



C7 : MODÉLISATION MULTIPHYSIQUE

C7-1 - Modélisation multi-physique des systèmes complexes

11 Mai 2021

Table des matières

I Introduction	2
1 Motivations de la modélisation multiphysique	2
2 Présentation du support du cours	3
II Notions physiques constituant un modèle	4
1 Notions de Puissance/énergie	4
2 Représentation d'un composant de la chaîne d'énergie d'un système complexe	5
III Construction d'un modèle multiphysique à l'aide de Matlab Simulink	6
1 Type de modélisation	6
a) Modélisation causale	7
b) Modélisation acausale	8
2 Utilisation de Matlab Simulink	9

Compétences

- **Analyser**; Définir les frontières de l'analyse : Flux échangés
- **Analyser**; Appréhender les analyses fonctionnelle et structurelle : Architectures fonctionnelle et structurelle : - diagrammes de définition de blocs - chaîne directe - système asservi - commande
- **Analyser**; Apprécier la pertinence et la validité des résultats : Chaîne d'information et d'énergie : - diagramme de blocs internes - diagramme paramétrique
- **Modéliser**; Identifier et caractériser les grandeurs physiques :
- **Modéliser**; Proposer un modèle de connaissance et de comportement : Ordres de grandeur
- **Modéliser**; Valider un modèle : Caractéristiques des grandeurs physiques : - nature physique - caractéristiques fréquentielles - caractéristiques temporelles
- **Résoudre**; Procéder à la mise en oeuvre d'une démarche de résolution numérique : Flux de matière Flux d'information
- **Expérimenter**; S'approprier le fonctionnement d'un système pluritechnologique : Chaîne d'énergie et d'information
- **Expérimenter**; Proposer et justifier un protocole expérimental :

I. Introduction

1 Motivations de la modélisation multiphysique

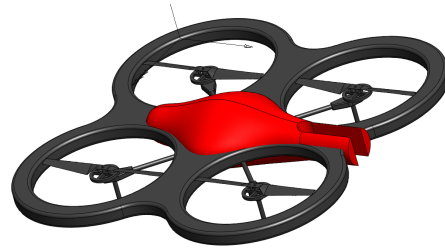
Propriété 1 : Intérêts et motivation

Les systèmes développés de nos jours font appel à de plus en plus de technologies différentes. C'est pourquoi on peut les appeler "**multiphysiques**" ou "**pluritechnique**".

Pour **modéliser** les performances d'un drone quadricoptère il faut déterminer la commande des actionneurs (moteurs) pour obtenir un mouvement donné. Ce problème est complexe puisqu'il fait intervenir des domaines physiques différents : électriques (commande des moteurs, gestion de l'énergie), mécaniques (inertie du drone et mouvements des hélices), aérodynamiques (portance et traînée), etc...



Système réel

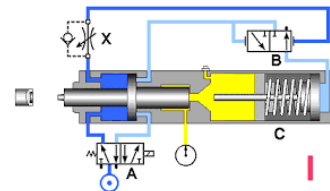


Modélisation volumique dans solidworks

L'objectif est de construire un modèle permettant de faire interagir ces différentes considérations physiques c'est le principe de la **modélisation multiphysique**.

Définition 1 : Modélisation multiphysique

- La **modélisation multiphysique** est nécessaire à mettre en oeuvre dès lors qu'un système est constitué de sous ensembles mobilisant des technologies faisant appel à des branches différentes de la physique :
 - électrique;
 - mécanique;
 - hydraulique;
 - etc..



- L'écriture de principes relatifs à ces différentes disciplines (lois électrique, principes de la dynamique, conservations énergétiques) aboutit à l'écriture d'équation différentielles qu'il faut résoudre pour prévoir le comportement du système qu'on modélise.
- Les outils de la **modélisation multiphysique** permettent de relier les **modèles de connaissances** et les **lois de comportement** des différents sous-ensemble du système pour construire un modèle très complet. C'est l'objectif de ce cours.

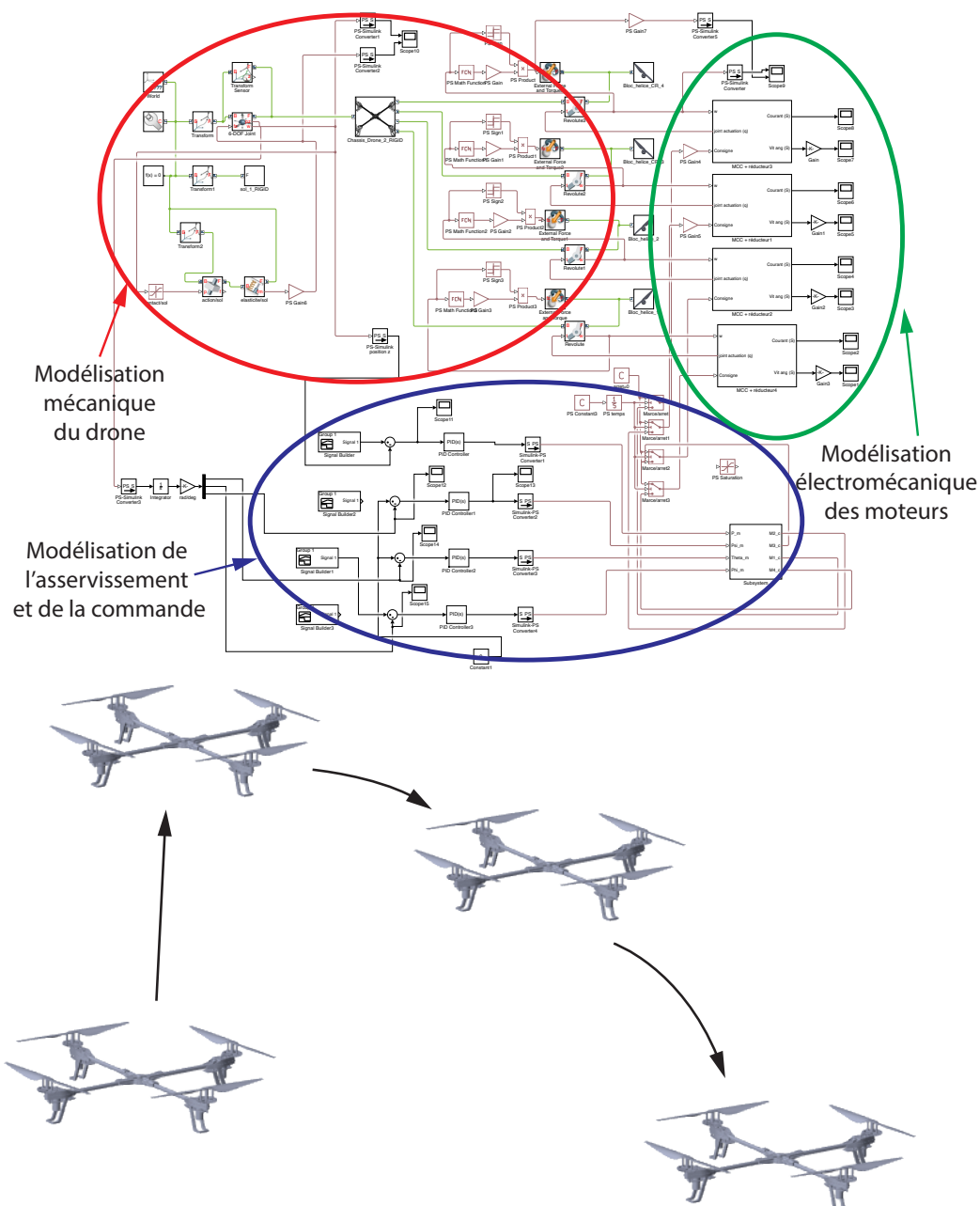
2 Présentation du support du cours



Exemple 1 : Architecture de la modélisation multiphysique d'un drone

L'exemple ci-dessous présente une modélisation multiphysique d'un drone quadricoptère. Le modèle est complexe mais on peut distinguer les parties qui permettent de modéliser le comportement mécanique du drone (reposant sur la modélisation volumique CAO), de commande (asservissement) et des moteurs (électromécanique).

Ce modèle permet de simuler la phase de décollage puis un mouvement de roulis.



II. Notions physiques constituant un modèle

1 Notions de Puissance/énergie



Définition 2 : Puissance/énergie

- **Energie :**
 - **L'énergie** mesure la capacité d'un système à modifier un état ou à produire un travail.
 - l'unité d'une énergie est le **Joule** (J) qui est homogène au produit d'une force par une longueur.
- **Puissance**
 - La puissance est la quantité d'énergie par unité de temps.
 - Son unité est le **Watt** (W) qui est homogène au produit d'une force par une vitesse.
 - C'est une grandeur scalaire qui résulte du produit de deux grandeurs duales :
 - > l'une est appelée **flux** et notée $f(t)$;
 - > l'autre est appelée **potentiel** et est noté $p(t)$.
 - Généralement on pourra l'écrire sous la forme :

$$P(t) = f(t) \times p(t) = \vec{f}(t) \cdot \vec{p}(t).$$

(1)



Propriété 2 : Interprétation des grandeurs de potentiel et de flux

Le tableau ci-dessous précise selon le domaine de la physique les différentes grandeurs associées à un potentiel ou un flux.

Domaine	Potentiel $p(t)$	flux $f(t)$
Electrique	Tension $u(t)$	Intensité $i(t)$
Mécanique (translation)	Force $\vec{F}(t)$	Vitesse $\vec{V}(t)$
Mécanique (rotation)	Couple $\vec{C}(t)$	Vitesse angulaire $\vec{\Omega}(t)$
Mécanique (quelconque)	Torseur d'action mécanique $\{\mathcal{T}_{(ext \rightarrow R)}\}$	Torseur cinématique $\{\mathcal{V}_{(S/R)}\}$
Hydraulique	Pression $p(t)$	Débit volumique $q_v(t)$
Thermique	Température $T(t)$	Flux entropique $\dot{S}(t)$



Propriété 3 : interprétation des grandeurs de potentiel et de flux

- **Grandeur d'effort ou de potentiel :** Une grandeur d'effort est, dans le domaine physique, une grandeur qui "tend" à déplacer de la matière ou quelque chose qui en tient lieu.
- **Grandeur de flux :** Une grandeur de flux est, dans le domaine physique, une grandeur qui traduit un déplacement de matière ou de quelque chose qui en tient lieu avec un certain "débit".


Remarque 1 : Interprétation des grandeurs de potentiel et de flux

Par analogie entre les physiques pour les mesures et en considérant que :

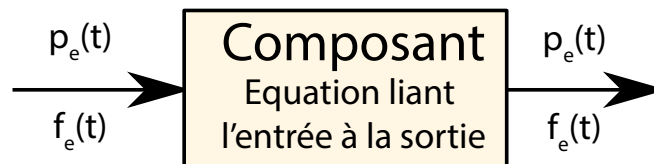
- les grandeurs de potentiel se mesurent en dérivation et donc relativement à une autre valeur ("across");
- les grandeurs de flux se mesurent en série ("through");

Domaine	Variable "across"	Variable "through"
Electrique		
Mécanique (translation)		
Mécanique (rotation)		
Hydraulique		

2 Représentation d'un composant de la chaine d'énergie d'un système complexe


Propriété 4 : Composant et chaine d'énergie

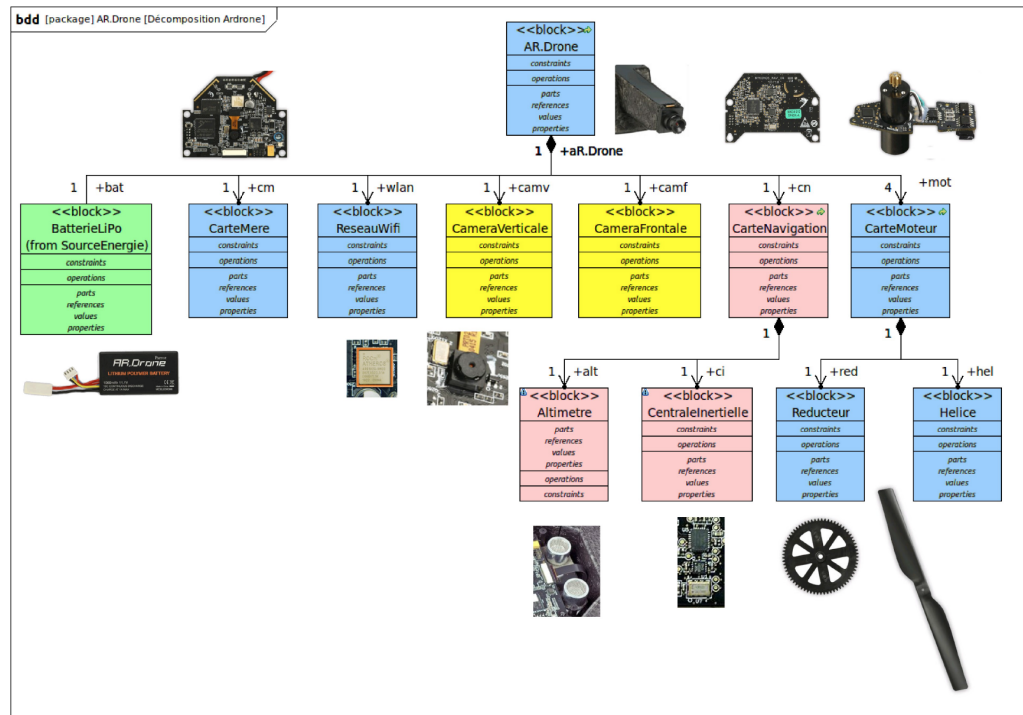
- Une modélisation multiphysique repose sur la représentation par la chaine d'énergie et d'information.
- Chaque bloc représentant un composant de la chaine d'énergie est caractérisé par des paramètres et des équations.
- Les liens entre les blocs transportent les variables "**potentiel**" et "**flux**" précisant à tout instant le transfert de puissance.



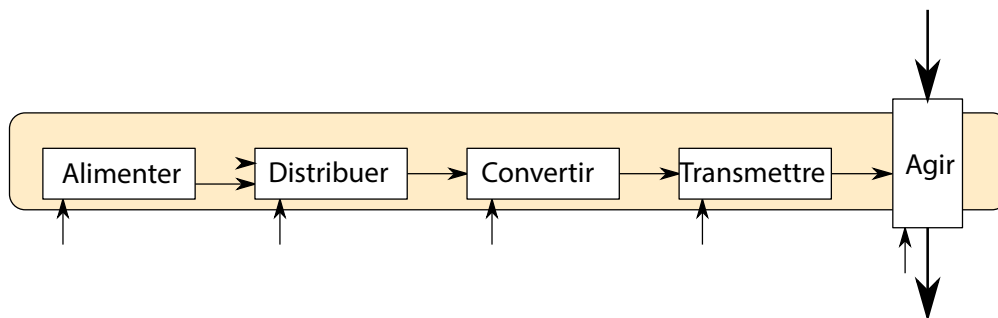


Exemple 2 : Chaîne d'énergie du drone

On donne le diagramme de définition de blocs de l'"A.R Drone Parrot".



Q 1 : Proposer une modélisation fonctionnelle de la chaîne d'énergie du drone en précisant les composants ainsi que les puissances et les grandeurs de flux et de potentiel qui transitent dans le modèle :



III. Construction d'un modèle multiphysique à l'aide de Matlab Simulink

1 Type de modélisation

Les modélisations **causales** et **acausales** reposent sur la modélisation de systèmes à l'aide de **blocs** pouvant décrire des composants ou des phénomènes physiques. La **nature** et l'**orientation** éventuelle des **grandeurs** transitant de

bloc en bloc définissent le type de modélisation.

a) **Modélisation causale**



Définition 3 : Approche causale

L'approche de **modélisation causale** repose sur un lien de causalité entre les blocs qui la composent. Les blocs produisent des signaux de sorties à partir de signaux d'entrées. C'est l'approche qui est utilisée dans la modélisation par schéma blocs.

La **causalité** repose sur l'**orientation** des données navigant d'un bloc source vers un bloc cible ou de destination.



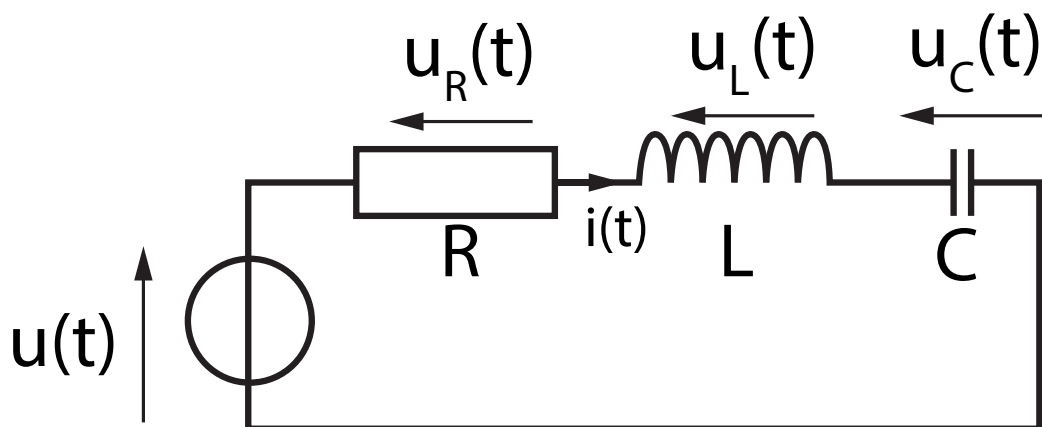
Propriété 5 : Avantages et inconvénients de l'approche

- 😊 La représentation de causalité est parfois plus naturelle à comprendre.
- 😊 Cette représentation s'adapte à la représentation d'un système asservi sous la forme d'un schéma bloc.
- 😞 la construction d'un modèle repose sur la manipulation d'équations mathématiques (équations différentielles) qui peut parfois s'avérer complexe et source d'erreurs.
- 😞 la représentation graphique est parfois peu explicite d'un point de vue physique.
- 😞 une modélisation causale est parfois difficile à faire évoluer.



Exemple 3 : Modélisation d'un circuit électrique

On souhaite modéliser un circuit **RLC** alimenté par une source de tension $u(t)$.



Modèle de connaissance associé



Exemple 4 : Construction du modèle causal associé au circuit électrique

Donner une proposition de modèle causal qui aura pour entrée $U(p)$ et pour sortie $U_c(p)$.

b) Modélisation acausale



Définition 4 : Approche acausale

- La **modélisation acausale** est une forme de modélisation ne tenant pas compte de l'orientation des liens entre différents blocs de modélisation.
- Les grandeurs transitant de blocs en blocs sont énergétiques et résultent de la dualité "**flux/-potentiel**" liée à la notion physique étudiée.



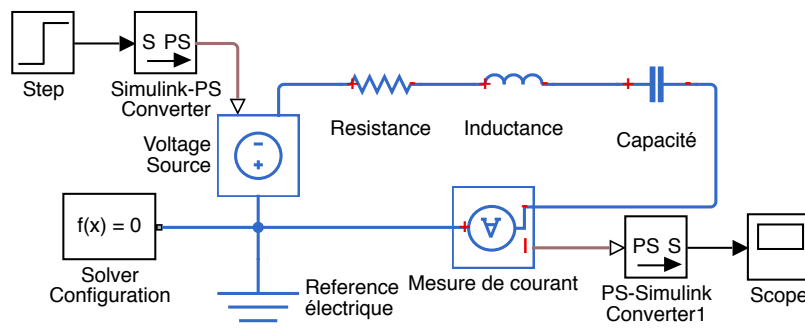
Propriété 6 : Avantages et inconvénients de l'approche

- 😊 La représentation de la modélisation est très proche de l'architecture matérielle du système modélisé.
- 😊 Cette représentation ne nécessite pas forcément d'écrire d'équations.
- 😊 dans cette modélisation les blocs représentent directement des composants.
- 😊 Il n'y a pas de lien de cause à effet entre les connecteurs des blocs.
- ☹️ L'utilisation de cet outil nécessite la maîtrise de la représentation fonctionnelle des systèmes pluritechniques.



Exemple 5 : Construction du modèle acausal associé au circuit électrique

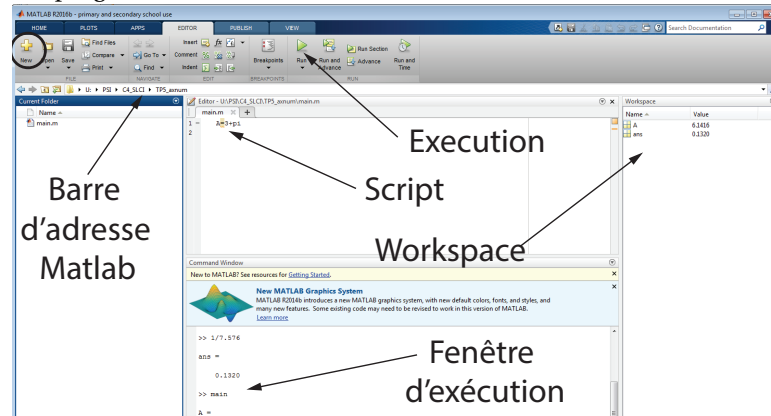
La représentation acausale à l'aide du logiciel Matlab Simulink est donnée ci-dessous. On observe que la structure est très similaire à la représentation physique sous la forme d'un schéma électrique. Il est cependant bien nécessaire de maîtriser la modélisation électrique. Ainsi une différence de potentiel est imposée en parallèle et une mesure de courant est mesurée en série.



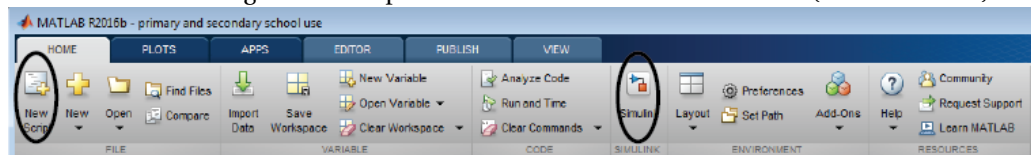
2 Utilisation de Matlab Simulink

Ce logiciel permet de construire les deux types de modélisation présentées précédemment.

- A l'ouverture de Matlab plusieurs fenêtres sont accessibles :
 - Barre d'adresse Matlab : dossier de travail à préciser au préalable.
 - Fenêtre d'exécution ou "Command Windows" : saisie de lignes de commande ou instructions.
 - "Current Folder" : navigateur de fichier.
 - "Script" : éditeur de programmes ou de fonctions.



- Le bouton Simulink dans l'onglet "Home" permet de choisir un nouveau modèle ("Blank model")



- En pressant le bouton de couleur on peut choisir ses blocs (bibliothèque Simulink). Différentes rubriques sont accessibles :
 - "**commonly used block**" : blocs courants ;
 - "**source**" : entrées ;
 - "**sinks**" : sorties
 - "**continuous**" : intégrale, dérivé, fonction de transfert ;
 - "**Math**" : polynômes, trigonométrie, seuils ;
 - "**Simscape/foundation librairies**" et triés par domaines physiques vous trouverez toutes les fonctions permettant de construire un modèle acausal.
 - "**Simscape/foundation librairies/utilities**" vous trouverez des fonctions permettant de passer d'une simulation causale à acausale et inversement.

