

# Le Model-Based Design

Une approche complète en sciences industrielles de l'ingénieur



**Frédéric MAZET**

Lycée Dumont d'Urville - Toulon



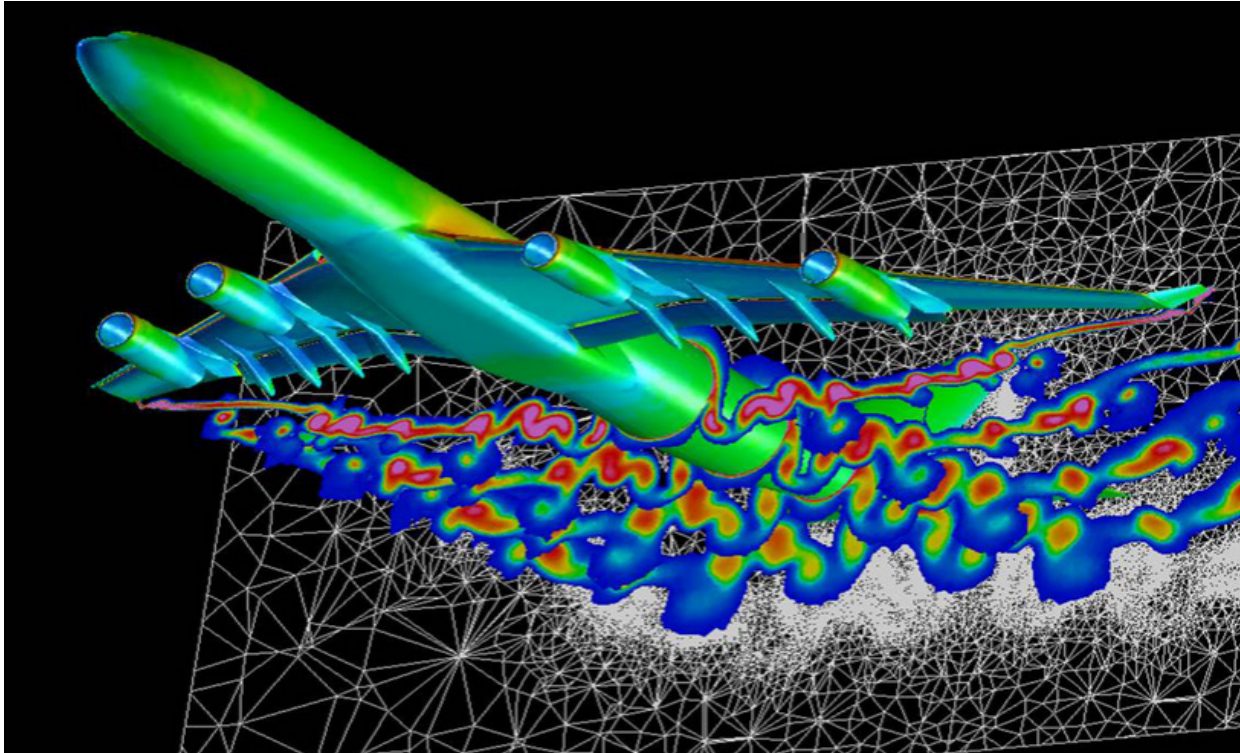
# Le Model-Based Design

Miser le plus longtemps possible sur la simulation



# Le Model-Based Design

Miser le plus longtemps possible sur la simulation



# Le Model-Based Design

... par exemple pour éviter

Echec du 1° vol d'Ariane 5 :  
Problème de codage logiciel  
Coût d'un lancement : 220 M\$  
Coût de la charge utile : 370 M\$



# Le Model-Based Design

... par exemple pour éviter

*Accélération latérale*

Ariane 4 : 64 en décimal

$2^7$	$2^6$	$2^5$	$2^4$	$2^3$	$2^2$	$2^1$	$2^0$
128	64	32	16	8	4	2	1
0	1	0	0	0	0	0	0

Ariane 5 : 300 en décimal

$2^8$	$2^7$	$2^6$	$2^5$	$2^4$	$2^3$	$2^2$	$2^1$	$2^0$
256	128	64	32	16	8	4	2	1
1	0	0	1	0	1	1	0	0

*44 sans ce 9<sup>ème</sup> bit !*



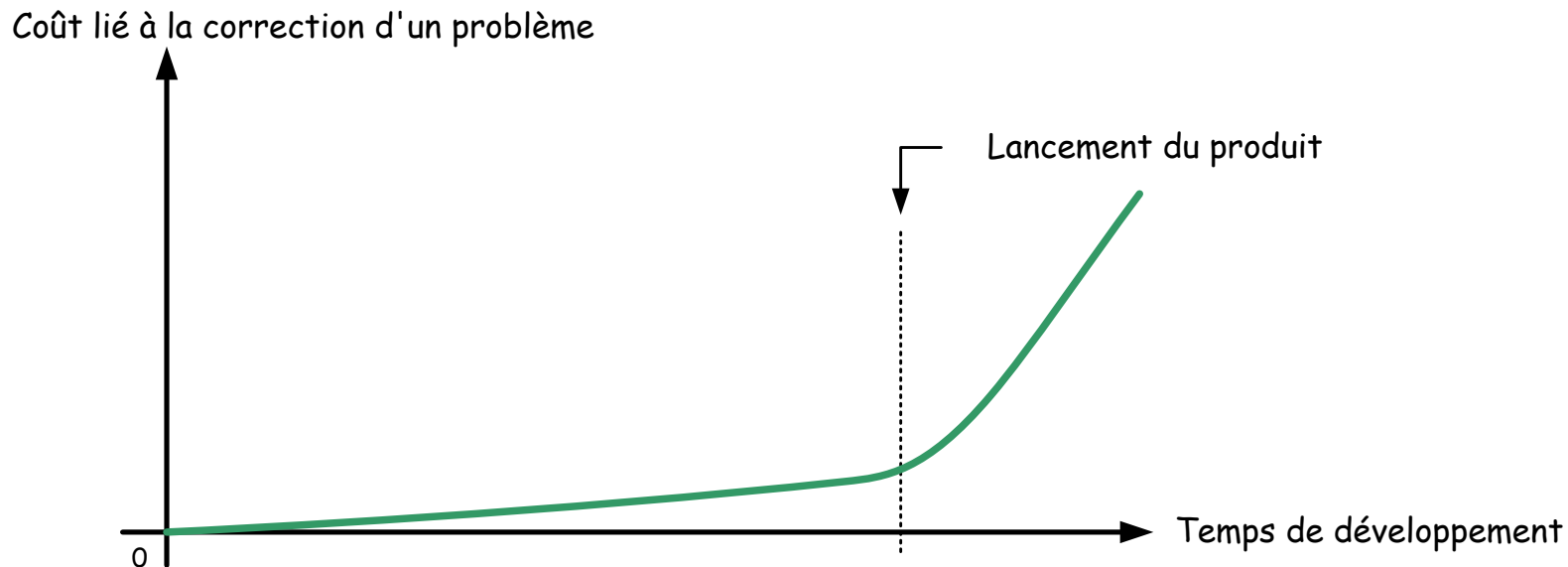
# Le Model-Based Design

... pour

- Limiter les délais de mise sur le marché
- Limiter les coûts de développement
- Limiter les risques matériels et humains
- Optimiser les performances des produits

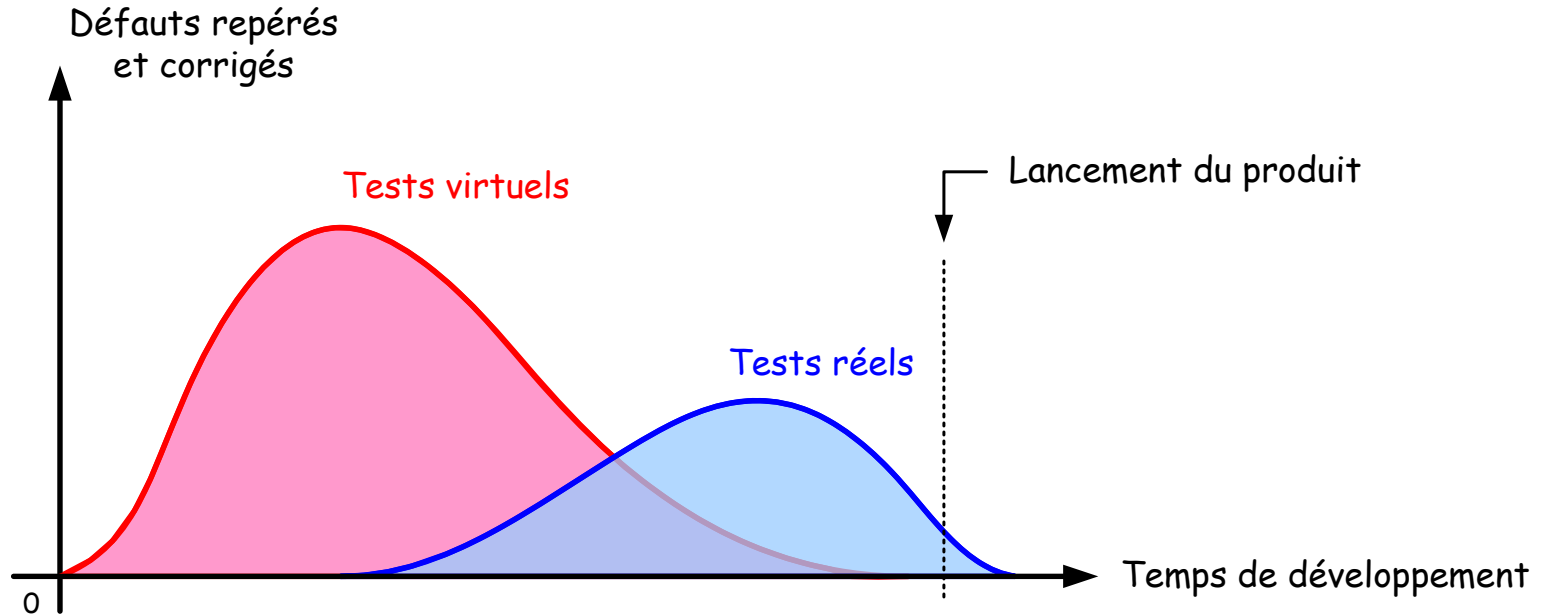
# Le Model-Based Design

... vers l'optimisation des produits



# Le Model-Based Design

... vers l'optimisation des produits



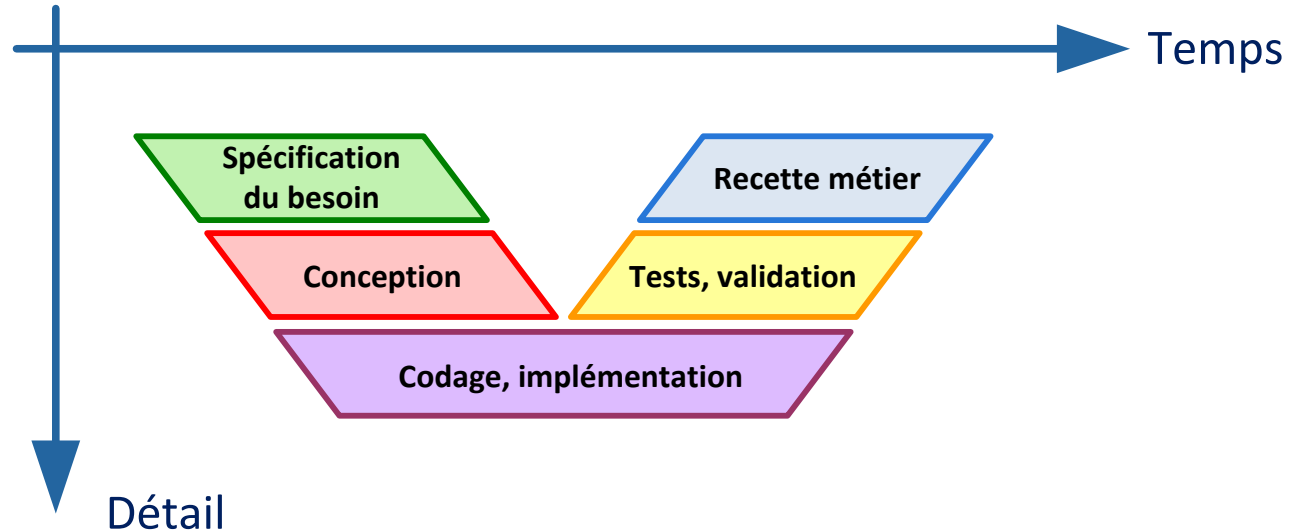




# Le Model-Based Design

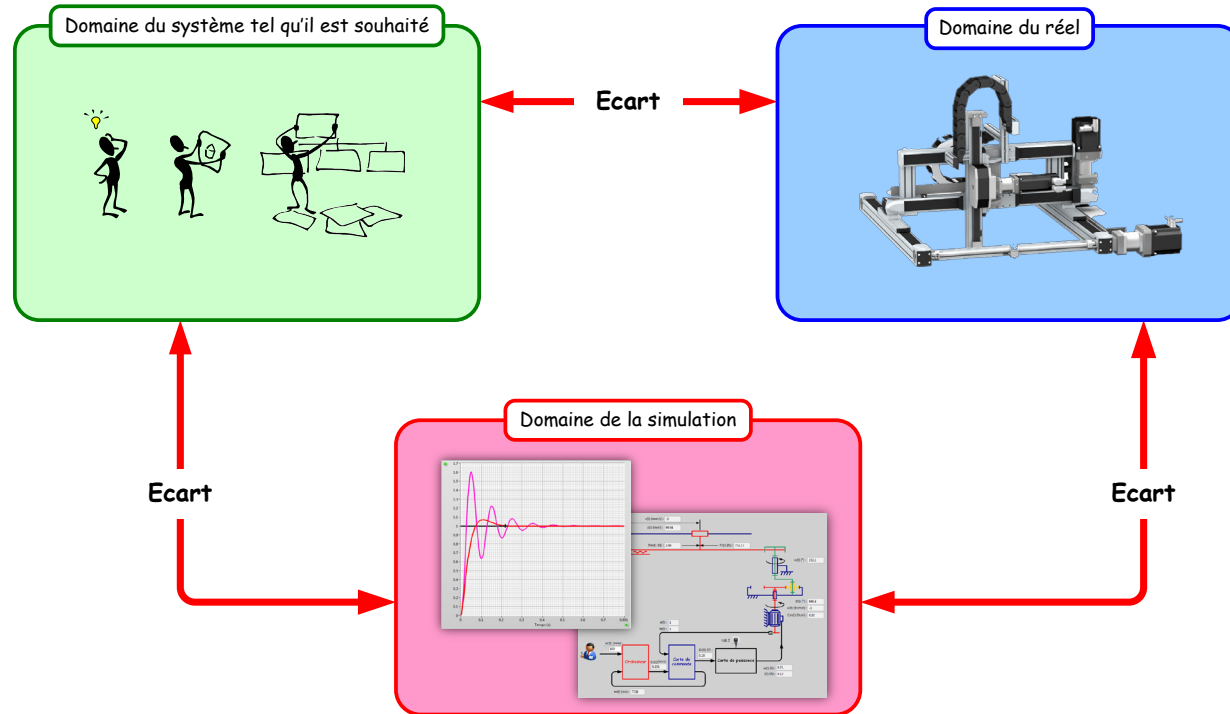
à travers le cycle en V

standard industriel en matière de gestion de projet



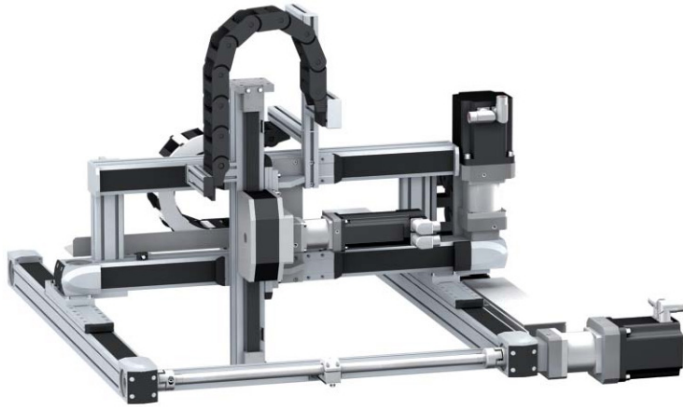
# Le Model-Based Design

à travers la démarche d'analyse des écarts



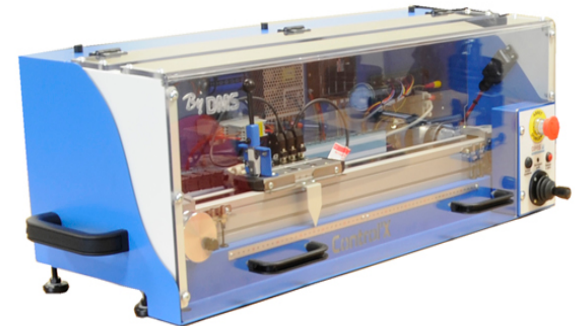
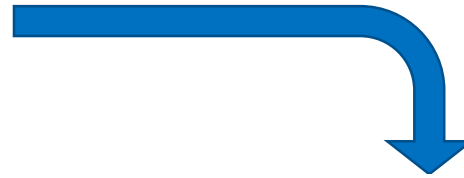
# Le Model-Based Design

... des spécifications fonctionnelles à la validation des performances



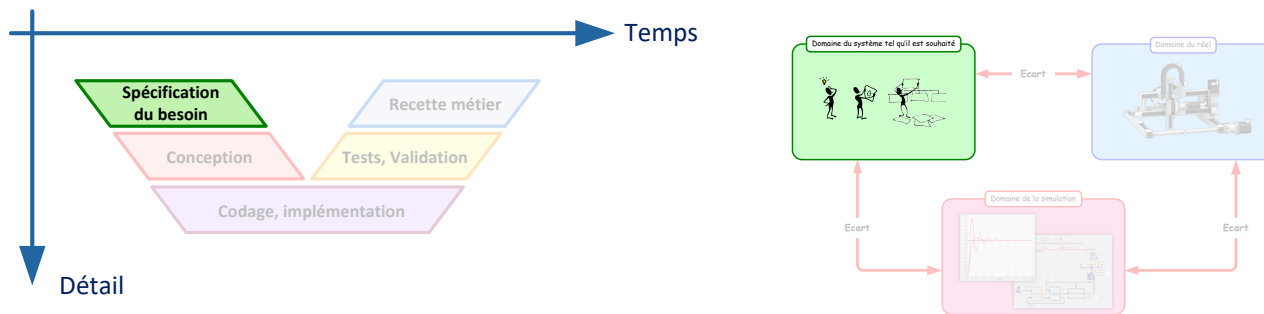
**Moyen de satisfaire le cahier des charges :**  
l'algorithme de correction

**Exemple à travers  
un axe linéaire**



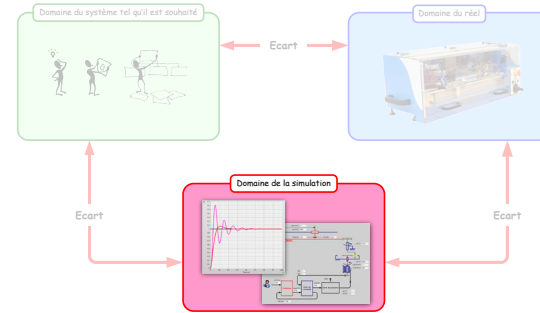
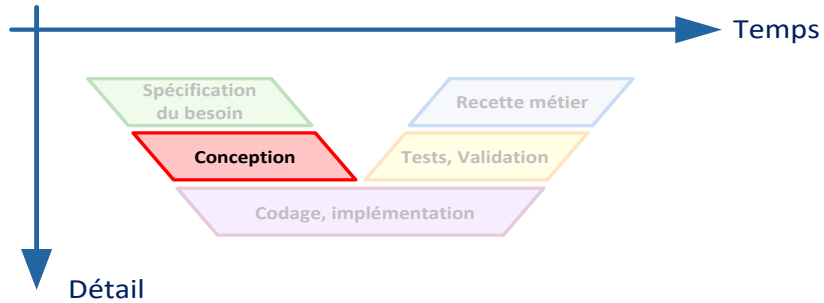
# Spécification du besoin

Quel correcteur pour respecter les exigences ?



Exigence	Critères		Niveaux
Permettre de positionner une pièce.	C1	Asymptotiquement stable	
	C2	Amortissement	$D_1 < 15\%$
	C3	Rapidité	$T_{5\%} < 150 \text{ ms}$ $T_m < 100 \text{ ms}$
	C4	Précision	$\varepsilon_S < 0.5 \text{ mm}$
	C5	Course	300 mm

# La conception



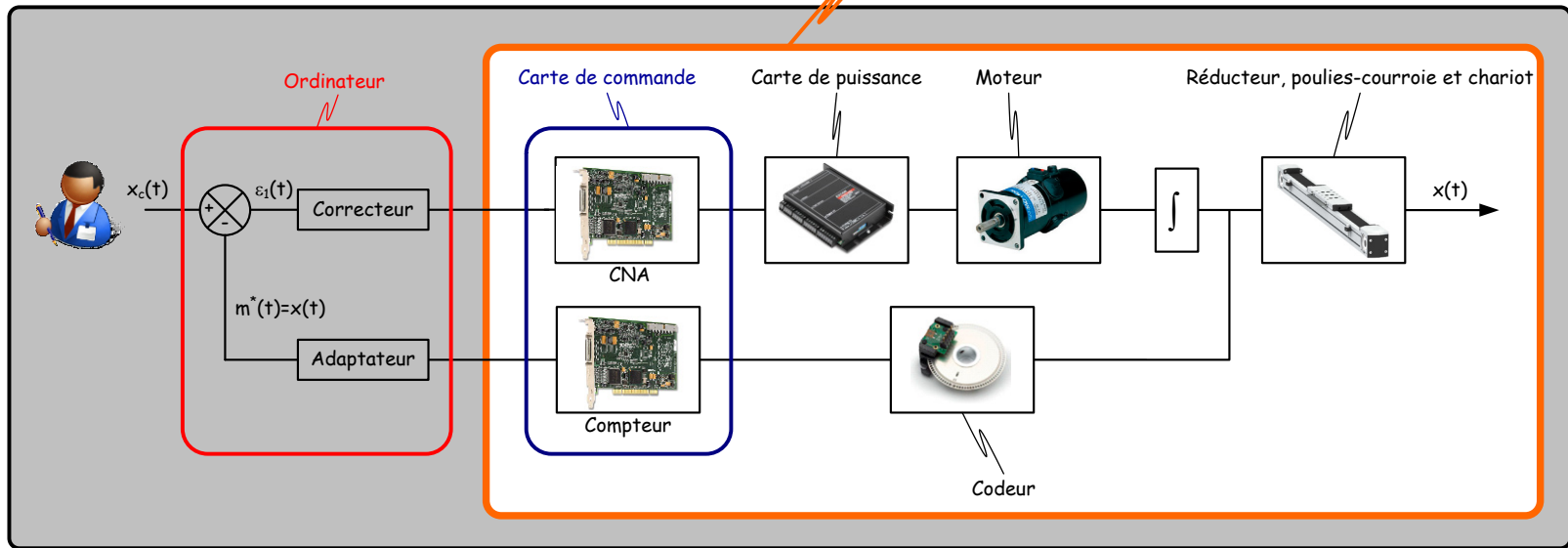
## Conception divisée en 3 phases

- **Modélisation**
- Validation du modèle
- Simulations Model-in-the-loop

# La conception : 1<sup>o</sup> phase

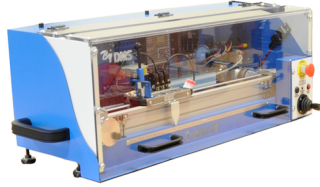
## Modélisation

Boucle ouverte à modéliser

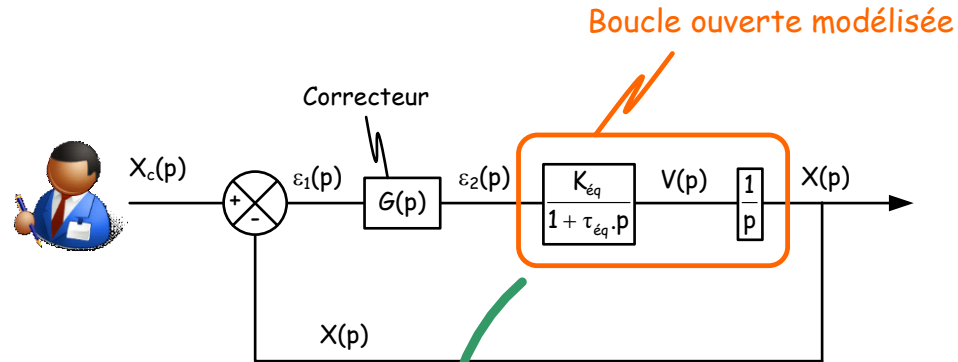


# La conception : 1<sup>o</sup> phase

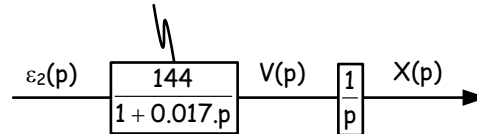
## Modélisation



Une bonne douzaine d'hypothèses

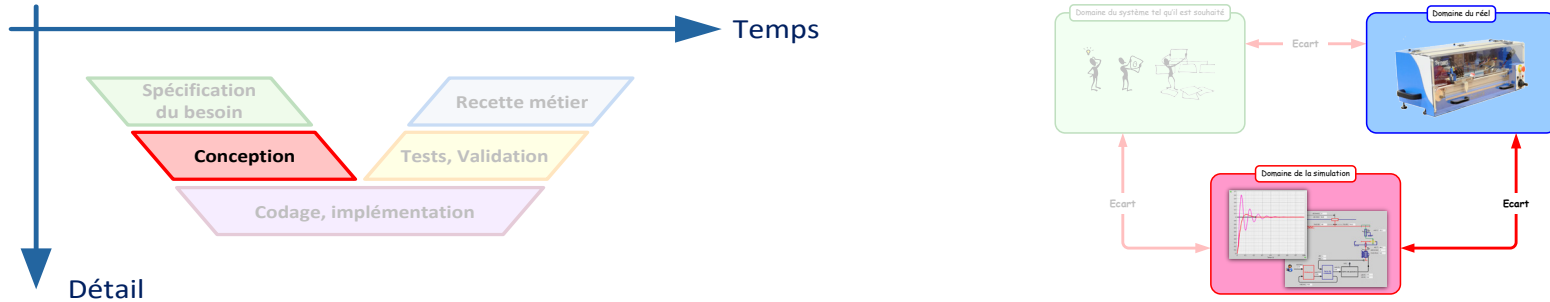


Moteur linéaire équivalent



# La conception : 2<sup>o</sup> phase

## Validation du modèle



## Conception divisée en 3 phases

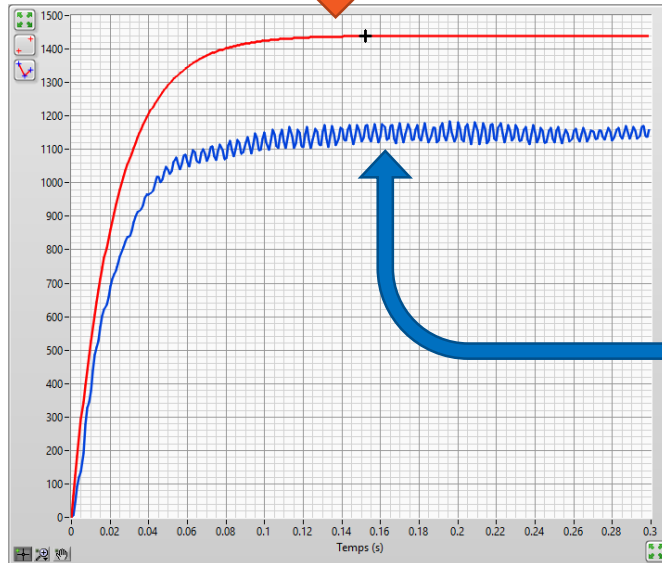
- Modélisation
- **Validation du modèle**
- Simulations Model-in-the-loop



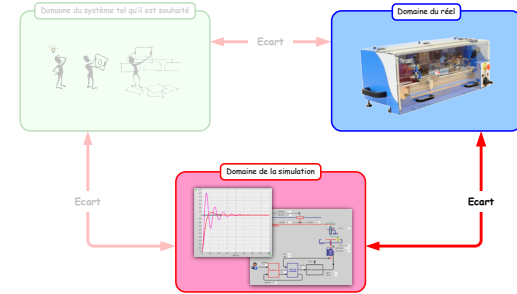
# La conception : 2<sup>o</sup> phase

## Validation du modèle

Vitesse simulée

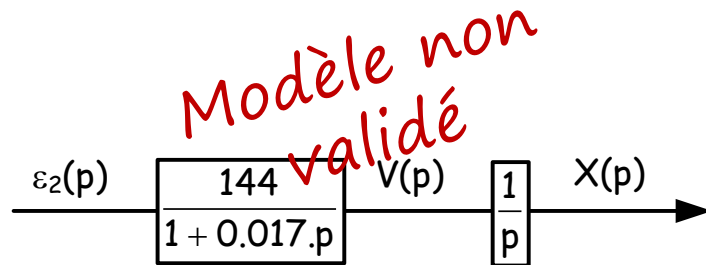
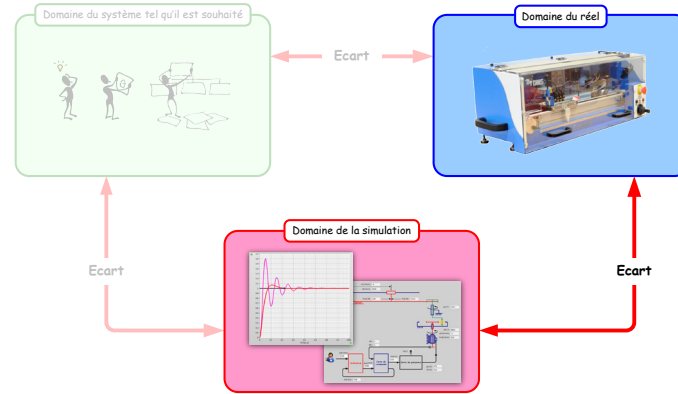


Vitesse réelle

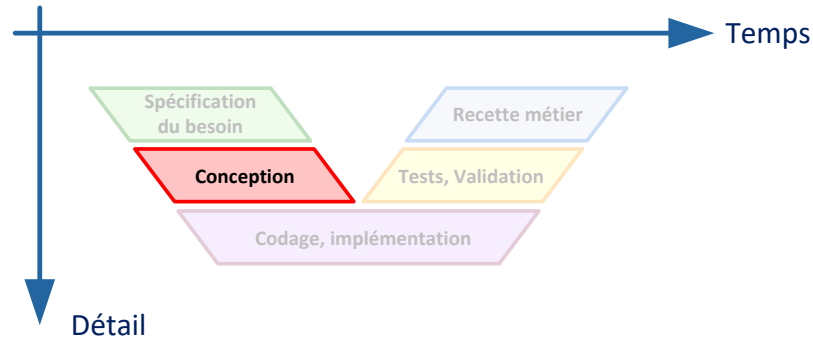


# La conception : 2<sup>o</sup> phase

## Validation du modèle



# La conception : 2<sup>o</sup> phase



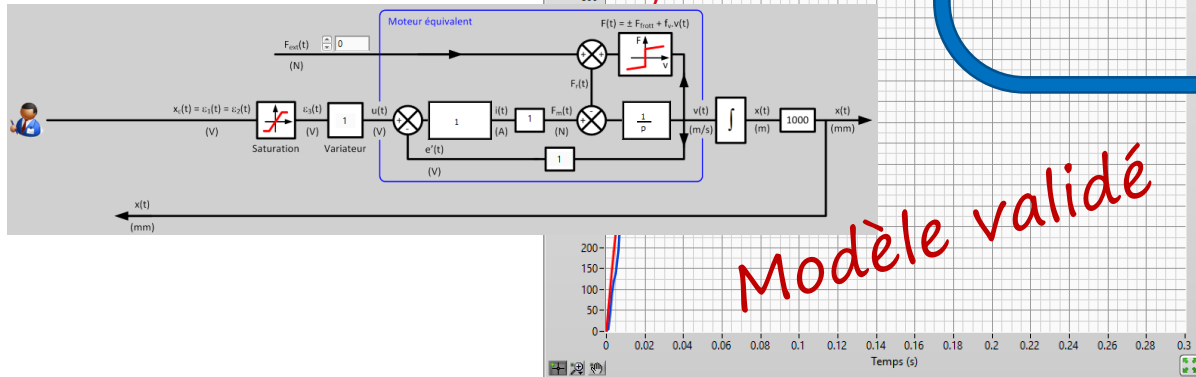
Itérations successives jusqu'à obtenir un modèle réputé "convenable"

- **Modélisation**
- Validation du modèle

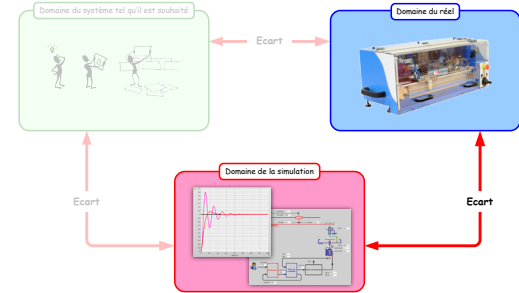
# La conception : 2<sup>o</sup> phase

## Validation du modèle

Nouvelle  
vitesse  
simulée

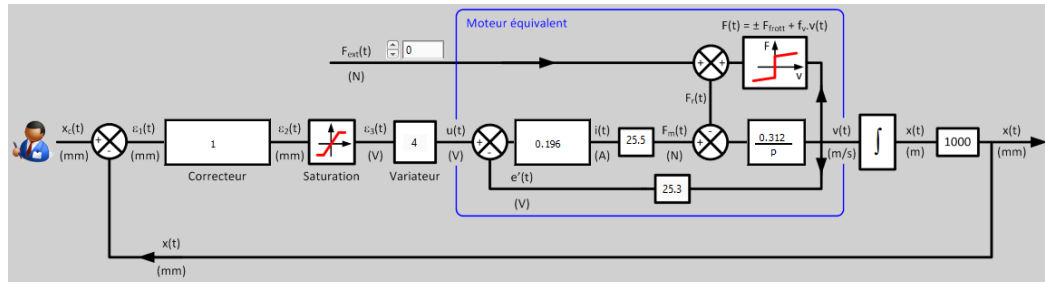


Modèle validé

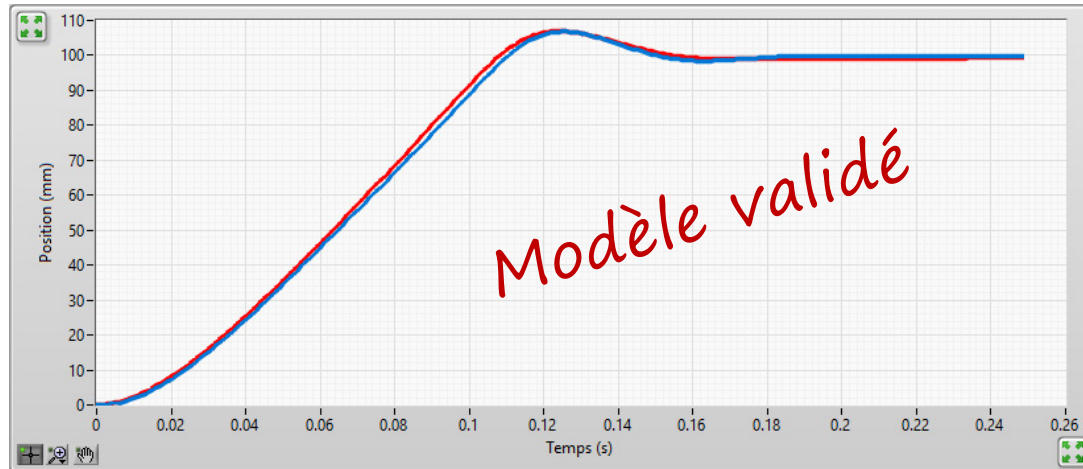
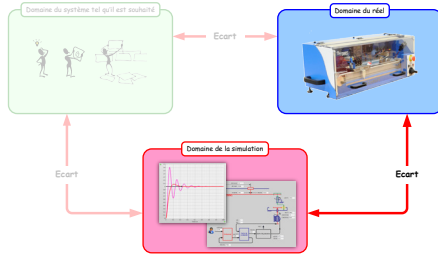


Vitesse réelle

# La conception : 2<sup>o</sup> phase

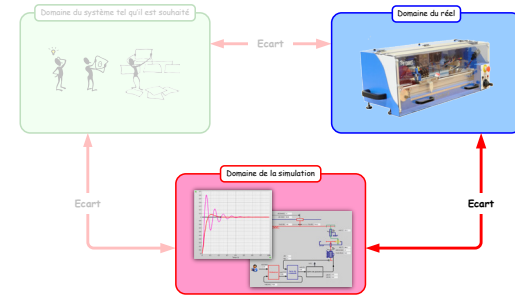
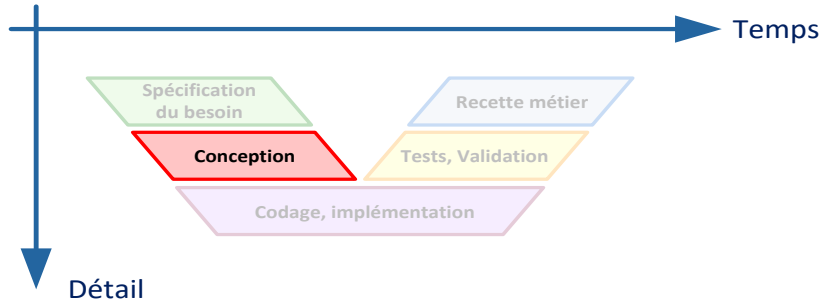


...du modèle de boucle ouverte  
au modèle de boucle fermée



# La conception : 3<sup>o</sup> phase

Simulations

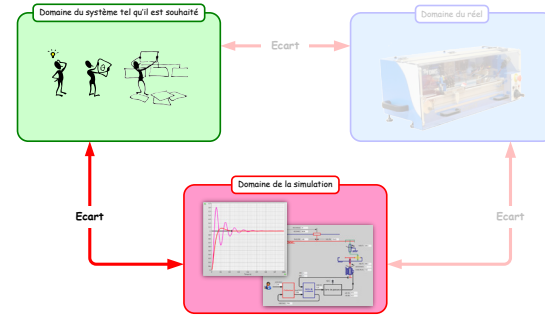
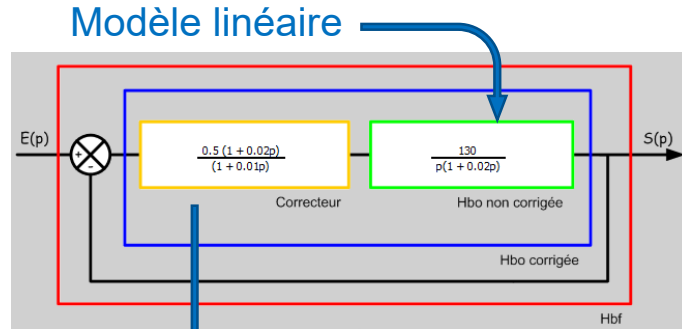


## Conception divisée en 3 phases

- Modélisation
- Validation du modèle
- **Simulations Model-in-the-loop**

# La conception : 3 ° phase

## Synthèse de correcteur



Choix correcteur

Correcteur

PID parallèle PID académique PID LabVIEW Avance de phase, action D Retard de phase, action I Avance - Retard Linéaire quelconque Coupe bande

$K$  0.01 0.1 1 10 5

$\tau$  0 0.005 0.01 0.003

$a$  1 5 10 2  $a > 1$

$K_c \frac{1 + a \cdot \tau \cdot p}{1 + \tau \cdot p} = \frac{5(1 + 0.006p)}{(1 + 0.003p)}$

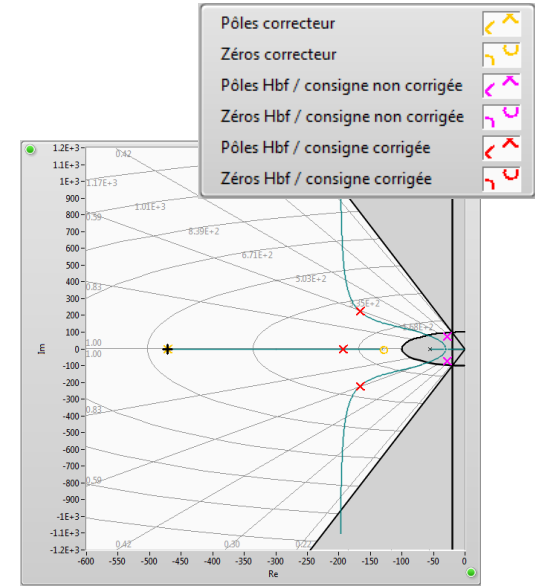
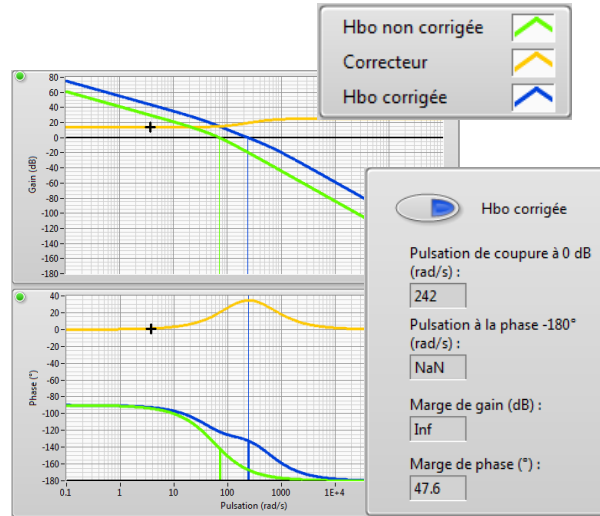
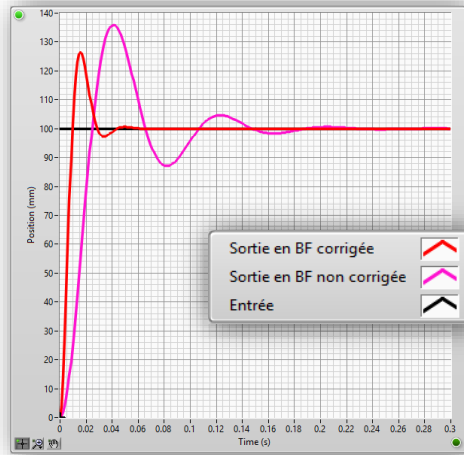
Pulsation avance maxi (rad/s) 235.7

Avance maxi (deg) 19

# La conception : 3<sup>o</sup> phase

## Synthèse de correcteur

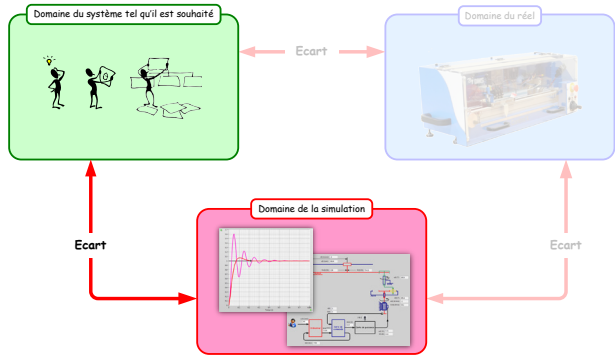
Calage dans le domaine temporel, fréquentiel ou lieu des pôles





# La conception : 3<sup>o</sup> phase

## La synthèse du correcteur



Les performances simulées respectent le cahier des charges

*Synthèse de correcteur effectuée*

Correcteur

PID parallèle | PID académique | PID LabVIEW | Avance de phase, action D | Retard de pression | Avance - Retard | Linéaire quelconque | Coupe bande

$K$  0.01 0.1 1 10 5

$\tau$  0 0.005 0.01 0.003

$a$  1 5 10 2  $a > 1$

Pulsation avance maxi (rad/s) 235.7

Avance maxi (deg) 19

$$K \cdot \frac{1 + a \cdot \tau \cdot p}{1 + \tau \cdot p} = \frac{5(1 + 0.006p)}{(1 + 0.003p)}$$

# La conception : 3 ° phase

Simulations hors ligne

## Batterie de tests virtuels :

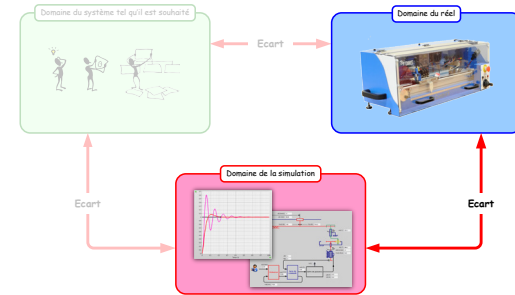
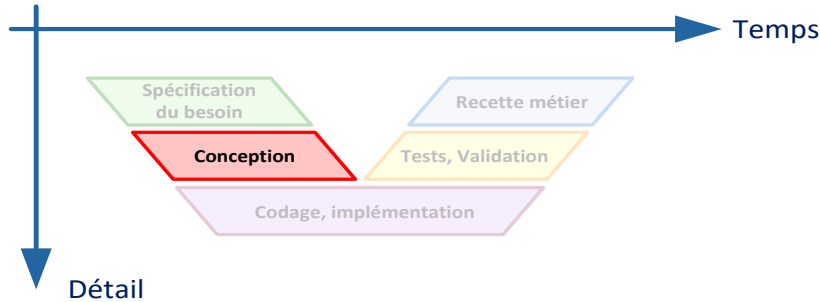
- Scénarii les plus contraignants
- Tous type d'entrées, toutes amplitudes, prise en compte de perturbations, simulation du vieillissement...

## Buts

- Détection d'erreur très tôt dans le cycle de conception
- Report des tests réels (longs, chers et risqués) le plus tard possible
- Anticiper les phases de réglage en travaillant sur le modèle

# La conception : 3<sup>o</sup> phase

Simulations



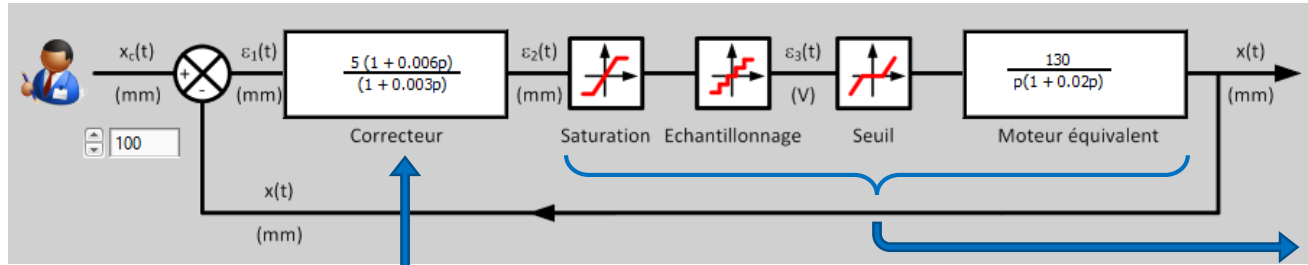
## Conception divisée en 3 phases

- Modélisation
- Validation du modèle
- **Simulations Model-in-the-loop**

# La conception : 3 ° phase

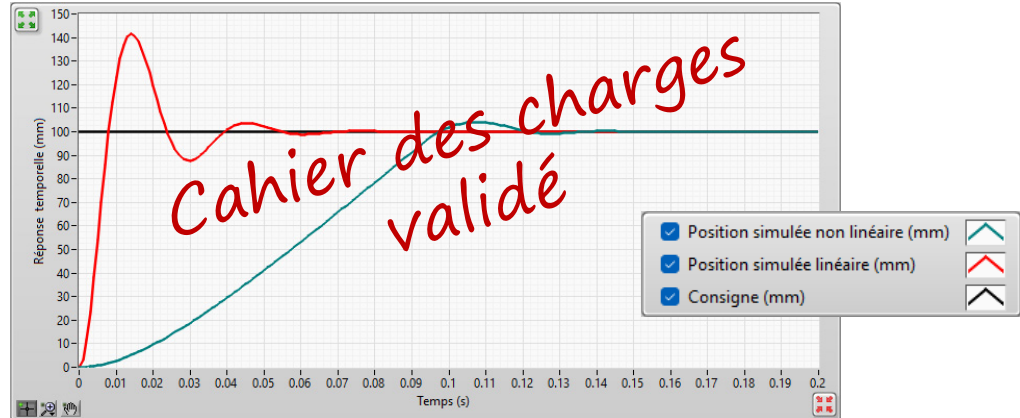
## Simulations hors ligne

### Simulation de la BF



Modèle non linéaire  
précédemment validé

Correcteur



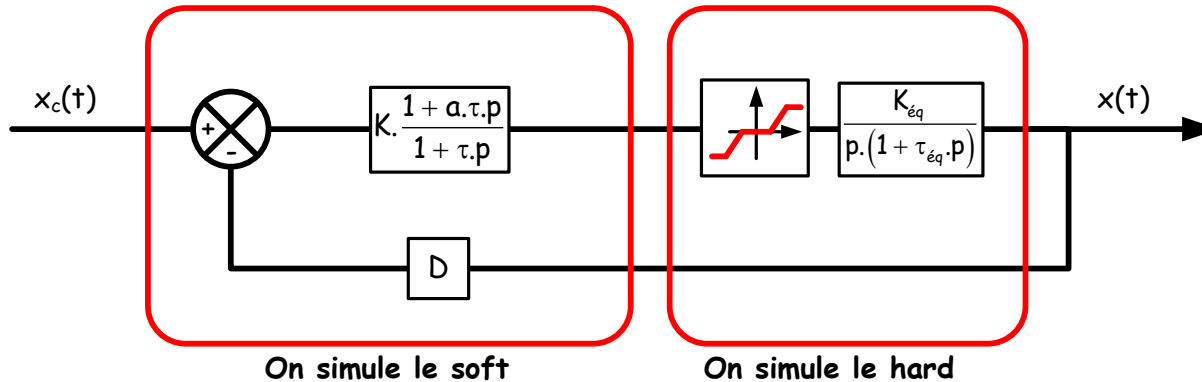
# La conception : 3 ° phase

Batterie de tests, validation de toutes les performances



# A ce stade, tout est donc simulé...

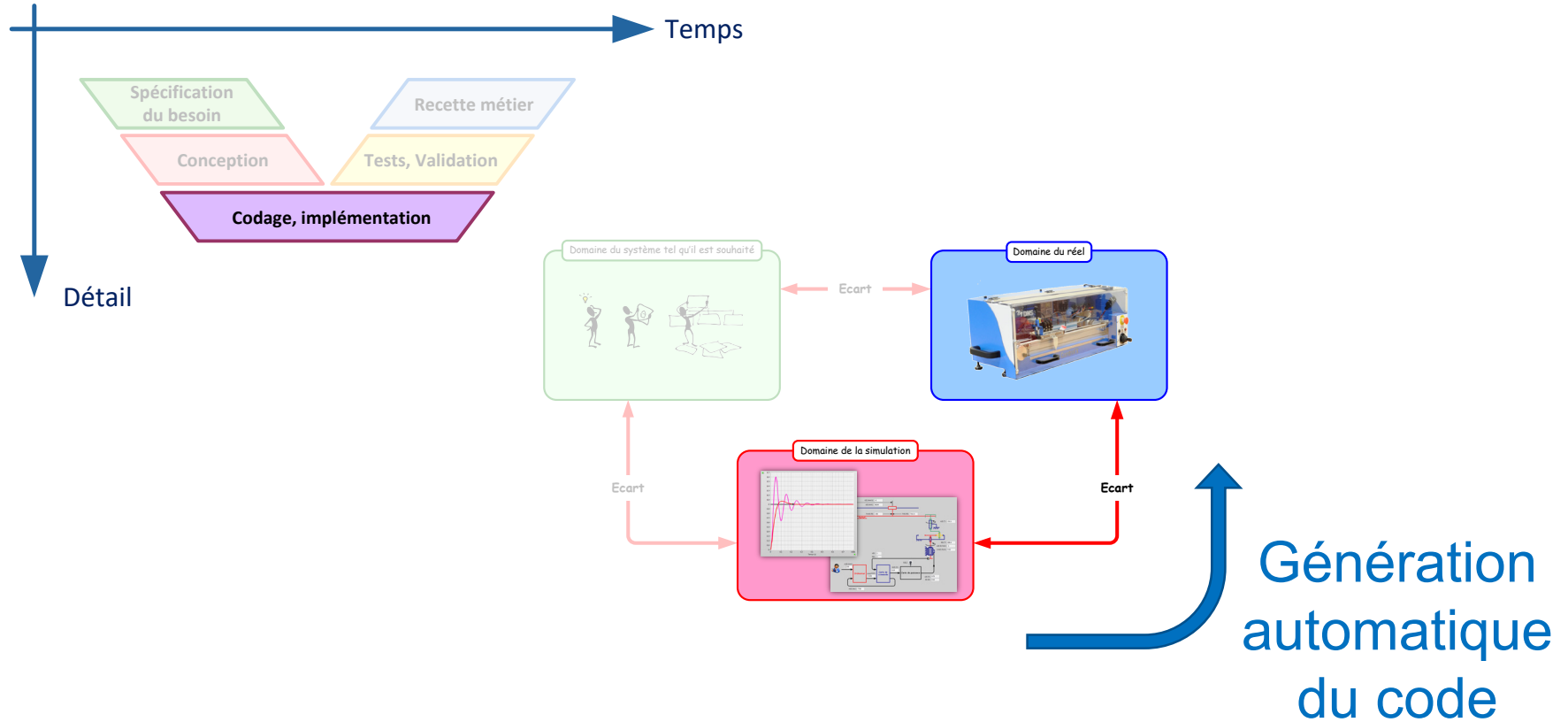
## Model in the loop



A ce stade de la conception, tout est simulé

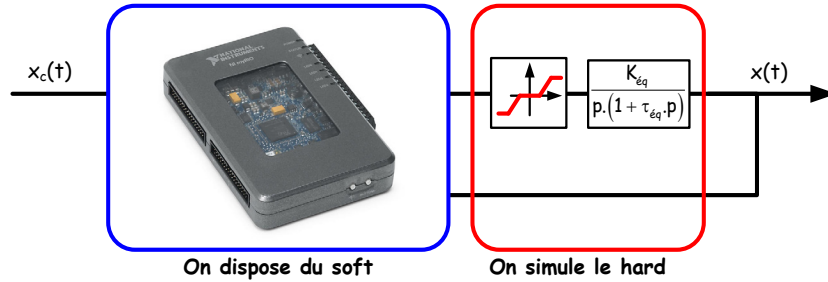


# L'implémentation



# L'implémentation

## 1° temps : software / processor in the loop

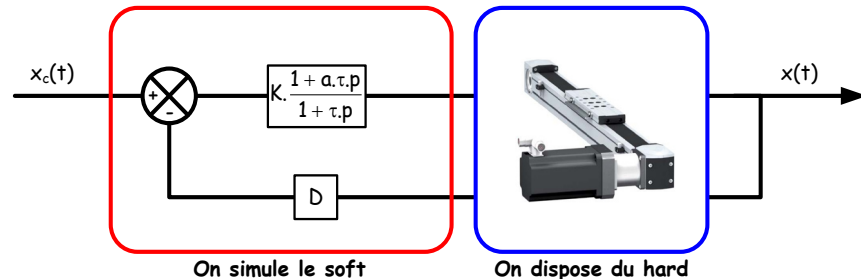


On peut simuler toute une variété d'environnements des plus sévères...

Le soft tourne dans le matériel définitif (la cible)

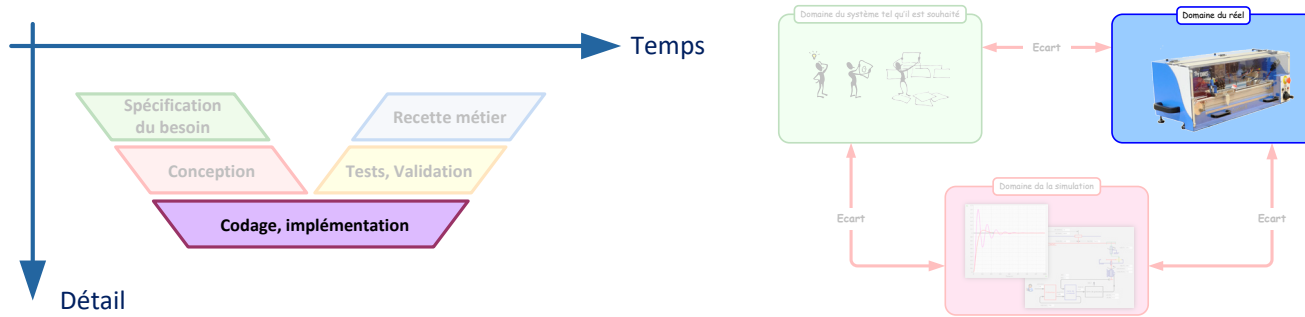


## 2° temps : hardware in the loop

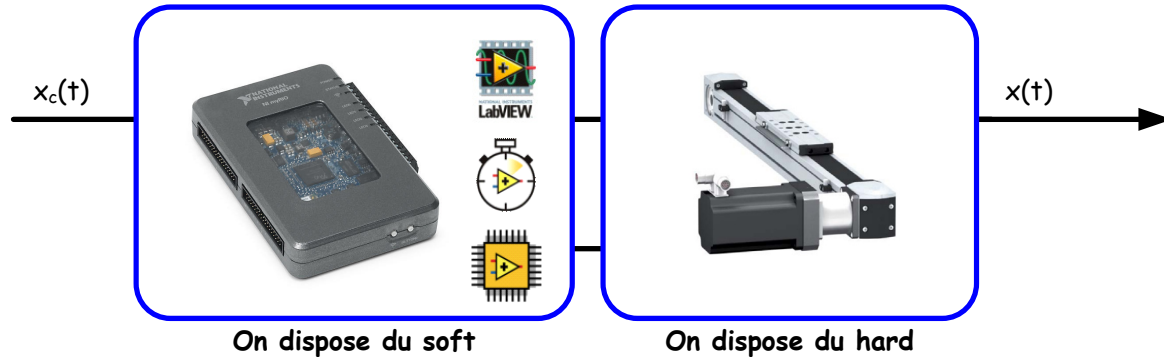




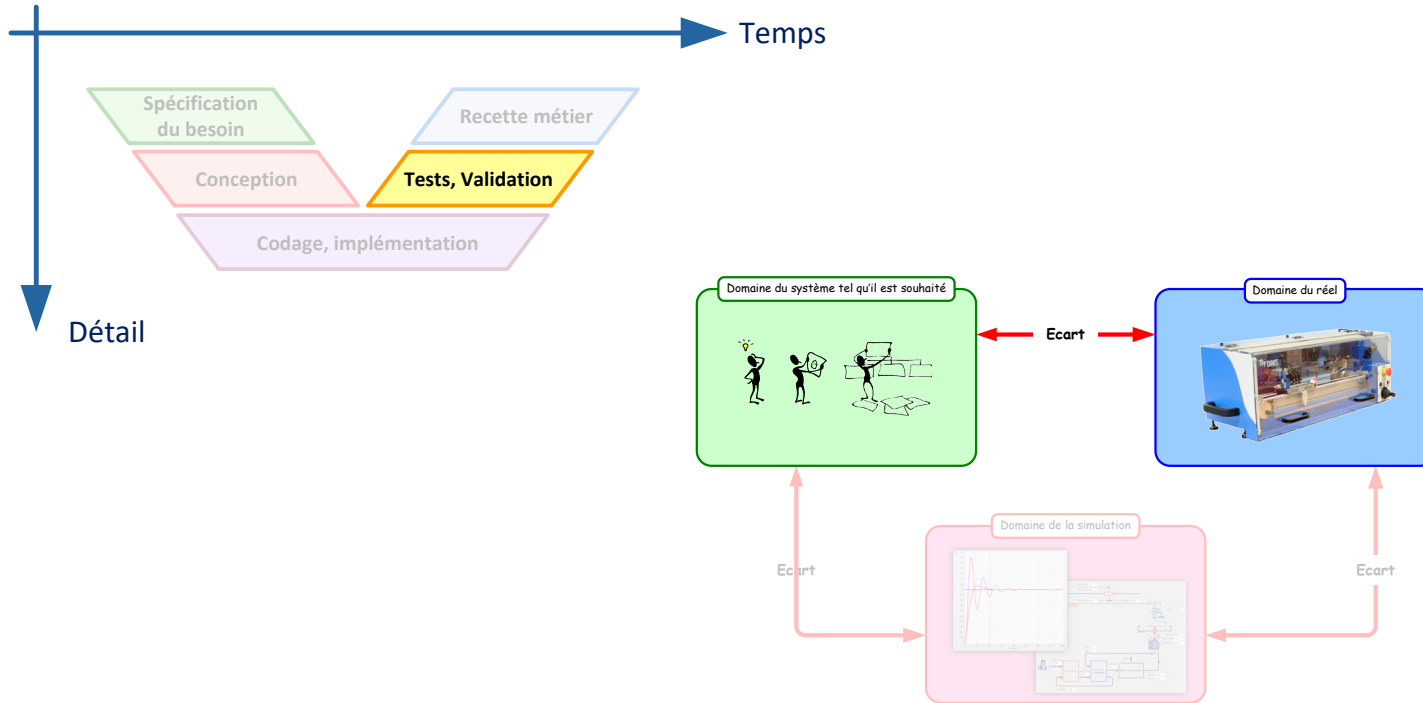
# L'implémentation



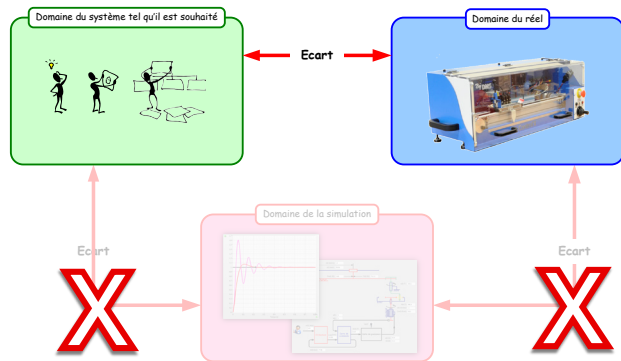
## Tout tourne sur le matériel définitif



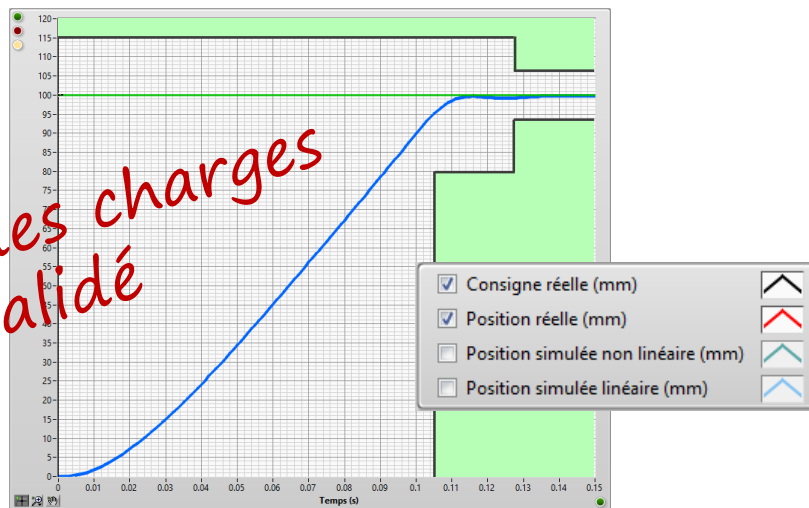
# Test et validation



# Test et validation

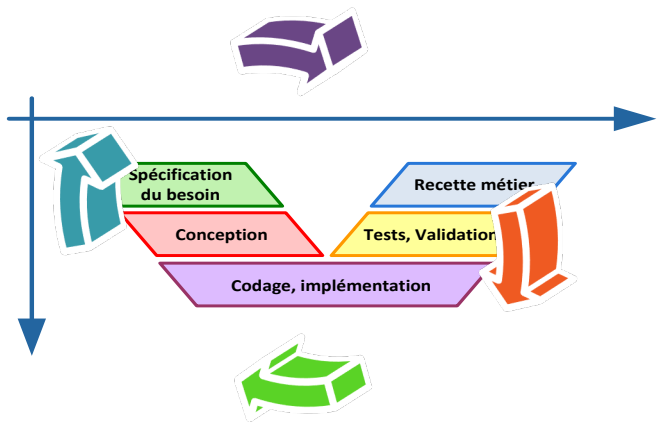


## Réponse réelle



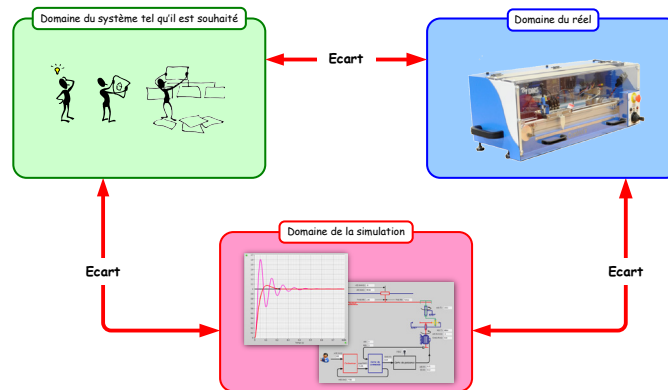
*Cahier des charges validé*

# Test et validation

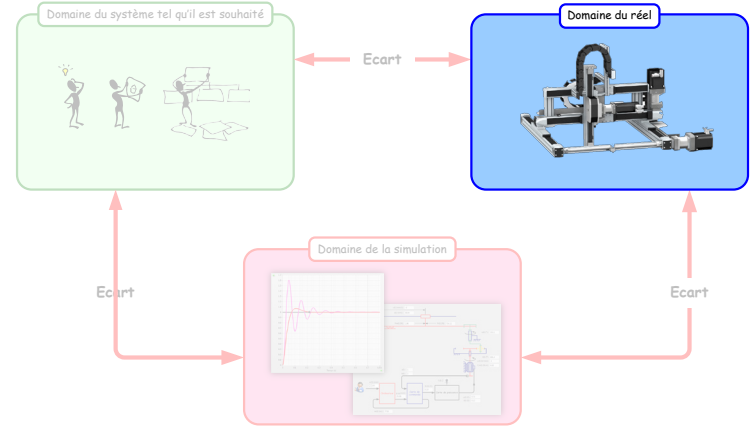
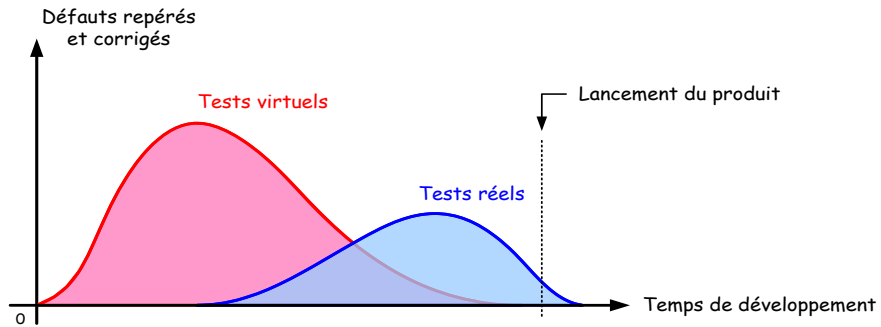
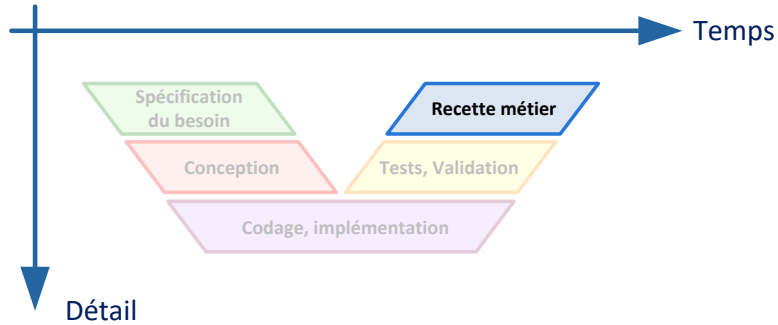


Itérations quasi-immédiates

*Cahier des charges non validé ?*



# Recette métier



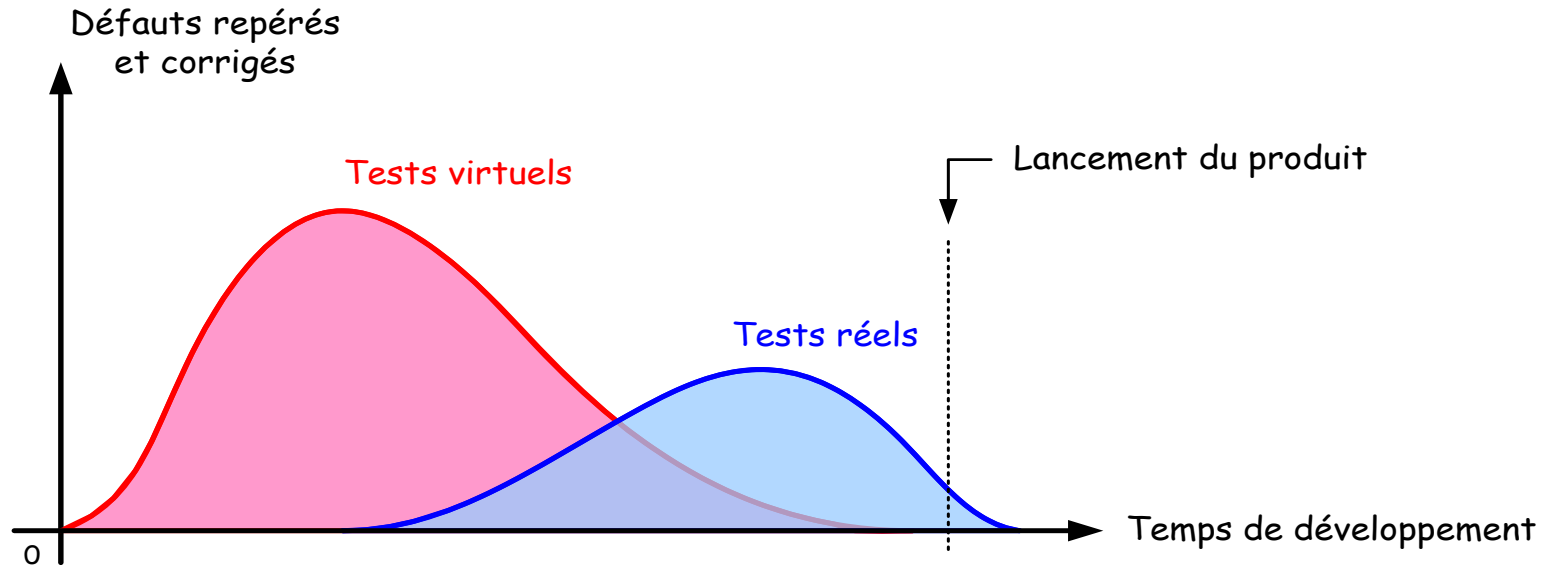
# Le Model-Based Design

... pour

- Limiter les délais de mise sur le marché
- Limiter les coûts de développement
- Limiter les risques matériels et humains
- Optimiser les performances des produits

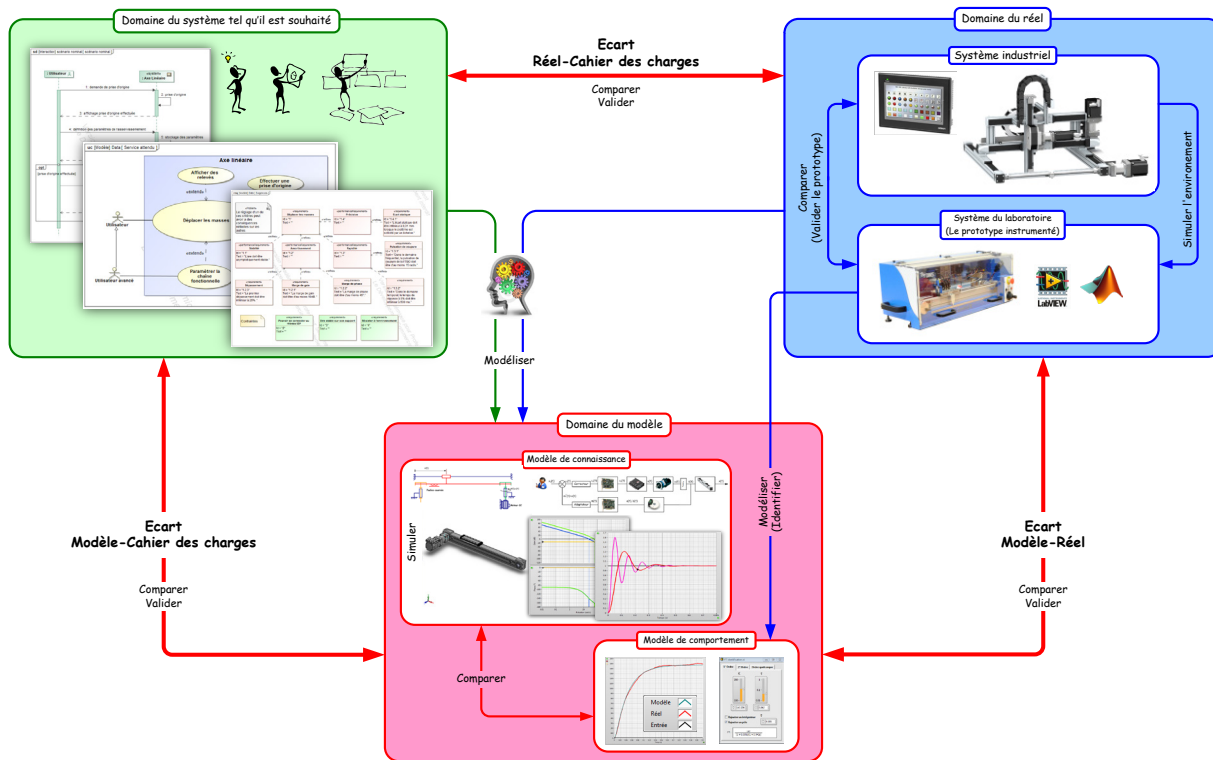
# Le Model-Based Design

... vers l'optimisation des produits



# Le Model-Based Design

à travers la démarche d'analyse des écarts



Modèle de connaissance, de comportement, causal, acasual...



**Transparent en +**

# Le Model-Based Design

vs

## La méthode "Generate and test" ou "Trial and error"

