

PLAN D'EXPÉRIENCES 2

MODÉLISATION ET SIMULATION

Sommaire

1. Notions théoriques

- Système réel
- Expérimentation
- Modélisation
- Formalisme et paradigme
- Simulation et simulateur
- synthèse

2. Cas d'étude: simulation d'encollage

- Rappel démarche PE de la PDCA3
- Simulation d'encollage:
 - Scilab et algorithme/script (simulateur)
 - Simulation du modèle de comportement
 - Interfaces utilisateurs

3. Conclusion





1

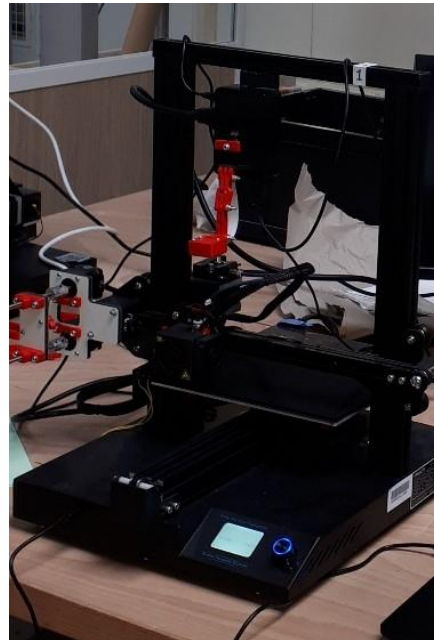
Notions théoriques

Novembre 2020

Systeme reel

Combinaison d'un ou plusieurs éléments structurels interdépendants:

- Périmètre
- Interaction avec l'environnement extérieur



Actions **de**
l'environnement



Systeme

Actions **sur**
l'environnement

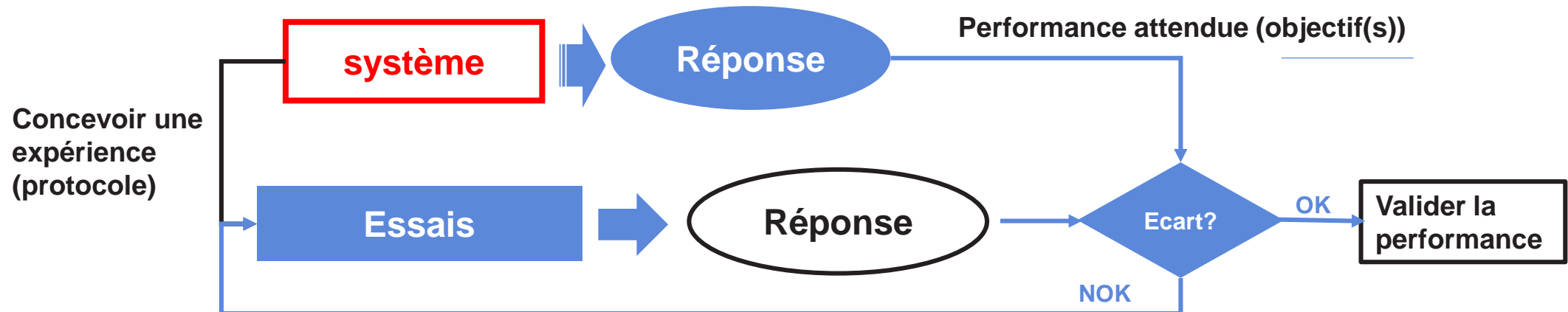


(Source: Duboz et al., 2004 - théorie de la modélisation et de la simulation)

Expérimentation

Soumettre le prototype d'un système dans des conditions reproduisant « **au mieux** » son environnement réel dans une phase de vie considérée:

- Equipé d'instruments de mesure afin de mesurer les grandeurs physiques caractéristiques de la réponse;
- L'expérience s'effectue dans le « domaine réel », mais hors du domaine d'utilisation.



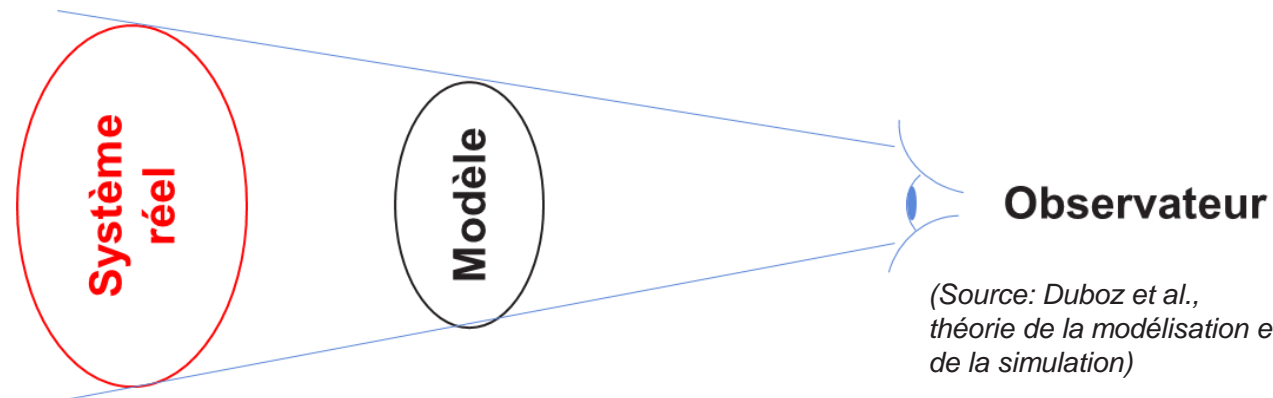
Une expérimentation est un « **processus** » par lequel on observe les réponses d'un système en agissant sur ses entrées.

Modélisation

Modèle

Une représentation « **simplifiée, observable ou perceptible** » du comportement ou de la structure d'un système réel afin de résoudre un problème d'analyse ou de conception.

- **modèle prédictif** : on cherche à prédire une situation, un état d'un système . Ex: *modèle de comportement (issu du plan d'expériences) , algorithmes (arbre de décision, machine learning...), jumeau numérique, etc.*
- **modèle descriptif** : on formalise la connaissance d'un système au sein du modèle (*ex, maquette virtuelle numérique, diagramme FAST, etc...*).



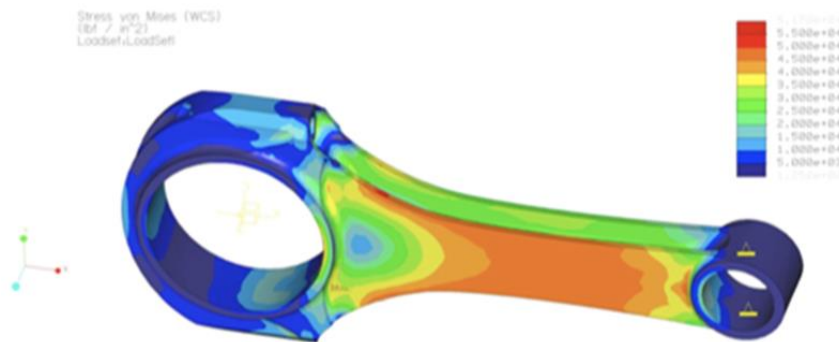
Formalisme et paradigme

Formalisme:

C'est un **mode d'expression** d'un modèle. Le terme « formalisme » fait référence aux formes choisies pour représenter des modèles.

Paradigme:

Une théorie formelle (loi mathématique, logique, thermodynamique, mécanique etc...) qui sert de **concept d'élaboration** d'un simulateur.

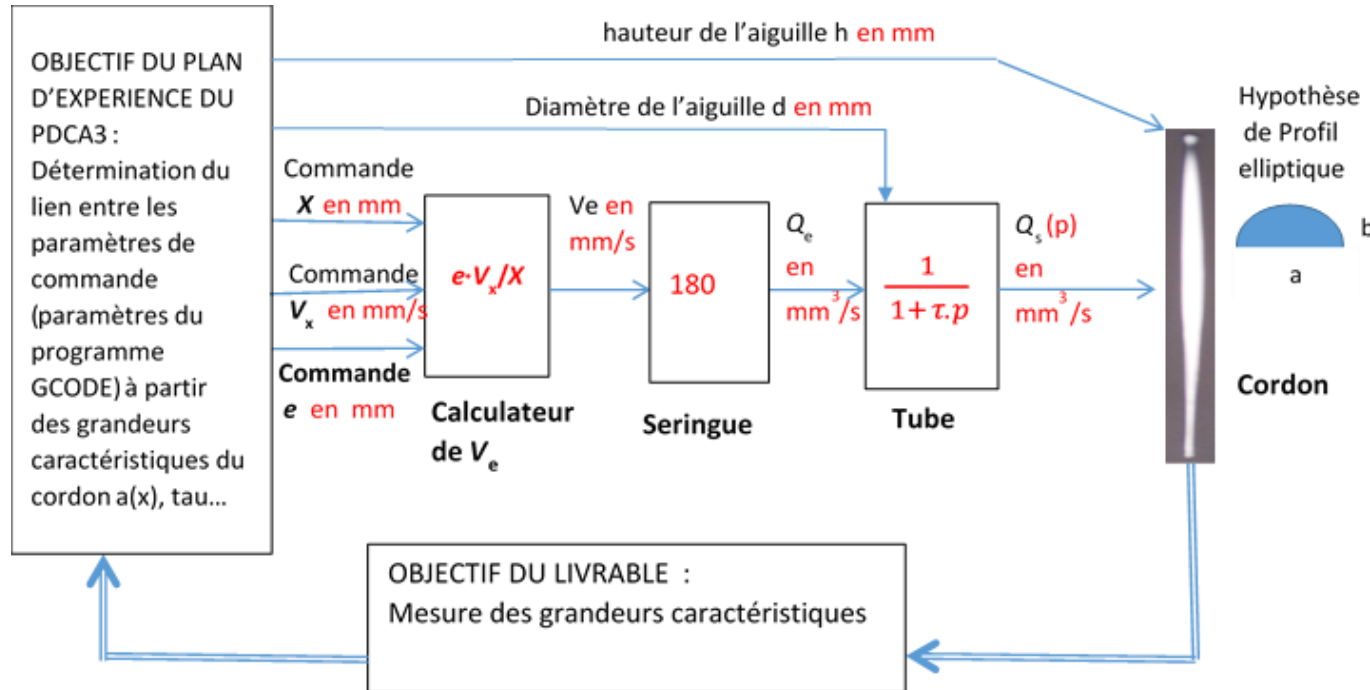


Exemple de modélisation en éléments finis d'une bielle (répartition de la contrainte normale):

Formalisme du modèle: maillage

Source: L. GENDRE 2013

Modélisation



Formalisme du modèle:
schéma bloc

Selon l'interprétation, ce schéma peut être considéré comme un modèle prédictif ou descriptif de l'encolleuse.

- **Prédictif** : représente des étapes de changement d'état dans l'encolleuse, afin de prédire le résultat qu'on va obtenir: un cordon de colle avec ses grandeurs caractéristiques ;
- **Descriptif**: représente le processus de fonctionnement de l'encolleuse pour accomplir la fonction requise: dépose d'un cordon de colle

Simulation

- Calculer l'évolution des grandeurs physiques d'un système sous l'effet des sollicitations extérieures.
- Chercher une « **réponse théorique** » du produit, nommée résultat de la simulation ou encore performance simulée.

Ces représentations mathématiques évoluent dans ce que l'on nomme le « domaine virtuel », par opposition au domaine réel ou domaine des expériences.

La simulation consiste à reproduire le comportement dynamique d'un système réel en s'appuyant sur son modèle

Simulateur

Typologie

- **Simulateur numérique:** la simulation est pilotée par un ou plusieurs ordinateurs, sous forme d'un solveur (logiciel). Dans ce cas, le terme simulateur désignera très souvent le solveur lui-même. L'humain ne rentre pas dans la boucle de la simulation. Les interfaces numériques du simulateur fourniront des **résultats observables** du ou des modèle(s) simulé(s).
- **Simulateur interactif:** l'humain intervient dans la boucle de simulation et pilote le simulateur. A la suite de ses actions, les interfaces physiques (visuelle, sonore, haptique, etc.) du simulateur fourniront au pilote les **résultats perceptibles** de ses actions.

L'outil permettant de réaliser une simulation sous des conditions contrôlables et observables de l'évolution du modèle.

Simulateur

structure globale

Interface d'entrée:

- Grandeurs physiques/paramètres du modèle (*simulation numérique*);
- IHM/commandes du simulateur (*simulation interactive*)

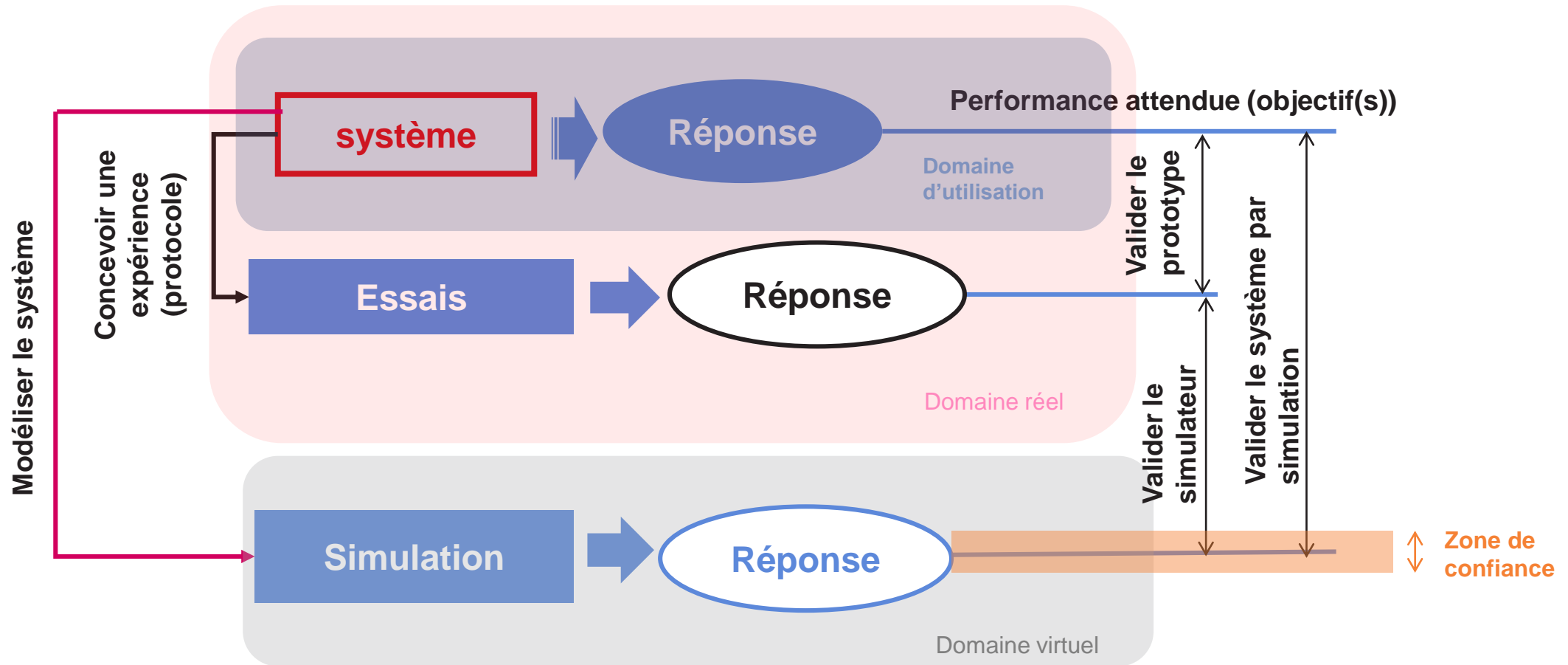
Interface de sortie:

Réponses observables ou perceptibles du modèle

CALCULATEUR NUMERIQUE:

- Modèle(s) mathématique(s);
- Méthode(s) de calcul (s)
- Environnement(s) virtuel(s),
- Etc.

Validation: modèle – prototype – simulateur



Synthèse

- S'assurer que les réponses obtenues (aux simulations et/ou aux essais) seraient bien conformes à la performance attendue du système;
- Les entreprises tendent à privilégier les simulations par rapport aux essais, afin de réduire les délais et les coûts...sans compromettre la qualité et la sécurité.
 - **En conception:** le système réel est encore inexistant. Le concepteur détermine l'écart entre la réponse simulée et la réponse attendue. Si cet écart est suffisamment faible, la performance simulée peut être validée.
 - **En développement (prototypage):** au point de vue du plan d'expériences, des simulations via le « modèle de comportement » permettent de prédire les réponses d'un système pour ses niveaux de paramètres non testés...

La simulation du comportement d'un système a pour objectif de prévoir le niveau de satisfaction du besoin

2

PDCA3 du projet 7: Cas de simulation d'encollage (plan d'expériences)

Novembre 2020

Rappel démarche PE préconisée

Phase de
construction
du simulateur
d'encollage
(plan
d'expériences)

Etape 1

Prendre en main le simulateur V0;

Prendre connaissance des paramètres fixes (X et d) et variables (facteurs) ;

Choix de l'aiguille à l'aide du simulateur V0 (version de Ruby)

- Simuler le profil de cordon avec les 4 aiguilles disponibles.
- Etudier l'influence des aiguilles sur TauVx. Choisir l'aiguille avec la contrainte "minimiser TauVx".

Etape 2

PE sur un scénario de buse-aiguille et interprétation

- Préparer les essais
- Réaliser les expériences
- Interpréter les résultats expérimentaux.
- Extraire le modèle de comportement (fonction objective) de TauVx et de a_x . Ajuster le simulateur en prenant en compte les fonctions objective obtenues. Valider le simulateur en déterminant le résidu des deux fonctions objective s.

Etape 3

Challenge

- A partir du meilleur réglage choisi, réaliser un contour fermé aux dimensions de la pièce à encoller. La largeur du cordon doit être la plus homogène possible.

Simulation d'encollage

Les paramètres de la simulation

Paramètres fixes:

- Déplacement de l'aiguille **X**=70mm (G-Code **X70**)
- Diamètre de l'aiguille **2r** non programmable (Nécessite une manipulation)

Paramètres variables ou facteurs:

- Déplacement du piston seringue **e** en mm (e_{\min} à e_{\max})
- Hauteur de l'aiguille **h** en mm (h_{\min} à h_{\max})
- Vitesse de déplacement aiguille/table **Vx** en mm/mn (Vx_{\min} à Vx_{\max})

Plan 2³: 3 facteurs continus à
2 niveaux (min, max)

Simulation d'encollage

Modélisation des réponses $\tau.Vx$ et a_x issues du plan d'expériences

$$\tau.Vx = a_0 + a_1.Vx + a_2.(e/X) + a_3.h + a_1a_2.(Vx.e/X) + a_1a_3.(Vx.h) + a_2a_3.((e/X).h) + a_1a_2a_3.(Vx.h.(e/X))$$

$$a_x = b_0 + b_1.Vx + b_2.(e/X) + b_3.h + b_1b_2.(Vx.e/X) + b_1b_3.(Vx.h) + b_2b_3.((e/X).h) + b_1b_2b_3.(Vx.h.(e/X))$$

- **Formalisme:** fonctions affines à trois variables
- **Type:** modèles prédictifs numériques

Simulation d'encollage

Le simulateur



- Le logiciel **SciLab** (Scientific Laboratory) a été développé par l'INRIA comme une **alternative libre à Matlab**.
- **Matlab** signifie Matrix Laboratory, donc ces deux logiciels font des vecteurs et des matrices leurs objets de base.

Logiciel en open source:

- Calcul numérique
- Graphique 2D et 3D

L'environnement Scilab:

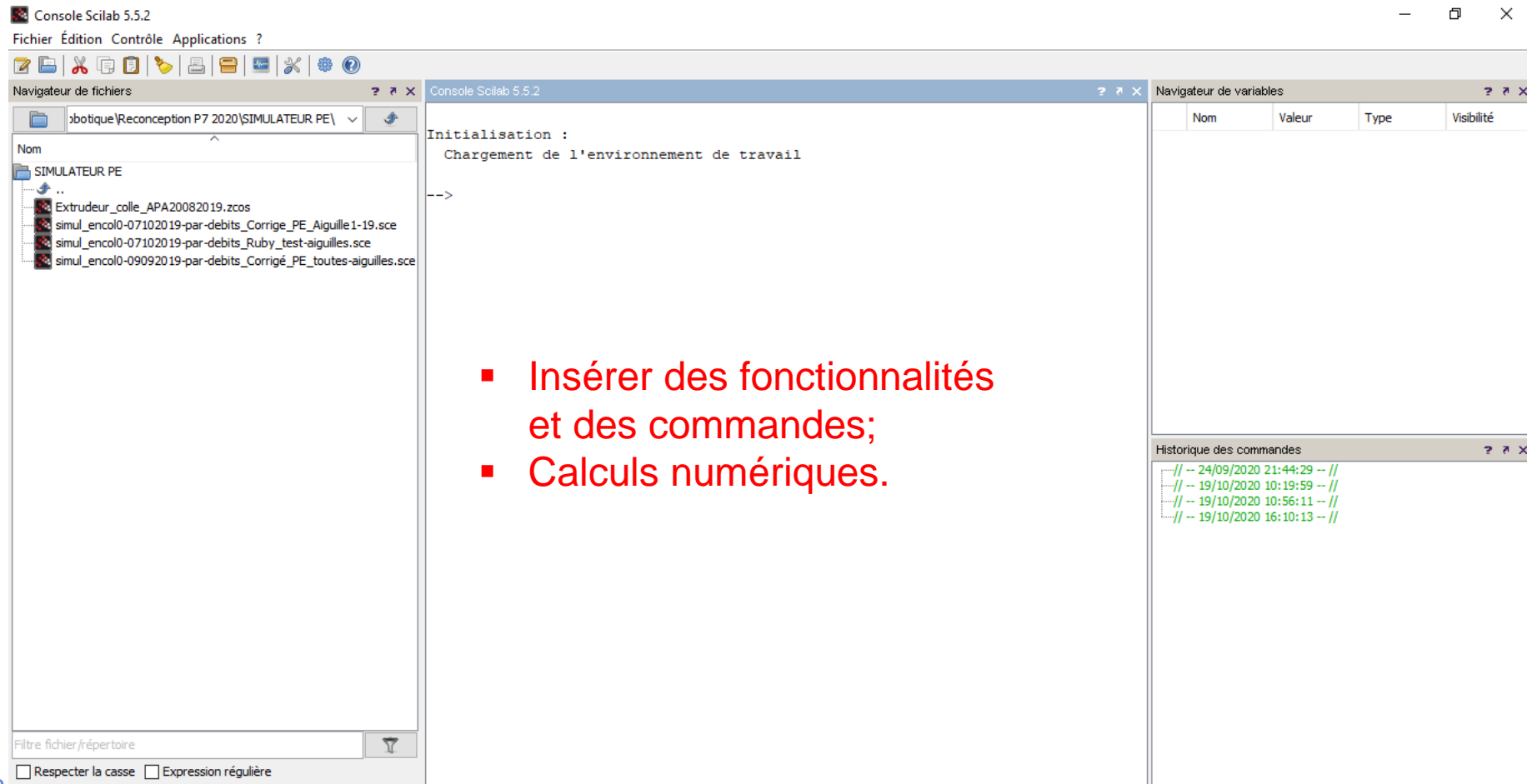
- Console de commande
- Editeur de programme (Scinotes)
- Fenêtres graphiques

Paradigme: calculs vectoriel et matriciel;

Typologie: simulateur numérique

Simulation d'encollage

Le console Scilab



- Insérer des fonctionnalités et des commandes;
- Calculs numériques.

Simulation d'encollage

L'éditeur de programme - Scinotes

simul_encol0-07102019-par-debits_Corrige_PE_Aiguille1-19.sce (C:\Users\handriankaja\Documents\Mes docs CESI old PC\Projet7_robotique\Recon

Fichier Édition Format Options Fenêtre Exécuter ?

simul_encol0-07102019-par-debits_Co

simul_encol0-07102019-par-debits_Co

```
1 //Ruby la p'tit Geek-0
2 //Variable avec uniquement des lettres majuscules : Vecteur
3 //Boite de dialogue
4 txt = ['Déplacement e en mm'; 'Déplacement x en mm (20-200)'; 'vitesse Vx en mm/mn'; 'hauteur h en mm'];
5 param = x_mdialog('Entrer les paramètres d''encollage',txt,['0.5';'70';'500';'0.5']);
6 xx = evstr(param(2));
7 ee = evstr(param(1));
8 Vx = evstr(param(3));
9 hh = evstr(param(4));
10
11 //Le symbole logique ou est -|
12
13 //Paramètre e, Vx, X et h
14 if (ee<0.2) | (ee>0.8) then disp('Erreur : Déplacement seringue non valide'); return; end; ---//Déverrouiller
15 if (xx<30) | (xx>230) then disp('Erreur : Déplacement non valide'); return; end; ---//Déverrouiller les valeurs
16 if (Vx<200) | (Vx>800) then disp('Erreur : Vitesse non valide'); return; end; ---//Déverrouiller les valeurs apr
17 if (hh<0.2) | (hh>0.8) then disp('Erreur : hauteur aiguille non valide'); return; end; ---//Déverrouiller les va
18 Vxs=Vx/60; //La vitesse en mm/mn est convertie en mm/s
19 Xl=[0.1:0.1:xx]; //Génération des abscisses sur un demi axe
20 X=[Xl,Xl+xx]; //Génération de l'axe des abscisses complet
21 Ve=ee*Vxs/xx; //Calcul de Ve comme dans la CR20
22 Qe=Ve*180; //Débit = vitesse de piston ^ surface piston
23
24 //Valeurs issues du PE régime libre lettres triplées Variables centrées réduites PE réalisé pour X=70 - Gén
25 //Cadeau de Ruby
26 Vxx=(Vx-500)/300; eee=((ee/xx)-0.00714)/(0.00428); hhh=(hh-0.5)/0.3;
27
28 //Valeur de TauVx issu des essais du fournisseur et du bidouillage de Ruby pour prendre en compte le diamètre
29 TauVx = -28.53 + 6.47*Vxx -5.03*eee -1.57*hhh +0.11*Vxx*eee -0.41*Vxx*hhh +0.78*eee*hhh -0.35*Vxx*hhh*eee; // (A
30
31 tau = TauVx/Vxs;
32 Qs1=Qe*(1-exp(-Xl/(tau*Vxs))); //Débit forcé sur le premier demi axe
33 S1=Qs1/Vxs; //Surface de cordon pour Qs1
34
```

Commandes d'exécution du programme (appel du solveur et des interfaces utilisateurs)

Commentaires

Déclaration des variables

Interface d'entrée (conditionnée par les niveaux des facteurs du PE)

Structures conditionnées: si...ou...alors, « instructions »...ailleurs « instructions »...fin

Calculateur de Ve (piston seringue)

Codage des variables

Modélisation de la réponse $\tau.Vx$

Modélisation du régime forcé

Simulation d'encollage

L'éditeur de programme (suite)

```
35 QS2=QS1(xx*10)*[exp(-(X1/(tau*Vxs)))];  
36 //.-.-: Division terme à terme des vecteurs x1 et tauv  
37 // Débit libre sur le deuxième demi-axe  
38 S2=QS2/Vxs; // Surface de cordon pour Qs2 avec raccordement non anguleux  
39  
40 // Valeur de a0 du régime libre issu des essais du fournisseur et du bidouillage de Ruby pour prendre en compte le diamètre de l'aiguille; largeur du cordon  
41 a0 = -2.84 -0.02*Vxx +0.75*eee -0.13*hhh +0.04*Vxx*eee +0.06*Vxx*hhh +0.02*eee*hhh -0.036*Vxx*hhh*eee; // (A remplacer par la fonction objective issu du PE physique)  
42  
43 ainfini=a0/(sqrt(1-exp(-70/TauVx)));  
44 Ss=180; // Surface du piston seringue  
45 ba=4*Ss*ee/(3.1416*xx*ainfini^2); // rapport hauteur/largeur du cordon de colle  
46 A1=sqrt(S1^4/(%pi*ba))/2; // largeur de cordon premier demi-axe  
47 A2=sqrt(S2^4/(%pi*ba))/2; // largeur de cordon deuxième demi-axe pour s2  
48 Y=[A1,A2]; // Valeurs des abscisses avec raccordement non anguleux  
49 ysup=5; // Echelle max des Y  
50 clf; // Effacer le graphique précédent  
51 plot(0,ysup,0,-ysup) // Echelle max des Y  
52 plot(X,Y,X,-Y); // Affichage du cordon retouché sans point anguleux avec symétrie  
53 p=gca();  
54 p.background=color(240,255,240);  
55 p.grid=[1 1];  
56 p.thickness = 1;  
57 format(6);  
58 titrel = 'Entrées : -e=' +string(ee)+'mm, -X=' +string(xx)+'mm, -Vx=' +string(Vx)+'mm/mm, -h=' +string(hh)+'mm, -2r=-1,19mm';  
59 titre2 = 'Relevés courbe : a(' +string(xx)+' )=' +string(A1(xx*10)^2)+'mm, -tau*Vx=' +string(TauVx)+'mm, ' ;  
60 titre3 = 'Calculés : -s.max=' +string(S1(xx*10))+'mm², -s.infini=' +string(Ve*Ss/Vx)+'mm², -a.infini=' +string(sqrt(ee*Ss^4/(%pi*ba*xx)))+'mm, -tau=' +string(tau)+'s, ' ;  
61 xtitle([titrel;titre2;titre3]);  
62 p.isoview="off";  
63  
64
```

Modélisation du régime libre

Modélisation de la réponse a_x (largeur du cordon à $X=70\text{mm}$)

Mise à l'échelle des graphiques et commandes d'affichage des résultats de la simulation (interface de sortie)

Simulation d'encollage

GUI (Interfaces utilisateurs)

Demande de plusieurs valeurs Scilab

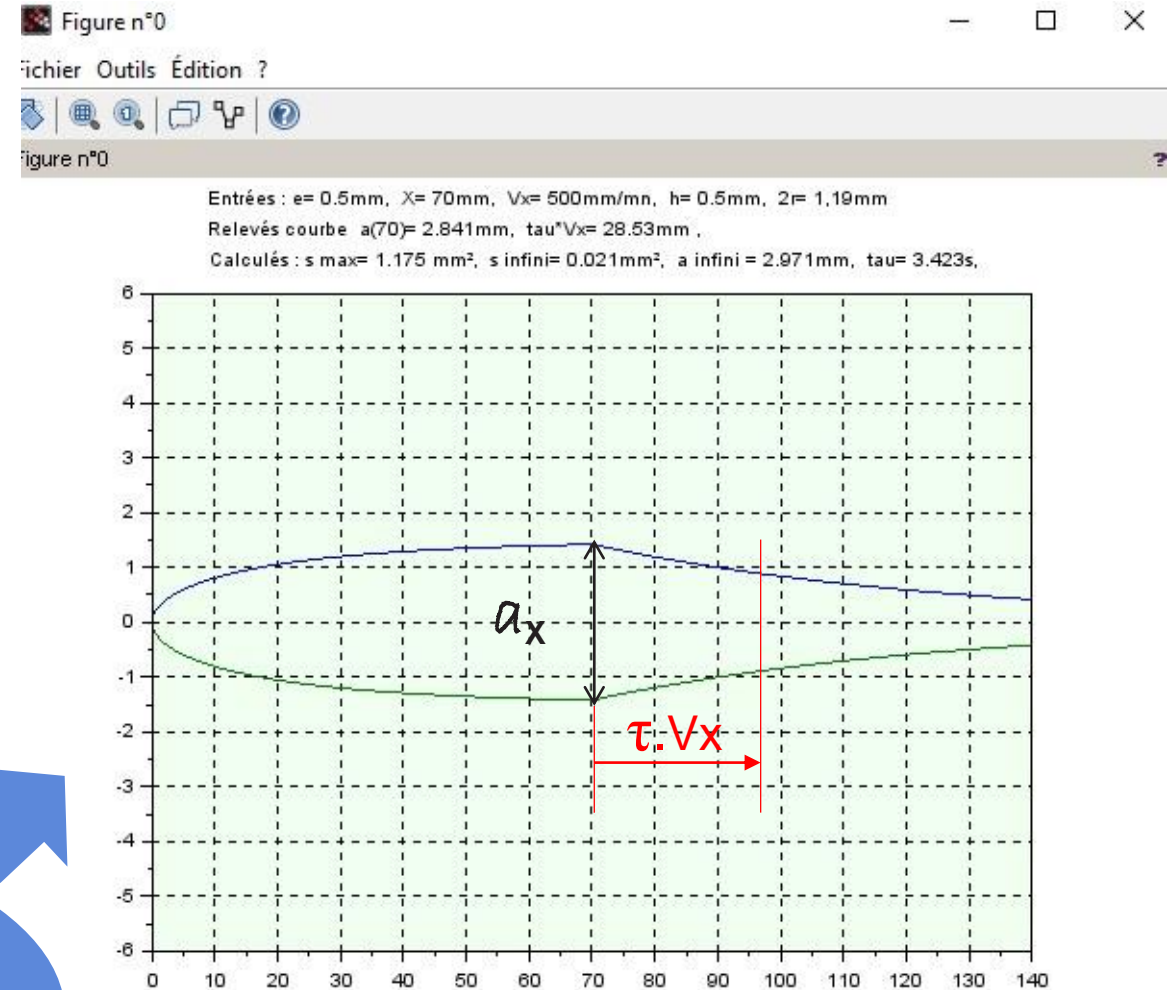
Entrer les paramètres d'encollage

Déplacement e en mm	0.5
Déplacement x en mm (20-200)	70
vitesse Vx en mm/mn	500
hauteur h en mm	0.5

Ok Annuler

CALCULATEUR NUMERIQUE:

- Modèle(s) de comportement;
- Méthode(s) de calcul (s)

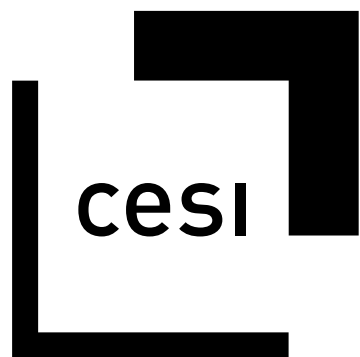


Conclusion

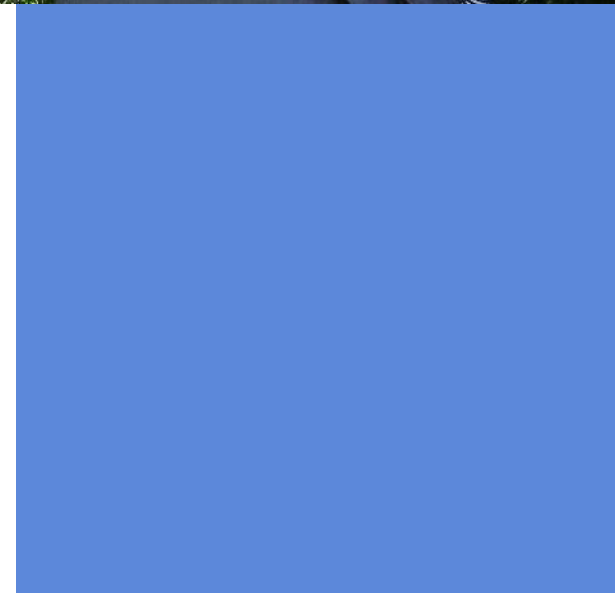
La modélisation et la simulation constituent une démarche prédictive en plusieurs étapes logiques: (de *[Gendre et Virely, 2013]*)

- Identifier les phénomènes physiques mis en œuvre dans le système qui ont une influence sur le résultat attendu.
- Choisir une théorie et des modèles de comportement permettant de modéliser ces phénomènes pour atteindre le résultat escompté.
- Choisir un solveur (i.e. un logiciel ou une méthode de simulation) compatible avec les deux points précédents.
- Modéliser le système sous la forme demandée par le solveur.
- Lancer la simulation et en déduire les résultats.
- Valider : Estimer l'écart avec la performance "réellement" réalisée (résidus vs. résultats des essais) et, si nécessaire, analyser les causes de cet écart et agir pour le réduire.

A vous de jouer!



CAMPUS
D'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR
ET DE FORMATION PROFESSIONNELLE



Références

- Carlier, A., (2006), Stratégie appliquée à l'audit des systèmes d'informations – Hermes science publications, Edition Lavoisier.
- Duboz, R., Ramat, É., Quesnel, G. (2004), Systèmes multi-agents - théorie de la modélisation et de la simulation : une analogie opérationnelle. Actes des douzièmes journées Francophones sur les Systèmes Multi-Agents (JFSMA) - Systèmes multi-agents défis scientifiques et nouveaux usages, Paris.
- Gendre, L., Virely, J-M. (2013), La démarche scientifique dans la réalisation des produits industriels, ENS Paris-Saclay,, <http://eduscol.education.fr/sti/si-ens-paris-saclay>.
- International Council on Systems Engineering (2004), Systems engineering handbook, INCOSE-TP-2003-016-02, version 2a, June 2004.