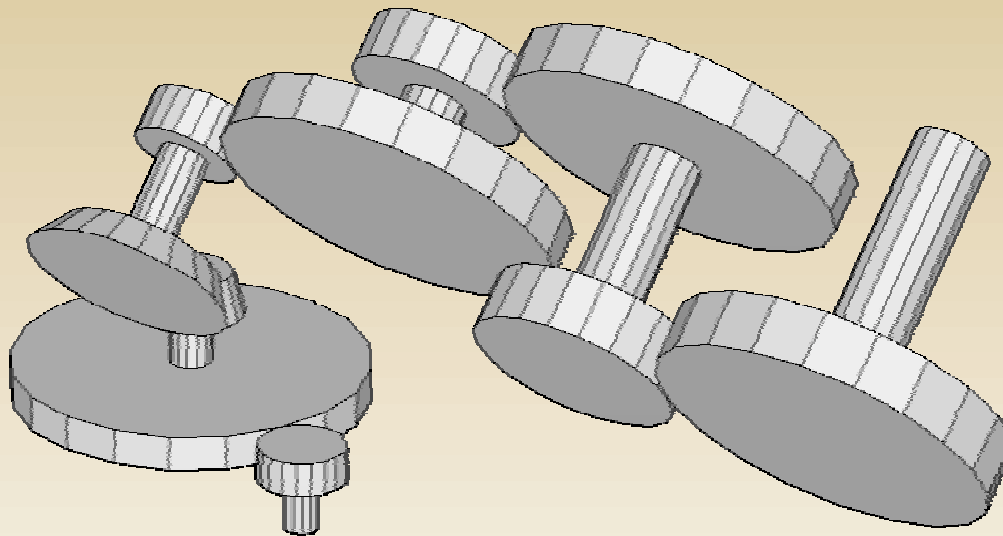


Conception optimale de structures cinématiques tridimensionnelles

Application aux mécanismes de transmission en rotation

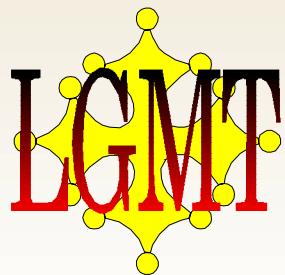


Par

Jean-Christophe FAUROUX

Directeur de thèse : Marc SARTOR

Laboratoire de **G**énie **M**écanique de **T**oulouse

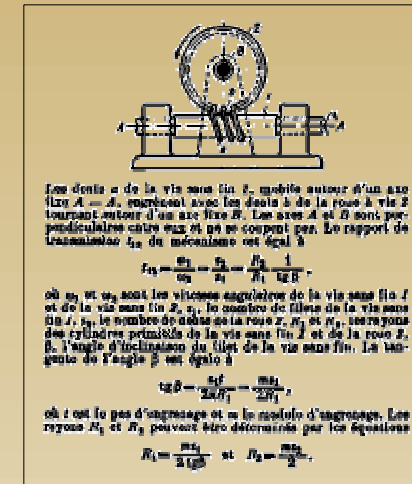


-1-
Introduction
Conception de mécanismes

Conception de mécanismes

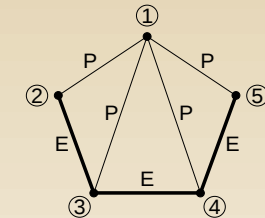
- Encyclopédies : **recensement** de mécanismes (Artobolevski, Chironis) →

- Outils d'**analyse** : simulation et d'optimisation de **mécanismes existants**



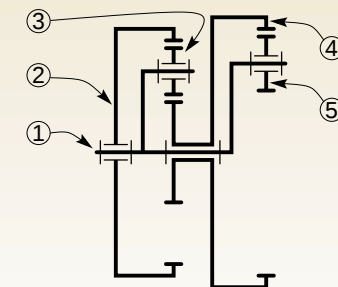
- Conception **détaillée** : **dernières phases** de la conception

- Outils de **synthèse** : graphe (Freudenstein) → ou **atlas de mécanismes** (Subramanian).



- Conception de **réducteurs de vitesse** : techniques d'**optimisation**

- Engrenages **cylindriques**
- Réducteurs **épicycloïdaux** →
- Réducteurs à **plusieurs étages** (Pomrehn)
- Cas des **arbres tous parallèles**



Objectif du travail

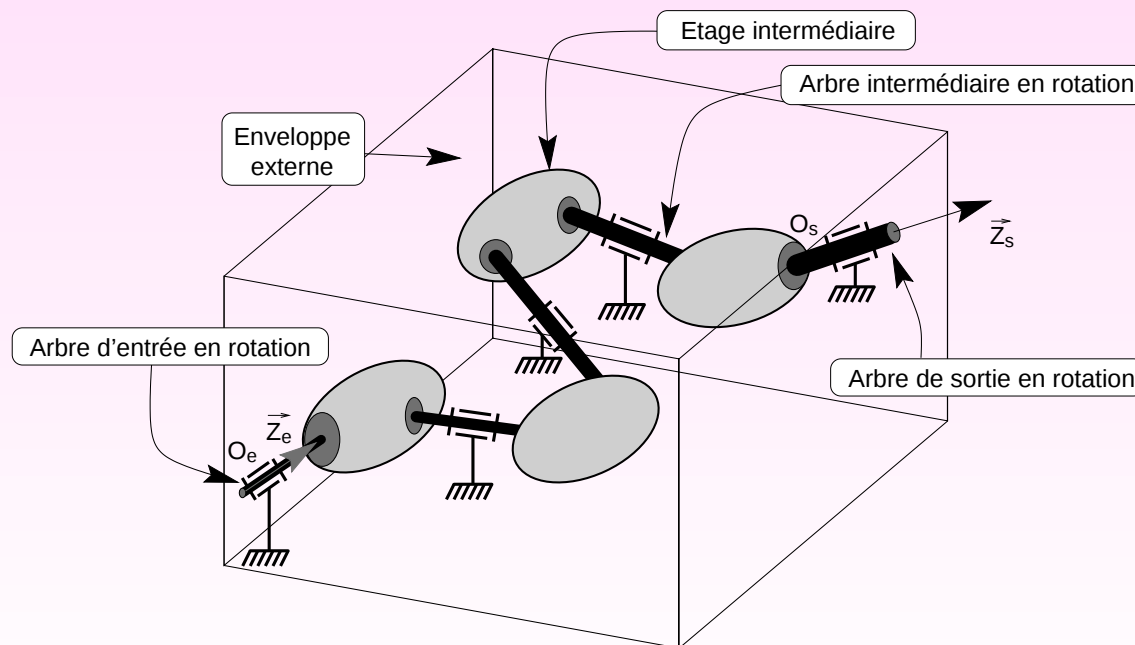
- Se concentrer sur la phase de **conception préliminaire**
Aider le concepteur partant de la feuille blanche
- Proposer une méthode **créative**
- Trouver une **classe de mécanismes**
pour appliquer cette démarche
- Développer un **logiciel** d'aide à la conception
qui soit **simple** d'usage, **portable** et **extensible**

-2-

Structure de notre *méthode* de conception

Classe des mécanismes à concevoir

- Transmission de mouvement **rotatif** à rapport **constant** (1 ddl)
- Structure **linéaire** en forme de chaîne :
Plusieurs **étages** disposés en série
- **Un** arbre d'entrée, **un** arbre de sortie
- Tous les étages sont **liés** au bâti reliés par des arbres intermédiaires
- Arbres d'orientation **quelconque**



Méthode de conception retenue

Général

Niveau de conception

Détaillé



Phase 1 Conception préliminaire

Phases 2 et + Conception détaillée

Étape 1
Recherche
topologique
préliminaire

Étape 2
Pré-calcul
dimensionnel
par la méthode
du squelette

Étape 3
Calcul des
dimensions
principales
du mécanisme

Étape 1
Définition de
la topologie
des guidages
en rotation

À suivre
...

Modèle 3D
Version 1.1

Modèle 3D
Version 1.2

Modèle 3D
Version 1.3

Modèle 3D
Version 2.1

Modèle 3D
Version 1

Modèle 3D
Version 2

Cahier des
Charges
initial

-3-

**Etape de recherche
topologique préliminaire**

Principes

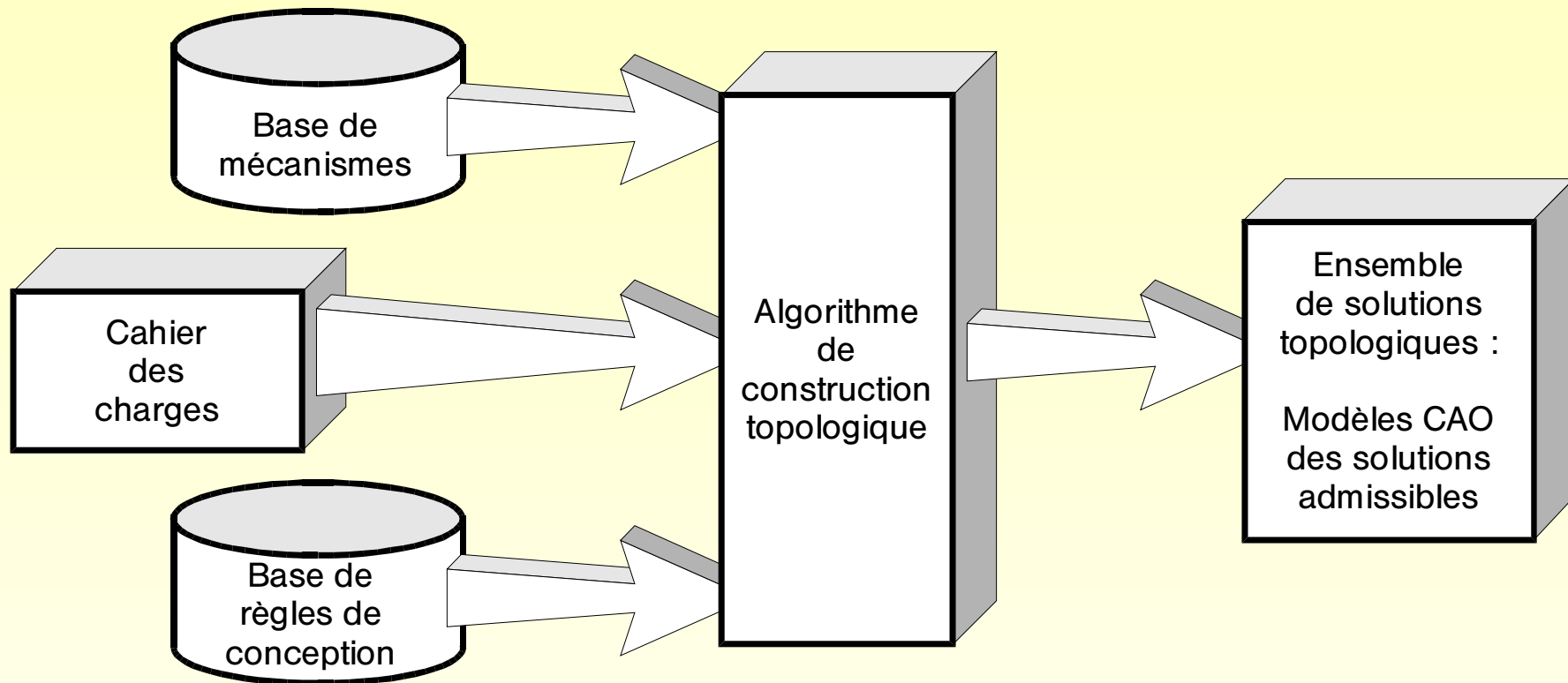
Le but est de répondre aux **contraintes fonctionnelles** du problème sans aborder les **contraintes dimensionnelles**

Solutions trouvées **qualitativement**

L'algorithme devra obéir aux principes suivants :

- **Justesse**
- **Exhaustivité**
- **Clarté**
- **Flexibilité**

Principes (suite)



Cahier Des Charges (CDC)

- **Nombre** maximum d'étages
- **Rendement** minimum
- **Orientation** relative des arbres d'entrée-sortie (angle en °)
- **Rapport de réduction**
- **Sens** de rotation (+ ou -)

Notion de **MME**

M.M.E. = **M**odule **M**écanique **E**lémentaire (brique de construction)

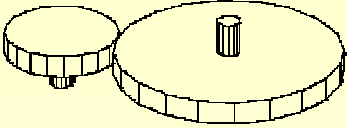
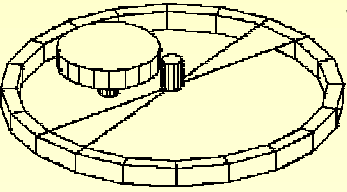
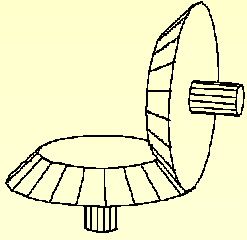
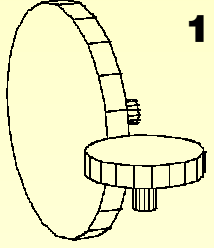
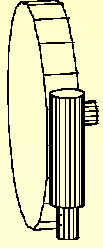
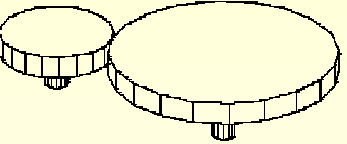
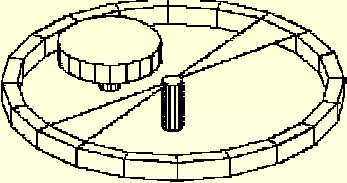
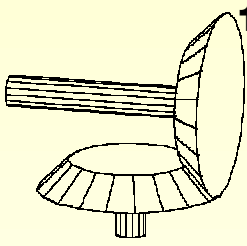
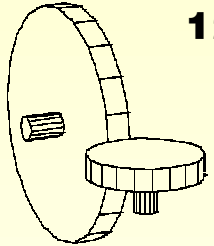
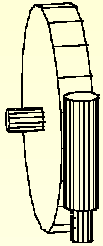
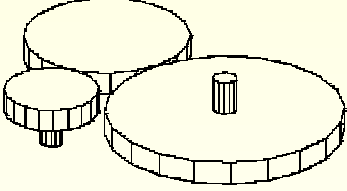
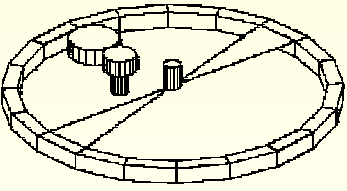
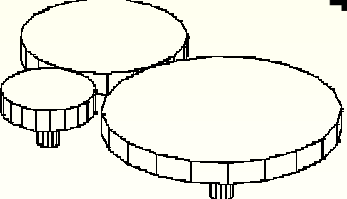
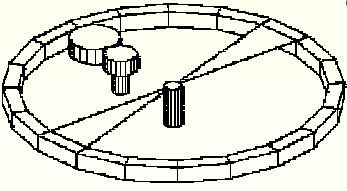
= Entité mécanique insécable et non décomposable

- Mécanisme à structure linéaire (1 DDL)
- 1 entrée - 1 sortie
- Rotation à rapport constant

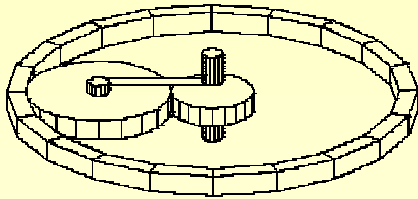
Construction d'une **base de MME** par :

- Recherche directe dans des encyclopédies (Artobolevski)
- Construction de **variantes**
 - Diverses positions d'arbres possibles
 - Adjonction d'un système inverseur

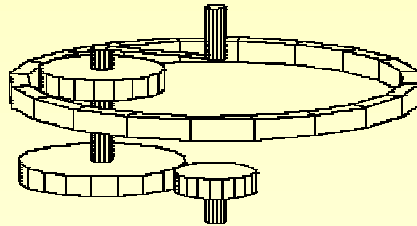
Base de MME (engrenages simples)

		Extérieur	Intérieur	Conique	Gauche	Roue-Vis
Sans inverseur	Disposition 1	 1	 5	 9	 11	 13
	Disposition 2	 2	 6	 10	 12	 14
Avec inverseur	Disposition 1	 3	 7			
	Disposition 2	 4	 8			

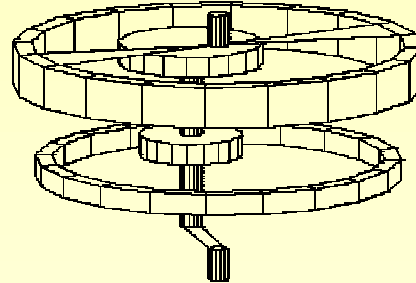
Base de MME (autres mécanismes)



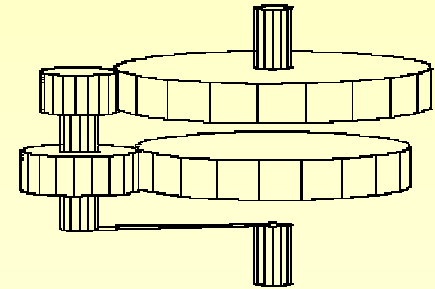
15 Epicycloïdal type I



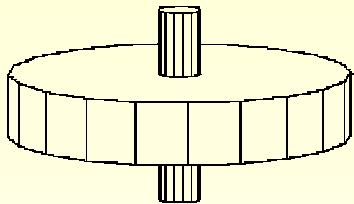
16 Epicycloïdal type II



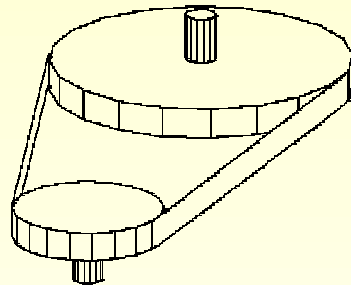
17 Epicycloïdal type III



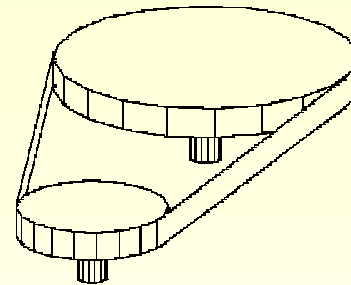
18 Epicycloïdal type IV



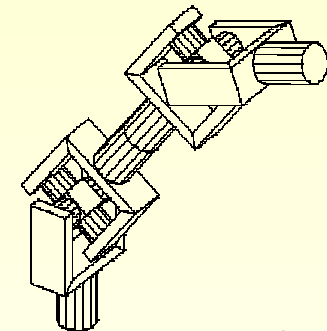
19 Cyclo-réducteur



20 Courroie



21 Courroie



22 Cardan

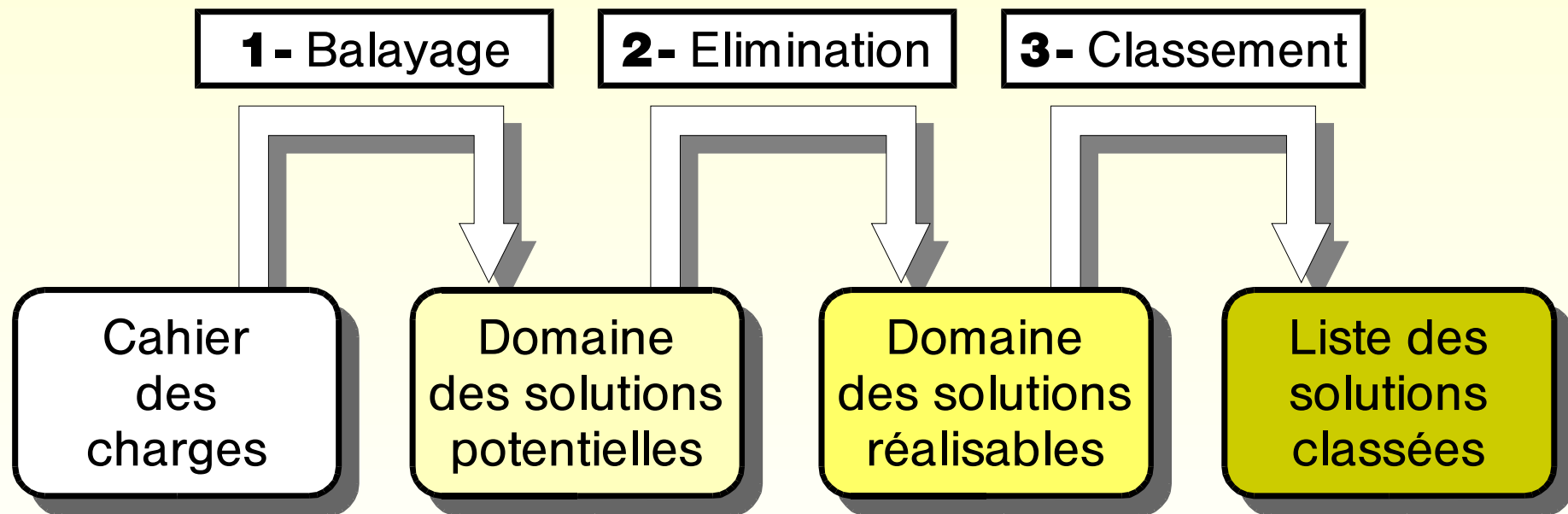
Caractéristiques de chaque MME

- | | |
|--|--|
| <ul style="list-style-type: none">• Rendement approché• Angle entre les arbres• Plage de rappports de réduction | <ul style="list-style-type: none">• Sens de rotation (+ - ?)• Dispositif inverseur (O/N)• Qualités du mécanisme |
|--|--|

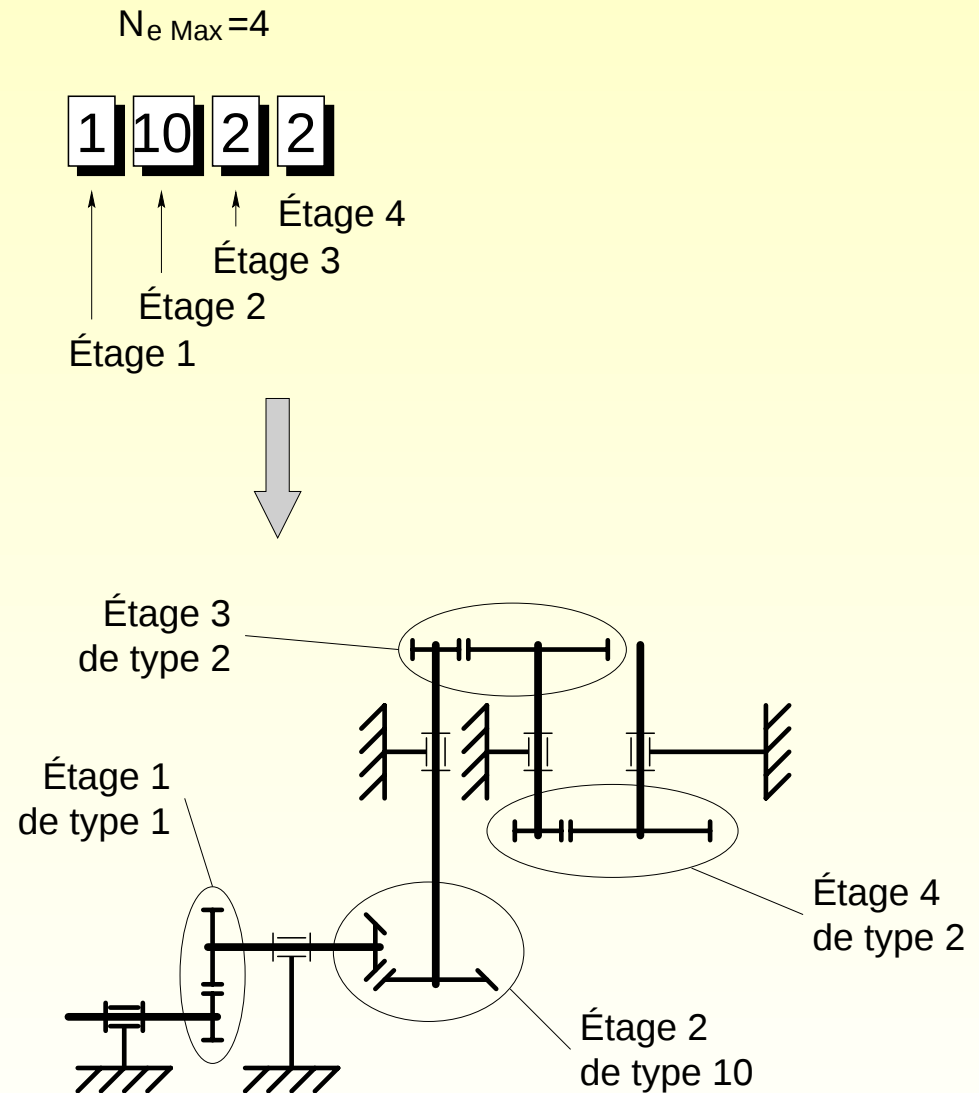
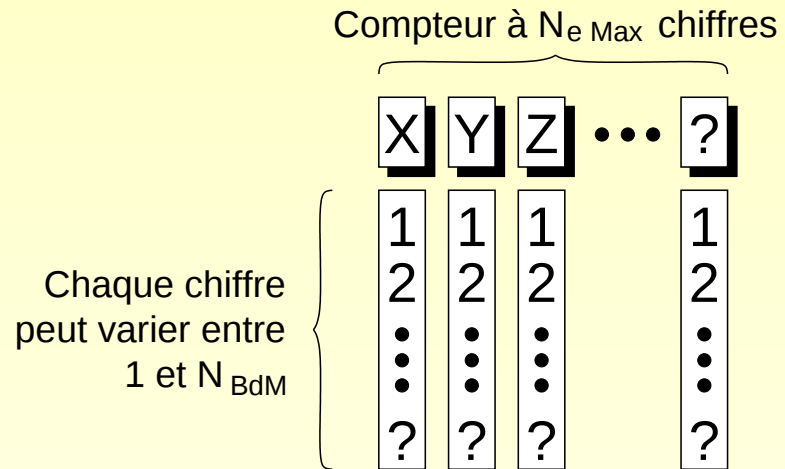
Algorithme de synthèse topologique

Méthode en **3 parties** :

- **1** - Exploration **combinatoire**
- **2** - **Elimination** des combinaisons inadaptées
- **3** - **Classement** par ordre de pertinence



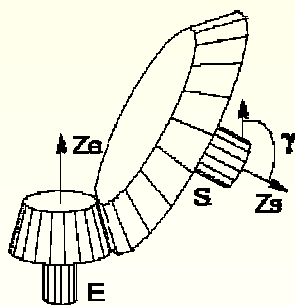
1 - Exploration combinatoire



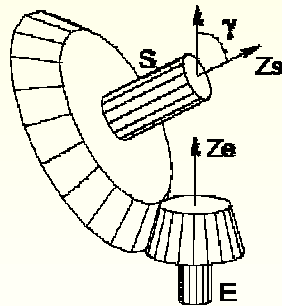
2 - Elimination

Des **règles de conception** permettent d'éliminer de nombreuses combinaisons inadaptées :

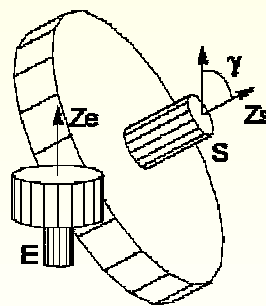
- Règle 1 : choix technologique sur la **position** de certains étages
- Règle 2 : respect du **rapport** de réduction
- Règle 3 : respect du **rendement** minimum
- Règle 4 : respect du **sens de rotation**
- Règle 5 : au plus **un étage inverseur**
- Règle 6 : respect de l'**orientation** des arbres



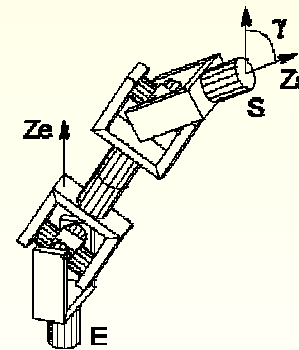
(a) Engrenage conique



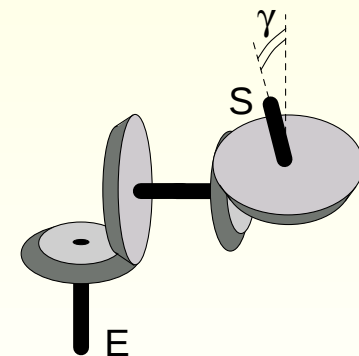
(b) Engrenage conique
(variante)



(c) Engrenage gauche



(d) Double cardan



3 - Classement

Classement des solutions restantes par **ordre de pertinence** :

Chaque solution comporte :

- N_e étages évalués selon
- N_c critères de qualité

- Méthode **multi-critères** :

$$Q_{M_i} = \frac{\sum_{c=1}^{N_c} K_c \cdot \left[\frac{\sum_{e=1}^{N_e} Q_{e,c}}{N_e} \right]}{\sum_{c=1}^{N_c} K_c}$$

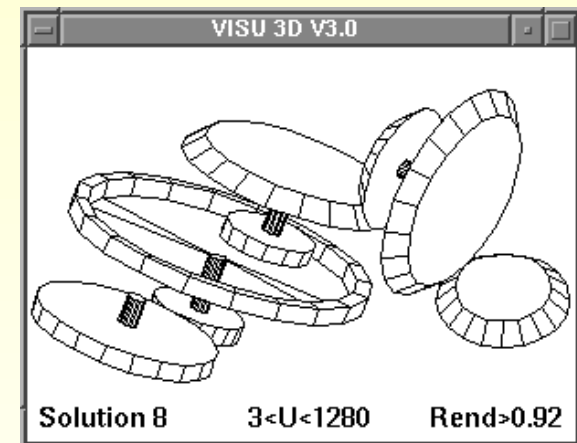
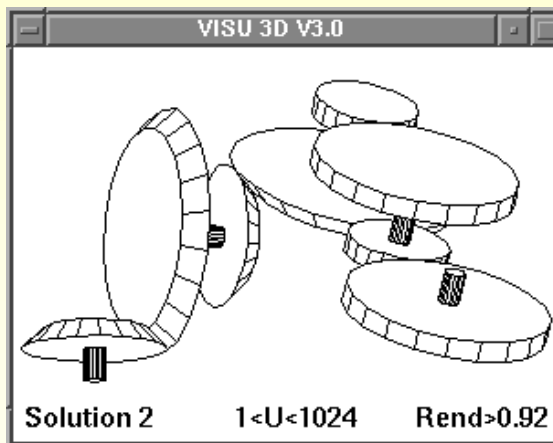
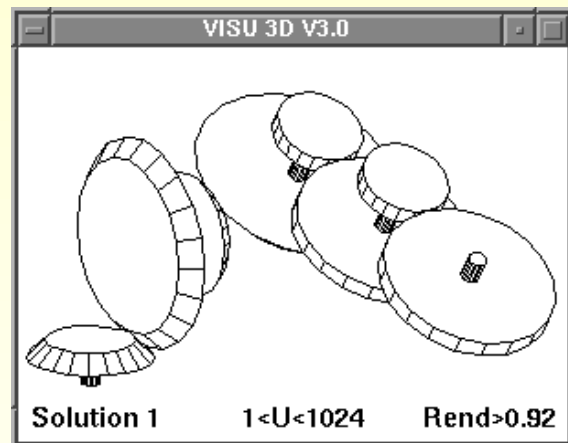
- Pour chaque mécanisme-solution M_i , calcul de Q_{M_i}
- Tri selon Q_{M_i}

- Méthode par la **logique floue** :

- Définition d'un **opérateur de comparaison floue** entre deux solutions
- Tri de la liste des solutions
- Avantage : évite l'attribution de notes

Conclusion sur la synthèse topologique

- Méthode simple pour isoler rapidement quelques **centaines** de solutions parmi des **millions** de combinaisons
- Solutions obtenues sous forme d'un **modèle CAO** prêt à être dimensionné

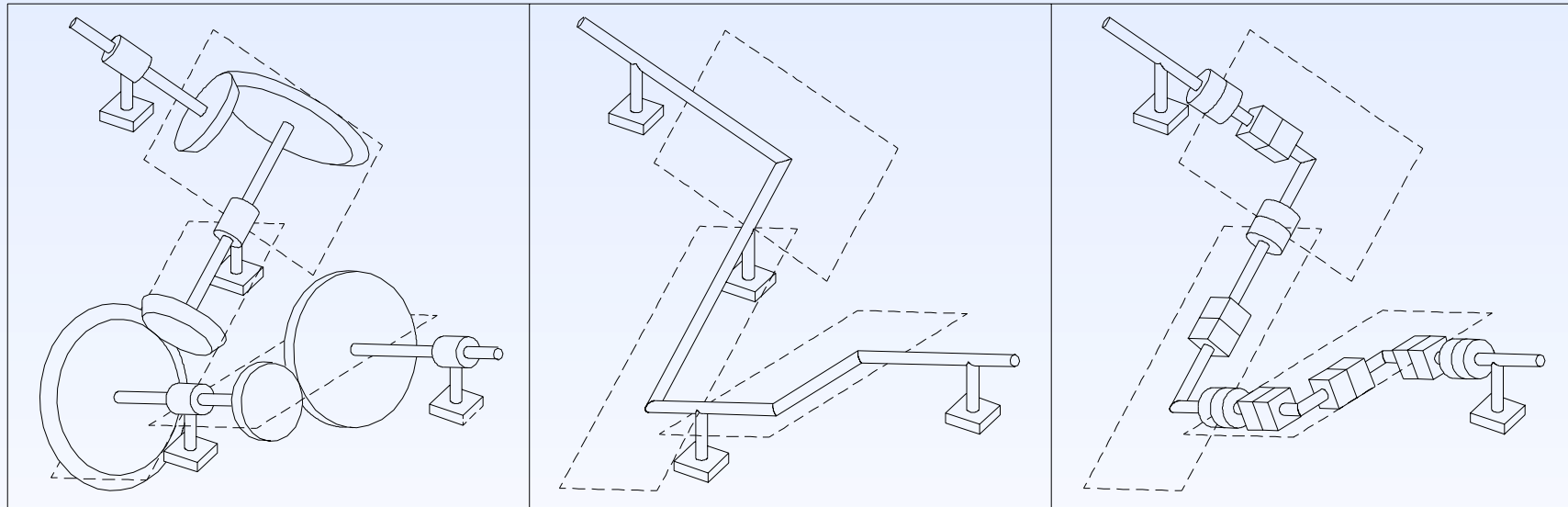


- Méthode **facile à modifier** :
 - Rajout de **MME**
 - Rajout de **règles d'élimination**
 - Autres **critères de tri**

-4-
Etape du
pré-calcul dimensionnel par la
méthode du squelette

Introduction de la méthode du squelette

- **Hypothèse** : une solution topologique a été choisie à l'étape précédente (Ne étages)
- Notion de **squelette** de mécanisme :
 - Modèle **filaire** simplifié
 - Longueurs d'**arbres**
 - Longueurs d'**entraxes**
 - **Angles** de rotation entre étages

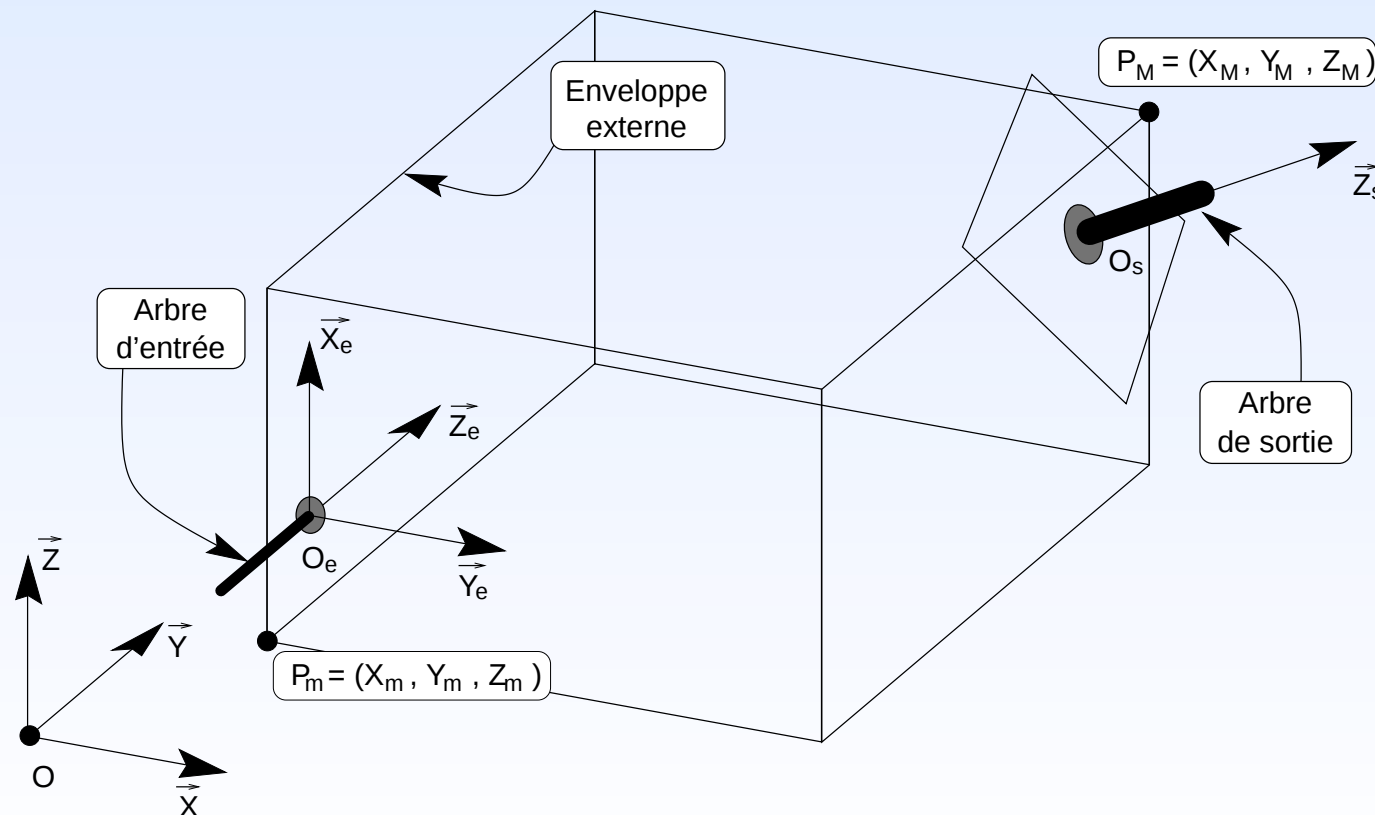


- **But** : trouver une disposition optimale des étages (**angles** plutôt que longueurs)

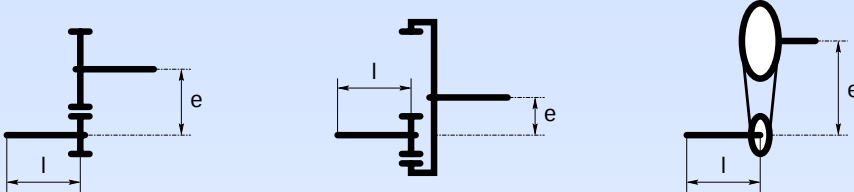
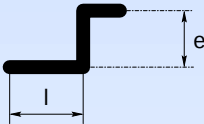
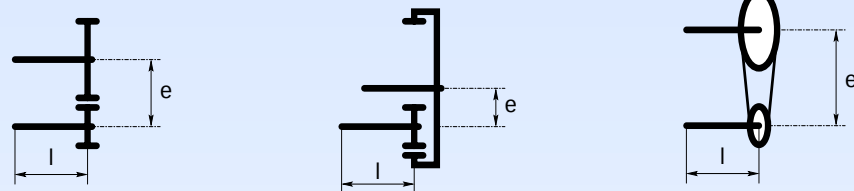
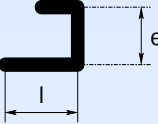
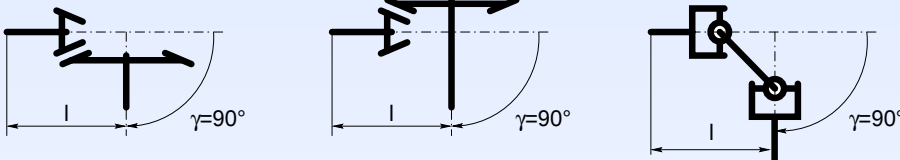
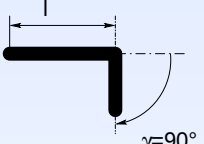
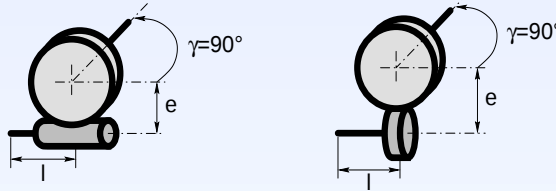
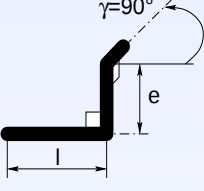
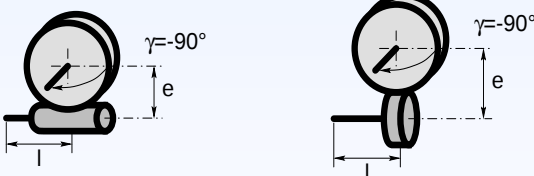
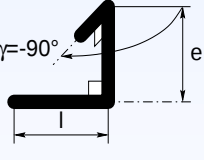
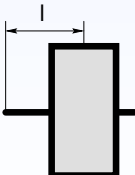
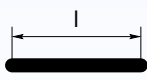
Nature du problème

Problème : déterminer **dimensions**, **positions** et **orientations** des étages du réducteur telles que :

- L'arbre de sortie sorte bien en Os selon $\vec{Z}_s$ (**condition de fermeture**)
- Tous les étages rentrent dans l'**enveloppe**
- L'**encombrement** soit minimum



Squelettes de quelques étages

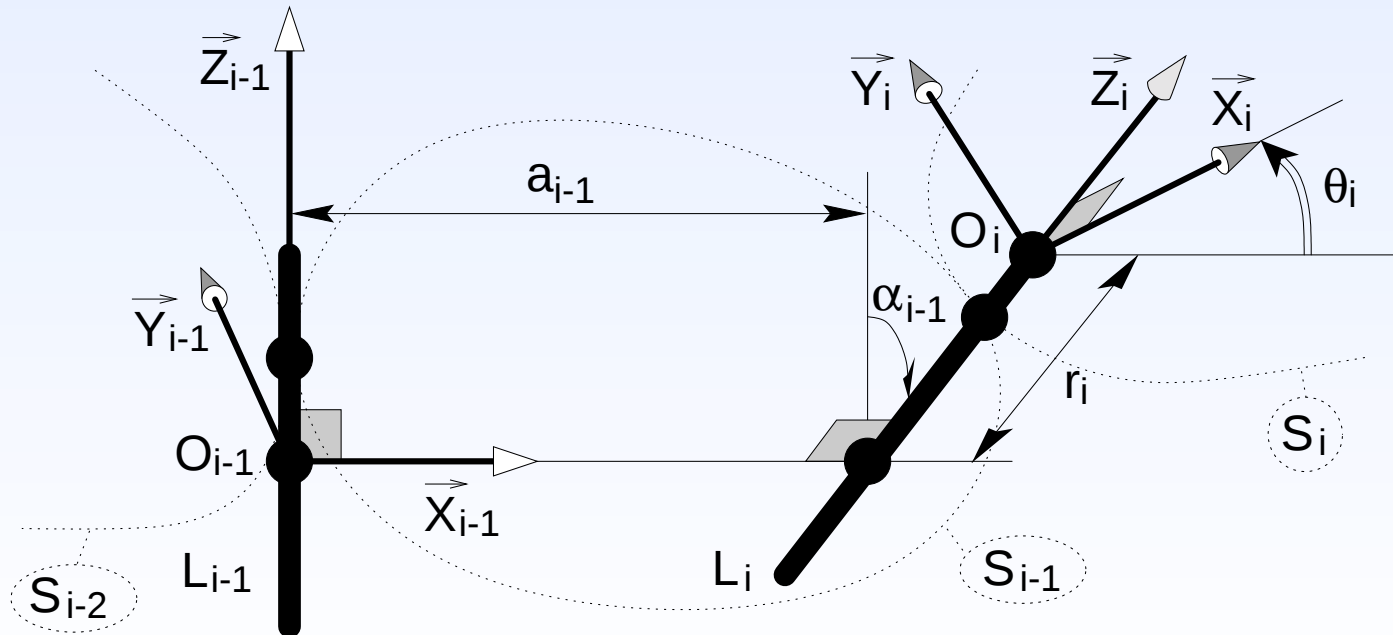
Exemples d'étages	Squelette	Descriptif
		Arbres parallèles opposés
		Arbres parallèles du même côté
		Renvoi d'angle sans entraxe
		Renvoi d'angle avec entraxe et γ positif
		Renvoi d'angle avec entraxe et γ négatif
		Arbres coaxiaux

Modèle géométrique utilisé

- **Substitutions** dans le squelette :
 - Variables de longueur $\Leftrightarrow$ Liaisons **prismatiques**
 - Variables angulaires $\Leftrightarrow$ Liaisons **rotoïdes**
- On utilise un modèle s'inspirant de celui de **Denavit-Hartenberg**
- Il permet de spécifier la position d'une liaison par rapport à la précédente à l'aide **4 paramètres** :

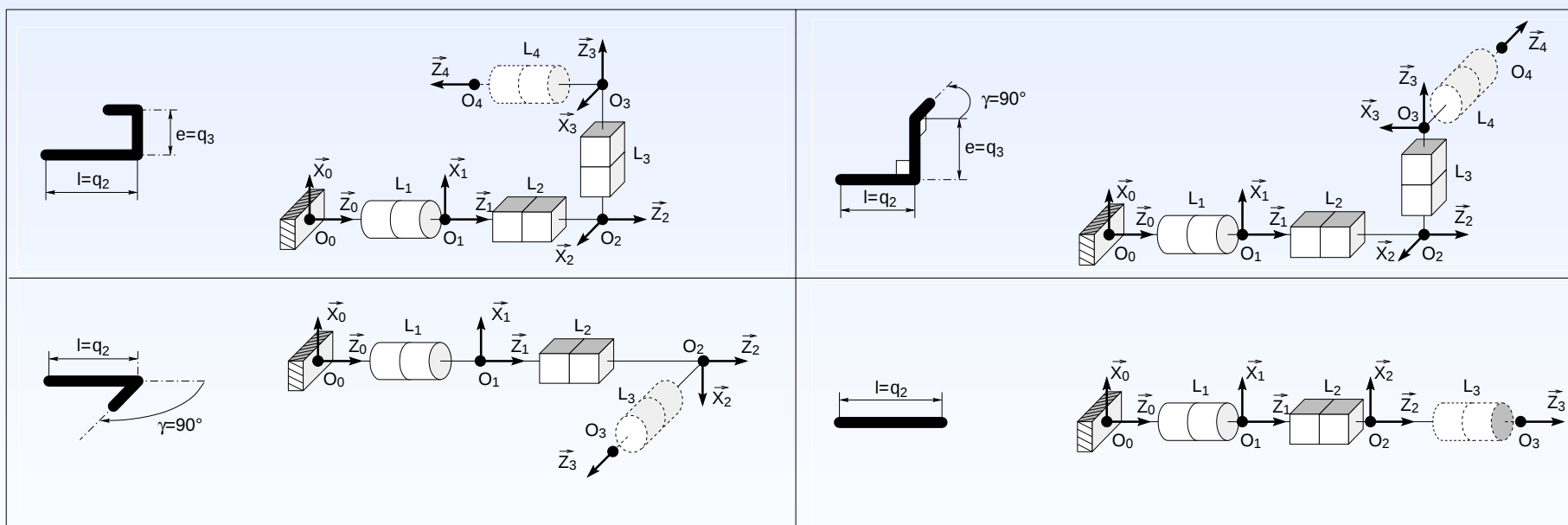
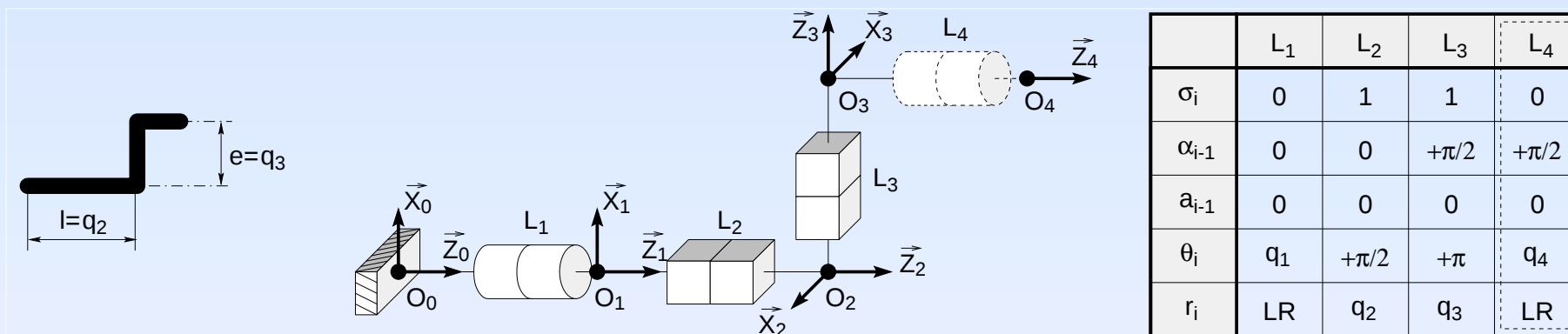
$$(a_{i-1}, \alpha_{i-1}, r_i, \theta_i)$$

Longueur des liaisons prismatiques $\xrightarrow{\quad}$ $\xrightarrow{\quad}$ Angle des liaisons rotoïdes



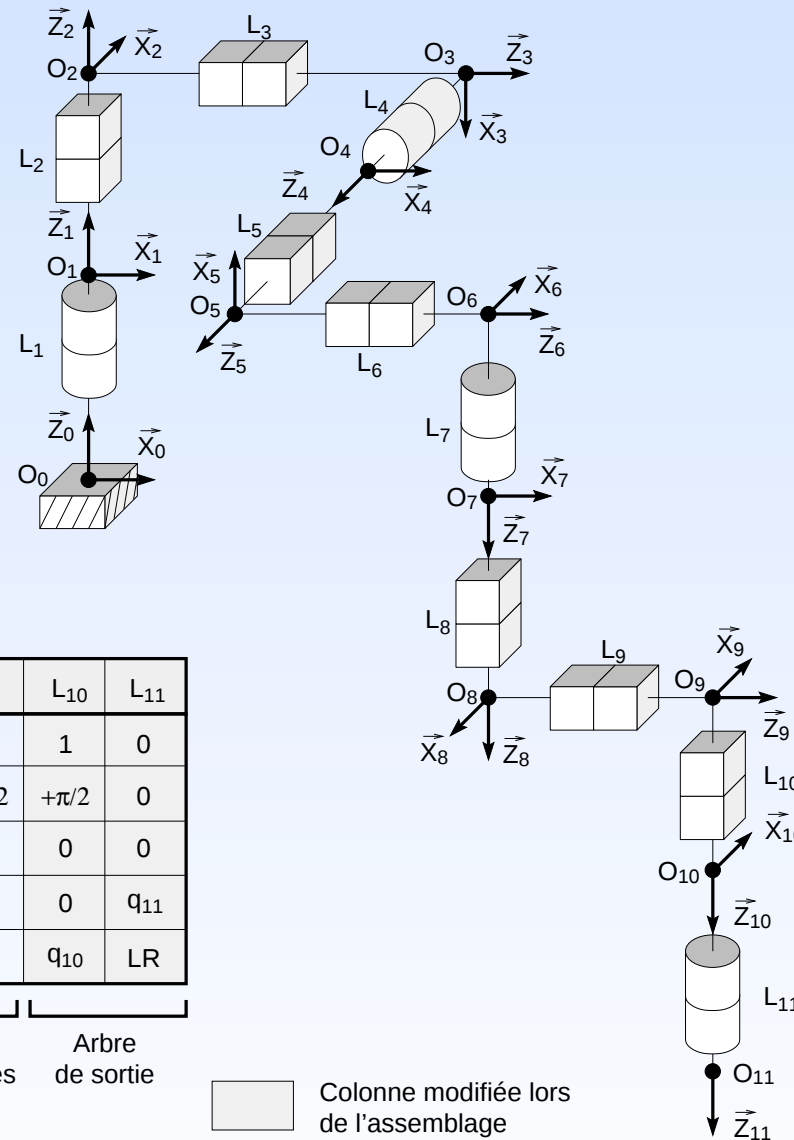
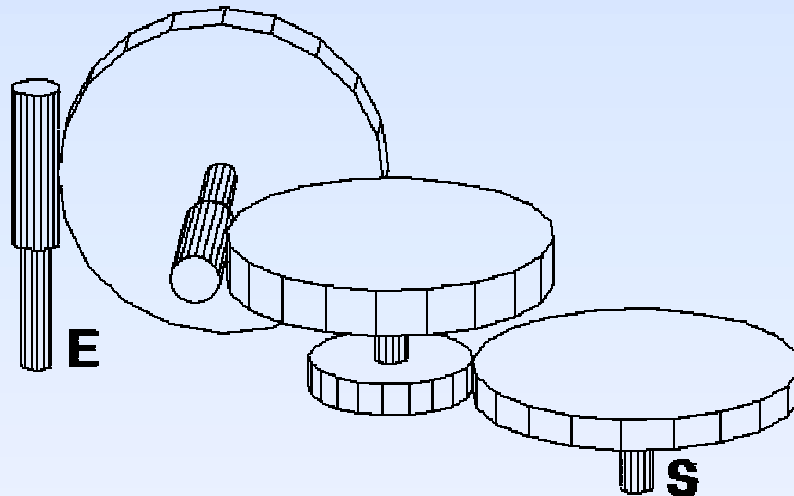
Modélisation géométrique des étages

- Pour chaque type d'étage, on a une **table des paramètres** de DH
- On **rajoute** une variable modélisant la longueur de l'arbre de sortie



Modélisation d'un réducteur **complet**

- La table du réducteur est issue de l'**assemblage** des tables des étages
- Rajout des paramètres de l'**arbre de sortie**



	L ₁	L ₂	L ₃	L ₄	L ₅	L ₆	L ₇	L ₈	L ₉	L ₁₀	L ₁₁
σ_i	0	1	1	0	1	1	0	1	1	1	0
α_{i-1}	0	0	$+\pi/2$	$+\pi/2$	0	$+\pi/2$	$+\pi/2$	0	$+\pi/2$	$+\pi/2$	0
a_{i-1}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
θ_i	q_1	$+\pi/2$	$-\pi/2$	q_4	$+\pi/2$	$-\pi/2$	q_7	$+\pi/2$	$+\pi$	0	q_{11}
r_i	LR	q_2	q_3	LR	q_5	q_6	LR	q_8	q_9	q_{10}	LR

Étage 1
(Renvoi d'angle à
90° avec entraxe)

Étage 2
(Renvoi d'angle à
90° avec entraxe)

Étage 3
(À arbres parallèles
opposés)

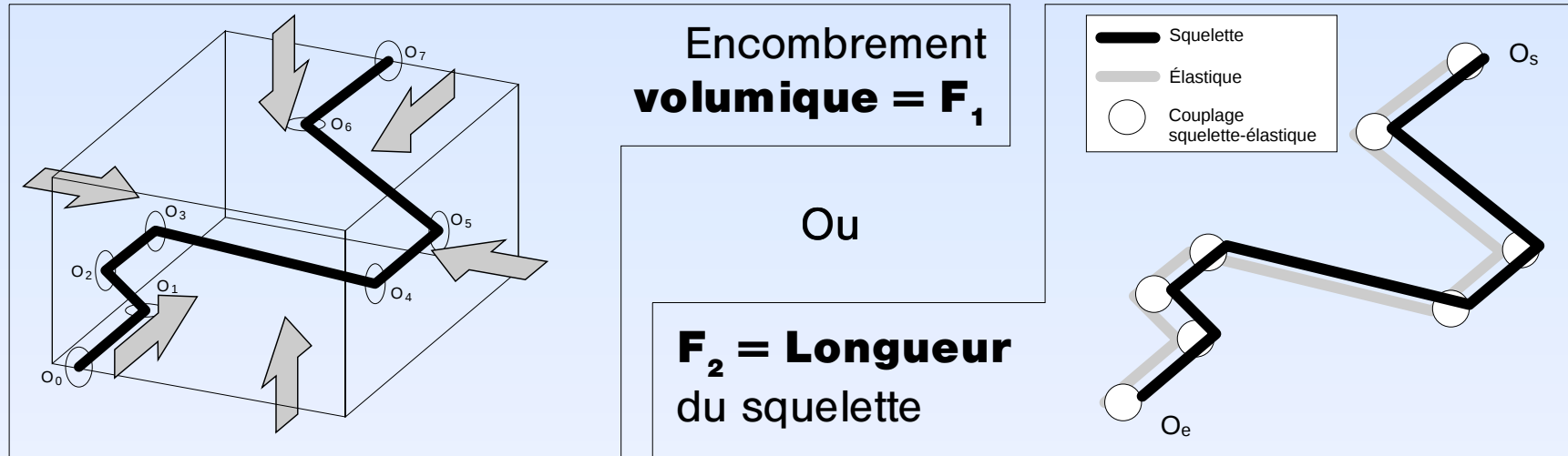
Arbre
de sortie

 Colonne modifiée lors
de l'assemblage

- Démarche **modulaire** entièrement informatisée

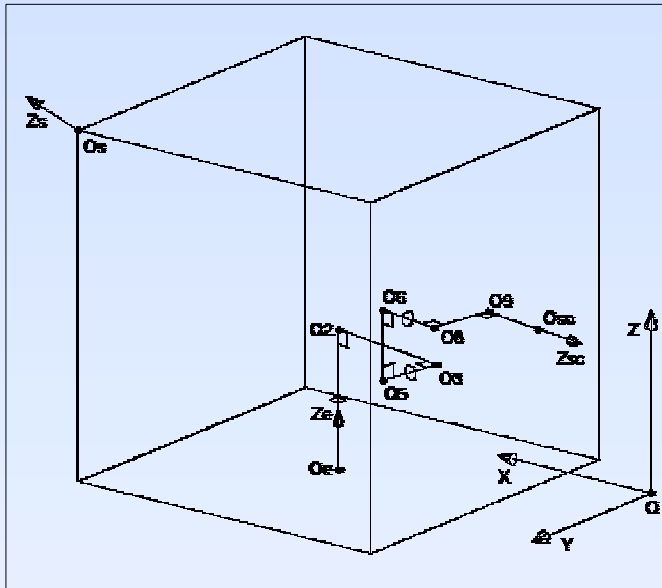
Le problème d'optimisation

- Variables = longueurs et angles
- On cherche à minimiser une **fonction objectif** :

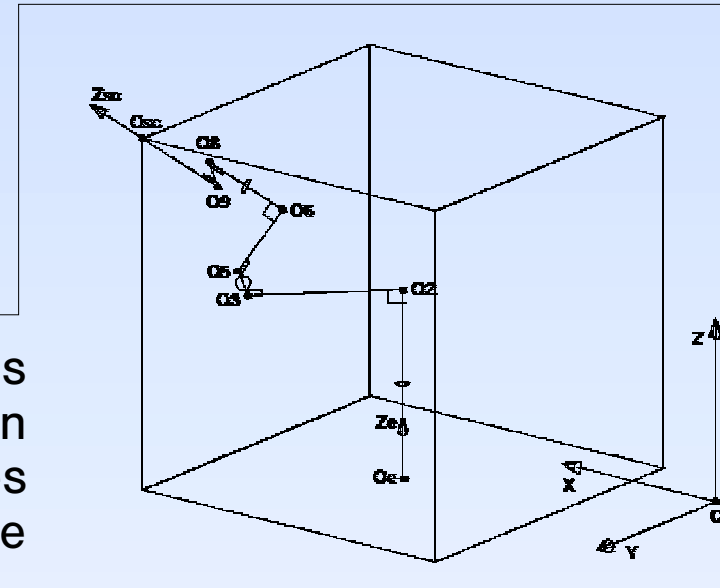


- Contraintes égalités de **fermeture** :
 - Contraintes de **position** : $O_s = O_{sc}$
 - Contraintes d'**orientation** : $\vec{Z}_s = \vec{Z}_{sc}$
- Contraintes inégalités de **non interférence** avec l'enveloppe :
 Enveloppe convexe $\Rightarrow$ il suffit de s'assurer que les points O_i restent dans l'enveloppe

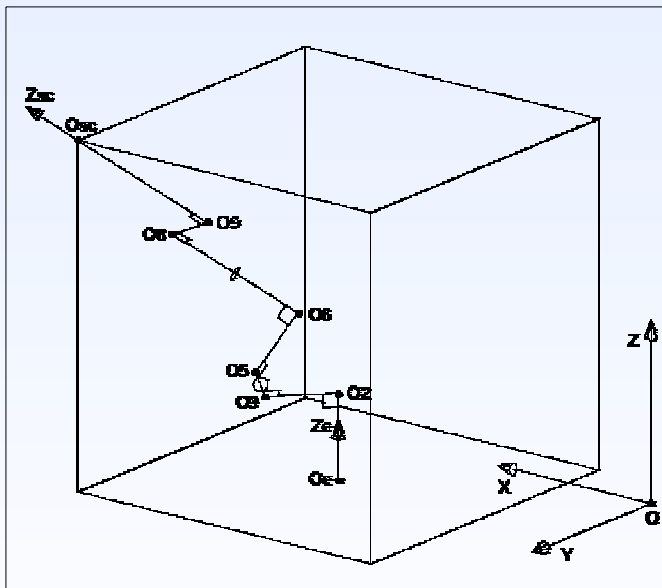
Exemple d'application



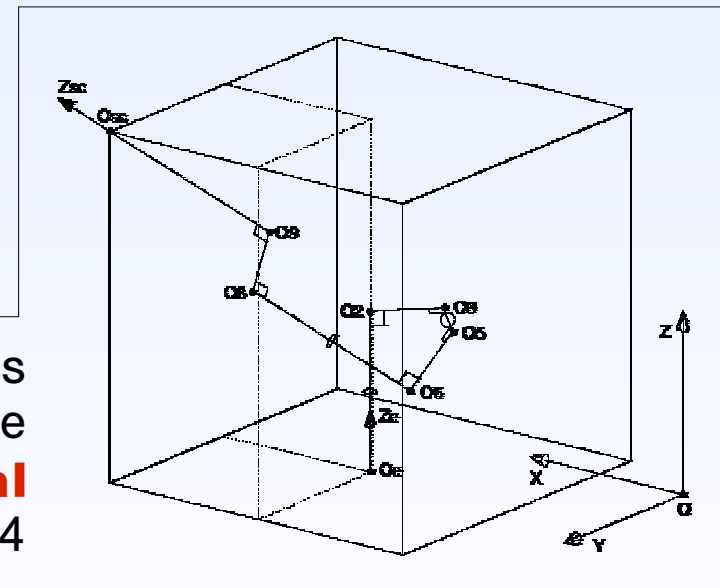
Position
initiale



Après
vérification
des contraintes
de fermeture

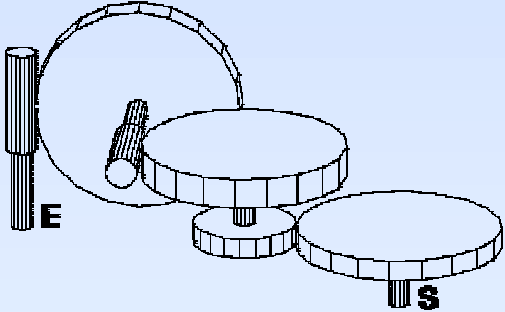
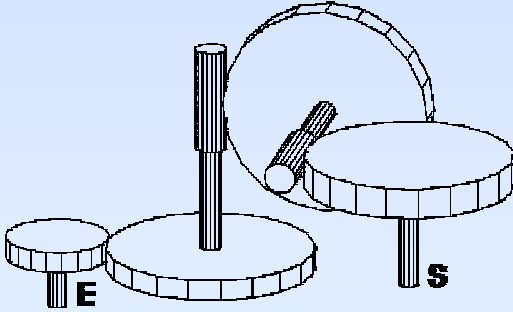
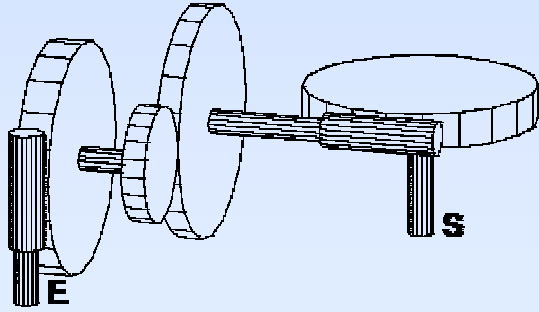
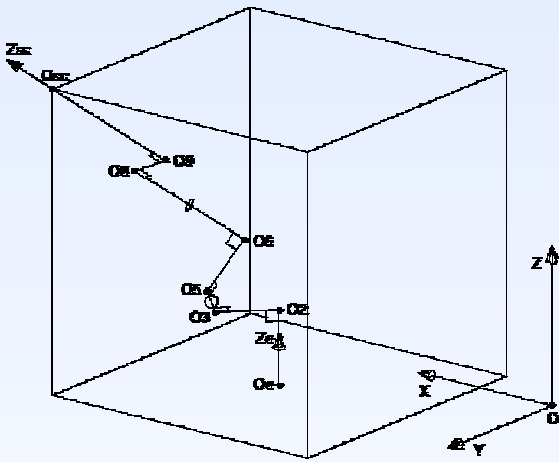
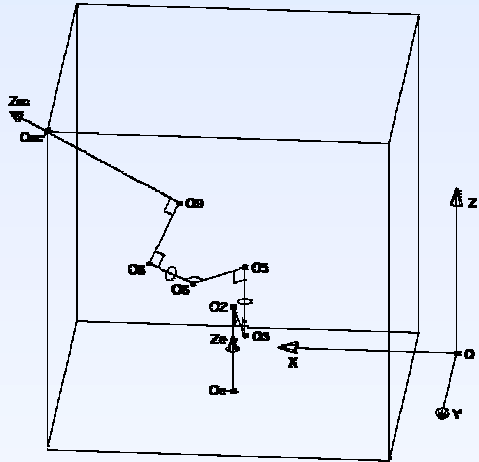
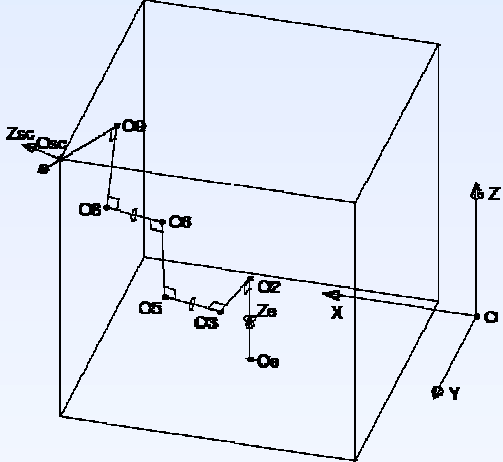


Après
compactage
Opt. **global**
 $F_2 = 1930$



Après
compactage
Optimum **local**
 $F_2 = 2344$

Autres exemples

Variante 1 (13, 13, 1)	Variante 2 (1 , 13, 13)	Variante 3 (13, 1 , 13)
		
		
Optimum global : $F_2 = 1930$	Optimum global : $F_2 = 1930$	Pas de solution

Le calcul du squelette permet de s'apercevoir que la variante 3 correspond à une **topologie incorrecte**

Conclusion sur la méthode du squelette

Le **pré-calcul du squelette** offre de nombreux avantages :

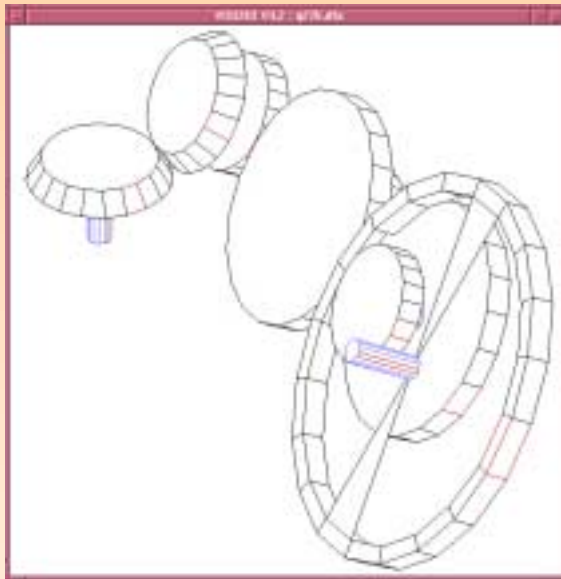
- Permet de résoudre le problème de la **fermeture de la chaîne**
- L'existence d'un squelette valide est une **condition nécessaire** mais non suffisante pour l'existence d'un mécanisme valide
- **Représentation synthétique** de la disposition optimale des étages dans l'espace d'un point de vue purement géométrique
- Les paramètres du squelette donnent un **point de départ** avantageux pour le problème d'optimisation de l'étape suivante

-5-

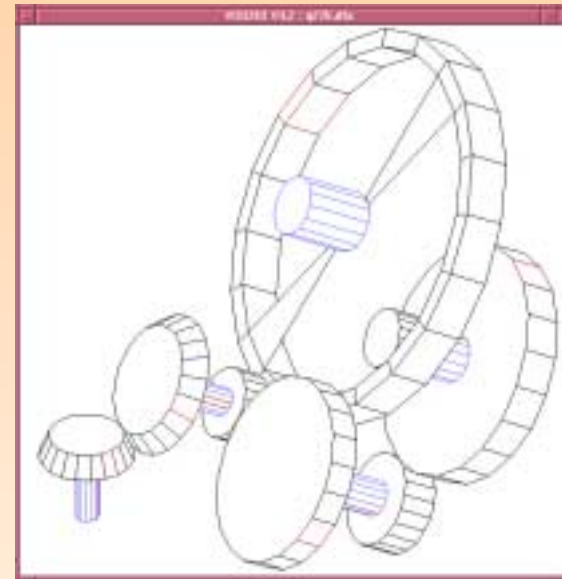
**Etape du calcul des
dimensions principales
du mécanisme**

Optimisation des dimensions

- **Dimensionnement** des pièces



Avant



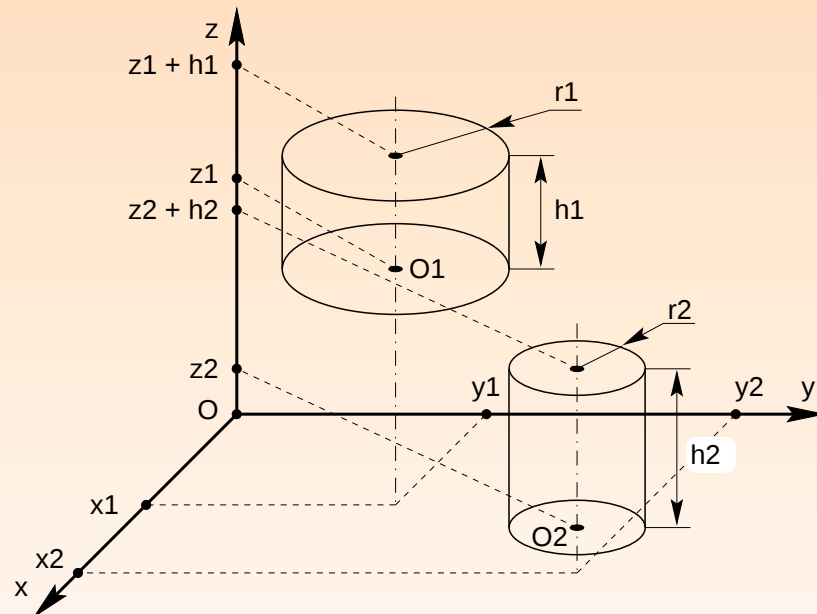
Après

- **Variables** :
 - Arbres : L_a , R_a
 - Roues : r_1 , r_2 , b
 - Etages : ξ (angle en $^\circ$)
- **Objectif** : volume

Contraintes géométriques

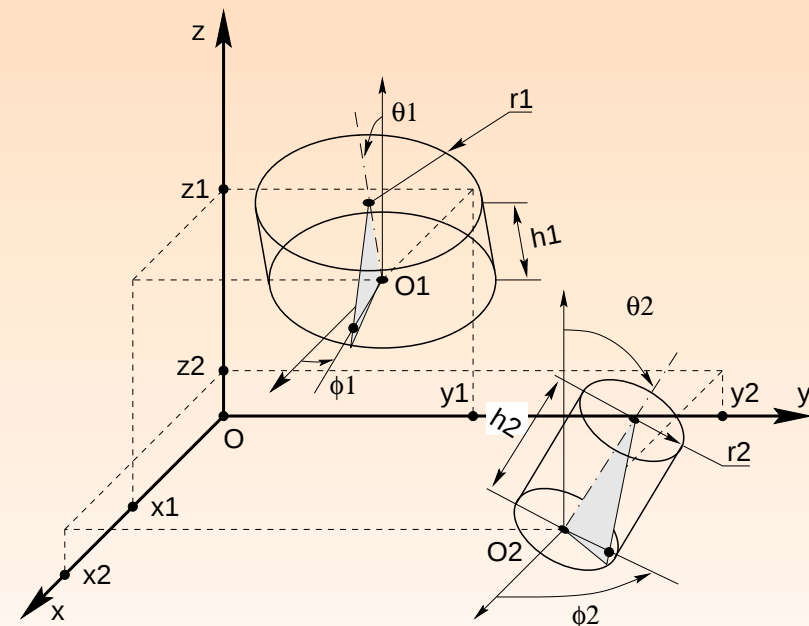
- **Fermeture** du mécanisme
- **Continuité** du mécanisme
- **Non-interférence** entre solides

Cylindres parallèles



Formule analytique simple

Cylindres quelconques



Méthode de détection
hybride

(discrétisation + équations exactes)

Contraintes **technologiques**

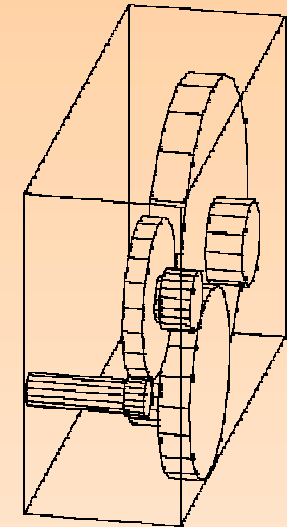
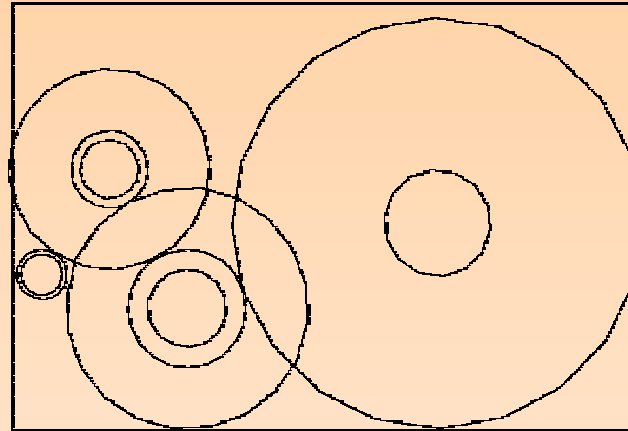
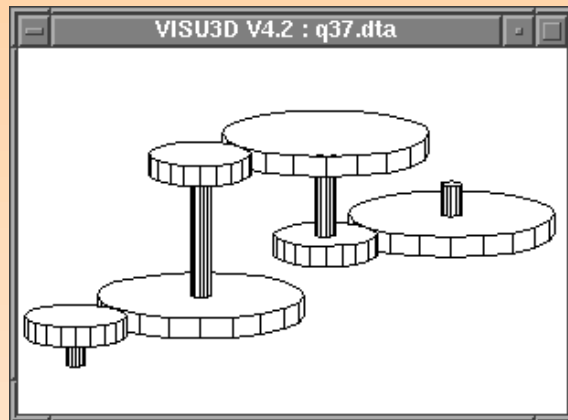
- **Résistance des dentures** à la pression superficielle (AFNOR E23-015)

$$\left[\begin{array}{l} \frac{P_e \cdot (d_1 + d_2) \cdot (C_H + C_I \cdot \left(\frac{b}{d_1}\right)^2 + C_J \cdot b)}{N_e \cdot K_{PRESS} \cdot b \cdot d_1^2 \cdot d_2} - 1 \leq 0 \\ (300 \cdot b) / (C_e \cdot d_1) - 1 \leq 0 \\ 50/b - 1 \leq 0 \\ b/500 - 1 \leq 0 \\ b/(2 \cdot d_1) - 1 \leq 0 \end{array} \right.$$

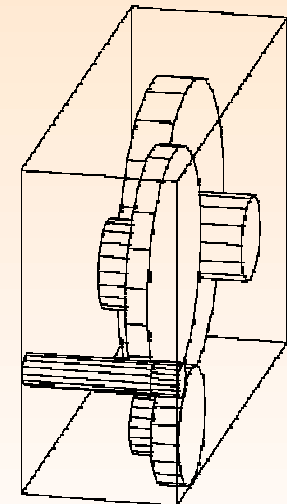
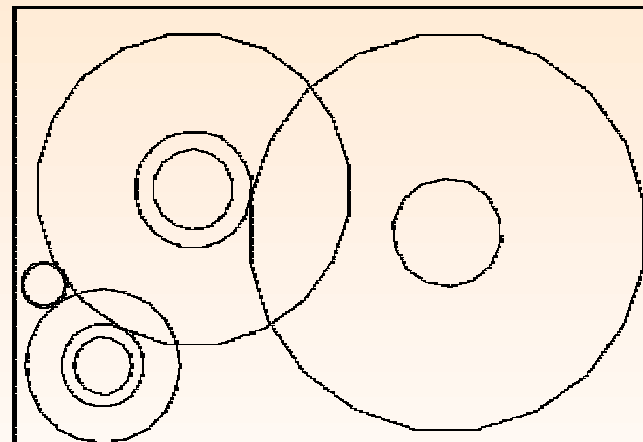
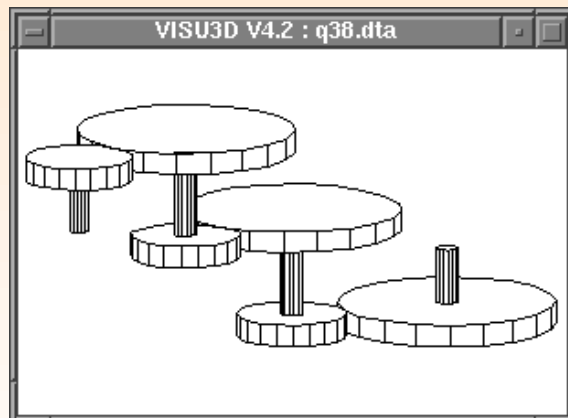
- **Distribution longitudinale** de charge ($K_{H\beta}$) maximale
- **Rapport de forme** des roues
- **Vitesse tangentielle** maximale
- **Rapport** de réduction
- **Rendement**
- Déformée maximale des **arbres en torsion**

Exemple de réducteur industriel

- Solution **q37**



- Solution **q38**

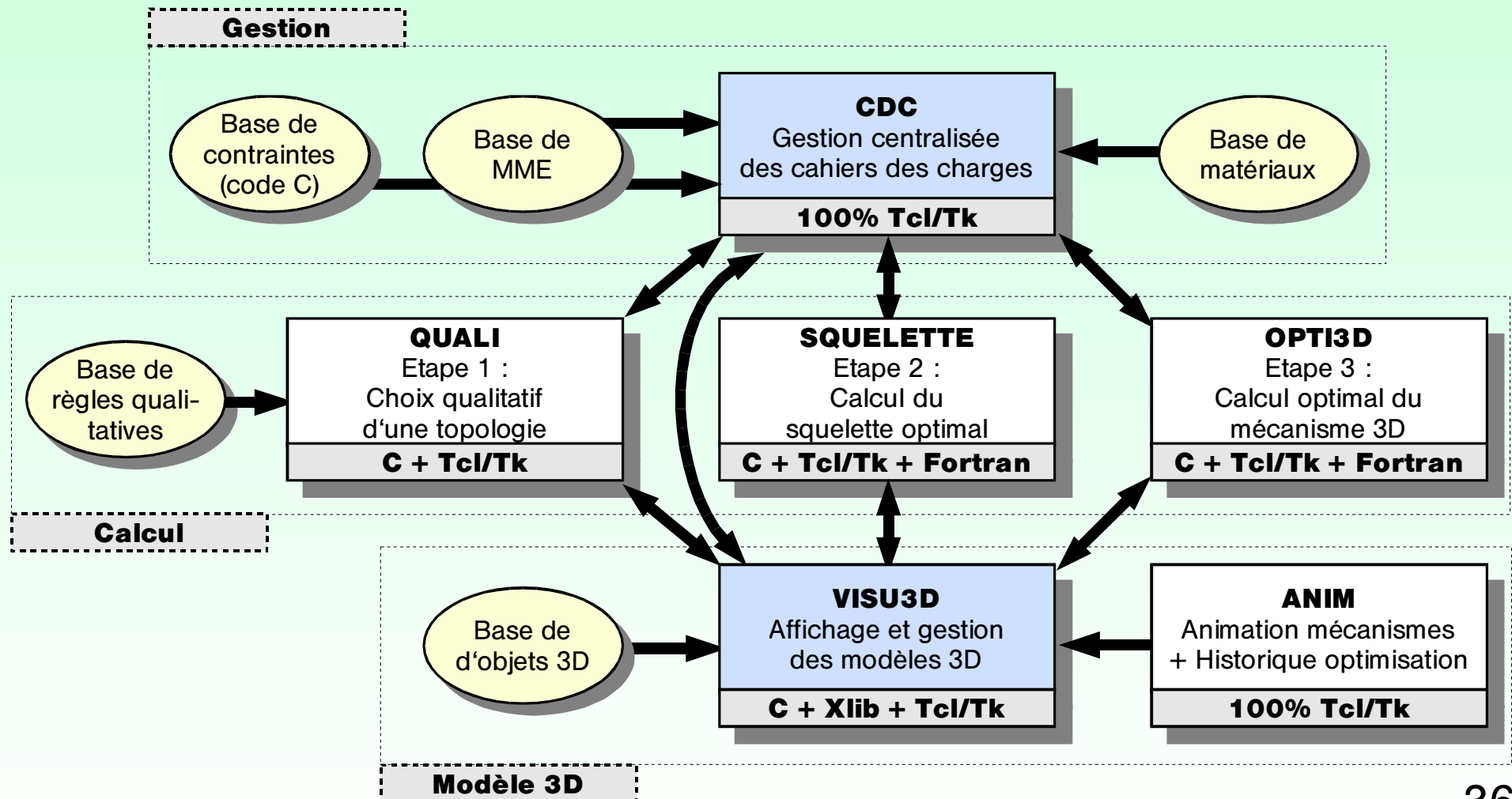


-6-

Mise en oeuvre logicielle

Architecture du logiciel

- Logiciel **CASYMIR** : **C**onception **A**ssistée de **S**ystèmes
Mécaniques de transm*i*ssion en **R**otation
- Architecture multi-modules : Échange de **messages** en mémoire

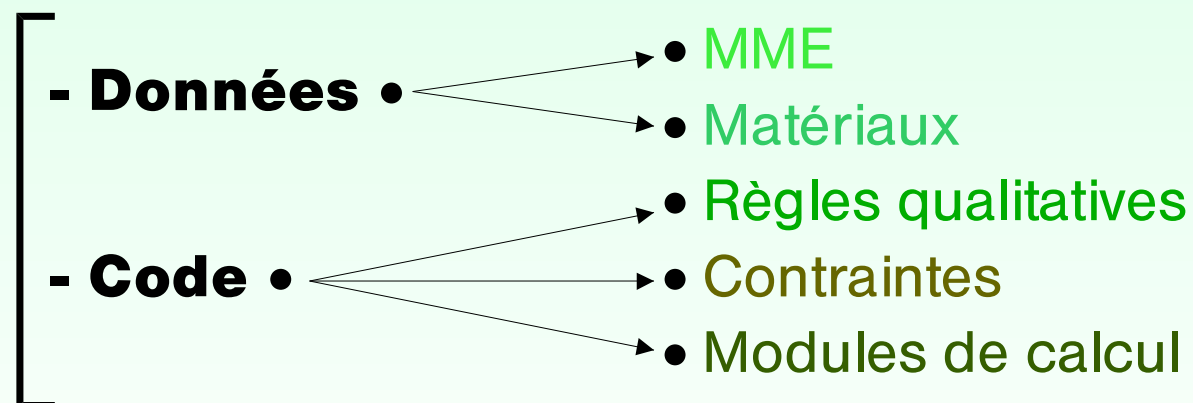


Portabilité et extensibilité

- **Langages** portables :

- **C** : calculs rapides
- **Fortran** : optimisation
- **Tcl/Tk** : interfaces graphiques

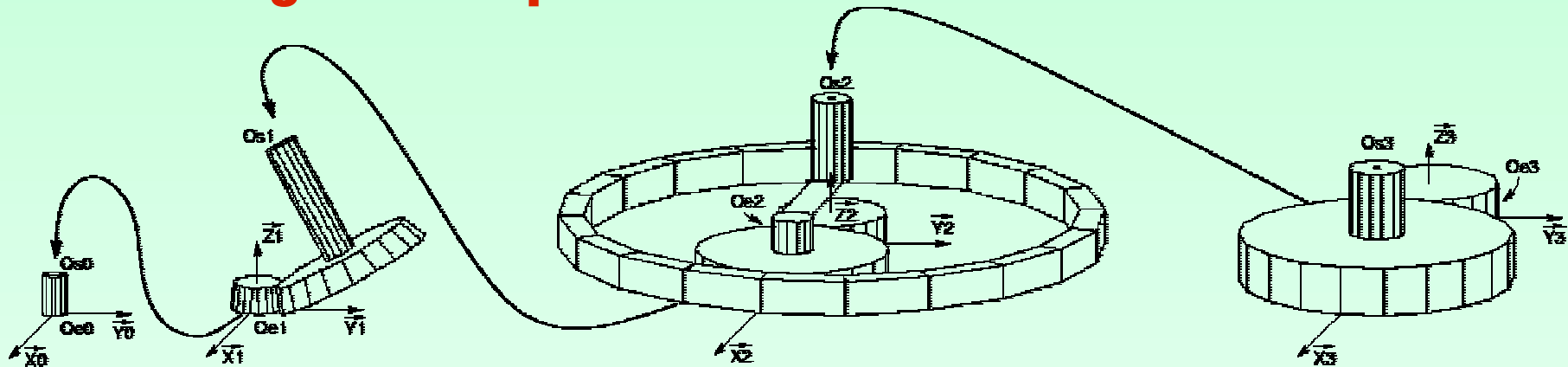
- Logiciel **extensible**



Collaboration entre modules

VISU3D / OPTI3D

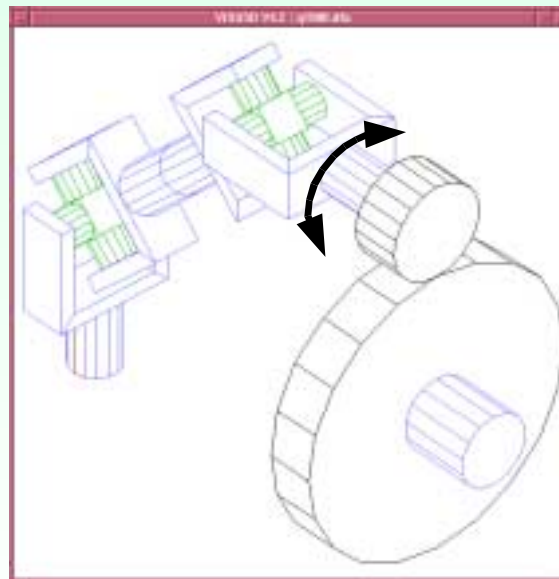
- Continuité **géométrique** :



- Calcul des **coordonnées** assuré par VISU3D

VISU3D / ANIM

- Continuité **cinématique** :



Conclusion et perspectives

Conclusion

- Conception de mécanismes en **rotation** :
 - Conception **sur mesure**
 - **Orientations** quelconques
- Méthode de **synthèse** :
 - Synthèse **topologique**
 - Synthèse **dimensionnelle** : pré-calcul du squelette
 - Synthèse **dimensionnelle** : optimisation des dimensions
- **Logiciel** de conception CASYMIR :
 - Evite l'effet **boîte noire**
 - **Extensible** et **portable**
 - **Optimisation collaborative**

Perspectives

- Méthodes d'optimisation **hybrides** (stochastique / gradient)
- Méthodes de **décomposition** de problèmes
- Mécanismes à structure **arborescente**
- Enrichissement de la **base de contraintes**
- Passage à la phase de **conception détaillée**