

Modèles pour l'Interaction Homme-Machine

INFO5
2024-2025

Renaud Blanch
IIHM - CLIPS-IMAG - UJF
mailto:renaud.blanch@imag.fr
<http://iihm.imag.fr/blanch>

Plan du cours

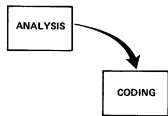


Figure 1. Implementation steps to deliver a small computer program for internal operations.

1. Psychologie cognitive
2. Méthodes de conception
3. Architectures logicielles

1. Psychologie cognitive

- 1.0 Introduction
- 1.1 Modèle du processeur humain
- 1.2 Modèle *Interacting Cognitive Subsystems* (ICS)
- 1.3 Modèle de Rasmussen
- 1.4 Théorie de l'action

1.0 Introduction

La psychologie cognitive

propose des modèles pour :

- **prédire** ; et
- **expliquer**

le comportement du sujet humain.

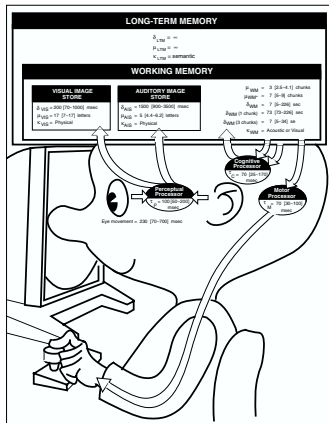
L'ergonomie

prescrit des bonnes pratiques.

Les modèles présentés dans ce cours permettent d'expliquer certaines règles ergonomiques.

Ils permettent de guider des choix de conception d'interface.

1.1 Modèle du processeur humain [Card, 1983]



1.1 Modèle du processeur humain [Card, 1983]

Le sujet humain

est un système de traitement de l'information

régit par des principes.

Ce système est composé de trois sous-systèmes indépendants :

- le système sensoriel ;
- le système moteur ; et
- le système cognitif.

Chaque sous-système comprend :

- un processeur ; et
- une mémoire.

1.1 Modèle du processeur humain [Card, 1983]

Le système sensoriel

est responsable de la perception.

Le système moteur

est responsable des mouvements.

Le système cognitif

est responsable du raisonnement et des prises de décisions.

Les processeurs

sont caractérisés par τ , leur **temps de cycle** (τ_s , τ_m , τ_c) qui inclue le temps d'accès à la mémoire.

Chaque mémoire est caractérisée par :

- κ , le **type d'information** mémorisée ;
- μ , sa **capacité** ; et
- δ , sa **persistance** (demi-vie d'un élément).

Système sensoriel

Le système sensoriel comporte :

- un **processeur** de temps de cycle $\tau_s = 100$ [50 ~ 200] ms
- **deux mémoires** spécifiques, l'une **visuelle** (v), l'autre **auditive** (a) liées à la mémoire à court terme du processeur cognitif.

Pour la **mémoire visuelle** :

- $\kappa_v =$ **physique**
- $\mu_v = 17$ [7 ~ 17] “lettres”
- $\delta_v = 200$ [70 ~ 1000] ms

Pour la **mémoire auditive** :

- $\kappa_a =$ **physique**
- $\mu_a = 5$ [4.4 ~ 6.2] “lettres”
- $\delta_a = 1500$ [900 ~ 3500] ms

Système sensoriel

Le **codage en mémoire sensorielle** n'est constitué que d'**attributs physiques**.

Les éléments des mémoires sensorielles passent en **mémoire à court terme** (mémoire de travail du système cognitif) en traversant un **filtre cognitif**.

Système sensoriel

Exemples d'application :

Le **temps interactif** est le temps qui maintient la causalité, celui au cours lequel deux événements apparaissent simultanés : τ_S .

C'est aussi le temps maximal d'exposition de chaque image pour qu'une animation apparaisse fluide :
il faut produire au moins 10 images par seconde.

Système moteur

Le système moteur comporte :

- un **processeur** de temps de cycle $\tau_M = 70$ [30 ~ 100] ms

Ce temps de cycle détermine la performance des mouvements en "boucle ouverte".

Pour les mouvements en "boucle fermée", il faut considérer la constante de temps $\tau_S + \tau_C + \tau_M = 240$ ms.

Système moteur

Exemples d'application :

La performance du mouvement en boucle ouverte est déterminée par τ_M , celle des corrections par $\tau_S + \tau_C + \tau_M$.

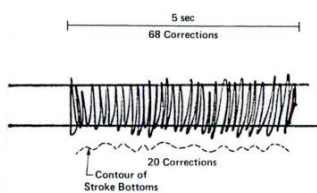


Figure 2.5. Maximum motor output rate.
Marks made by subject moving pen back and forth between two lines as fast as possible for 5 sec.

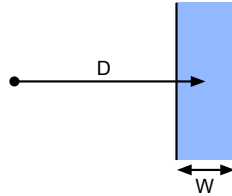
Système moteur

Exemples d'application :

La performance **du pointage d'une cible** peut être expliquée par le temps de cycle du mouvement en boucle fermée.

Elle est régie par la loi de Fitts [1954] :

$$ID = \log_2 \left(\frac{2D}{W} \right)$$
$$MT = a + b \times ID$$



Système moteur - loi de Fitts [1954]

Hypothèse

Le mouvement est constitué de sous-mouvements dont l'erreur est proportionnelle à l'amplitude.

L'**erreur après le premier mouvement** est alors $\varepsilon \times D$, c'est donc la nouvelle amplitude à parcourir.

Après le n^{ième} mouvement, l'erreur est $\varepsilon^n D$.

Le processus s'arrête quand l'erreur commise est inférieure à la précision requise pour atteindre la cible, soit la moitié de sa largeur.

On a alors : $n = -\frac{\log_2 \left(\frac{2D}{W} \right)}{\log_2(\varepsilon)}$ le nombre de sous-mouvements.

Si chaque sous-mouvement prend un temps $\tau_S + \tau_C + \tau_M$, il vient :

$$MT = -\frac{\tau_S + \tau_C + \tau_M}{\log_2(\varepsilon)} \log_2 \left(\frac{2D}{W} \right)$$

Système cognitif

Le système cognitif comporte :

- **un processeur** de temps de cycle $\tau_C = 70$ [25 ~ 170] ms
- **deux mémoires** spécifiques,
 - l'une à **court terme** ou **de travail** (τ_{CT}),
 - l'autre à **long terme** (τ_{LT}).

Pour la **mémoire à court terme** :

- $K_{CT} =$ **acoustique** ou **visuelle**
- $\mu_{CT} = 3$ [2.5 ~ 4.1] **mnèmes** (ou 7 [5 ~ 9])
- $\delta_{CT} = 7$ [5 ~ 226] s (ou 73 [73 ~ 226])

Pour la **mémoire à long terme** :

- $K_{LT} =$ **sémantique**
- $\mu_{LT} = \infty$
- $\delta_{LT} = \infty$

Principes opératoires

P0. **Recognize-Act Cycle of the Cognitive Processor.** On each cycle of the Cognitive Processor, the contents of Working Memory relate actions associatively linked to them in Long-Term Memory; these actions in turn modify the contents of Working Memory.

P1. **Variable Perceptual Processor Rate Principle.** The Perceptual Processor cycle time t_p varies inversely with stimulus intensity.

P2. **Encoding Specificity Principle.** Specific encoding operations performed on what is perceived determine what is stored, and what is stored determines what retrieval cues are effective in providing access to what is stored.

P3. **Discrimination Principle.** The difficulty of memory retrieval is determined by the conditions that exist in the memory relative to the retrieval cues.

P4. **Variable Cognitive Processor Rate Principle.** The Cognitive Processor cycle time t_c is shorter when greater effort is induced by increased task demands or information loads; it also diminishes with practice.

P5. **Fitts's Law.** The time T_{mov} to move the hand to a target of size S which lies a distance D away is given by:

$$T_{mov} = t_{ph} \log_2(D/S + S); \quad (2.3)$$

where $t_{ph} = 100/270 \sim 105$ msec/deg.

P6. **Power Law of Practice.** The time T_n to perform a task on the n th trial follows a power law:

$$T_n = T_1 n^{-a}; \quad (2.4)$$

where $a = .41 \pm .03$.

P7. **Uncertainty Principle.** Decision time T increases with uncertainty about the judgment or decision to be made:

$$T = t_j H;$$

where H is the information-theoretic entropy of the decision and $t_j = 100 [20-157] \text{ msec/bit}$. For n equally probable alternatives (called Hick's Law), $H = \log_2(n + 1)$.

$$H = \sum_{i=1}^n p_i \log_2(1/p_i); \quad (2.5)$$

For n alternatives with different probabilities p_i of occurrence, $H = \sum_{i=1}^n p_i \log_2(1/p_i) + 1$.

P8. **Rationality Principle.** A person acts so as to attain his goals through rational action, given the structure of the task and his inputs of information and bounded by limitations on his knowledge and processing ability.

Goals \rightarrow Task \rightarrow Operators \rightarrow Inputs
 \downarrow Knowledge \rightarrow Processes \rightarrow Behavior

P9. **Problem-Space Principle.** The rational activity in which people engage to solve a problem can be described in terms of (1) a set of states of knowledge, (2) operators for changing one state into another, (3) constraints on applying operators, and (4) control knowledge for deciding which operator to apply next.

Figure 2.2. The Model Human Processor—principles of operation.

- le processeur cognitif suit un cycle “reconnaissance-action”.
- le temps de cycle du processeur sensoriel dépend de l'intensité des stimuli.
- la difficulté de retrouver une information est liée au nombre de candidats répondants aux mêmes indicateurs d'accès.
- pour atteindre un objectif, l'individu agit de manière rationnelle en fonction du but, de la tâche, et de sa connaissance.

Principes opératoires

P0. **Recognize-Act Cycle of the Cognitive Processor.** On each cycle of the Cognitive Processor, the contents of Working Memory relate actions associatively linked to them in Long-Term Memory; these actions in turn modify the contents of Working Memory.

P1. **Variable Perceptual Processor Rate Principle.** The Perceptual Processor cycle time t_p varies inversely with stimulus intensity.

P2. **Encoding Specificity Principle.** Specific encoding operations performed on what is perceived determine what is stored, and what is stored determines what retrieval cues are effective in providing access to what is stored.

P3. **Discrimination Principle.** The difficulty of memory retrieval is determined by the conditions that exist in the memory relative to the retrieval cues.

P4. **Variable Cognitive Processor Rate Principle.** The Cognitive Processor cycle time t_c is shorter when greater effort is induced by increased task demands or information loads; it also diminishes with practice.

P5. **Fitts's Law.** The time T_{mov} to move the hand to a target of size S which lies a distance D away is given by:

$$T_{mov} = t_{ph} \log_2(D/S + S); \quad (2.3)$$

where $t_{ph} = 100/270 \sim 105$ msec/deg.

P6. **Power Law of Practice.** The time T_n to perform a task on the n th trial follows a power law:

$$T_n = T_1 n^{-a}; \quad (2.4)$$

where $a = .41 \pm .03$.

P7. **Uncertainty Principle.** Decision time T increases with uncertainty about the judgment or decision to be made:

$$T = t_j H;$$

where H is the information-theoretic entropy of the decision and $t_j = 100 [20-157] \text{ msec/bit}$. For n equally probable alternatives (called Hick's Law), $H = \log_2(n + 1)$.

$$H = \sum_{i=1}^n p_i \log_2(1/p_i); \quad (2.5)$$

For n alternatives with different probabilities p_i of occurrence, $H = \sum_{i=1}^n p_i \log_2(1/p_i) + 1$.

P8. **Rationality Principle.** A person acts so as to attain his goals through rational action, given the structure of the task and his inputs of information and bounded by limitations on his knowledge and processing ability.

Goals \rightarrow Task \rightarrow Operators \rightarrow Inputs
 \downarrow Knowledge \rightarrow Processes \rightarrow Behavior

P9. **Problem-Space Principle.** The rational activity in which people engage to solve a problem can be described in terms of (1) a set of states of knowledge, (2) operators for changing one state into another, (3) constraints on applying operators, and (4) control knowledge for deciding which operator to apply next.

Figure 2.2. The Model Human Processor—principles of operation.

- la loi de Fitts régit le temps de mouvement.
- la loi de Hick régit le temps de choix lors d'alternatives.
- la “loi de puissance de l'apprentissage” (*power law of practice*) régit l'évolution de la performance au cours de l'apprentissage.

1.1 Modèle du processeur humain [Card, 1983]

évaluation du modèle

Le modèle du processeur humain :

- fournit un **cadre fédérateur** pour diverses connaissances en psychologie ;
- utilise une **terminologie “informatique”** ; et
- introduit les fondations d'une **psychologie “appliquée”**.

Cependant,

il ne fournit pas le niveau d'abstraction correspondant aux besoins du concepteur d'IHM, et il ne considère qu'un utilisateur “parfait”.

1.2 Modèle ICS [Barnard]

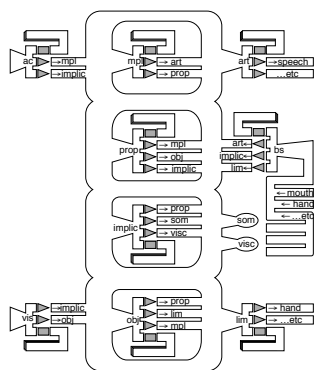


Fig 2.6: the complete set of mental levels and transformations

1.2 Modèle ICS [Barnard]

Le sujet humain

est un ensemble de sous-systèmes cognitifs interagissants.

Chaque sous-système est caractérisé par **le type de représentation mentale** qu'il manipule. Certains types de représentation mentale peuvent être **transformés** en d'autres types **par des processus cognitifs** propres à chaque sous-système.

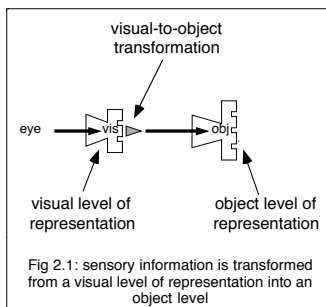


Fig 2.1: sensory information is transformed from a visual level of representation into an object level

1.2 Modèle ICS [Barnard]

Le sujet humain

est un ensemble de sous-systèmes cognitifs interagissants.

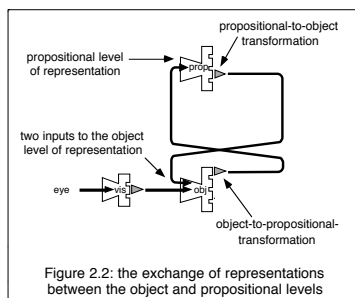
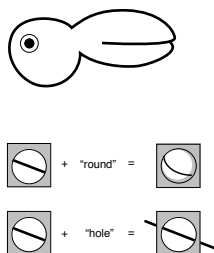


Figure 2.2: the exchange of representations between the object and propositional levels



1.2 Modèle ICS [Barnard]

Chaque sous-système

reçoit en entrée des représentations, peut les copier en mémoire, et peut les transformer en représentations de niveaux différents.

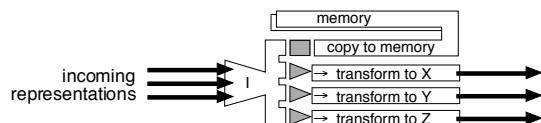


Fig 2.7: the components of each cognitive subsystem

1.2 Modèle ICS [Barnard]

Le modèle ICS se décompose en 9 sous-systèmes :

- acoustique ;
- visuel ;
- état physique (proprioceptif) ;
- morphono-lexical ;
- objet ;
- propositionnel ;
- implicationnel ;
- articulatoire ;
- mouvement.

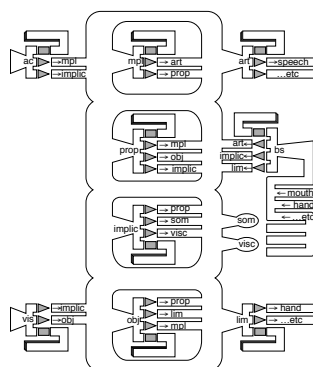


Fig 2.6: the complete set of mental levels and transformations

1.2 Modèle ICS [Barnard]

Le modèle ICS se décompose en 9 sous-systèmes dont 3 **sensoriels** :

Le sous-système **acoustique** concerne ce que l'on entend à l'extérieur de nous.

Le sous-système **visuel** concerne ce que l'on voit à l'extérieur de nous.

Le sous-système **“état physique”** (proprioceptif) concerne ce que l'on sent à l'intérieur du corps.

1.2 Modèle ICS [Barnard]

Le modèle ICS se décompose en 9 sous-systèmes dont 3 sensoriels, 2 **perceptuels** :

Le sous-système **morphono-lexical** concerne ce que l'on entend dans notre tête, notre voix intérieure.

Le sous-système **objet** concerne ce que l'on voit dans notre tête, nos images intérieures.

1.2 Modèle ICS [Barnard]

Le modèle ICS se décompose en 9 sous-systèmes dont 3 sensoriels, 2 perceptuels, 2 **centraux** :

Le sous-système **propositionnel** concerne nos connaissances factuelles du monde.

Le sous-système **implicationnel** concerne nos impressions, nos sentiments.

1.2 Modèle ICS [Barnard]

Le modèle ICS se décompose en 9 sous-systèmes dont 3 sensoriels, 2 perceptuels, 2 centraux, et 2 **effecteurs** :

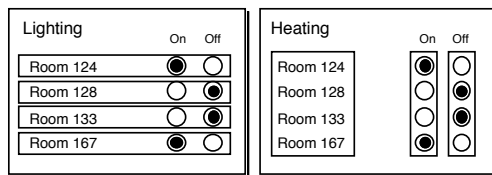
Le sous-système **articulatoire** concerne les mouvements "expressifs" : la parole, l'écriture.

Le sous-système **mouvement** concerne nos mouvements "physiques".

1.2 Modèle ICS [Barnard]

exercice

Dessiner le diagramme structurel des panneaux de contrôle.
Dessiner les diagrammes de transition pour allumer lumière et climatisation dans la salle 133.

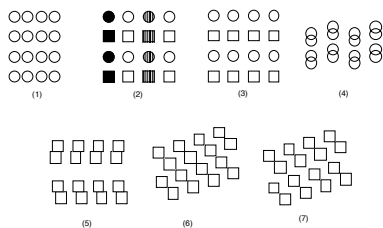


1.2 Modèle ICS [Barnard]

Le regroupement

des objets peut être la conséquence de leur :

- position ;
- couleur ;
- forme ;
- texture ;
- alignement ;
- taille ...



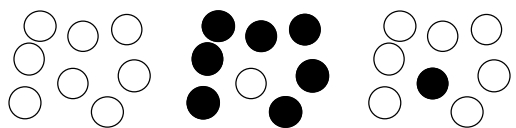
1.2 Modèle ICS [Barnard]

Le sujet pragmatique

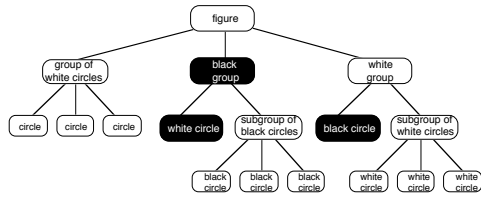
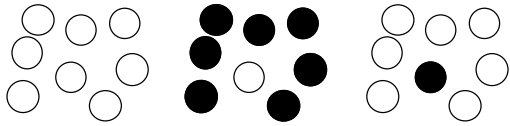
est l'objet saillant d'un groupe

(il attire l'attention par ses caractéristiques visuelles).

Il devient le sujet psychologique quand l'attention se porte sur ce groupe.

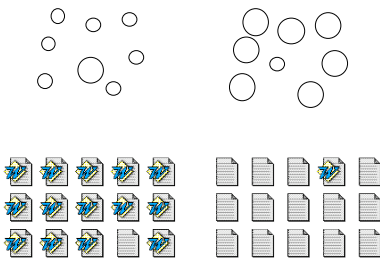


1.2 Modèle ICS [Barnard]



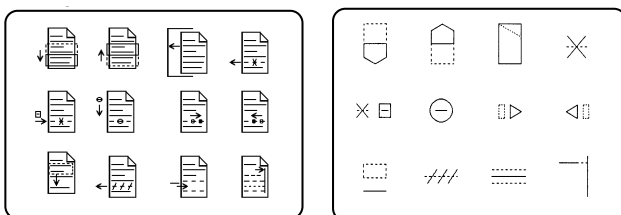
1.2 Modèle ICS [Barnard]

exemples



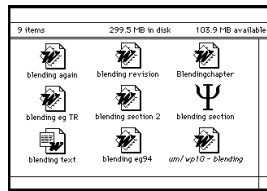
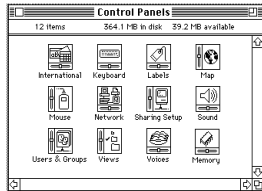
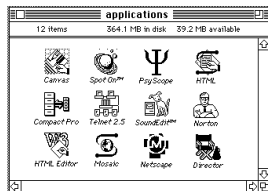
1.2 Modèle ICS [Barnard]

Lorsqu'on utilise des icônes, il faut porter la plus grande attention à leur sujet pragmatique.



1.2 Modèle ICS [Barnard]

exemples



1.2 Modèle ICS [Barnard]

Les **techniques d'analyses structurelles** d'ICS valent pour tous les niveaux de représentation des sous-systèmes.

Les **diagrammes structurel** et de **transitions** peuvent donc être utilisés pour analyser les interfaces aux niveau purement visuel, mais aussi au niveau “tâches”.

1.2 Modèle ICS [Barnard]

évaluation du modèle

Le modèle ICS :

- fournit un cadre plus détaillé que le “processeur humain” de Card et al. ;
- prend en compte plusieurs modalités ;
- propose des règles de structuration pour les interfaces graphiques.

Cependant, il est difficile à appliquer car il comporte un grand nombre de règles et il nécessite des connaissances en psychologie.

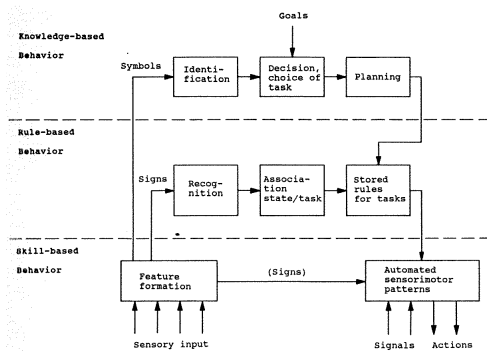


Figure 9.1. Simplified diagram of the three levels of control of human actions.

évaluation du modèle

Le modèle de Rasmussen :

- fournit un cadre simple pour la modélisation des niveaux d'expertise de l'utilisateur ; et
- complète la théorie de l'action de Norman.

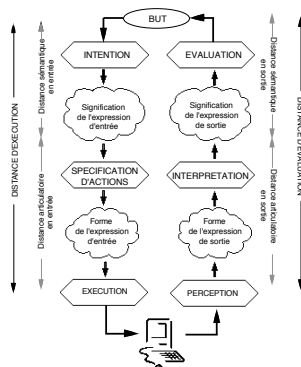


Fig. 3.3 : Distances sémantiques et distances articulatoires.

1.4 Théorie de l'action [Norman, 1986]

La **théorie de l'action** de Norman [1986] est **une** théorie sur les processus cognitifs sous-jacents à la réalisation d'une tâche, présentée dans "*User Centered System Design*".

L'**individu élabore des modèles conceptuels**, reflets de son comportement.

1.4 Théorie de l'action [Norman, 1986]

Un **modèle conceptuel** est une **représentation mentale** qui dépend

- de la **connaissance acquise** ;
- de la compréhension de la **situation présente** ;

et qui évolue dans le temps grâce à l'**expérience**.

Plusieurs modèles conceptuels cohabitent :

- celui du **concepteur** à propos du système et de l'utilisateur ;
- celui de l'**utilisateur** à propos du système ; et éventuellement
- celui du **système** à propos de l'utilisateur.

1.4 Théorie de l'action [Norman, 1986]

Le **modèle de conception** est le modèle conceptuel de l'outil.
C'est celui que se forme le concepteur à propos du système et de l'utilisateur.
Il découle d'études de besoins, de la compréhension des tâches et des utilisateurs.

Le **modèle de l'utilisateur** est le modèle conceptuel que se forge l'utilisateur de l'outil qu'il utilise au travers de son image (de son interface).

Le but d'une bonne conception est de construire une image telle que le modèle de l'utilisateur coïncide avec le modèle de conception.

1.4 Théorie de l'action [Norman, 1986]

Dans le cas de l'**outil informatique**, et des programmes "intelligents", un troisième modèle conceptuel peut exister : le **modèle que le système a de l'utilisateur**.

1.4 Théorie de l'action [Norman, 1986]

L'**image** ou l'interface est la **passerelle** entre :

- le **monde physique** du système informatique ; et
- le **monde psychologique** de l'utilisateur.

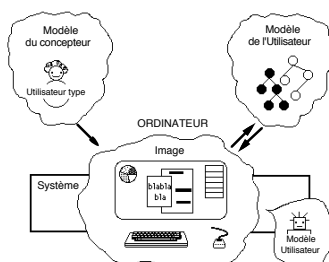


Fig. 3.1 : Modèles conceptuels et notion d'image.

1.4 Théorie de l'action [Norman, 1986]

Le monde **physique** et le monde **psychologique** utilisent des **langages** spécifiques.

Le passage d'un monde à l'autre nécessite la **traduction** d'un langage à l'autre.

Cette traduction est une étape difficile qu'il convient de faciliter.

L'utilisateur modélise le monde en terme de **variables psychologiques ψ** .

Le monde réel se manifeste en termes de **variables physiques ϕ** .

1.4 Théorie de l'action [Norman, 1986]

exemple tiré de [Norman, 1986] :

La **tâche** consiste à **remplir une baignoire** avec de l'eau à une température donnée, la baignoire étant équipée de **2 robinets**, l'un pour l'eau froide, l'autre pour l'eau chaude.

Les variables **psychologiques** sont **d**, le débit de l'eau et **t**, la température du bain.

Les variables **physiques** sont **d_c** et **t_c**, le débit et la température de l'eau chaude, et **d_f** et **t_f**, le débit et la température de l'eau froide.

La traduction ϕ vers ψ s'obtient par :

$$d = d_f + d_c ; \quad t = \frac{d_c \times t_c + d_f \times t_f}{d_f + d_c}$$

1.4 Théorie de l'action [Norman, 1986]

La réalisation d'une tâche comporte **7 étapes**.

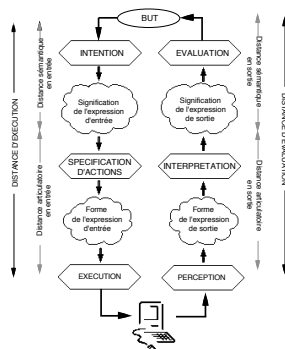


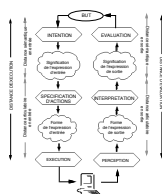
Fig. 3.3 : Distances sémantiques et distances articulatoires.

1.4 Théorie de l'action [Norman, 1986]

1. Établir un but

Un but est la représentation mentale d'un état désiré soit un ensemble de valeurs B_ψ .

L'état du système est caractérisé par des valeurs E_ϕ . Pour pouvoir comparer le but à l'état courant du système, il faut donc traduire cet état physique en variables psychologiques : E_ψ .



1.4 Théorie de l'action [Norman, 1986]

2. Former une intention

La distance entre B_ψ et E_ψ amène à l'intention I_ψ qui est la décision d'agir pour atteindre B en supprimant cette distance.

Il reste à parcourir la distance sémantique qui sépare l'intention psychologique des actions physiques.

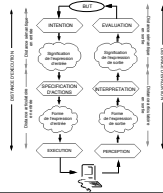


1.4 Théorie de l'action [Norman, 1986]

3. Spécifier la suite d'actions

La suite d'action physiques A_ϕ résulte de la traduction de I_ψ .

La traduction requière la connaissance des correspondances entre variables ψ et ϕ et entre variables ϕ et dispositifs de contrôle.



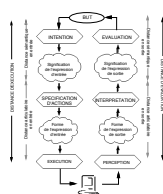
1.4 Théorie de l'action [Norman, 1986]

4. Exécuter la suite d'actions

L'exécution de A_ϕ met essentiellement en jeu le savoir-faire moteur.

5. Percevoir l'état du système

Les valeurs de E_ϕ sont perçues par l'intermédiaires des sens.



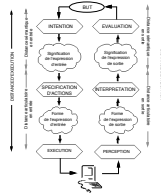
1.4 Théorie de l'action [Norman, 1986]

6. Interpréter l'état actuel

L'interprétation est la phase de traduction de E_ψ en termes de variables psychologiques E_ψ .

7. Évaluer le résultat

La comparaison de E_ψ avec B_ψ peut amener à modifier le plan d'action et à repartir pour un nouveau cycle.



1.4 Théorie de l'action [Norman, 1986]

La théorie de l'action introduit :

- la **distance d'exécution** ; et
- la **distance d'évaluation**.

Elles se décomposent chacune en :

- **distance sémantique** ; et
- **distance articulatoire**.

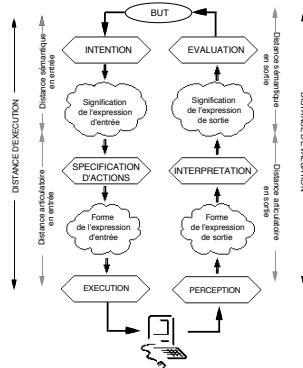


Fig. 3.3 : Distances sémantiques et distances articulatoires.

1.4 Théorie de l'action [Norman, 1986]

En résumé,

l'objectif du concepteur et du réalisateur est de **réduire les distances mentales** par le biais de l'**image du système**.

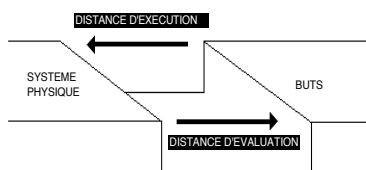


Fig. 3.2 : Les distances d'exécution et d'évaluation.

1.4 Théorie de l'action [Norman, 1986]

évaluation du modèle

La théorie de l'action :

- précise la notion d'état : l'état perçu est la traduction de l'état effectif sous forme de variables psychologiques ;
- prend en compte les erreurs ;
- explique les difficultés des utilisateurs ; et
- identifie les phases où l'utilisateur effectue des interprétations.

Cependant, elle donne peu d'informations sur le travail de l'informaticien pour concevoir et développer des applications intégrant la théorie de l'action.
