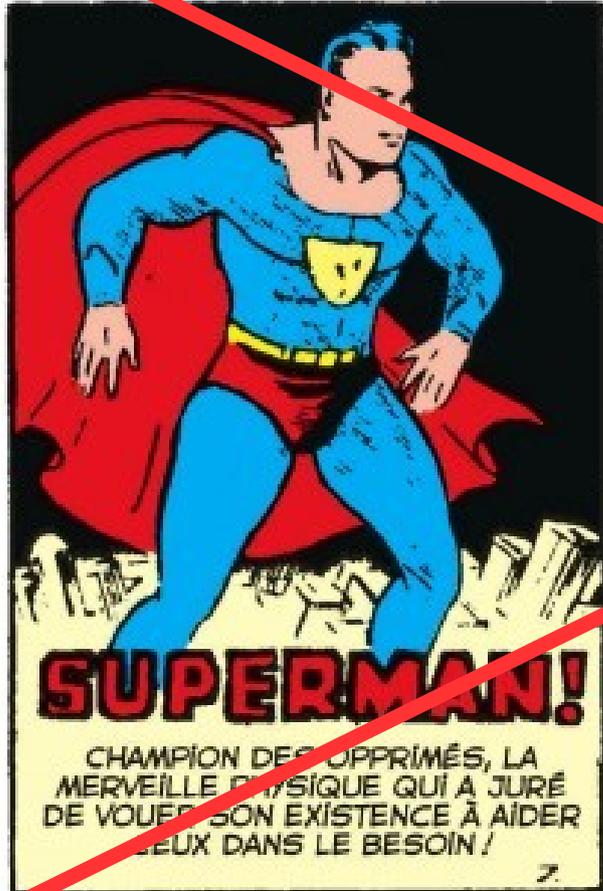
Sur Terre...



Echelle 1/30 ?



## II. Sa force



**EXPLICATION SCIENTIFIQUE DE LA FORCE ÉTONNANTE DE CLARK KENT.**

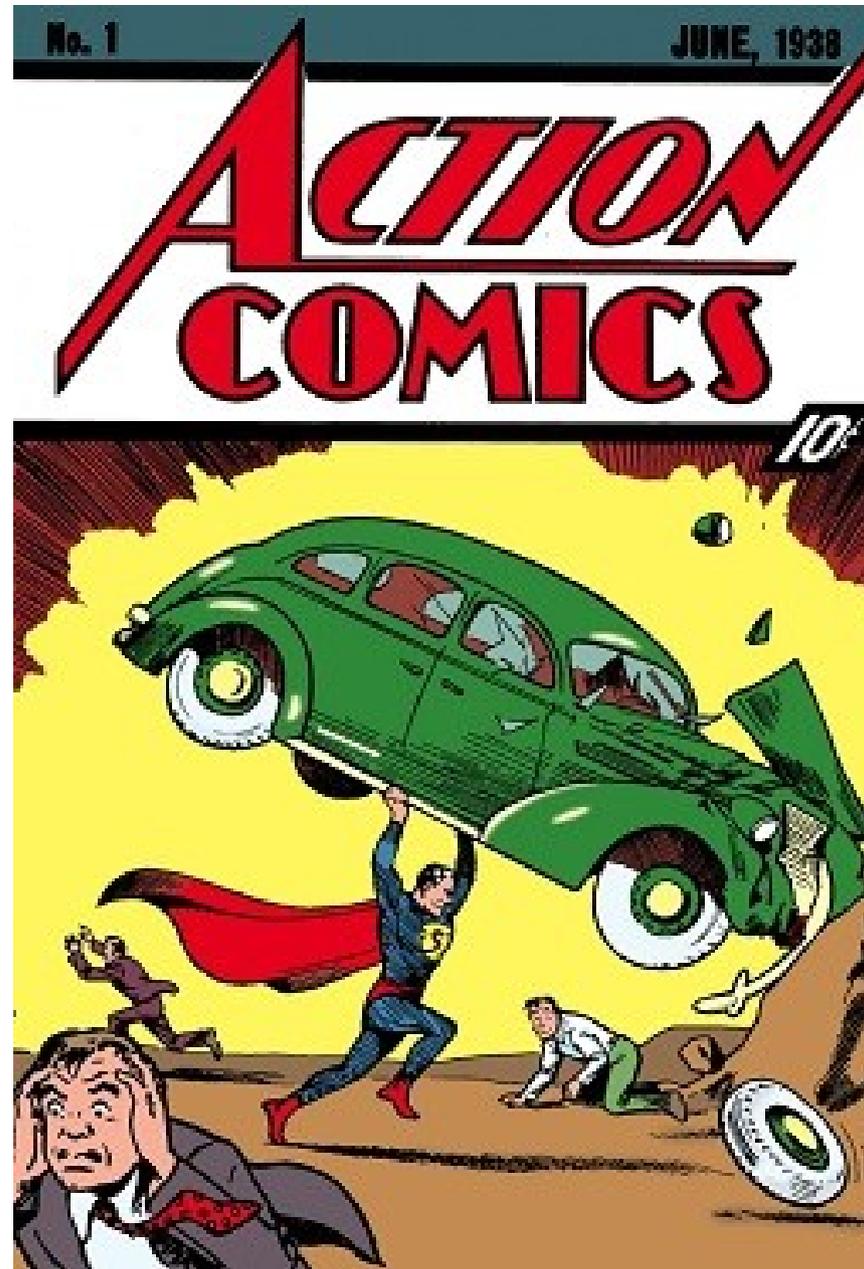
... INCROYABLE ? NON ! CAR MÊME DE NOS JOURS, SUR NOTRE MONDE, IL EXISTE DES CRÉATURES À LA SUPER-FORCE !

CLARK KENT VIENT D'UNE PLANÈTE DONT LES HABITANTS POSSÈDENT UNE STRUCTURE PHYSIQUE EN AVANCE DE MILLIONS D'ANNÉES SUR LA NÔTRE. À LEUR MATURITÉ, ILS SE TROUVENT NANTIS D'UNE FORCE TITANESQUE !

LA FOURMI PEUT SOULEVER DES OBJETS QUI PÈSENT PLUSIEURS CENTAINES DE FOIS SON POIDS.

LE CRIGET PEUT FRANCHIR DES DISTANCES QUI, POUR UN HUMAIN, ÉQUIVAUVAIENT À PLUSIEURS PÂTÉS DE MAISONS.

## II. Sa force



# II. Sa force

## Montons les marches 4 par 4....

Energie  $\sim mgh/\text{temps}$

Pour 0,5s et  $h = 1\text{m}$ , on obtient 20 W/kg

Une jambe représente 15 % du poids total, avec  $\sim 80\%$  de muscles

$\rightarrow 160\text{ W/kg}$  de muscle

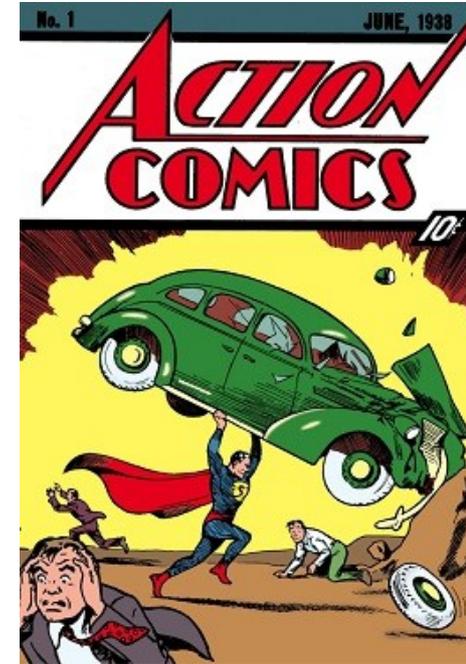
Pour Superman, 30x plus puissant  $\rightarrow 5000\text{ W/kg}$  de muscle !

## Athlète terrestre : Lanceur de poids à 10m, poids d'environ 7kg

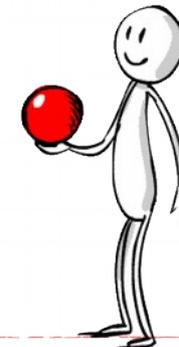
Pour 10m on doit avoir  $v \sim 10\text{ m/s}$

$\rightarrow$  Energie du projectile  $\sim 360\text{J}$ , sur 0,2s  $\rightarrow 1800\text{ W}$

$\rightarrow$  Mobilise  $\sim 10\text{kg}$  de muscles !



$$d_{\max} = f(\text{angle}) \frac{v^2}{g}$$



## II. Sa force

5000 W/kg de muscle pour Superman

**Athlète terrestre : Poids de 7 kg à 22m**

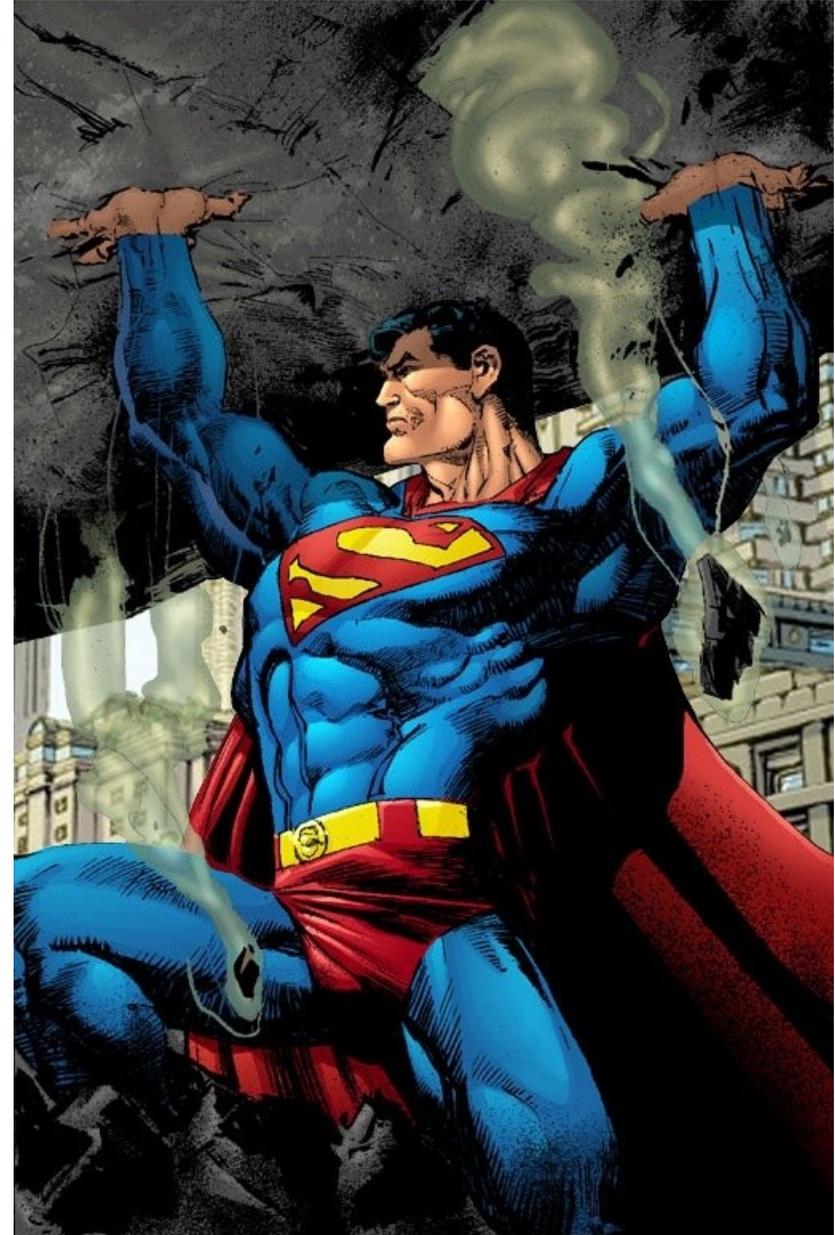
→ Energie du projectile  $\sim 360\text{J}$ , sur  $0,2\text{s}$  →  $1800\text{ W}$

Pour  $160\text{W/kg}$  de muscle,  $\sim 10\text{kg}$  de muscles !

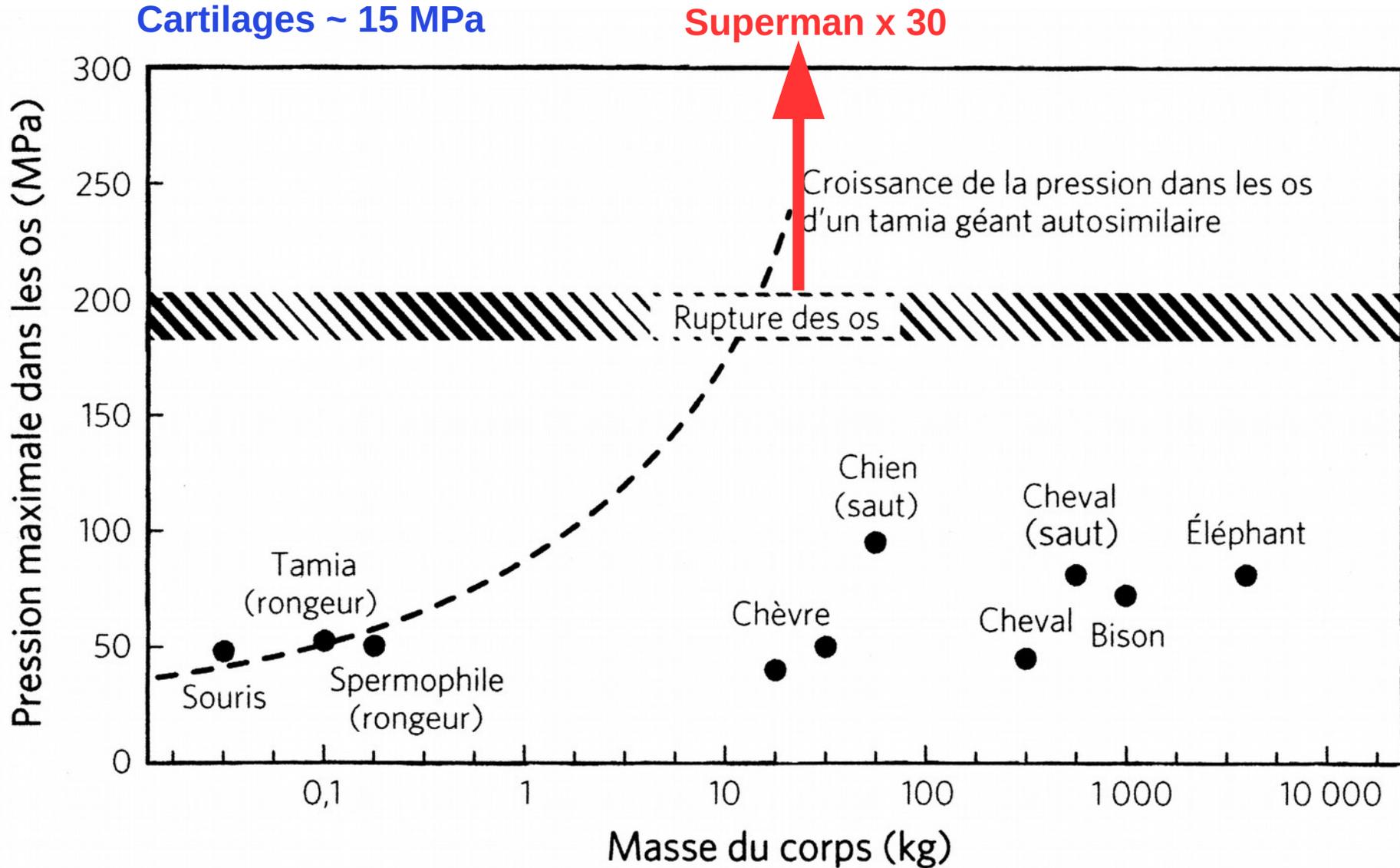
Pour Superman + voiture d'1 Tonne

→ Puissance  $\times (1000/7)$  →  $250\,000\text{ W}$  !

→ **Plus de 50kg de muscles utilisés !**



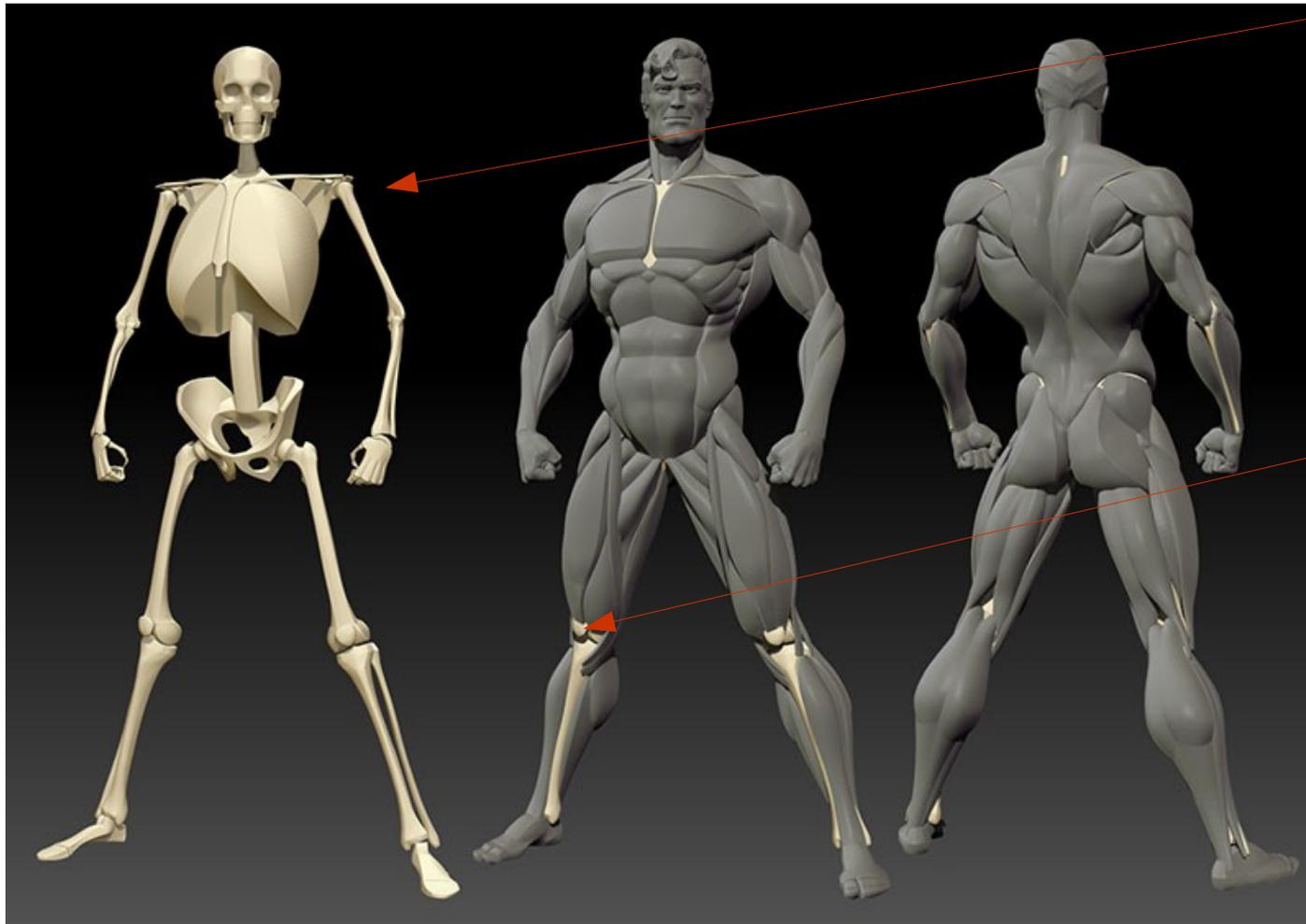
# II. Sa force



**Cartilage 15 MPa → 450 MPa (Acier)**  
**Os 200 MPa → 6 GPa (Fibre de Carbone)**

*T. Séon*  
*« Les lois d'échelle » (Odile Jacob)*

## II. Sa force



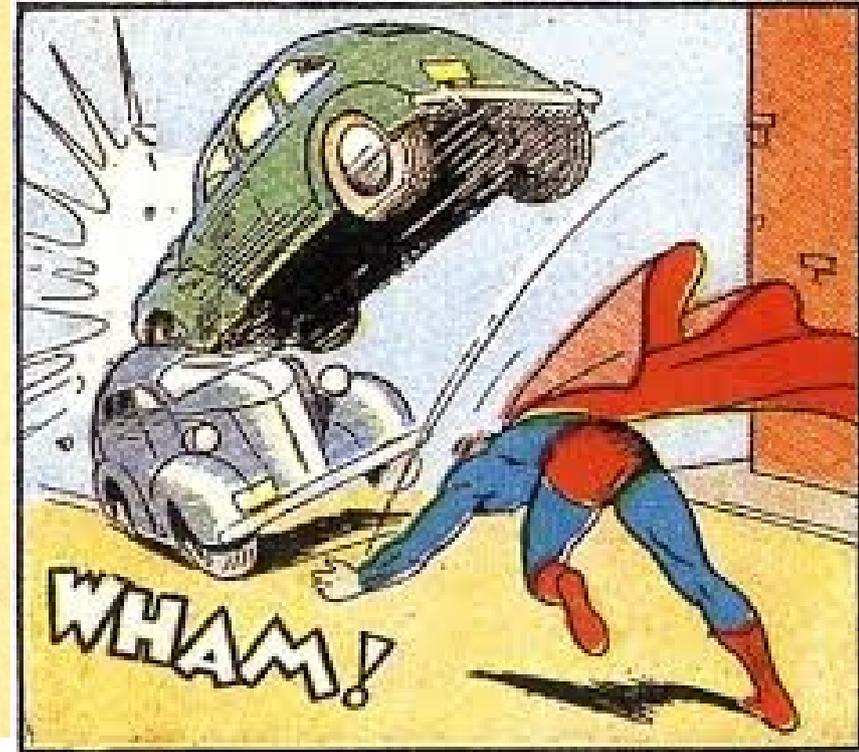
Fibre de Carbone

Acier

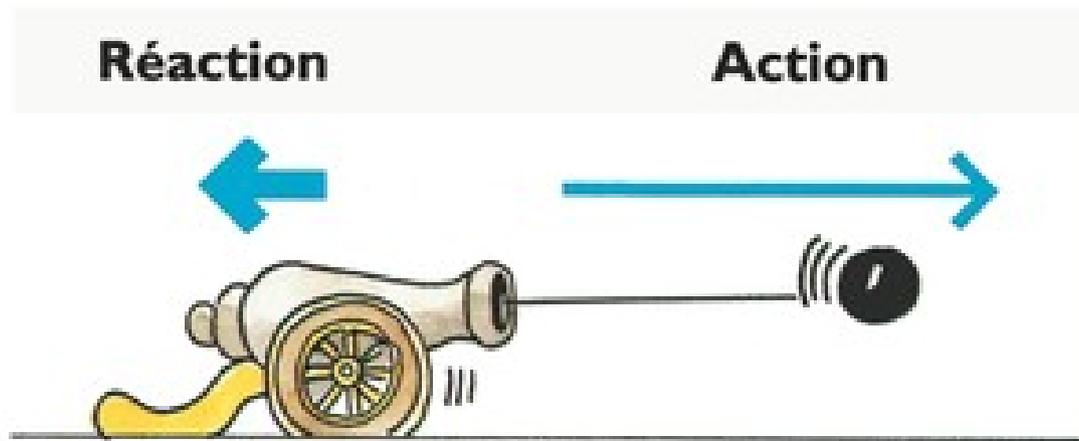
Un bel athlète, mais pas vraiment humain...



## II. Sa force & son lancer

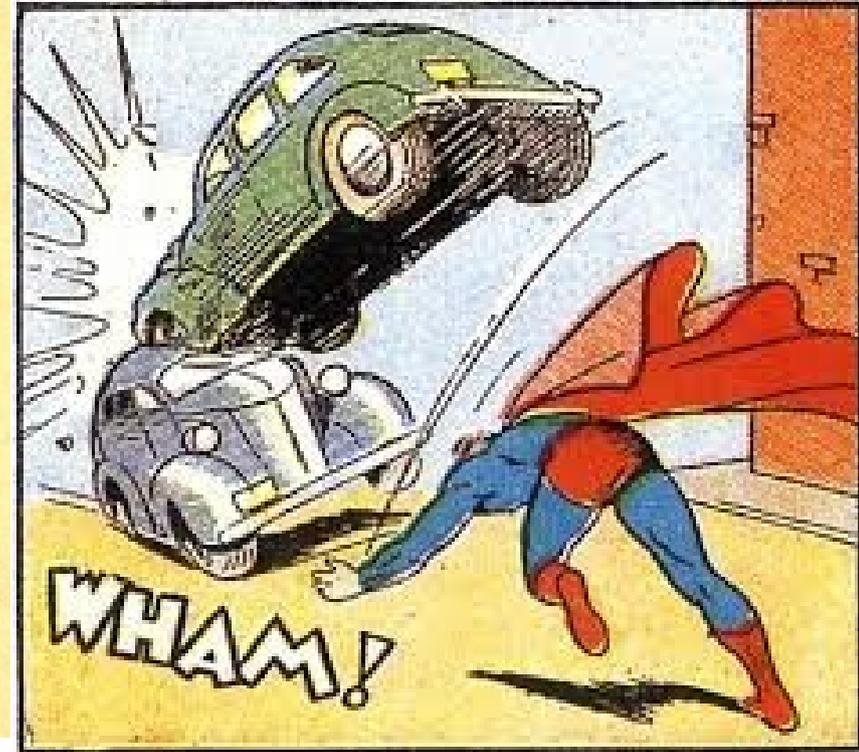


## II. Sa force & son lancer



## II. Sa force & son lancer

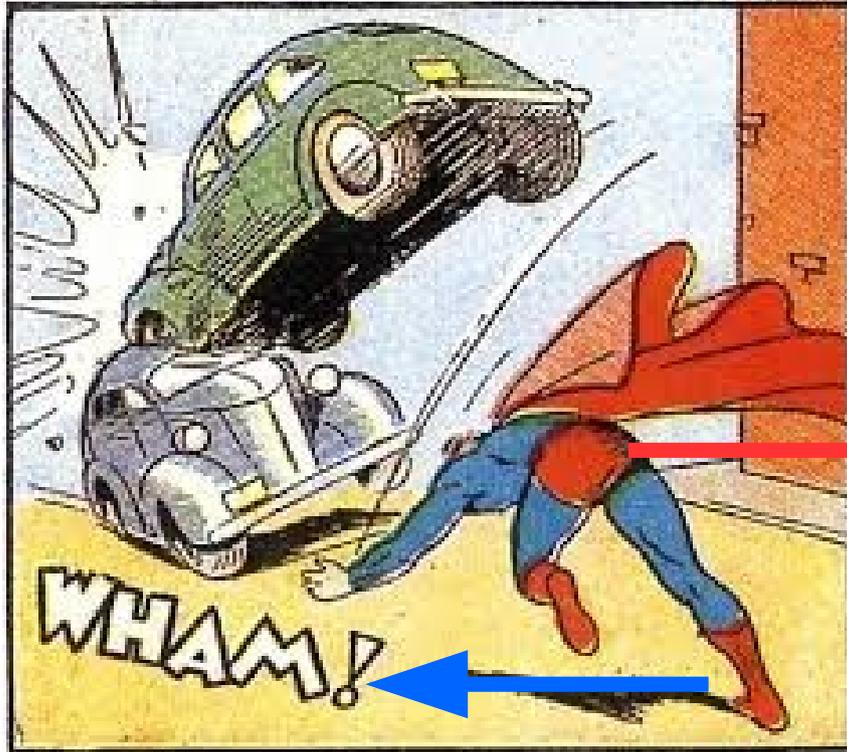
Force = Masse x Accélération = Variation de (Masse x Vitesse)



« Quantité de Mouvement » = masse x vitesse conservée au cours du mouvement !

$$M_{\text{Voiture}} V_{\text{Voiture}} + m_{\text{Superman}} V_{\text{Superman}} = 0$$
$$\rightarrow V_{\text{Superman}} = M_{\text{voiture}} V_{\text{Voiture}} / m_{\text{Superman}} \sim 1000 \times 10/100 \sim 100 \text{ m/s !}$$

## II. Sa force & son lancer



**Force de Recul**

$$\rightarrow F = m_{\text{Superman}} v_{\text{Superman}} / \text{durée} \sim 50-100 \times m_{\text{Superman}} !$$

**Force de Frottements**

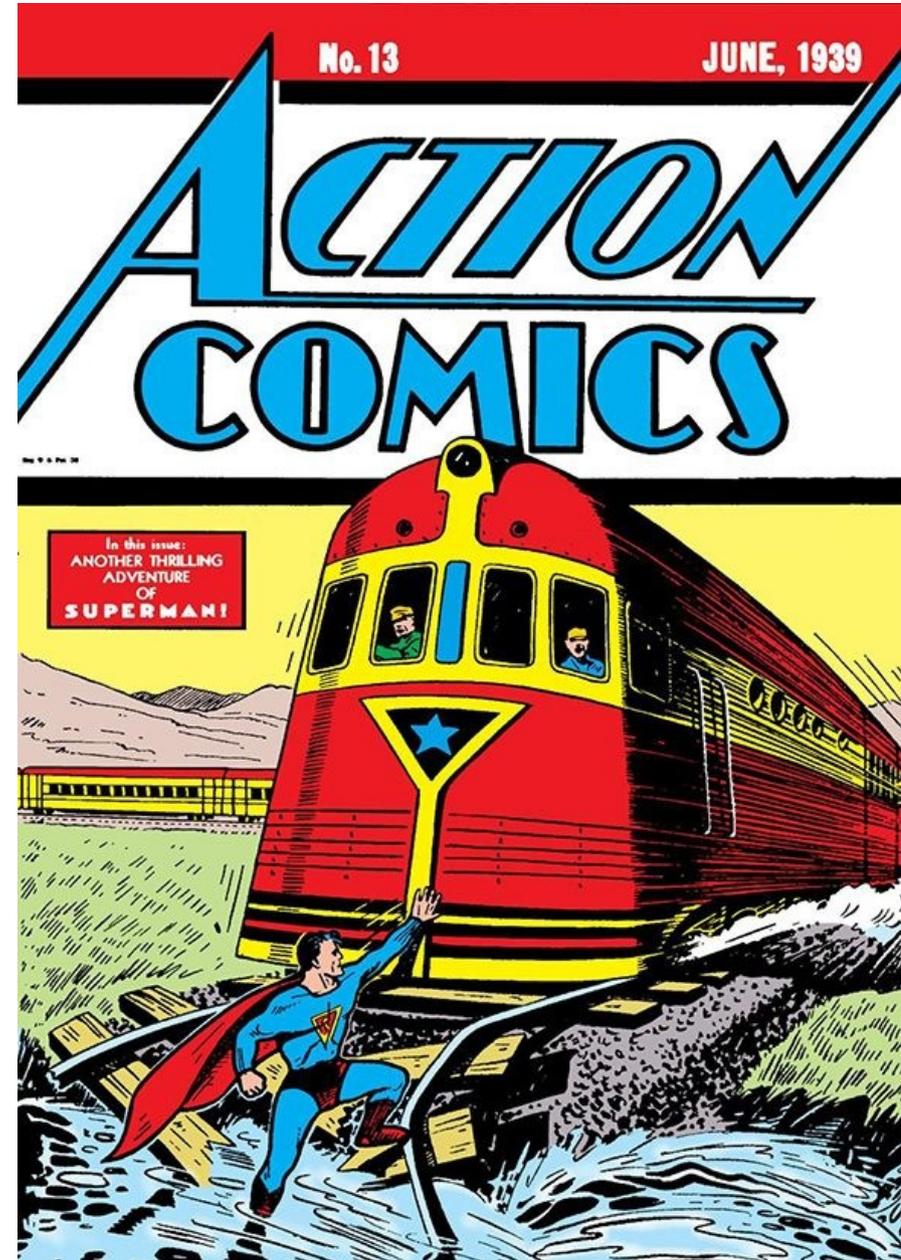
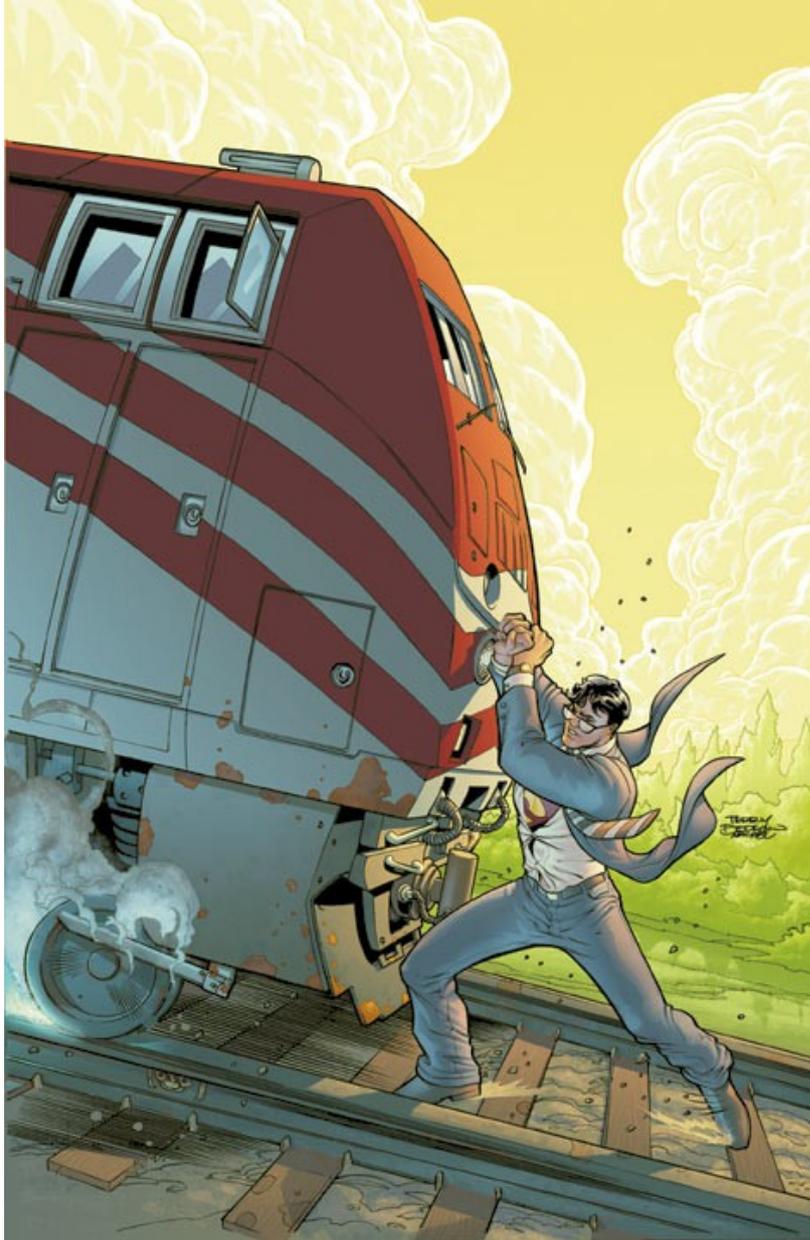
**Frottements** ~ Coefficient x Poids, opposés au mouvement

Coefficient ~ 0-1 typiquement  $\rightarrow$  **Frottements** < **Force de recul** !

**Attention au recul !**



## II. Sa force : arrêter un train



## II. Sa force : arrêter un train



### Il en faut du frottement !

Force de Superman  $\rightarrow$  Train  $\sim$  Frottements

Frottements  $\sim$  1-10 Poids

Pneu sur route mouillée  $\sim$  0,1

Pneu sur route sèche  $\sim$  1

$$F_{\text{superman} \rightarrow \text{Train}} \sim 3 \times m_{\text{Superman}} g = M_{\text{Train}} \times a_{\text{Train}}$$

$\rightarrow$  Décélération de  $3 m_{\text{Superman}} g / M_{\text{Train}}$   $\text{m/s}^2$

$\rightarrow$  Décélération  $0,03 \text{ m/s}^2$

Avec  $v_{\text{Train}} \sim 120 \text{ km/h}$ , Il faut environ 18 minutes !

Avec les frottements du train,  $a_{\text{train}} \sim 2 a_{\text{frottements}}$

$\rightarrow$  temps d'arrêt  $\sim$  6 minutes



## II. Sa force : arrêter un train



ça va chauffer !

Puissance thermique/m<sup>2</sup> :  $[P] = \text{Energie}/\text{temps}/\text{m}^2$

Energie =  $[mgh] = M.L/T^2 \times L = M.L^2/T^2$

Puissance =  $[mgh/\text{temps}] = M.L^2/T^3$

Puissance thermique/m<sup>2</sup> :  $[P] = M.T^{-3}$

Paramètres :

- coefficient de frottement  $\mu$  sans dimensions
- Pression sur le sol  $[p] = M.L.T^{-2}/L^2 = M.L^{-1}.T^{-2}$
- vitesse de déplacement  $v$   $[v] = L.T$

→ Puissance  $P \propto v.p \times f(\mu)$

En fait :

$$P = \mu \times p \times v \approx 2,3 \times 10^{5-6} \text{ W}/\text{m}^2$$



## II. Sa force : arrêter un train

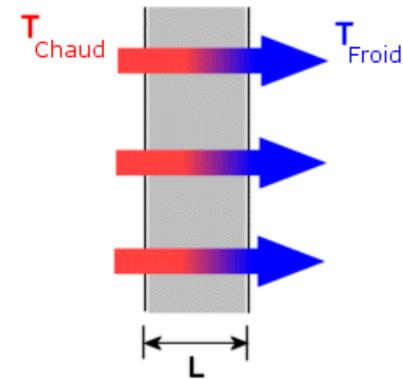


ça va chauffer !

$$P = \mu \times p \times v \approx 2,3 \times 10^{5-6} \text{ W/m}^2$$

Le flux de chaleur dépend ensuite de  $\lambda$ ,  $\rho$ ,  $c$   
→  $\lambda$  conductivité thermique W/m/kg

→ Flux de chaleur  $\approx \lambda \times (\text{variation de } T)/L$



→  $c$  capacité thermique J/kg/K

→ Chaleur =  $m c \times \text{variation de } T$



## II. Sa force : arrêter un train



ça va chauffer !

$$P = \mu \times p \times v \approx 2,3 \times 10^{5-6} \text{ W/m}^2$$

Le flux de chaleur dépend ensuite de  $\lambda$ ,  $\rho$ ,  $c$   
Acier :

$$c \sim 500 \text{ J/kg/K}$$

$$\lambda \sim 50 \text{ W/m/K}$$

$$\rho \sim 8000 \text{ kg/m}^3$$

Fibre de Carbone ?

$$c \sim 1000 \text{ J/kg/K}$$

$$\lambda \sim 80 \text{ W/m/K}$$

$$\rho \sim 2000 \text{ kg/m}^3$$

→ même chaleur dans les rails et Superman

$$\rightarrow T_{\text{finale}} \sim \text{Flux} \times f(\lambda, \rho, c) \sim 2000-3000^\circ\text{C}...$$



## II. Sa force : arrêter un train

---



# II. Sa course : plus vite qu'une balle !

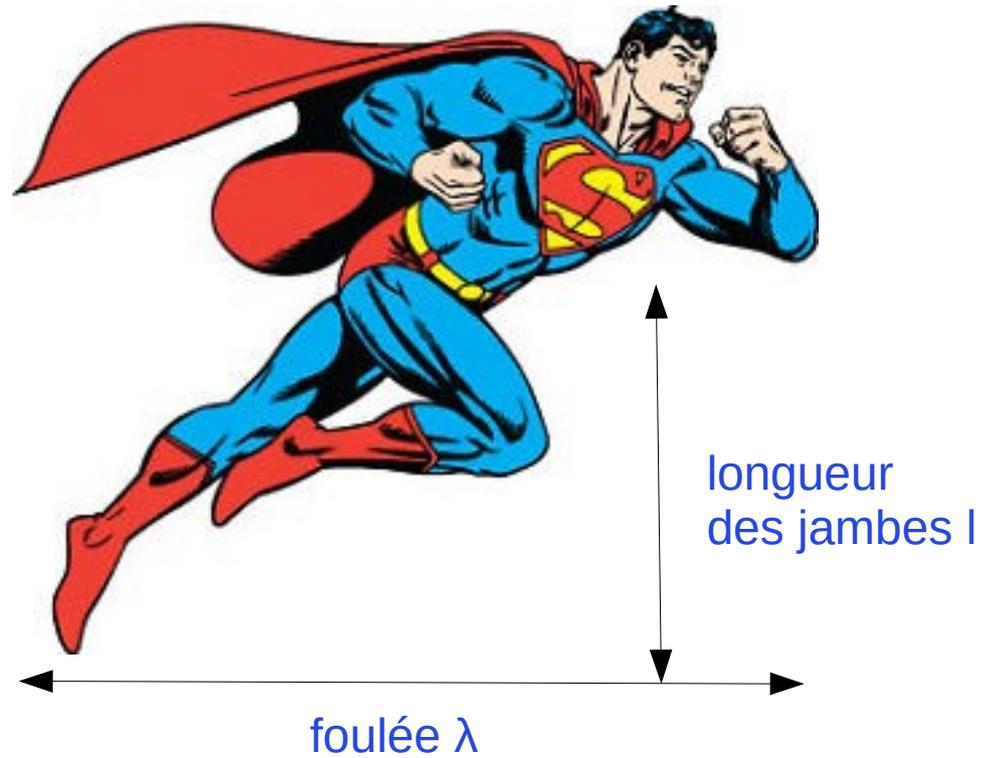
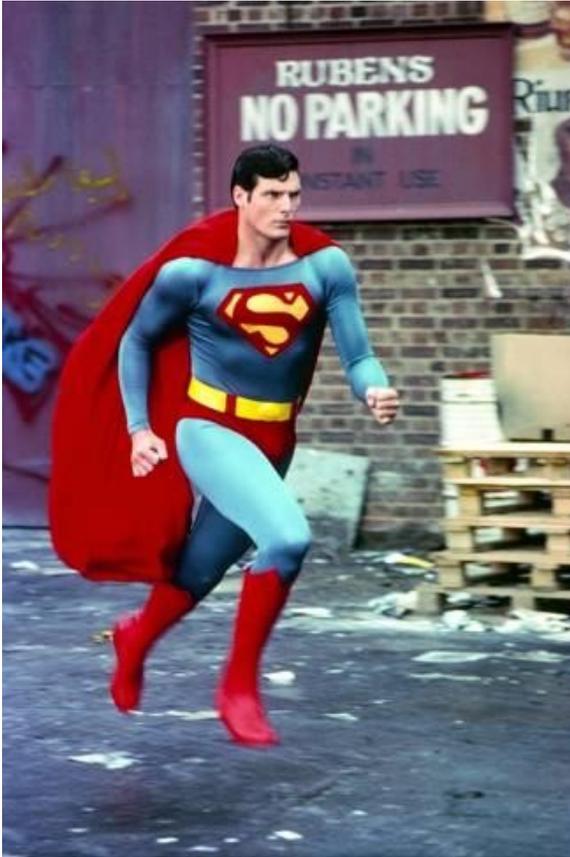


## II. Sa course : plus vite qu'une balle !

---

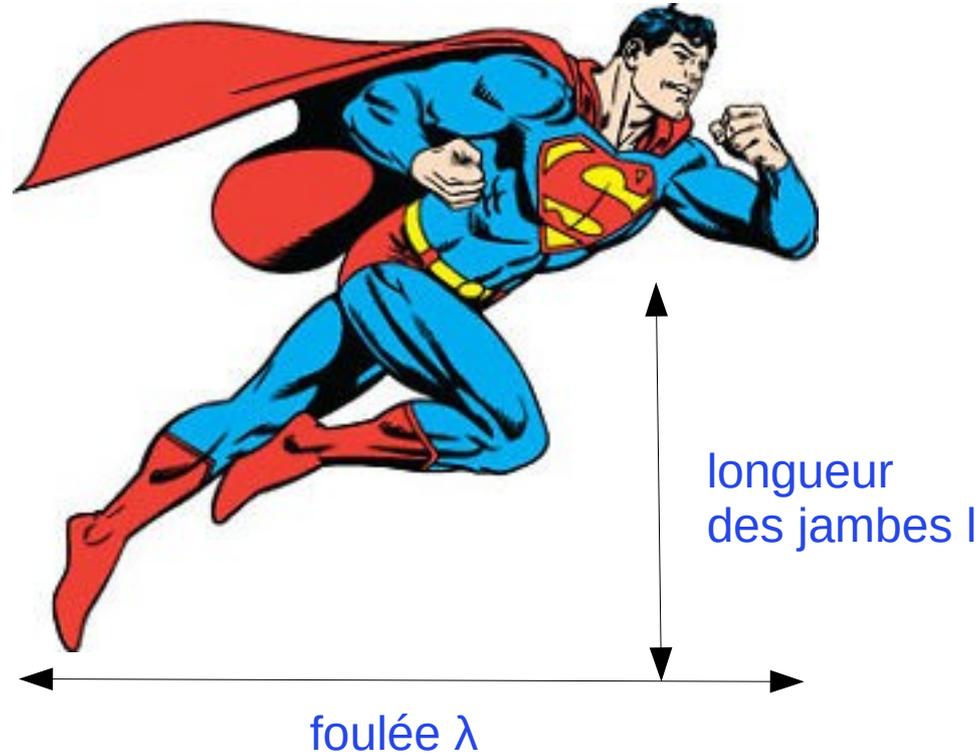


## II. Sa course : plus vite qu'une balle !



$$\Rightarrow \frac{\lambda}{l} = f \left( \frac{v^2}{gl} \right)$$

## II. Sa course : plus vite qu'une balle !



### Analyse dimensionnelle

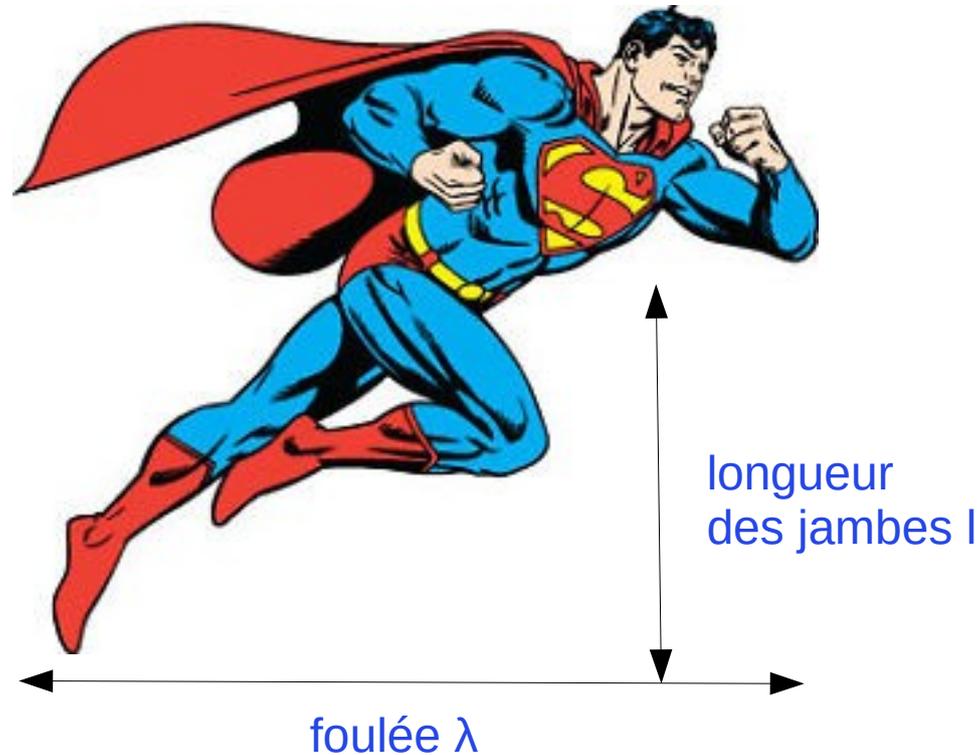
Comme pour le pendule : la masse n'intervient pas (Cours 1)

Longueur de foulée  $\lambda$ , longueur des jambes  $L$

Vitesse  $[v] = L/T + \text{Gravité } [g] = L \cdot T^{-2}$

4 paramètres, 2 dimensions

## II. Sa course : plus vite qu'une balle !



### Analyse dimensionnelle

On construit 2 nombre sans dimensions, dont  $\lambda/l$

$$[v^2] = L^2.T^{-2}$$

On remarque que  $[g.l] = L^2.T^{-2}$

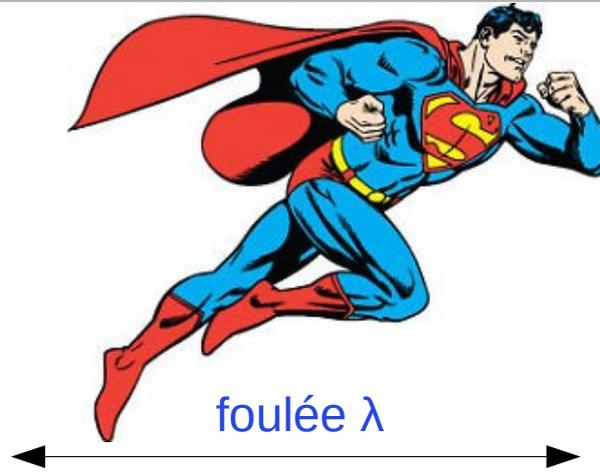
$$\rightarrow v^2/gl \text{ est sans dimension ! } \Rightarrow \frac{\lambda}{l} = f\left(\frac{v^2}{gl}\right)$$



# II. Sa course : plus vite qu'une balle !



300-900 m/s

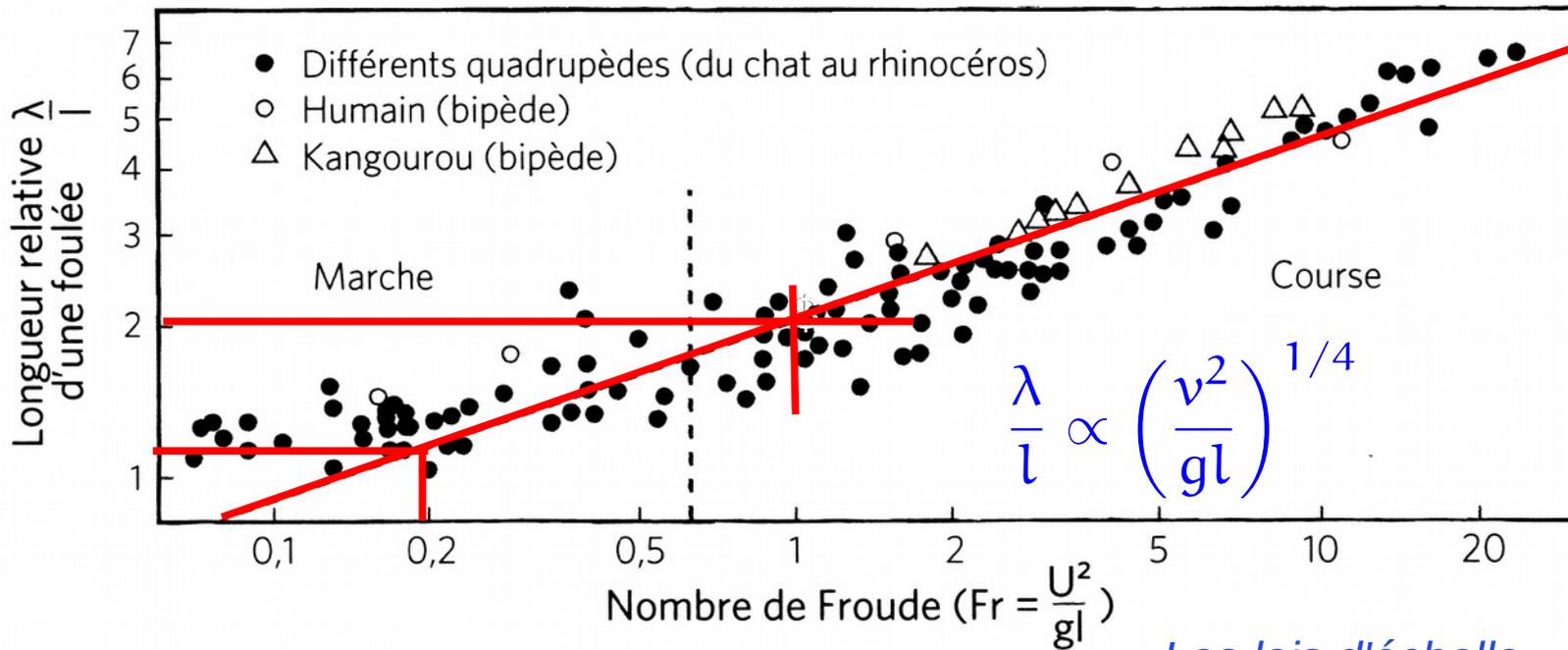


foulée  $\lambda$

longueur  
des jambes  $l \sim 1\text{m}$

$v^2/gl \sim 9000-81000$

$v^2/gl$  Superman



T. Séon  
« Les lois d'échelle » (Odile Jacob)

# II. Sa course : plus vite qu'une balle !

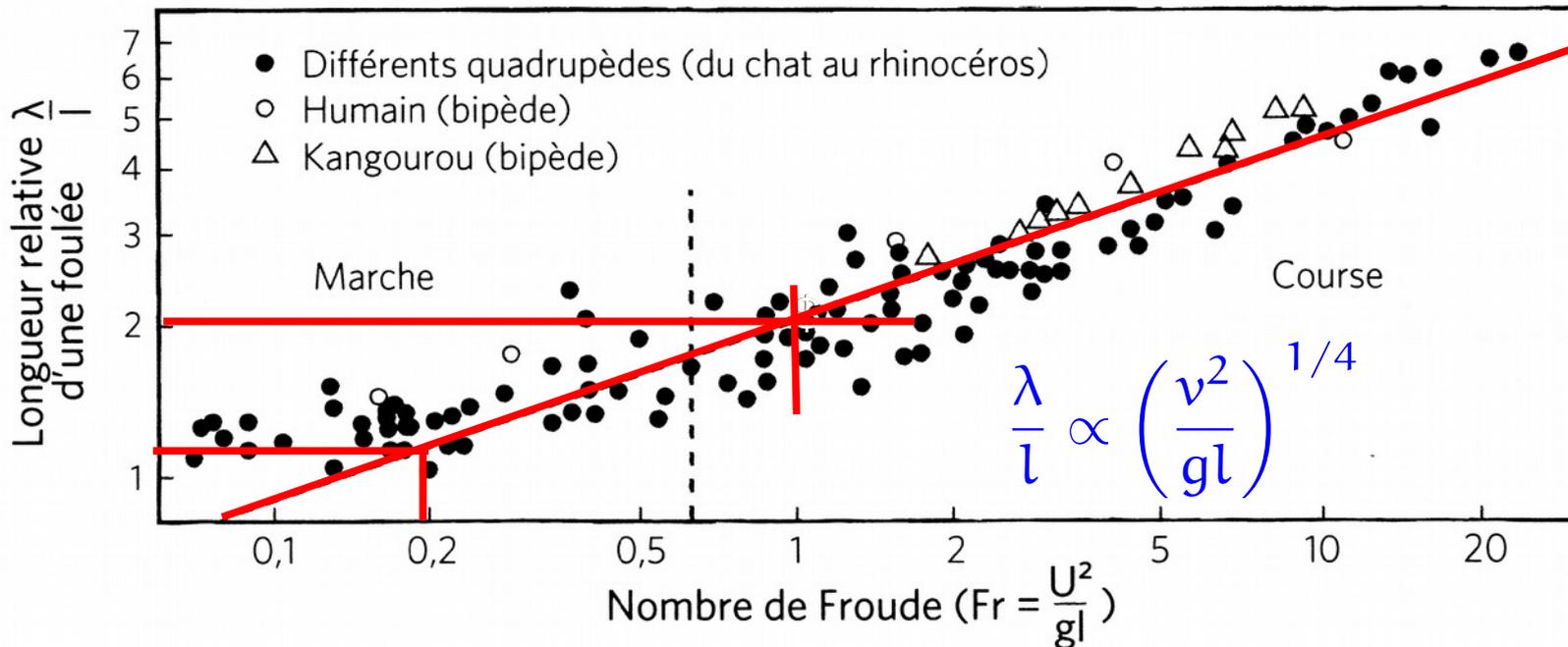


300-900 m/s



longueur  
des jambes  $l \sim 1\text{m}$

$v^2/gl \sim 9000-81000 \rightarrow \lambda \sim (10-20) \times \text{longueur des jambes !!}$   $v^2/gl$  Superman



Cohérent avec gravité → foulée 30x plus grande...

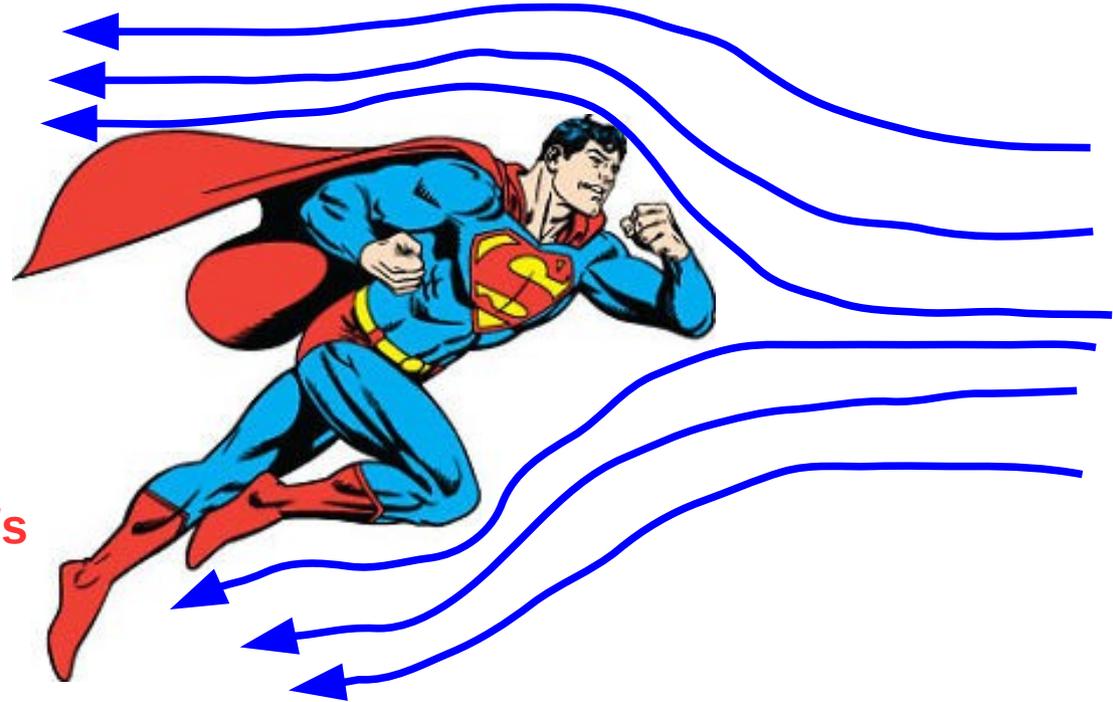
## II. Sa course : plus vite qu'une balle !



300-900 m/s

Homme « normal » ~10m/s

→ Superman 30x plus puissant → 300 m/s



Frottements → force  $\propto S v^2$  (portance)

[Puissance] = [E/T] = M.L<sup>2</sup>.T<sup>-2</sup>/T = M.L.T<sup>-2</sup> x L/T → Puissance = F.v  $\propto v^3$  !!

Avec 30x plus de puissance...30<sup>1/3</sup> fois plus vite !

→ Seulement 3x plus vite...



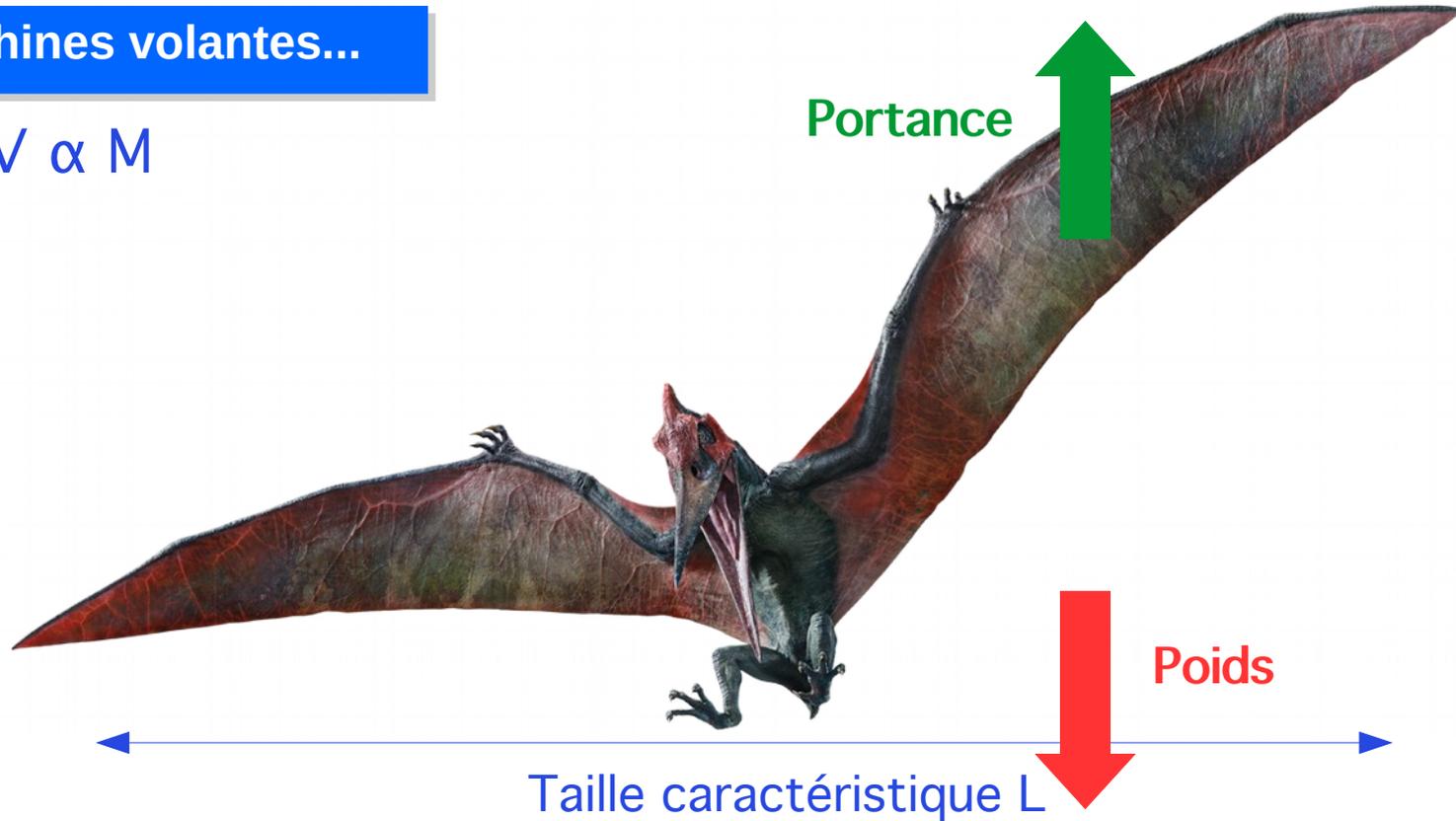
## II. Peut-il voler ?



## II. Peut-il voler ?

Des machines volantes...

→  $P \propto V \propto M$



→ Force de portance dépend de  $S$ ,  $\rho_{\text{air}}$ ,  $v$  (voir Cycle 1/Cours 2)

avec  $[F] = M^1 \cdot L^1 \cdot T^{-2} = [\rho_{\text{air}}]^x [S]^y [v]^z = (M \cdot L^{-3})^x L^{2y} (L \cdot T^{-1})^z = M^x \cdot L^{-3x+2y+z} \cdot T^{-z}$

→  $z = 2$

→  $x = 1$  et donc  $-3x+2y+z = 1 = -3 \cdot 1 + 2y + 2 = 1 \rightarrow 2y = 2 \rightarrow y = 1$



## II. Peut-il voler ?

Des machines volantes...

→  $P \propto V \propto M$



→  $F \propto \rho_{\text{air}}^1 S^1 v^2$  avec  $M \propto L^3 \rightarrow L \propto M^{1/3}$  et donc  $S \propto M^{2/3}$

Si  $F \propto v^2 M^{2/3}$  compense le poids  $\propto M$

→  $v^2 \propto M^{1-2/3} = M^{1/3} \rightarrow v \propto M^{1/6}$

## II. Peut-il voler ?



$$\rightarrow v \propto M^{1/6} \propto 1/\sqrt{L}$$

Petit oiseau ~ 20 km/h ~ 5-10cm (chute libre?)

→ Poule ~ 50cm ~ 9 moineaux →  $v \times 3 \sim 60$  km/h

→ Autruche ~25 moineaux ? → 100 km/h

→ Airbus ~ 9 autruches → 300 km/h



## II. Peut-il voler ?

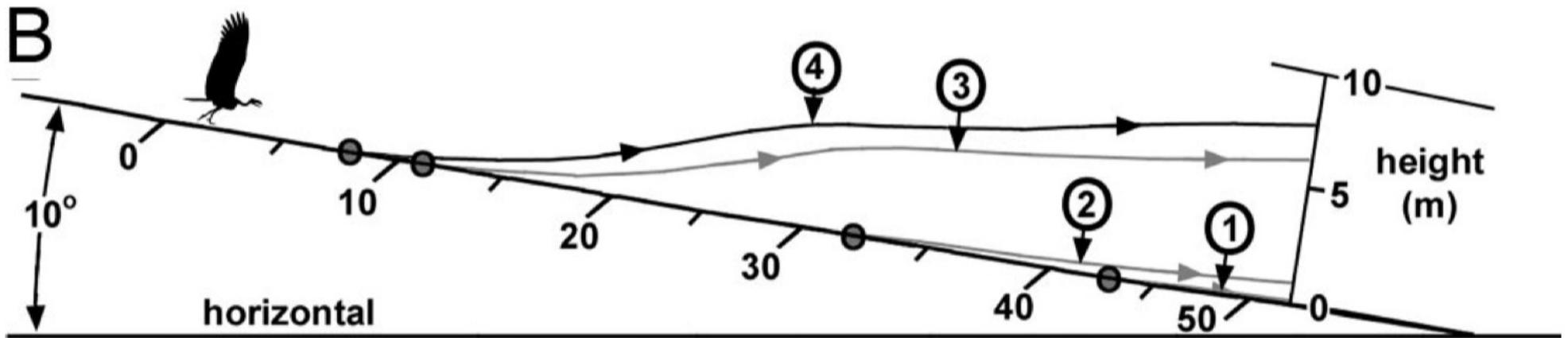


## II. Peut-il voler ?

---



## II. Peut-il voler ?



Argentavis Magnificens (6 millions d'années)  
6-7m d'envergure, 60-120 kg



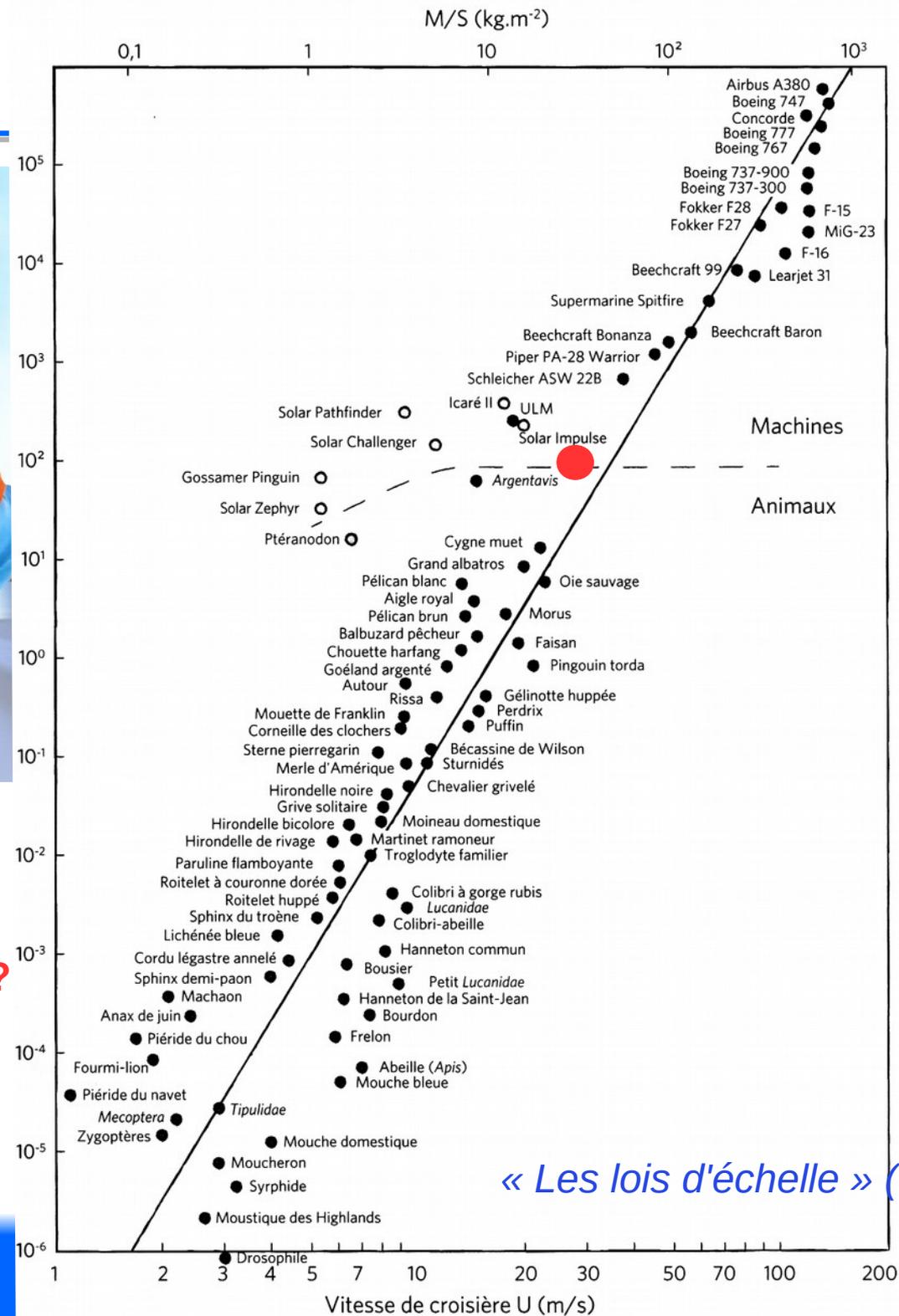
# II. Peut-il voler ?



capedwonder.com

Surface 2,5 m<sup>2</sup>  
 Pour 110kg → M/S ~ 45 kg/m<sup>2</sup>

→ Accroître la surface portante ?



T. Séon  
 « Les lois d'échelle » (Odile Jacob)

## II. Peut-il voler ?



capedwonder.com

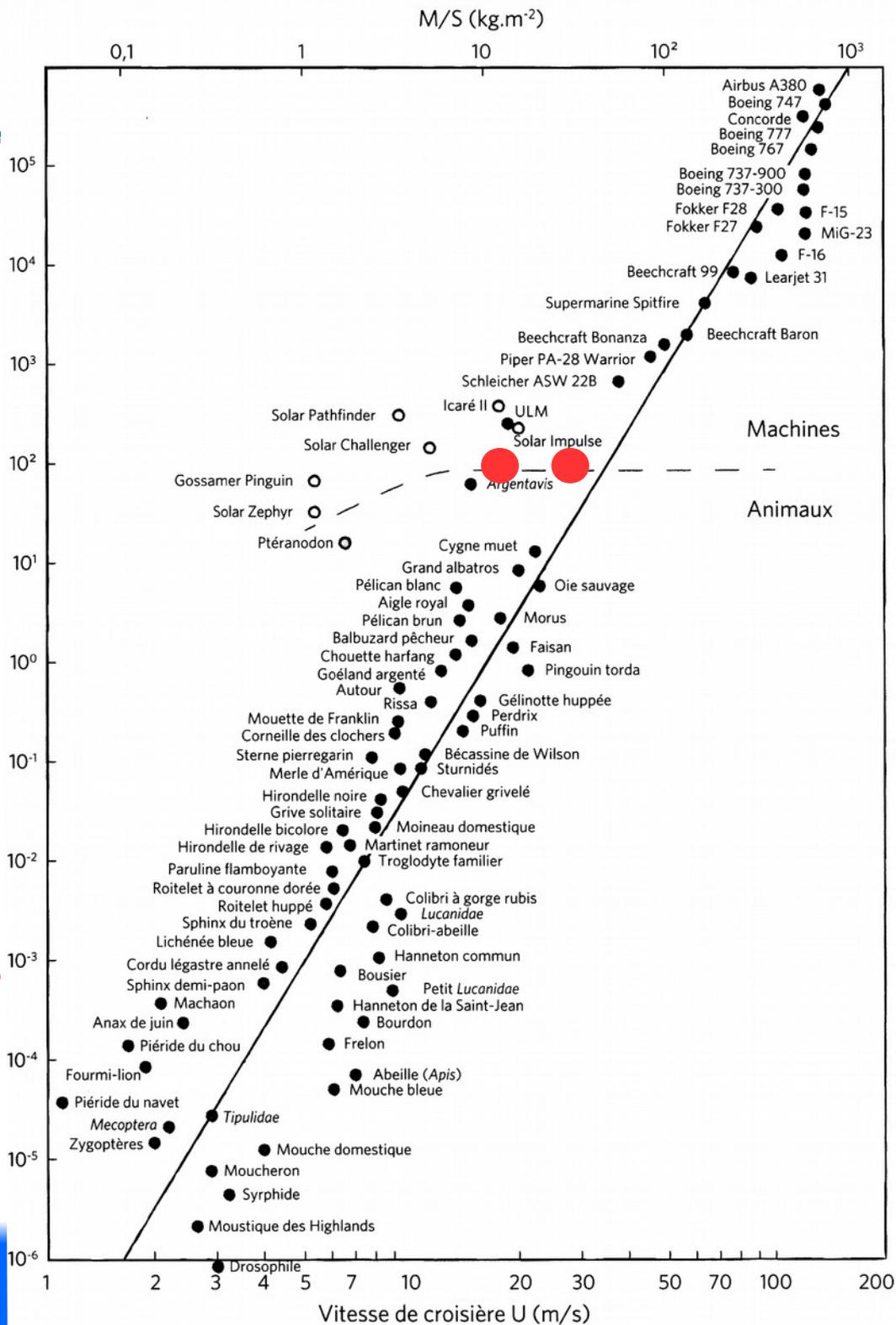
Surface  $2,5 \text{ m}^2$   
Pour  $110\text{kg}$   $\rightarrow$   $M/S \sim 45 \text{ kg/m}^2$

$\rightarrow$  **Accroître la surface portante ?**

Surface  $\times 4 \rightarrow 10 \text{ m}^2$   
 $\rightarrow$  Poids/S  $\sim 10 \text{ kg/m}^2$



# II. Peut-il voler ?



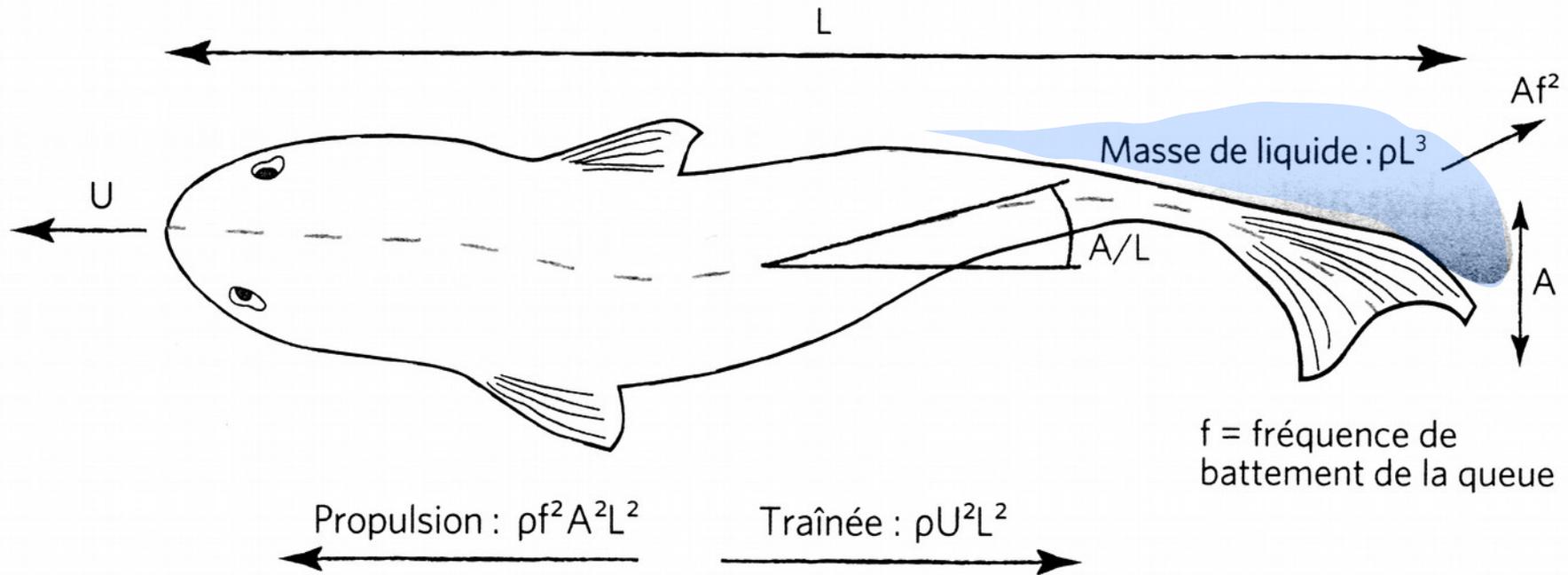
Surface 2,5 m<sup>2</sup>  
 Pour 110kg →  $M/S \sim 45 \text{ kg/m}^2$

→ **Accroître la surface portante ?**

Surface x 4 → 10 m<sup>2</sup>  
 → Poids/S ~ 10 kg/m<sup>2</sup>

...mais quelle propulsion ?

## II. Interlude : et s'il nageait... ?



**Force de réaction** → **propulsion**

A chaque mouvement, déplacement d'un volume  $\propto L^3$

→ Réaction  $\propto \rho L^3 \times a$

avec  $[a] = L/T^2$

Longueur  $\sim$  Amplitude d'ondulation  $A$

Temps : fréquence de battement

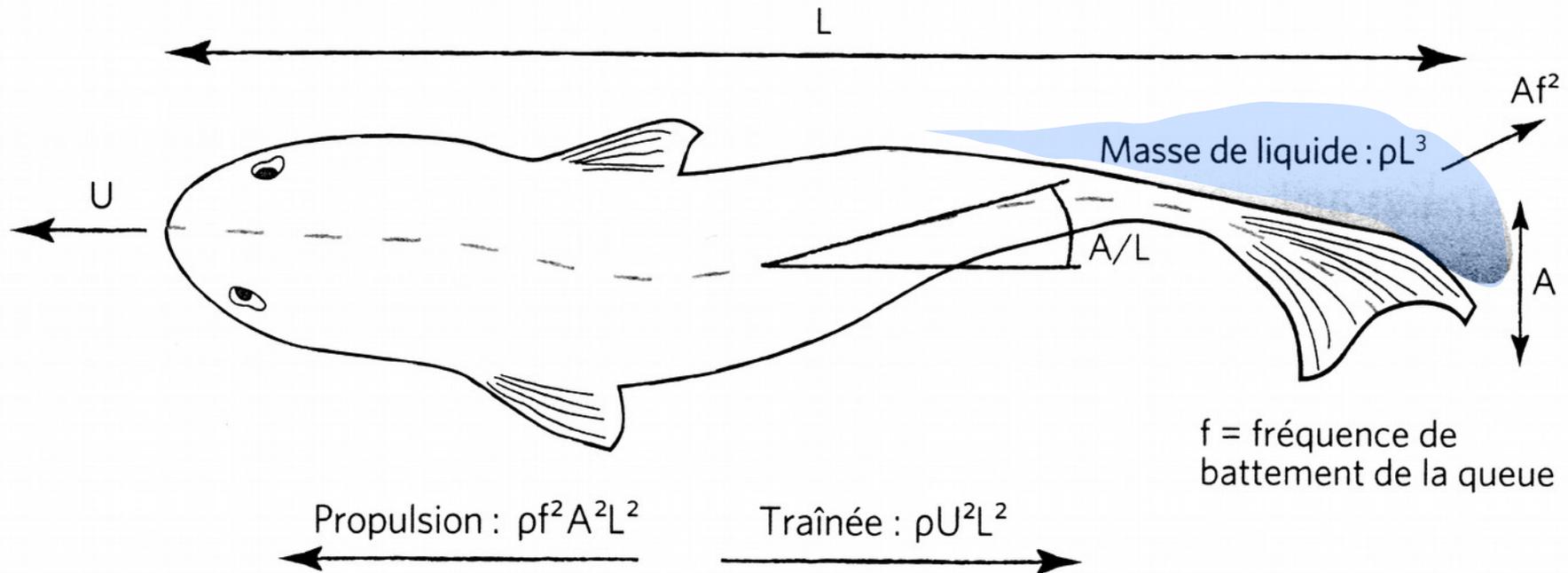
→  $a \sim Af^2$

→ Réaction  $\propto \rho L^3 \times Af^2$

**PISTE EINSTEIN**

T. Séon  
« Les lois d'échelle » (Odile Jacob)

## II. Interlude : et s'il nageait... ?



**Force de réaction** → **propulsion**

→ Réaction  $\propto \rho L^3 \times Af^2$

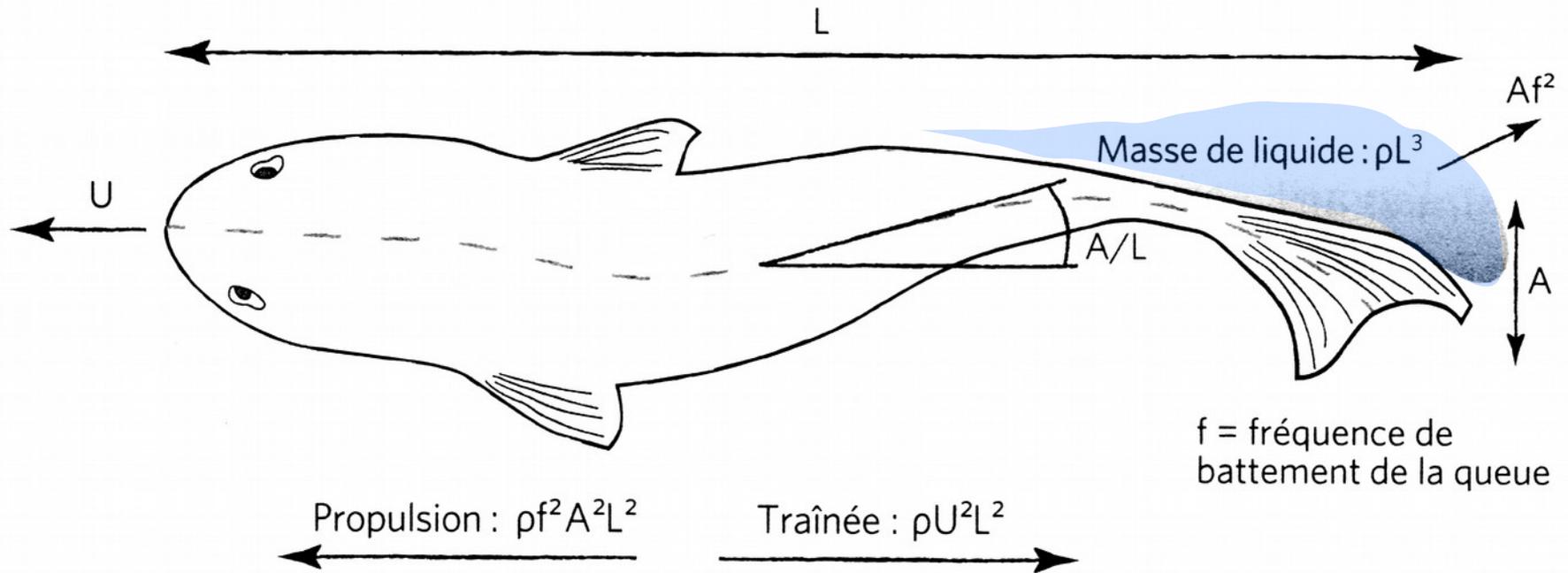
**L'angle de la queue par rapport au corps  $\sim A/L$**

**Accélération du volume d'eau  $\sim Af^2 \times A/L$**

→ Propulsion avec Force  $\rho f^2 A^2 L^2$

PISTE EINSTEIN

## II. Interlude : et s'il nageait... ?



Accélération du volume d'eau  $\sim Af^2 \times A/L \rightarrow$  Propulsion avec Force  $\rho f^2 A^2 L^2$

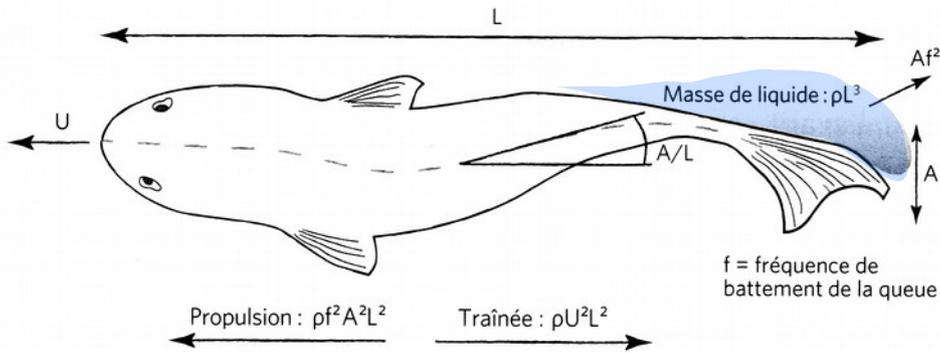
Frottements/Traînée  $\rightarrow \rho v^2 L^2$

Equilibre Trainée/Propulsion :  $\rho f^2 A^2 L^2 = \rho v^2 L^2 \rightarrow v \sim fA$

$\rightarrow$  Nombre de Strouhal  $St = fA/v$

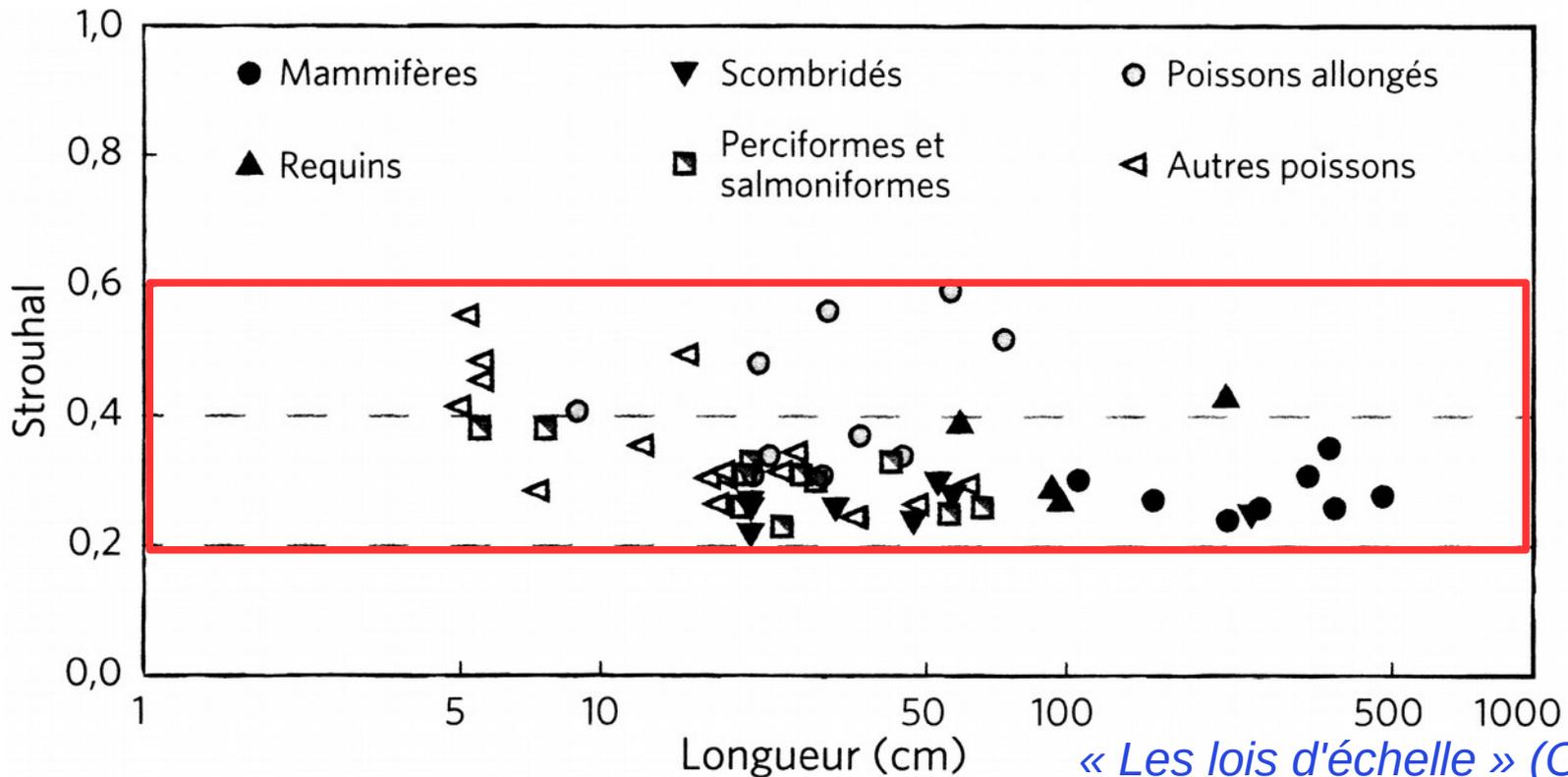
PISTE EINSTEIN

# II. Interlude : et s'il nageait... ?



→ Propulsion avec Force  $\rho f^2 A^2 L^2$   
 Frottements/Trainée →  $\rho v^2 L^2$   
 Equilibre Trainée/Propulsion :  $v \sim fA$

→ Nombre de Strouhal  $St = fA/v$

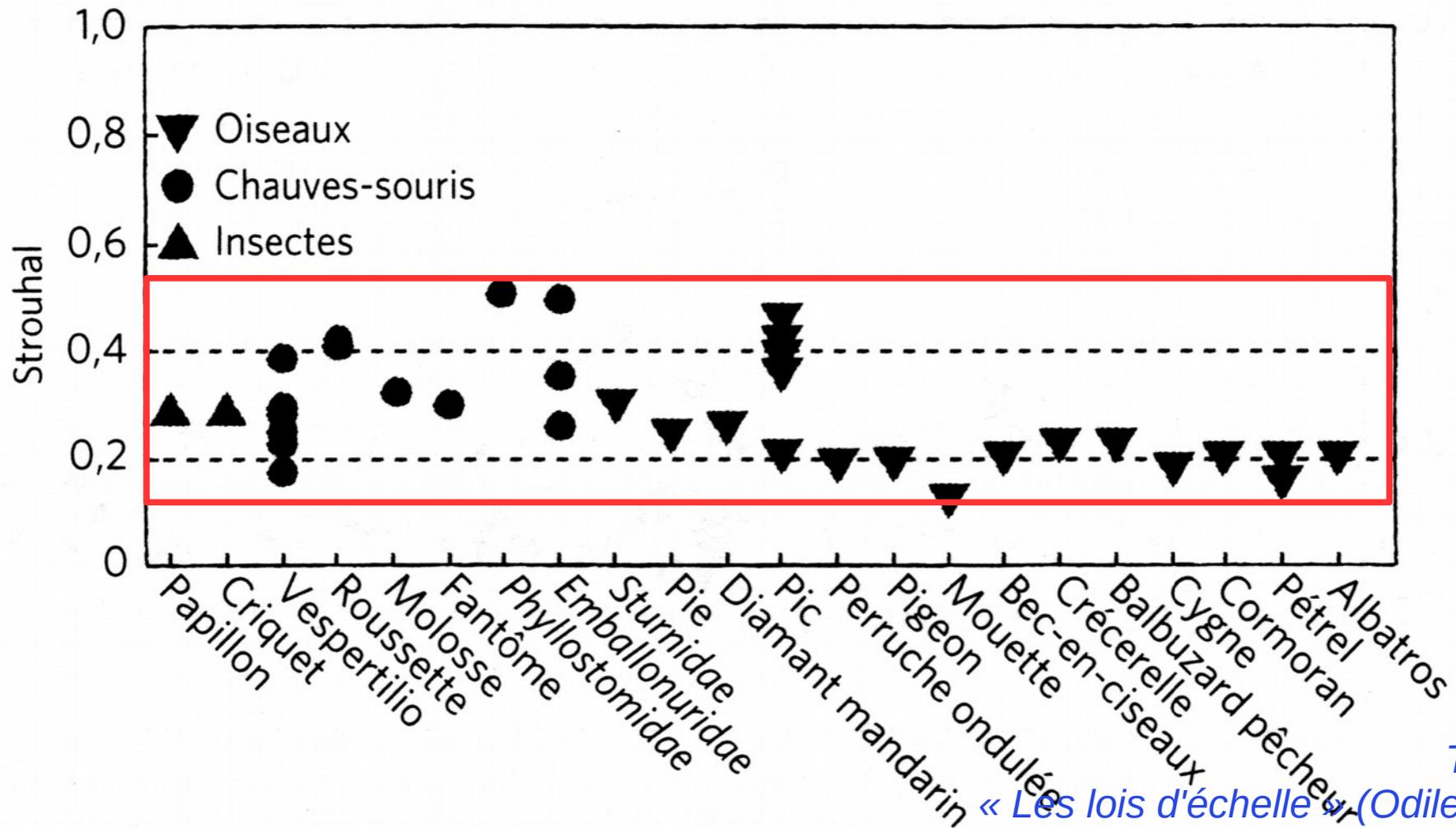


T. Séon  
 « Les lois d'échelle » (Odile Jacob)

# II. Pour voler il faut battre des ailes...

Equilibre Trainée/Propulsion :  $v \sim fA$

→ Nombre de Strouhal  $St = fA/v \sim 0,3 - 0,6 \rightarrow v \sim (1,5-3) fA$



T. Séon  
« Les lois d'échelle » (Odile Jacob)

## II. Pour voler il faut battre des ailes...

---

Equilibre Trainée/Propulsion :  $v \sim fA$

→ Nombre de Strouhal  $St = fA/v \sim 0,3 - 0,6 \rightarrow v \sim (1,5-3) fA$

Avec  $A \sim 1-2\text{m}$ , pour avoir  $v \sim 600\text{m/s} \rightarrow f \sim (100-200)/\text{seconde}....$



## II. Pour voler il faut battre des ailes...

---

Equilibre Trainée/Propulsion :  $v \sim fA$

→ Nombre de Strouhal  $St = fA/v \sim 0,3 - 0,6 \rightarrow v \sim (1,5-3) fA$

Avec  $A \sim 1-2\text{m}$ , pour avoir  $v \sim 600\text{m/s} \rightarrow f \sim (100-200)/\text{seconde}....$

Comme le colibri ?



## II. Superman

---

Un homme-colibri en « wingsuit » ?

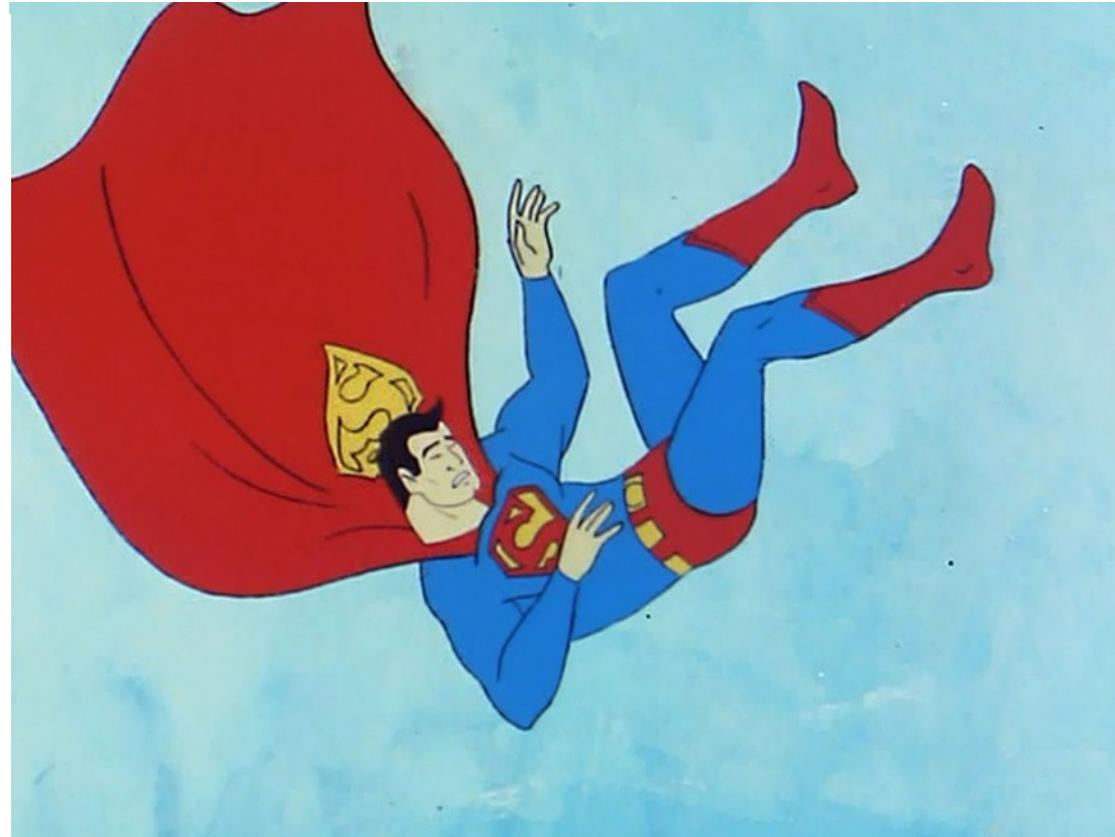
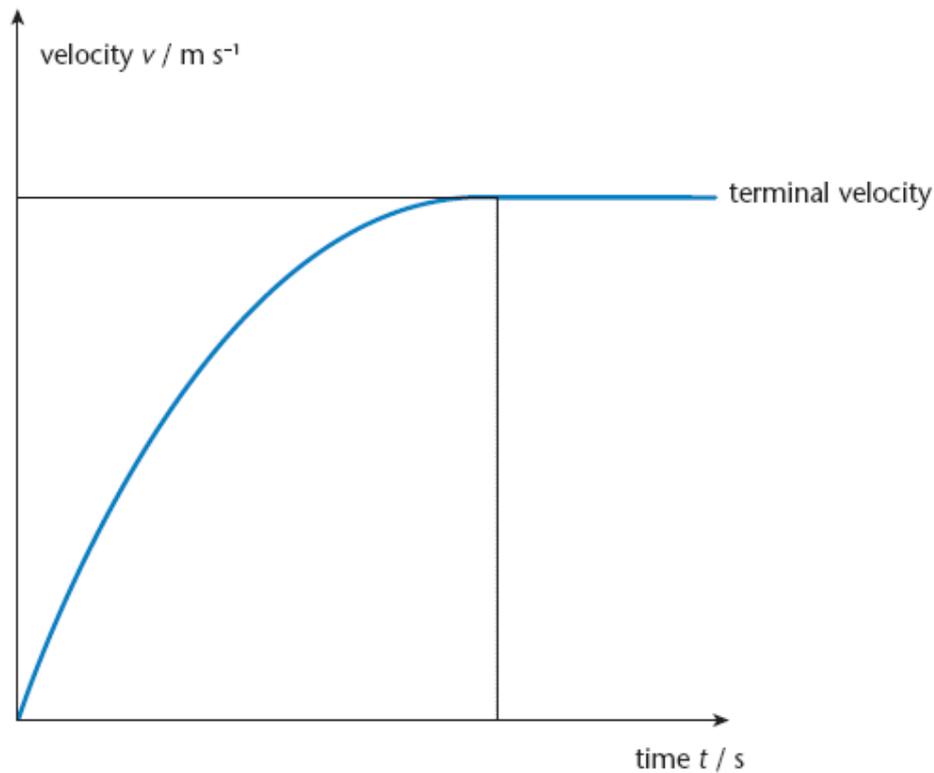


## II. Et s'il tombe...

Frottements  $\sim \rho v^2 S$

→ Compense le poids si  $\rho v^2 S = Mg \propto L.S \rightarrow$  **Vitesse Terminale de chute**

→  $v \propto L^{1/2} \rightarrow v_{\text{Cheval}} \sim 200^{1/2} v_{\text{Souris}} = 15 \text{ x plus vite !}$

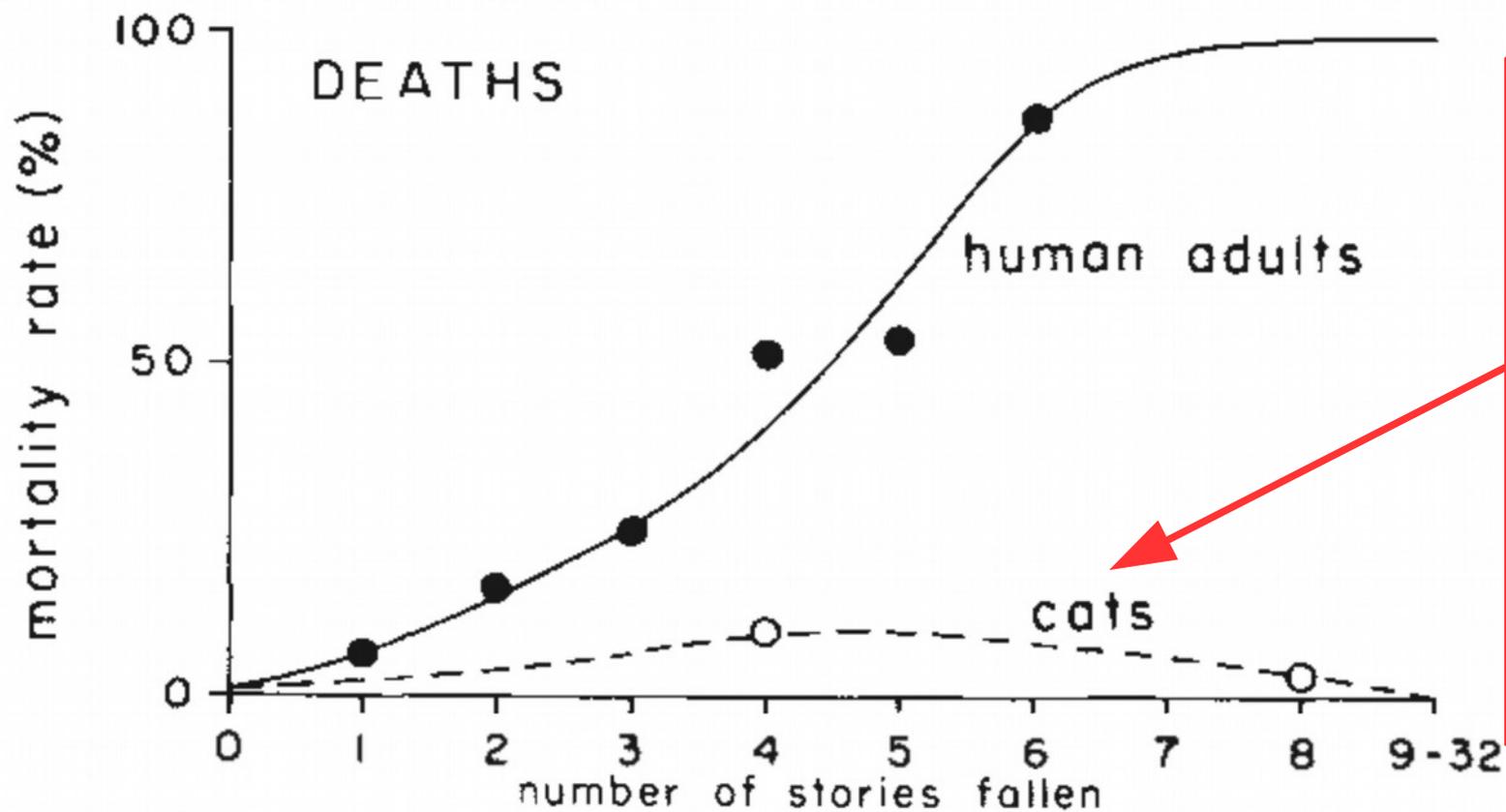


## II. Et s'il tombe...

Frottements  $\sim \rho v^2 S$

→ Compense le poids si  $\rho v^2 S = Mg \propto L.S$

→  $v \propto L^{1/2} \rightarrow v_{\text{Cheval}} \sim 200^{1/2} v_{\text{Souris}} = 15 \times \text{plus vite !}$

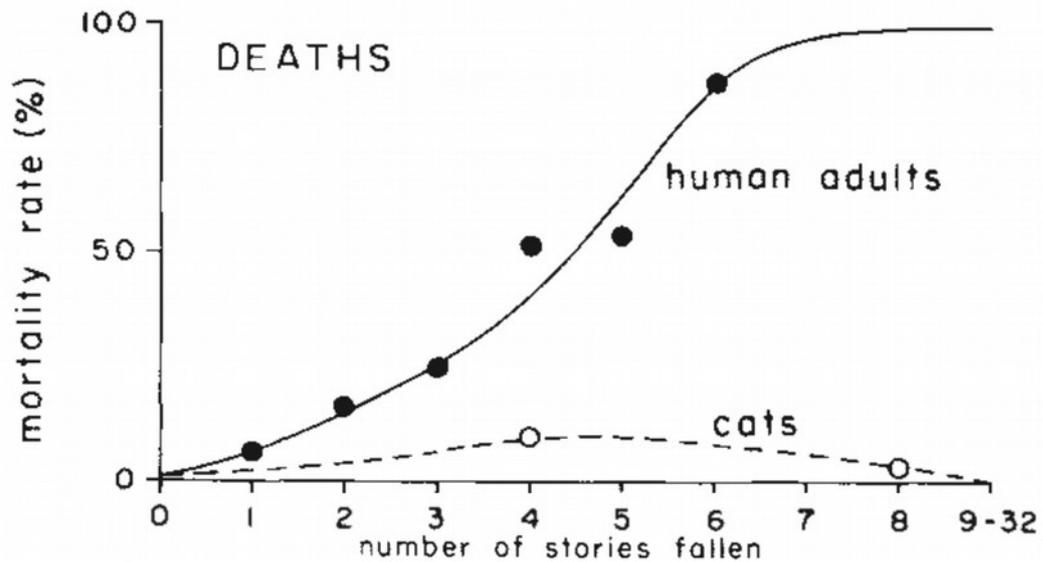


# II. Et s'il tombe...

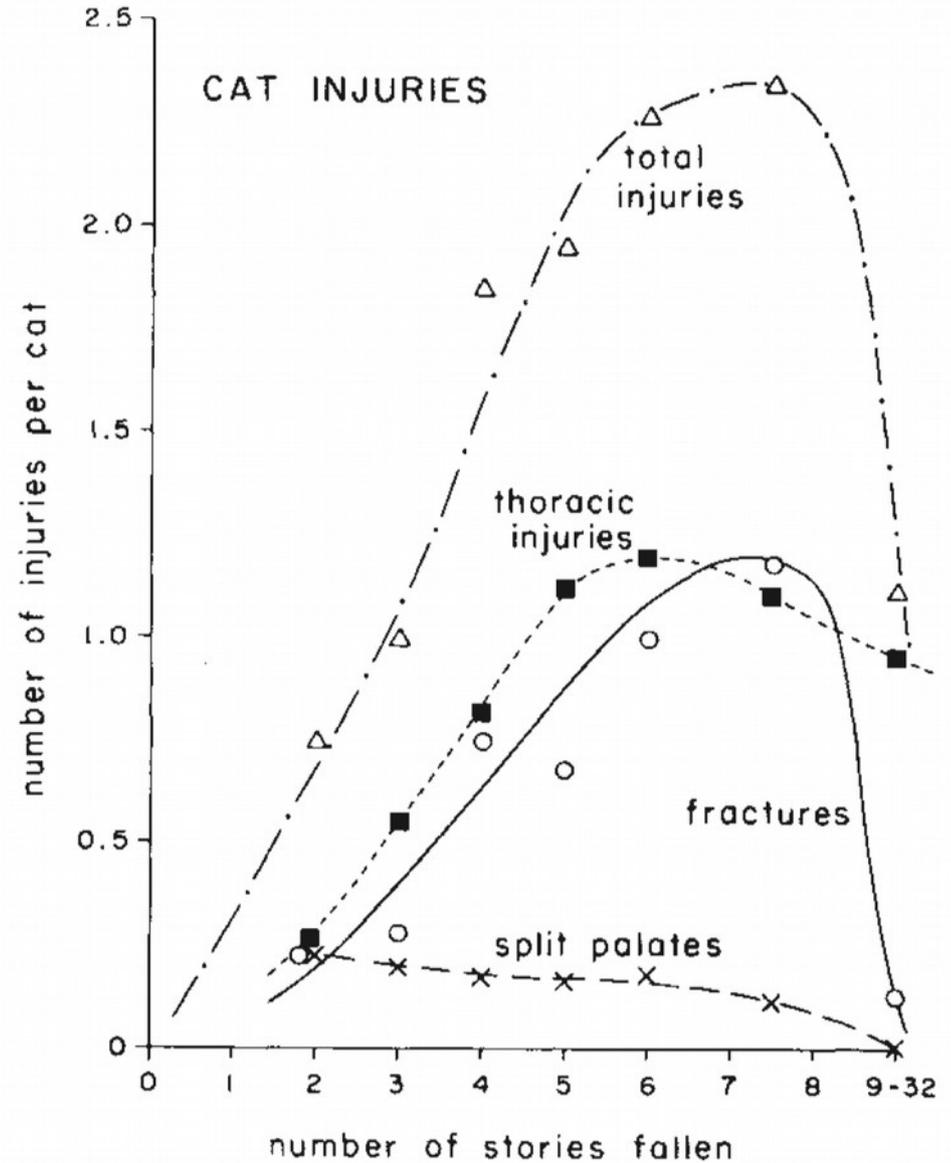
Frottements  $\sim \rho v^2 S$

→ Compense le poids si  $\rho v^2 S = Mg \propto L.S$

→  $v \propto L^{1/2}$



J. Diamond  
Nature. 1988 Apr 14;332(6165):586-7

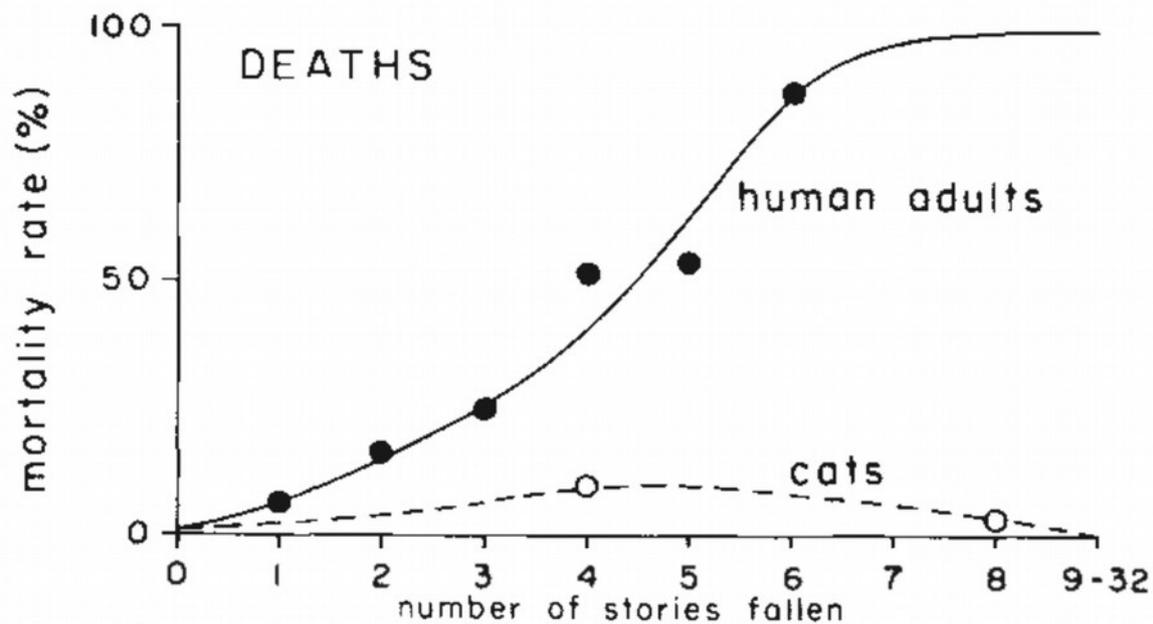


## II. Et s'il tombe...

Frottements  $\sim \rho v^2 S$

→ Compense le poids si  $\rho v^2 S = Mg \propto L.S$

→  $v \propto L^{1/2}$



## II. Une énergie monstrueuse...

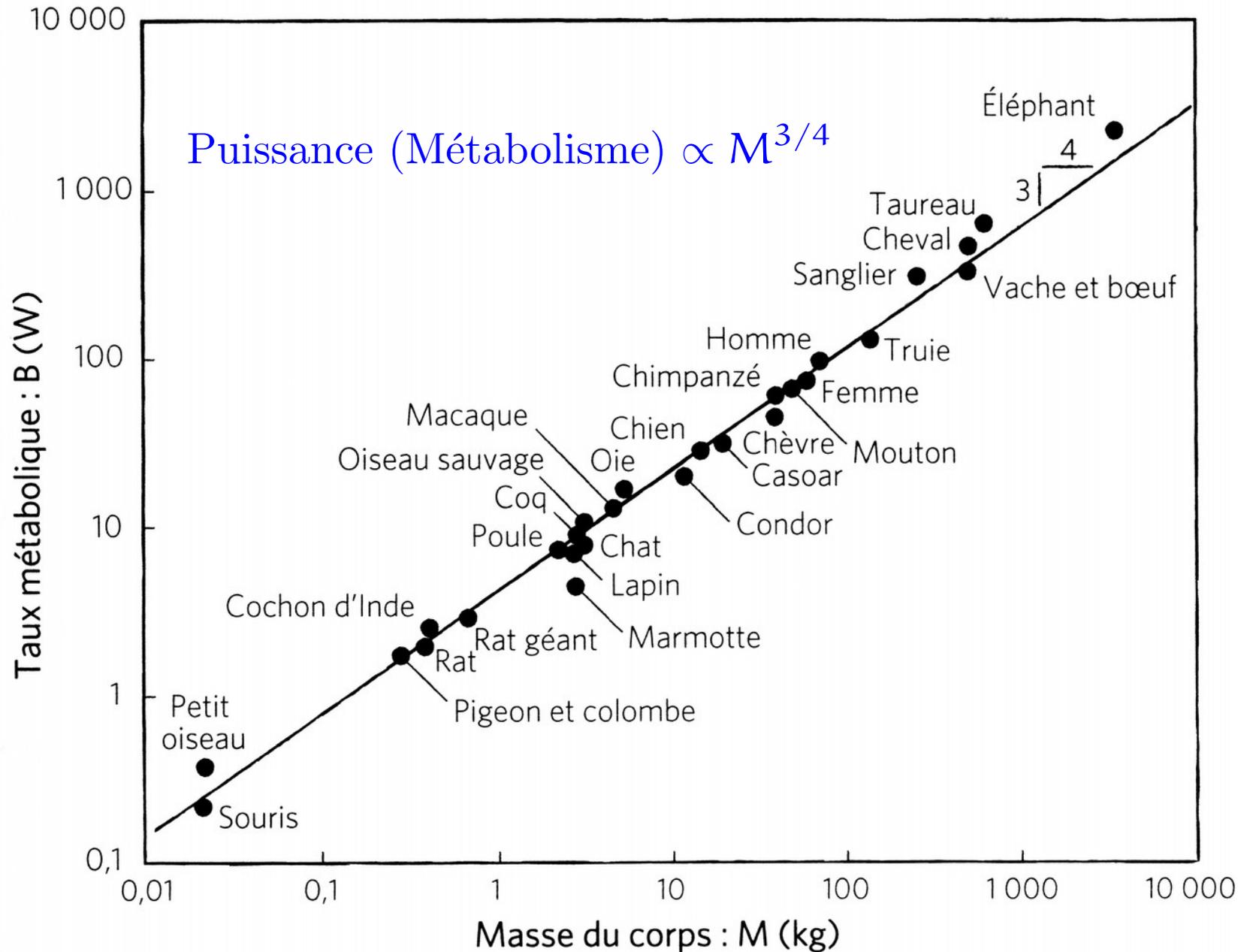
---

Pour voler à environ 900 km/h, Puissance =  $F.v \sim 2 \times 10^6 \text{ W}$  ou Joules/s...

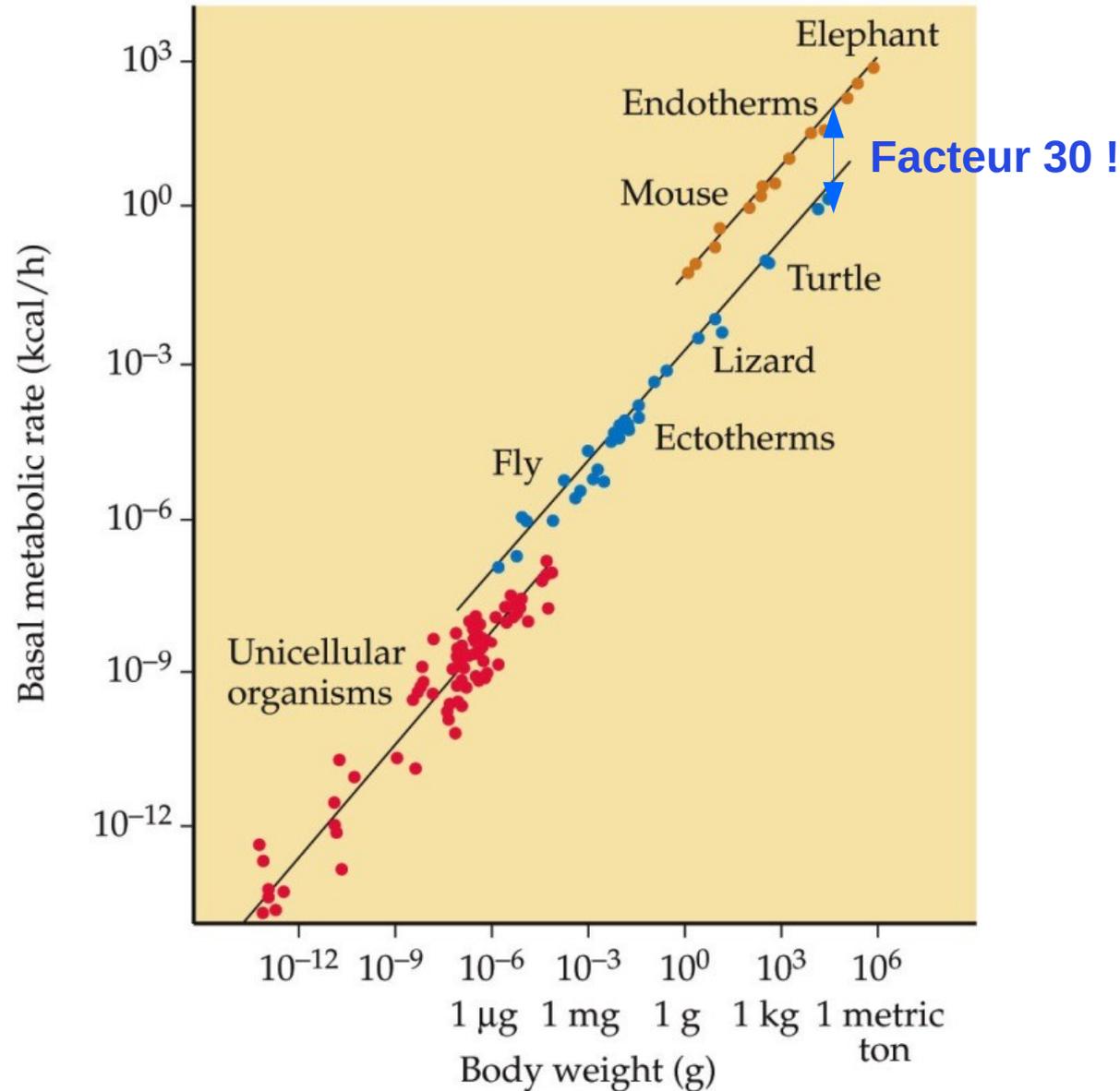
→ Avec un bon repas, 3000 kcalories  $\sim 3000 \times 4,18 \times 10^3 \text{ J}$  → **6 secondes seulement...**



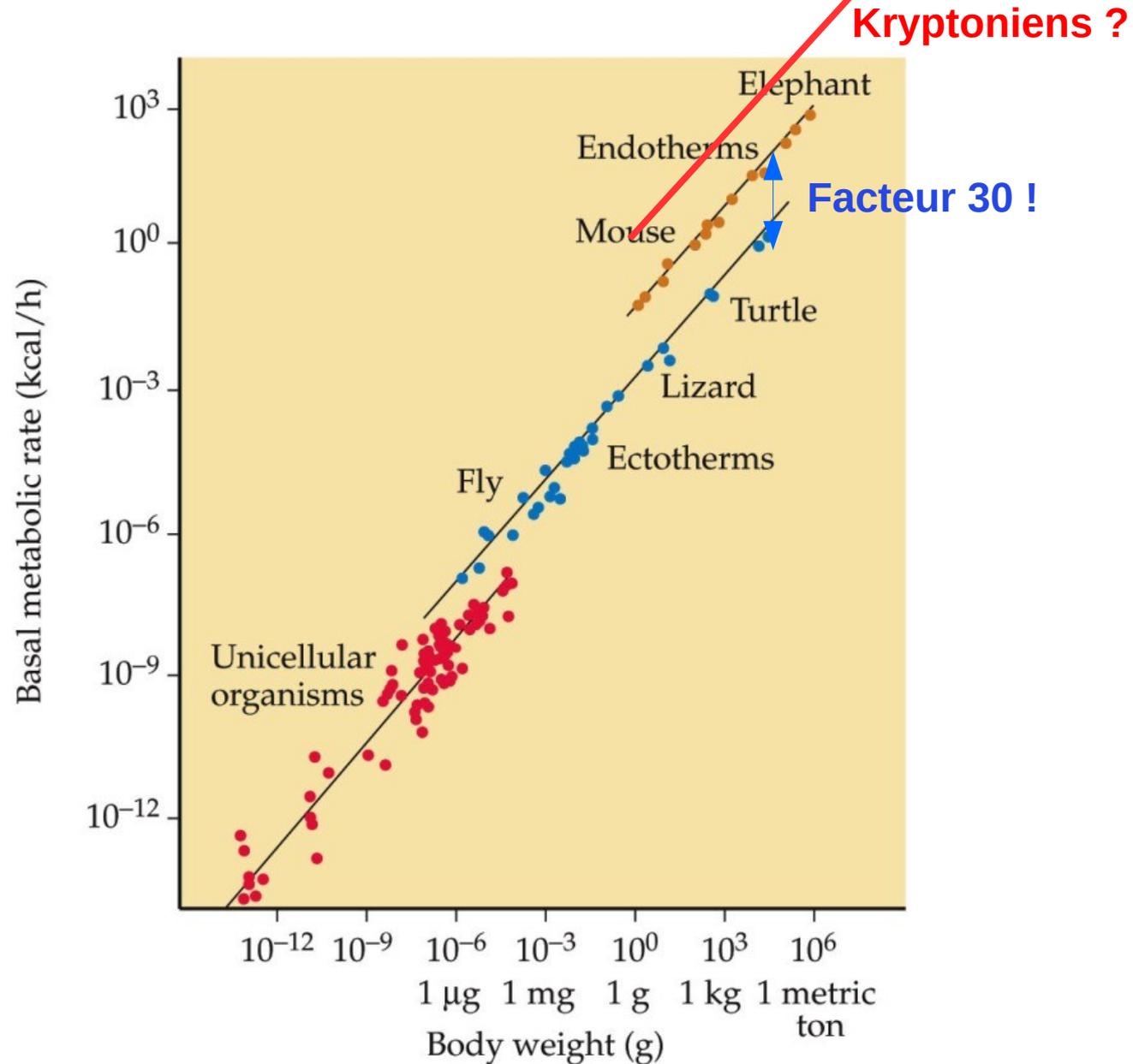
# II. Comment expliquer une telle puissance ?



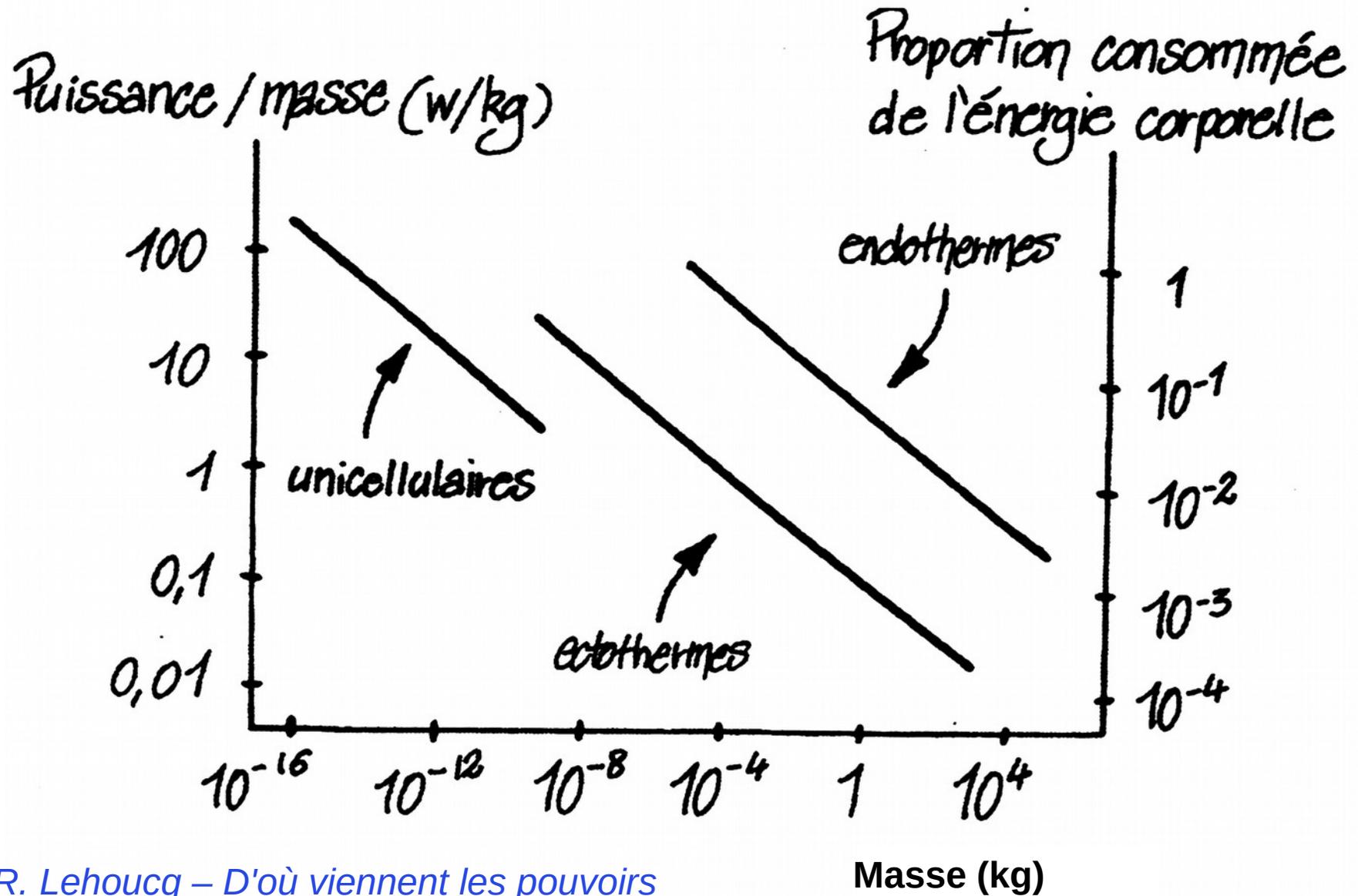
# II. Comment expliquer une telle puissance ?



# II. Comment expliquer une telle puissance ?



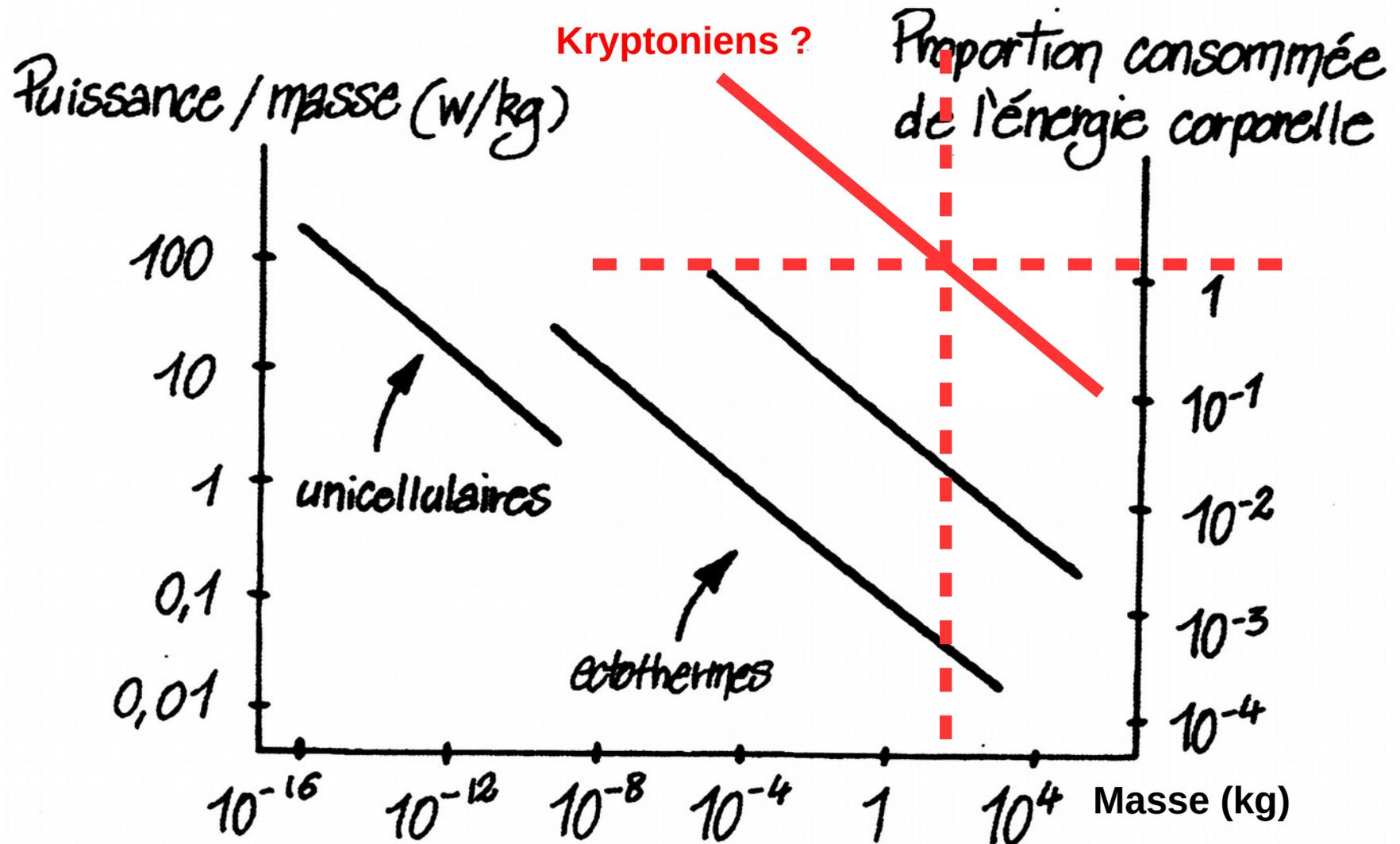
## II. Comment expliquer une telle puissance ?



R. Lehoucq – D'où viennent les pouvoirs de Superman (EDP Sciences)

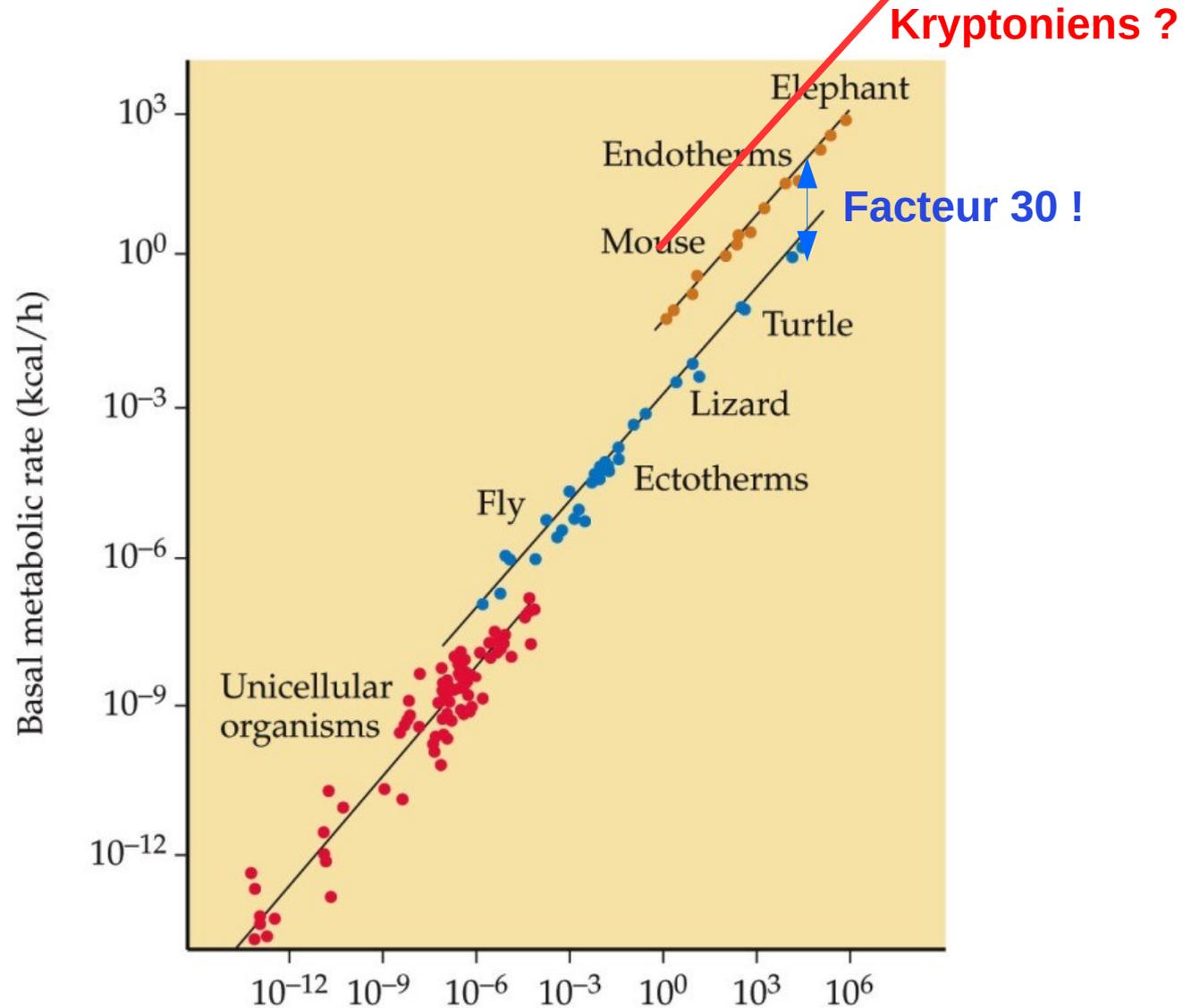
Masse (kg)

## II. Comment expliquer une telle puissance ?



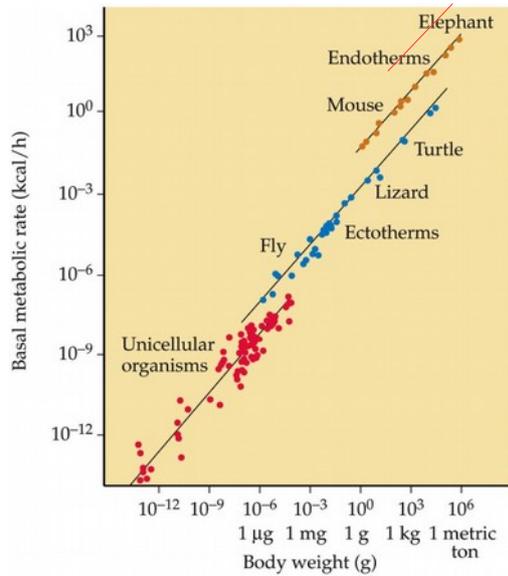
**Superman passe son temps à manger !**

# II. Comment expliquer une telle puissance ?



**D'où vient la Loi de Kleiber ?**

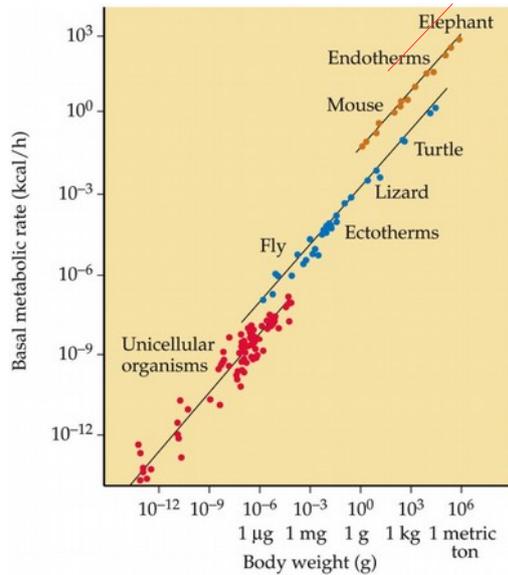
# II. Comment expliquer une telle puissance ?



Hypothèse : le « Métabolisme » sert à contrôler la température

$P \propto L^2$  et donc  $P \propto M^{2/3} \rightarrow$  Pas le bon exposant !

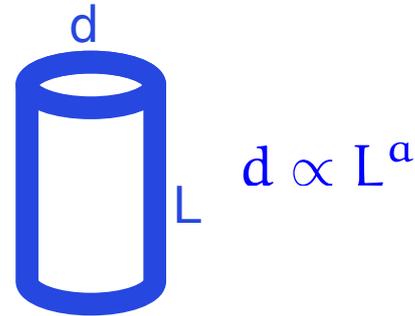
# II. Comment expliquer une telle puissance ?



Hypothèse : le « Métabolisme » sert à contrôler la température

$P \propto L^2$  et donc  $P \propto M^{2/3} \rightarrow$  Pas le bon exposant !

Ajoutons une dimension



Surface  $\propto L d$

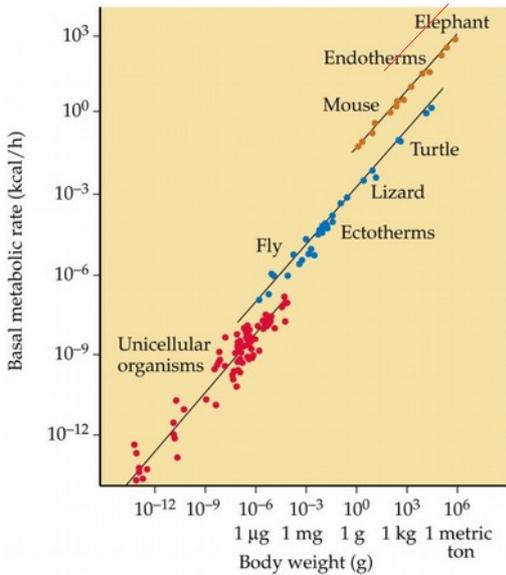
$$\rightarrow P \propto Ld = L^{1+a}$$

$$\text{Or } M \propto V \propto Ld^2 \rightarrow M \propto L \cdot L^{2a} = L^{1+2a}$$

$$P \propto L^{1+a} \text{ et } M \propto L^{1+2a} \rightarrow P \propto M^{(1+a)/(1+2a)}$$

à comparer à  $P \propto M^{3/4}$

# II. Comment expliquer une telle puissance ?



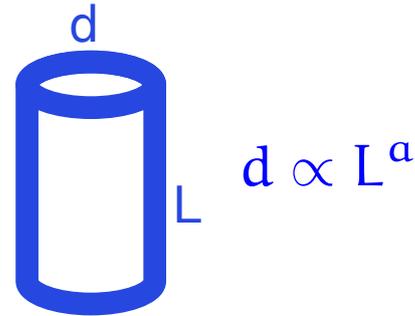
Hypothèse : le « Métabolisme » sert à contrôler la température

Ajoutons une dimension

$$S \propto L d$$

$$\rightarrow P \propto L d = L^{1+a}$$

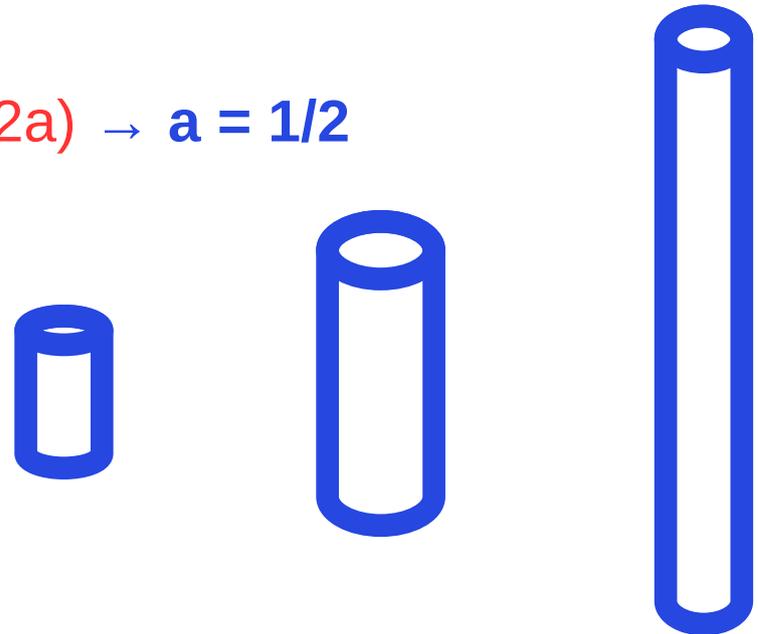
$$M \propto L^{1+2a}$$



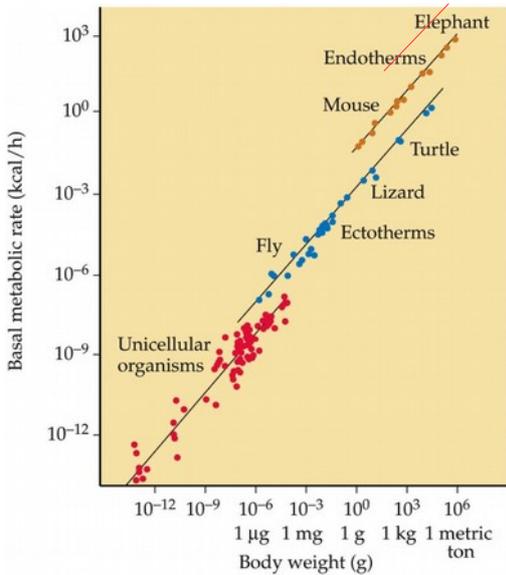
$$\rightarrow P \propto M^{(1+a)/(1+2a)} = M^{3/4} \rightarrow (1+a) = 3/4 \times (1+2a) \rightarrow a = 1/2$$

$$d \propto L^{1/2}$$

Exemple :  $L \times$  par 2  $\rightarrow d \times$  par  $\sqrt{2}$



# II. Comment expliquer une telle puissance ?



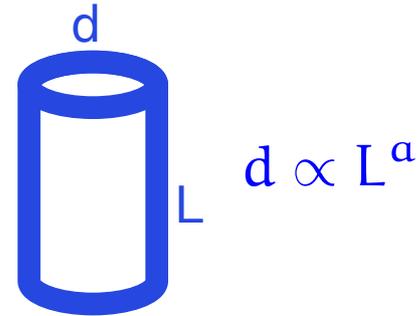
Hypothèse : le « Métabolisme » sert à contrôler la température

Ajoutons une dimension

$$S \propto L d$$

$$\rightarrow P \propto L d = L^{1+a}$$

$$M \propto L^{1+2a}$$

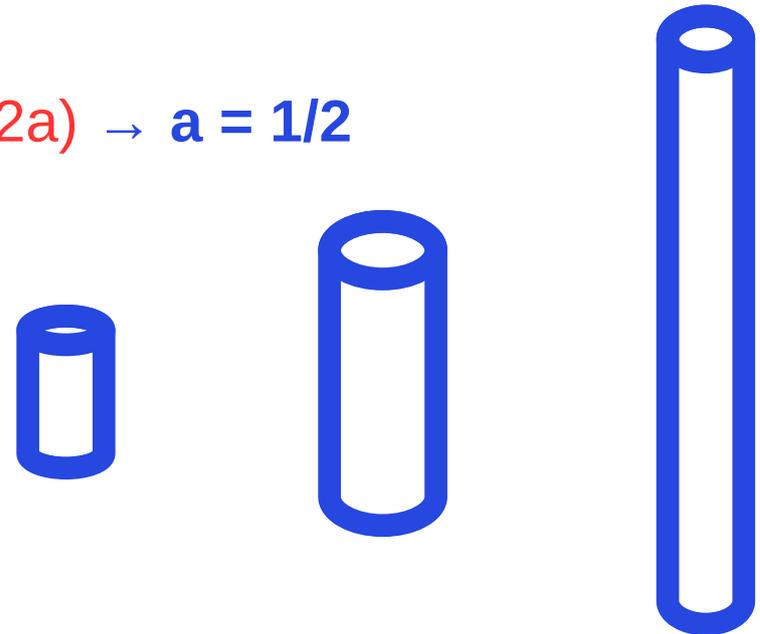


$$\rightarrow P \propto M^{(1+a)/(1+2a)} = M^{3/4} \rightarrow (1+a) = 3/4 \times (1+2a) \rightarrow a = 1/2$$

$$d \propto L^{1/2}$$

Exemple :  $L \times$  par 2  $\rightarrow d \times$  par  $\sqrt{2}$

ça ne va pas avec la morphologie...



## II. Comment expliquer une telle puissance ?

---



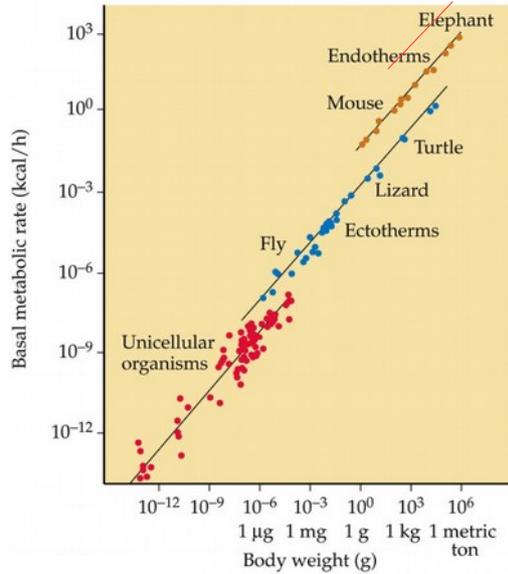
**Os longs, fins**



**Os courts, épais**



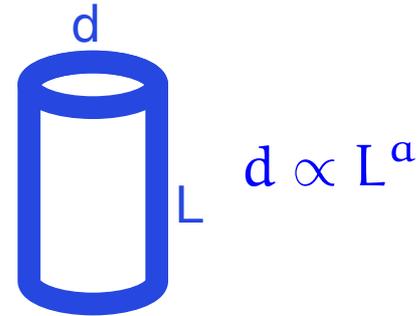
# II. Comment expliquer une telle puissance ?



Hypothèse : le « Métabolisme » sert à faire fonctionner les muscles

$$P \propto d^2 \text{ avec } d \propto L^a$$

$$\rightarrow P \propto L^{2a}$$

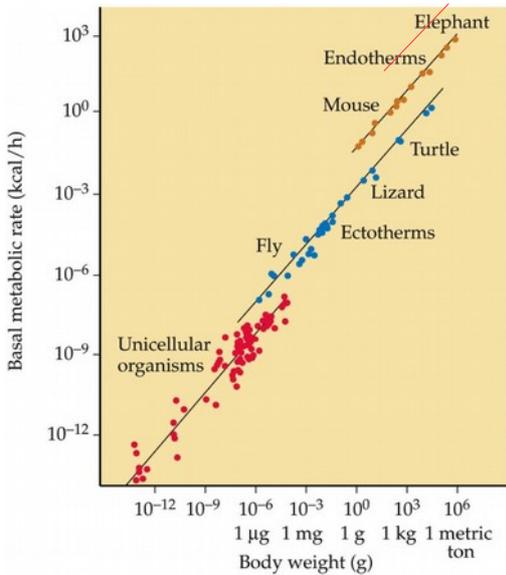


$$\text{Or } M \propto V \propto Ld^2 \rightarrow M \propto L \cdot L^{2a} = L^{1+2a}$$

$$P \propto L^{2a} \text{ et } M \propto L^{1+2a} \rightarrow P \propto M^{2a/(1+2a)}$$

à comparer à  $P \propto M^{3/4}$

# II. Comment expliquer une telle puissance ?



Hypothèse : le « Métabolisme » sert à faire fonctionner les muscles

$$P \propto d^2 \text{ avec } d \propto L^a$$

$$\rightarrow P \propto L^{2a}$$

$$M \propto L^{1+2a}$$

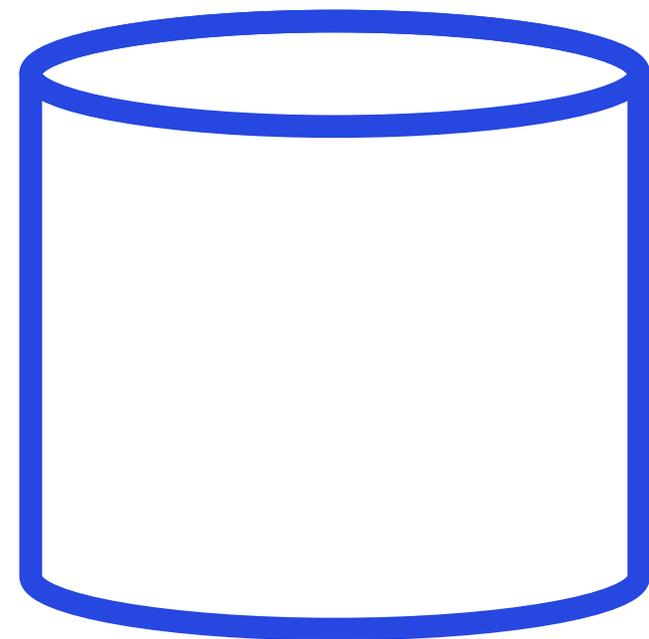
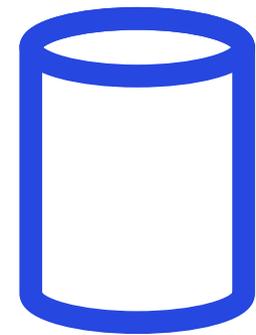


$$d \propto L^a$$

$$\rightarrow P \propto M^{2a/(1+2a)} = M^{3/4} \rightarrow 2a = 3/4 \times (1+2a) \rightarrow a = 3/2$$

$$d \propto L^{3/2}$$

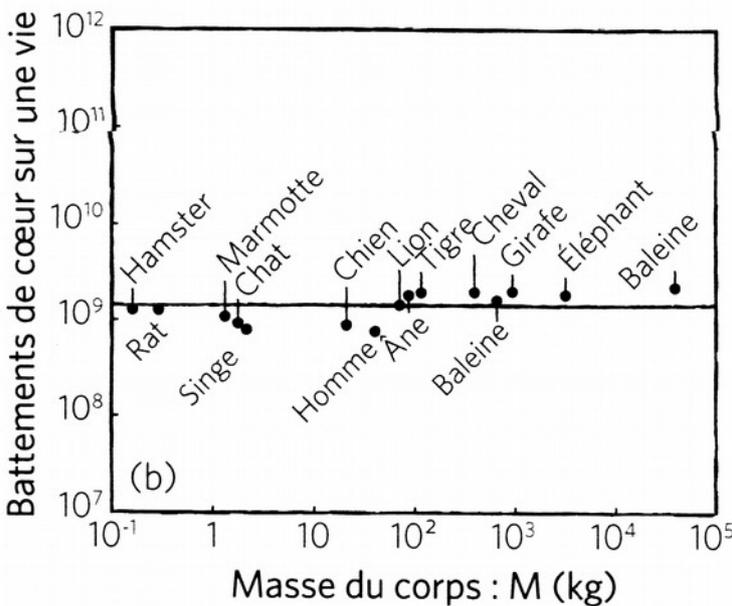
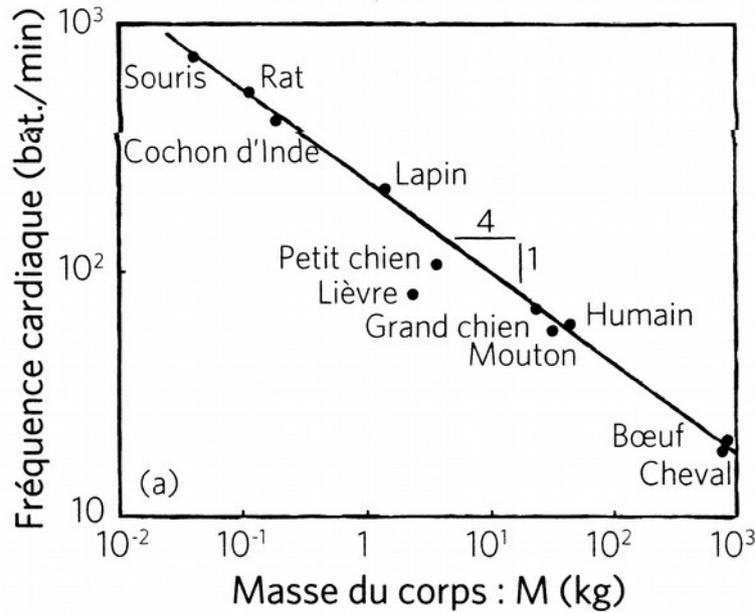
Exemple :  $L \times \text{par } 2 \rightarrow d \times \text{par } 2,8$



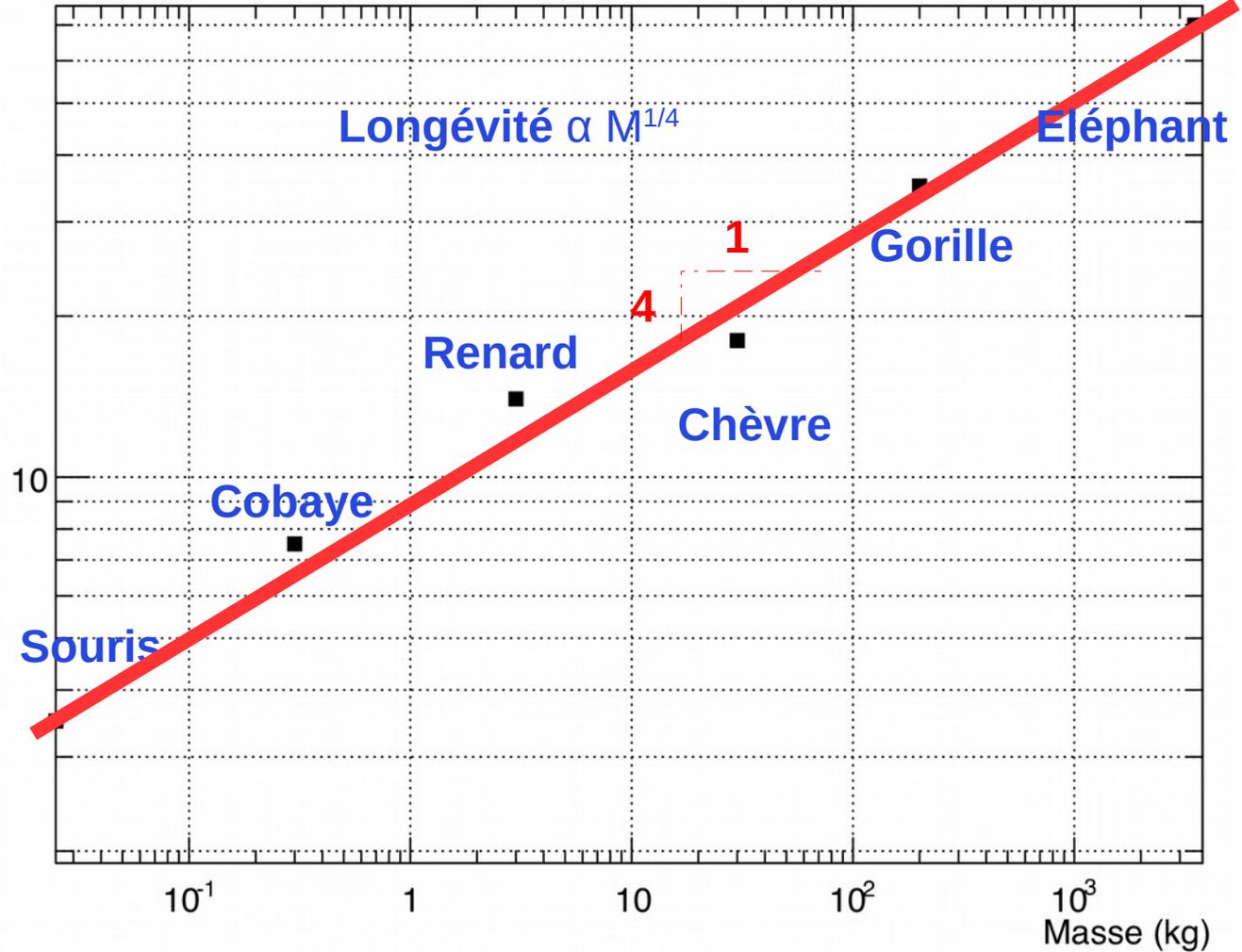
ça marche !

« Métabolisme » = fonctionnement des muscles

# II. Comment expliquer une telle puissance ?



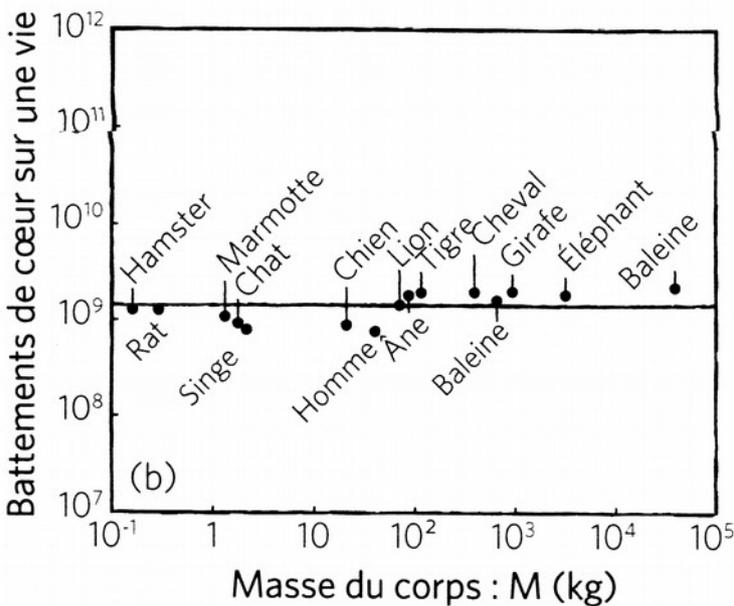
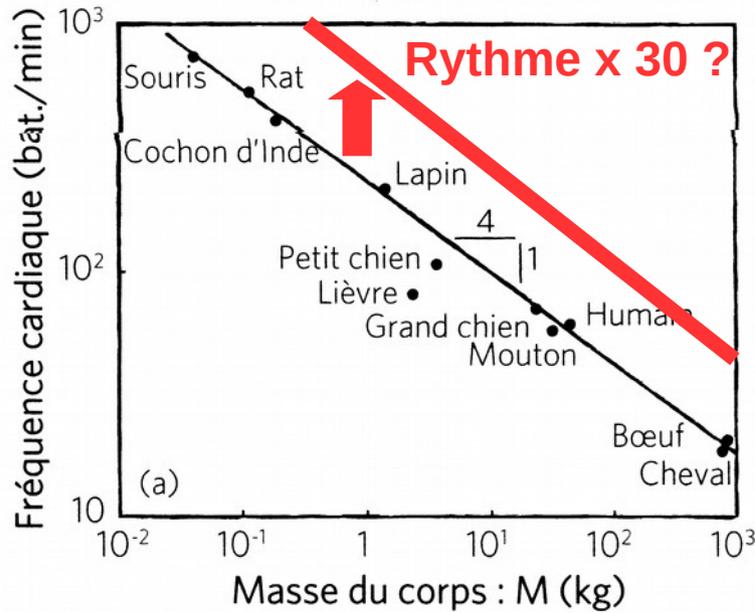
Longévité (années)



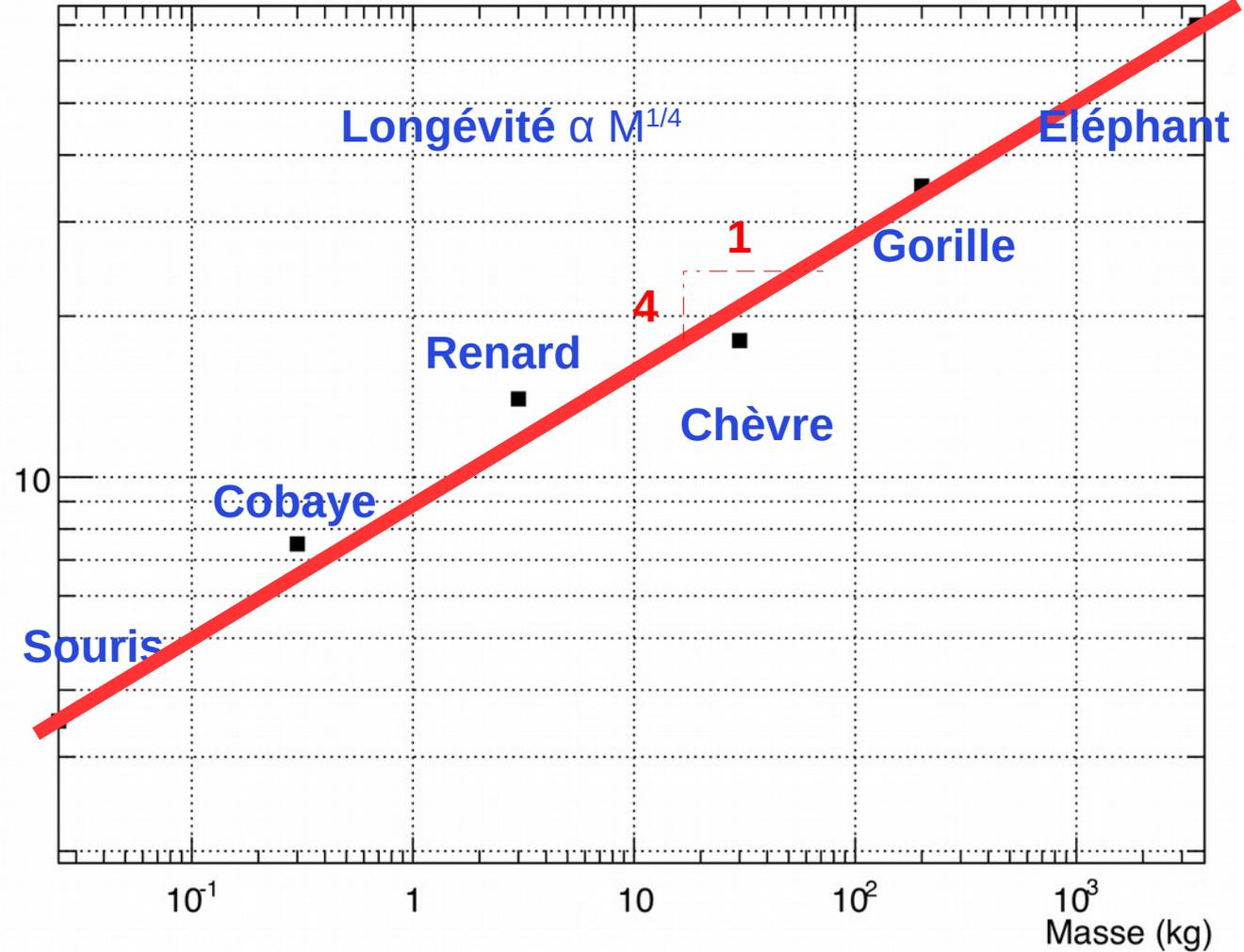
T. Séon

« Les lois d'échelle » (Odile Jacob)

# II. Comment expliquer une telle puissance ?

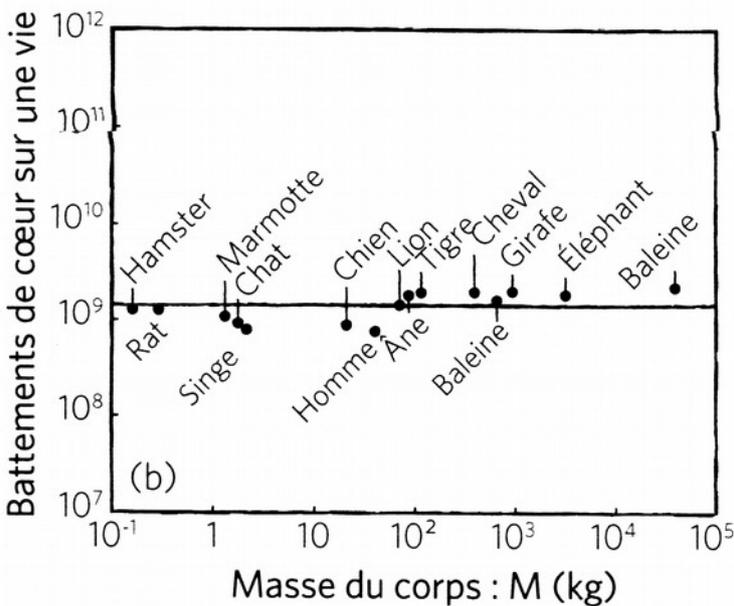
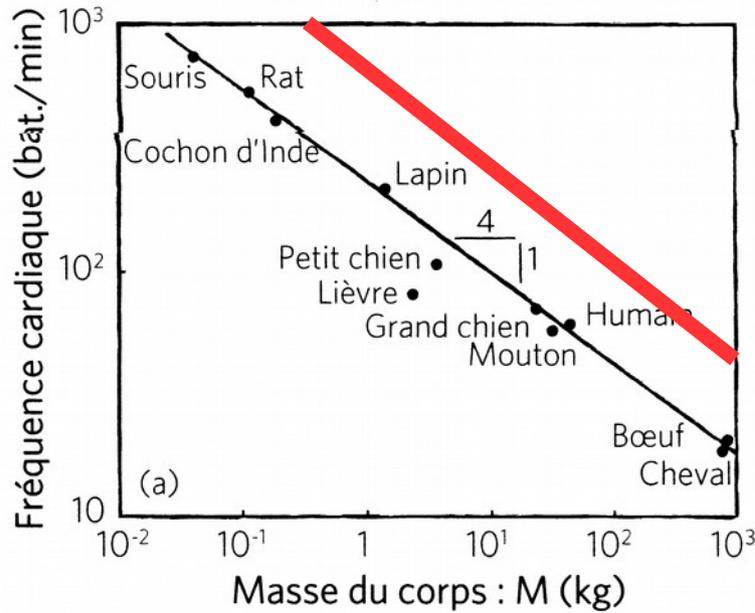


Longévité (années)

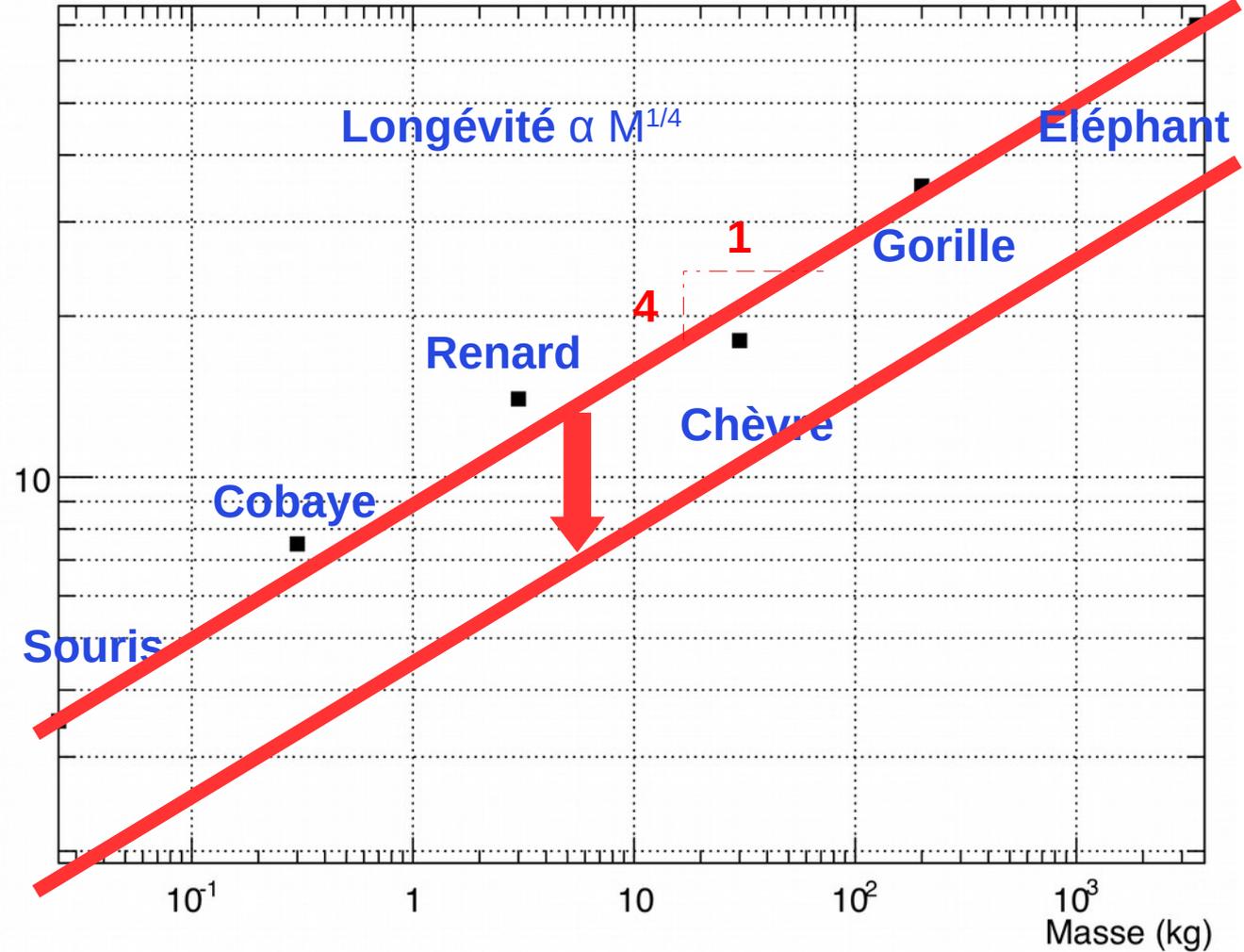


Un Super-Coeur ?

# II. Comment expliquer une telle puissance ?

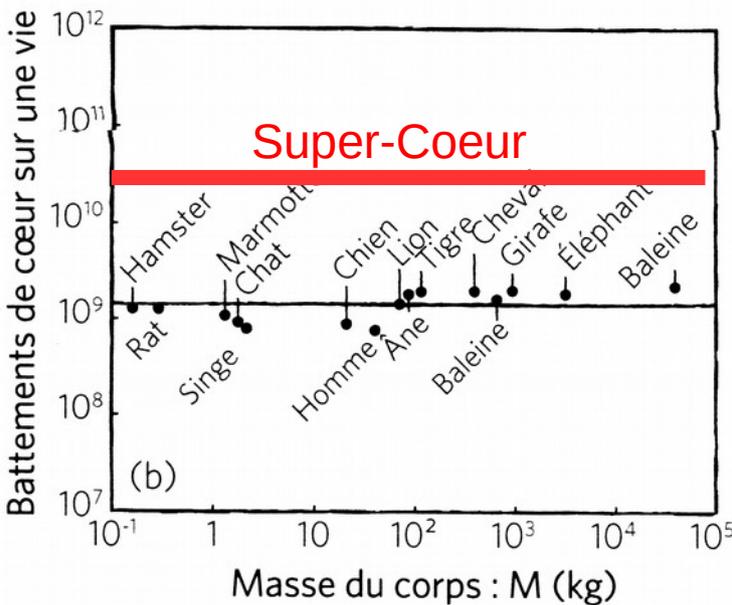
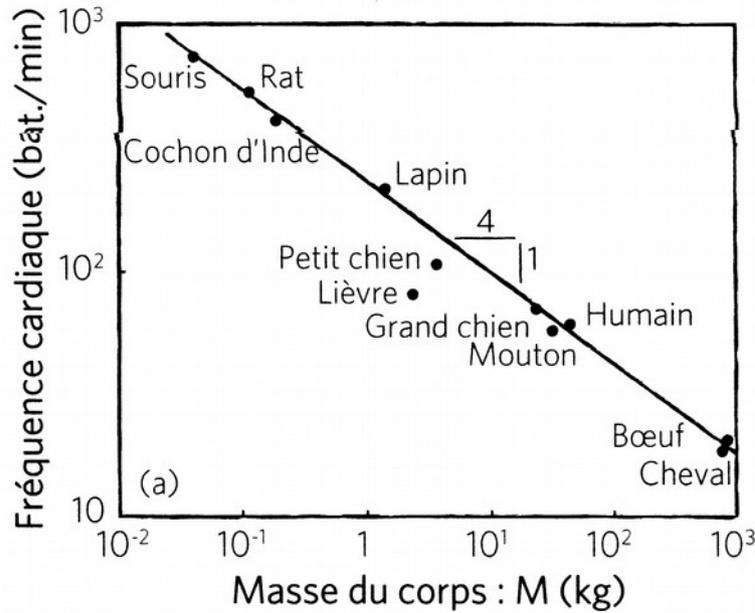


Longévité (années)

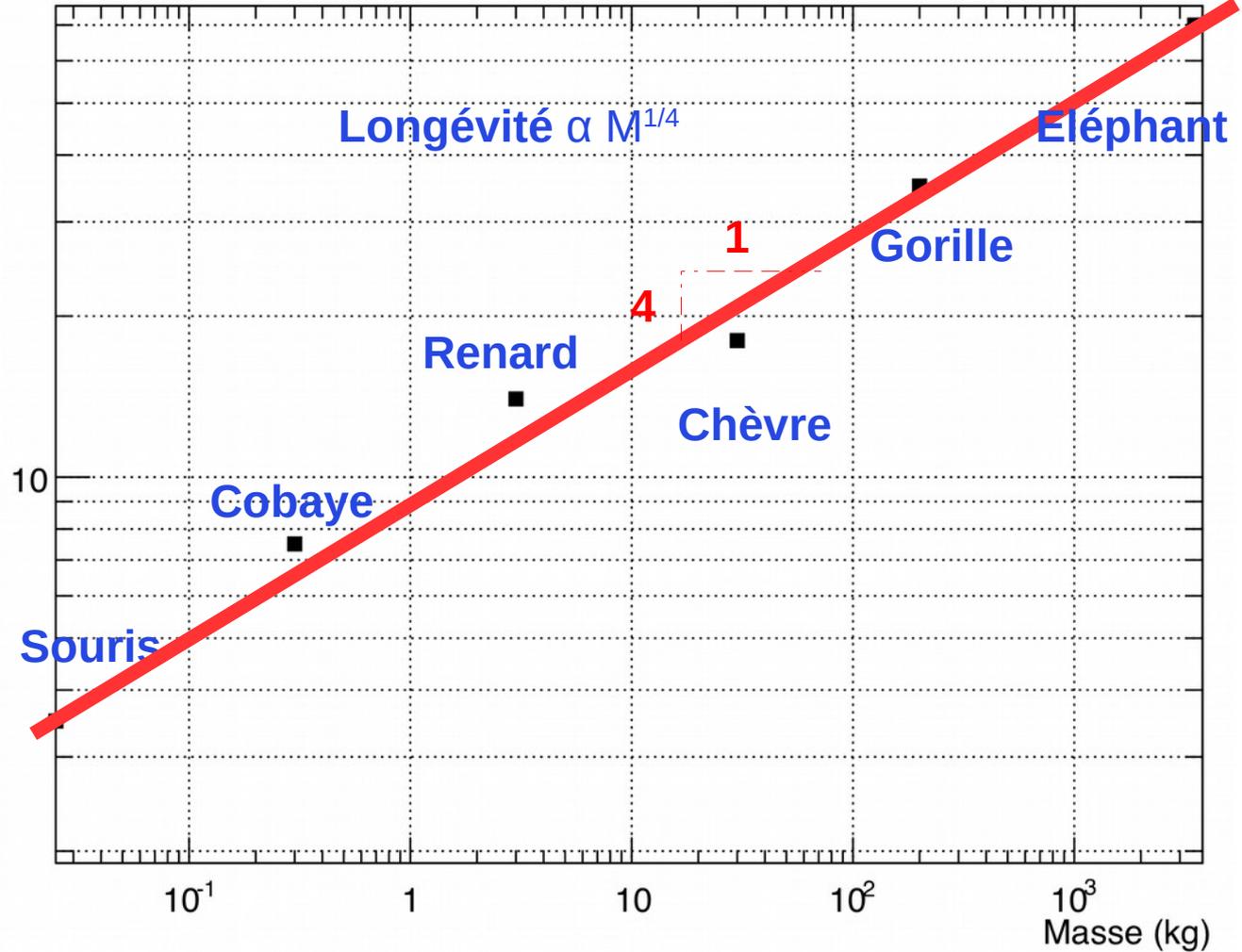


Superman a 30 ans ?  
Il ne devrait vivre que 3 ans...

# II. Comment expliquer une telle puissance ?



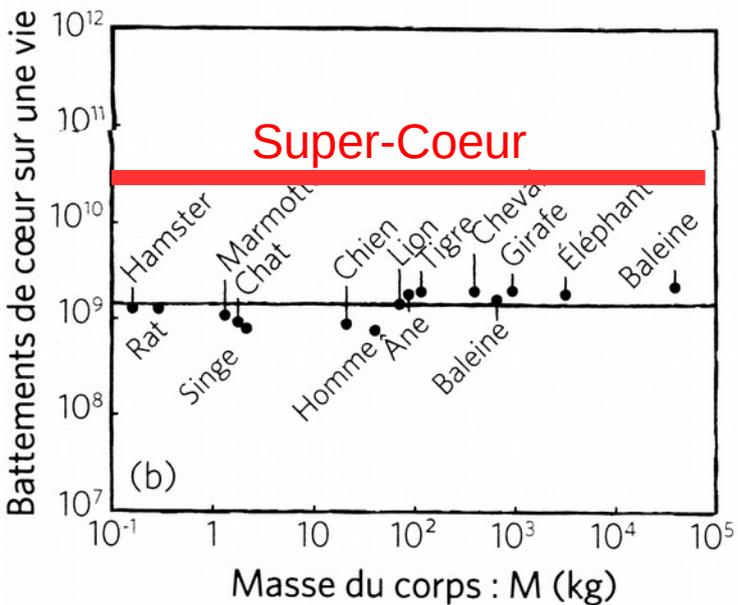
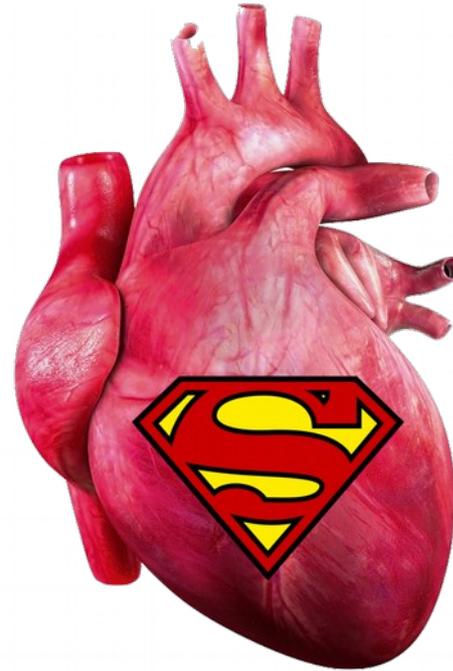
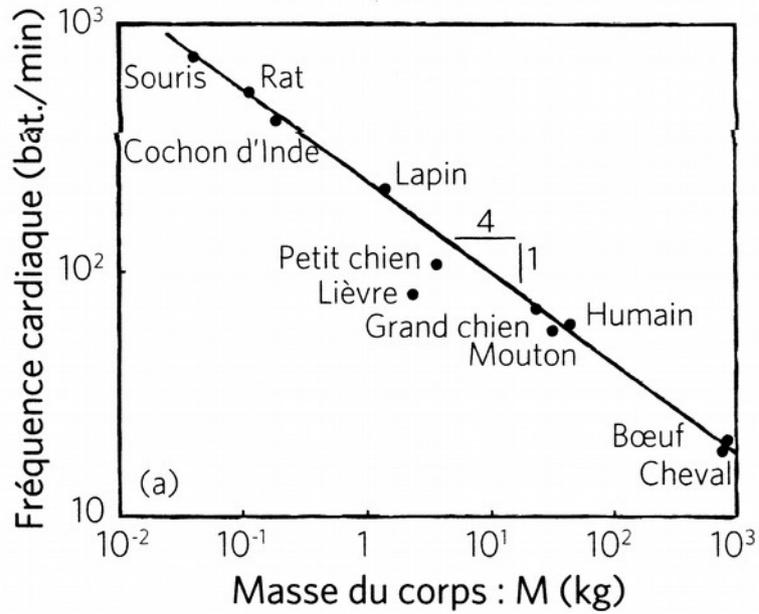
Longévité (années)



Un Super-Coeur...ou un super-sang...



# II. Comment expliquer une telle puissance ?

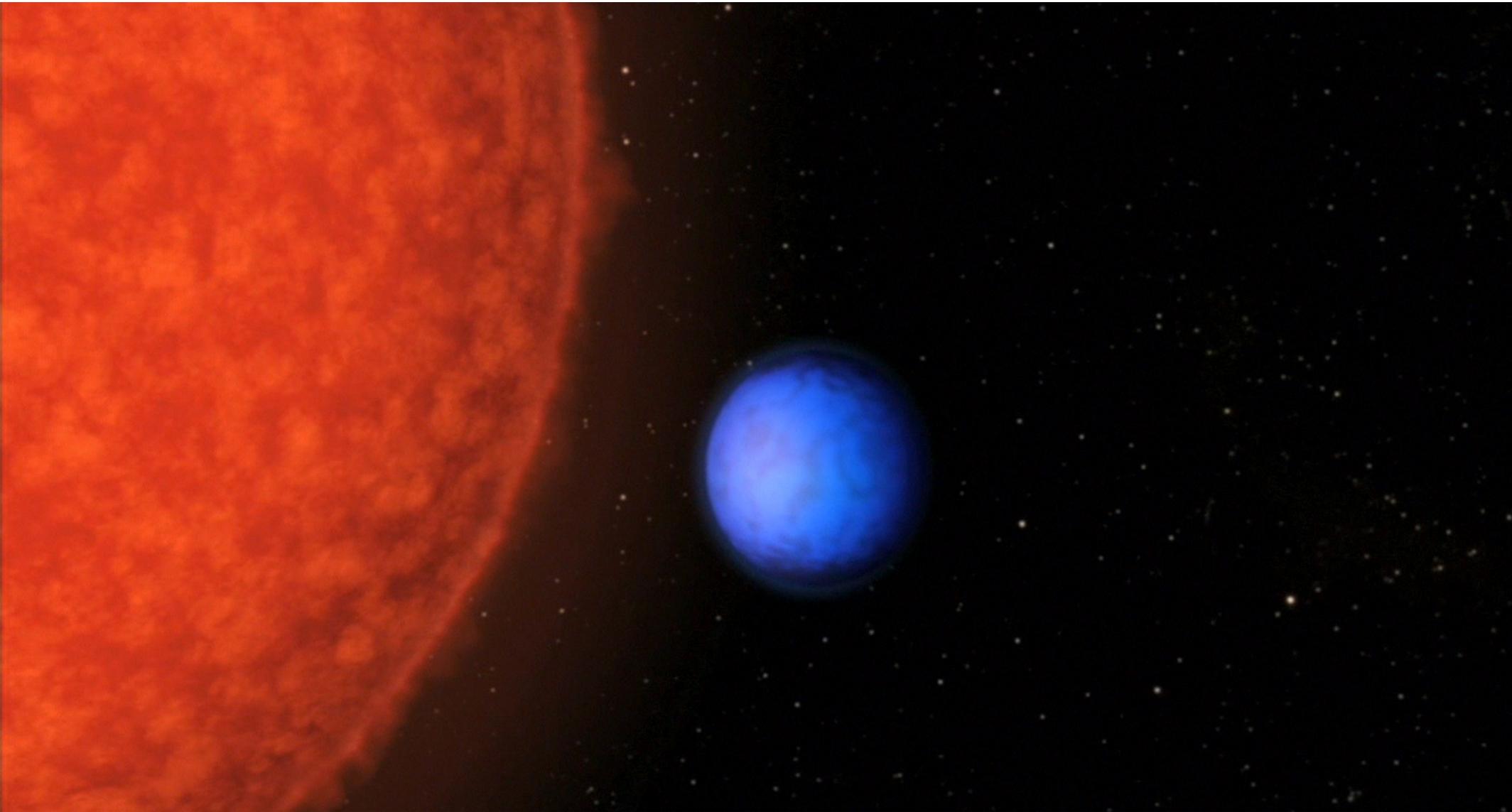


Un Super-Coeur...ou un super-sang...



## II. Sa puissance : retour sur Krypton

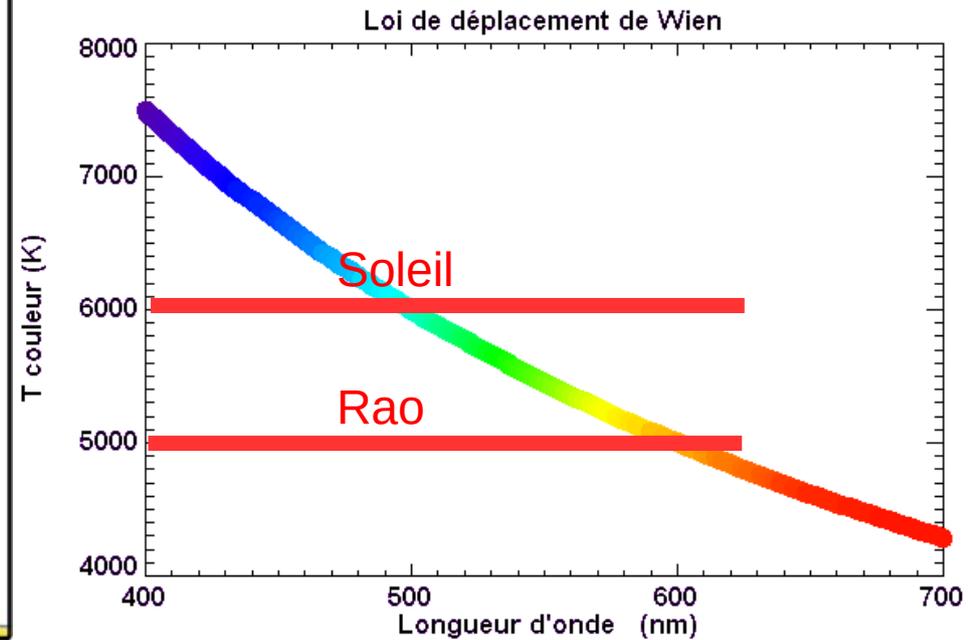
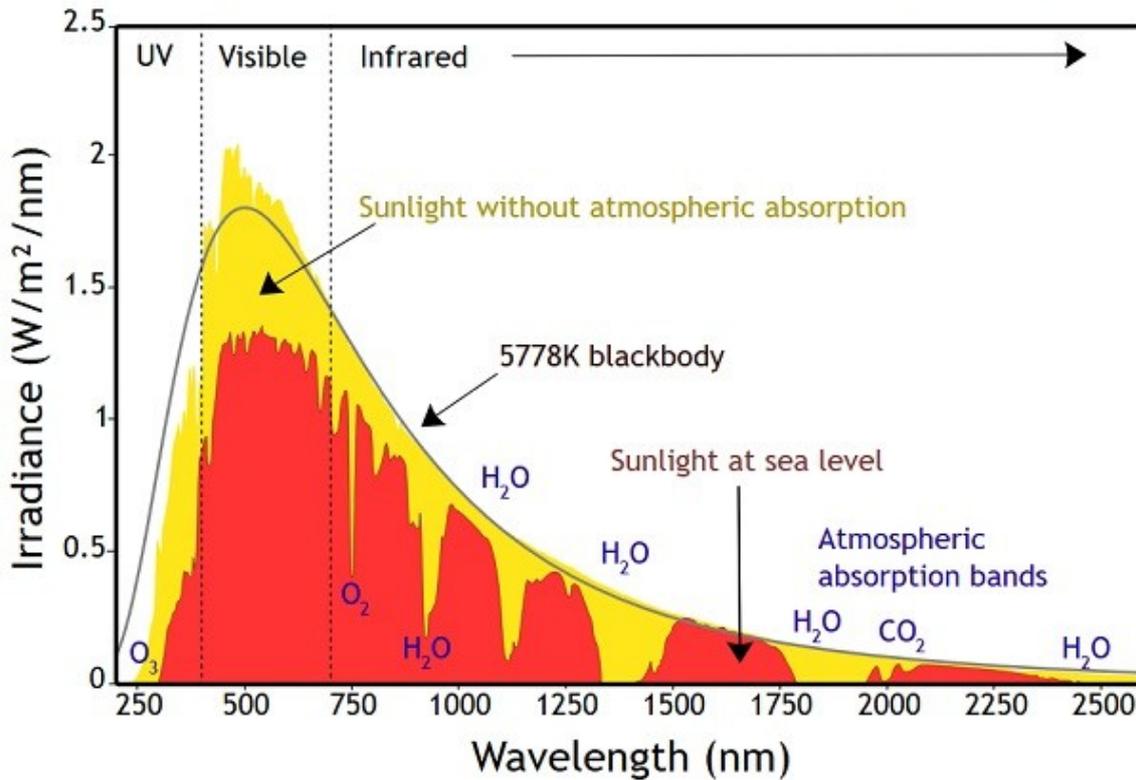
---



Rao, une étoile orange-rouge...

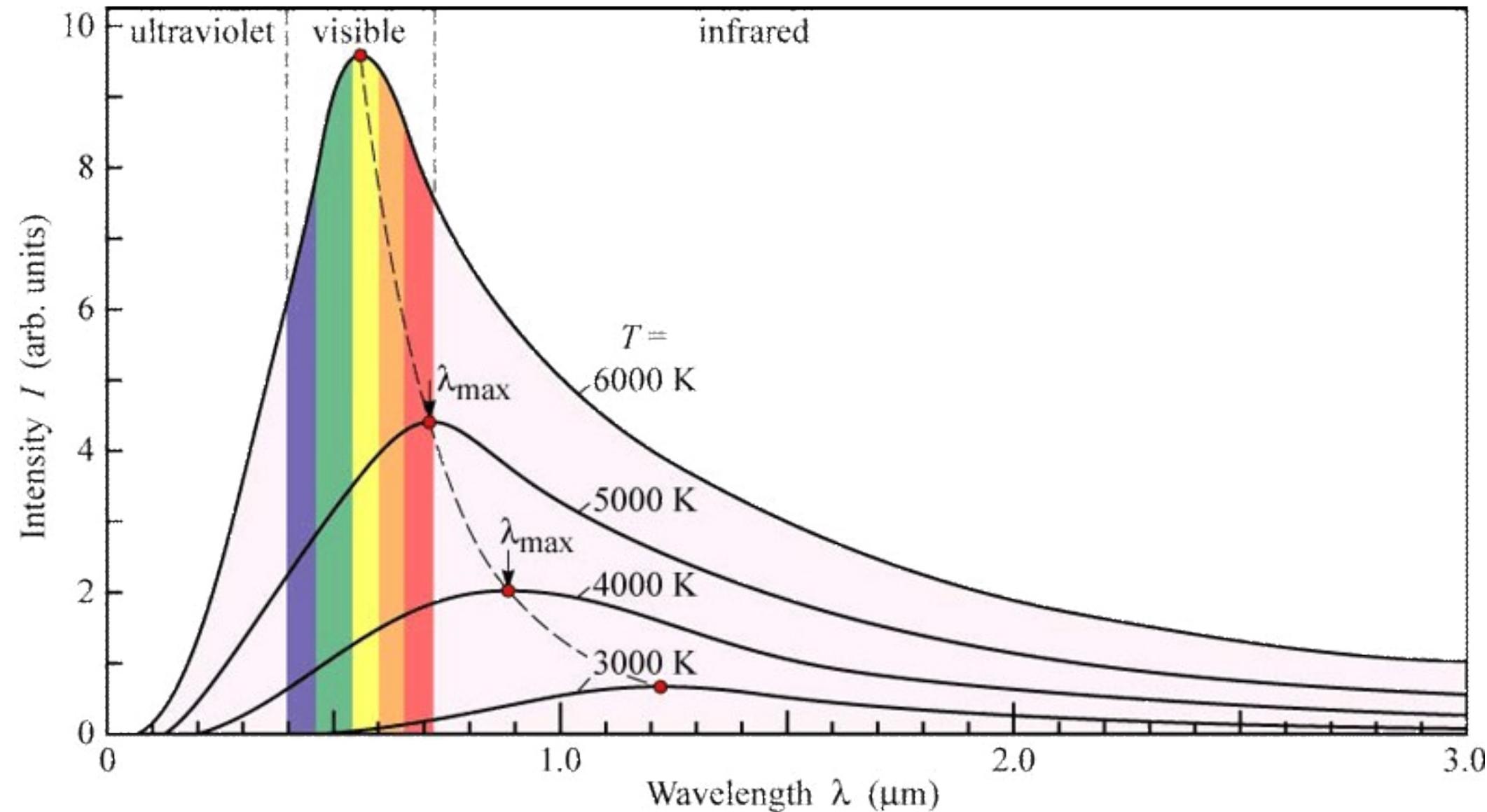
# II. Sa puissance : retour sur Krypton

### Spectrum of Solar Radiation (Earth)



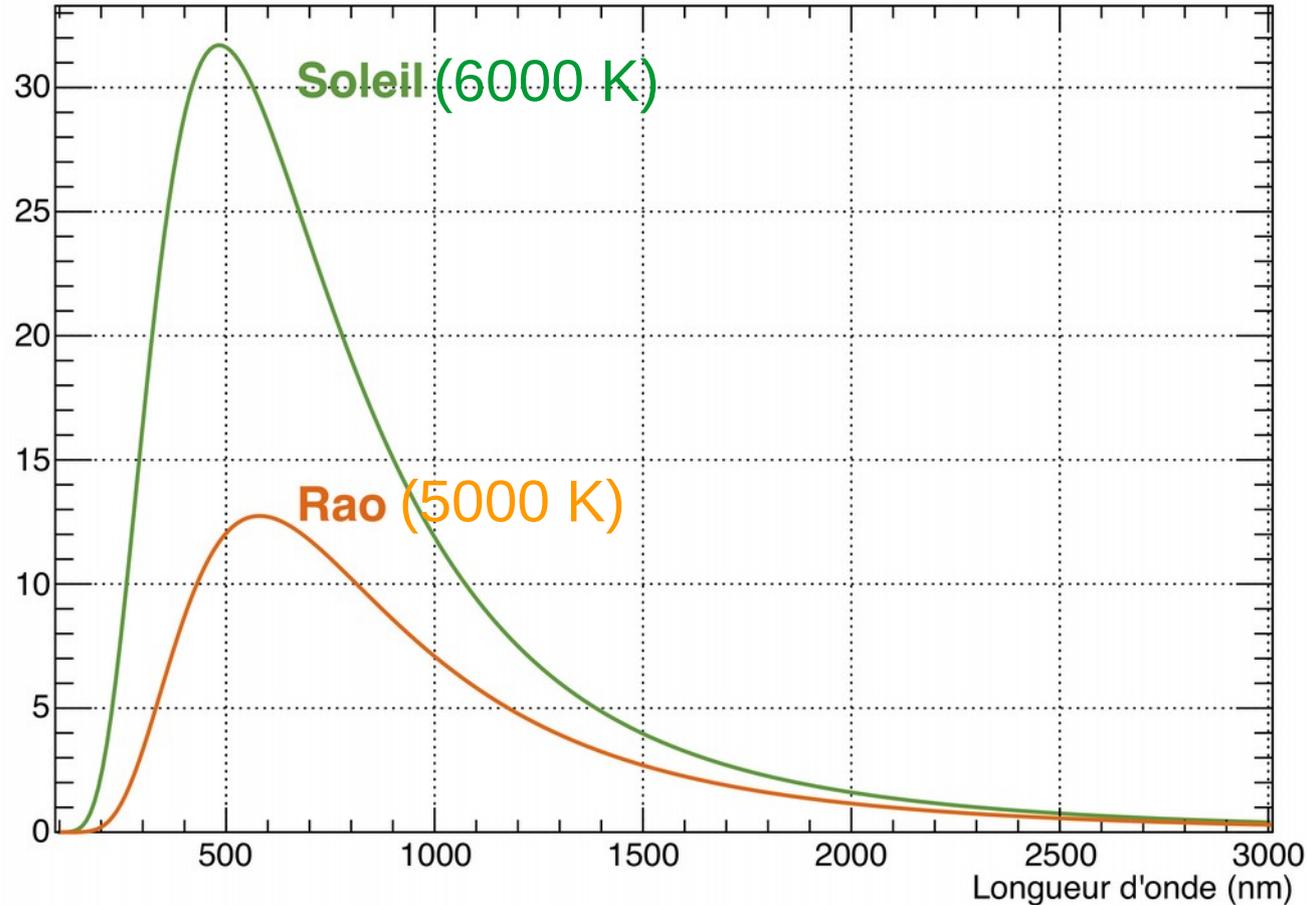
Rayonnement du « Corps Noir »

## II. Sa puissance : retour sur Krypton



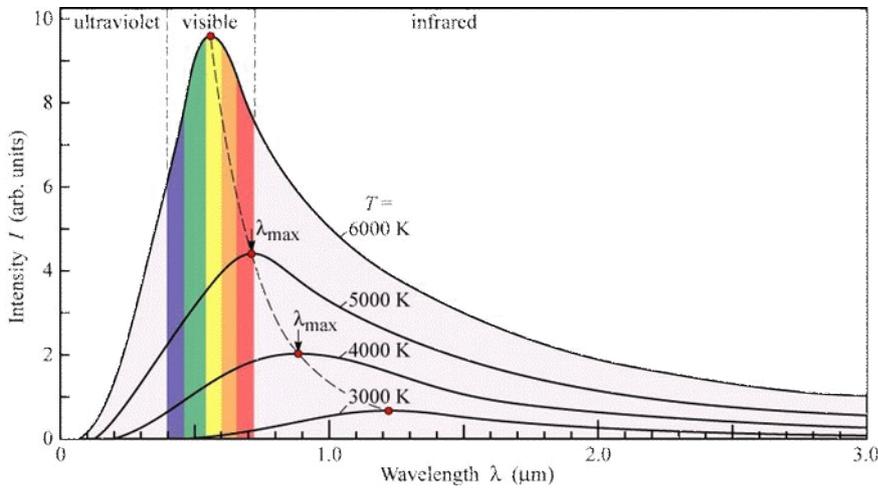
## II. Sa puissance : retour sur Krypton

Densité Spectrale (kW/m<sup>2</sup>/sr/nm)



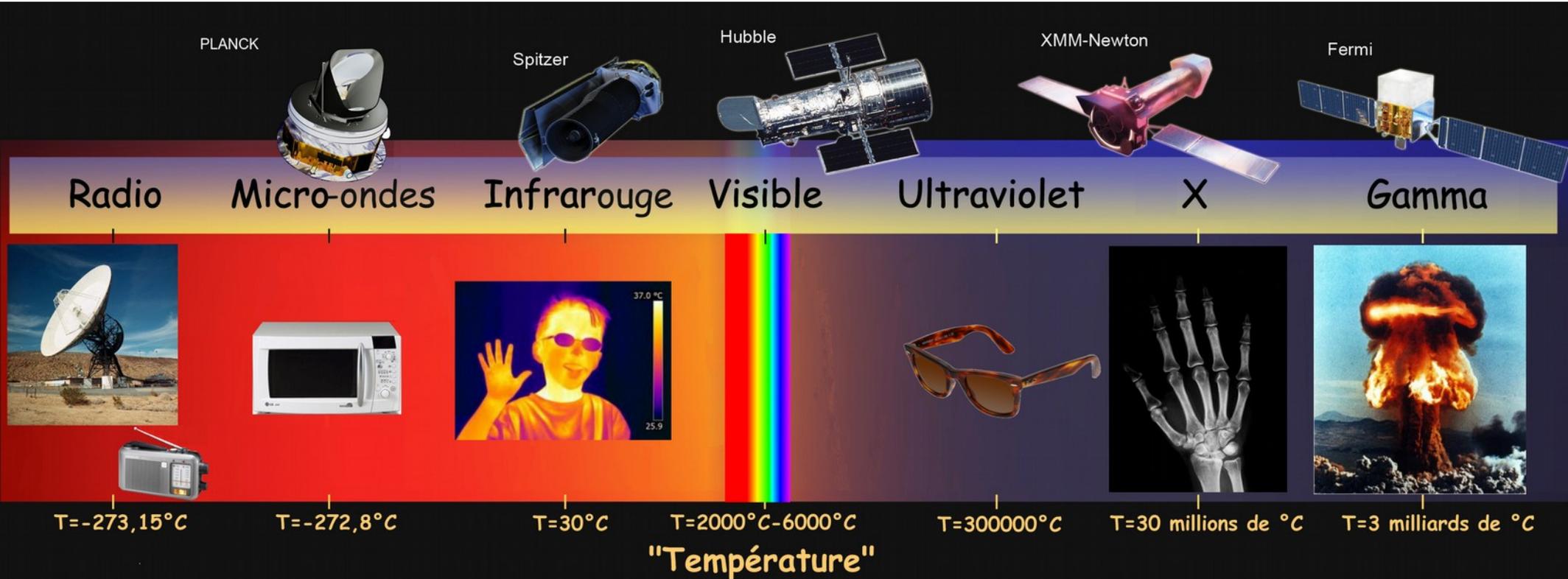
Pour le « Corps Noir » : Puissance Totale  $\propto 1/T^4$   
Imaginons (Puissance du Soleil) = 30 x (Puissance de Rao)  
 $\rightarrow T_{\text{Soleil}} = T_{\text{Rao}} \times 30^{1/4} \rightarrow T_{\text{Rao}} \sim \mathbf{2500K}$

# II. Sa puissance : retour sur Krypton



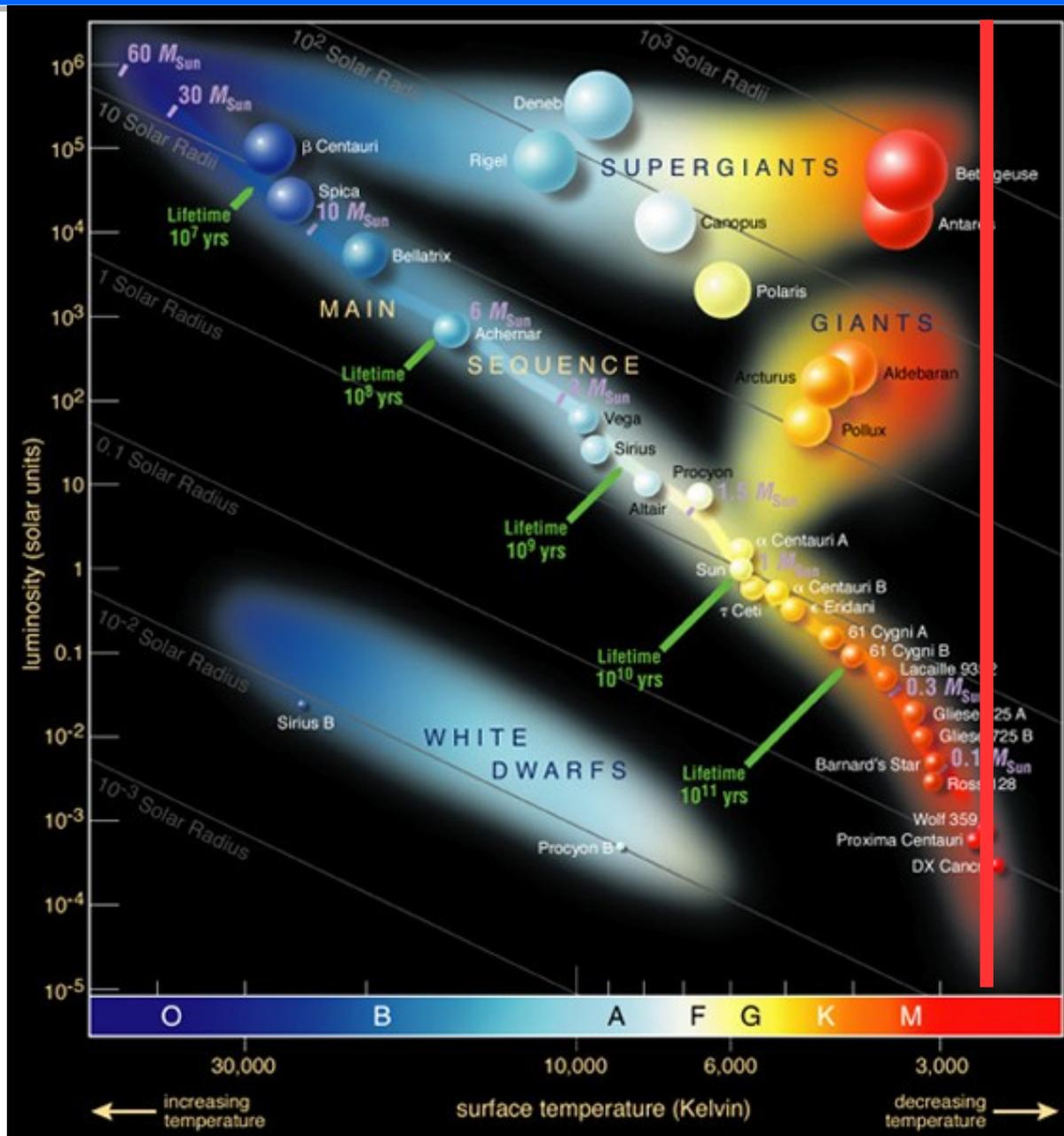
Mais Puissance Totale  $\propto 1/T^4$   
 Imaginons (Puissance Soleil) = 30 x  $R_{\text{ao}}$   
 $\rightarrow T_{\text{Soleil}} = T_{\text{Rao}} \times 2,3 \rightarrow T_{\text{Rao}} \sim 2500\text{K}$

$\lambda_{\text{max}} \propto 1/T \rightarrow \lambda_{\text{max}} \sim 1100\text{nm}$  pour  $T_{\text{rao}} \sim 2500\text{K}$



"Température"

# II. Sa puissance : retour sur Krypton

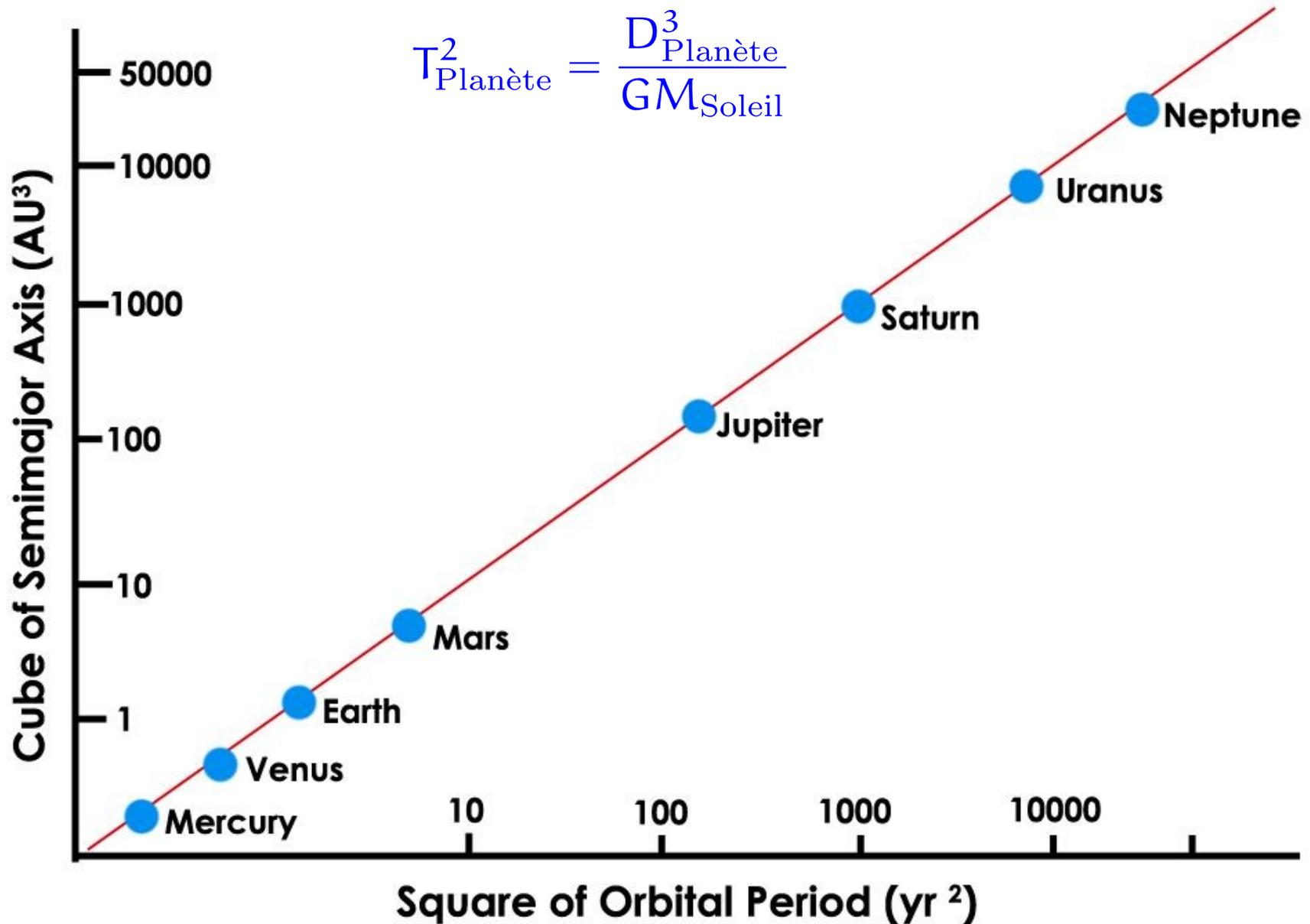


Climat froid...  
Faible luminosité  
OU  
Grande distance...

mais année Krypton ~ 1,4 Terre !  
Superman#157 (1962)



## II. Sa puissance : retour sur Krypton

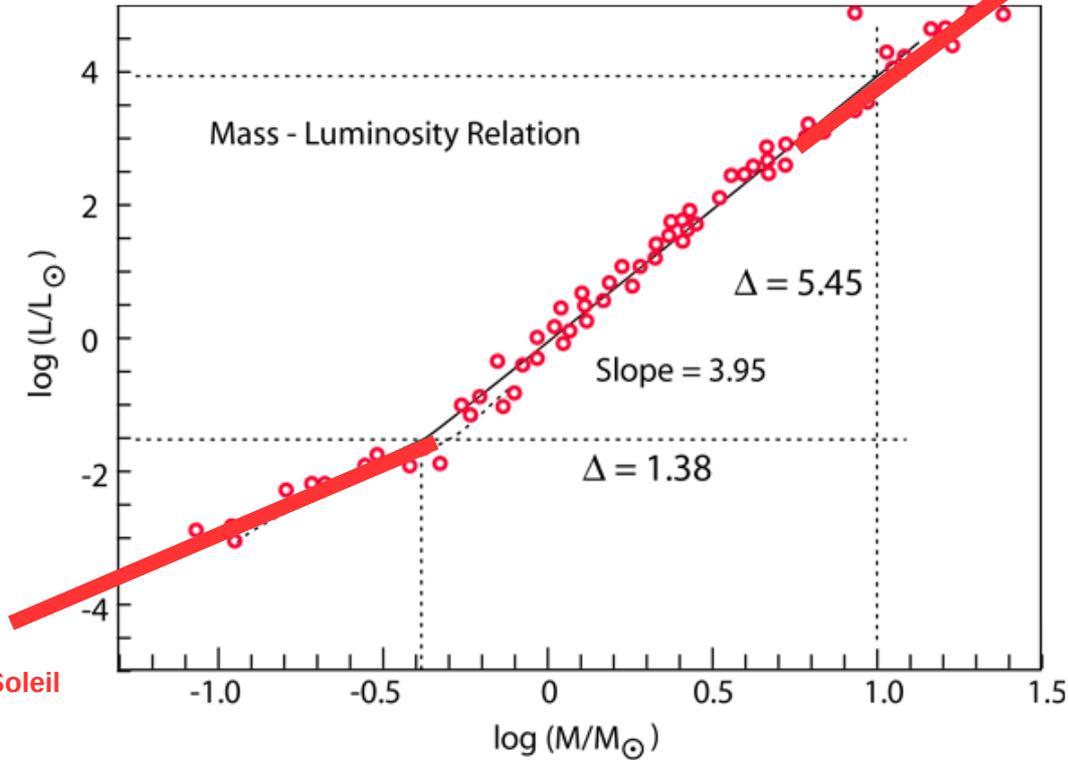
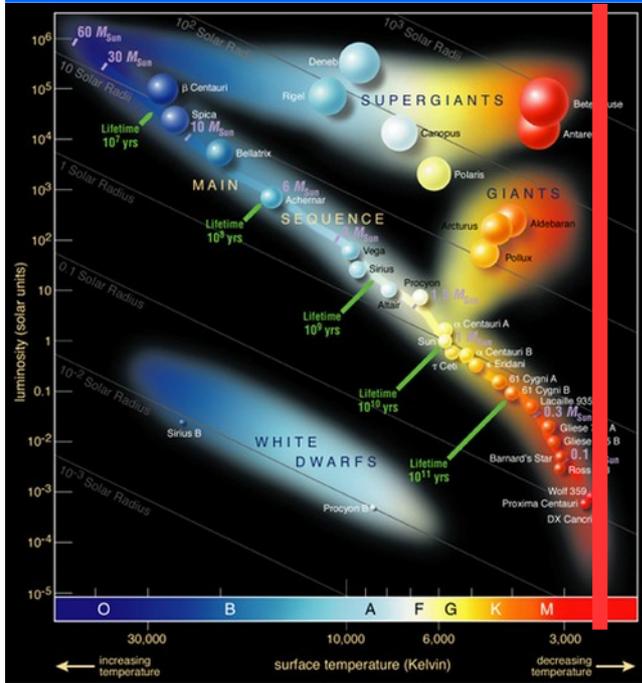


# II. Sa puissance : retour sur Krypton



Climat froid...  
Faible luminosité  
OU  
Grande distance...

mais année Krypton ~ 1,4 Terre !



$M_{\text{Rao}} \sim 10^{-1,4} M_{\text{Soleil}}$

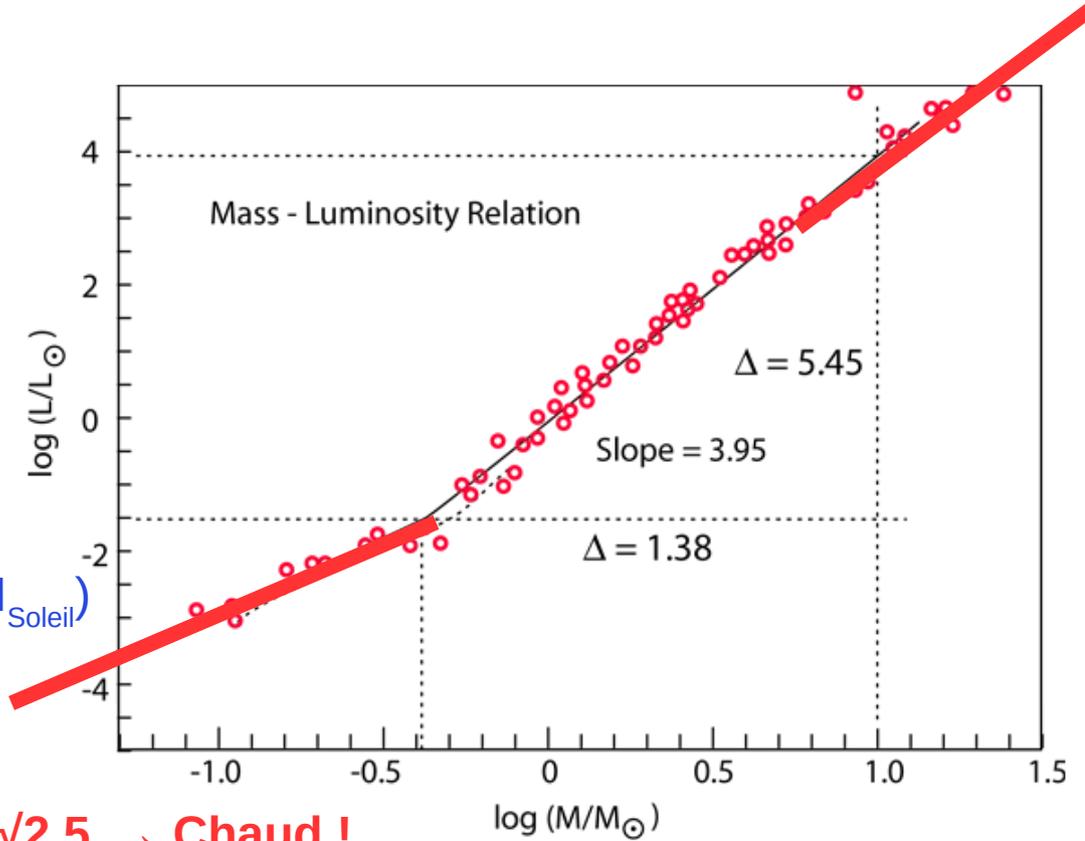
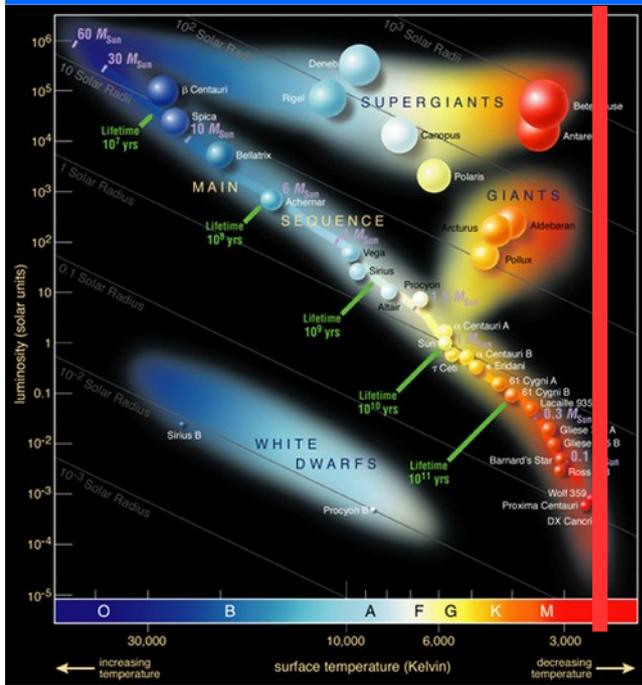
$M_{\text{Rao}} \sim 10^{1,5} M_{\text{Soleil}}$

# II. Sa puissance : retour sur Krypton



Climat froid...  
Faible luminosité  
OU  
Grande distance...

mais année Krypton ~ 1,4 Terre !



$$M_{\text{Rao}} \sim 10^{-1,4} M_{\text{Soleil}}$$

$$\text{Kepler} \rightarrow (D_{\text{Rao}} / D_{\text{Soleil}})^3 = (T_{\text{Krypton}} / T_{\text{Terre}})^2 (M_{\text{Rao}} / M_{\text{Soleil}})$$

$$\rightarrow (D_{\text{Rao}} / D_{\text{Soleil}})^3 \sim 2 \times 0,04 = 0,08$$

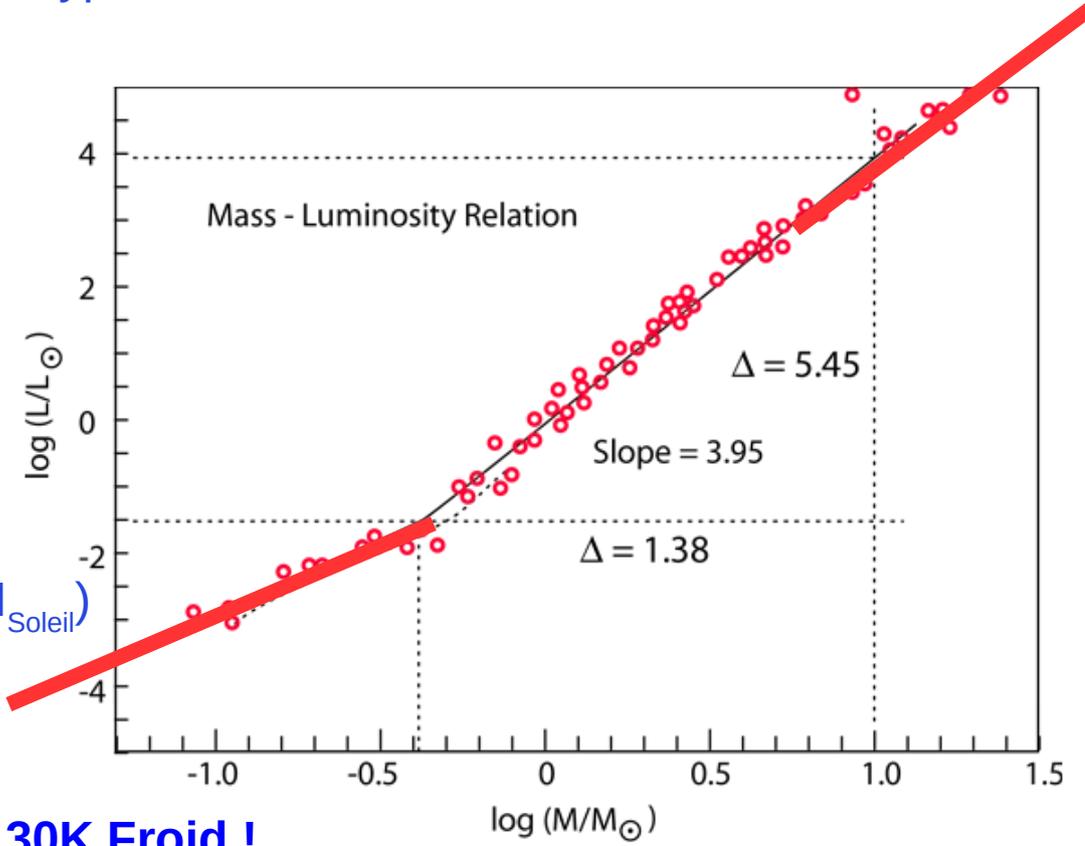
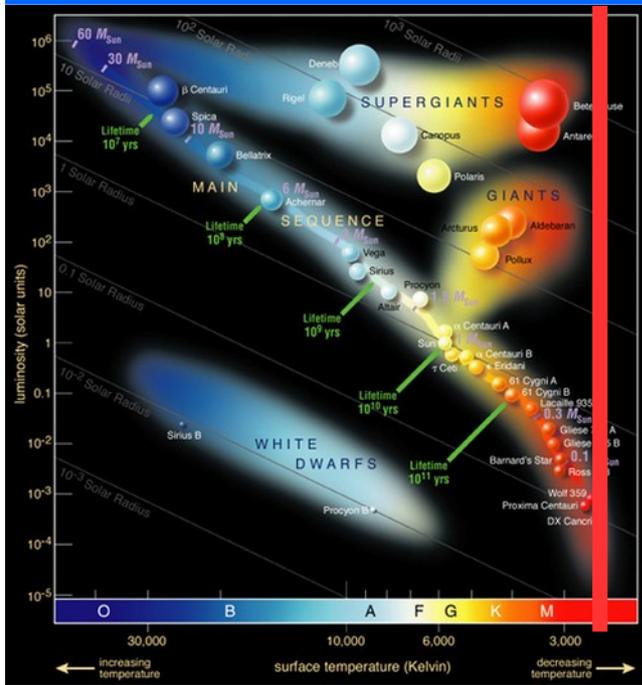
$$\text{qui est } 2,5 \times \text{ plus proche...} \rightarrow T_{\text{Krypton}} \sim T_{\text{terre}} \times \sqrt{2,5} \rightarrow \text{Chaud !}$$

# II. Sa puissance : retour sur Krypton



Climat froid...  
Faible luminosité  
OU  
Grande distance...

mais année Krypton ~ 1,4 Terre !



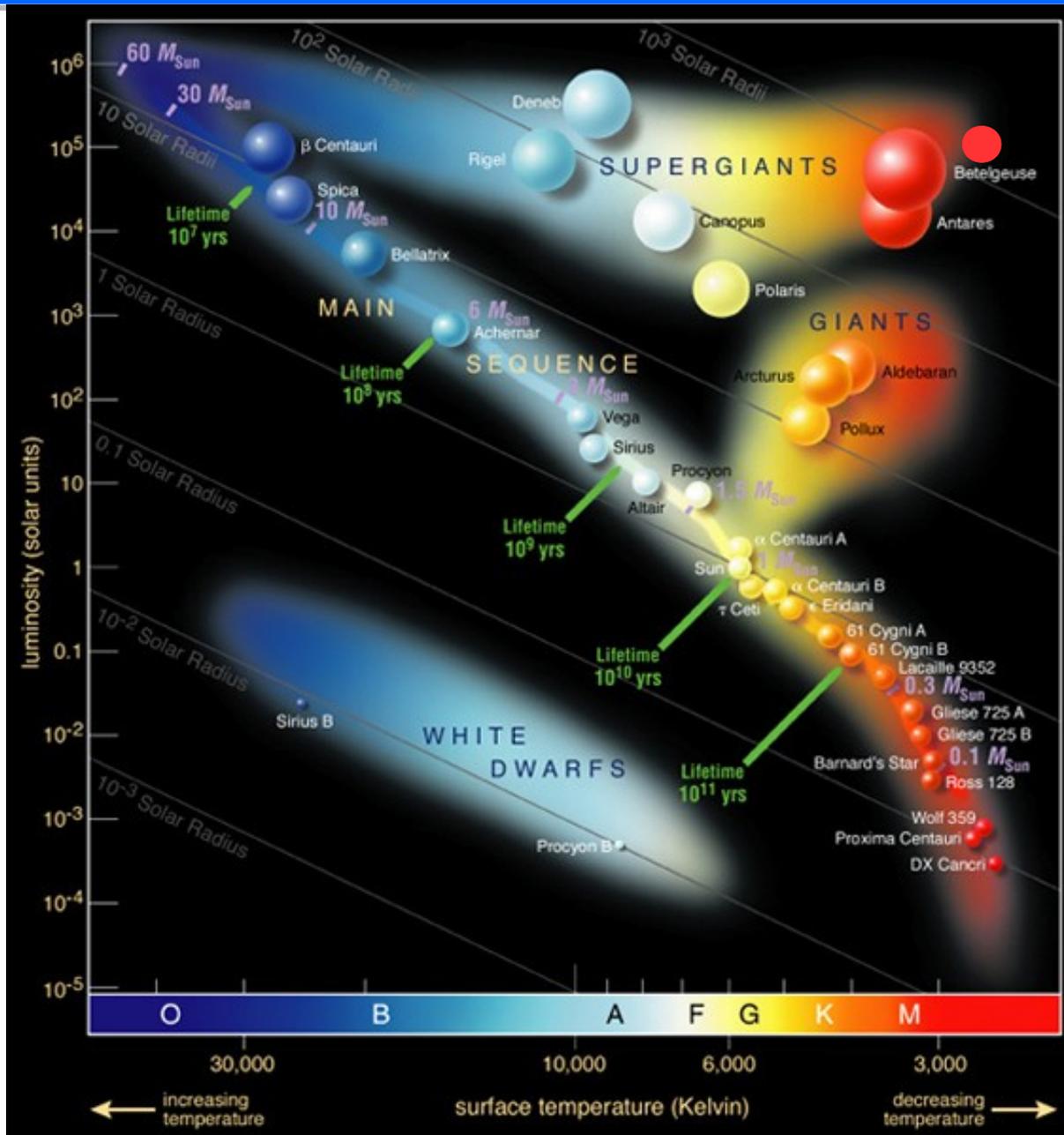
...OU  $M_{Rao} \sim 10^{1.5} M_{Soleil}$

$$\text{Kepler} \rightarrow (D_{Rao}/D_{Soleil})^3 = (T_{Krypton}/T_{Terre})^2 (M_{Rao}/M_{Soleil})$$

$$\rightarrow (D_{Rao}/D_{Soleil})^3 \sim 2 \times 32 = 64$$

qui est 64x plus loin...  $\rightarrow T_{Krypton} \sim T_{terre} / \sqrt{64} \sim 30K \text{ Froid !}$

# II. Sa puissance : retour sur Krypton

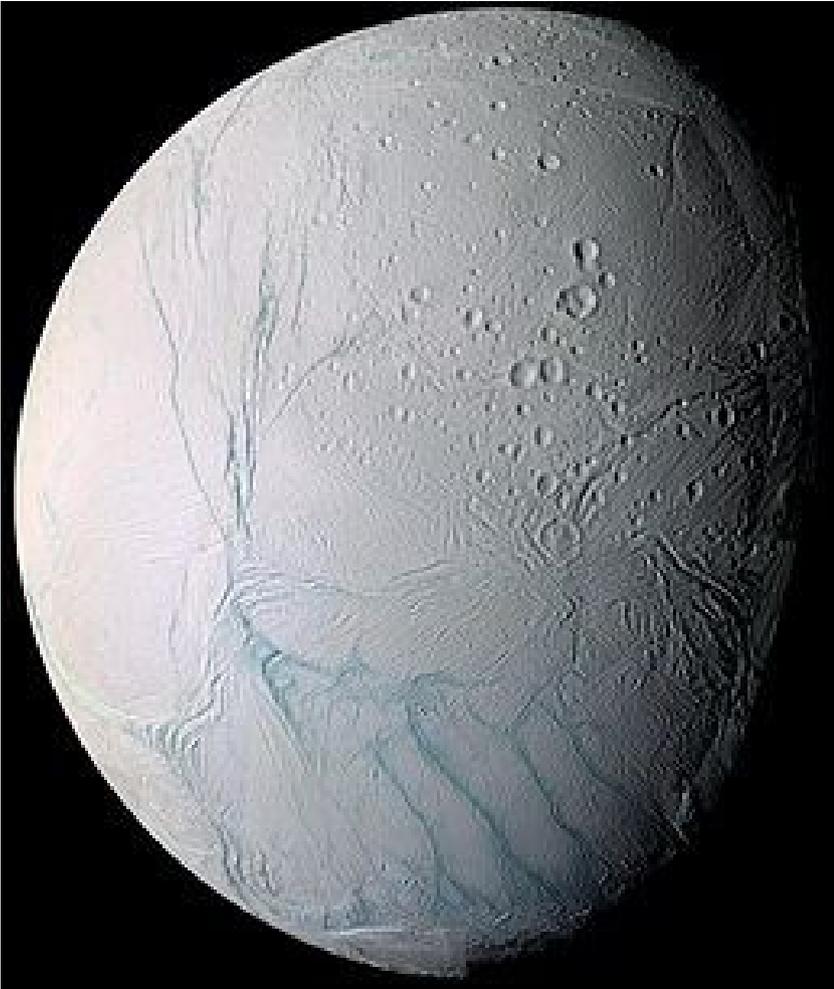


Rao/Krypton  
**Une supergéante Rouge**  
**T ~2500K**

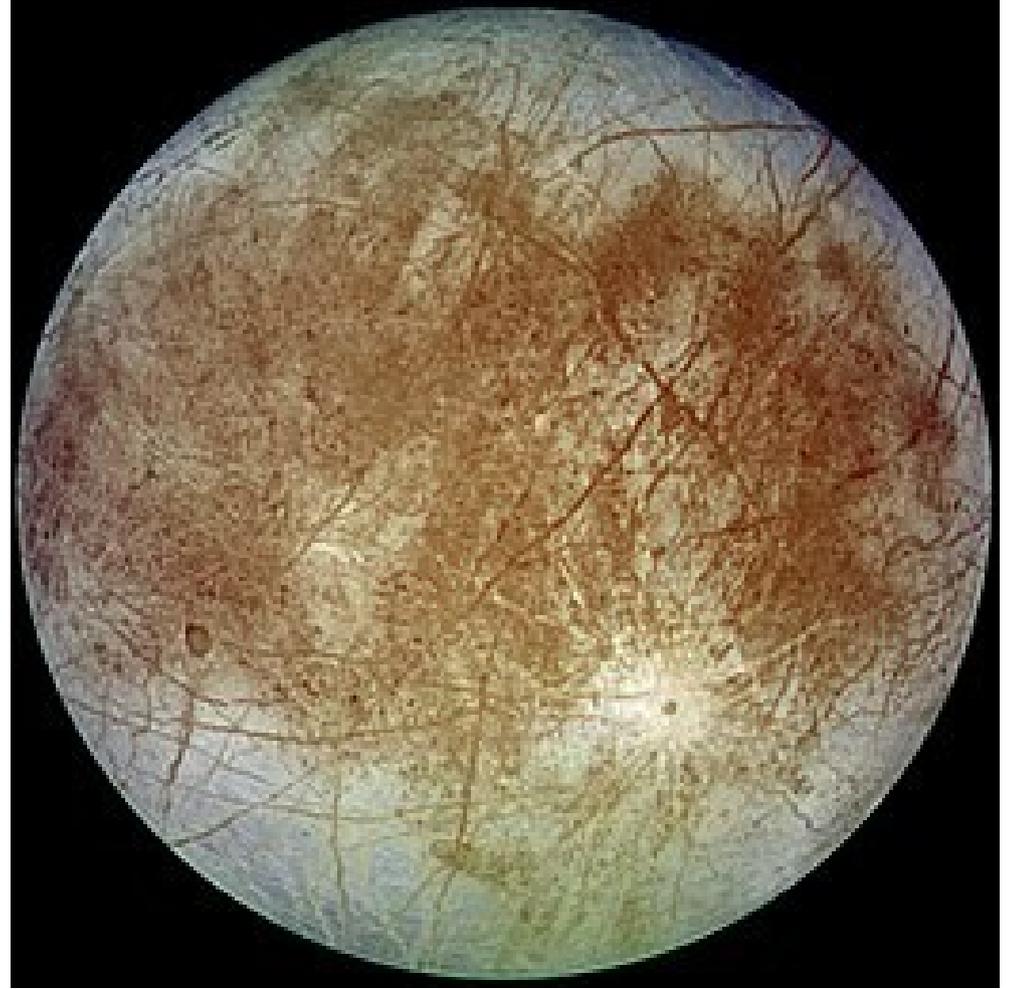
Krypton  
Période ~ 1,4 année  
à 64 UA de Rao  
**T<sub>surface</sub> ~ -100°C → -200°C**

## II. Sa puissance : retour sur Krypton

---



**Encelade (Saturne)**  
**-190°C**  
**+ Atmosphère**



**Europe (Jupiter)**  
**-150°C**  
**+ Atmosphère**



## II. Sa puissance : retour sur Krypton

---

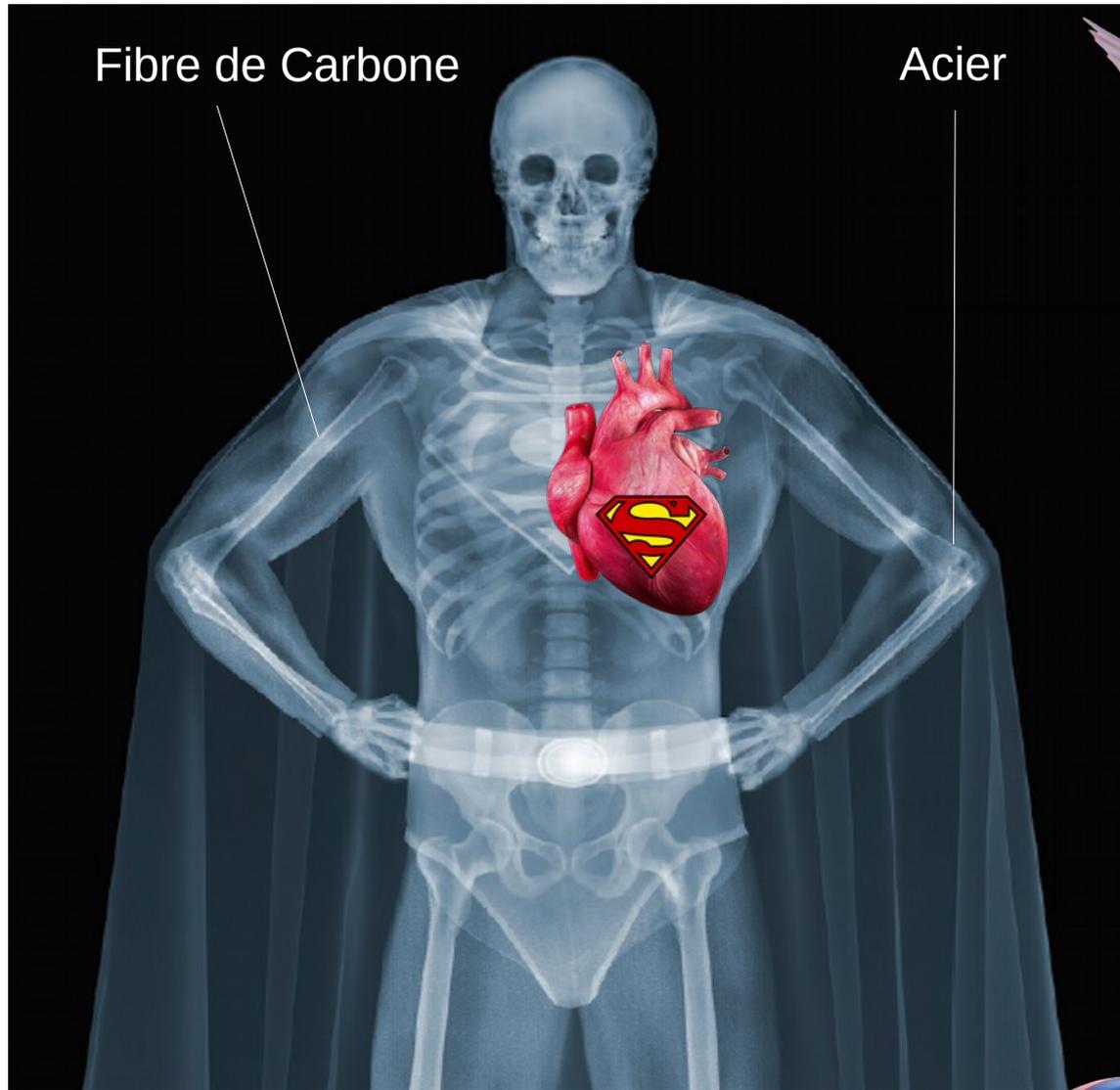
Pour voler à environ 900 km/h, Puissance =  $F.v \sim 2 \times 10^6 \text{ W}$  ou Joules/s...

→ **Soleil  $\sim 1,5 \text{ kW/m}^2$  x Surface Superman  $\sim 3000 \text{ W}$ ...**



L'énigme reste entière...

## II. Sa puissance : un homme « solaire »



Physique pour Tous !

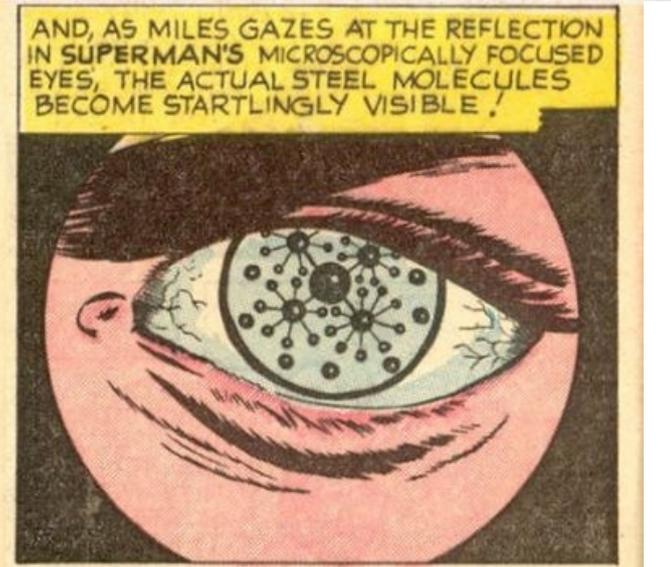
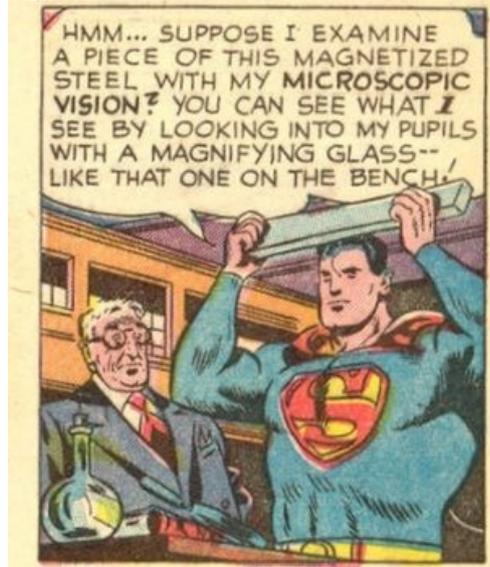
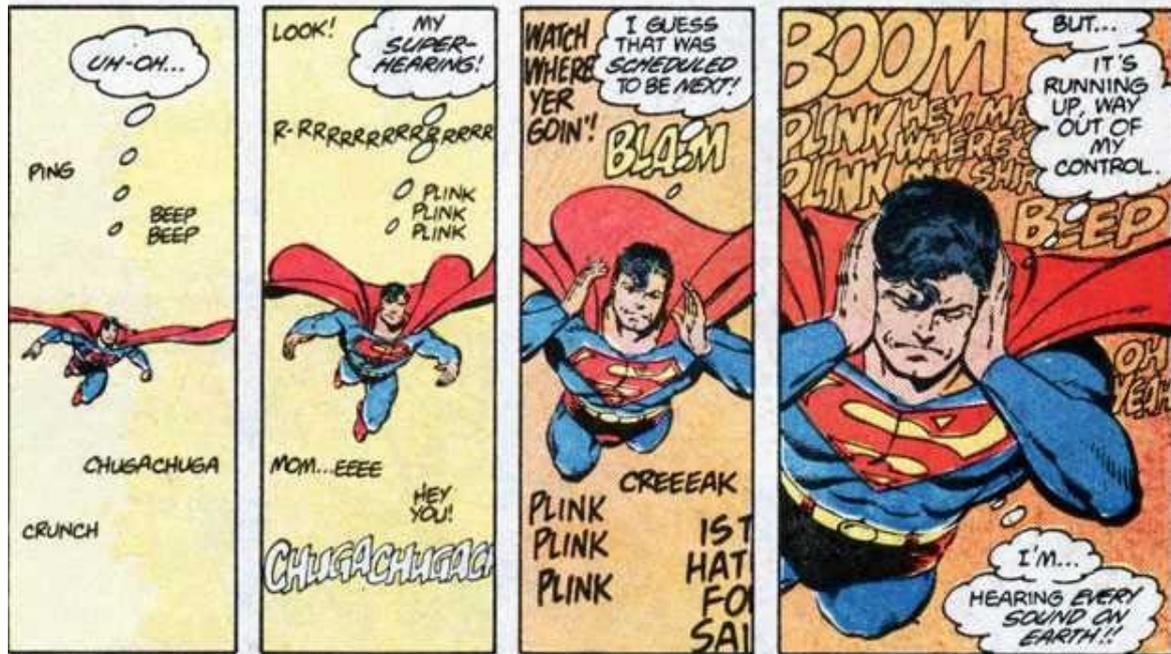
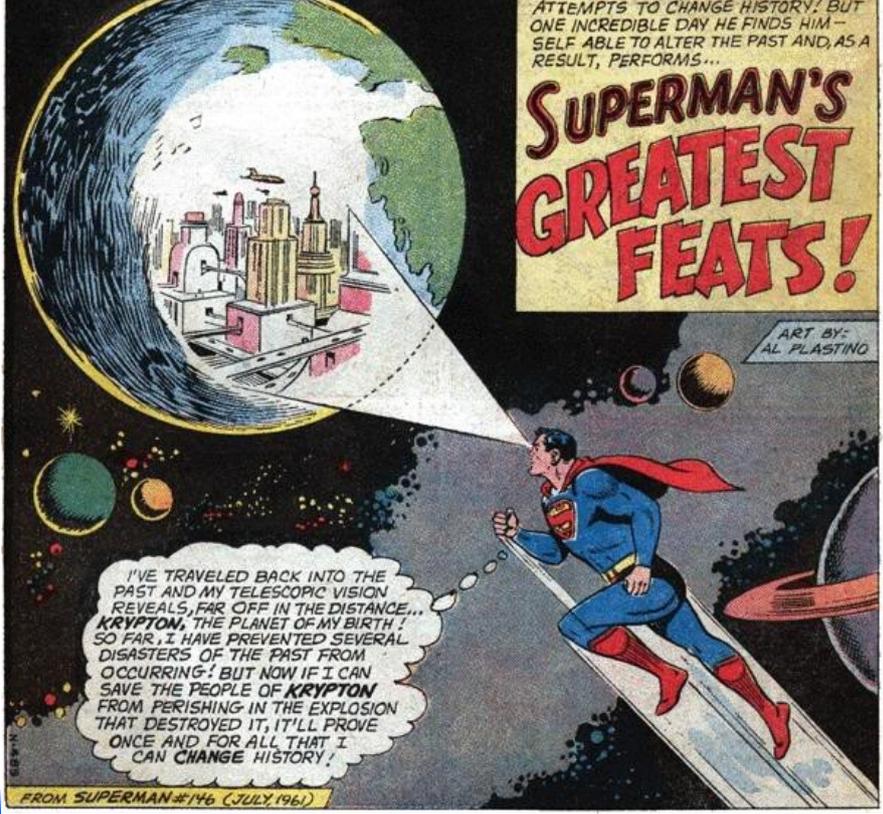
## 3- Les pouvoirs de Superman

Anatomie d'un Super-Héros ordinaire...



- 1 – Les origines : la planète Krypton
- 2 – La force de Superman, sa course, son vol
- 3 – Les super-sens décortiqués

# III. Les super-sens



# III. Les super-sens : le super-souffle



Brusque expansion d'un gaz  
→ refroidissement



# III. Les super-sens : le super-souffle



Brusque expansion d'un gaz  
→ refroidissement



# III. Les super-sens : le super-souffle



**Effet Joule-Thompson**  
Brusque expansion d'un gaz  
→ refroidissement

→  $\Delta P \sim 10^6 \text{ Pa} !$

$$\frac{\Delta T}{\Delta P} \propto \frac{V}{c} (\alpha T - 1)$$



# III. Les super-sens : le super-souffle



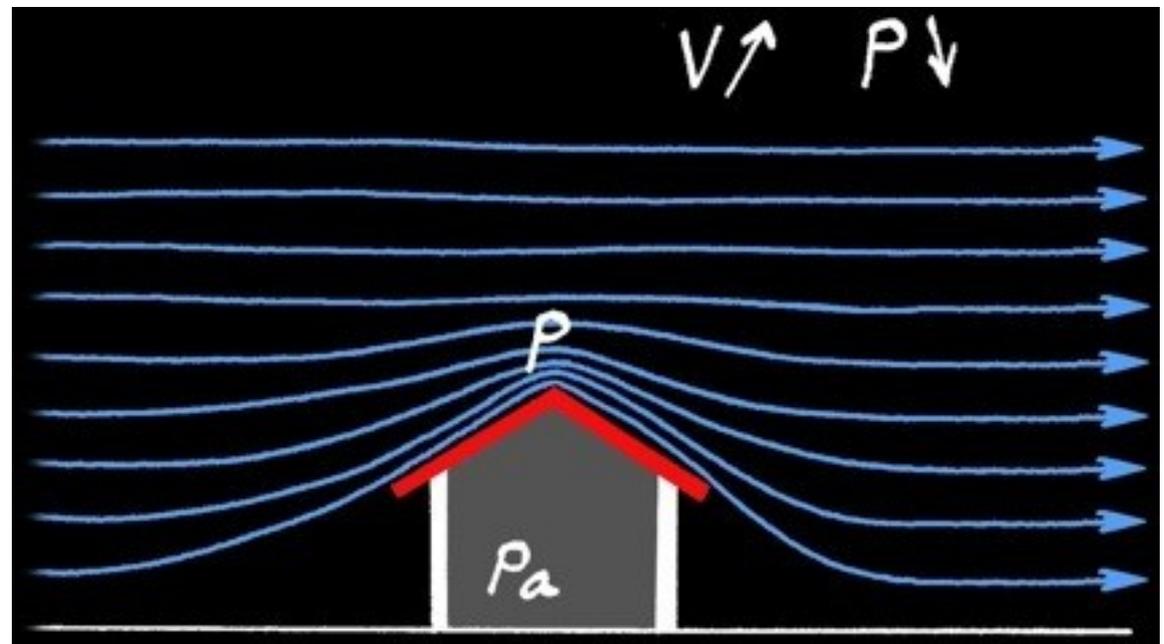
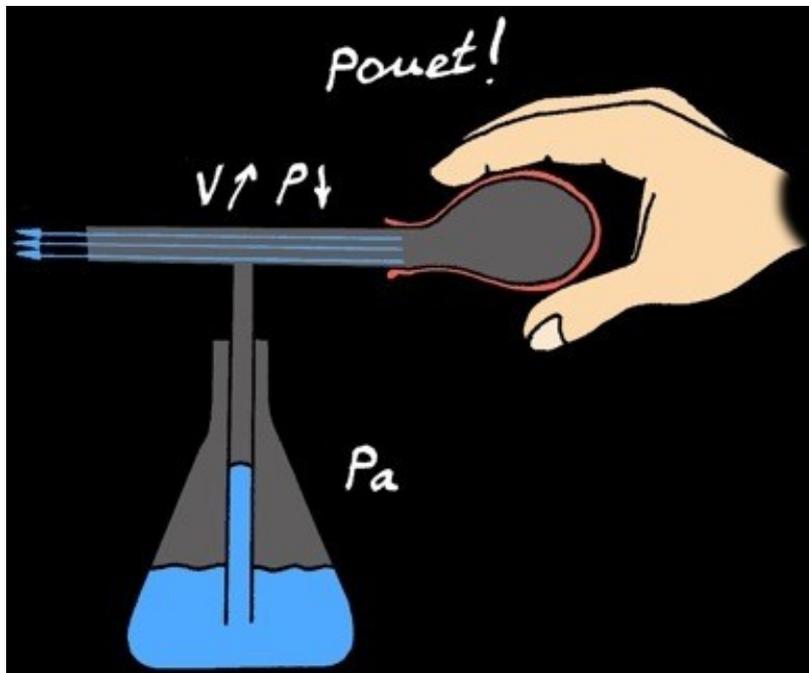
→  $\Delta P \sim 10^6 \text{ Pa}$  !

Dans un fluide  $\frac{1}{2}\rho v^2 + P = \text{constante}$

Bouche - Extérieur : différence  $\Delta P$

$v \sim 0$  en sortie

→  $\Delta P = \frac{1}{2}\rho v^2 \rightarrow v \sim 1500 \text{ m/s}$  !



# III. Les super-sens : le super-souffle



→  $\Delta P \sim 10^6 \text{ Pa}$  !

Dans un fluide  $\frac{1}{2}\rho v^2 + P = \text{constante}$

Bouche - Extérieur :  $\Delta P$

$v \sim 0$  en sortie

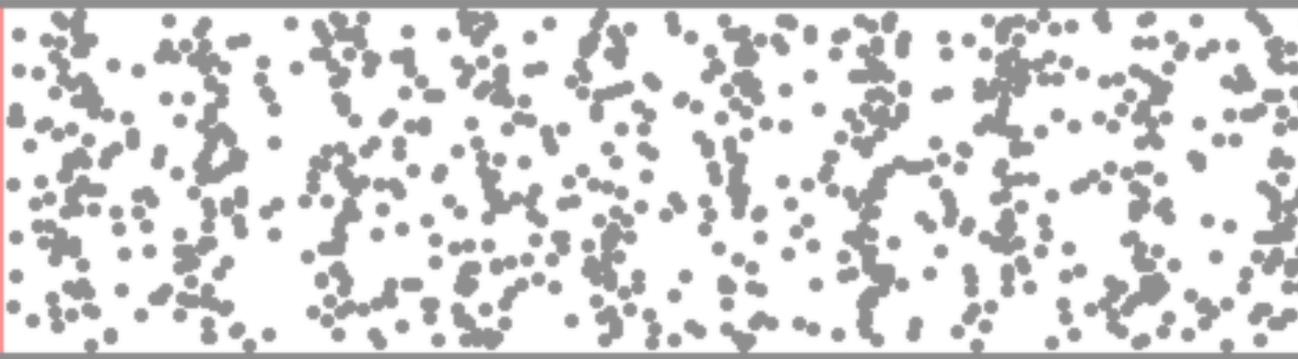
→  $\Delta P = \frac{1}{2}\rho v^2 \rightarrow v \sim 1500 \text{ m/s}$  !



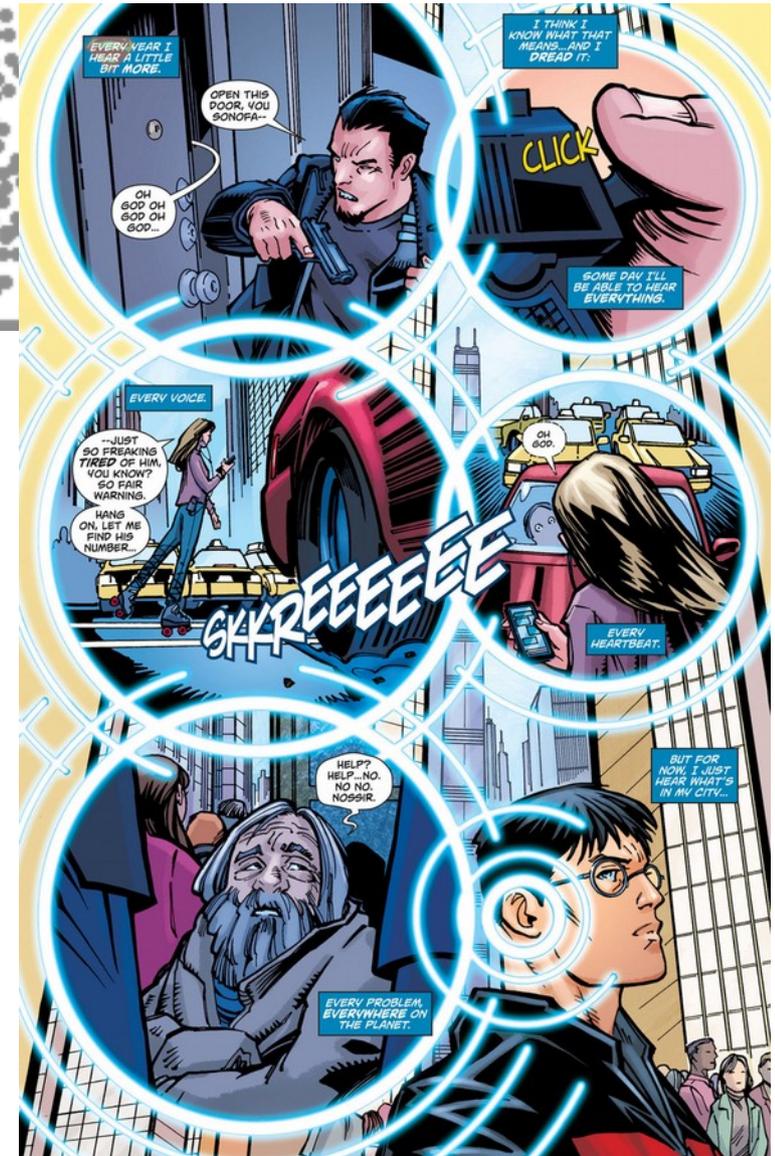
**30x la vitesse  
d'une flèche  
de sarbacane**



# III. Les super-sens : la super-ouïe

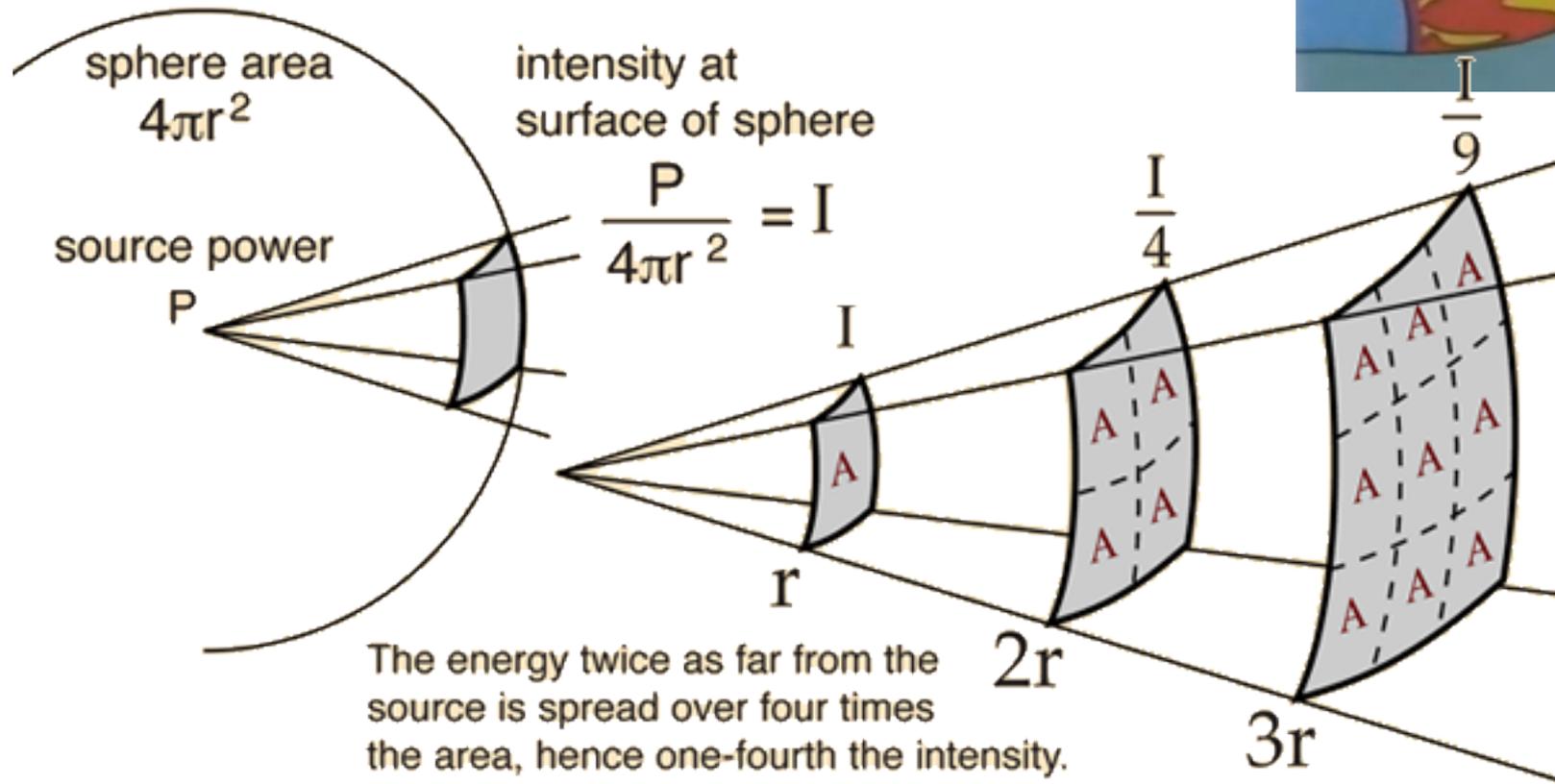


Le Son = une onde mécanique qui se propage...  
Superman : un coeur qui bat à plusieurs km ?  
un coup de feu dans Metropolis ?



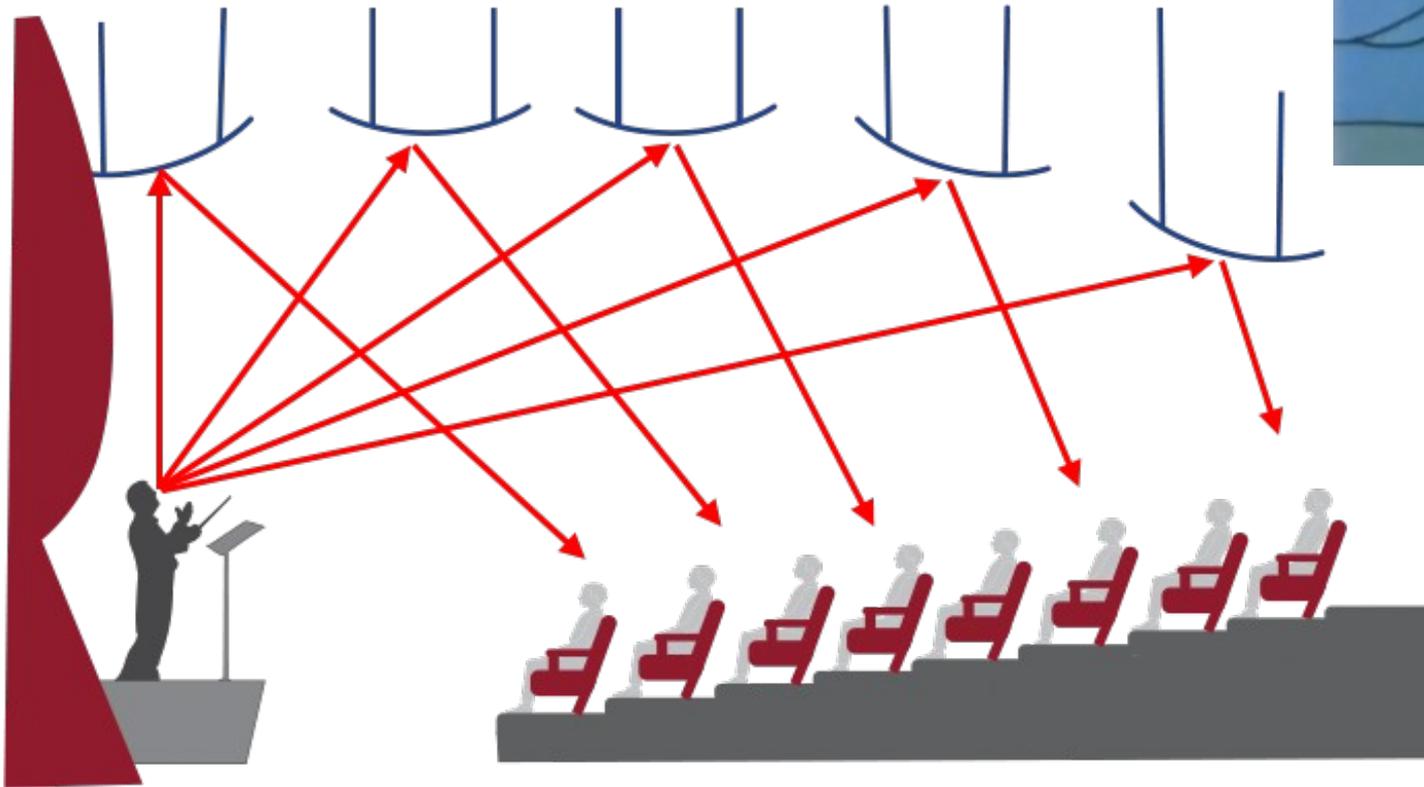
# III. Les super-sens : la super-ouïe

Les sons subissent des :  
- Atténuations/Absorptions



# III. Les super-sens : la super-ouïe

- Les sons subissent des :
- Atténuations/Absorptions
  - **Réflexions**



# III. Les super-sens : la super-ouïe

- Les sons subissent des :
- Atténuations/Absorptions
  - Réflexions
  - **Réfractions**



Milieu  
« rapide »



Milieu  
«lent»

Des vitesses de propagation différentes



# III. Les super-sens : la super-ouïe

Les sons subissent des :

- Atténuations/Absorptions
- Réflexions
- Réfractions
- **Diffractions**



**Flûte**  
**Petite longueur d'onde**

$\lambda \rightarrow$  ||



**Percussion**  
**Grande longueur d'onde**

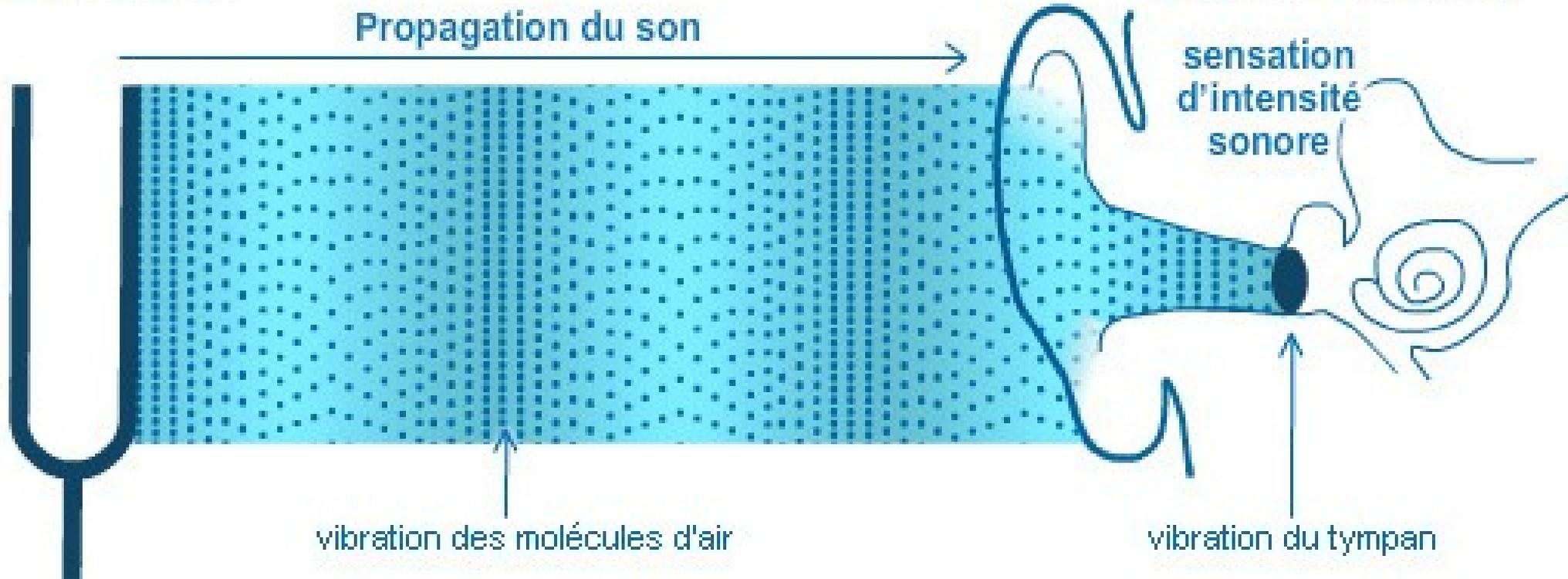
$\leftarrow \lambda \rightarrow$



# III. Les super-sens : la super-ouïe

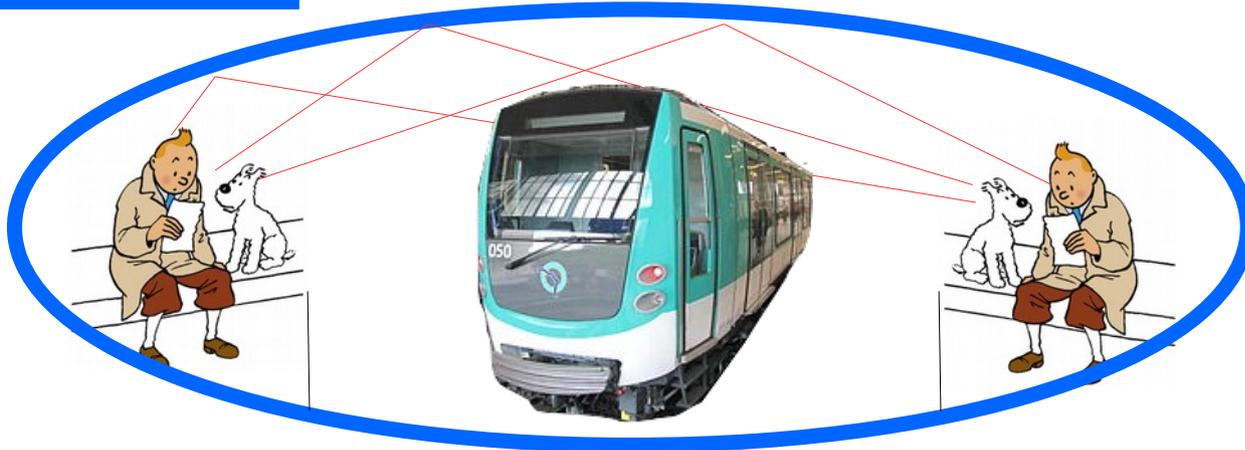
Source sonore :  
**Diapason**

Récepteur :  
**oreille + tympan**



# III. Les super-sens : la super-ouïe

« Focaliser » un son

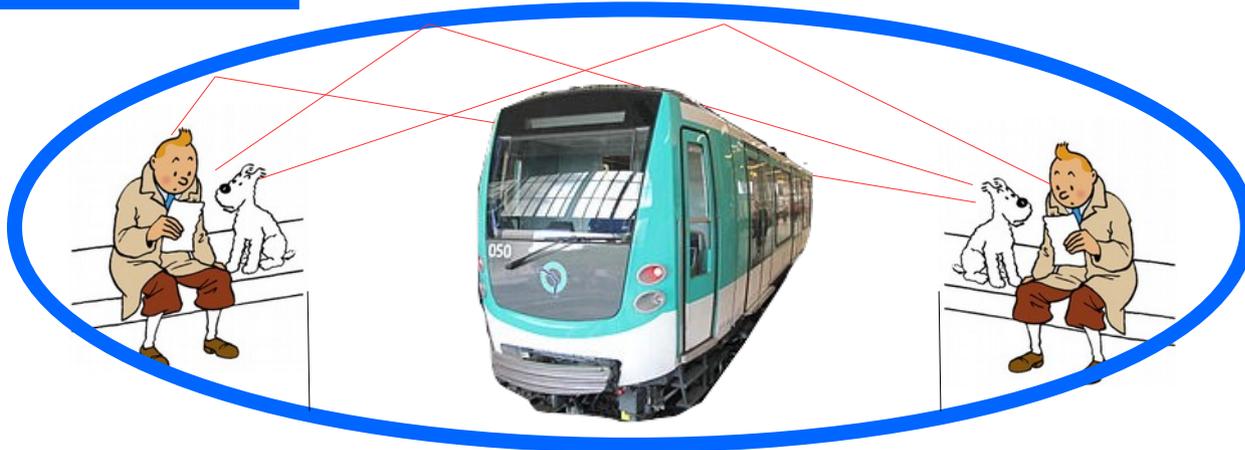


Amplifier les sons...



# III. Les super-sens : la super-ouïe

« Focaliser » un son



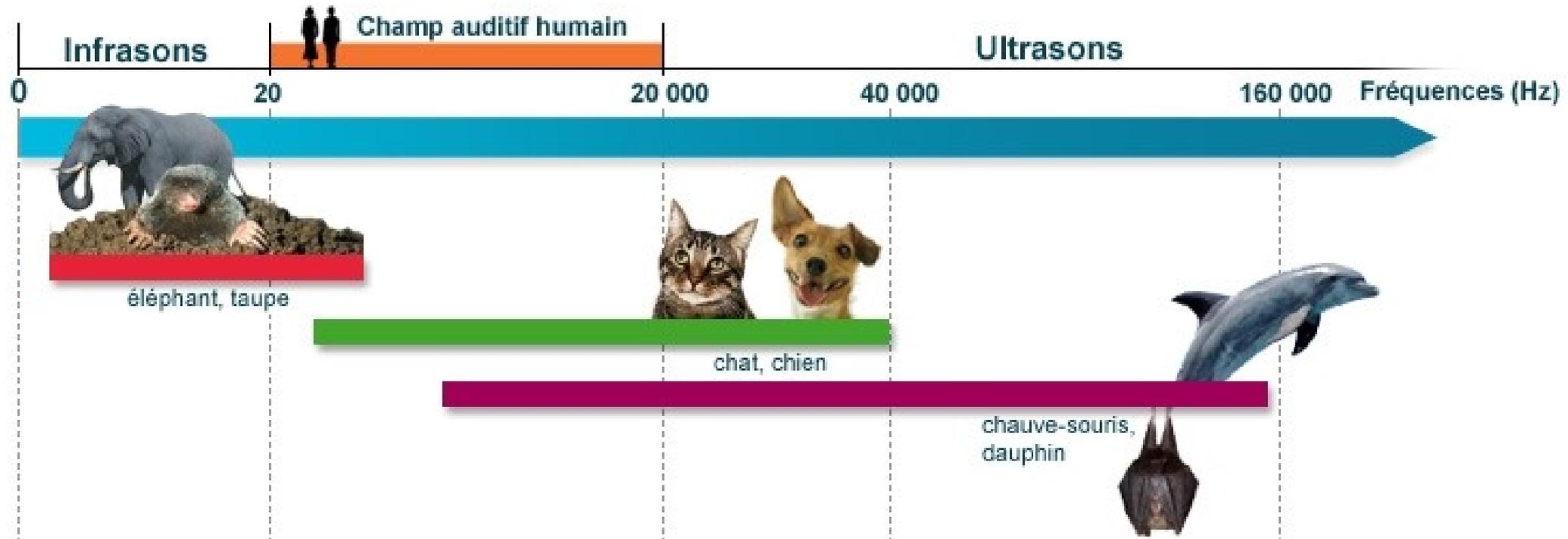
Amplifier les sons...



Super-Oreille !



# III. Les super-sens : la super-ouïe



Des performances auditives différentes d'une espèce à l'autre

### III. Les super-sens : la super-ouïe



Loup → 40 kHz  
environ 10 km !



Éléphant → infrasons  
plusieurs km !

# III. Les super-sens : la super-ouïe



Effet Doppler !



La fréquence diminue  
(vers le rouge)



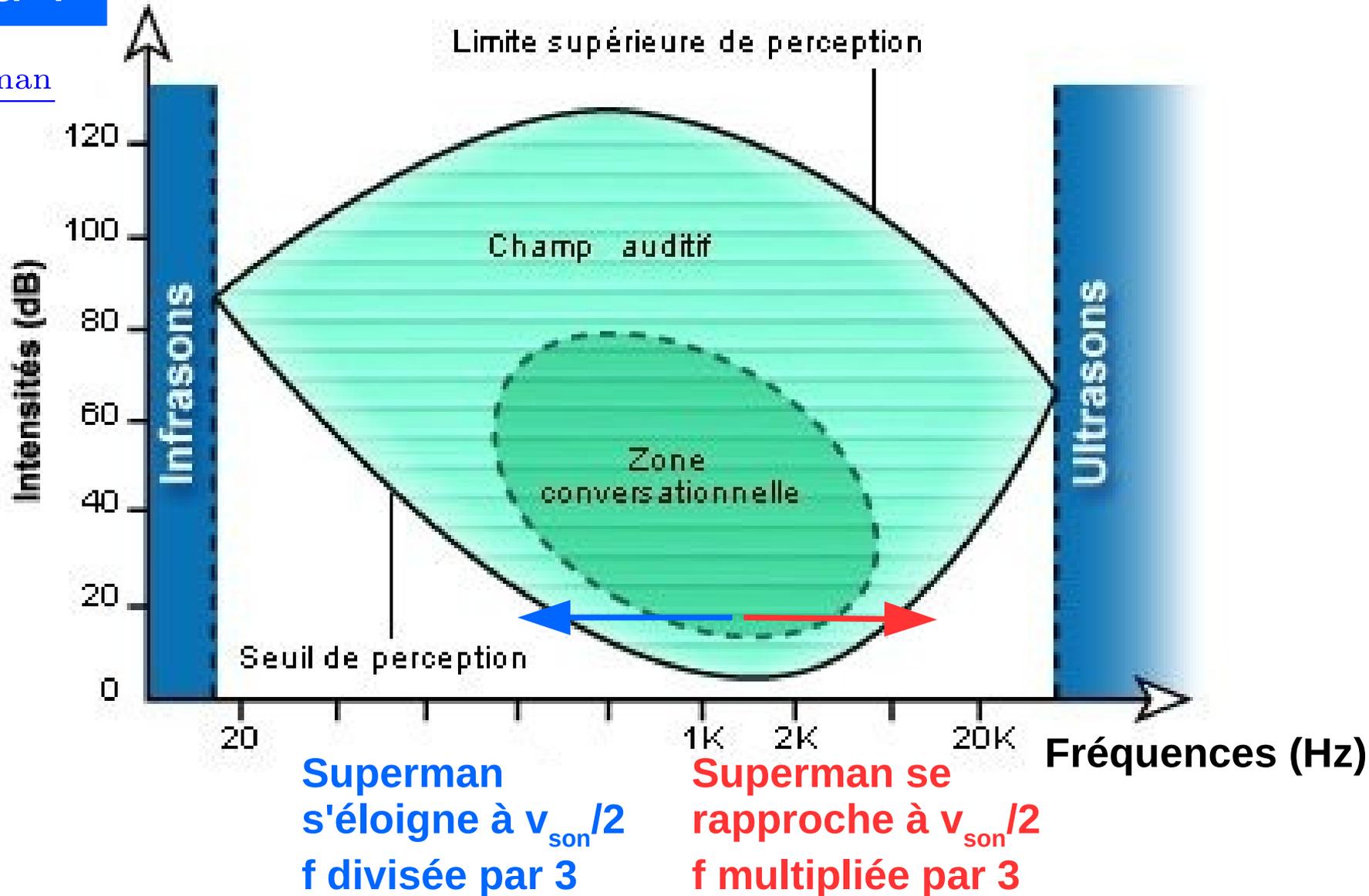
La fréquence augmente  
(vers le bleu)



# III. Les super-sens : la super-ouïe

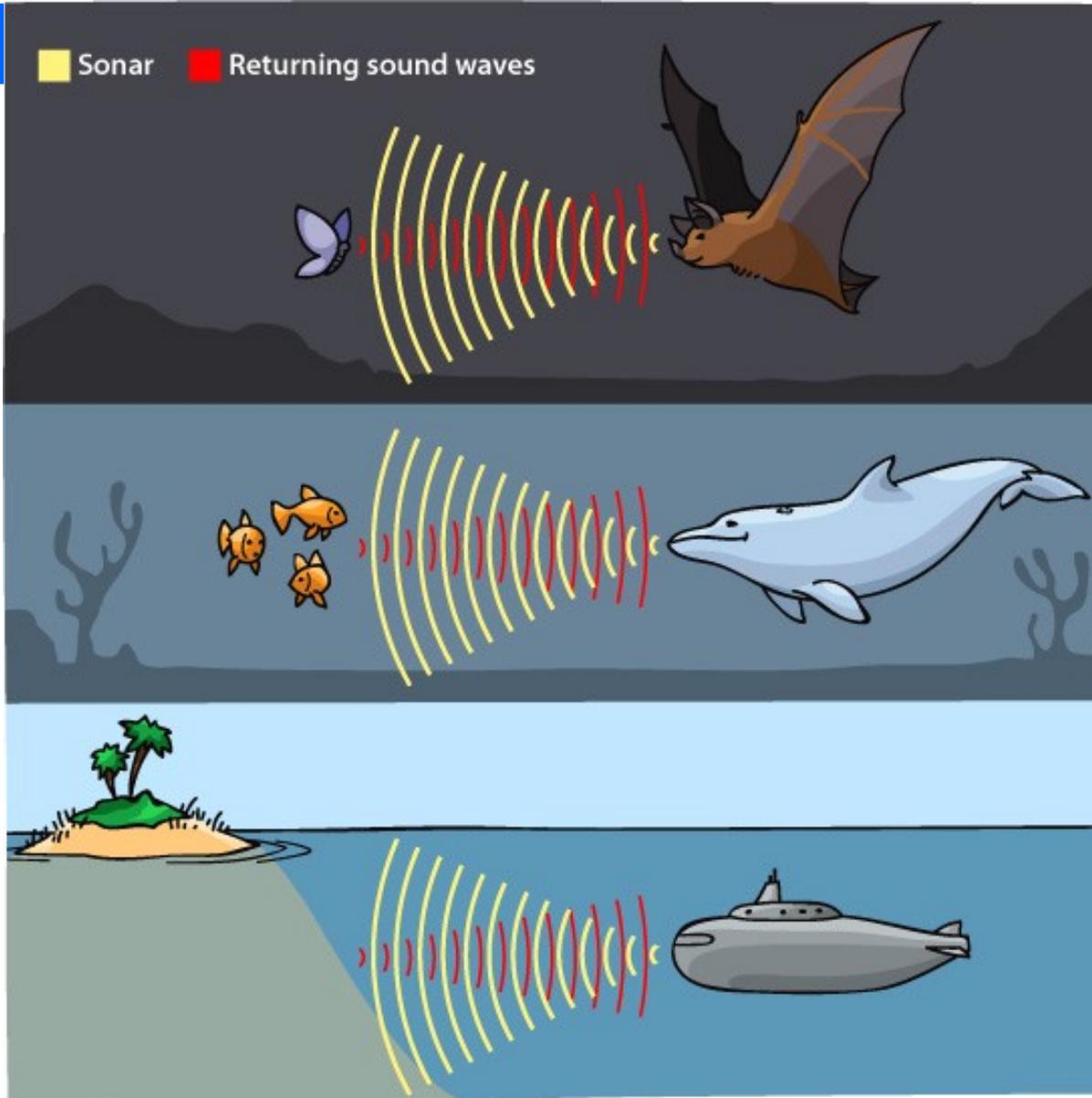
Effet Doppler !

$$\frac{\Delta f}{f} = \frac{v_{\text{Superman}}}{v_{\text{son}}}$$

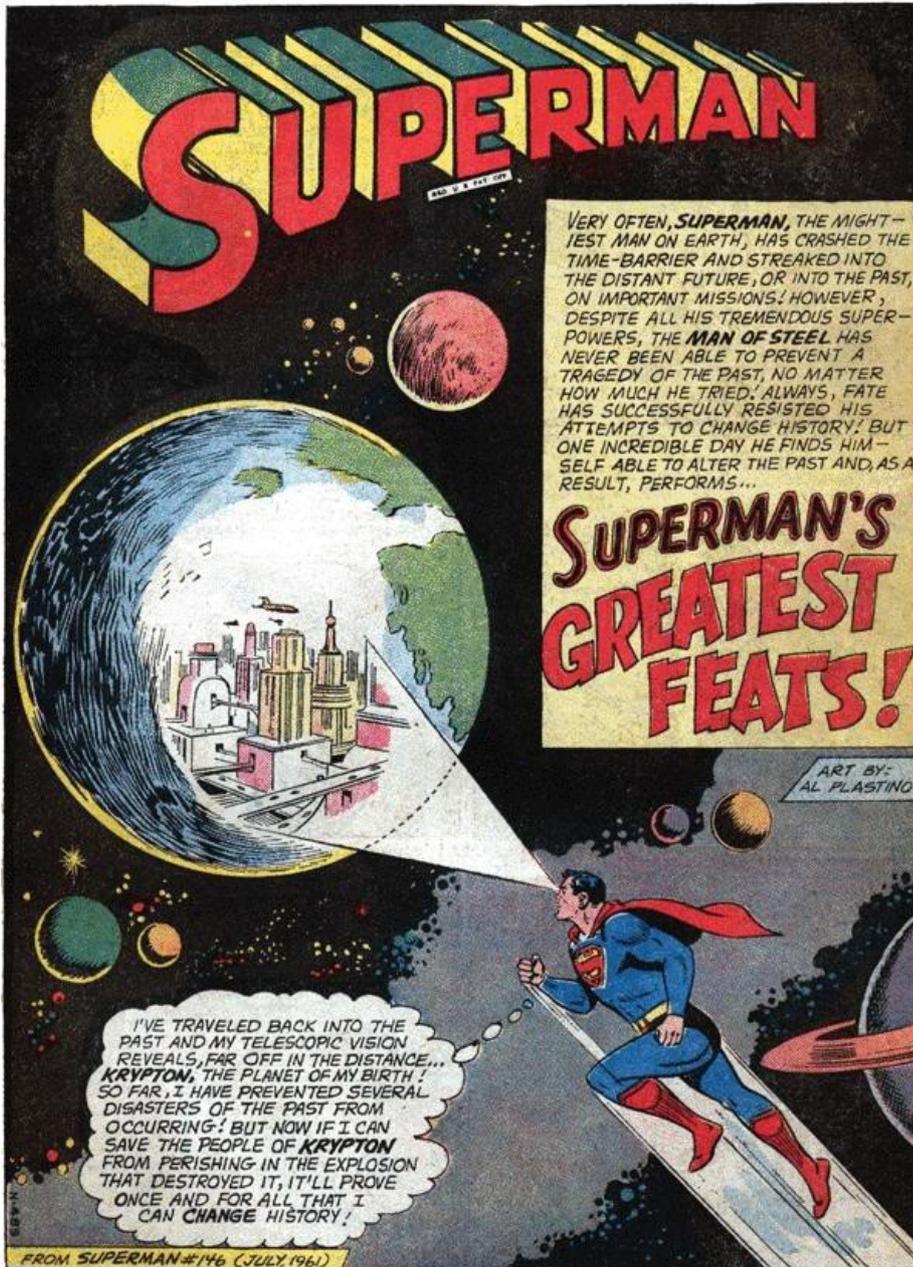


# III. Les super-sens : la super-ouïe

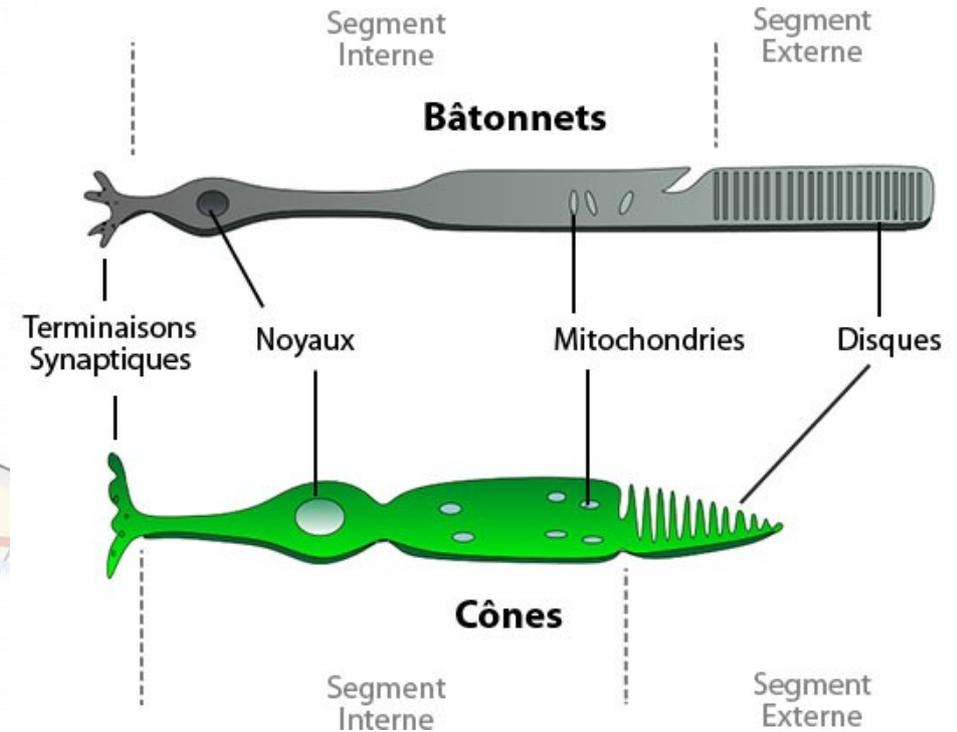
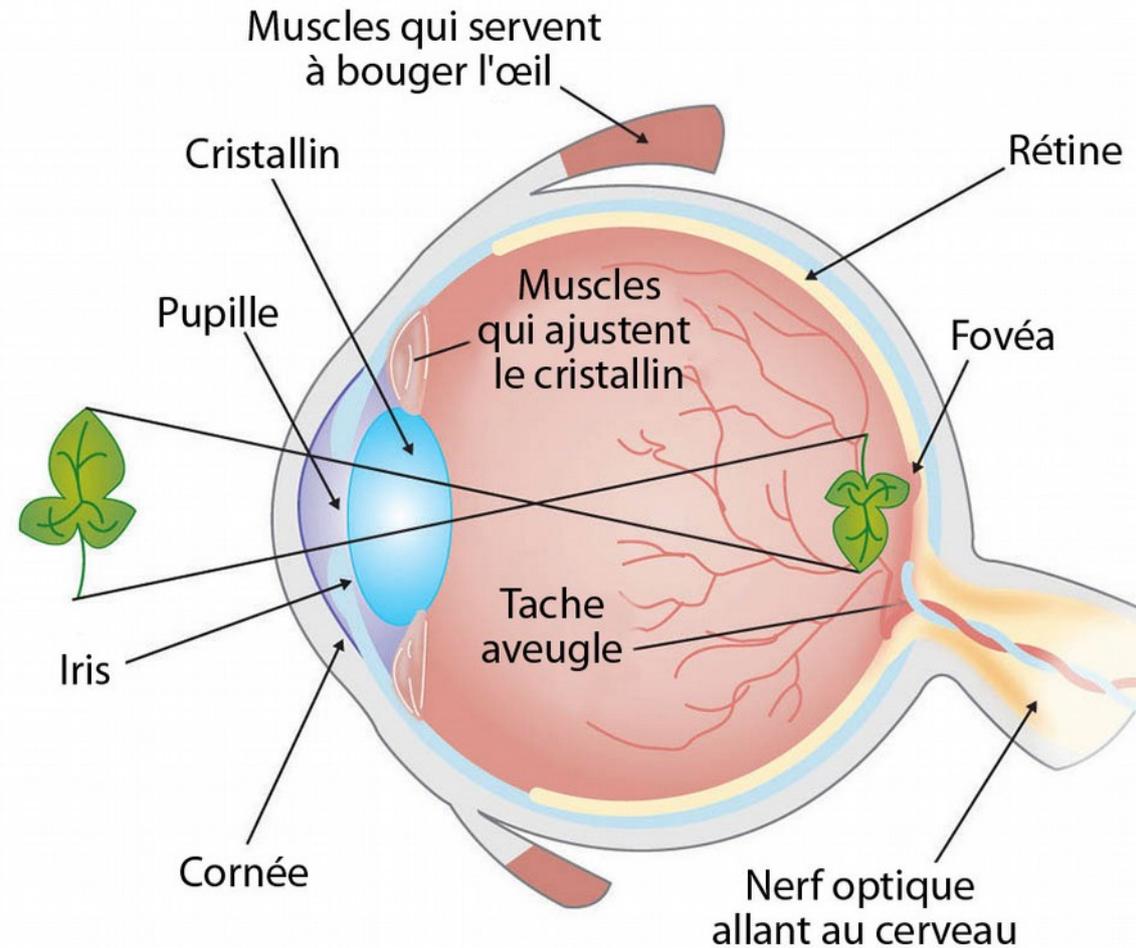
## Echo-location



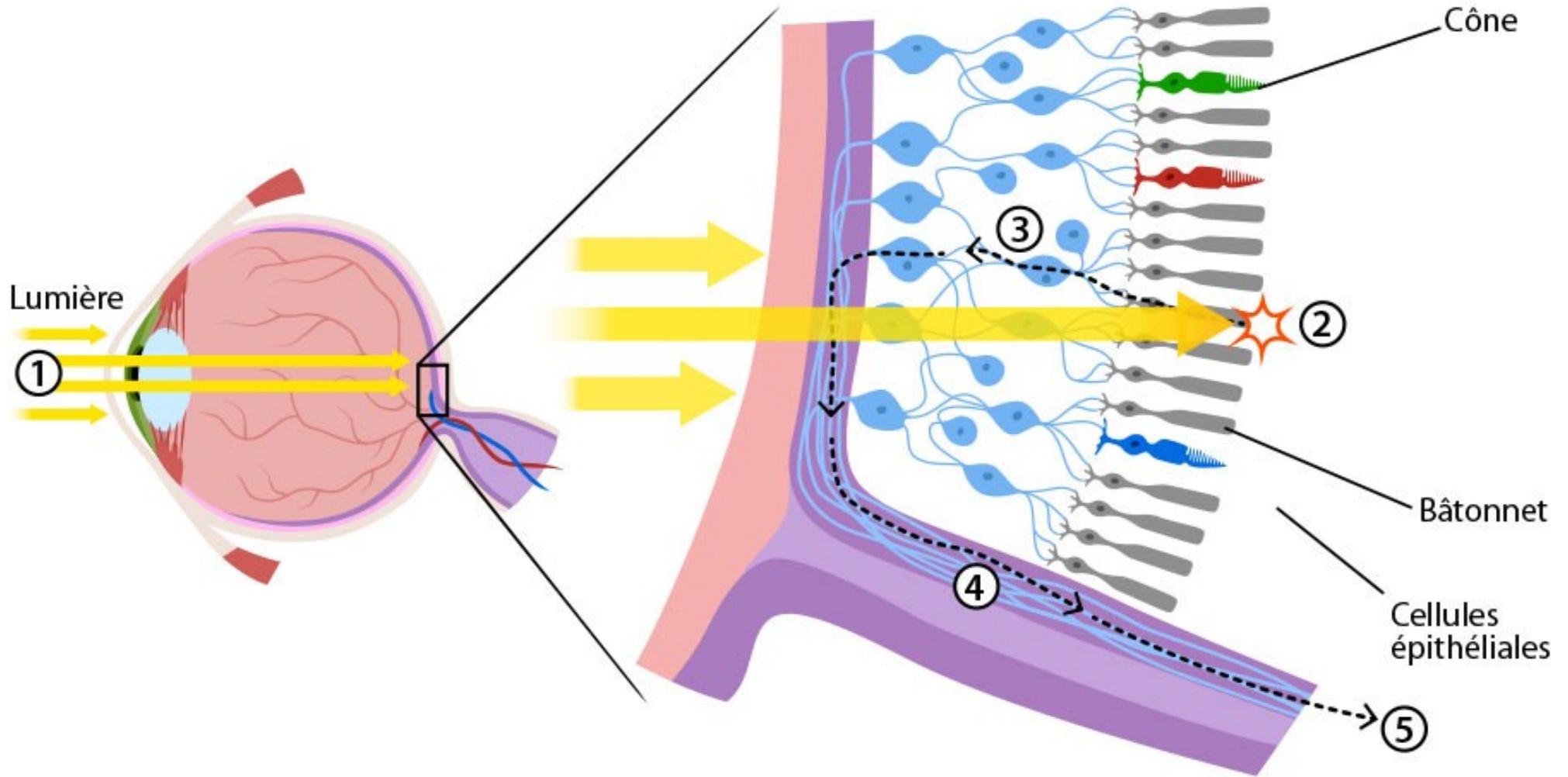
# III. Les super-sens : la super-vision



# III. Les super-sens : la vision



# III. Les super-sens : la vision

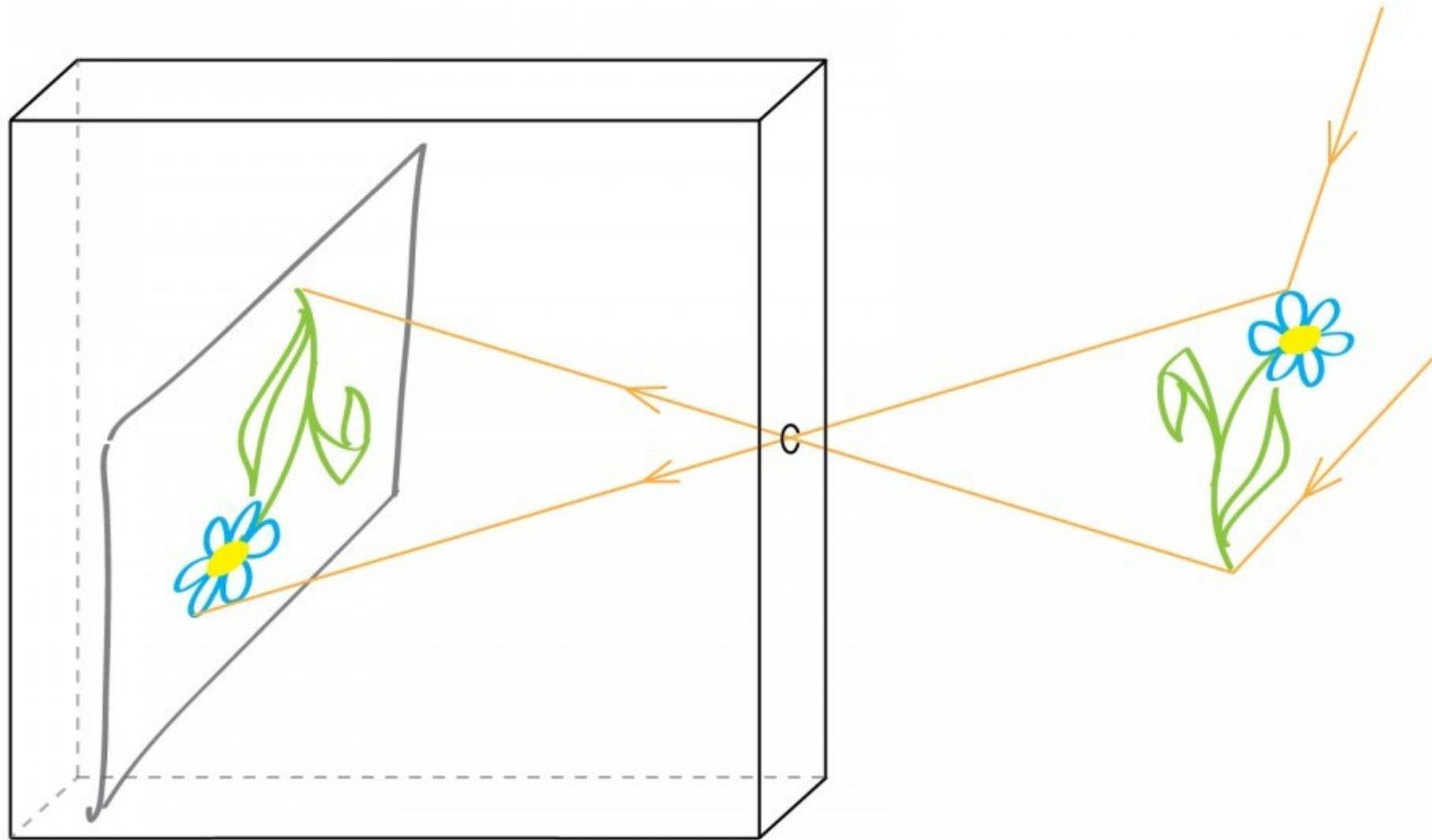


Cônes = éclaircissement fort, couleurs  
Bâtonnets = sensibles, pas de couleur



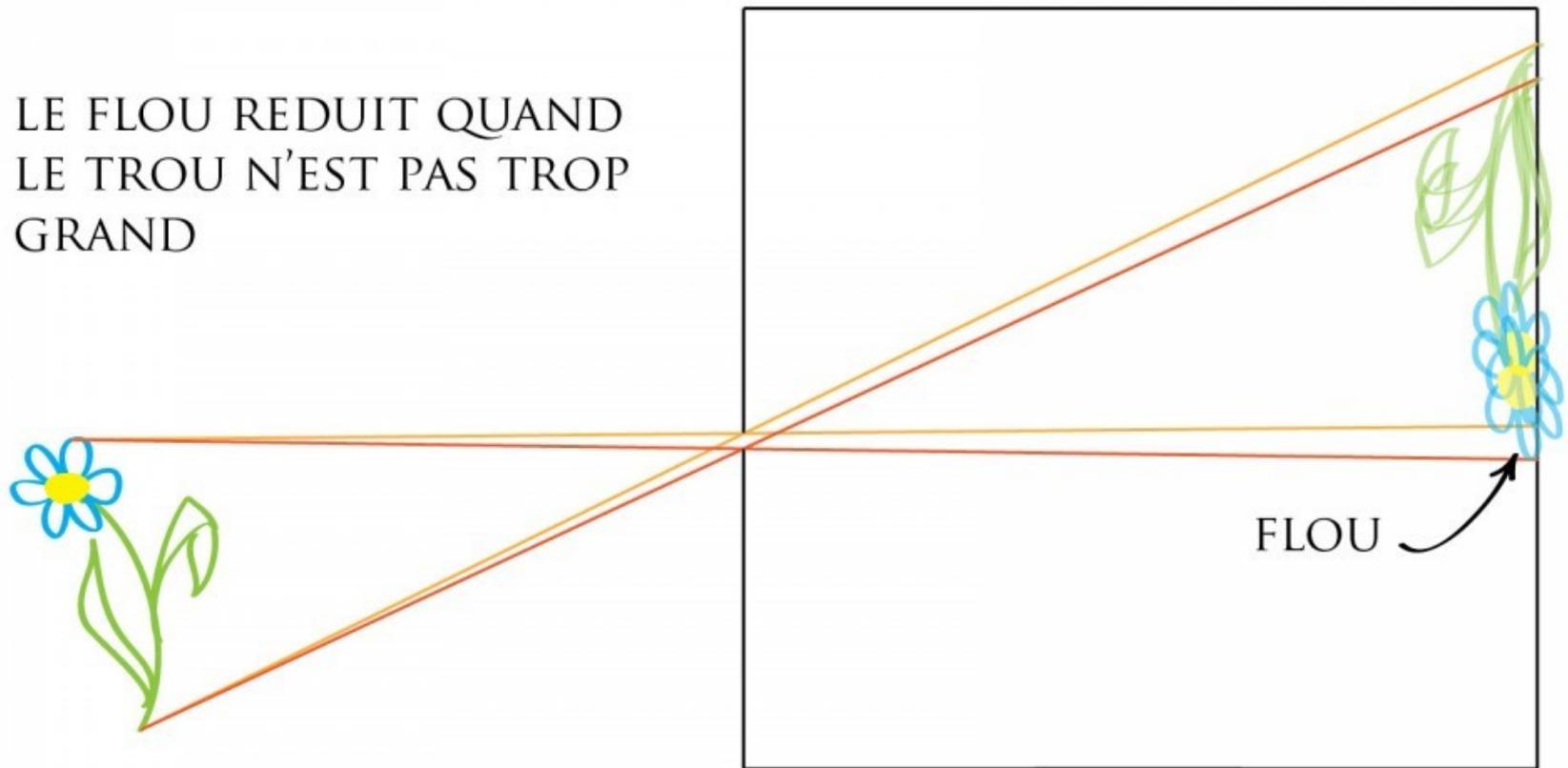
# III. Les super-sens : la vision

IMAGE INVERSEE



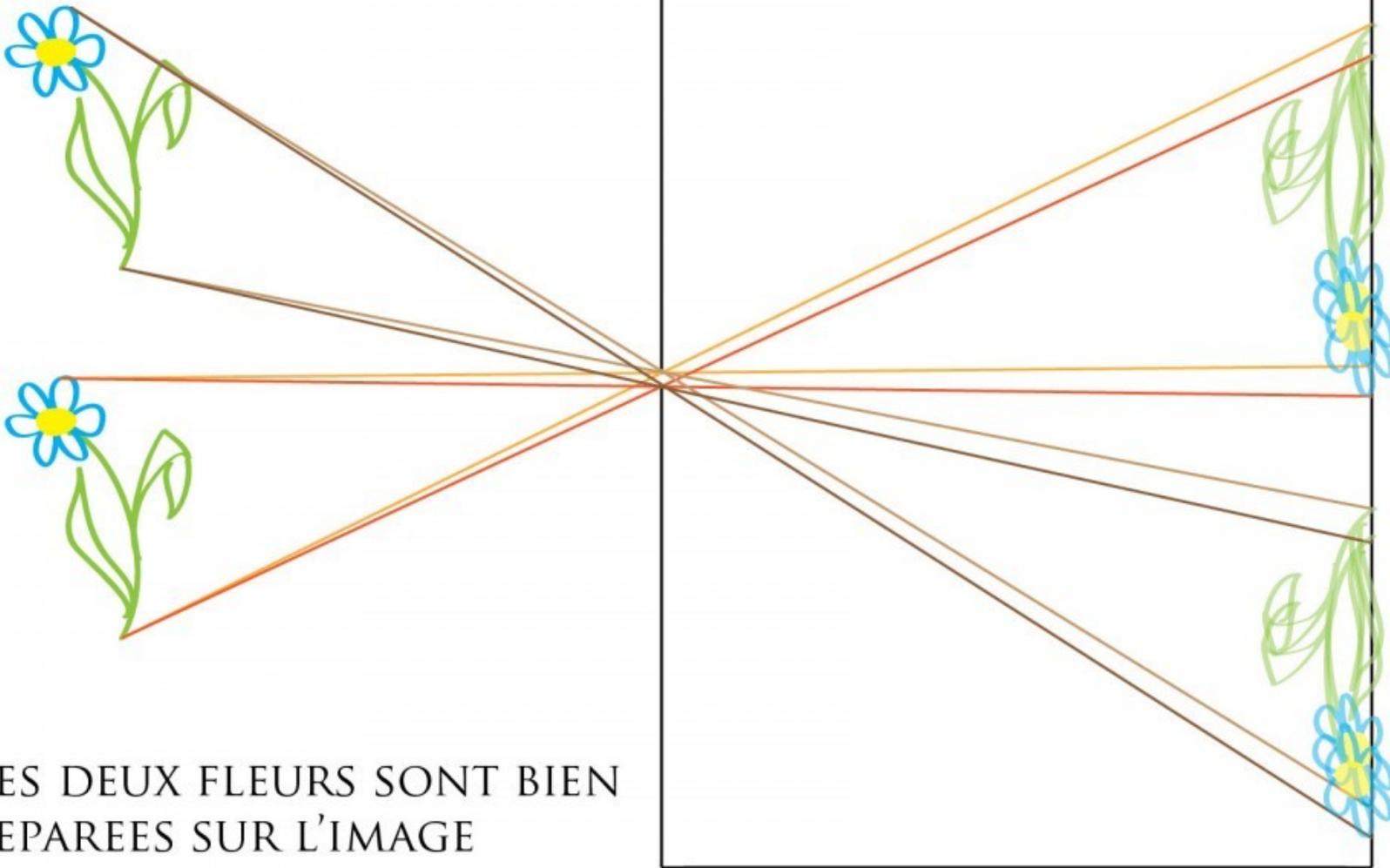
# III. Les super-sens : la vision

LA TAILLE DU TROU EST RESPONSABLE DU FLOU



# III. Les super-sens : la vision

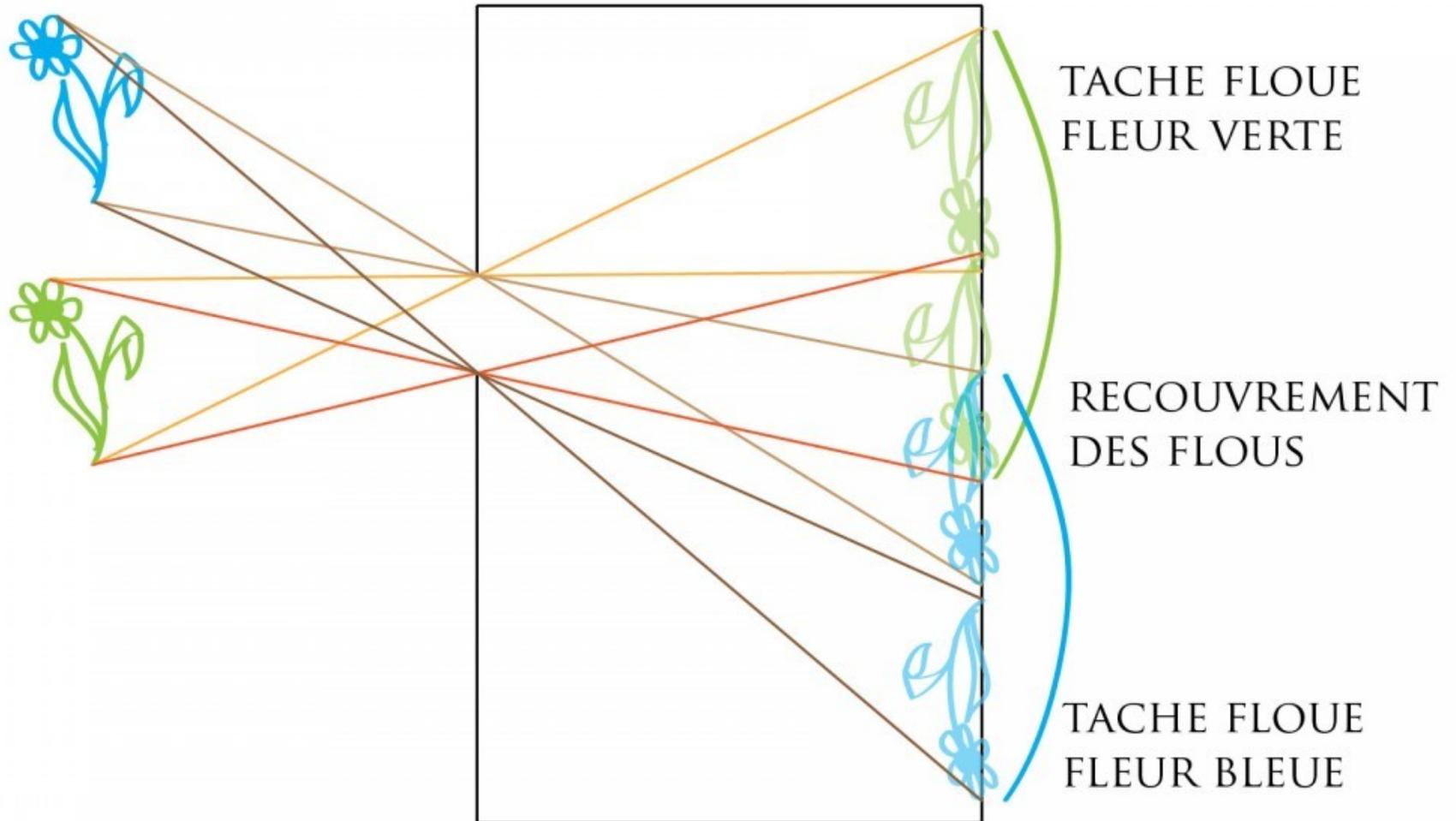
TROU PETIT = FLOU REDUIT = IMAGE DISCERNABLE



LES DEUX FLEURS SONT BIEN SEPARÉES SUR L'IMAGE

# III. Les super-sens : la vision

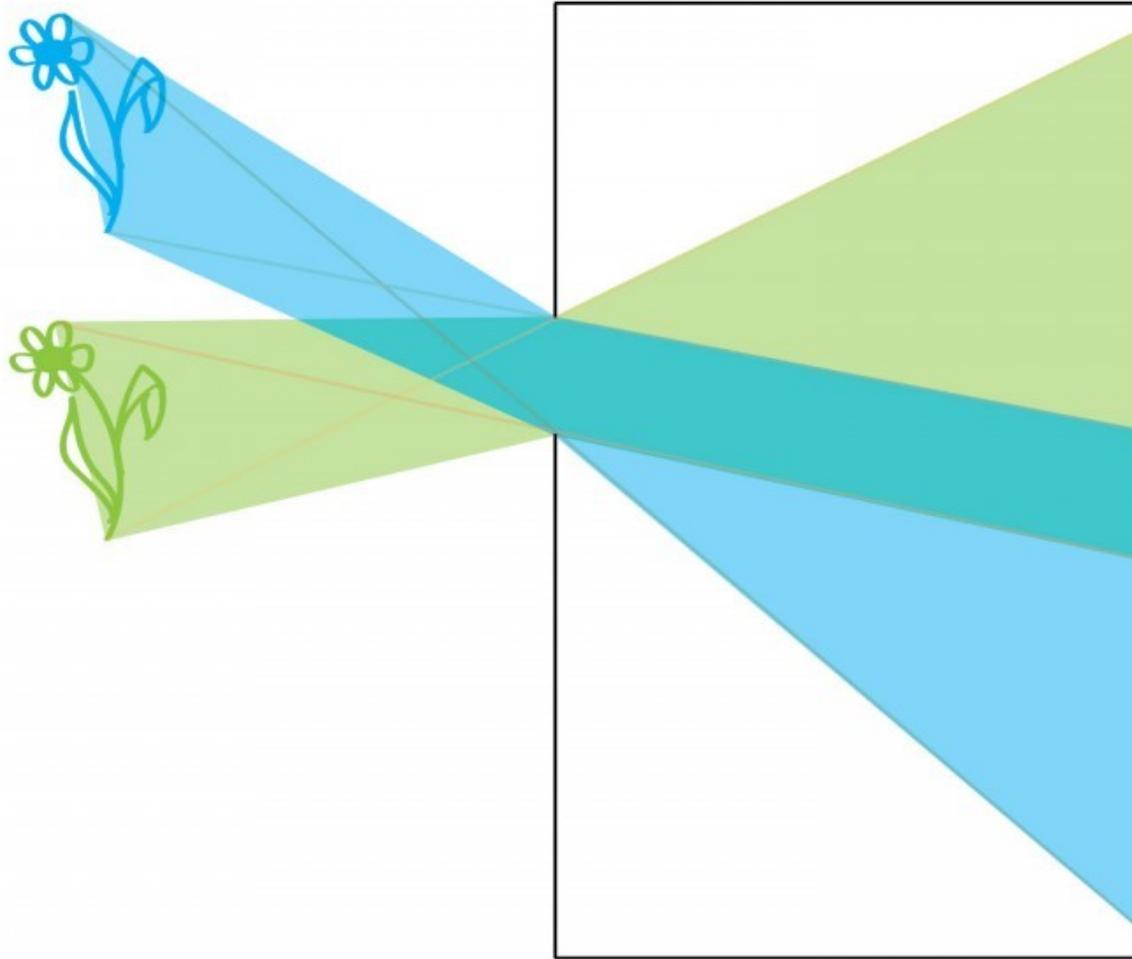
GRAND TROU = TROP DE FLOU = IMAGE NON DEFINIE



# III. Les super-sens : la vision

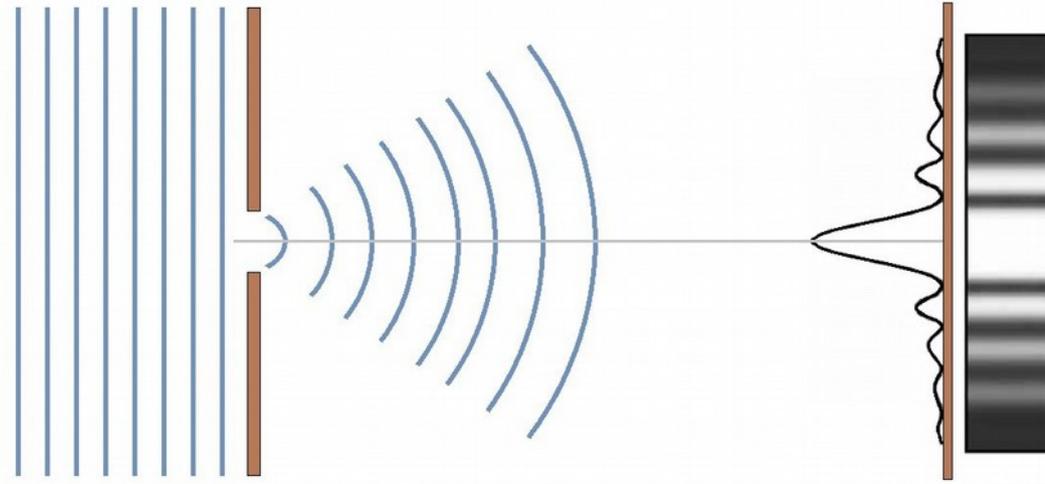
---

GRAND TROU = TROP DE FLOU = IMAGE NON DEFINIE

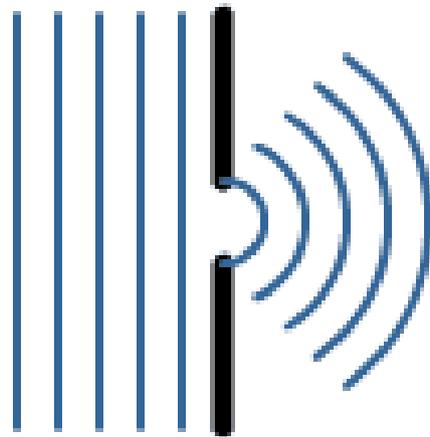


# III. Les super-sens : la vision

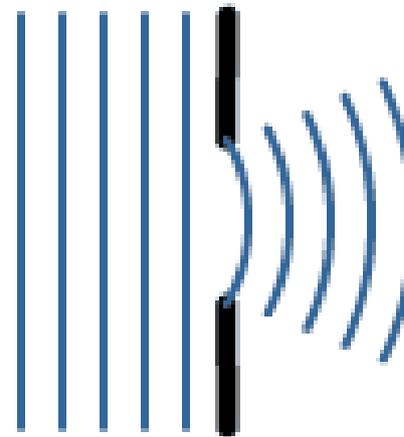
Trou trop petit → Diffraction



Small Gap

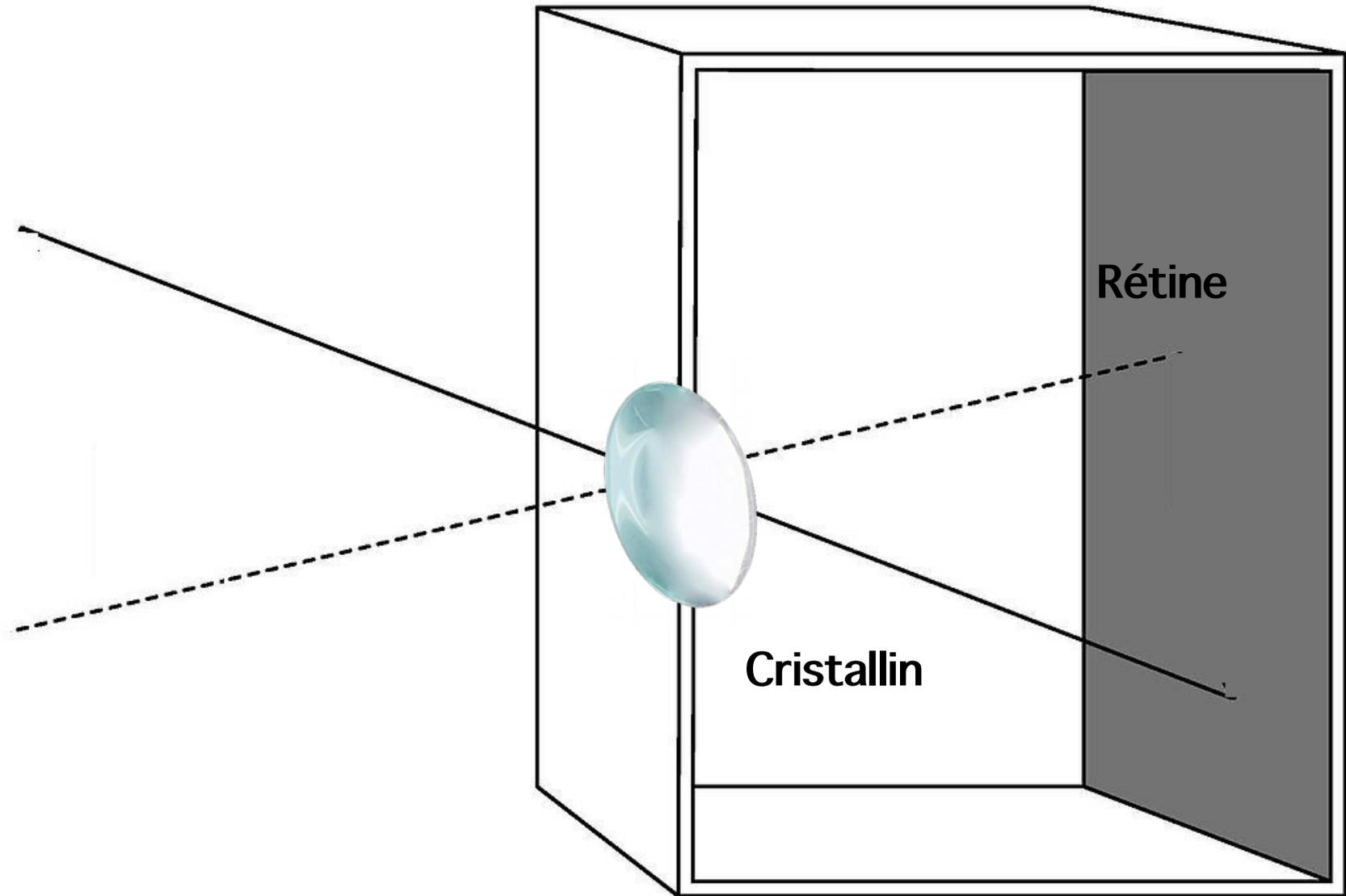


Large Gap

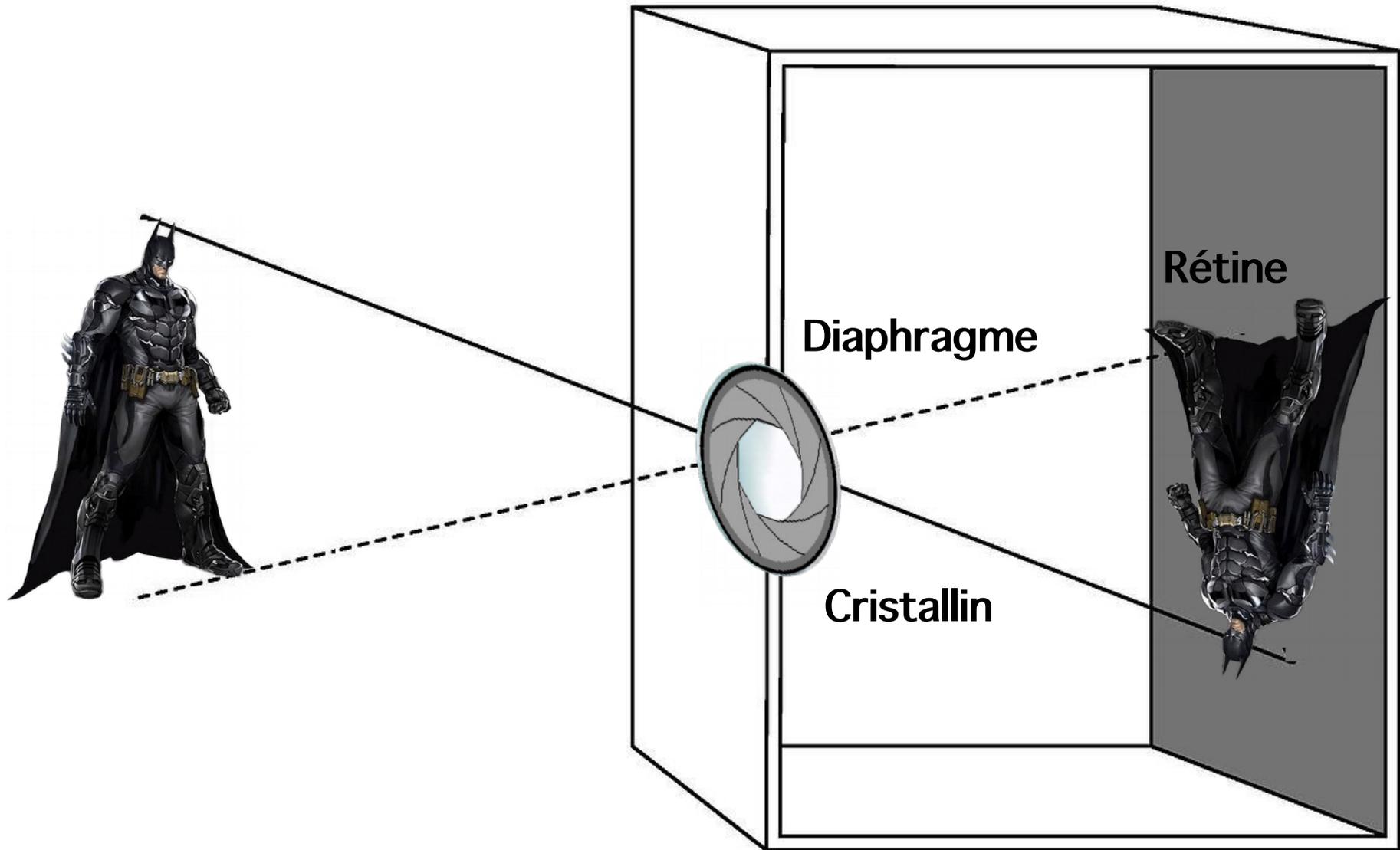


# III. Les super-sens : la vision

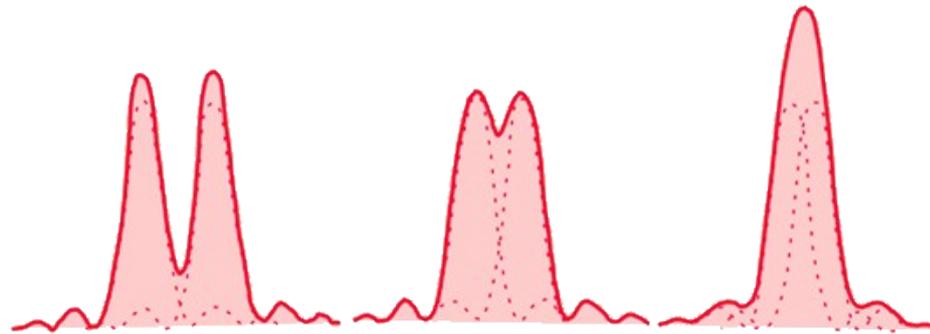
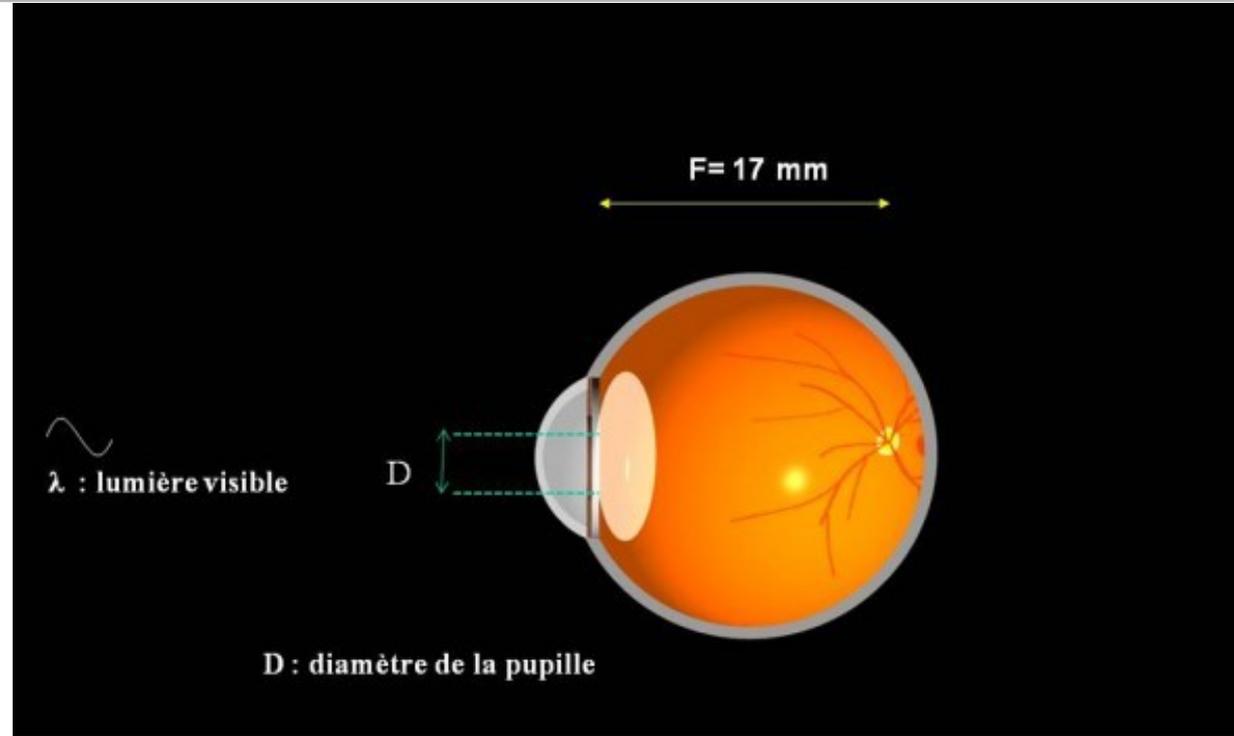
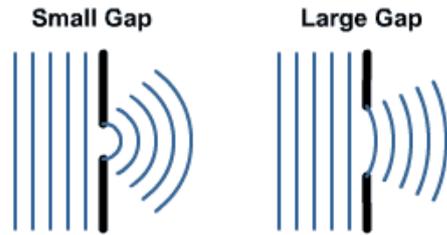
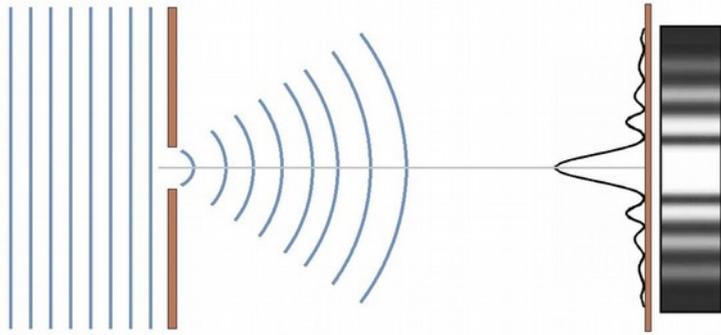
---



# III. Les super-sens : la vision

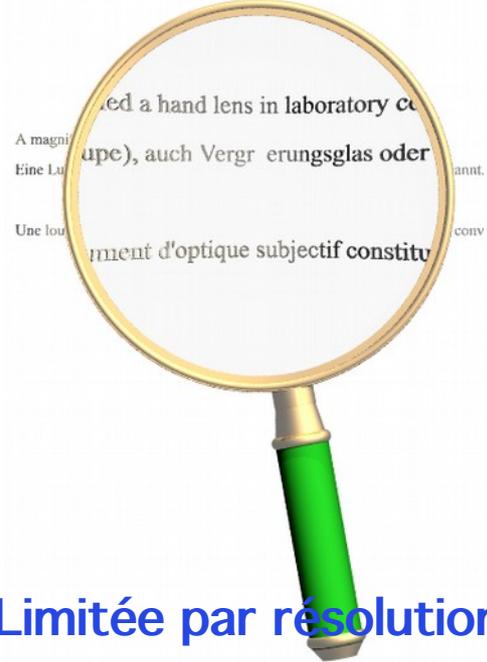
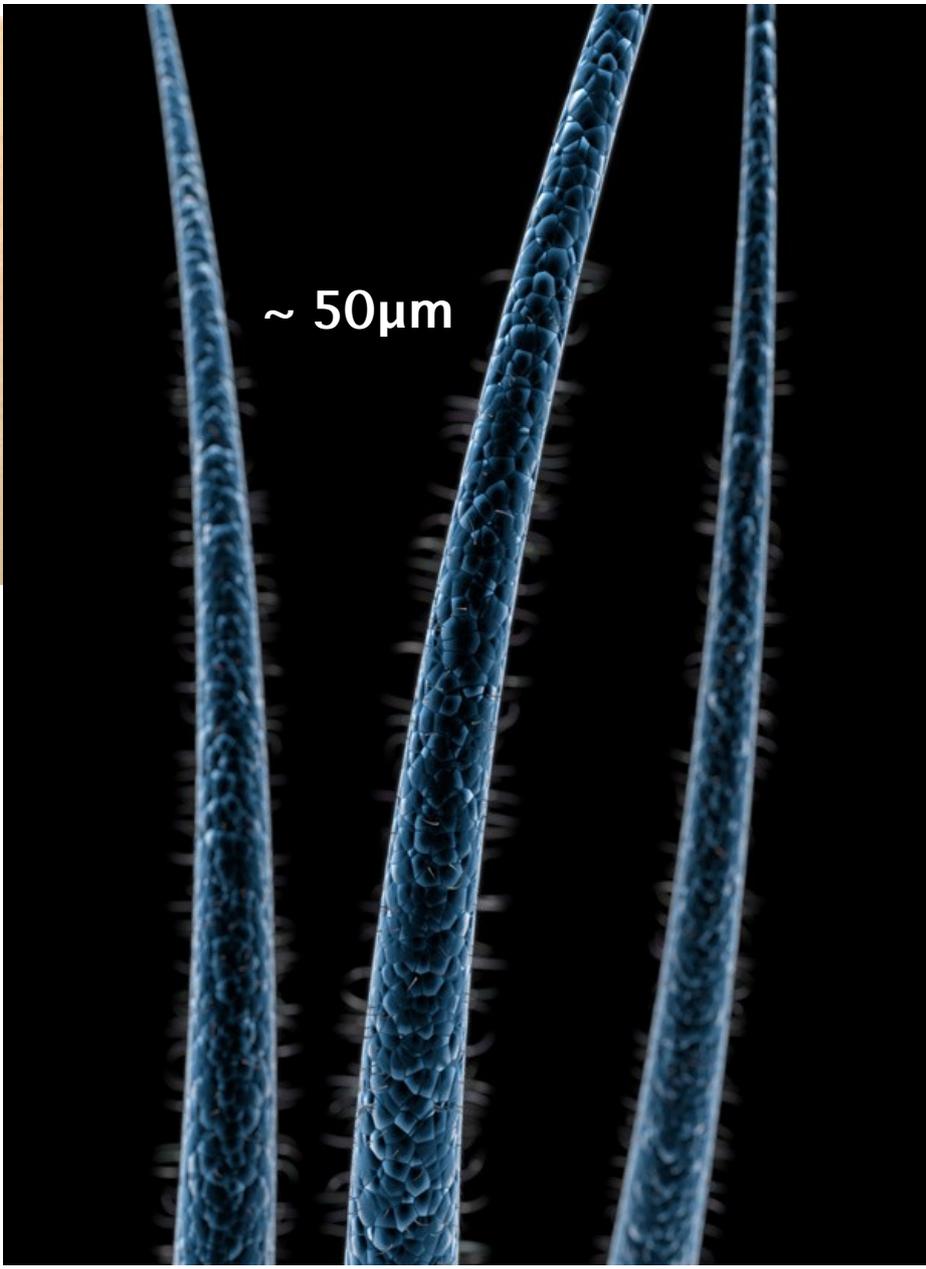
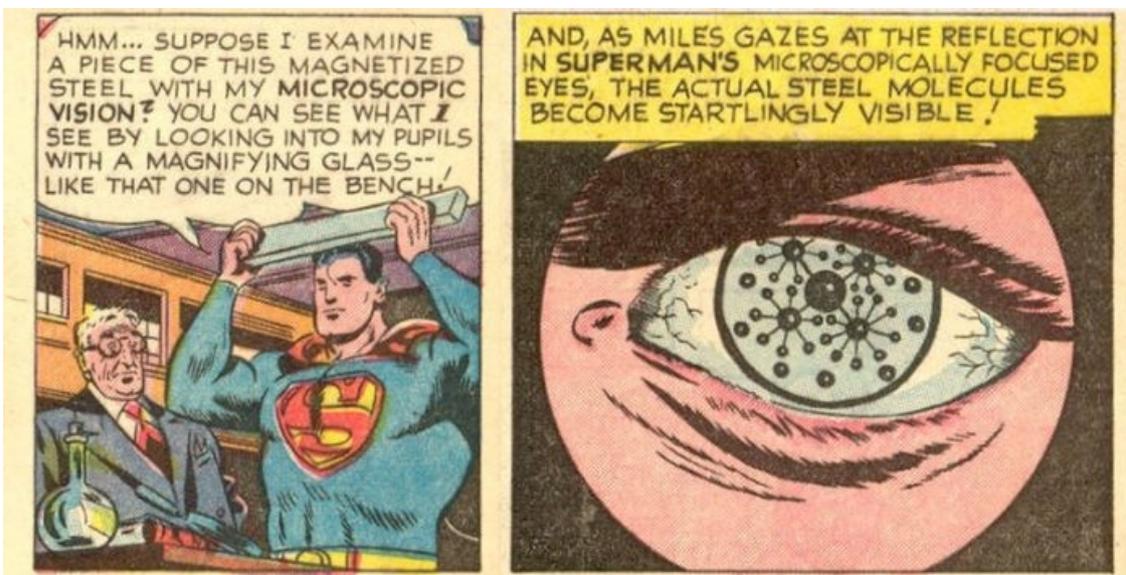


# III. Les super-sens : la vision « télescopique »



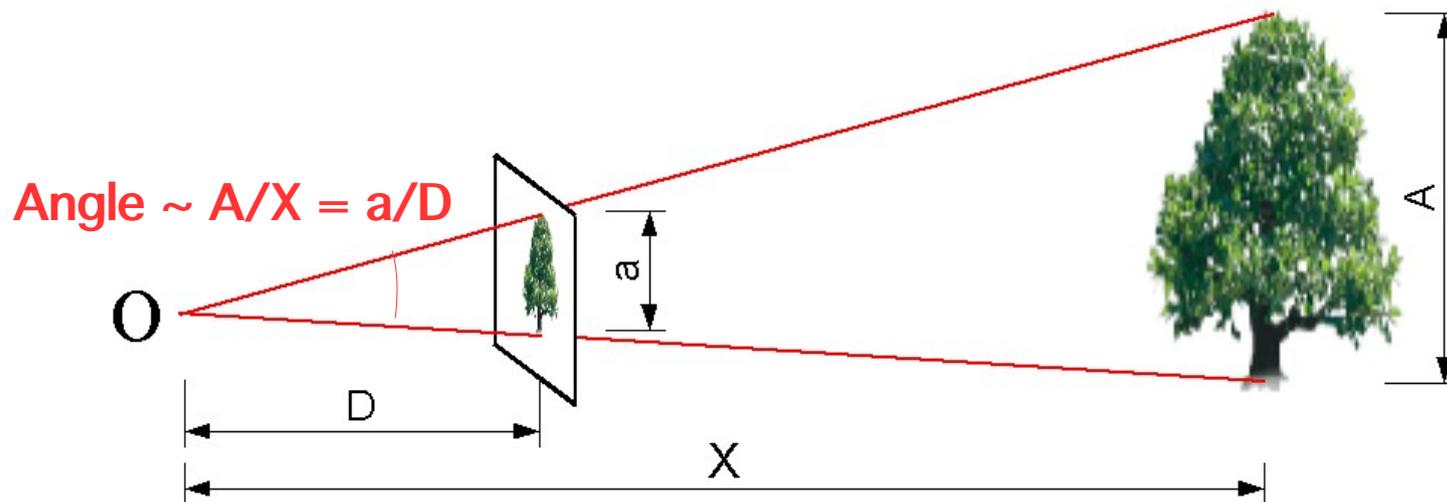
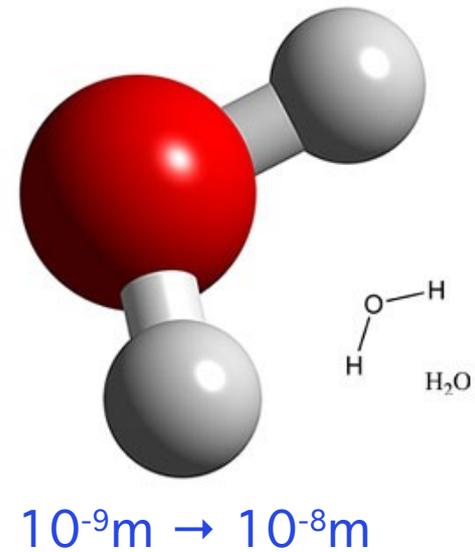
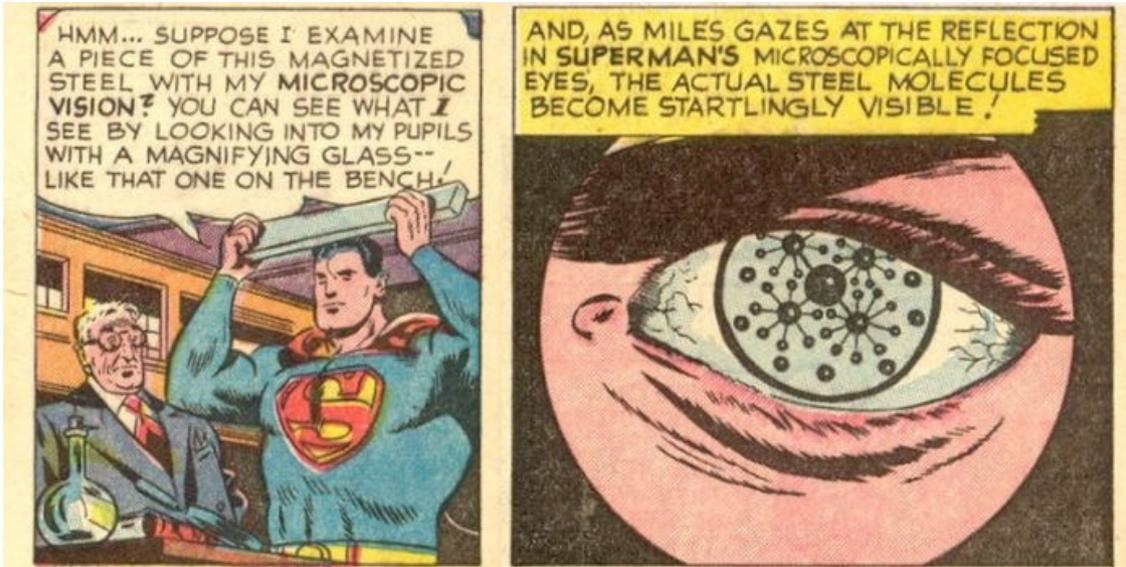
Résolution  $\sim \lambda F/D \rightarrow$  Superman : identique, sauf si  $F/D$  plus petit !  
et cellules photosensibles plus petites... ?

# III. Les super-sens : la vision « microscopique »



Limitée par résolution de l'oeil ~ 1/60°

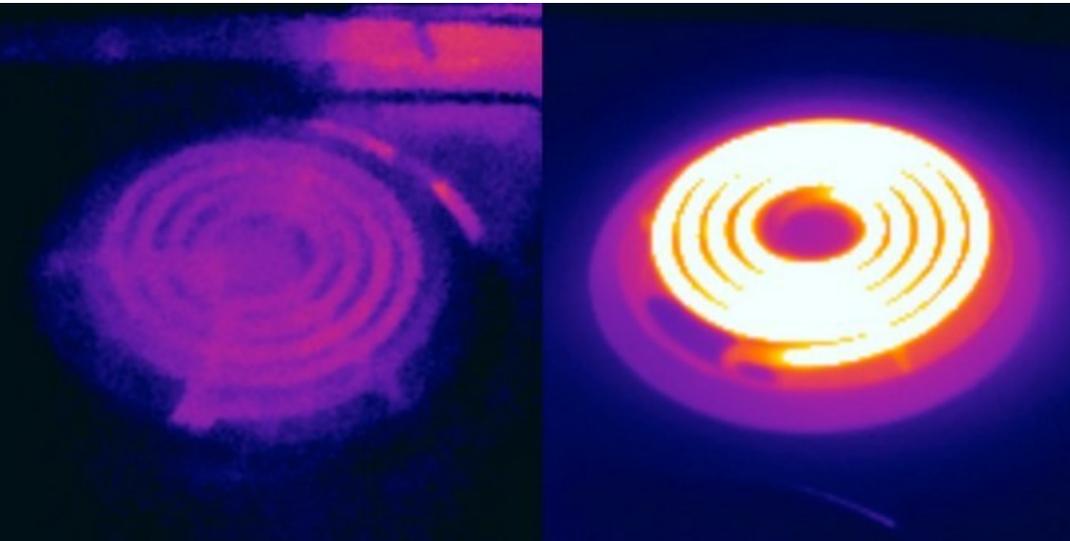
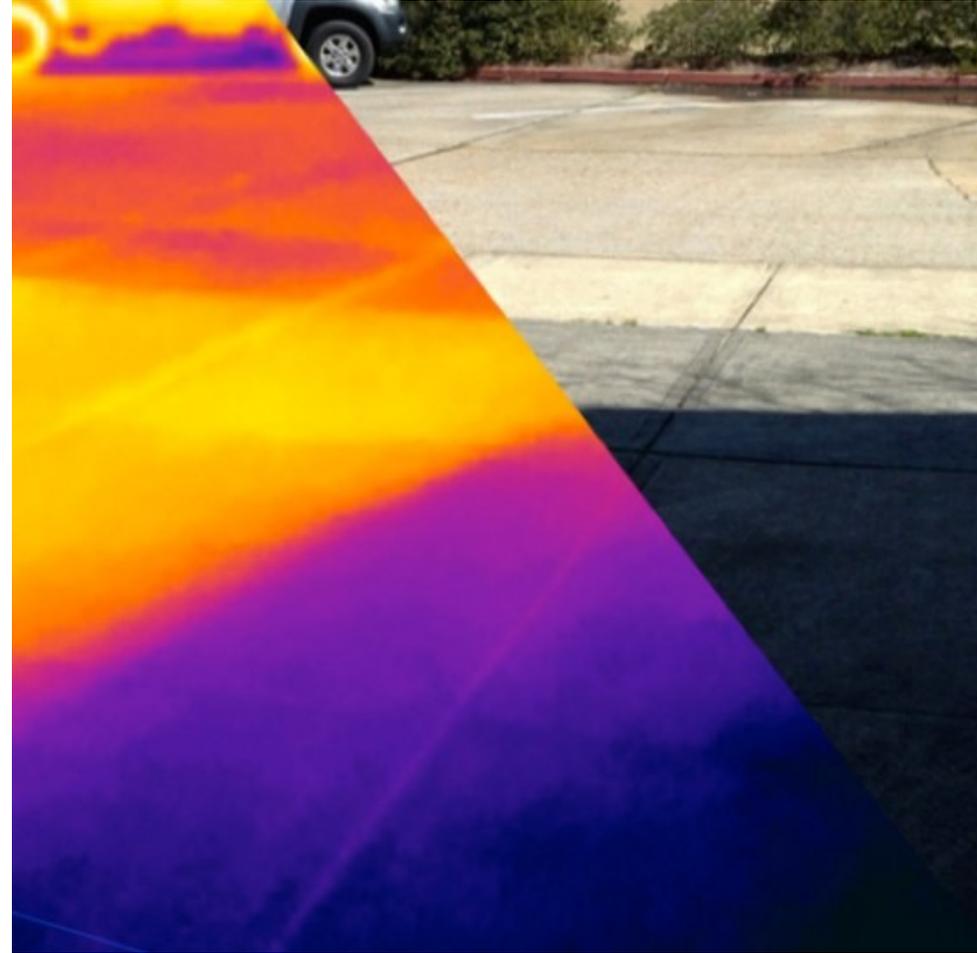
# III. Les super-sens : la vision « microscopique »



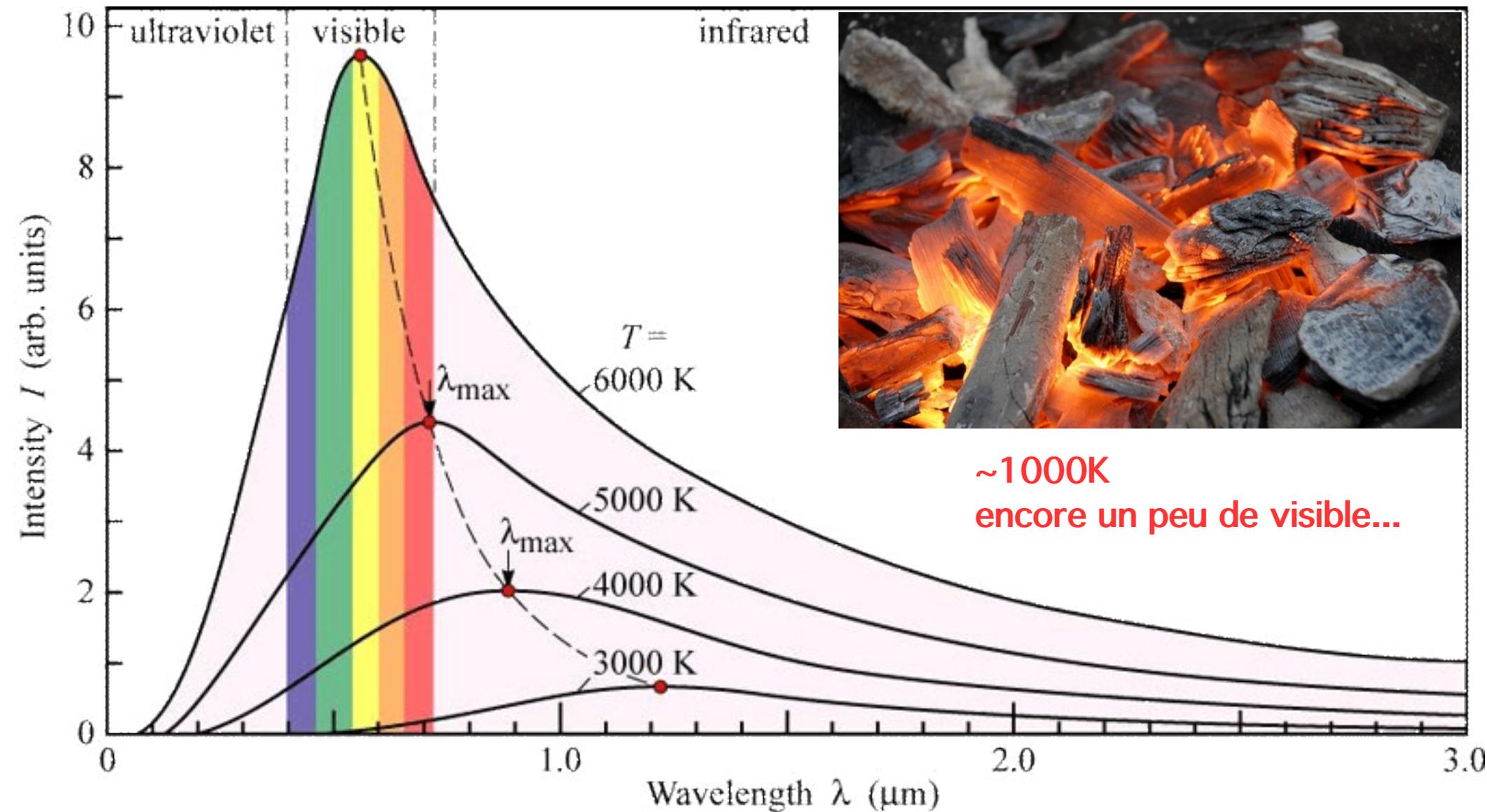
Limitée par résolution  $\sim 1/60^\circ = 3 \times 10^{-4}$  radians  $\rightarrow$  à 25cm, taille minimale  $\sim 50\mu\text{m}$   
 $\rightarrow$  devient  $\sim \mu\text{m}$  pour Superman si son oeil est 30x plus puissant...

# III. Les super-sens : la vision « infrarouge »

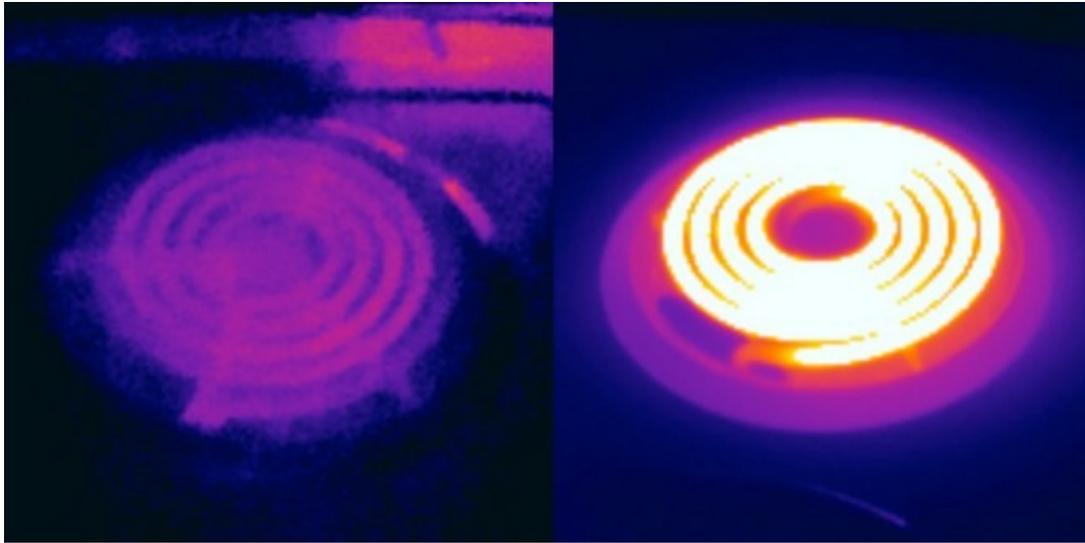
---



# III. Les super-sens : la vision « infrarouge »



# III. Les super-sens : la vision « infrarouge »



Vipère  
Souris à 50cm



### III. Les super-sens : la vision « UV »

---

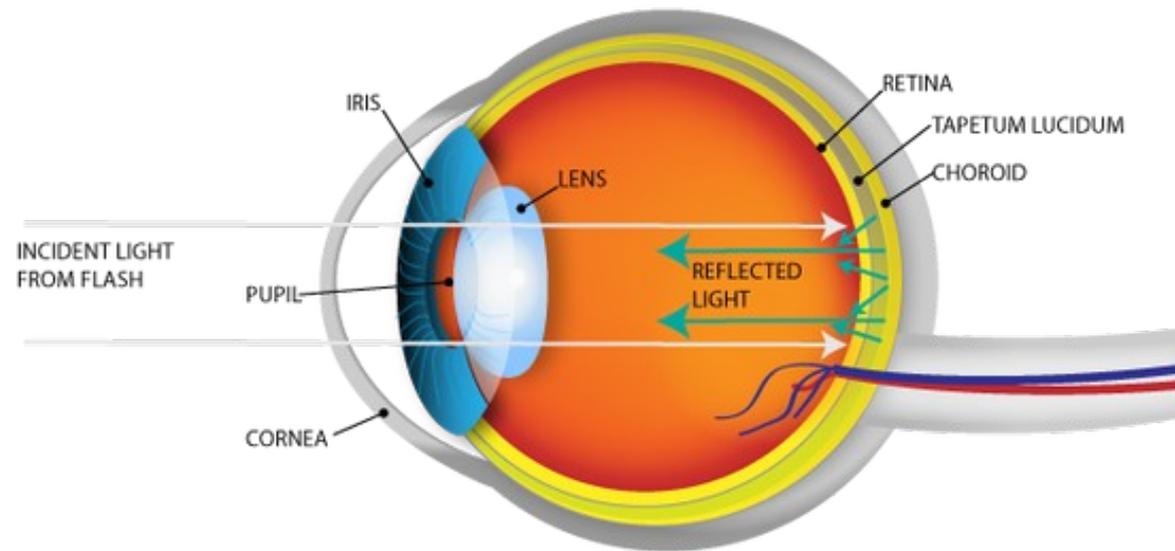


Faucon  
Gecko Nocturne

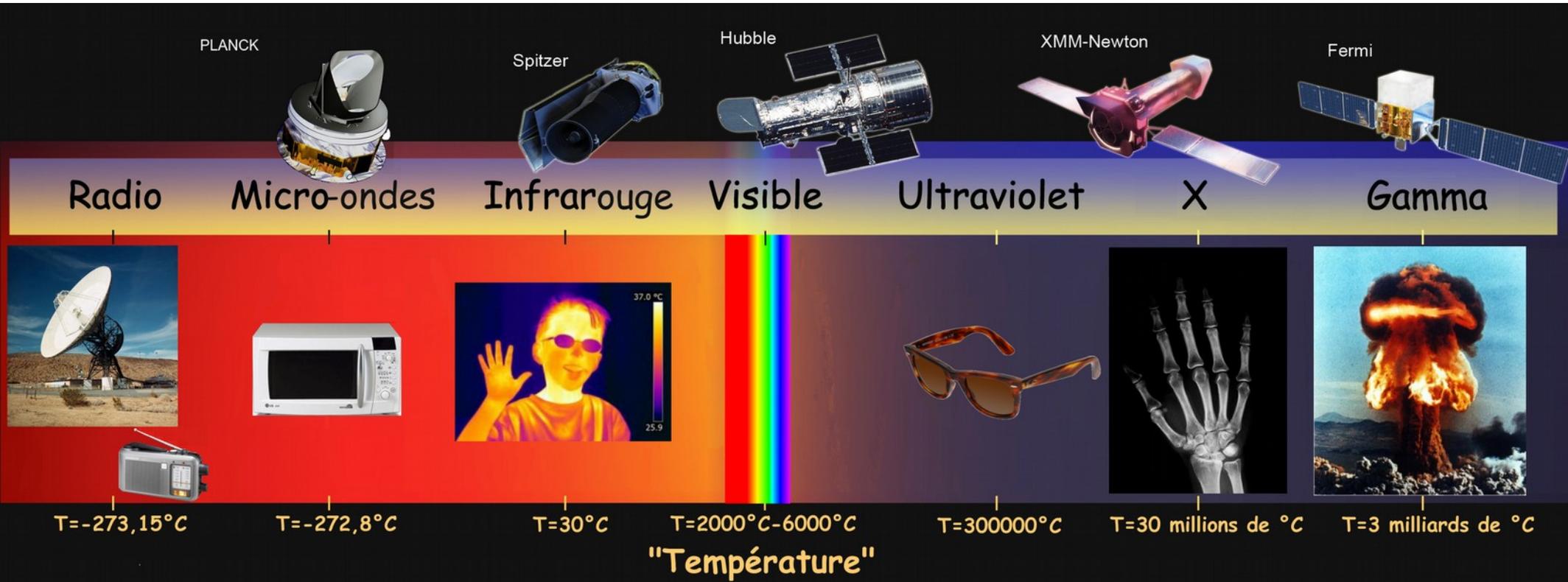
# III. Les super-sens : la vision nocturne



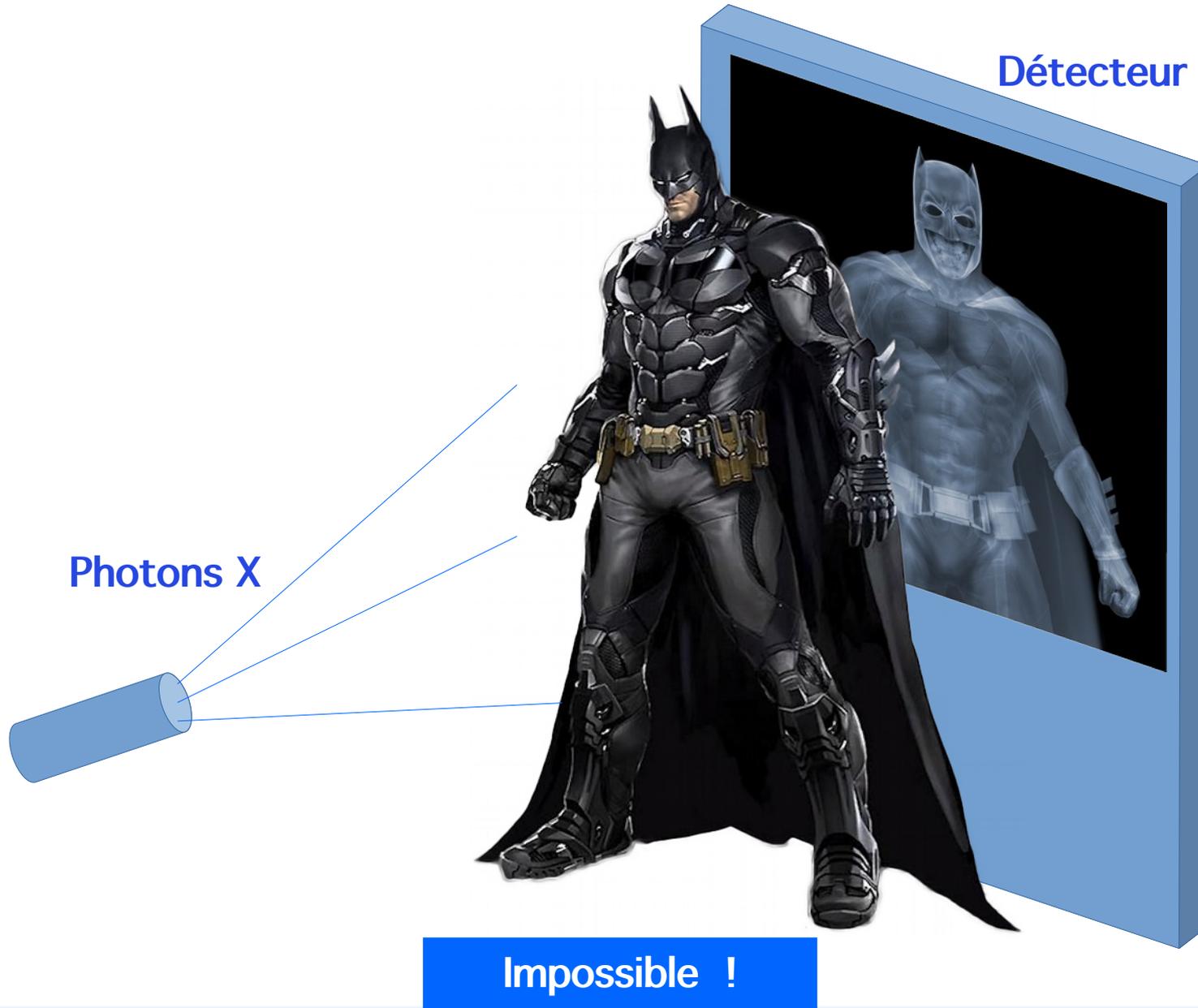
Tapetum Lucidum



# III. Les super-sens : la vision X



# III. Les super-sens : la vision X



### III. Les super-sens : la vision « laser »

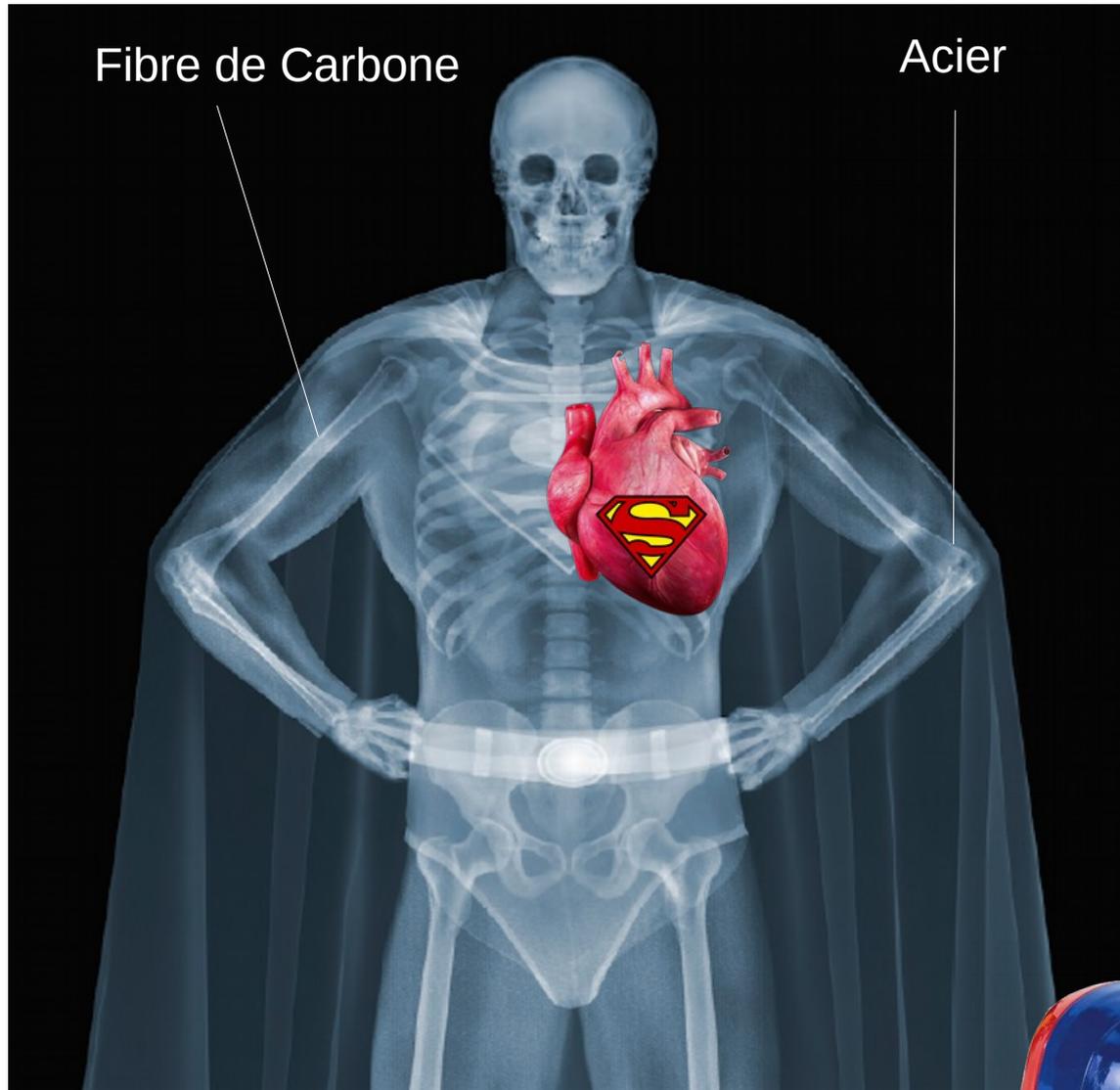
---



Impossible !



# Le « vrai » Superman



# Physique & Fiction

## de Gulliver à Star Wars

Mardi 29 Janvier 2019

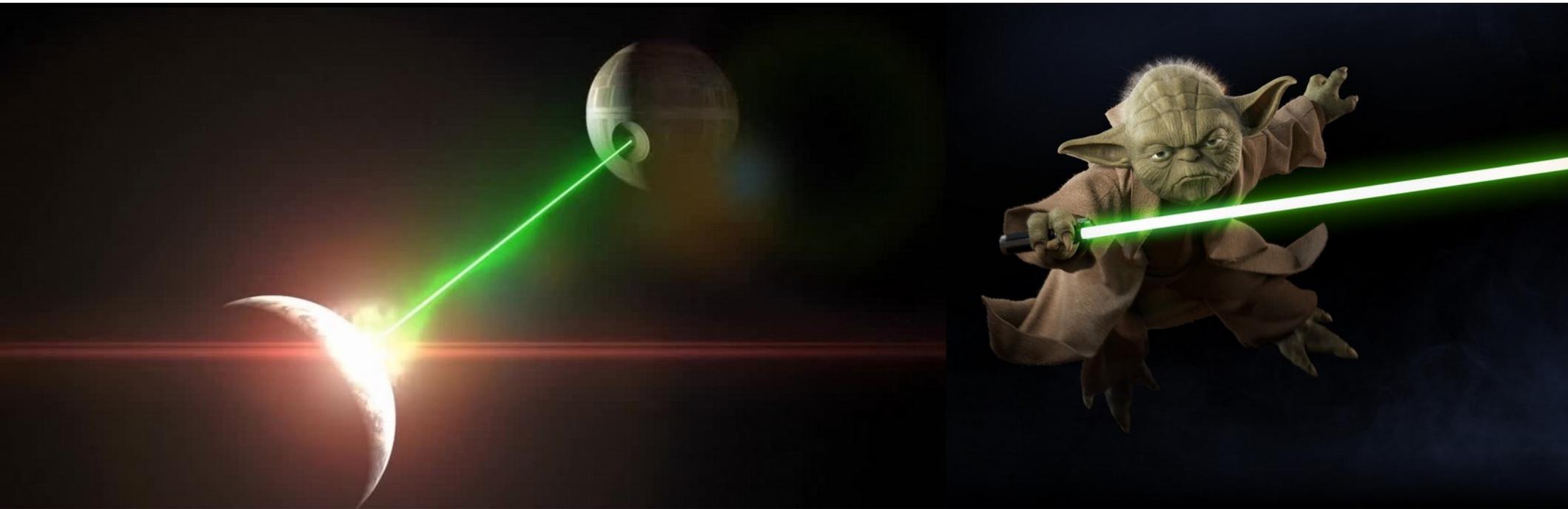


- Cours 1 : Physique & Dimensions*
- Cours 2 : Des Schtroumpfs à Gargantua*
- Cours 3 : Les pouvoirs de Superman*
- Cours 4 : L'énergie dans Star Wars**
- Cours 5 : De Dante à Edgar Allan Poe*



# 4- Que la Force soit avec nous !

Une enquête dans l'univers de Star Wars



- 1 – La Force, le Sabre-Laser & l'Etoile de la Mort...
- 2 – Les animaux & véhicules terrestres/spatiaux
- 3 – Les planètes dans Star Wars