

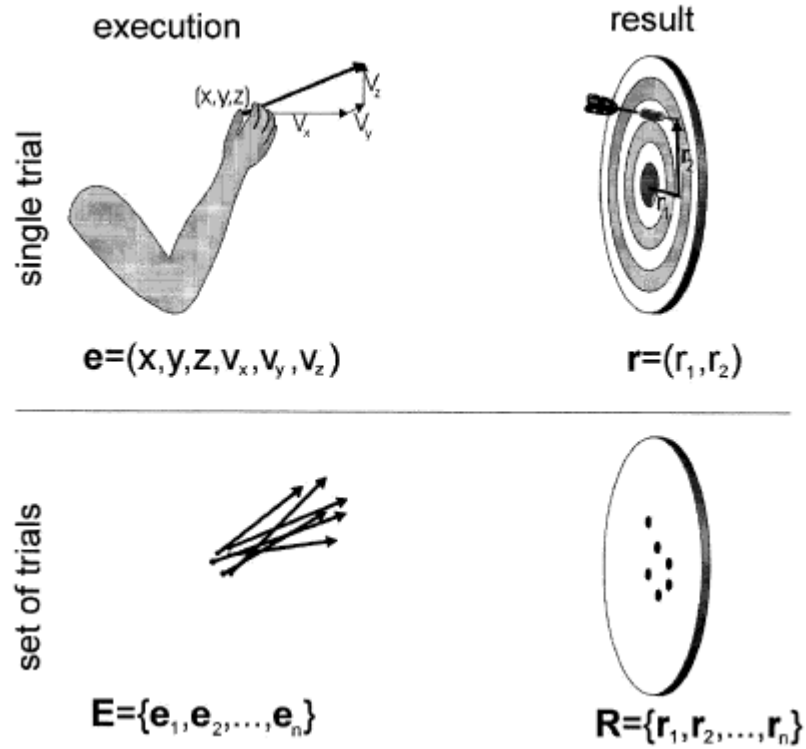
# Redondance et primitives du mouvement

Julien Lagarde

Master 1 TC

UE 1 E4

# Variabilité: Pas deux fois le même mouvement





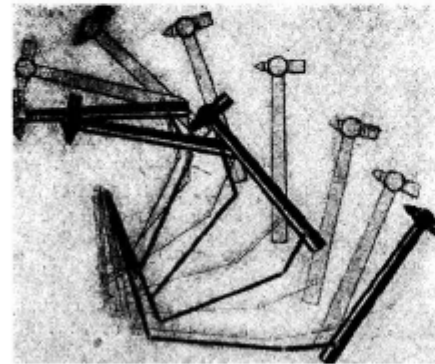
## Bernstein (1935):

During multijoint movements  
variability is lower at endpoint  
than at individual joints

## La théorie de la « variété non contrôlée » :

les fluctuations sur les degrés de libertés individuels sont  
plus grandes que les fluctuations sur les paramètres à  
contrôler ( spécifiés par la TACHE).

La variabilité est restreinte à un sous espace redondant  
plutôt que supprimée de façon non spécifique.

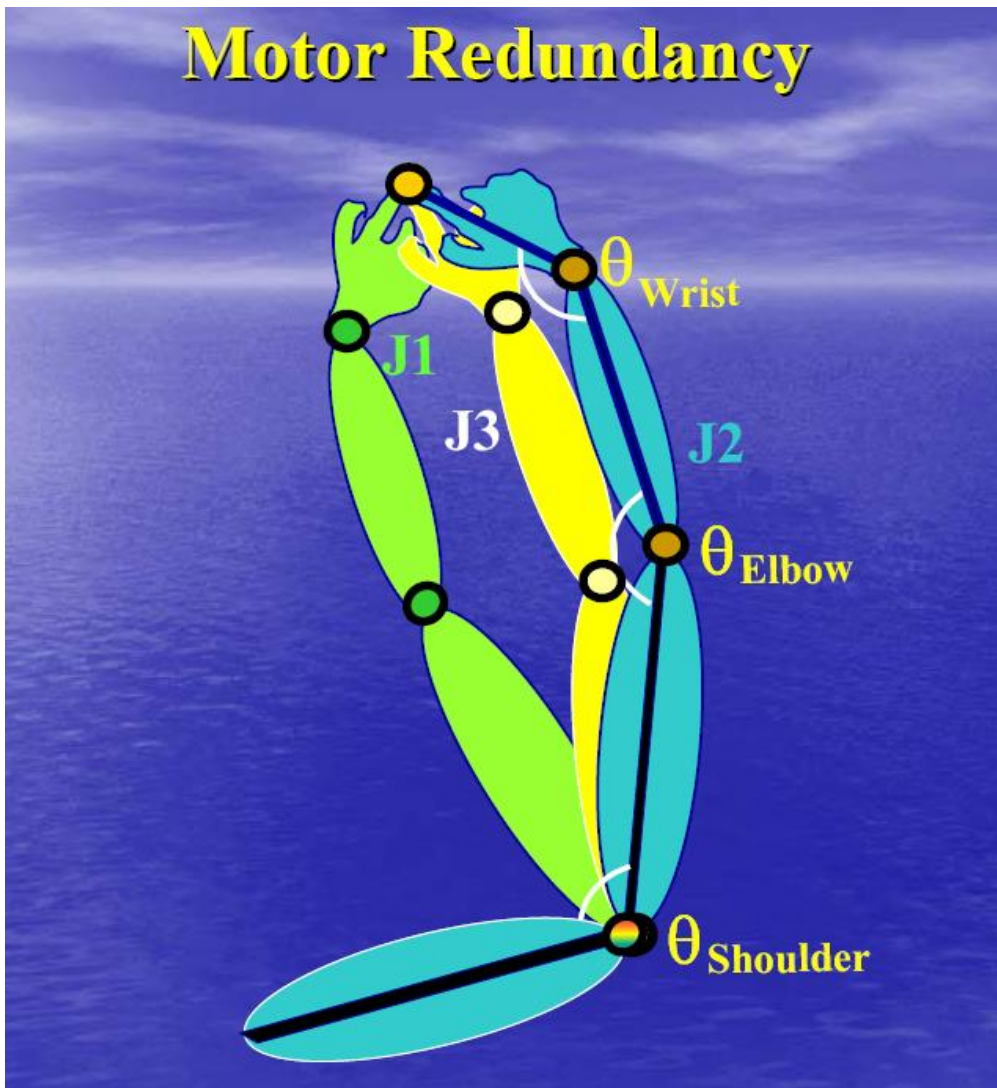


Bernstein (1967)

Variabilité des angles articulaires

> variabilité de la position du marteau

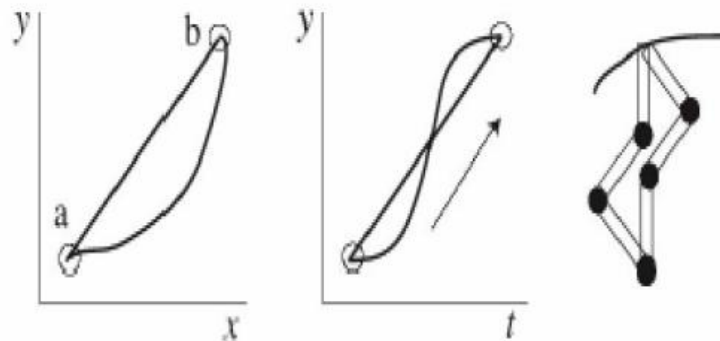
# Motor Redundancy



La déviation de la trajectoire causée par une articulation peut être compensée par d'autres articulations

## Choix d'une trajectoire

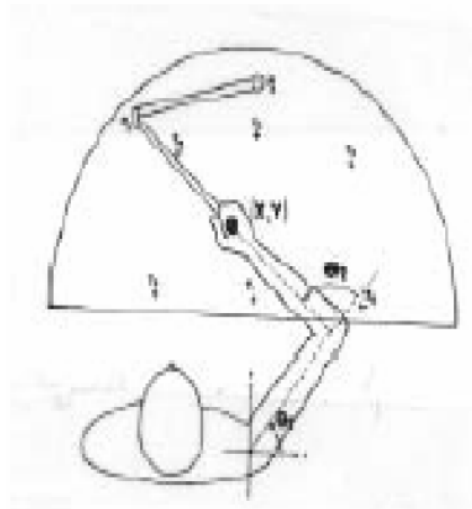
- Chemin dans l'espace (de la tâche)
- Parcours temporel sur de la trajectoire



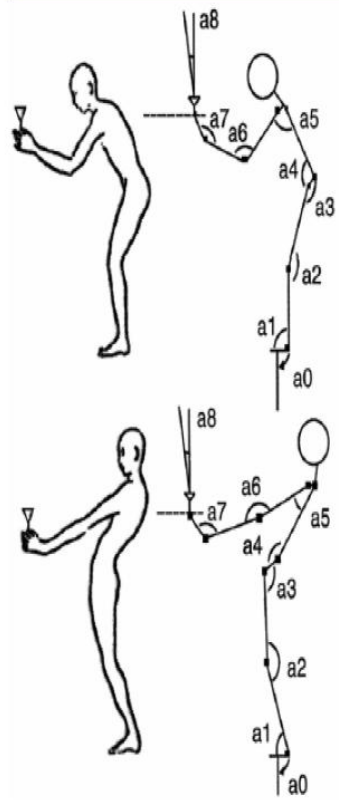
## Formation d'une trajectoire

- Effecteur (**DEGRÉS DE LIBERTÉ, ÉQUIVALENCE MOTRICE**)
- Trajectoire articulaire (**REDONDANCE**)

Mathématiquement : cinématique inverse



Passage de la position  $(x,y)$  de la main dans le plan aux angles articulaires



redundance

## Avantage de la redondance = abundance

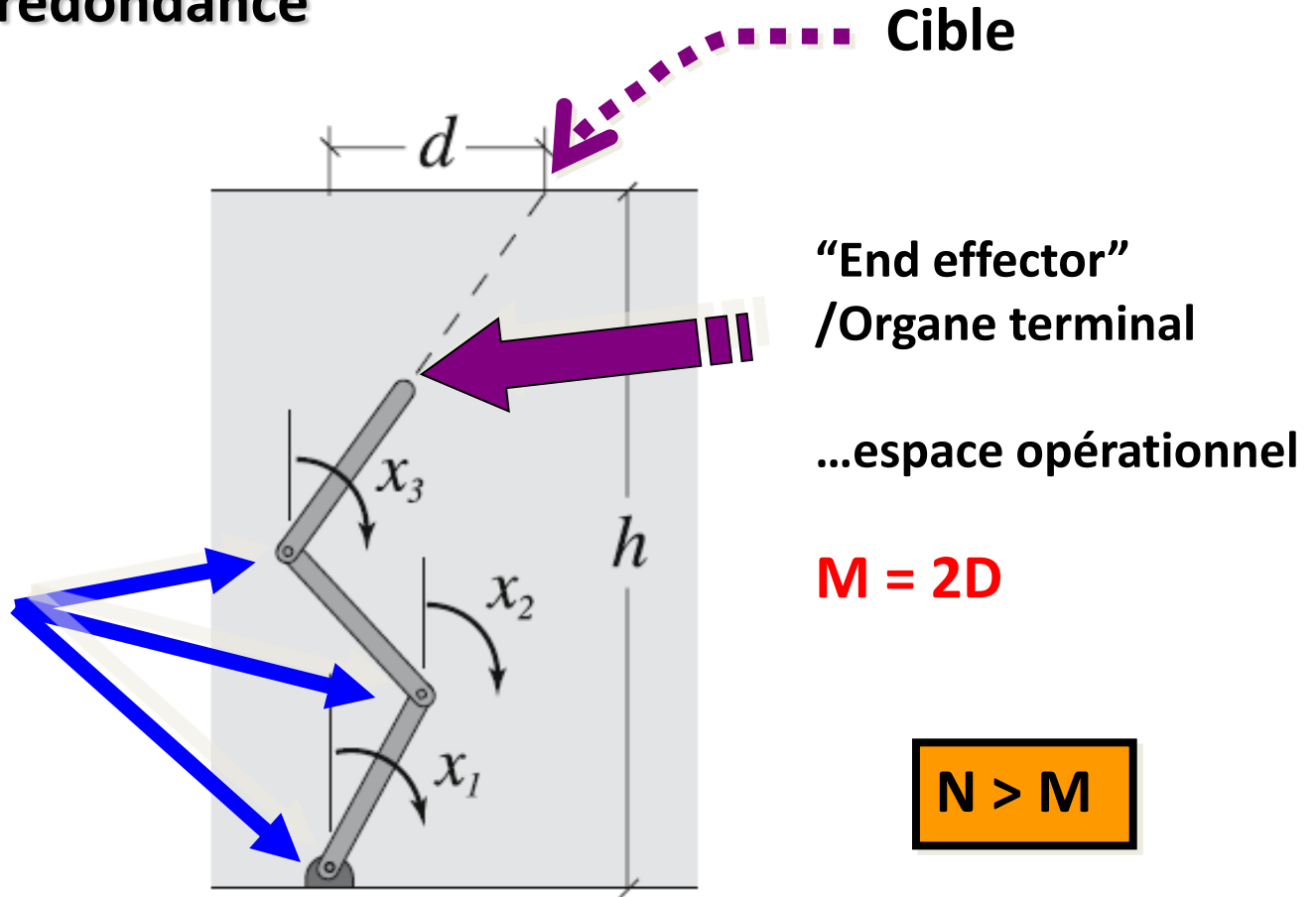
- Obstacles évités
- Perturbations (externes) n'interrompent pas le déroulement du mouvement
- Adoption de nouvelles solutions à proximités
- Flexibilité
- CAUSE : « contrôle » faible
  
- Robotique : Minimisation des efforts (couples)



# Précision sur la redondance

Articulations  
(degrés de libertés)

$$N = 3D$$



Joseph P. Cusumano · Paola Cesari

**Body-goal variability mapping in an aiming task**

# Contrôle optimal

Méthode pour trouver la solution d'un problème de contrôle qui satisfait un critère d'optimalité (minimum d'une fonction de coût).

Ex: Trouver la trajectoire entre deux points qui possède la régularité ("smoothness") maximale. Les propriétés des trajectoires trouvées sont: chemins rectilignes, mise à l'échelle linéaire en amplitude, invariance en translation, invariance en durée, profil de vitesse symétrique.

Comment le système nerveux détermine une commande optimale? Quelles fonctions de coût utilise-t-il?

Extremum d'une intégrale

$$C(x(t)) = \int_0^{t_f} L \left[ t, x, \dot{x}, \ddot{x}, \dots, \frac{d^n}{dt^n} \right] dt$$

Un extremum de  $C$  est obtenu quand  $x(t)$  est solution de l'équation d'Euler-Lagrange :

$$\frac{\partial L}{\partial x} - \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{x}} \right) \dots + (-1)^n \frac{d^n}{dt^n} \left( \frac{\partial L}{\partial x^{(n)}} \right) = 0$$

Maximum de régularité

$$C = \frac{1}{2} \int_0^{t_f} \left( \left[ \frac{d^3 x}{dt^3} \right]^2 + \left[ \frac{d^3 y}{dt^3} \right]^2 \right) dt$$

$$L = \frac{1}{2} ((\ddot{x})^2 + (\ddot{y})^2)$$

$$\frac{d^3}{dt^3} \left( \frac{\partial \ddot{x}^2}{\partial \ddot{x}} \right) + \frac{d^3}{dt^3} \left( \frac{\partial \ddot{y}^2}{\partial \ddot{y}} \right) = 0$$

$$\frac{d^6 x}{dt^6} = \frac{d^6 y}{dt^6} = 0$$

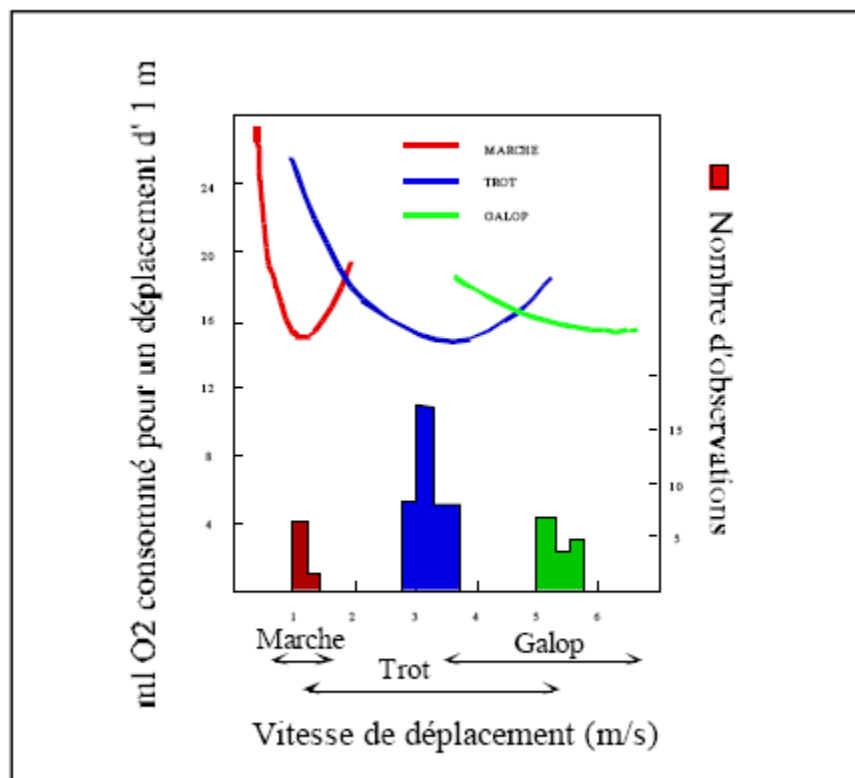
$$x(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3 + a_4 t^4 + a_5 t^5$$

$$y(t) = b_0 + b_1 t + b_2 t^2 + b_3 t^3 + b_4 t^4 + b_5 t^5$$

# Efficiencce énergétique

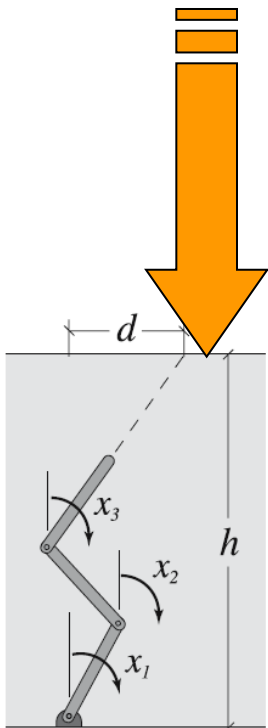
- Efficiencce (%) = (Travail mécanique effectué / Energie dépensée ) \* 100
- $W = \text{Force} * \text{Déplacement}$
- $F = \text{masse} * \text{acceleration}$
  
- Efficiencce  $\neq$  Economie
- Economie: Energie dépensée pour atteindre le but
  
- Avec l'apprentissage; l'économie s'accroit
  
- Meilleure organisation du geste (musculaire, segmentaire)
- Meilleure efficacité mécanique
- Mouvement plus lisse / plus fluide
- Fluidité: minimisation de la secousse (« jerk »)
- Vitesse =  $dp / dt$     accélération =  $dv / dt$     secousse =  $da / dt$

Hoyt & Taylor, 1981



# « Goal equivalent manifold » (GEM)

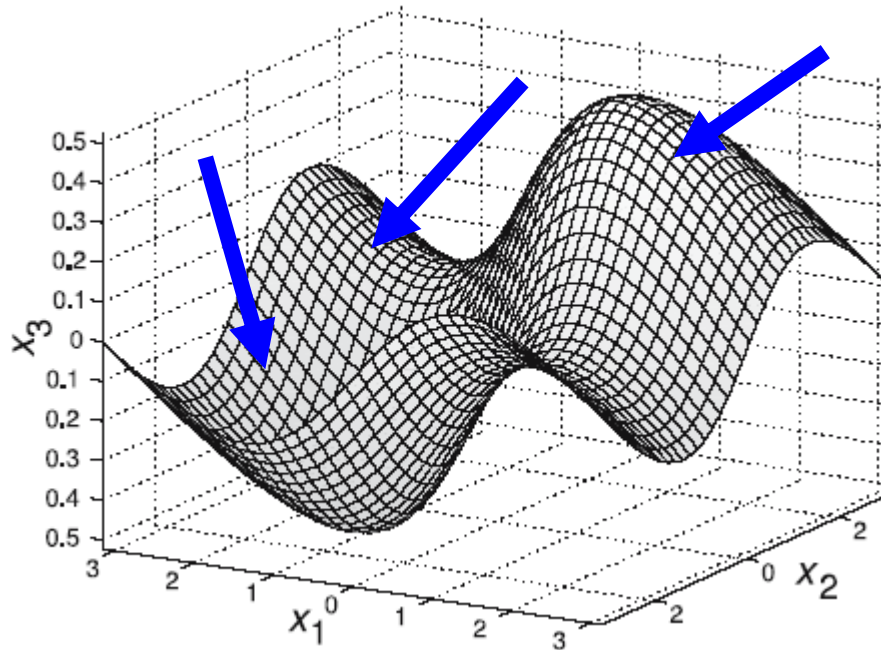
/Sous espace de valeurs articulaires correspond au même but (cible)



**L1 = 1**

**L2**

**L3**



Tous les point de la surface  
donnent un résultat du  
pointage  
équivalente

(X1 Radians

X2

X3)

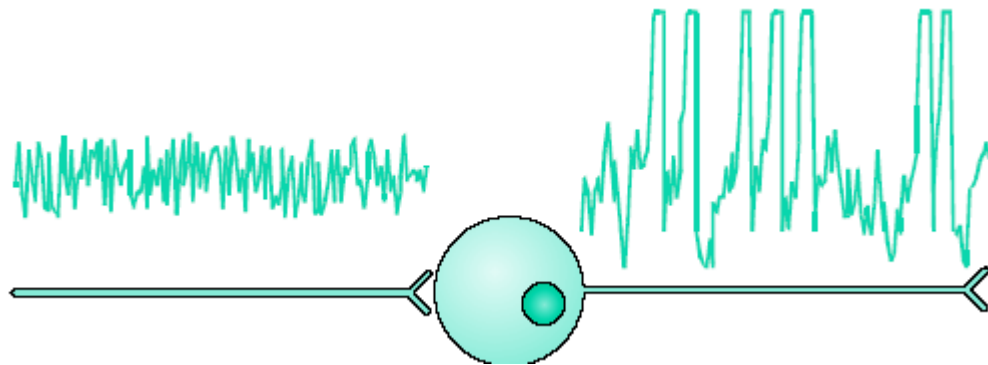
**Autres redondances :**

- **Musculaire**
- **Neuronale**

# **Préambules**

# Sources de variabilités dans un système biologique

**Bruit : *Echelles microscopiques*** – impact des fluctuations thermodynamiques



## Voltage traces

$V = -60 \text{ mV}, \sigma = 0.19 \text{ mV}$



$V = -70 \text{ mV}, \sigma = 0.11 \text{ mV}$

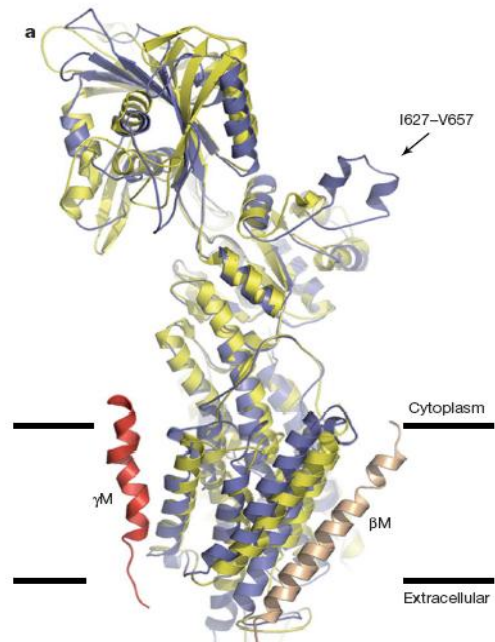
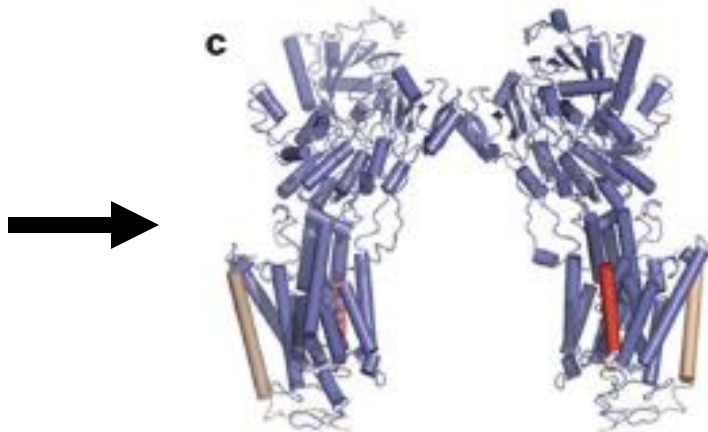
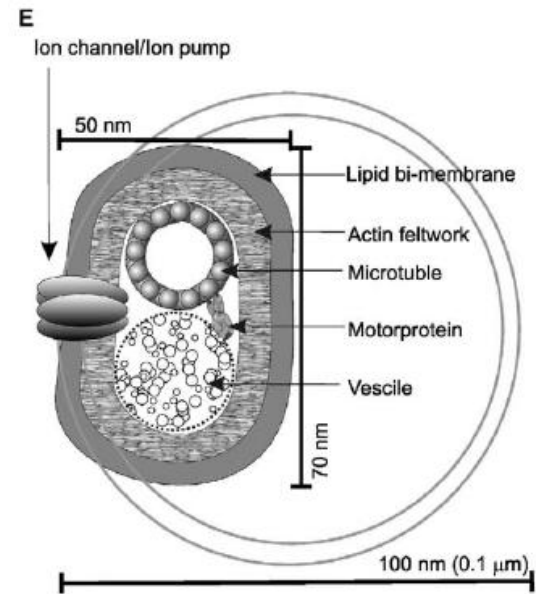
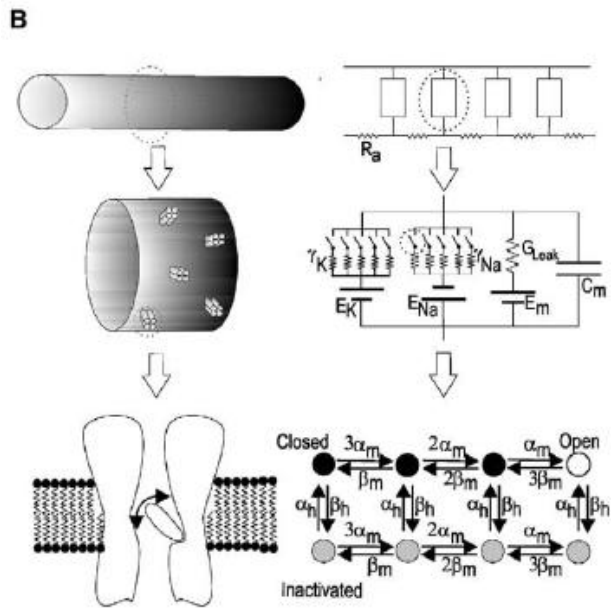


$V = -80 \text{ mV}, \sigma = 0.08 \text{ mV}$



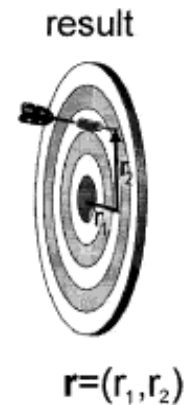
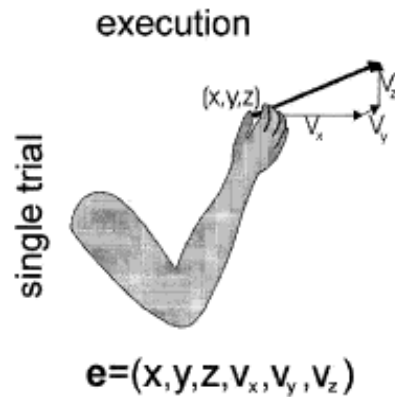
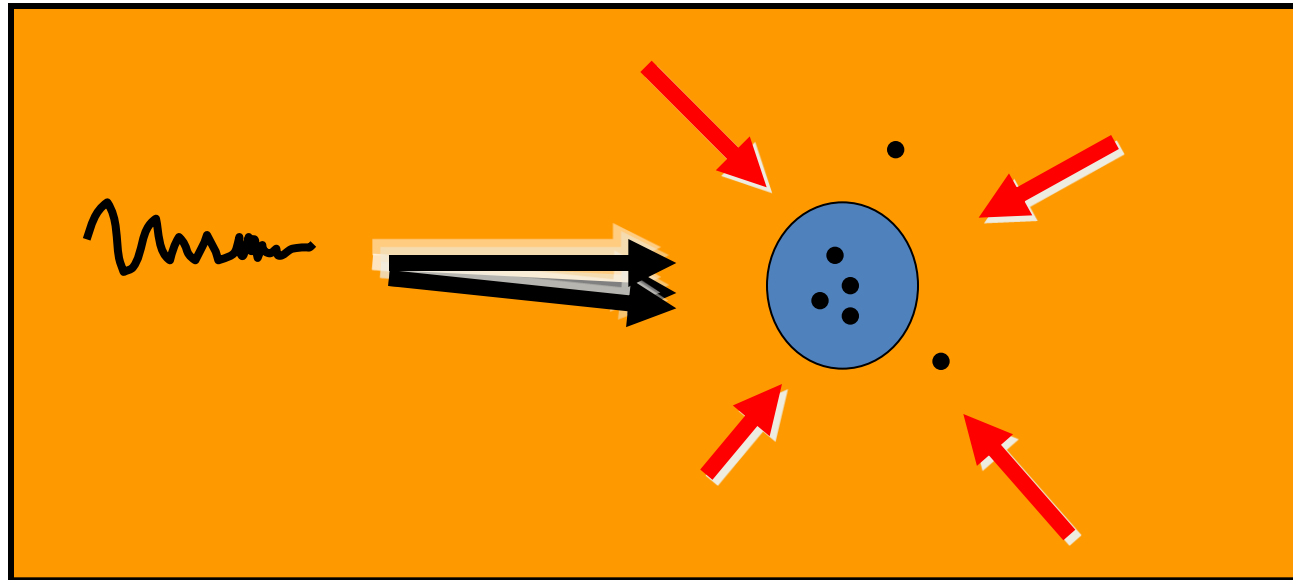
0.5 mV |  
1 sec



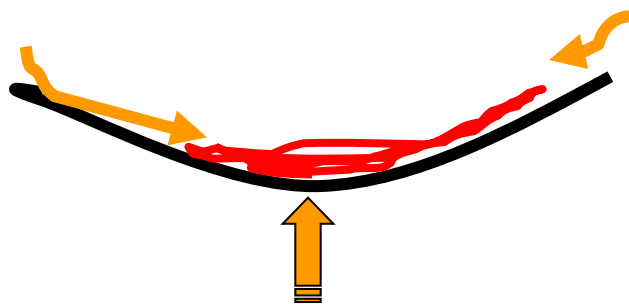


# Relation variabilité <-> bruit

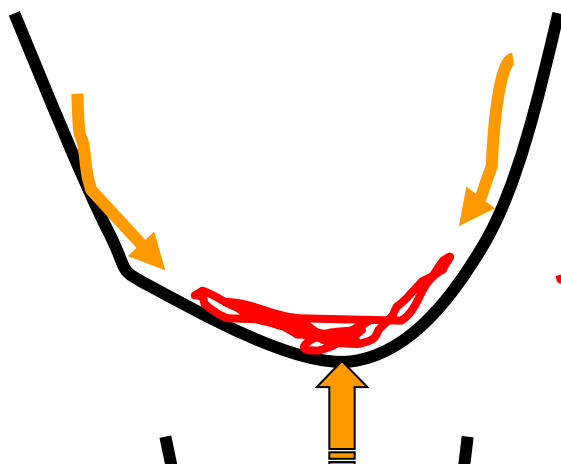
## Contrecarrer le bruit : Stabiliser



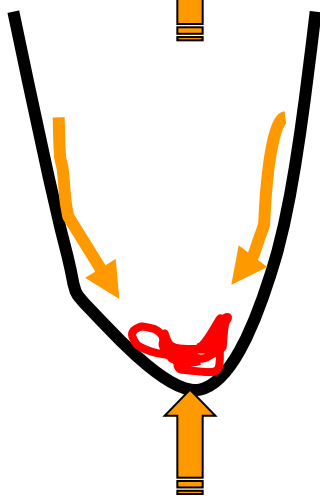
**Stable +**



**Stable ++**

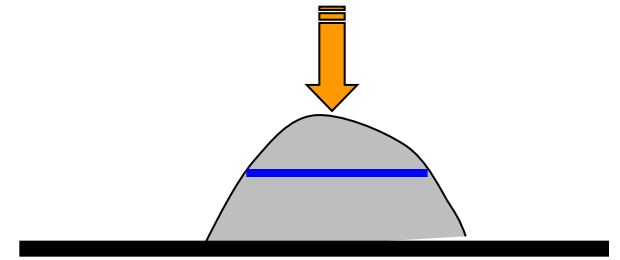
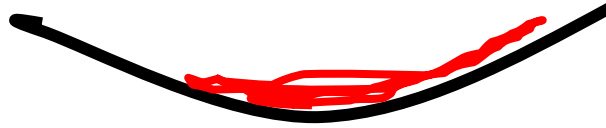


**Stable +++**

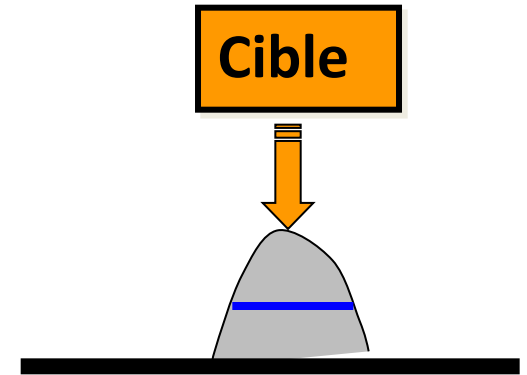
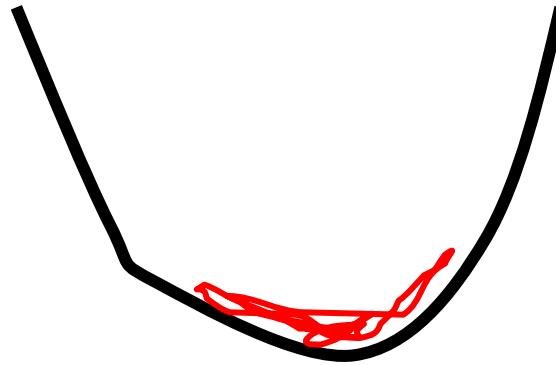


# Stabilité / Distribution / Variance

Stable +



Stable ++



Stable +++

