

Algorithmes génétiques pour l'architecture embarquée

B. Miramond
ETIS - UCP/Ensea

Plan

- Introduction
- Principe
- Application à la conception de SoC
- Application à l'adaptation de SoC
- Exemple sur les biomorphes

Avant le XVIIIe

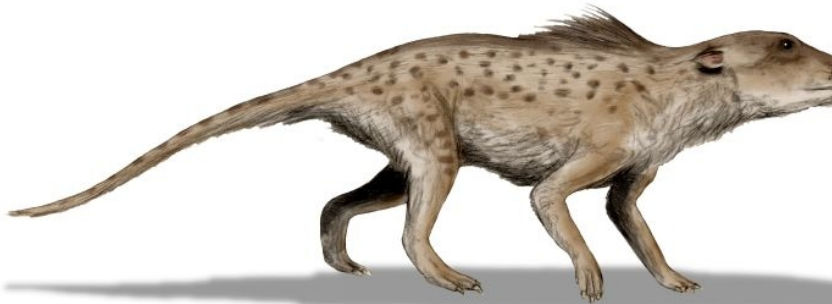
- Selon la thèse de l'archevêque irlandais James Ussher (1650), le monde a été créé le 23 octobre 4004 avant JC à 21 heures !!
- La vie est une génération spontanée; créationnisme
- Les êtres vivants restent inchangés; fixisme



L'homme n'est qu'un aléa de l'histoire universelle

Mais nan ...

- La vie a du tenter des essais pour survivre dans cet environnement changeant
 - De forme
 - De structure
 - D'apparence
 - De mode de reproduction
 - De mode de source d'énergie
 - De mode de locomotion
 - ...
 - À un rythme très lent pour l'individu, celui de l'adaptation génétique



Évolution et adaptation

- Face à un environnement changeant, les êtres vivants ont su, pour survivre, se transformer, s'adapter en multipliant les essais de formes, de structures morphologiques originales.
- Les mécanismes de l'évolution sont donc capables de sélectionner des structures spécifiques répondant à un problème adaptatif posé.

Les pères de l'évolution

- Cuvier (1769-1832) anatomie comparée, paléontologue
- Lamarck (1744-1829) usage et non-usage + hérédité des caractères acquis
- Darwin (1809-1882)

Les 3 i de Darwin

- i. Les galapagos et la speciation allopatrique des pinsons
- ii. La lecture de T. Malthus :
la population évolue selon une progression géométrique
alors que la production (les ressources) suit une
progression arithmétique.
« les aides de l'état ne font que supprimer le principal
obstacle à l'accroissement de la population, c'est-à-dire
la nécessité, pour chacun, de se prendre en charge et
supporter les conséquences de son imprévoyance »
- v. Une lutte entre les individus existe donc pour l'accès
aux ressources

Charles Darwin

- « Si, au milieu des conditions changeantes de l'existence, les êtres organisés présentent des différences individuelles [] s'il se produit, entre les espèces, en raison de la progression géométrique des individus, une lutte sérieuse pour l'existence [] alors [] il serait extraordinaire qu'il ne se soit jamais produit des variations utiles à la prospérité de chaque individu []. Mais, si des variations utiles à un être organisé quelconque se présentent quelquefois, assurément les individus qui en sont l'objet ont la meilleure chance de l'emporter dans la lutte pour l'existence, puis en vertu du principe si puissant de l'hérédité, ces individus tendent à laisser des descendants ayant le même caractère qu'eux.
- J'ai donné le nom de sélection naturelle à ce principe de préservation »

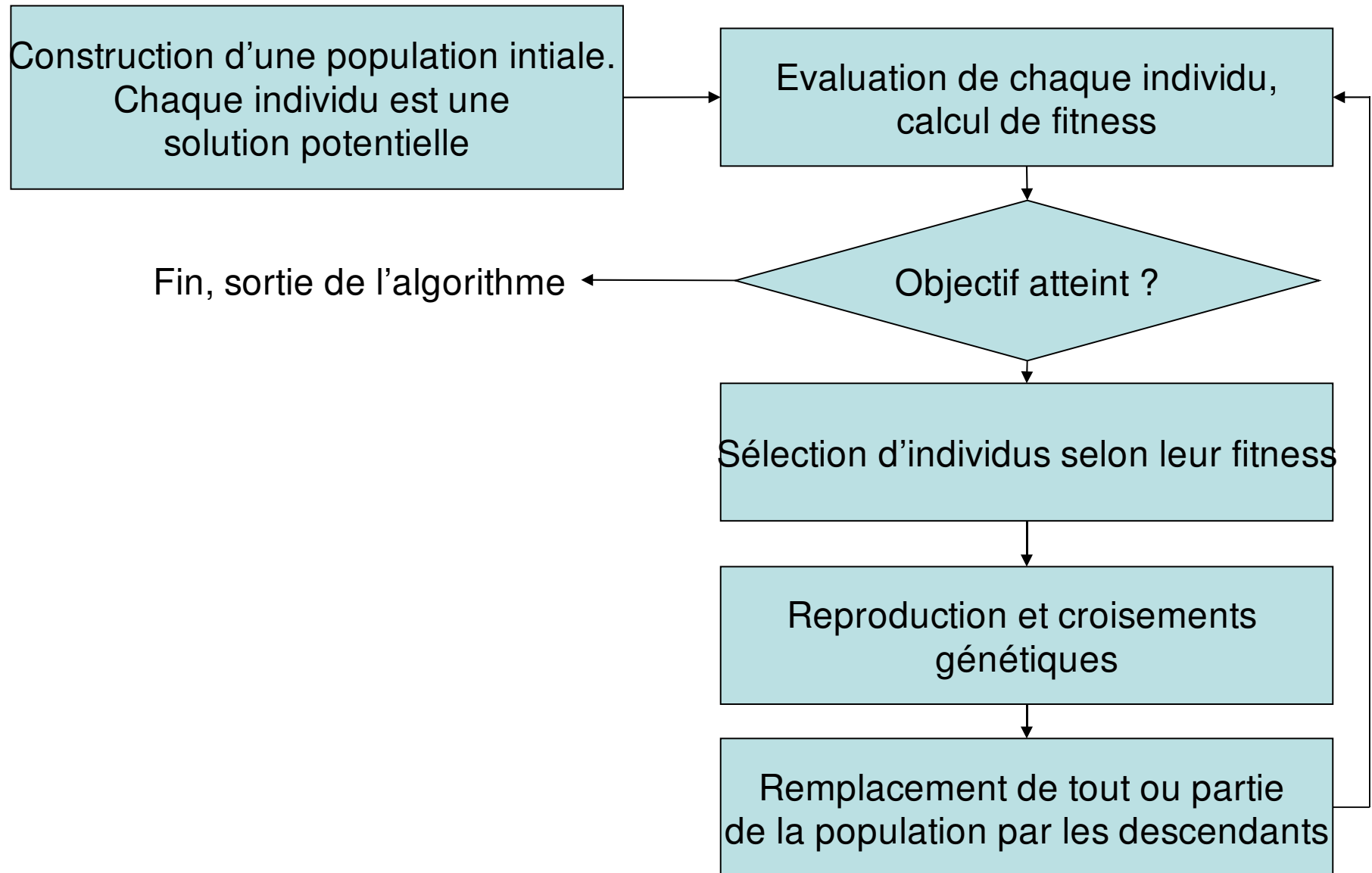
Algorithmes évolutionnistes

- Inspirés des mécanismes de l'évolution naturelle, on y mesure le niveau d'adaptation de différentes configurations génétiques.
- On parle d'évaluation, de fitness ou de niveau d'adaptation
- L'algorithme peut alors être utilisé comme une méthode d'optimisation combinatoire à condition que l'on sache calculer la fonction de coût de chaque individu

Glossaire

- Allèle : gène homologue, mais différent.
- Caryotype : ensemble des chromosomes d'un être humain
- Centromère : partie du chromosome ayant des fonctions essentielles lors de la division cellulaire
- Chromosome : fibre se trouvant dans le noyau de la cellule et contenant les gènes
- Gène : partie d'un chromosome codant un caractère héréditaire (un gène peut coder plusieurs caractères)
- Génome : ensemble des gènes d'un individu
- Génotype : ensemble des composants génétiques d'un individu. Son interprétation conduit à la construction du phénotype
- Phénotype : ensemble des caractères physiques (traduction du génotype)
- Eucaryote : individu dont les cellules sont dotés d'un noyau contenant le matériel génétique
- Dominance : un gène est dominant s'il tend à s'exprimer au détriment de son homologue
- Récessif : un gène récessif ne s'exprime au niveau du phénotype que s'il est présent sur les 2 chromosomes homologues d'un individu diploïde
- Mitose : processus de division cellulaire par lequel la nouvelle cellule reçoit une copie du génome de son parent

Algorithme évolutionnaire



Bestiaire des algorithmes évolutionnaires

- Algorithmes génétiques (J-H. Holland, 1975)
 - Travaille sur le génotype
- Programmation évolutionnaire (L.J. Fogel, 1966)
 - Travaille directement sur le phénotype (notamment le comportement des automates finis)
 - Exemple d'application : <http://www.dipaola.org/evolve/>
- Stratégies évolutionnaires (R. Bienert, I. Rechenberg, H-P. Schwefel, 1960)

Dans la même classe d'algorithmes...

- Les méthodes pseudo-aléatoire appelées aussi méta-heuristiques :
 - Recuit simulé
 - Recherche tabou
 - Algorithme fourmi (par essaim/swarm)

Principe

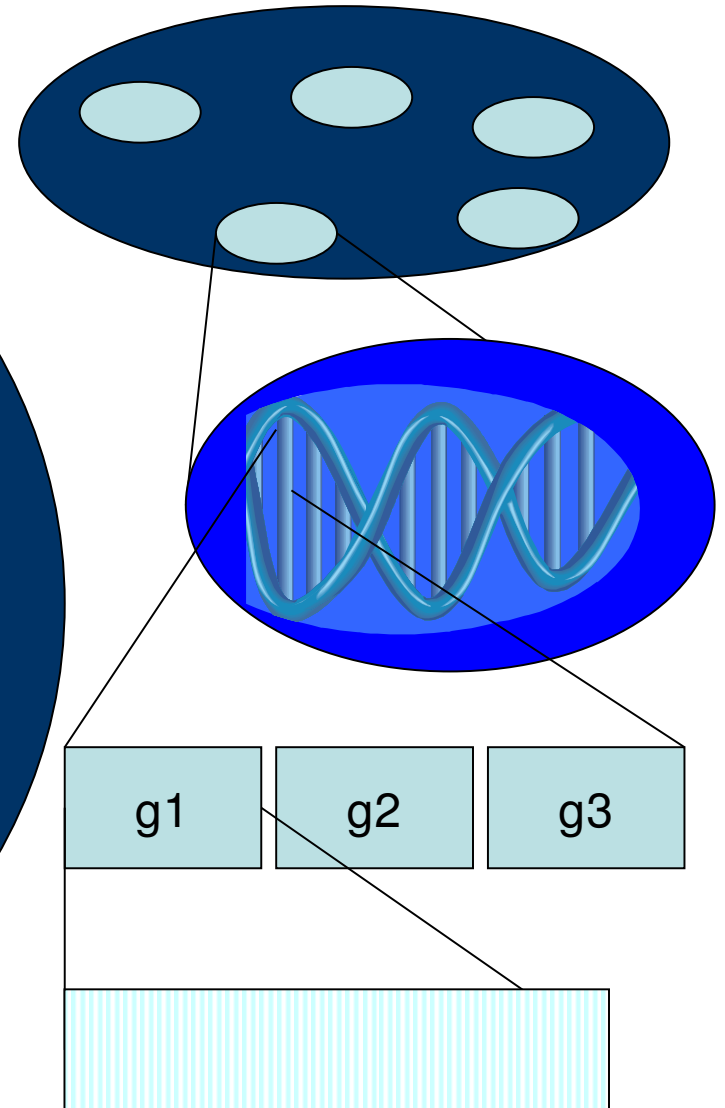
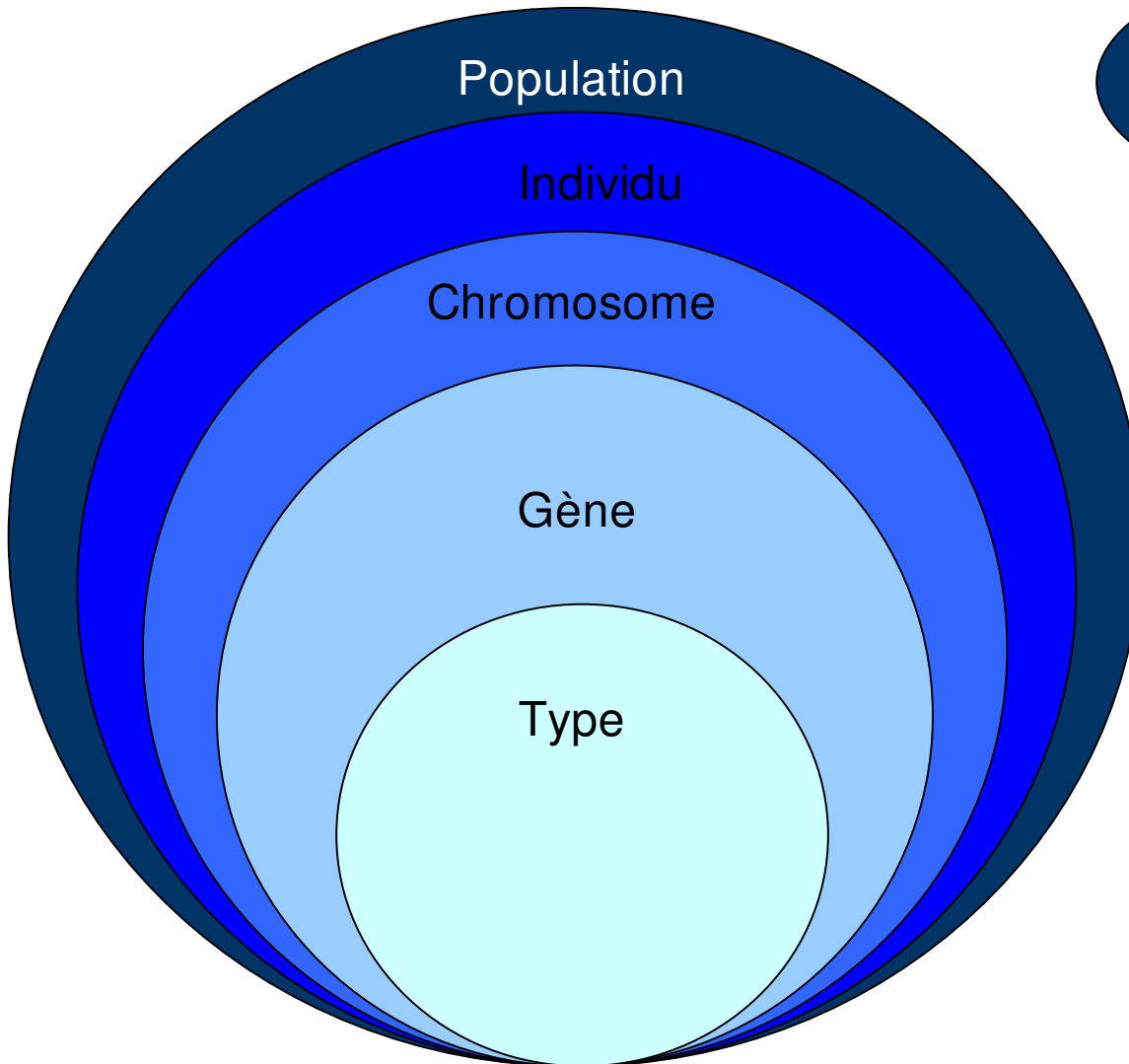
Etapes de l'algorithme

1. Représentation des solutions potentielles du problème que l'on appelle codage
2. Procédure de création d'une population initiale
3. Fonction d'évaluation qui joue le rôle de l'environnement, classant les individus selon leur adaptation
4. Procédure de sélection qui prive les individus mal adaptés de reproduction
5. Une étape de génération utilisant des opérateurs d'évolution qui altèrent la composition des descendants par rapport aux parents
6. Procédure de détection de la convergence

1) Codage

- Le choix d'un codage est très important puisqu'il aura des conséquences sur toutes les phases de l'algorithme
- Le codage dépend du problème traité
- Il doit représenter toutes les caractéristiques qui serviront à l'évaluation du fitness

Hiérarchie génétique



2) Genèse

- La procédure d'initialisation doit être aléatoire et non-déterministe
- La population créée doit aussi être aussi apporter une grande diversité pour permettre une meilleure exploration
- On choisit ici la taille de la population

3) Evaluation

- Il s'agit de décoder le génotype et d'exprimer le caractère physique (phénotype) pour mesurer son niveau d'adaptation
- C'est l'étape la plus gourmande en puissance de calcul
- Mais elle peut être parallélisée

4) Sélection

- On sélectionne à cette étape les meilleurs individus
- Pour une population de 100 individus et un taux de 90% de reproduction, à chaque nouvelle itération, les 10 meilleurs sont gardés et 90 nouveaux sont créés par reproduction de 90 parents

Méthode de sélection

[Baeck et al. 2000]

- Par élitisme
les individus sont triés en fonction de leur adaptation. Les meilleurs sont retenus, les autres ne survivent pas. Ne garde pas la diversité !
- Par tournoi
les individus sont choisis 2 par 2 au hasard pour comparaison. Le meilleur est gardé
- Wheel selection
on associe une probabilité p_i à individu i en fonction de son fitness. On tire aléatoirement le nombre d'individus nécessaire à la reproduction.

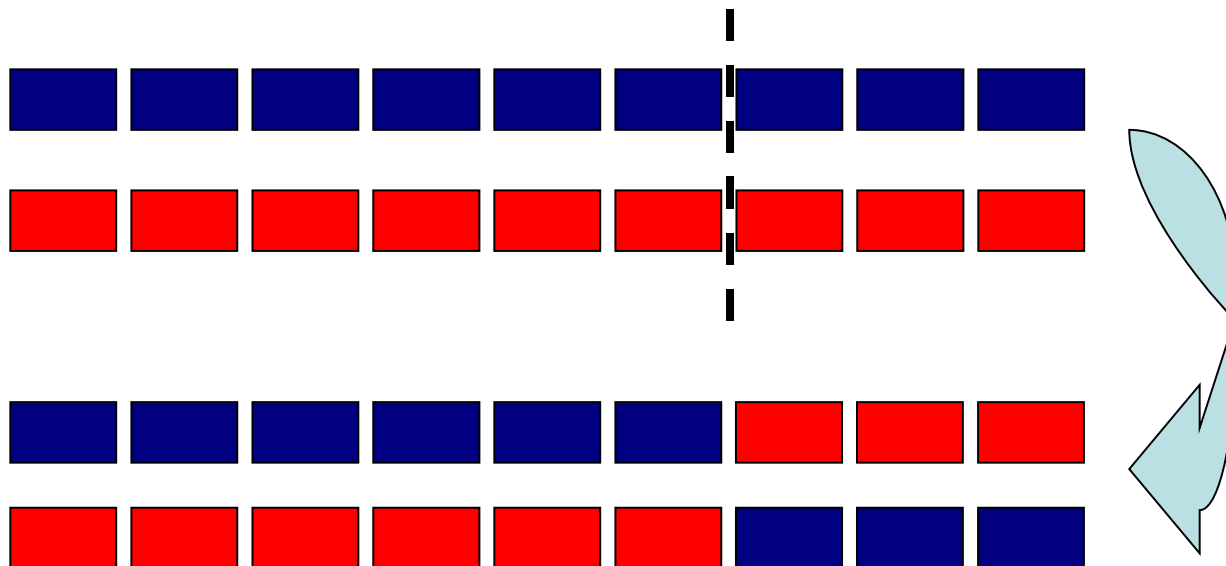
5) Opérateurs génétiques

- Le **croisement** est une propriété naturelle de l'ADN.
- Il assure le brassage génétique et l'accumulation des mutations favorables
- La **mutation** quant à elle fait intervenir des perturbations dans la reproduction et empêche l'évolution de se figer

3 type de Croisement

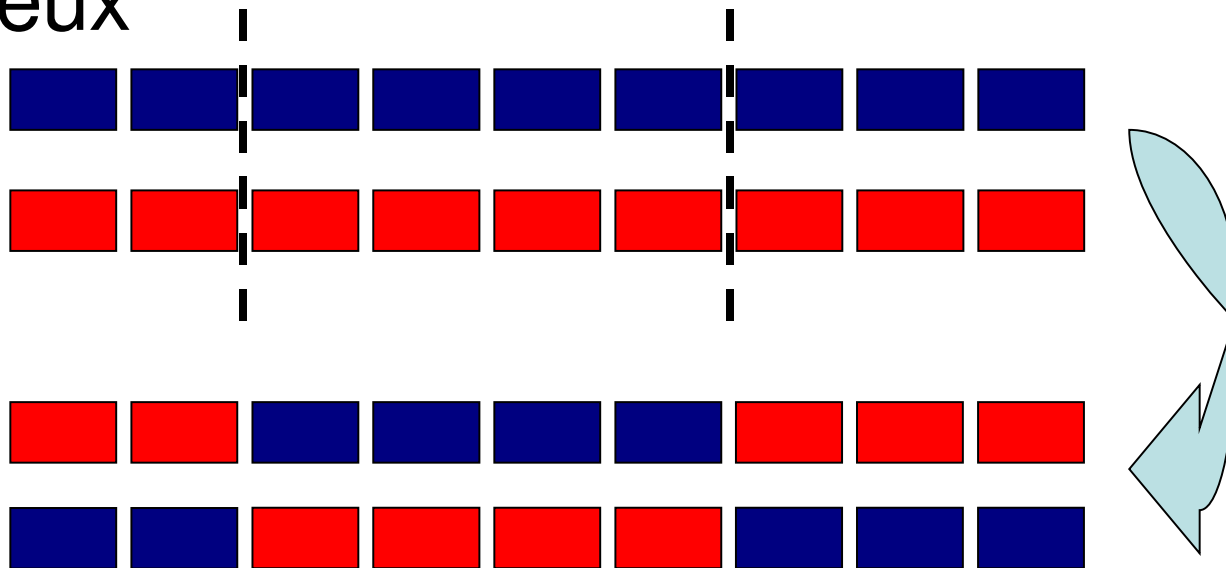
- croisement en un point

Les chromosomes des parents sont coupés en un même point. Les chromosomes des descendants sont reconstruits par échange



Croisement en 2 points

- Les chromosomes parents sont coupés en 2 endroits tirés aléatoirement
- On reconstruit les chromosomes descendant en permutant un ensemble sur deux



Croisement par masque

- Un tableau binaire de même longueur que les chromosomes indique s'il y a échange



6) Mutation

- La mutation est un opérateur indispensable à l'exploration de l'espace des solutions
- On fixe un taux de mutation (par population)
- Celle-ci n'affecte qu'un gène des individus sélectionnés
- Le paramétrage du taux est délicat

6) Terminaison

- Comment décider de la fin d'une exploration ?
 - Nombre d'itération fixe
 - Stabilisation du fitness moyen
 - on mesure alors la moyenne d'adaptation sur les k dernières itérations. Celle-ci a en effet tendance à se stabiliser lorsque la méthode n'arrive plus à optimiser
 - ex : ($k=10$, variance= $\pm 10\%$)

Application à la conception de SoC

Problème : Conception de systèmes embarqués

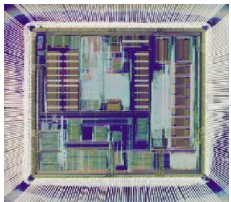


Spécification

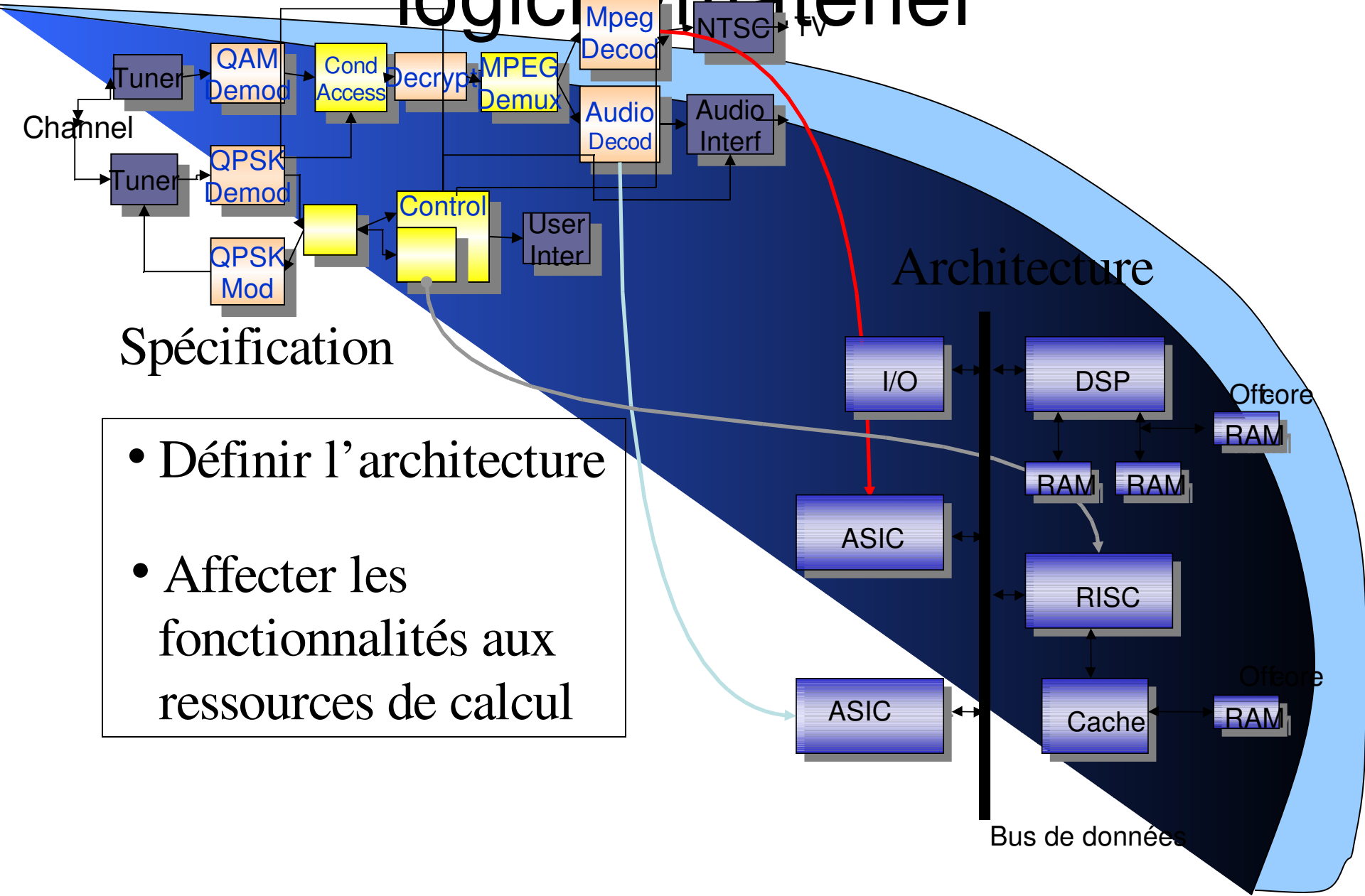
Définition de l'architecture

Synthèse

Développement



Partitionnement logiciel/matériel



- Définir l'architecture
- Affecter les fonctionnalités aux ressources de calcul

Objectifs

du partitionnement logiciel/matériel

Du point de vue de l'application

- Trouver l'architecture qui réponde aux exigences de l'application
 - Performances
 - Consommation
 - Taille
 - ...

...de la conception

- Trouver le meilleur compromis entre
 - Coût du matériel et
 - Efforts de conception (logiciel et matériel)
- Fournir le produit au début de la fenêtre de marché (*time-to-market*)

Réponses

Simulation

Les décisions architecturales peuvent être validées par simulation
[SystemC]

- L'exploration architecturale est longue et donc limitée
- Expérience du concepteur

Optimisation

- Définir un critère de sélection des meilleures solutions architecturales
- S'abstraire de certains détails architecturaux

Réponses

Simulation

Les décisions architecturales peuvent être validées par simulation
[Cadence]

- L'exploration architecturale est très limitée
- Expérience du concepteur

Optimisation

- Définir un critère de sélection des meilleures solutions architecturales
- S'abstraire de certains détails architecturaux

Objectifs(1)

- Assister le concepteur dans sa prise de décisions

⇒ Formuler le partitionnement logiciel/matériel comme un **problème d'optimisation**:

- Minimiser le coût de conception
- Satisfaire les contraintes de performances

Problème d'optimisation

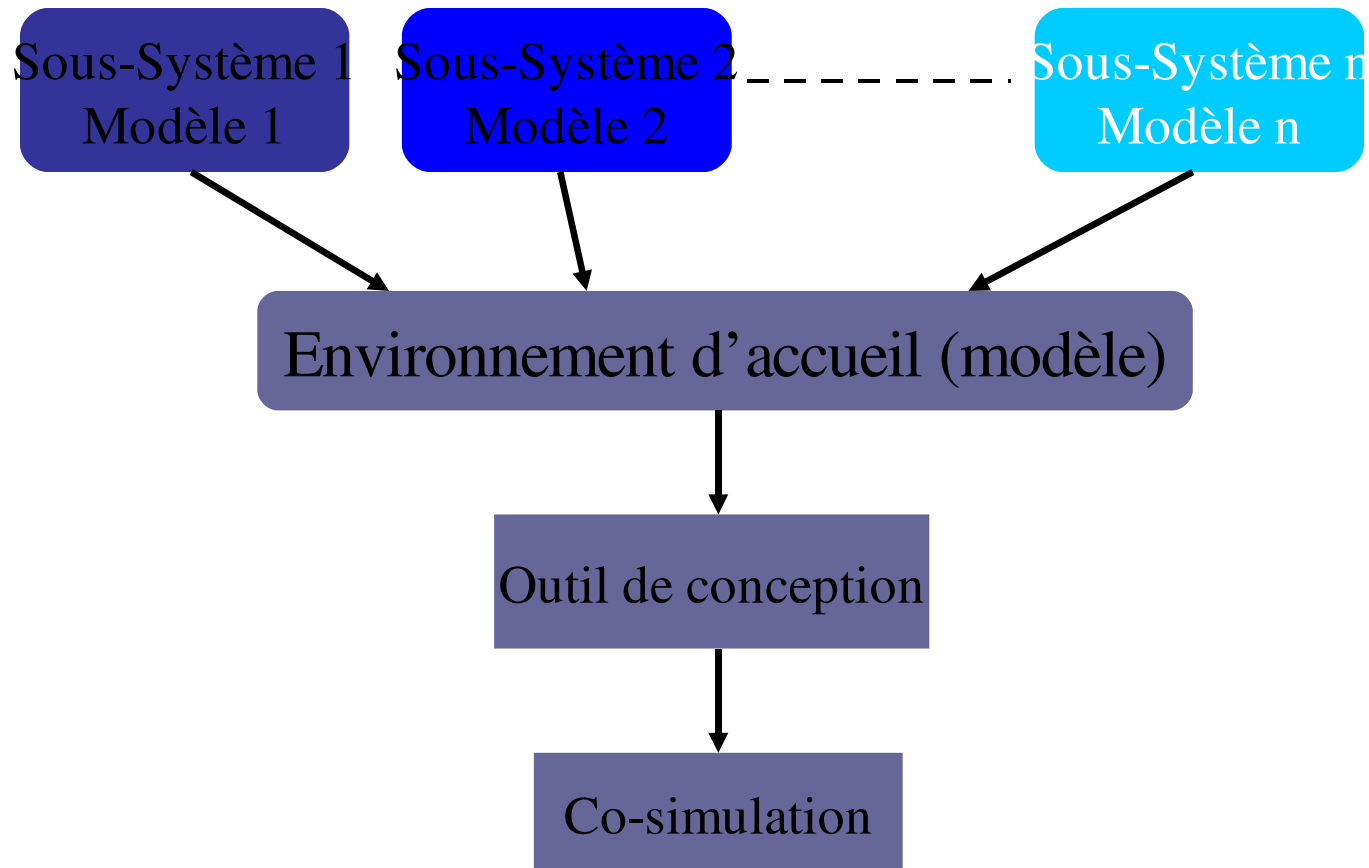
- Quel format de spécification de l'application à implanter ?
- Quelle modélisation de l'architecture ?
- Quelle fonction objectif ?

Modèle de spécification

Approche	Spécification
Auguin	DFG
Cosyma	CDFG
MOGAC	Processus temps-réel
SpecSyn	FSM
Madisetti	Flot de données

Spécification hétérogène

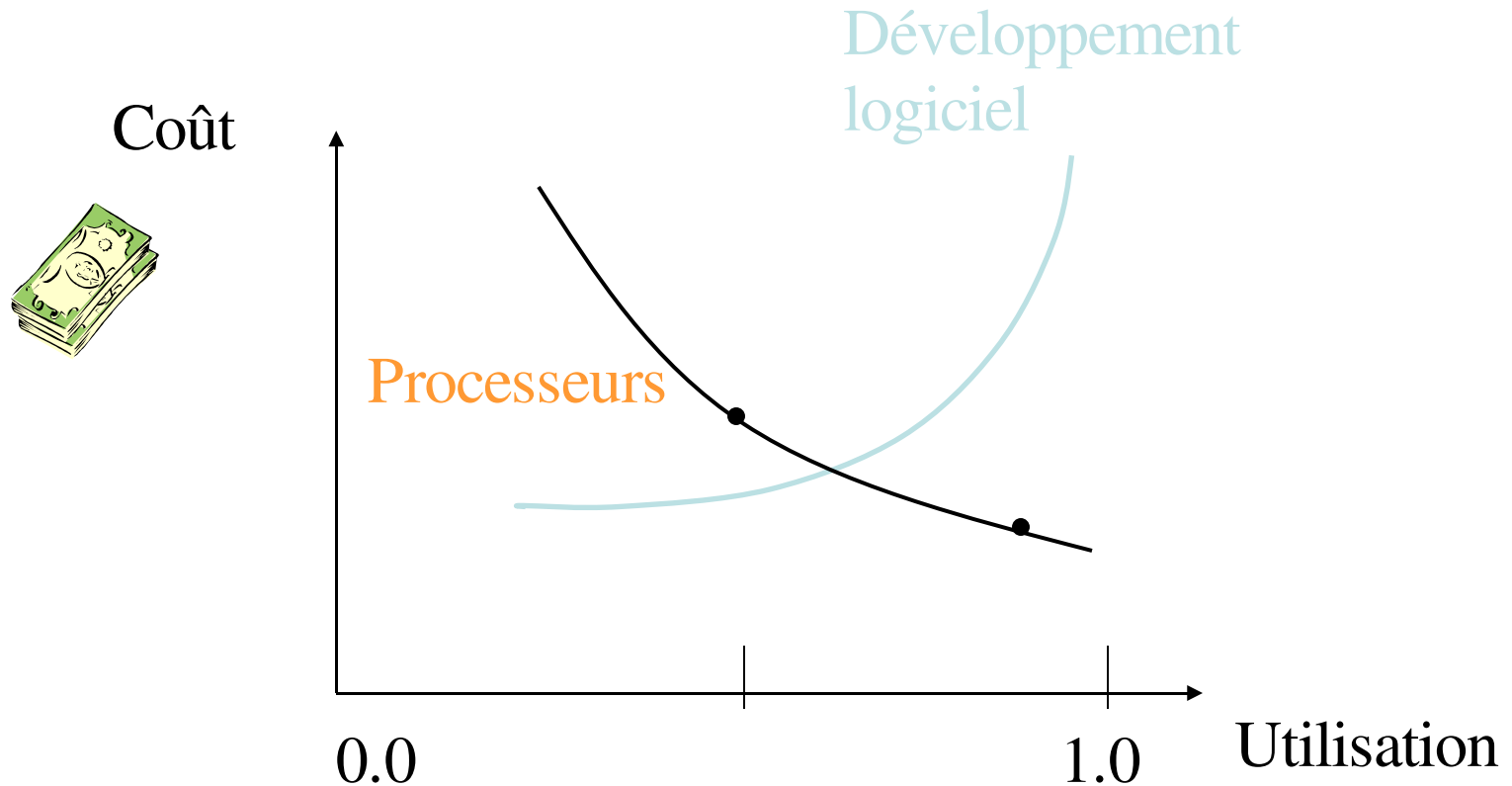
Approche modèles (MoCs)



Modèles de coût existants

Approche	Fonction Objectif
Auguin	Temps d'exécution
Cosyma	Performances
Mogac	Prix des composants, conso., performances
SpecSyn	Surface, performances
Madisetti (RASSP)	Coût global

Compromis coût matériel/ effort de conception



Coût et Temps de conception

Logiciel

$$C_{sw} = C_s \cdot E_{sw}$$

Coût :

$$T_{sw} = K_{sw} \cdot E_{sw}^\gamma$$

Temps :

$$E_{sw} = C \cdot F_P \cdot F_M \cdot L^M$$

Effort :

[COCOMO]

Matériel

$$C_{hw} = C_h \cdot E_{hw}$$

$$T_{hw} = K_{hw} \cdot E_{hw}^\gamma$$

$$E_{hw} = (1 + D)^{-a} \cdot (A + B \cdot S_{h^H})$$

[Madisetti]

Modélisation

Modèle de spécification

Objets de partitionnement

- Traitements
- Transferts

Modèle d'architecture

Type de Ressources

- Exécution
- Communication

Solution

Architecturale

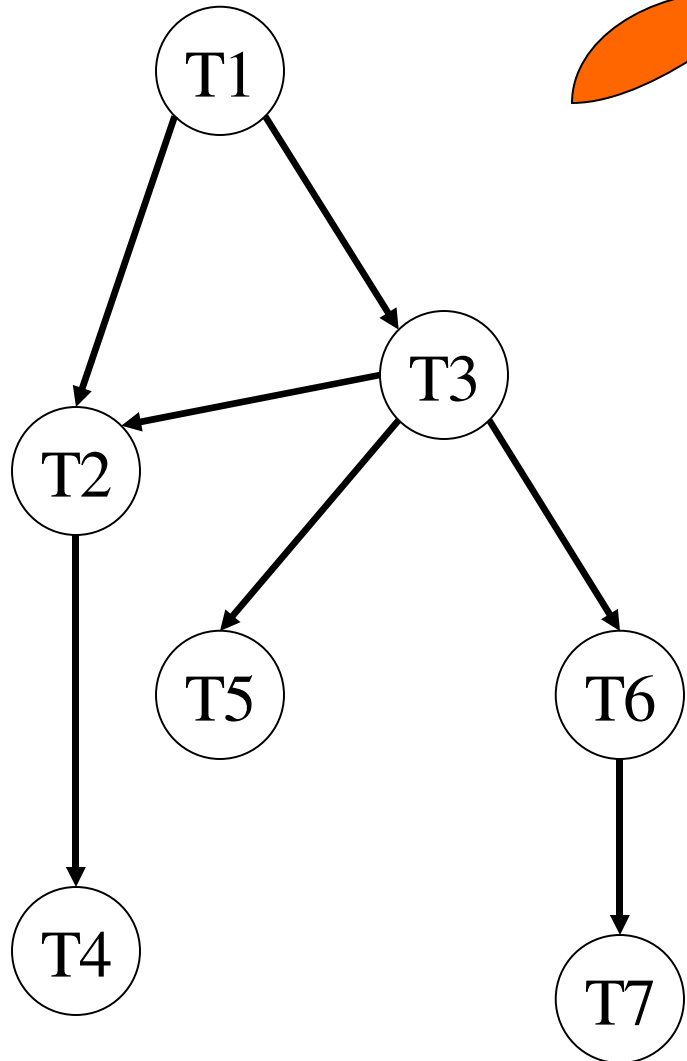
Modèle de performances

- Allocation
 - Affectation
 - Ordre d'exécution
- => Performances

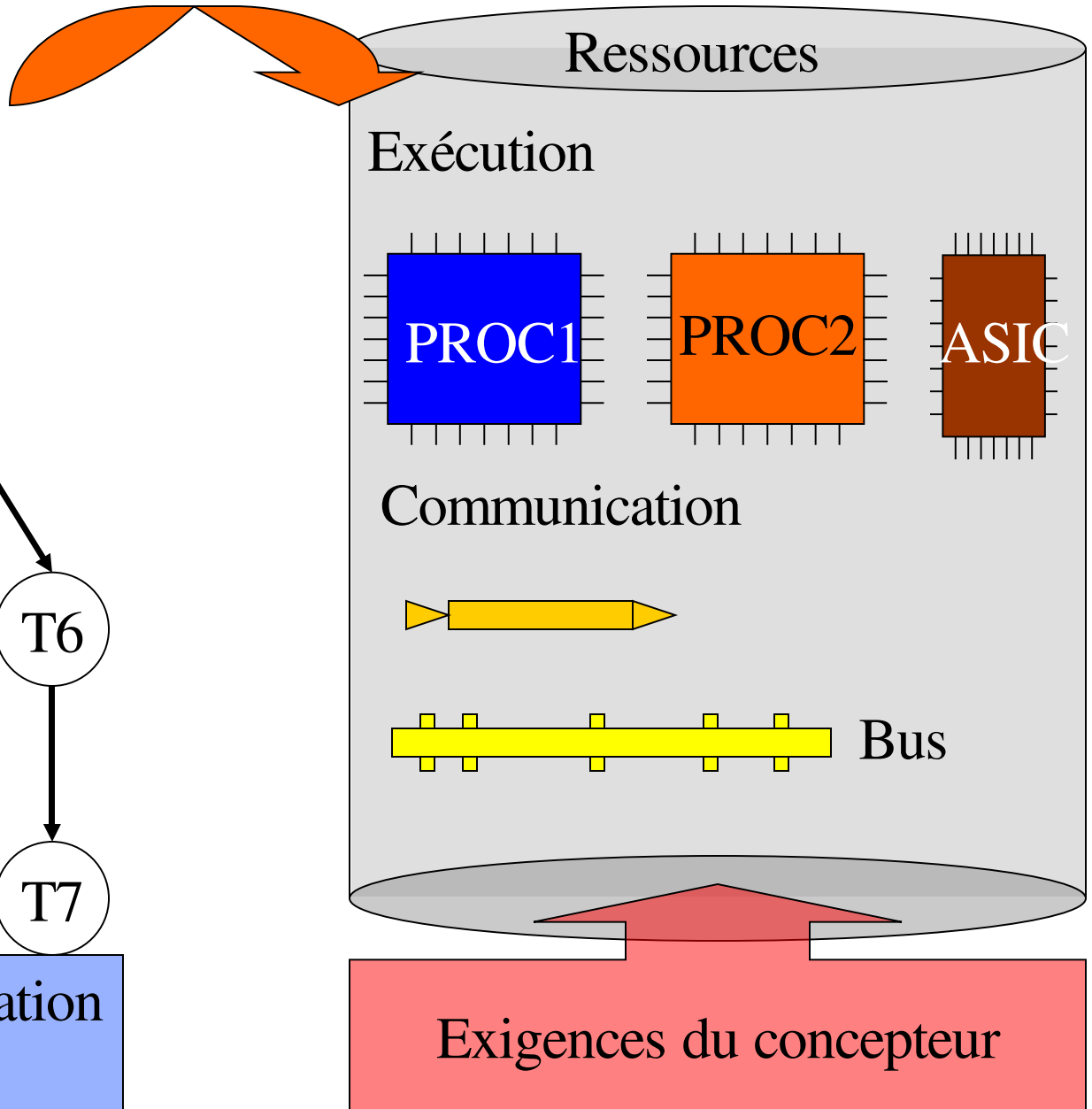
3 sous problèmes liés

- Allocation
du nombre et du type de ressources
- Affectation
d'une tâche à une ressource
- Ordonnancement
des tâches sur chaque ressource

Définition d'une solution architecturale



Modèle de spécification
flots de données

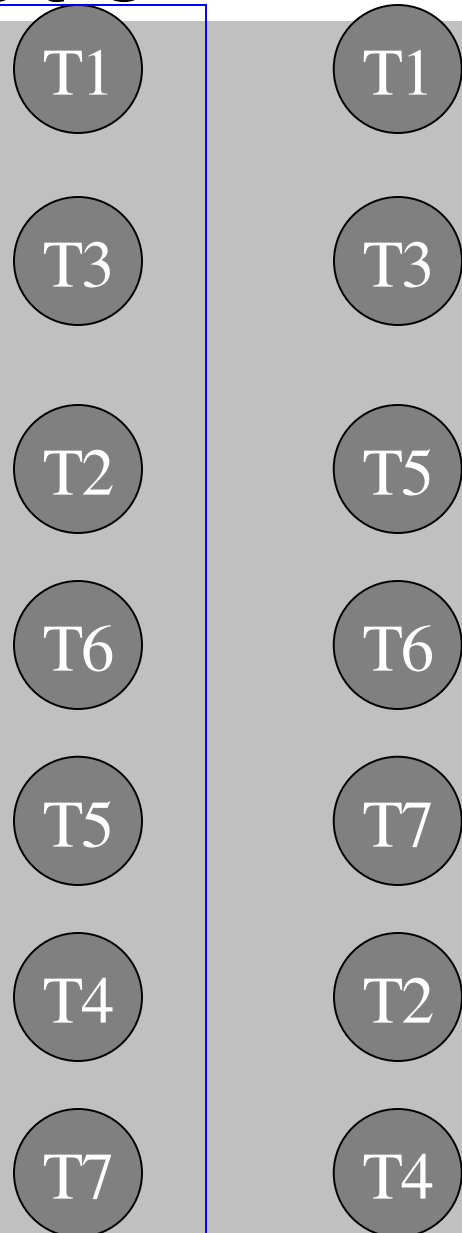


Définition d'une solution

allocation

- Allocation
- Affectation

• Ordre d'exécution



Modèle de performance

T1

T3

T2

T6

T5

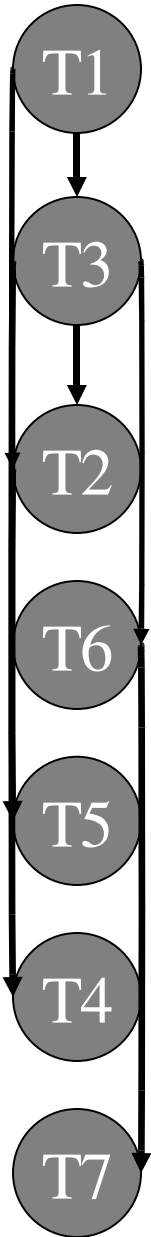
T4

T7

1. Regrouper les informations

- Structure du graphe
- Ordre total

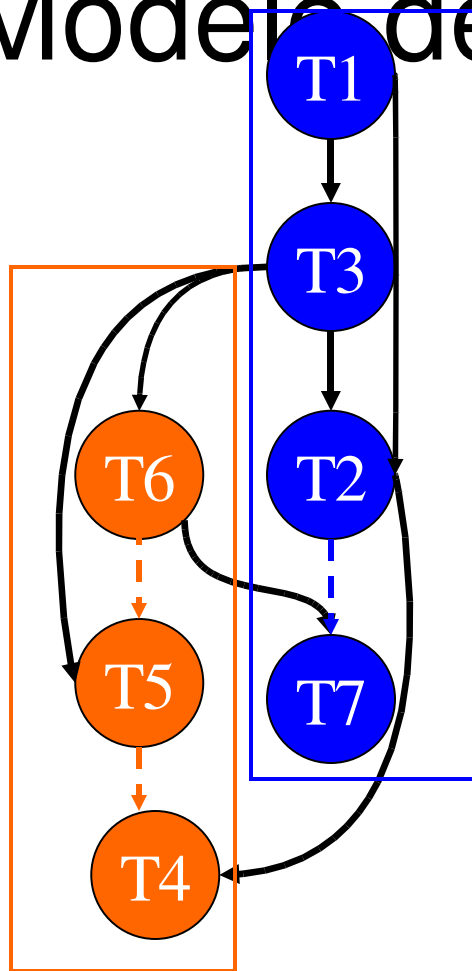
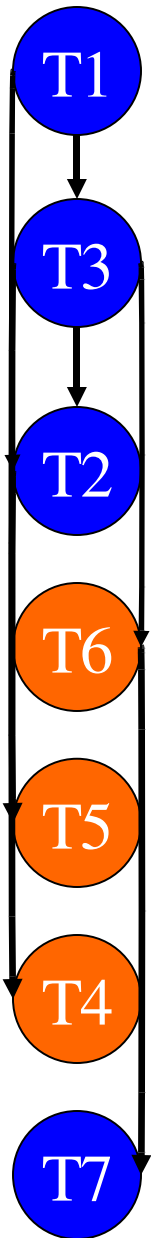
Modèle de performance



2. Regrouper les informations

- Affectation
- Ordre total

Modèle de performance

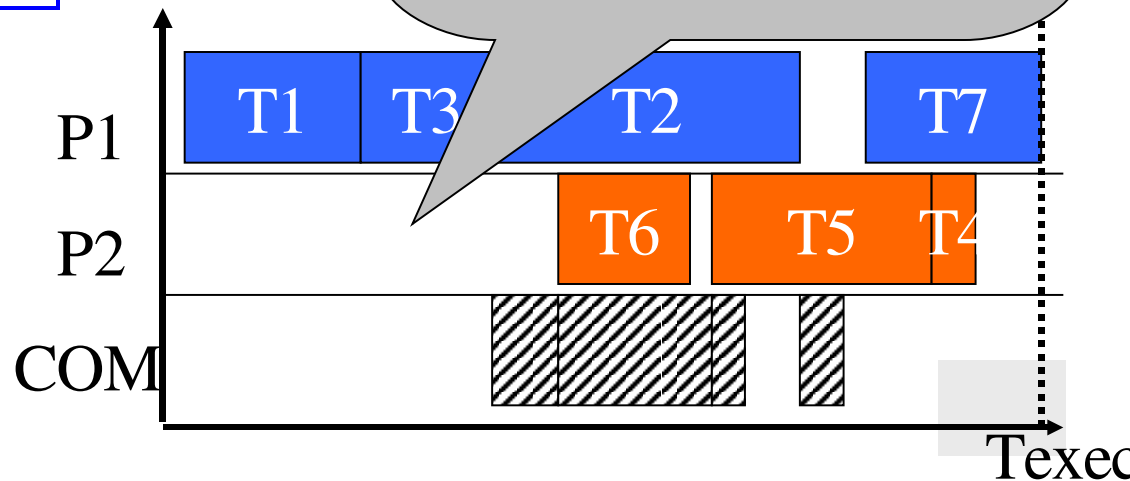


3. En déduire un ordre partiel

4. Ordonner

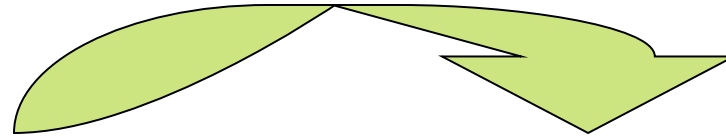
Une solution =

- Une allocation
- Une affectation
- Un ordre total

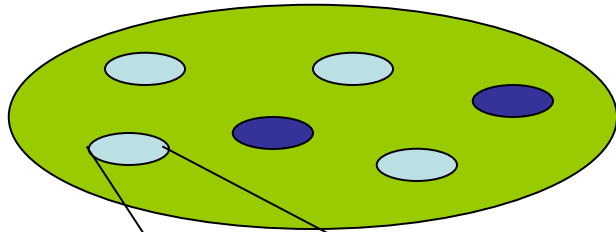


Algorithmes génétiques

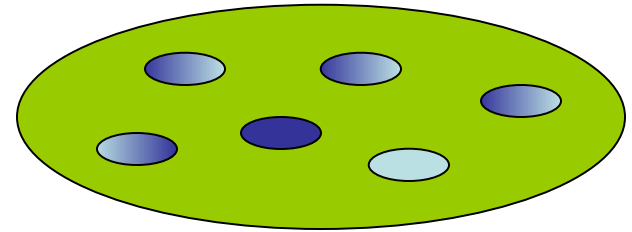
Croisements et mutations



Population i



Population i+1



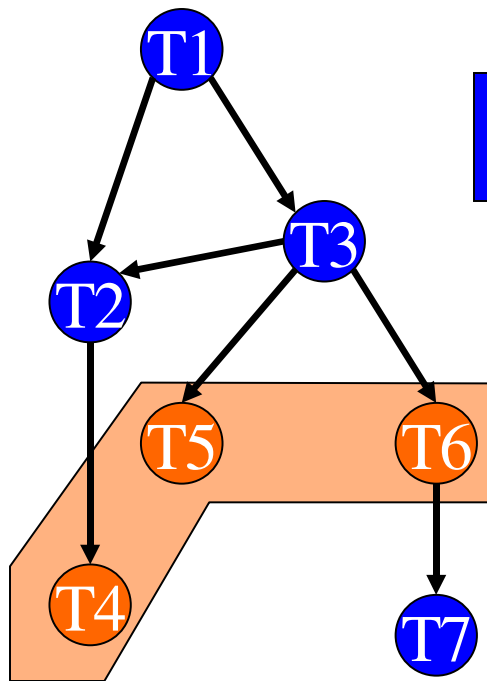
Individu

abbabac

Génotype = Deux chromosomes:

- Affectation
- Ordonnancement

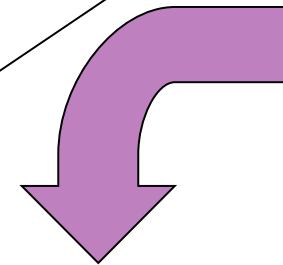
Codage des individus



T1 T2 T3 T4 T5 T6 T7



Codage de l'affectation



T1 T2 T3 T4 T5 T6 T7

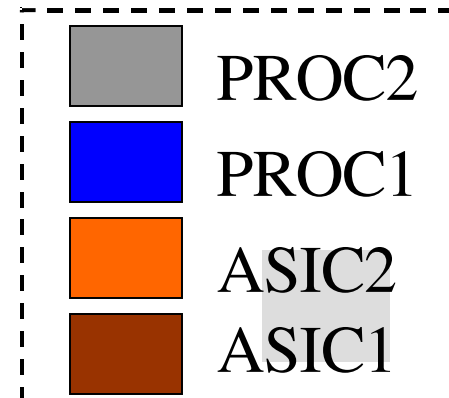
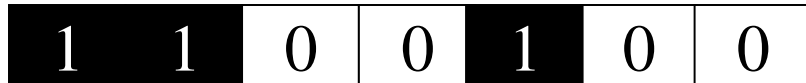


Codage de l'ordre d'exécution

Opérateurs génétiques dédiés

- Opérateurs de **croisement** permet l'exploration
 - de l'affectation

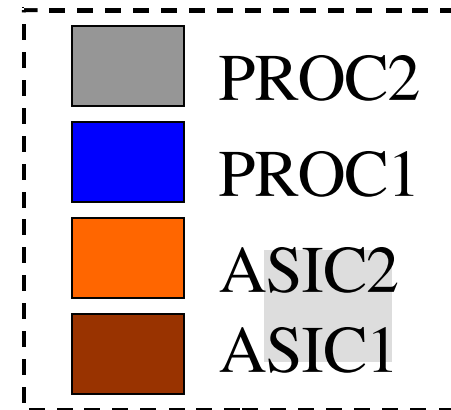
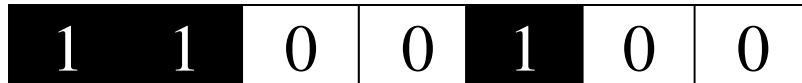
T1 T2 T3 T4 T5 T6 T7



Opérateurs génétiques dédiés

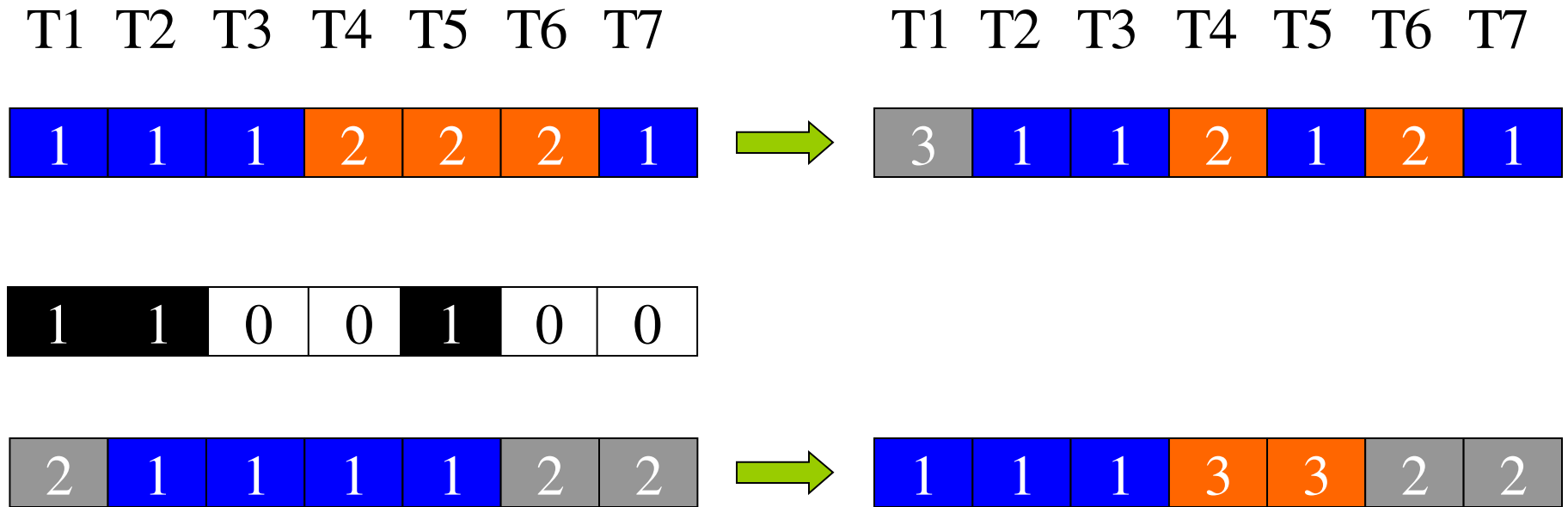
- Opérateurs de **croisement** permet l'exploration
 - de l'affectation

T1 T2 T3 T4 T5 T6 T7

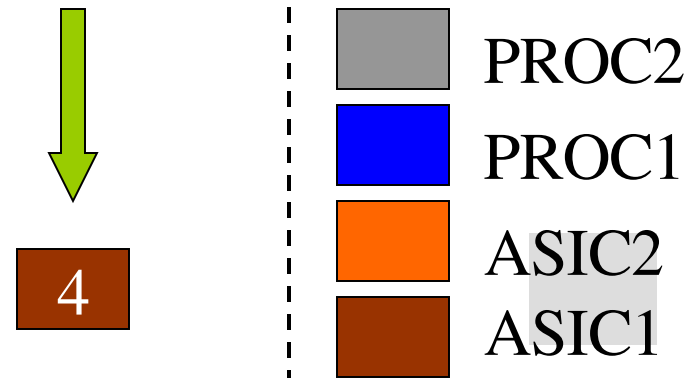


Opérateurs génétiques dédiés

- Opérateurs de **croisement** permet l'exploration
 - de l'affectation

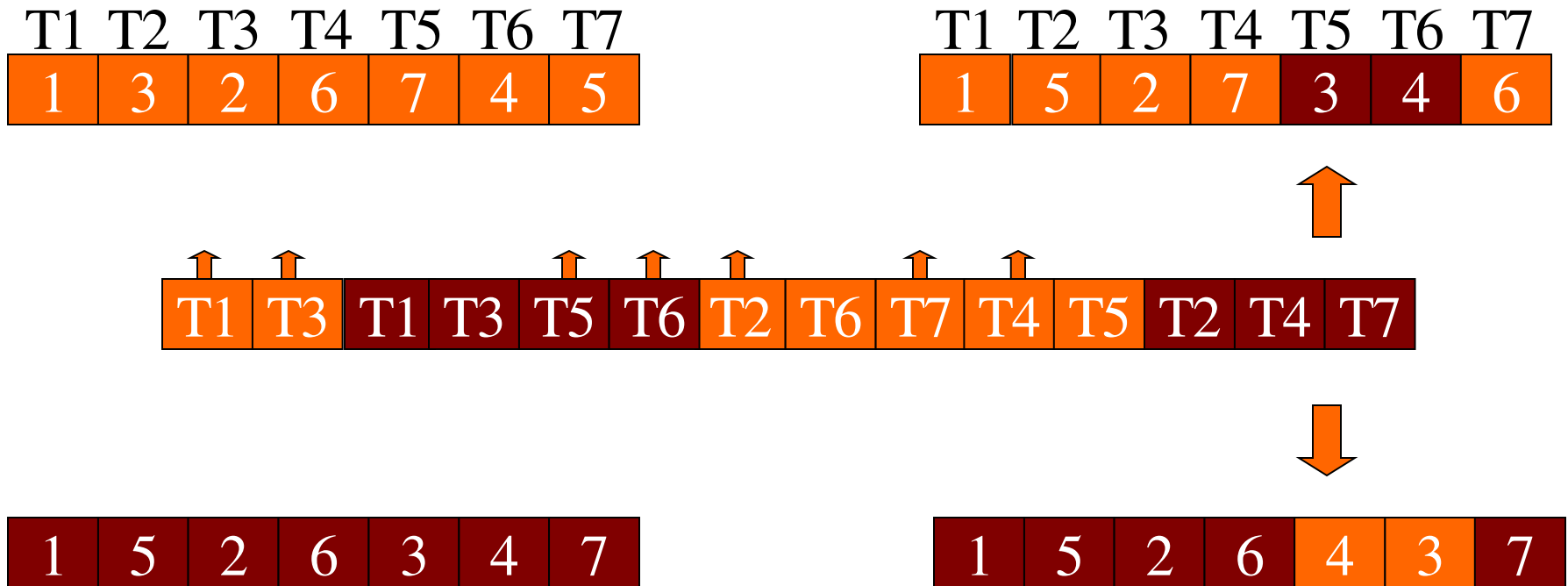


- Opérateur de **Mutation** permet l'exploration
 - de l'allocation



Opérateurs génétiques dédiés

- Opérateurs de **croisement** permet l'exploration
 - de l'ordonnancement



- Pas d'opérateur de **mutation** pour conserver la cohérence

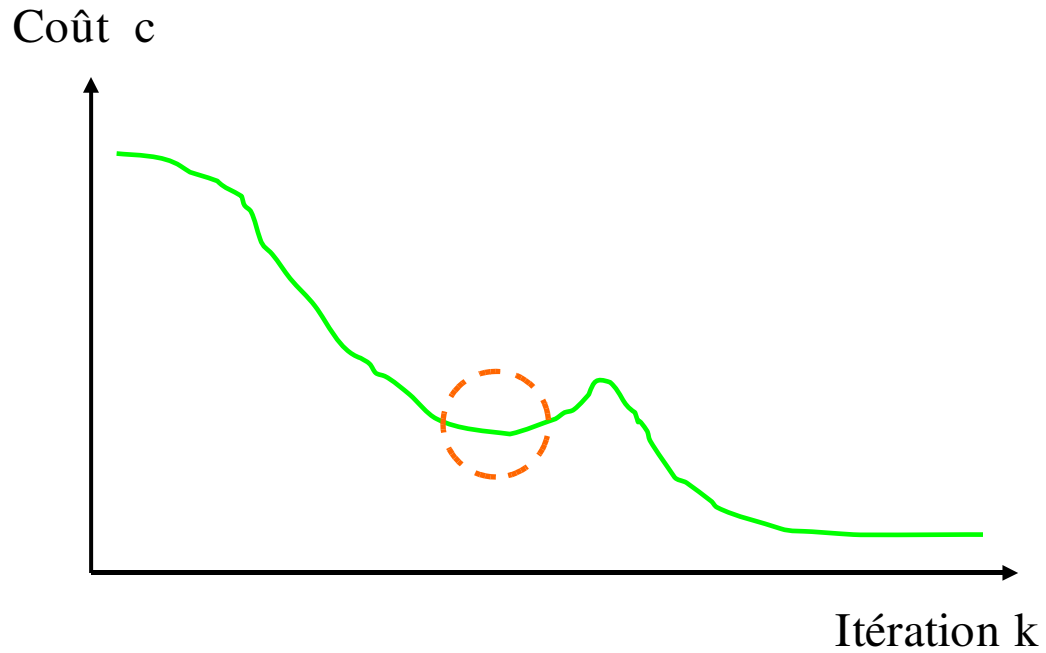
Exploration

- Croisements du chromosome d'affectation
 - Exploration de l'**affectation**
- Mutation du chromosome d'affectation
 - Exploration de l'**allocation** pour une tâche
- Croisement du chromosome d'ordonnancement
 - Exploration de l'**ordonnancement** (ordre total)

Recherche locale simple

- Principe:
 - Générer une solution initiale aléatoire
 - Faire
 - un changement local de la solution
 - $\forall \Delta c = \text{nouveau coût} - \text{coût courant}$
 - si ($\Delta c \leq 0$)
 - état courant = nouvelle solution
 - coût courant = nouveau coût
 - Tant qu'il existe des solutions faisant décroître le coût courant

Comportement



Recuit Simulé

$$p(\Delta c) = e^{-s \cdot \Delta c}$$

$$s = 1/T$$

T : la température

- Accepte des solutions augmentant le coût avec une probabilité:

$p(\Delta c)$

- Permet de sortir des optima locaux

Principe:
Contrôler la
décroissance de T

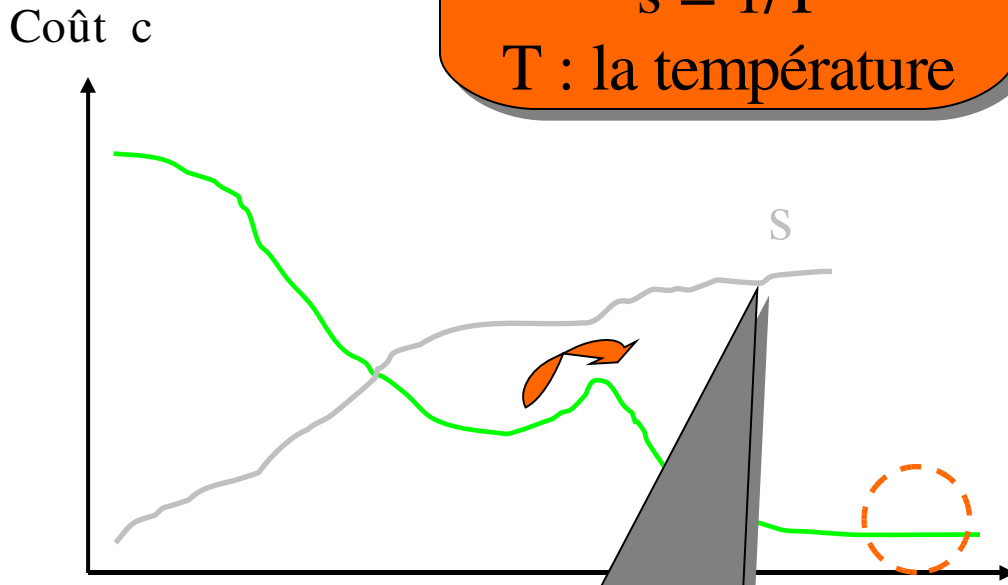
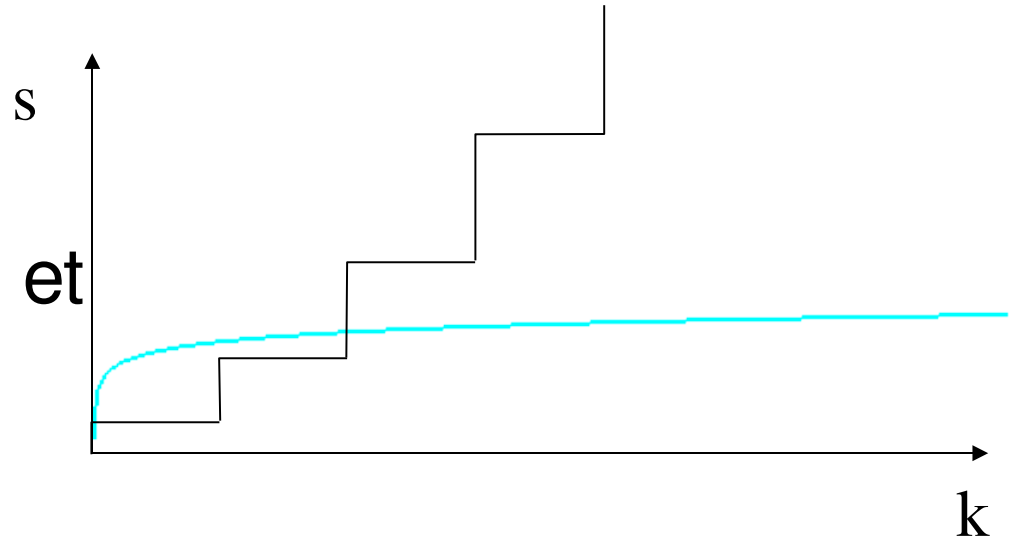


Schéma de décroissance de la température

- Classique:

- paliers $s_k = s_{k-1}$, et

- sauts $s_k = \alpha \cdot s_{k-1}$



- Convergence garantie vers l'optimum global:

$$s_k = \ln(k) / d_{\max}$$

- Probabilité de sortir des optima locaux = 1
 - Trop lent

La version adaptative

- Schéma pratique qui permet une décroissance **rapide**

S

- Principe:

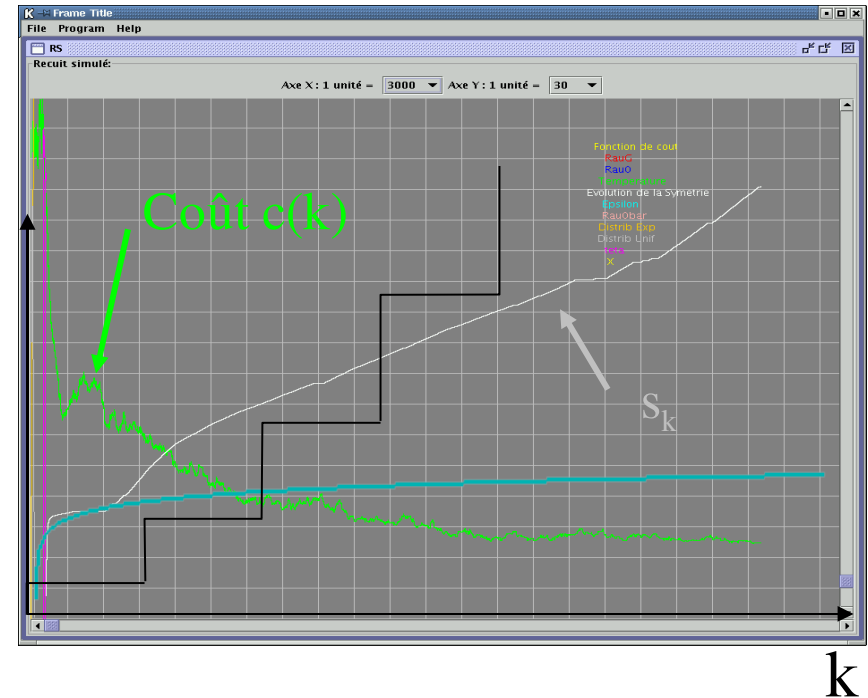
- Décroître T à chaque itération

- Rester à l'**équilibre**

=> Exploiter les propriétés statistiques de $c(k)$

⇒ Adaptative (sans réglages manuels)

⇒ Approche générale



Loi de décroissance de la température utilisée

à l'équilibre

rapide

$$s_{k+1} = s_k + \frac{\lambda}{\sigma(s_k)} \cdot \frac{-\rho_2(s_k)}{2\sigma^2(s_k)} \quad [\text{Lam}]$$

facteur 'vitesse thermodynamique constante'

- λ : paramètre de proximité de l'équilibre (qualité de solution)
- $\sigma(s)$: écart-type du coût

facteur dynamique

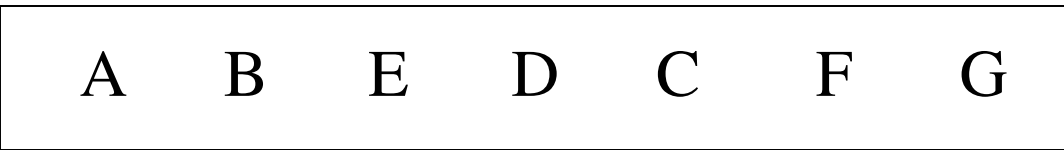
$-\rho_2(s)$: variance de l'incrément de coût

$$-\rho_2 / (2\sigma^2) \cong 1 / \tau$$

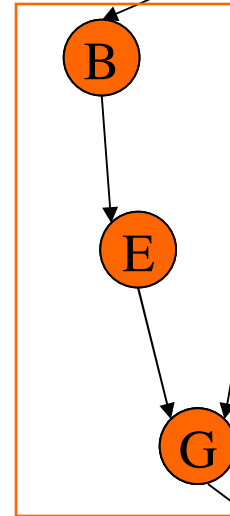
Mouvements pour le partitionnement

- Changement d'ordre d'exécution
- Changement d'affectation
- Changement d'allocation

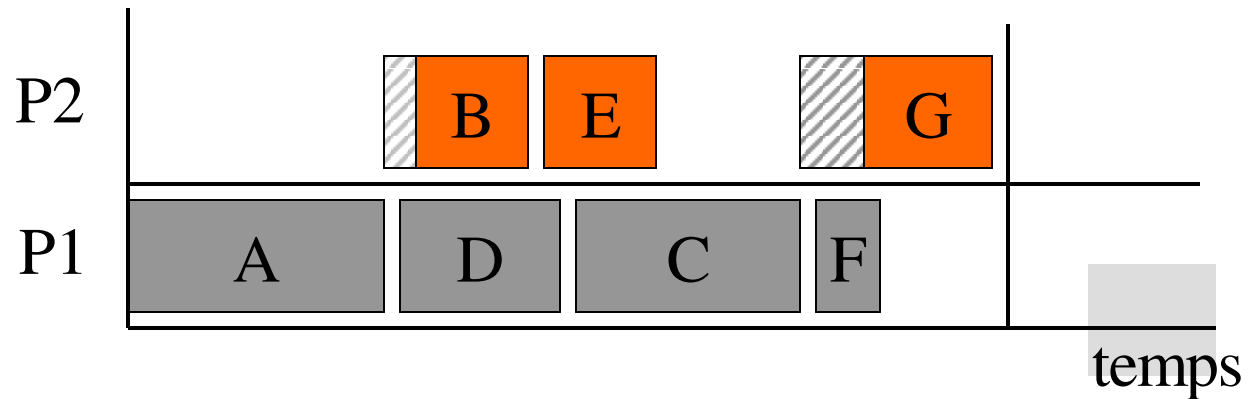
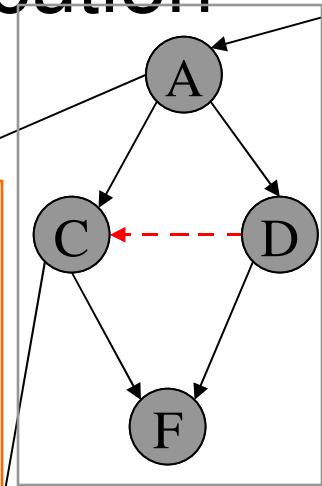
Changement d'ordre d'exécution



P2



P1



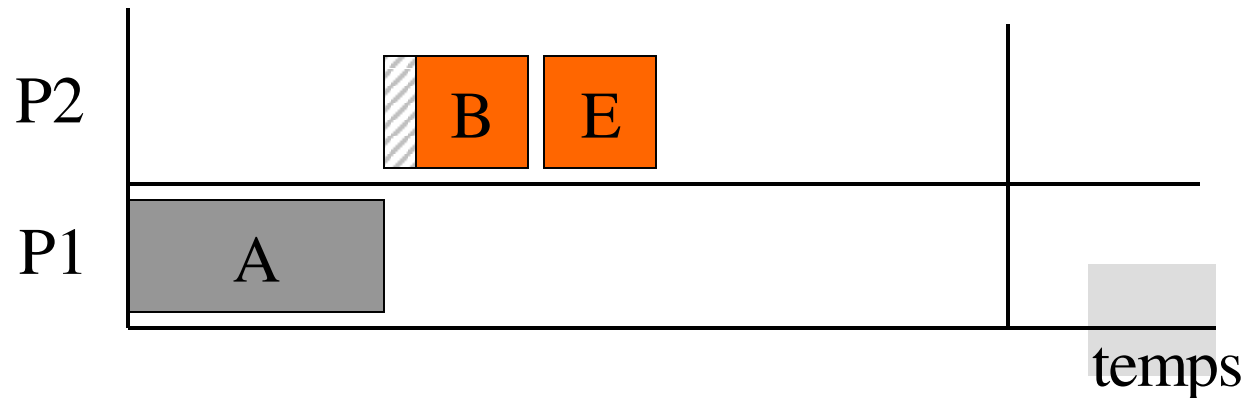
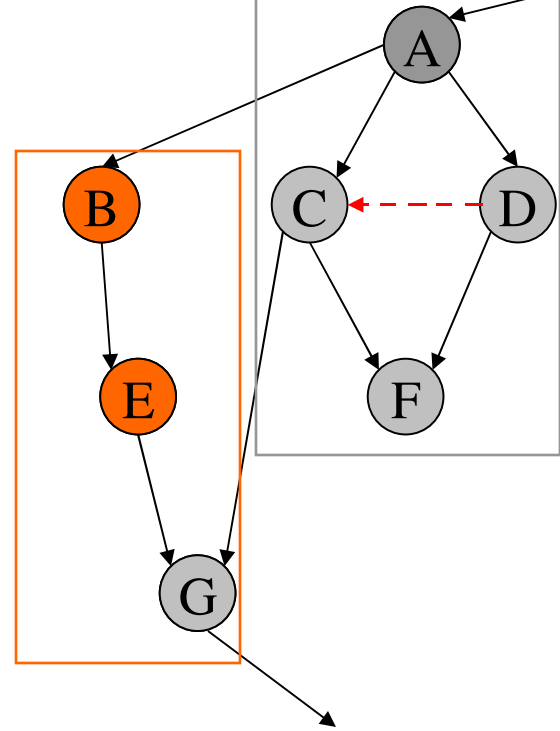
Changement d'ordre d'exécution

A B E D C F G

– changement **d'ordre** pour D

P2

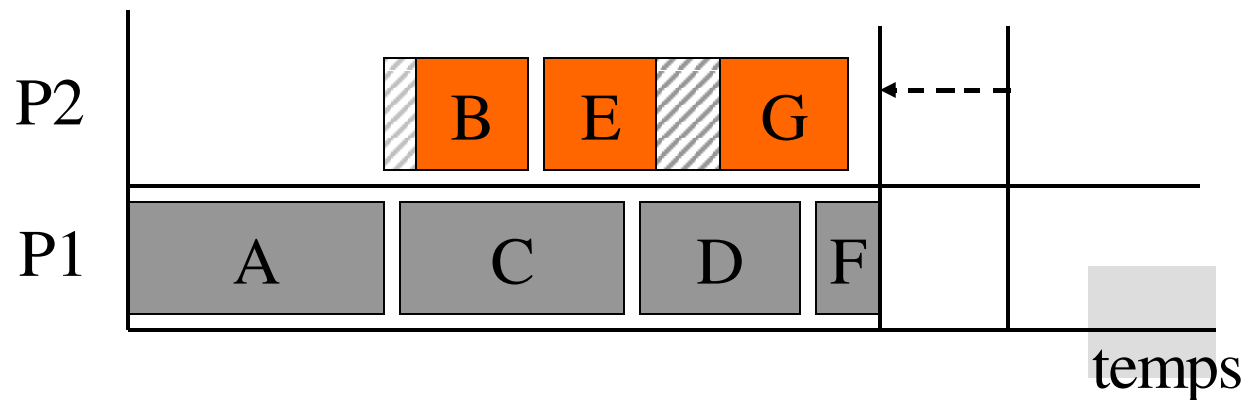
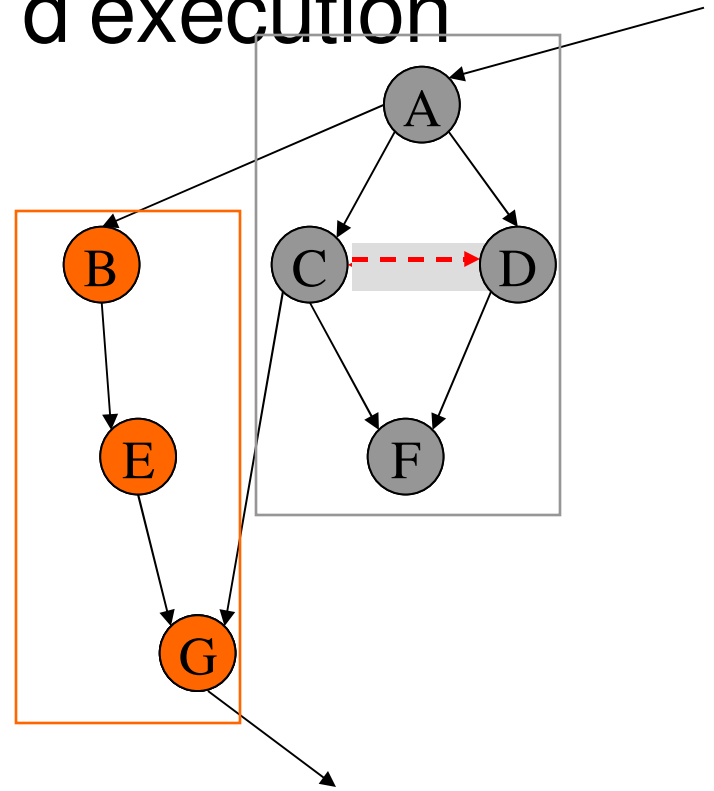
P1



Changement d'ordre d'exécution

A B E C **D** F G

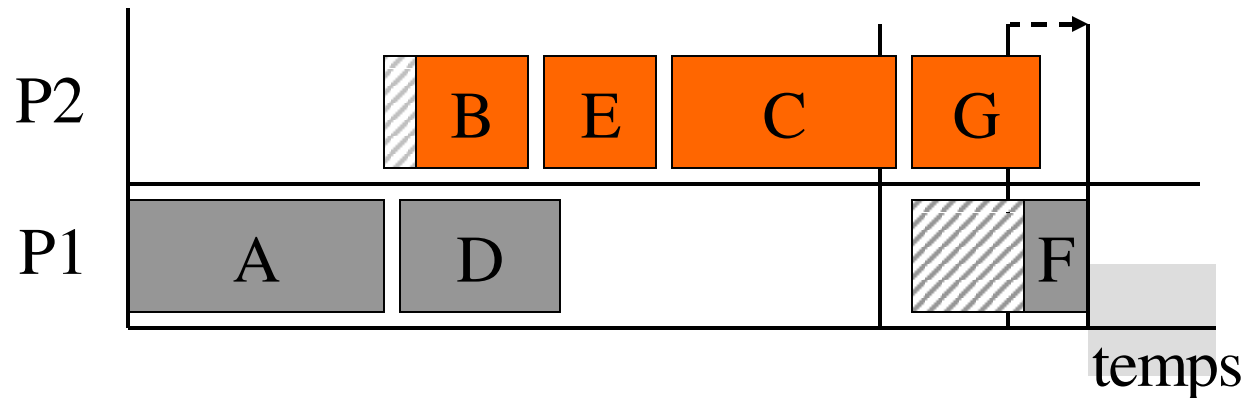
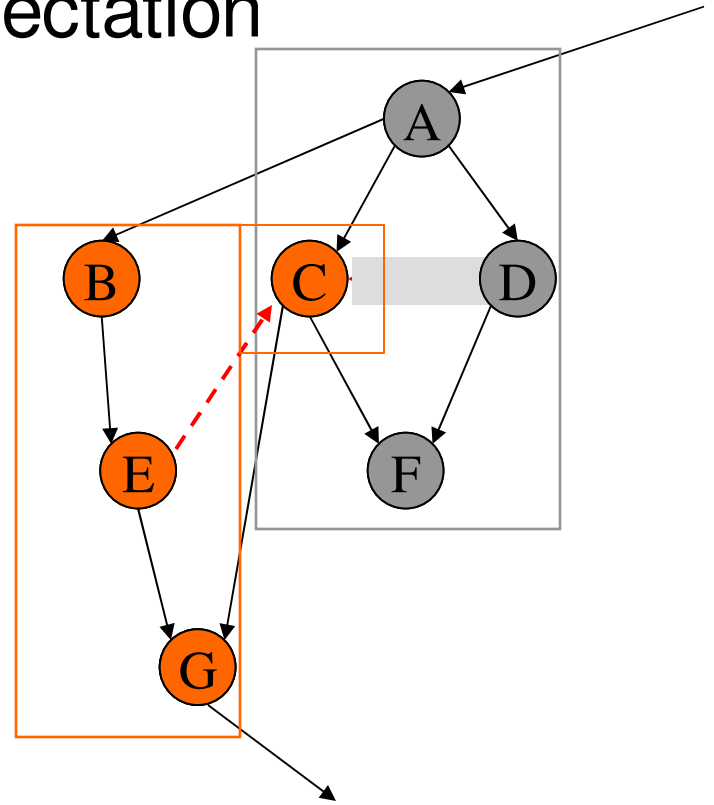
– changement **d'ordre** pour D



Changement d'affectation

A B E C D F G

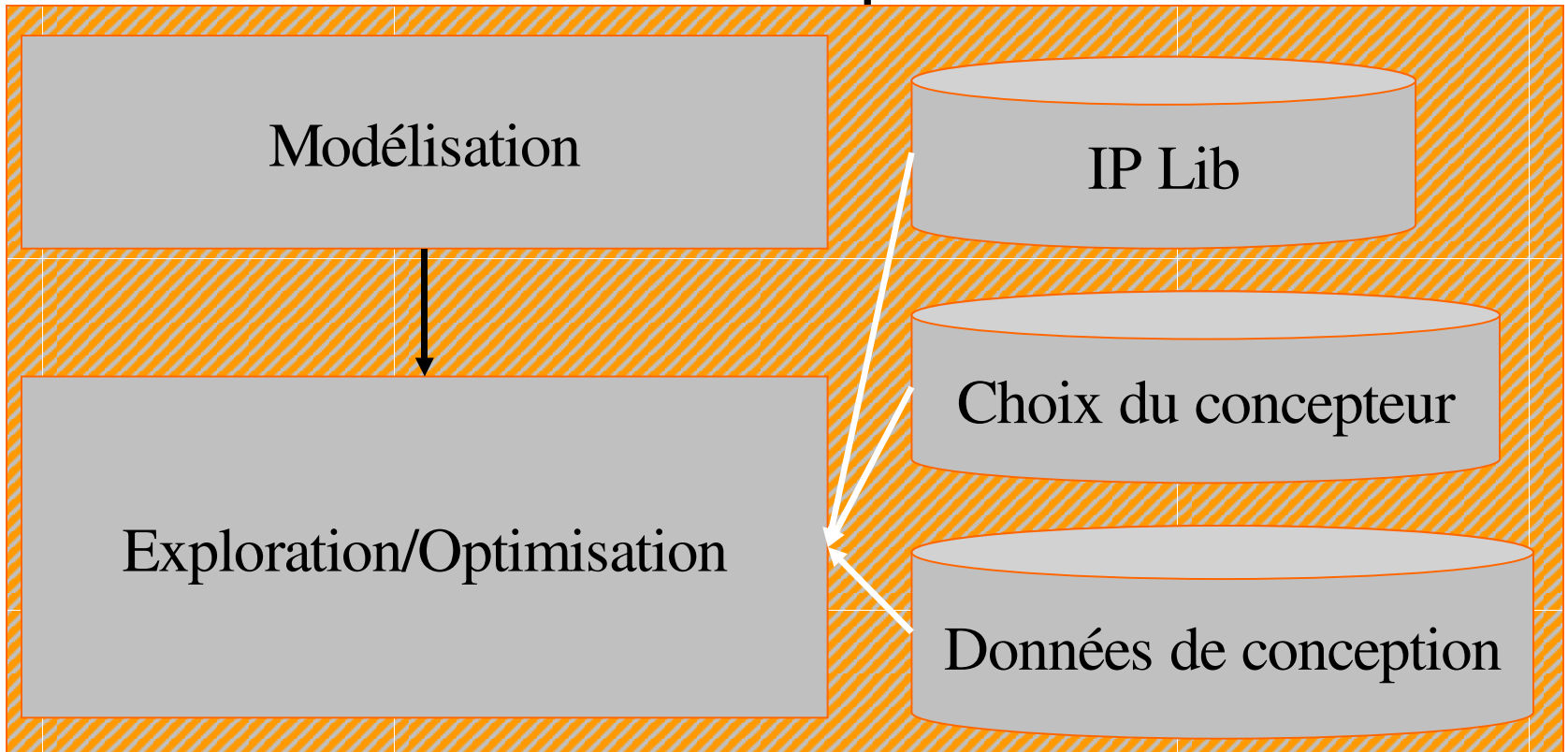
- changement **d'affectation** pour C
- après E



Mouvements pour le partitionnement

- Changement d'ordre d'exécution
- Changement d'affectation
- Changement d'allocation

Environnement de partitionnement

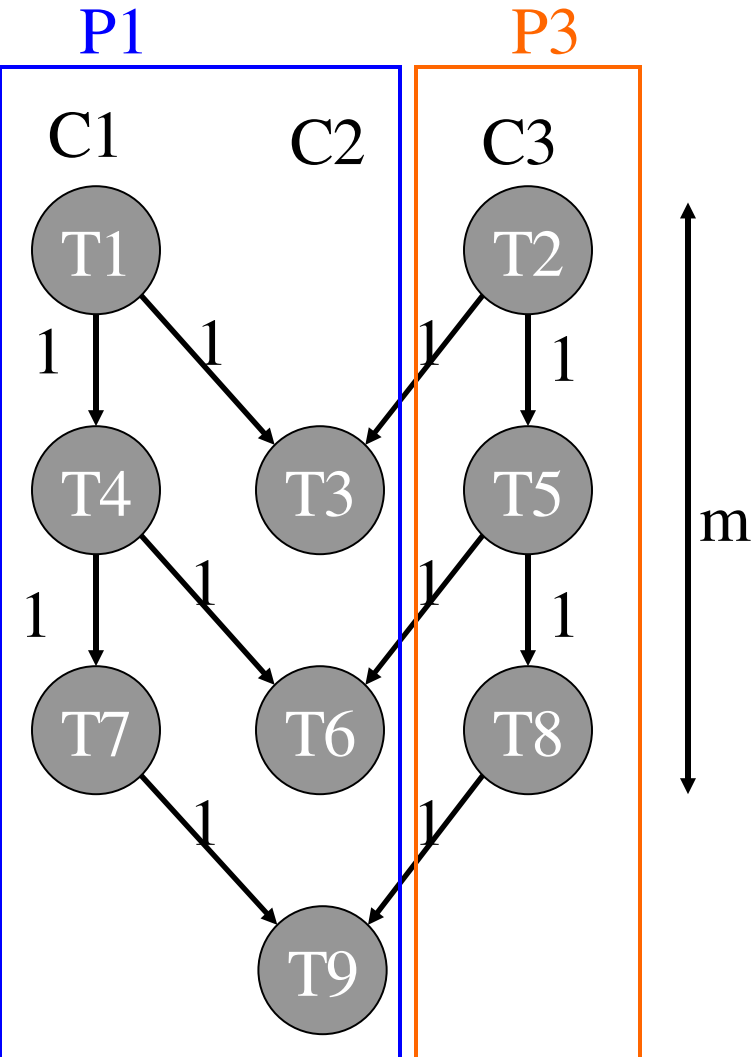


- Critère d'optimisation
- Contrainte

=
=

Coût du système
Temps d'exécution

Exemple illustratif



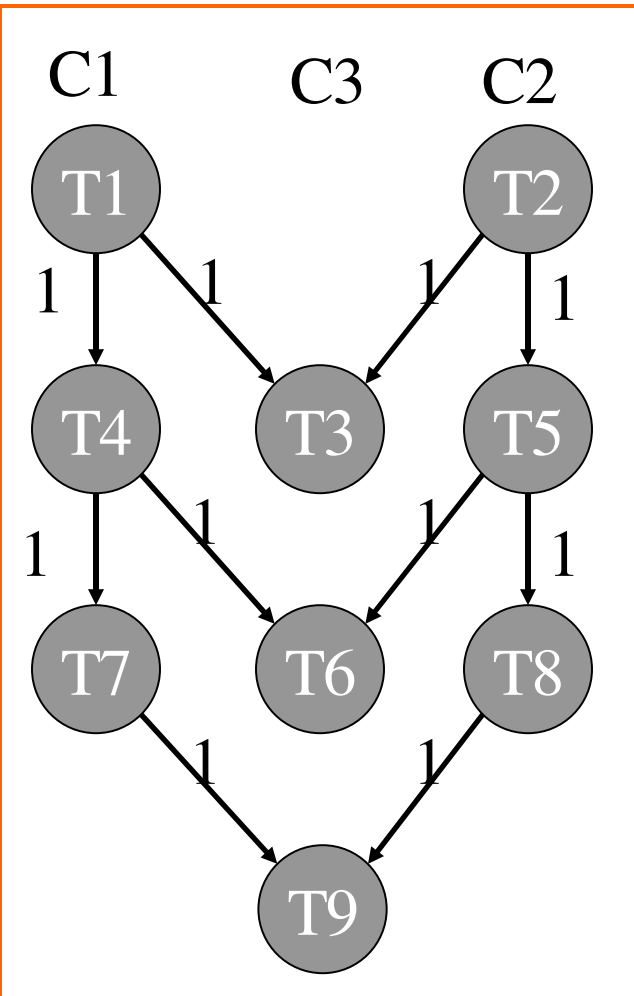
	C1	C2	C3	Coût
P1	1	1.5	4	30
P2	1.5	2	5	20
P3	2	1.5	3	10

$$T_{\min} = 3 * m + 1.5$$

$$C = 40$$

Exemple illustratif

P3



	C1	C2	C3	Coût
P1	1	4	1.5	30
P2	1.5	5	2	20
P3	2	3	1.5	10

$$T_{\min} = 3 * m + 1.5$$

$$C = 40$$

$$T = (6.5) * m$$

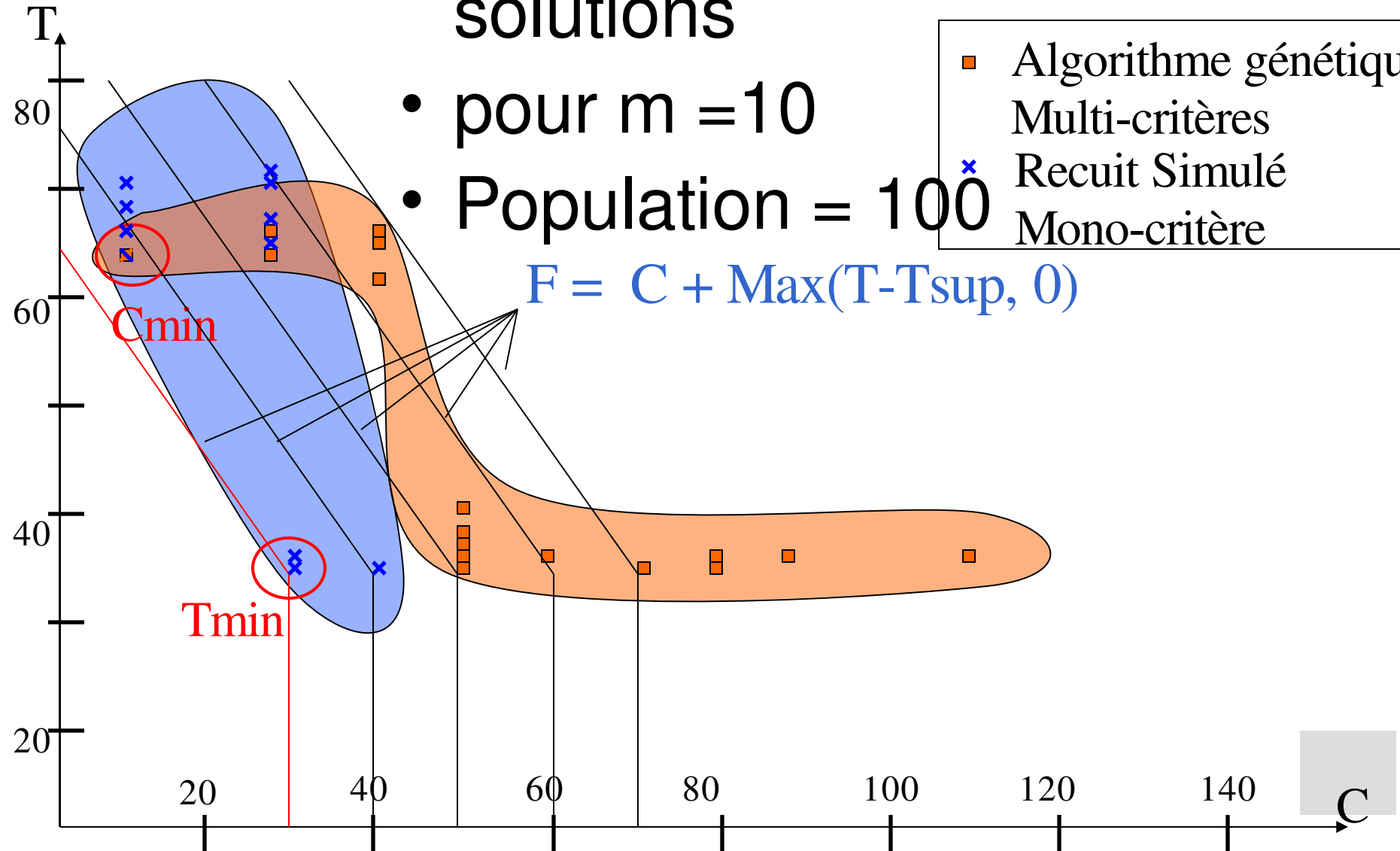
$$C_{\min} = 10$$

Résultats Distribution des solutions

- pour $m = 10$
- Population = 100

■ Algorithme génétique
Multi-critères
* Recuit Simulé
Mono-critère

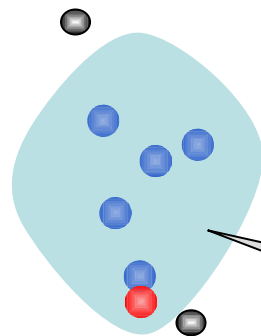
$$F = C + \text{Max}(T - T_{\text{sup}}, 0)$$



Objectifs(2)

Méthodologie :

Coût génération
future



2) Modélisation multi-critères

Algorithmes génétiques

[Axelson]

2) Modélisation mono-critère

Recuit simulé

Coût génération
courante

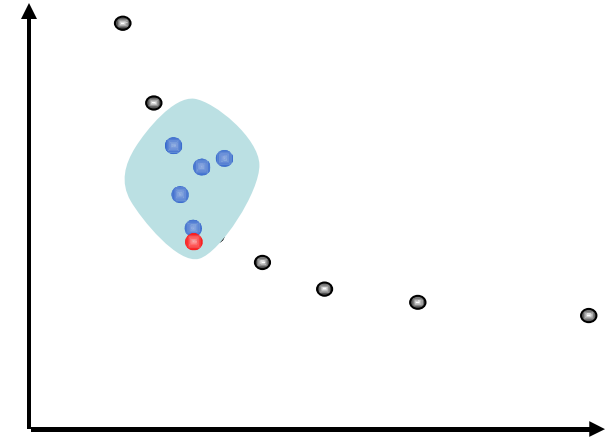
=> Modélisation homogène des solutions

Conclusion

Deux méthodes
d'optimisation:

- **Algorithme génétique**
 - modélisation **multi-critères**

- **Recuit simulé:**
 - modélisation **mono-critère**



Application à l'adaptation matérielle

Evolvable hardware

- Thompson [Tho97] a initié le secteur de recherche de l'evolvable hardware.
- Trouve ses sources dans les approches génétiques et dans la similitude faisable entre les fichiers de configuration des FPGA et le génome
- La spécification d'une architecture matérielle est alors vue comme une séquence binaire représentant une séquence génétique

Evolvable hardware

- On génère une population initiale de design
- On lance l'algorithme pour minimiser un certain critère
- On distingue alors
 - L'évolution 'extrinsic' : tous les designs sont simulés pour établir le fitness
 - L'évolution 'intrinsic' : les designs sont prototypés on-chip pour être évalués

Le problème de Thompson

- Il cherche un agencement de portes capable de discriminer des tonalités entre 1 et 10Hz.
- Simple avec des circuits séquentiels, Thompson se limite à l'utilisation de circuits purement combinatoires (possible ?)
- Le résultat de l'AG est surprenant

(suite)

- Configuration efficace, compacte, et surtout ...
- Incompréhensible !!!
- « *les circuits étaient non-humains dans leur conception – ils étaient compactes, efficaces et utilisaient des principes auxquels les concepteurs n'auraient jamais pensé* »
[Bentley01]

Limitations

- Le critère d'adaptation pour les circuits est difficile à formaliser
- La sélection naturelle (biologique) ne vise aucun but spécifique !
- L'utiliser pour l'adaptation en-ligne est beaucoup trop long !!

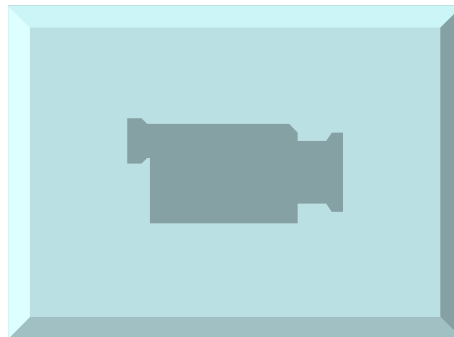
Systemes évolutionnistes morphogénétiques

- Proposés par Roggen, Floreano et Mattiussi [Rog03]
- Représente des architectures multicellulaires

Exemple de la reconfiguration robotique

Reconfiguration robotique/circuit

- La similitude avec la problématique circuit est assez troublante



Exemple des biomorphes

Biomorphes

- Un Biomorph est constitué d'un ensemble de 9 gènes. Huit de ces gènes codent en fait la direction et la longueur d'un embranchement, le neuvième code la profondeur des embranchements, leur nombre.
- On peut considérer que les 8 premiers gènes codent les directions dans l'ordre suivant :
 - Ouest, Nord-ouest, Nord, Nord-est, Est, Sud-est, Sud, Sud-ouest
- Le 9e gène code le nombre d'embranchement.

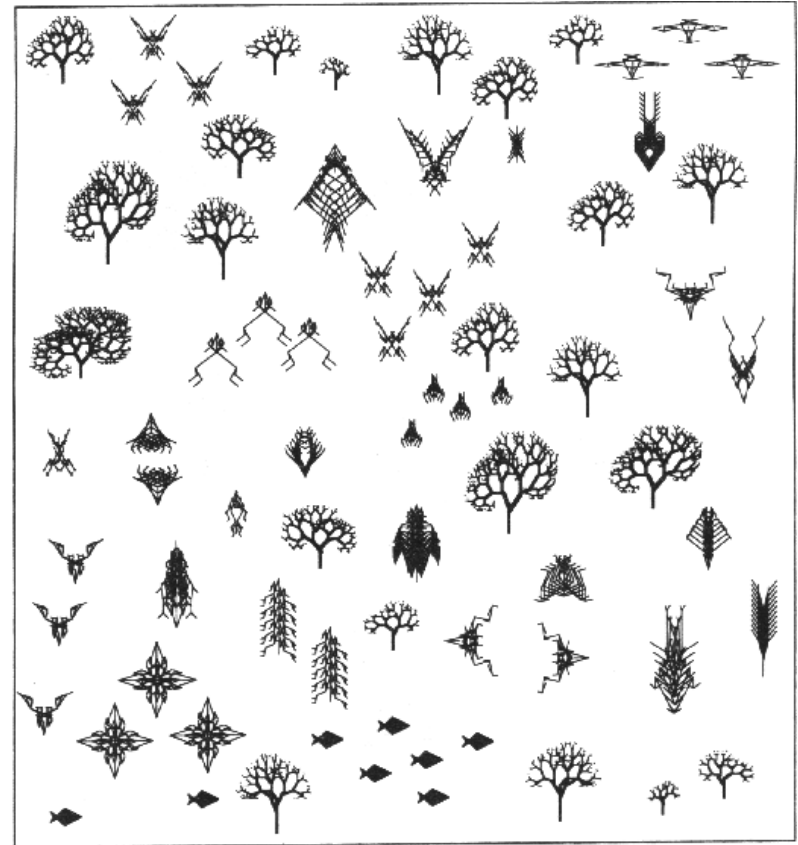


Figure 1.16 Safari park of black-and-white biomorphs, bred with the 'Blind Watchmaker' computer program.



Conclusion

