

## CM 7-CM 8

# Neurosciences et apprentissage moteur

Arnaud Boutin

[arnaud.boutin@universite-paris-saclay.fr](mailto:arnaud.boutin@universite-paris-saclay.fr)

# Deux approches de l'apprentissage

## Les théories cognitives

Postulent l'existence  
d'une « entité »  
stockée en MLT qui  
déclenche et corrige le  
mouvement

« Entité » =  
PMG  
Schéma  
Connaissances  
Représentations

## Les théories dynamiques

Postulent que les  
actions sont des  
coordinations  
motrices temporaires  
« émergentes » qui  
sont des réponses  
d'un système  
(l'organisme humain)  
à une demande  
environnementale

Pas besoin de  
postuler l'existence de  
représentations en  
MLT pour expliquer  
les mouvements

# Les théories dynamiques de l'apprentissage moteur

« Le comportement moteur est conçue comme un **phénomène émergeant d'un réseau de contraintes**, liées soit à la tâche, soit à l'organisme, soit à l'environnement » (Newell, 1986)

Basé sur les travaux du physiologiste Nicolai Bernstein (1967) qui définit la coordination comme : « le processus de maîtrise des degrés de liberté redondants de l'organisme pour en faire un système contrôlable »

# Les théories dynamiques de l'apprentissage moteur

Les habiletés motrices sont considérées comme des coordinations :

- **Assemblage** de segments, articulations (exemple : marche, roue)
- **Coopération** d'ensembles musculo-articulaires et segmentaires indépendants au départ
- Ces assemblages se traduisent par des relations spatio-temporelles **stables et reproductibles** entre les composantes
- Ces invariants sont la « **signature** » de la coordination (la marche, la course, la course d'élan ont des formes spécifiques stables)

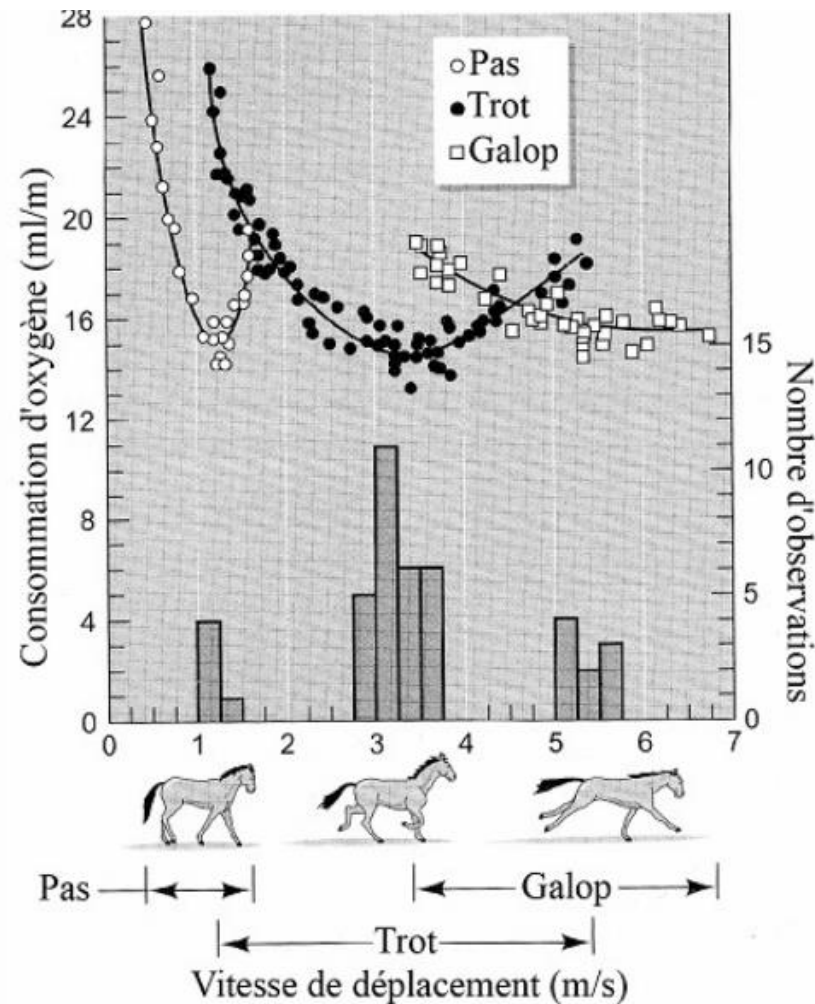
# Les théories dynamiques de l'apprentissage moteur

Ce sont les contraintes qui permettent la diminution des degrés de liberté du système moteur et expliquer l'**apparition**, la **persistance** ou la **disparition** des patrons de coordination

3 types de contraintes :

- Liées à l'organisme (morphologie, membres, taille, poids...)
- Liées à l'environnement (thermique, physique...)
- Liées à la tâche

# Les théories dynamiques de l'apprentissage moteur



Consommation d'oxygène dans les trois allures chez le cheval (pas, trot, galop). L'histogramme représente les vitesses spontanément adoptées par le cheval pour chaque allure (D'après Hoyt et

Taylor, 1981, dans Temprado et Montaigne, 2001)

# Les théories dynamiques de l'apprentissage moteur

Les modes de coordination préférentiels et stables sont appelés des **attracteurs**

⇒ Organisation spatio-temporelle choisie car **stable** et **peu coûteuse en énergie**

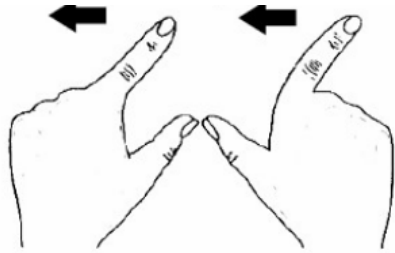
⇒ Exemple : le pas, le trot et le galop sont des attracteurs

**Coexistence** de plusieurs modes de coordinations en fonction des contraintes

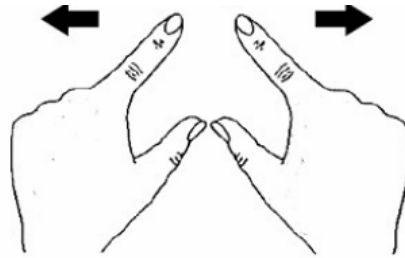
L'existence de modes de coordination préférentiels stables et disponibles dans le répertoire de l'individu ne repose pas sur un apprentissage préalable

# Les théories dynamiques de l'apprentissage moteur

Patron en anti-phase



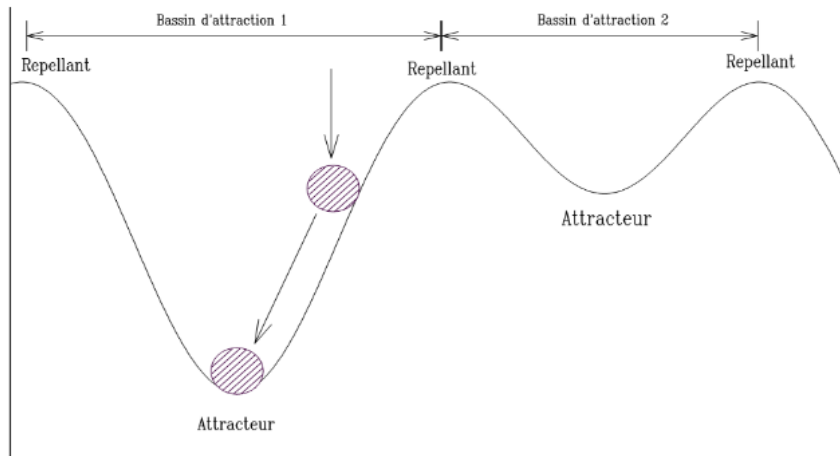
Patron en phase



Kelso et al. (1981)  
Delignières (1998)

La coordination préférentielle est appelée **attracteur** et se caractérise par une stabilité du système neuro-musculo-squelettique

Ex : deux attracteurs dans une tâche bi-doigt en fonction de la fréquence d'oscillation : la **phase** et l'**anti-phase**



La coordination est représentée par un puits ou bassin d'attraction. Plus il est profond, plus la coordination est stable

Le passage dans un autre attracteur passe par un **repellant** (phase instable)

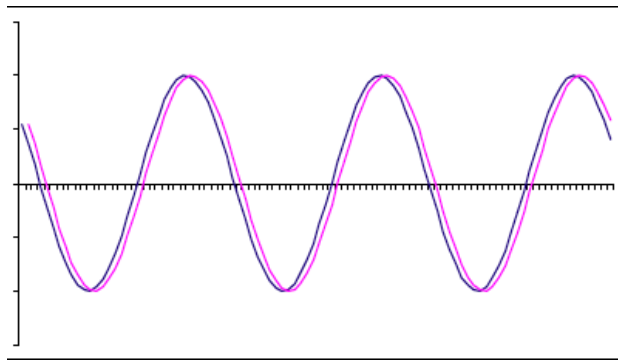


# Les théories dynamiques de l'apprentissage moteur



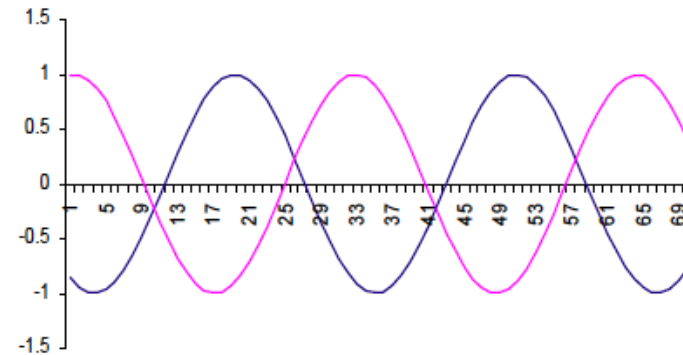
Coordinations bi-manuelles

# Les théories dynamiques de l'apprentissage moteur



Coordination  
en phase

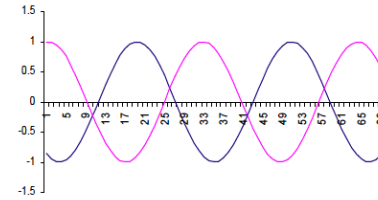
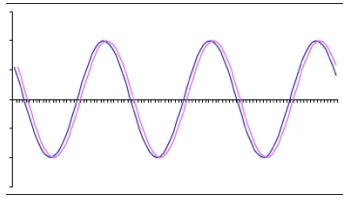
Décalage de  
phase :  $0^\circ$



Coordination  
en anti-phase

Décalage de  
phase :  $180^\circ$

# Les théories dynamiques de l'apprentissage moteur

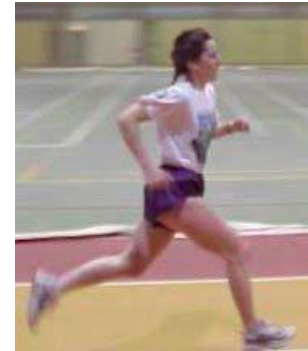


Le patron de coordination correspond à la valeur de la phase relative entre les effecteurs

⇒ La position relative d'un effecteur dans son cycle par rapport à la position de l'autre effecteur

Cette variable est appelée **paramètre d'ordre** du système bi-manuel et permet à la fois de quantifier les patrons de coordination et de caractériser leur évolution (dynamique)

# Les théories dynamiques de l'apprentissage moteur

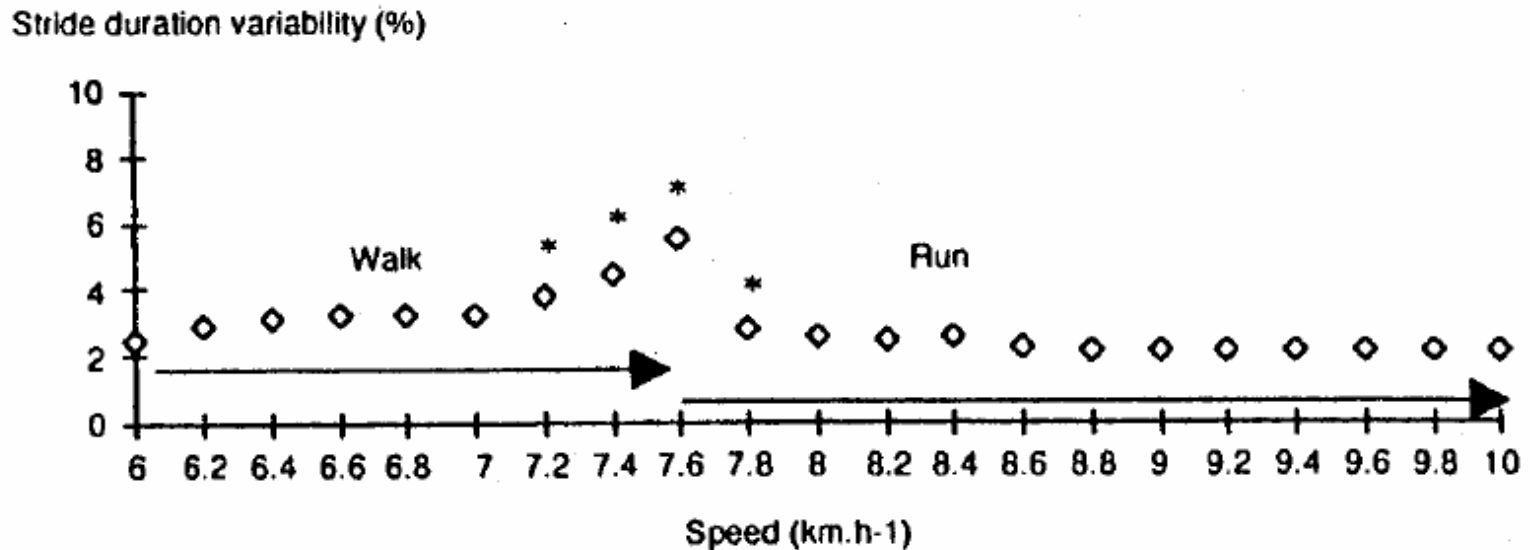


7,2 km/h

7,8 km/h



# Les théories dynamiques de l'apprentissage moteur

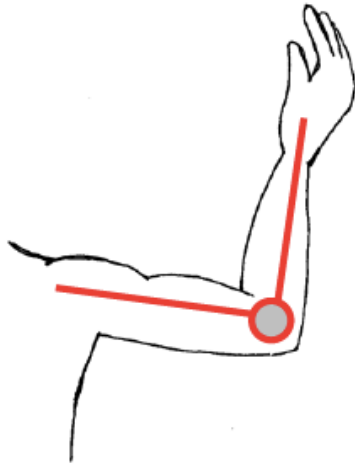


Variabilité de la durée du pas, en fonction de la vitesse de déplacement, lors d'un protocole d'incrémentation progressive de la vitesse. Une transition marche-course apparaît entre 7,6 et 7,8 km/h (Brisswalter & Mottet, 1996)

# Les théories dynamiques de l'apprentissage moteur

Bernstein (1967) : l'apprentissage et la maîtrise des degrés de liberté

Degré de liberté : paramètre libre pour la spécification des propriétés d'un système



# Les théories dynamiques de l'apprentissage moteur

## **Hypothèses de Bernstein**

Le problème du débutant est de gérer la redondance de ses degrés de liberté

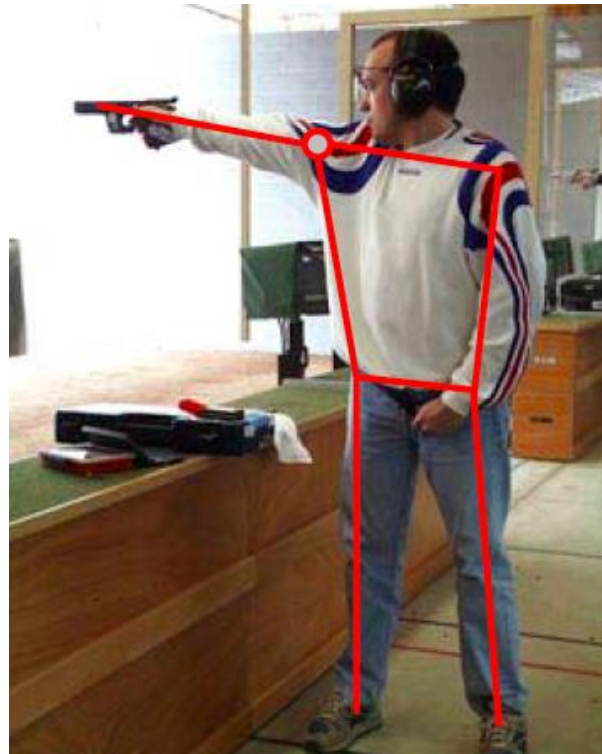
Dans un premier temps, le débutant « gèle » la plupart des ddl, et réalise la tâche avec les ddl résiduels

Dans un second temps, l'individu libère les degrés de liberté, et les intègre dans des « structures coordinatives »

# Les théories dynamiques de l'apprentissage moteur

Analyse de la variabilité des positions articulaires dans le tir au pistolet

Débutant



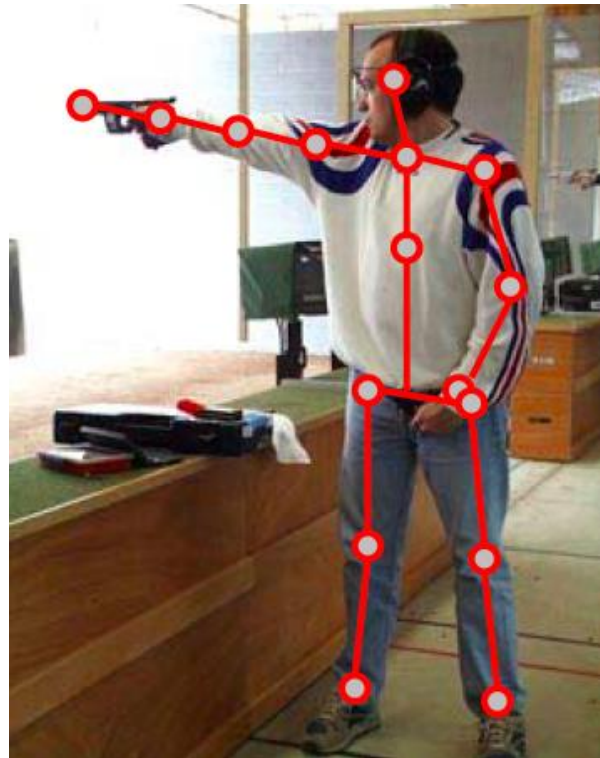
Arutyunyan, Gurfinkel & Mirskii (1968)



# Les théories dynamiques de l'apprentissage moteur

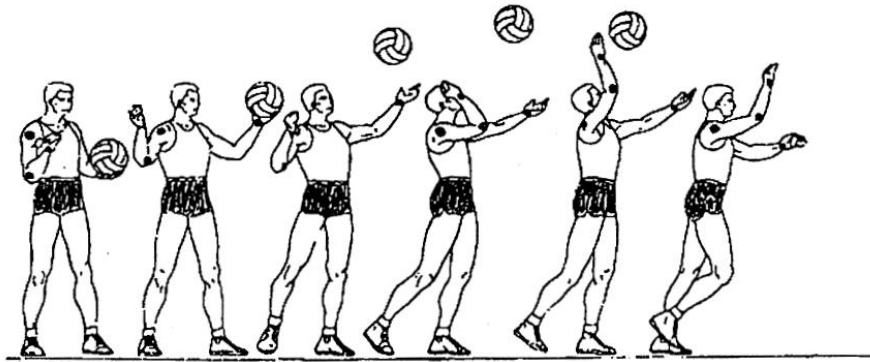
Analyse de la variabilité des positions articulaires dans le tir au pistolet

Expert

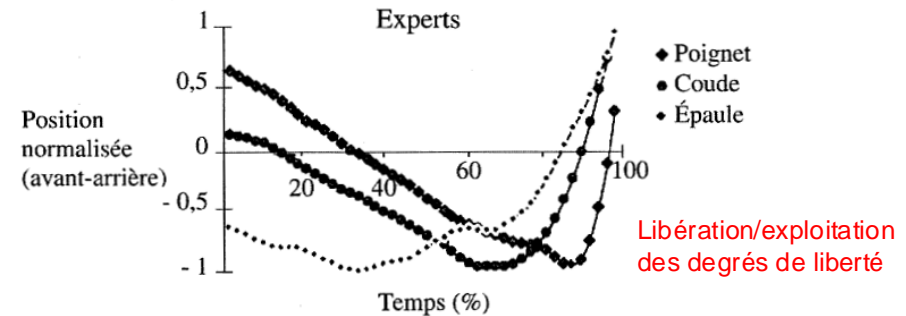
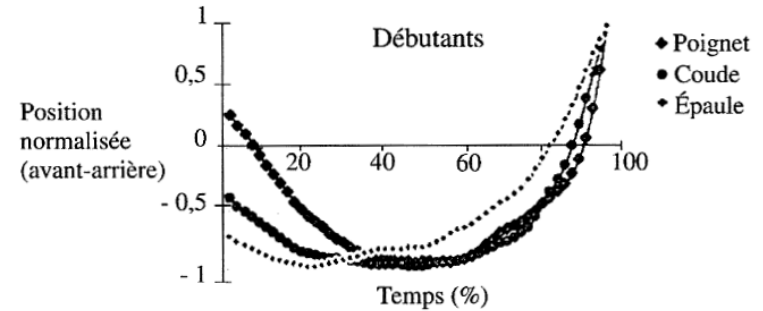


Arutyunyan, Gurfinkel & Mirskii (1968)

# Les théories dynamiques de l'apprentissage moteur



**La tâche de service** utilisée dans l'expérience réalisée par *Temprado et al.* (1997). Les sujets devaient atteindre une cible placée à 16 mètres, derrière le filet, sur un terrain réglementaire.



Source : d'après *Temprado et al.*, 1997.

**Positions normalisées de l'épaule, du coude et de la main en fonction du temps**, chez les experts et les novices. Les analyses de corrélation ont été effectuées à partir de ces courbes. On note la modification des relations spatio-temporelles entre les trois articulations au cours de l'expertise.

# Les théories dynamiques de l'apprentissage moteur

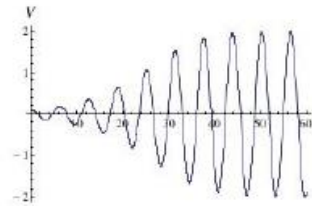
Nourrit et al. (2003) : le simulateur de ski (13 semaines d'apprentissage)

Passage d'une dynamique d'oscillateur harmonique de type Rayleigh (chaotique – débutant) à Van der Pol (stable – expert)



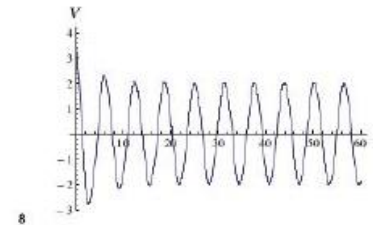
## Rayleigh - van der Pol

$$\ddot{V} - 0.2(1 - V^2)\dot{V} + V = 0$$



$$V(0) = 0.1, \quad \dot{V}(0) = 0$$

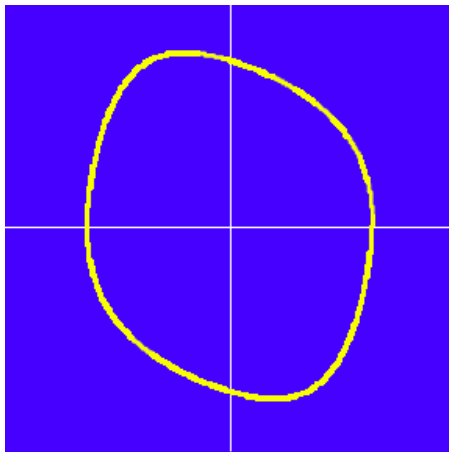
$$V(0) = 4, \quad \dot{V}(0) = -4$$



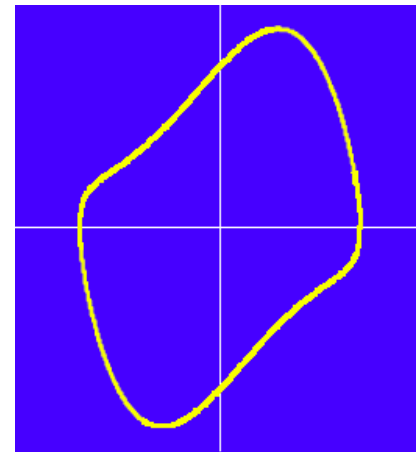
# Les théories dynamiques de l'apprentissage moteur

Nourrit et al. (2003) : le simulateur de ski (13 semaines d'apprentissage)

Passage d'une dynamique d'oscillateur harmonique de type Rayleigh (chaotique – débutant) à Van der Pol (stable – expert)



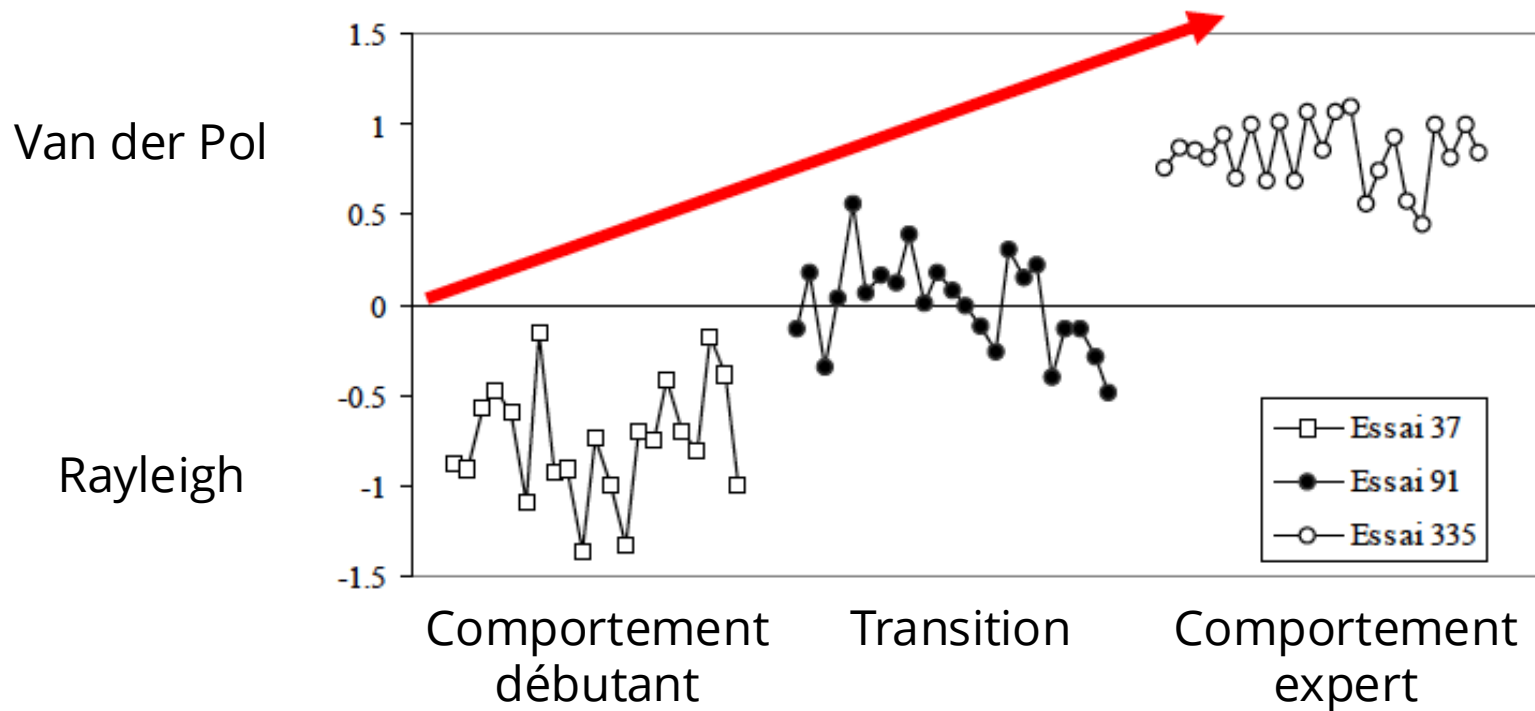
Rayleigh  
(débutant)



Van der Pol  
(expert)

# Les théories dynamiques de l'apprentissage moteur

Évolution cycle-à-cycle de l'amortissement dans trois essais caractéristiques

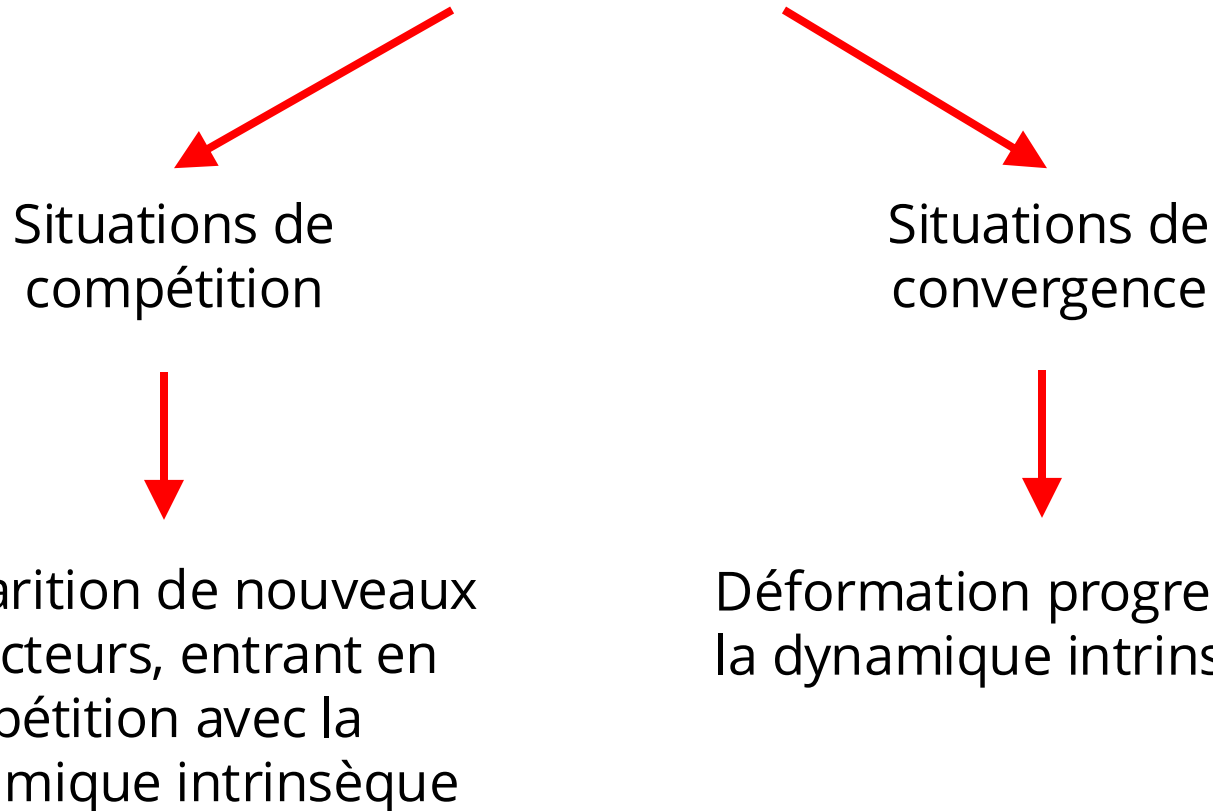


# Les théories dynamiques de l'apprentissage moteur

- L'apprentissage est la mise en place d'une nouvelle structure de coordination par l'apparition d'un nouvel attracteur plus efficient
- L'apprentissage est **une transition de phase** :
  - Déstabilisation de la coordination spontanée
  - Stabilisation de la nouvelle coordination

# Les théories dynamiques de l'apprentissage moteur

Deux types de situations d'apprentissage



# Les théories dynamiques de l'apprentissage moteur

Mise en pratique ....

- Identifier les états **préférentiels stables** afin de savoir ce qu'il faut déstabiliser et modifier pour passer à un autre état plus opérationnel
- Identifier les **variables de contrôle** qui permettent de faire passer l'élève d'un état à un autre
- Les débutants ne partent pas de rien : Ils possèdent des états préférentiels sur lesquels ils peuvent s'appuyer pour réaliser les tâches



# Les théories dynamiques de l'apprentissage moteur

Fonctionne très bien sur des coordinations simples (bi-doigts, bi-mains) mais moins évident sur des habiletés complexes

Exemple : L'apprentissage du javelot (Beaubren & Judey, 2001)

- Dynamique spontanée : le lancer à l'amble
- Nouvel attracteur : lancer jambe opposée au bras lanceur



# Les théories dynamiques de l'apprentissage moteur

Cet article propose une approche nouvelle des problèmes liés à l'enseignement ou à l'entraînement du lancer du javelot, et se veut une contribution à la réflexion générale disciplinaire.



## **APPROCHE DYNAMIQUE ET APPRENTISSAGE DU LANCER DU JAVELOT**

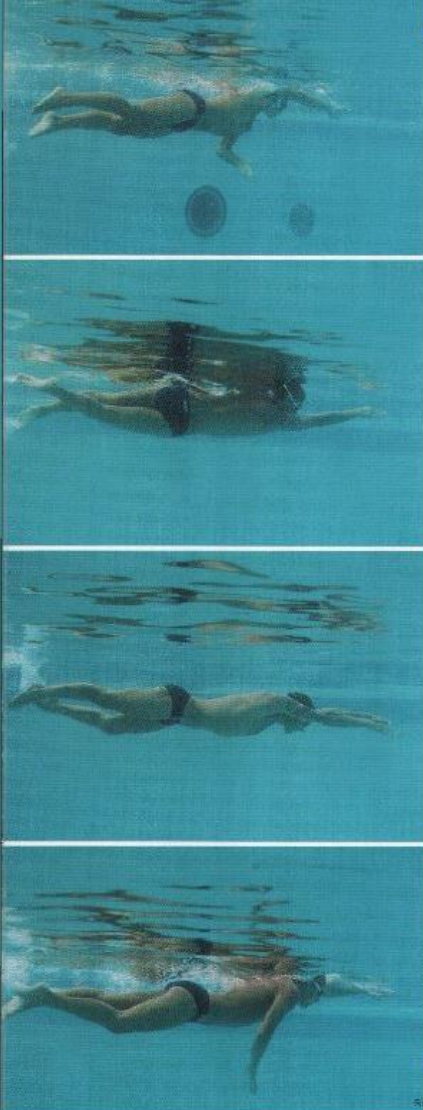
PAR F. BEAUBRUN, P. JUDEY

### **ATHLÉTISME**



# Les théories dynamiques de l'apprentissage moteur

Approches dynamique et cognitive dans l'apprentissage d'habiletés motrices en EPS (Temprado, 2004)



Les pratiques pédagogiques et les contenus de formation des étudiants en STAPS accordent une grande place aux théories du contrôle et de l'apprentissage moteur. Depuis plusieurs années, ce sont les théories cognitives prescriptives qui ont servi quasi exclusivement de cadre de référence. L'approche dynamique des coordinations motrices, ou approche « émergente », apparue depuis quelques années dans le champ des recherches en STAPS, est radicalement différente dans ses présupposés et ses concepts, de l'approche classique. Elle est porteuse d'idées nouvelles dans la façon d'envisager la motricité coordonnée et l'apprentissage moteur. Cet article a pour but de présenter brièvement les principaux concepts de cette approche et ses prolongements supposés pour l'apprentissage des habiletés motrices.

## APPROCHE DYNAMIQUE DES COORDINATIONS MOTRICES, PROLONGEMENTS POUR L'APPRENTISSAGE DES HABILÉTÉS MOTRICES EN EPS

PAR J.-J. TEMPRADO

Les coordinations au centre d'une nouvelle approche de la motricité humaine

Dans la plupart des situations sportives, le système perceptivo-moteur permet d'assembler et de faire coopérer des ensembles musculo-articulaires et segmentaires a priori indépendants (1). Ces coordinations se traduisent par des relations temporelles et spatiales stables et reproductibles entre les composants du système d'action à coordonner. Les invariants spatio-temporels sont en quelque sorte la « signature » de la coordination produite. Ils permettent de percevoir et de différencier aisément les patrons de coordination utilisés dans les différentes situations (exemples : le pas, le trot ou le galop chez l'animal).

Dans l'approche cognitive, ces invariants sont considérés comme l'expression des commandes spécifiques contenues dans les programmes moteurs stockés par le système nerveux du sujet et « prescrites » aux segments qui composent le système d'action utilisé. S'appuyant sur les sciences de la complexité ou sciences de la

PHOTOS : STEPHANE LAMAZZ

45

Revue EPS n°305 Janvier-Février 2004 c. Editions EPS. Tous droits de reproduction réservés.

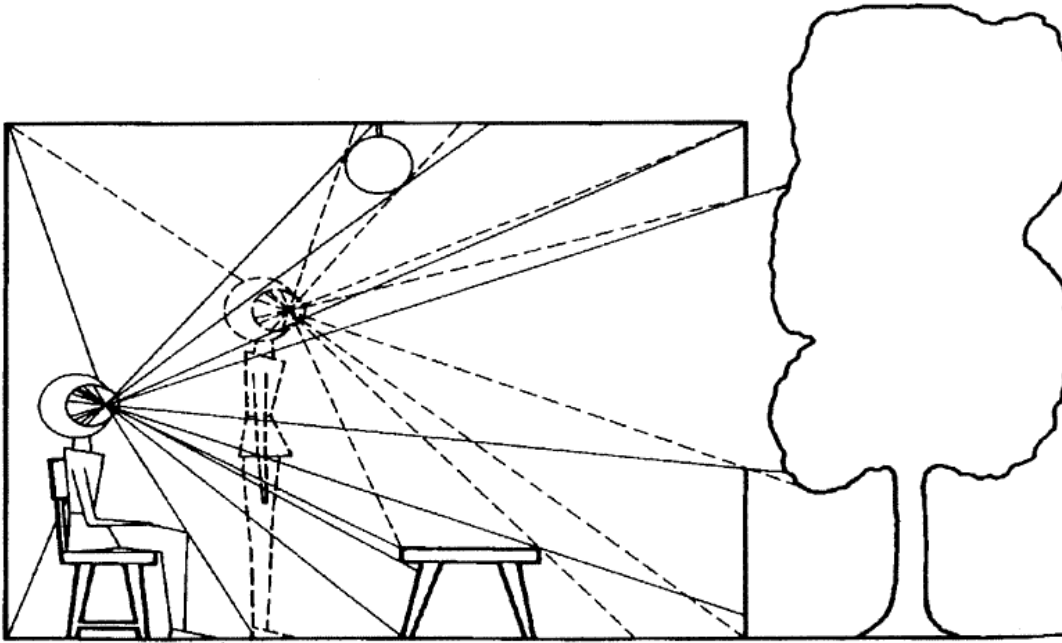
# Les théories écologiques de l'apprentissage moteur

L'apprentissage chez les écologistes :

- Pas besoin d'avoir une référence préalable (PMG, schéma...)
- Pas de coût cognitif sur les opérations. Lien direct entre information et motricité
- C'est la mise en place des bonnes lois de contrôle, c'est-à-dire la capacité à réguler visuellement un geste complexe
- Il s'agit donc de trouver le paramètre régulateur dans la motricité et la variable visuelle couplée

# Les théories écologiques de l'apprentissage moteur

Flux optique : changement de configuration optique au point d'observation



Source : d'après Gibson, 1979.

**Configurations optiques obtenues en deux points d'observation distincts.** La configuration optique correspond au patron de lumière structurée obtenu en un point d'observation donné. La configuration optique peut être également définie par l'ensemble des angles sous-tendus au point d'observation considéré par les contours des différentes surfaces de l'environnement.



« Perception of the world and of the self go together and only occur over time »

Gibson, 1975

# Les théories écologiques de l'apprentissage moteur

**Exemple d'invariant : le foyer d'expansion optique**  
(qui spécifie l'endroit vers lequel on se déplace)



# Les théories écologiques de l'apprentissage moteur

## Flux optique et foyer d'expansion

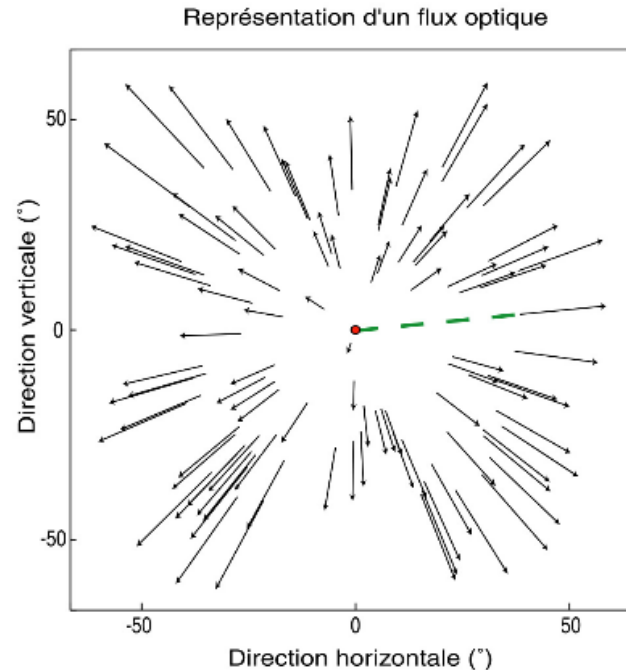
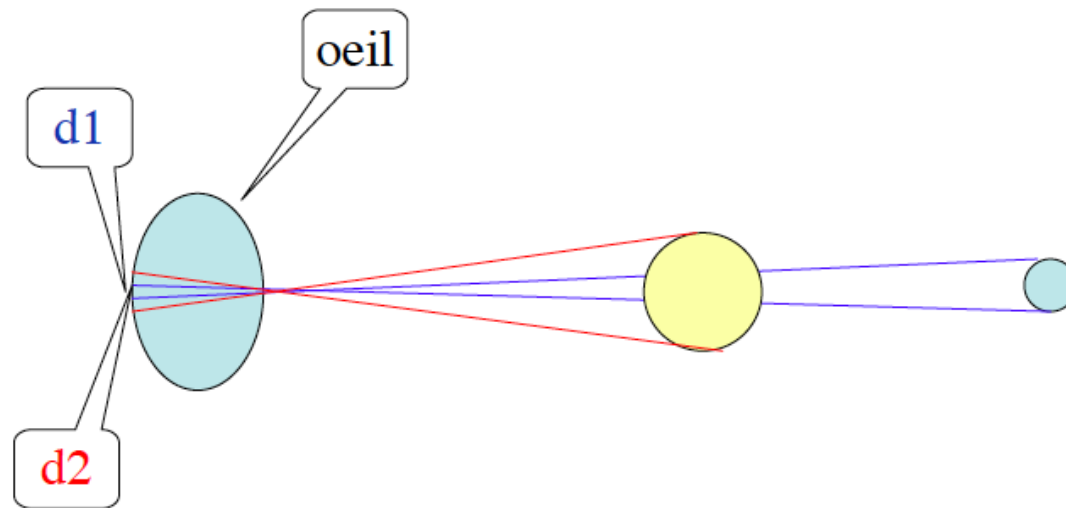


FIG. 1.10 – Représentation d'un flux optique simulant un mouvement vers l'avant. Au centre (en rouge), le foyer d'expansion. Chaque vecteur de mouvement (lignes fléchées, noires) est caractérisé par sa ligne de direction (ligne pointillée, en vert) le reliant au foyer d'expansion. Chacun de ces vecteurs représente le mouvement visuel provoqué par le déplacement de l'observateur.

# Les théories écologiques de l'apprentissage moteur

Exemple : La projection rétinienne



Les objets se projettent sur la rétine et la taille de la projection rétinienne dépend donc de la distance de l'objet par rapport à l'œil



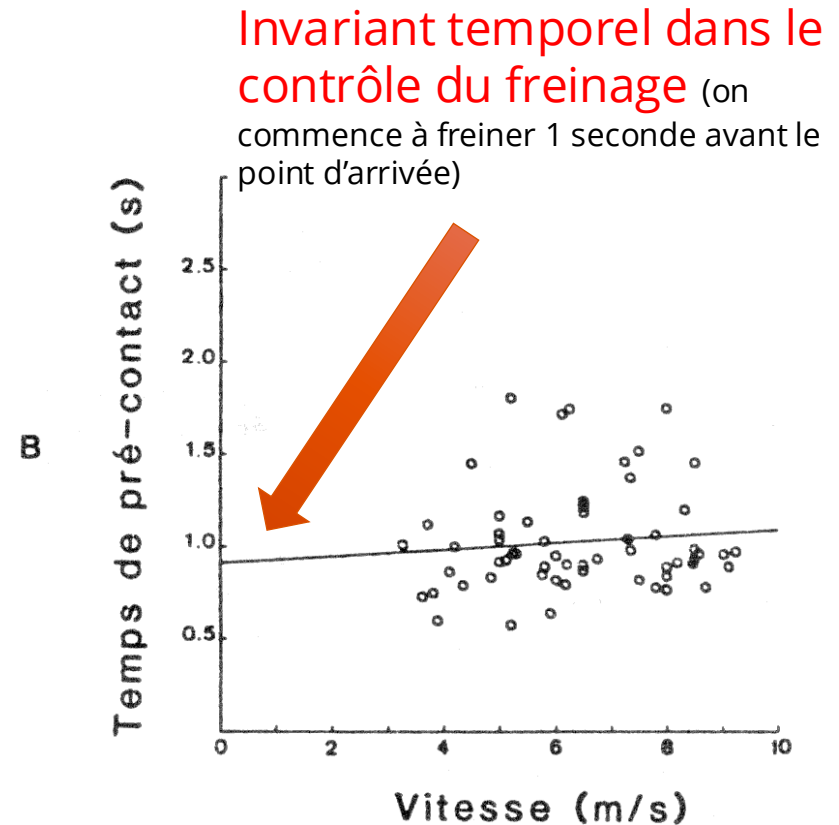
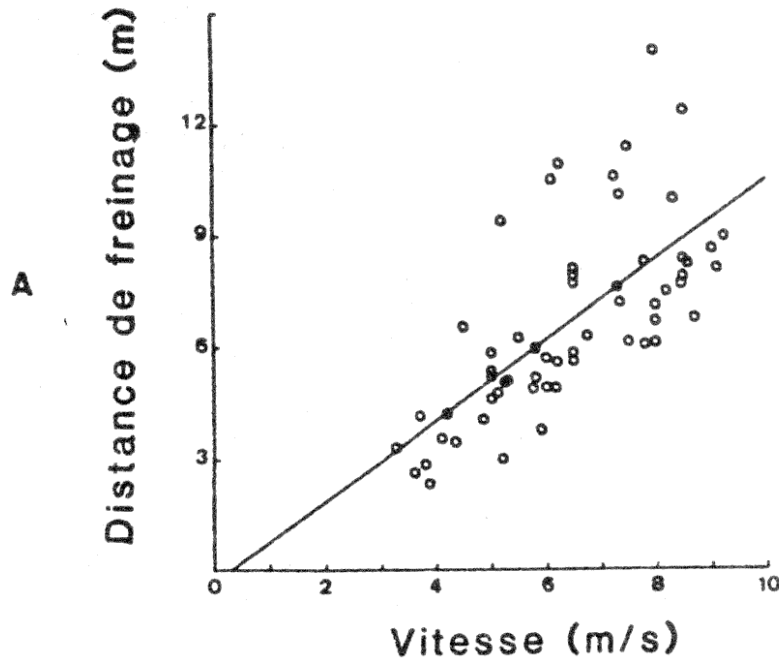
# Les théories écologiques de l'apprentissage moteur

Le temps avant contact (Lee, 1976 ; Lee et al., 1985)

- Durée séparant l'objet de l'œil à un instant  $t$  est associée à la modification de la taille de la projection de l'objet sur la rétine
- Pas de calculs (théories cognitives) mais **directement accessible** grâce à la **variable optique tau ( $\tau$ ) (appelée aussi invariant optique)**
- Tau est égale à l'inverse de la vitesse d'expansion de l'image rétinienne de l'objet

**Interception ou évitement d'un objet déterminé par la variable optique tau**

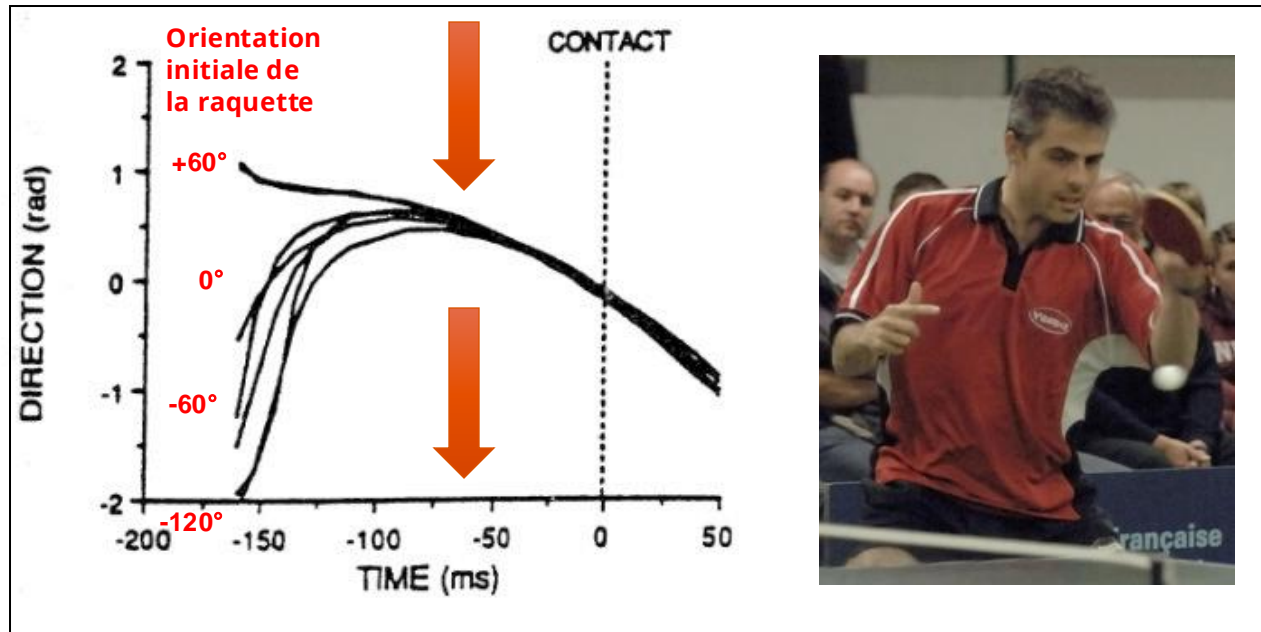
# Les théories écologiques de l'apprentissage moteur



*Relation entre la distance de freinage et la vitesse de course (A) et entre le temps de pré-contact mesuré (TC) et la vitesse de course (B) (d'après Laurent, 1987).*

# Les théories écologiques de l'apprentissage moteur

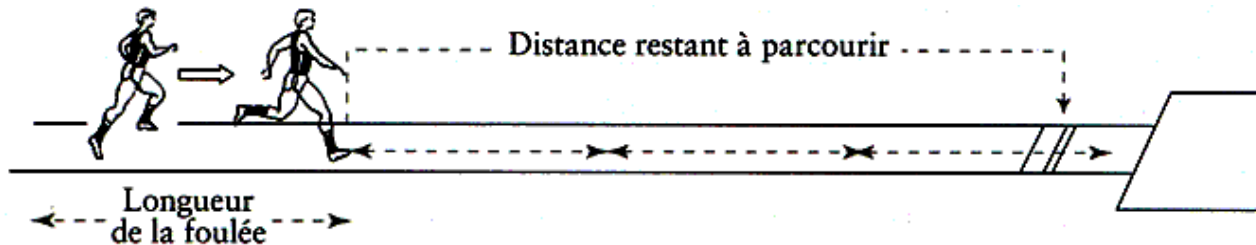
Le couplage est crucial vers la toute fin du geste



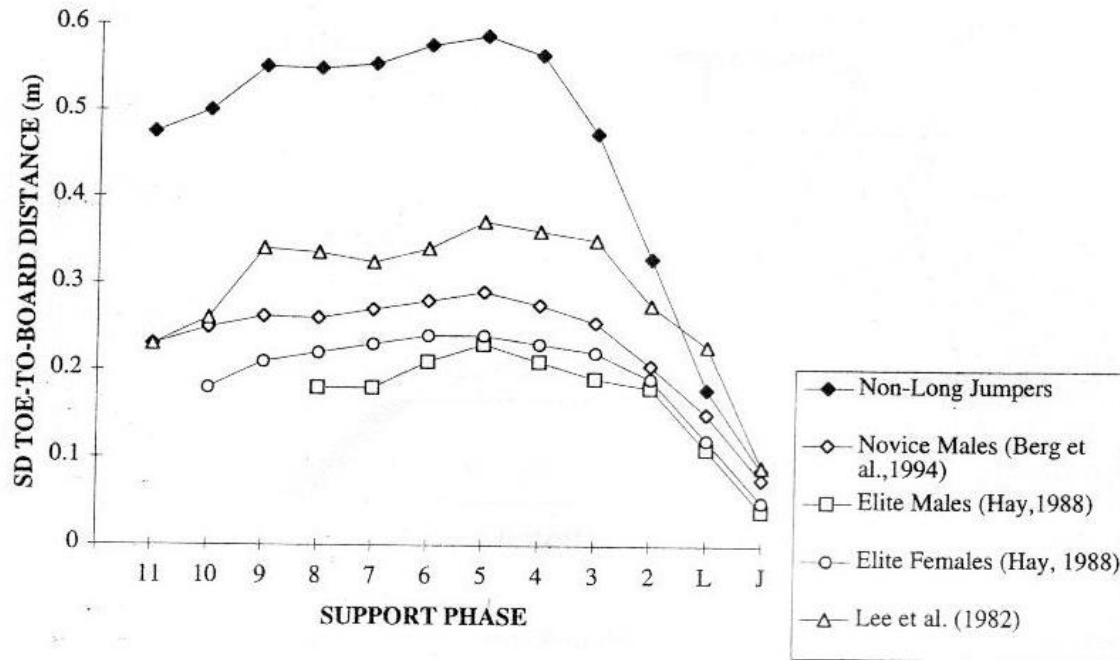
Wieringen & Bootsma (1990)

# Les théories écologiques de l'apprentissage moteur

Devenir expert : savoir utiliser la loi de contrôle adaptée pour l'action  
Tau et la course d'élan au saut en longueur



# Les théories écologiques de l'apprentissage moteur



**Figure 4** Mean standard deviation of toe-board distance in the run-up for non-long jumpers, novices and elite long jumpers. Data adapted from Lee *et al.* (1982), Hay (1988) and Berg *et al.* (1994). L = last; J = jump.

# Les théories écologiques de l'apprentissage moteur

Apprendre à percevoir l'action adaptée offerte par la relation sujet-environnement (**affordance**)

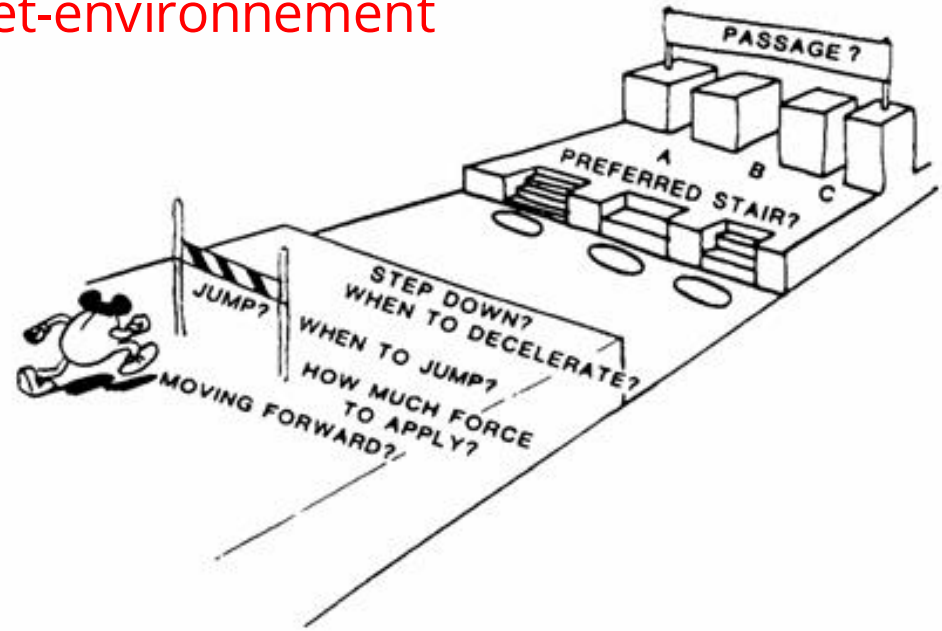
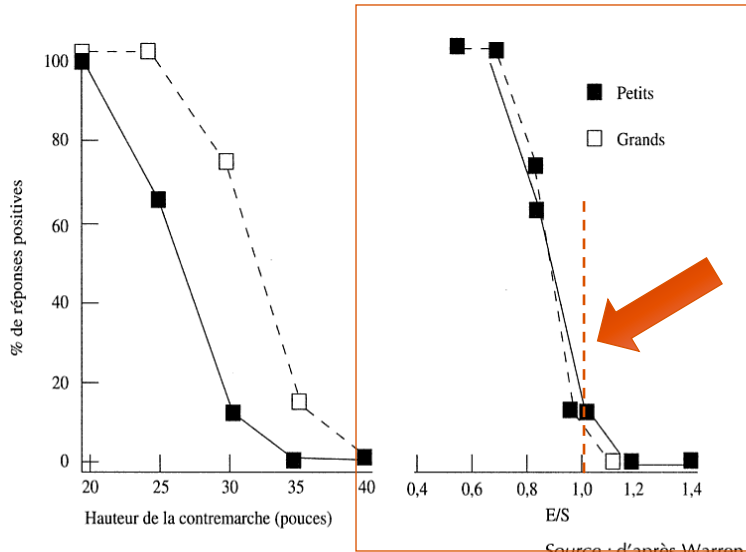


Figure 1.5. Illustration de quelques problèmes posés par la disposition des surfaces texturées de l'environnement auxquels un sujet doit faire face lorsqu'il se déplace (d'après Turvey & Kugler, 1984, p. 375, figure 1).

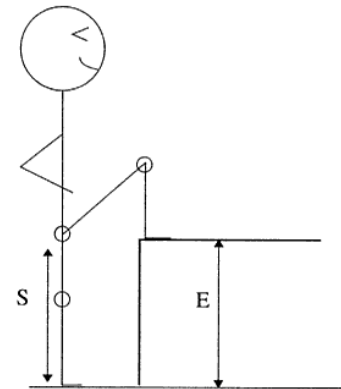
# Les théories écologiques de l'apprentissage moteur



Quand  $E/S > 1$  (c-à-d quand  $E > S$ ), on passe quasi-systématiquement du mode bipédique au mode quadrupédique pour monter les marches

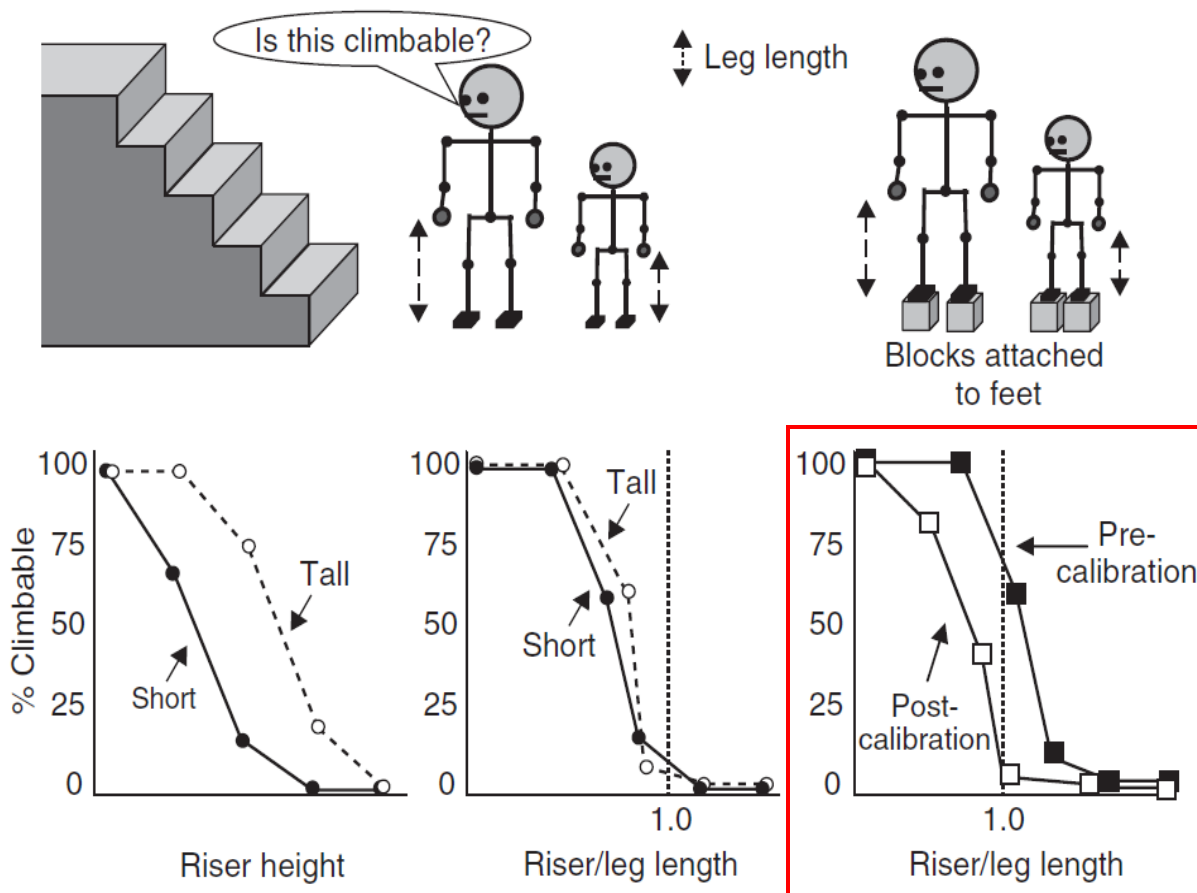


**Jugements des sujets lorsqu'il leur était demandé de déterminer si l'escalier qu'ils avaient devant leurs yeux pouvait être monté en mode bipédique** (i.e., sans utiliser les mains). Les figures représentent les pourcentages de réponses positives chez des sujets grands et petits. La hauteur de la contremarche est exprimée dans une échelle de mesure extrinsèque (figure de gauche) et dans une échelle de mesure intrinsèque (figure de droite). Lorsque les jugements des sujets sont exprimés selon une échelle de mesure intrinsèque ( $E/S$ ), ils deviennent parfaitement superposables. Les sujets sont donc bien en mesure de percevoir le point critique.



L'affordance peut être représentée par un nombre sans unité ( $\pi$ ) correspondant au rapport entre une propriété de l'environnement et une propriété du sujet ( $E/S$ ). Lorsqu'un sujet désire monter un escalier, la propriété de l'environnement pourrait correspondre à la hauteur de la contremarche ( $E$ ) et la propriété de l'individu à la longueur de la jambe ( $S$ ).

# Les théories écologiques de l'apprentissage moteur



**FIGURE** Perceived stair climbability. Short and tall individuals perceive the boundary between step-up-on-able and not step-up-on-able at different riser heights but at the same body-scaled ratio of riser height to leg length (Warren, 1984). Blocks attached to the feet of a participant raise the participant's eye-height and change the information for this affordance, such that step-up-on-ability is overestimated prior to the participant recalibrating to a new block + leg action system (Mark, 1987).

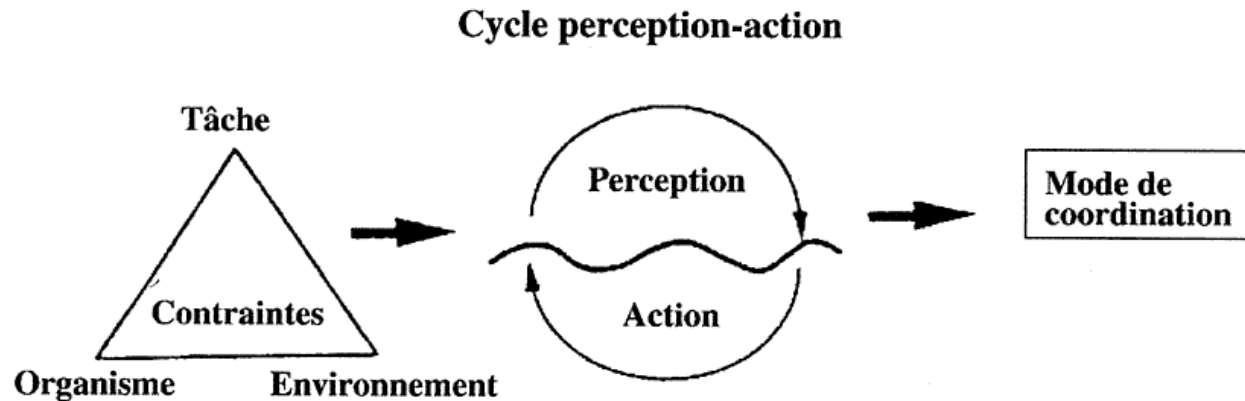
(d'après Richardson, 2008)

Dans une phase initiale (pré-calibration), les participants portant ces blocs aux pieds surestiment leur capacité à monter les marches en mode bipédique

Dans une deuxième phase (post-calibration), après avoir marché avec ces blocs (mais sans monter de marches), les participants montrent des réponses recalées sur l'invariant  $E/S \approx 1$



# Les théories écologiques de l'apprentissage moteur



Source : d'après Newell et McDonald, 1994.

**Dans la perspective physique naturelle**, les modes de coordination sont considérés comme des produits de l'auto-organisation du système neuro-musculo-squelettique, sous l'effet des contraintes.

# Les théories écologiques de l'apprentissage moteur

Limites de l'approche écologique :

- Porte essentiellement sur des habiletés perceptivo-décisionnelles (anticipation-coïncidence)
- Ce sont des habiletés bien maîtrisées, automatisées
- Toutes les habiletés ne sont pas « écologiquement induites »
  - ⇒ Habiletés morphocinétiques (danse, etc.)
  - ⇒ Saisie d'objet chez les non-voyants