

COURS et ACTIVITÉS

Introduction à la modélisation multiphysique

1 Introduction et question sociétale

1.1 Définition

La **simulation multi-physique** est, en analyse numérique, une tentative de reproduction du comportement de tout ou partie d'un système / objet en faisant cohabiter différents domaines des sciences et technique en vue d'obtenir un **jumeau numérique**. Il peut s'agir de domaines mécaniques, électrique, thermiques, chimiques, électromagnétiques, etc.

Cette simulation est faite à partir de **modèles** dans des logiciels tel que OpenModelica¹.

Les modèles peuvent être issus de :

- modèles de connaissance
- modèles de comportement
- modèles statistiques
- un mélange des trois (les prévisions météorologique en est un exemple)

Dans le cadre du programme de pré-bac nous nous intéresserons seulement aux deux premiers (modèles de connaissance et de comportement).

Ces deux modèles seront évoqués en guise de synthèse de cette activité. Vous aurez cependant besoin dans le cadre de l'activité 1, de caractériser la dynamique du système. Il faudra alors définir le temps de réponse à 5% ($tr_{5\%}$) expliqué à l'annexe F.

1.2 Question sociétale en vue des activités

Comment améliorer les performances d'un système ou de manière plus générale, concevoir un système et valider des performances sans avoir le système voire qu'il ne soit pas encore façonné!?

Exemple d'un système que l'on dispose et que l'on veut optimiser : Vous souhaitez prédéterminer les nouvelles performances cinématiques de la voiture Tamiya radio télécommandée pour la modification suivante :

L'**accumulateur** embarqué d'une bonne autonomie énergétique dégrade les performances de part son poids. Vous avez trouvé un accumulateur plus léger mais de plus faible capacité (nombre d'A.h plus faible).

Les questions que vous vous posez :

- comment évolue l'accélération ?
- comment évolue la vitesse de pointe ?
- comment évolue l'autonomie globale de la voiture ?



De manière intuitive il est assez aisé de comprendre que l'accélération sera meilleure du fait d'un poids global diminué mais de combien est-elle augmentée? Répondre à la deuxième et troisième questions s'annonce plus délicat.

1. OpenModelica (ou OMedit) est un logiciel de modélisation multiphysique gratuit et très puissant. D'autres logiciels permettent de réaliser des modèles de simulation multiphysique : OpenModelica (gratuit), Scilab Xcos, Matlab Simscape / Simulink, System Modeler Wolfram, Sinusphy, etc.

La modélisation multi-physique est là pour vous aider !

Pour vous mettre le pied à l'étrier, deux activités vous sont proposées :

- Performance de la voiture Tamiya Radio Commandée
- Gilet d'assistance aux apnéistes – ApneaSafe

2 Activité 1 – Performance de la voiture Tamiya Radio Commandée

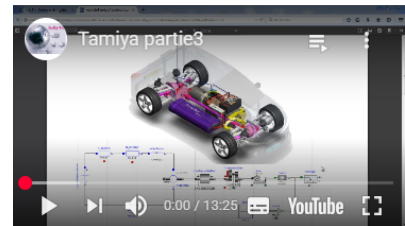
Prendre connaissance des trois vidéos suivantes présentant le modèle volumique (SolidWorks) et le modèle multiphysique (OpenModelica) de la voiture Tamiya



Tamiya partie 1



Tamiya partie 2



Tamiya partie 3

En guise d'initiation à la modélisation multiphysique, vous devrez télécharger le modèle de simulation et enrichir le modèle (les paramètres à renseigner dans le modèle sont : la tension batterie, la masse voiture et le diamètre des roues) à partir de la vraie voiture Tamiya mise à disposition dans le laboratoire de Sciences de l'ingénieur.

Travail demandé préliminaire

Avant de commencer l'activité, **laissez** parler votre intuition en répondant aux questions suivantes de :

Pour une batterie de tension un peu plus élevée :

- l'accélération est plus grande ;
- l'accélération est plus faible
- la vitesse de pointe est plus grande ;
- la vitesse de pointe est plus faible ;

Pour une masse un peu plus élevée de l'ensemble de la voiture :

- l'accélération est plus grande ;
- l'accélération est plus faible
- la vitesse de pointe est plus grande ;
- la vitesse de pointe est plus faible ;

Pour des roues de diamètre légèrement plus petits :

- l'accélération est plus grande ;
- l'accélération est plus faible
- la vitesse de pointe est plus grande ;
- la vitesse de pointe est plus faible ;

Travail demandé d'investigation

- **Télécharger** le modèle multiphysique [ici](#) (clic droit puis « enregistrer le lien sous »)
- **Paramétrer** le modèle à partir de la vraie voiture mise à disposition
- **Réaliser** une simulation pour déterminer la vitesse maximale atteinte (m/s et km/h), ainsi que le temps mis pour atteindre

À partir du modèle multiphysique que **vous aurez préalablement paramétré/enrichi des éléments manquants** (la tension batterie, la masse voiture et le diamètre des roues) , **vérifier** vos intuitions faites dans le travail demandé préliminaire.

3 Activité 2 – ApneaSafe

Dans le cadre du projet interdisciplinaire de terminale, quatre élèves du lycée Mendès France se sont attachés à rechercher une solution pour sécuriser les apnéistes (plongeurs en apnée). Ils ont réalisé un gilet gonflable capable de remonter le plongeur dès que le temps d'immersion paramétré est échu (temps d'immersion paramétrable par le plongeur).

Ce système a été baptisé ApneaSafe.

Dans la présente activité, je vous propose d'utiliser le modèle multiphysique (réalisé avec le logiciel OpenModelica) partiellement renseigné (que vous devrez enrichir)



Gilet de sauvetage gonflable

Cette activité a pour objectif de vous faire vivre une des situations du projet.

Un projet de terminale s'articule chronologiquement de la manière suivante :

1. **élaboration** d'un cahier des charges (formalisme utilisé dans ce projet : SysMI) ;
2. **élaboration** d'un modèle (multi-physique dans notre cas) permettant de prédire les futures performances ;
3. **réalisation** d'une maquette ou plusieurs maquettes qui une fois assemblées forme un prototype ;
4. **investigation** sur la maquette (essai en piscine en l'occurrence avec la bouée équipée du déclencheur) ;
5. **quantification** des écarts et recherche des origines ; apport de correction au modèle pour assurer un comportement conforme aux essais réels \Rightarrow Validation du Modèle
6. **Utiliser** le modèle pour déterminer le volume de bouée requise dans des conditions d'applications différentes de l'expérimentation.

3.1 Ressources à disposition

- Cahier des charges (annexe [A](#)) ainsi qu'une [vidéo d'aide à la lecture](#). ;
- La [vidéo 1 interview](#) de Raphaël Le Cam (plongeur / formateur à l'université de Rennes) ;
- La [vidéo 2 de l'essai](#) à 3 kg de lest (ceinture de plongée) réalisé dans la fosse de 10 mètres de profondeur à la piscine des Gayeulles à Rennes.
- Conditions de l'essai précédent (annexe [B](#)) ;
- Evolution de la masse volumique de l'eau en fonction de la température (annexe [C](#)) ;
- Les performances cinématiques réelles (profondeur d'immersion du plongeur en fonction du temps en phase de remontée d'urgence) réalisées à partir de l'essai précédemment cité (annexe [D](#)).
- Le modèle multi-physique (à compléter) du système ApneaSafe (Document réponse - annexe [E](#)) ainsi que [les explications du modèle en vidéo](#) ;
- [Le modèle multi-physique au format OpenModelica](#)².
- [Les tutoriaux vidéos d'OpenModelica](#) (partie 1 à 4) dans le cas où vous débutez avec OpenModelica.

2. Clic droit puis enregistre le lien...

3.2 Travail demandé

Analyse du besoin

1. **Visionner** l'interview de Raphaël Le Cam (vidéo 1).
2. **Visionner** la vidéo explicative du cahier des charges en SysML.
3. **Répondre** au points suivants en vous aidant du cahier des charges en SysML.
 - **Indiquer** les dangers en plongée sous-marine.
 - **Indiquer** de quel accident Raphaël Le Cam a été victime.
 - **Préciser** s'il existe des matériels pour sécuriser les apnéistes.
 - **Indiquer** quel(s) matériel(s) réalise(nt) le gonflage de la bouée du gilet.
 - **Expliquer** comment il est possible de connaître la profondeur d'immersion et indiquer la grandeur physique à mesurer ainsi que le matériel assurant cette mesure.
 - **Expliquer** comment le plongeur sait que son temps de plongée est quasiment échu

Analyse des performances réelles obtenues

1. **Visionner** la [vidéo 2](#) relative à l'essai en piscine.
2. **Préciser** les conditions d'essai et **vérifier** à partir de cette vidéo, que l'étude cinématique donnée à l'annexe 4 semble conforme quant-au temps de remontée.

Analyse des performances réelles obtenues

Désormais, l'objectif sera de vérifier que le modèle multi-physique se comporte globalement comme le **vrai système** ApneaSafe dans le but de s'en servir afin d'investiguer sur ce dernier pour en définir de nouvelles performances.

1. **Visionner** la [vidéo](#) explicative du modèle multi-physique.
2. **Compléter** le modèle multi-physique (document réponse annexe [E](#) à partir du cahier des charges (annexe [A](#)) et des informations relatives aux conditions d'essai (annexe [B](#)). Pour ce faire vous aurez besoin de maîtriser les concepts de poussée d'Archimède et de traînée aérodynamique.
3. Après avoir téléchargé ^a [le modèle multiphysique apneaSafeEleve.mo](#), **Simuler** modèle multi-physique et **caractériser** les écarts entre le cahier des charges, le modèle et les performances réelles obtenues en piscine.
4. **Vérifier** à partir du modèle que le temps de montée est inférieur à 14 secondes si l'on déleste aussi le plongeur de sa ceinture de lest.
5. **Vérifier** à l'aide du modèle, que le volume de la bouée est satisfaisant dans les cas d'utilisations ci-dessous :
 - Homme de masse 120 kg, volume 140 litres (bouée+combinaison comprise), surface frontale 0,42 m² et Cx 0,8
 - Femme de masse 60 kg, volume 68 litres (bouée+combinaison comprise), surface frontale 0,28 m² et Cx 0,52
 - Enfant de masse 23 kg, volume 26 litres (bouée+combinaison comprise), surface frontale 0,22 m² et Cx 0,43
6. **Déterminer** le temps de remontée si on plonge 20 m, Est-ce cohérent avec le cahier des charges ?
7. Les accidents ont lieu fréquemment dans les 2 derniers mètres de remontée. En fonction de la vitesse de remontée du plongeur que vous déterminerez grâce au modèle, **déterminez** le nouveau volume de bouée pour éviter un accident dans les 2 derniers mètres de remontée.

^a. Clic droit puis enregistré le lien..

4 Annexes

A Cahier des charges

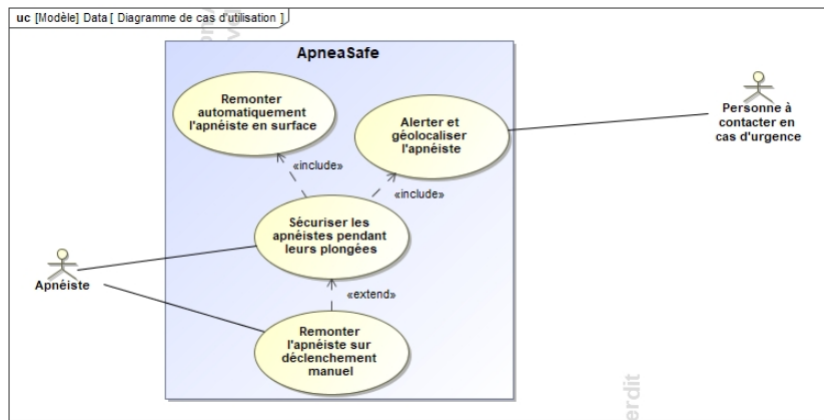


Diagramme de cas d'utilisation d'ApneaSafe

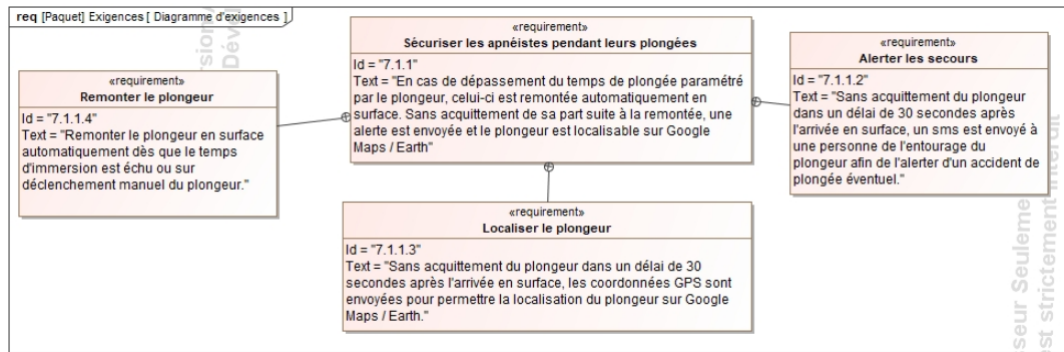


Diagramme d'exigences Sécuriser Apnéiste

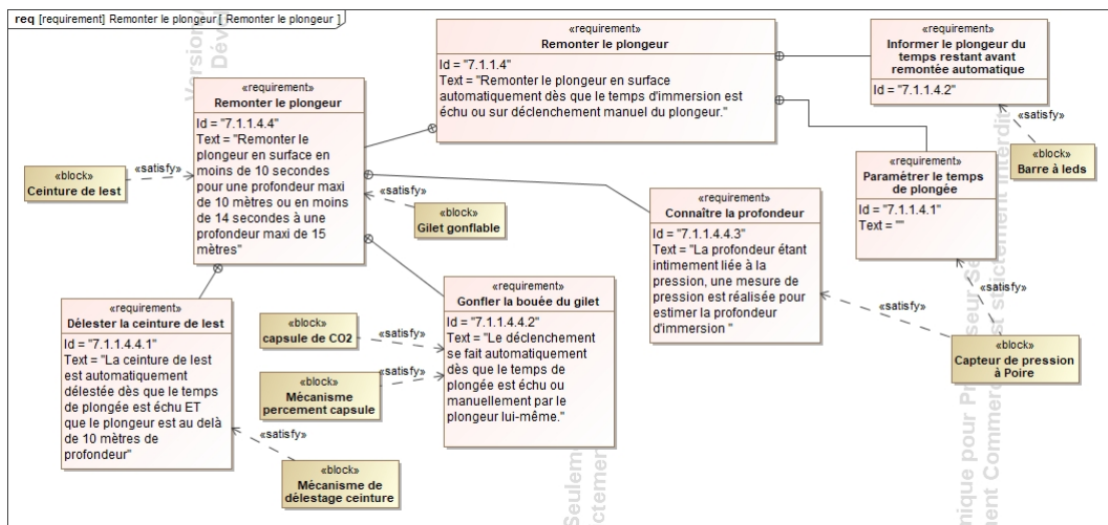
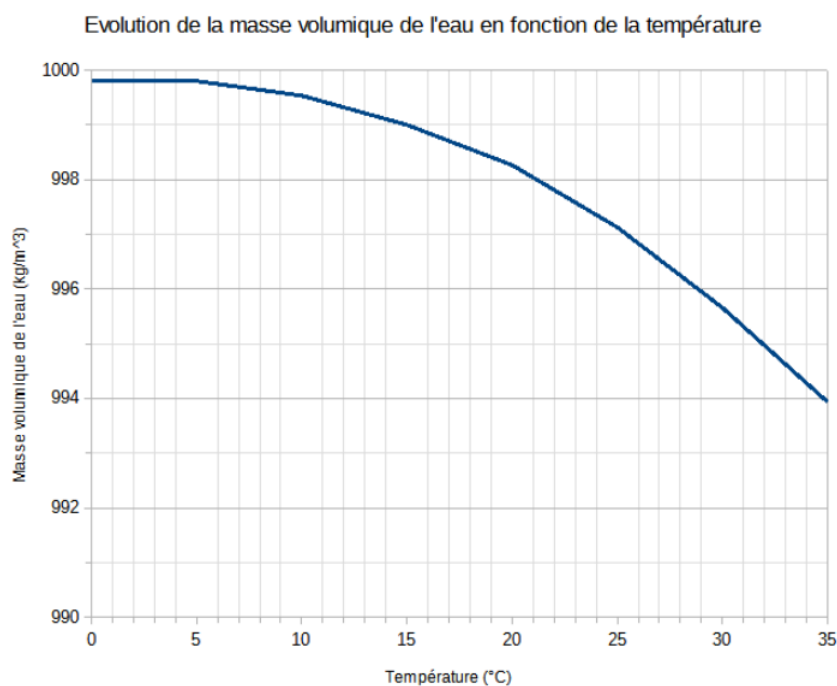


Diagramme d'exigences Remonter Apnéiste

B Conditions de l'essai réalisé à la piscine des Gayeulles (lest à 3 kg)

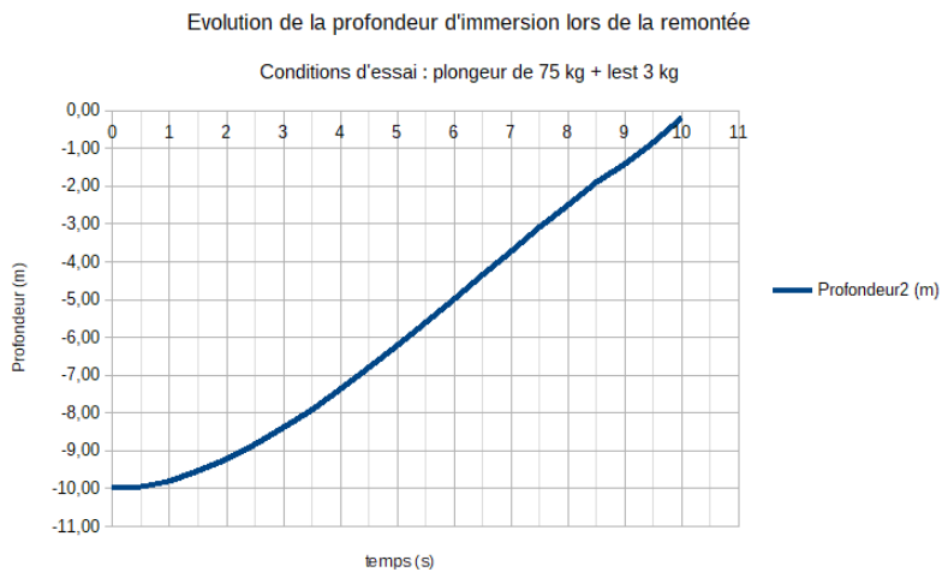
- La masse et le volume estimé du plongeur (bouée et combinaison comprises) sont respectivement de 75 kg et à 80 L ;
- La surface frontale S et le coefficient de pénétration C_x du plongeur sont respectivement estimés à $0,35\text{ m}^2$ et à $0,6$;
- L'eau de la piscine est de 28°C en surface et sera considérée constante quelle que soit la profondeur ;
- Les essais ont eu lieu sur Terre (eh oui!), l'accélération de pesanteur vaut donc $9,81\text{ m.s}^{-2}$.
- Le volume de la bouée gonflable du gilet une fois gonflé est de 10 Litres.

C Evolution de la masse volumique en fonction de la température



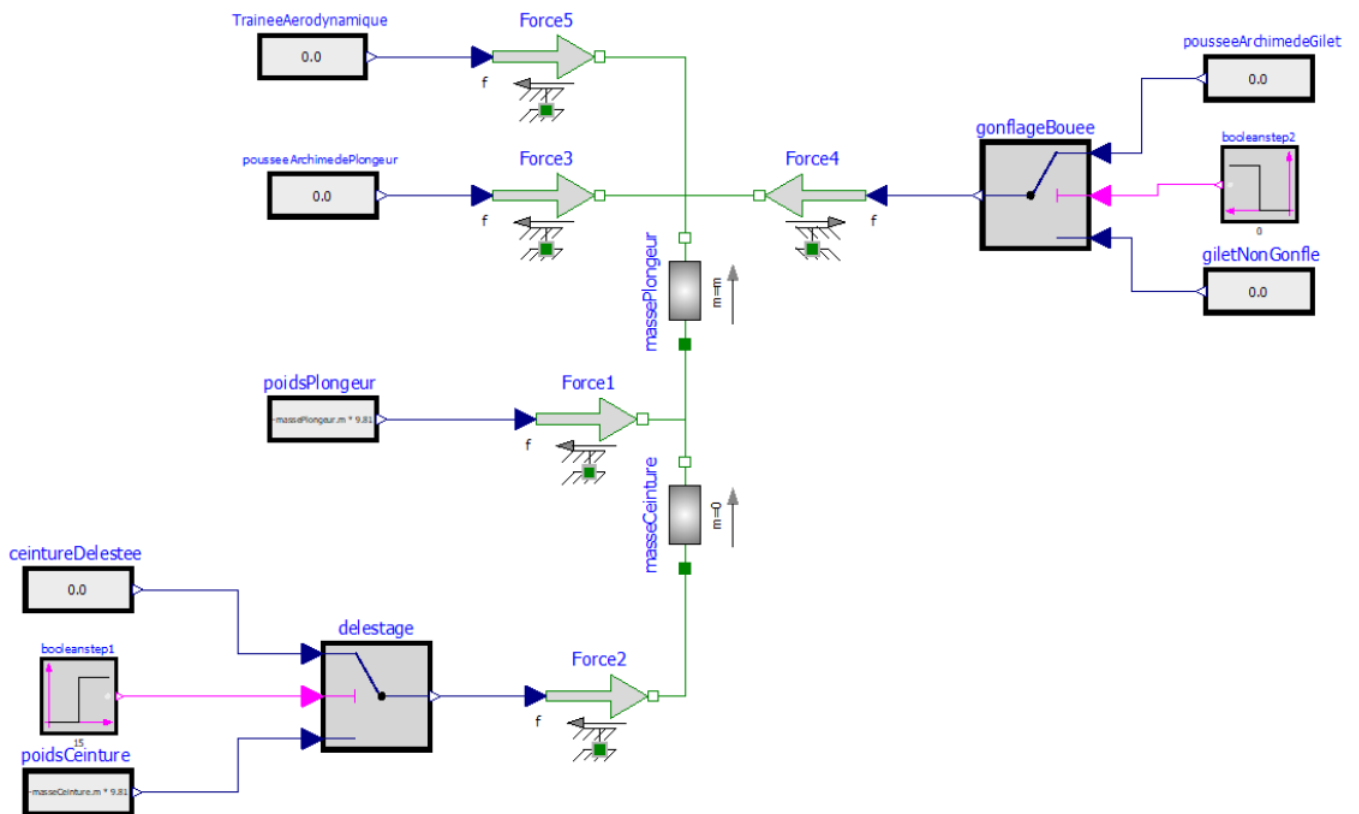
Évolution de la température de l'eau en fonction de la température

D Performance cinématique réelle



Évolution de la vitesse lors de la remontée dans les conditions d'essai

E Document réponse



Modèle multi-physique du système ApneaSafe (à compléter)

F Régimes transitoire / établi et réponse à 5%

Pour caractériser un système dynamique, il est d'usage d'utiliser ce que l'on appelle le temps de réponse à 5% ($tr_{5\%}$).

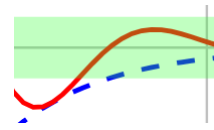
Prenons l'exemple de la figure 1 qui illustre la vitesse d'évolution de deux mobiles (l'un en rouge trait continu et l'autre en bleu pointillés). À première vue, les régimes transitoires sont sensiblement les mêmes, cependant l'un des deux est plus rapide que l'autre d'un point de vue du critère du temps de réponse à 5%.

Il faut pour cela tracer la zone de réponse à 5%. Pour cela il suffit d'encadrer la valeur finale par une bande égale à $0.95 V_{finale}$ et à $1.05 V_{finale}$.

Utilisation de la zone de réponse à 5%

La lecture de $tr_{5\%}$ se fait dès lors que la réponse entre dans la zone à 5% sans plus jamais en ressortir.

En zoomant sur la courbe on s'aperçoit que le mobile tracé en rouge est légèrement plus rapide.



Évolution de la vitesse d'un mobile

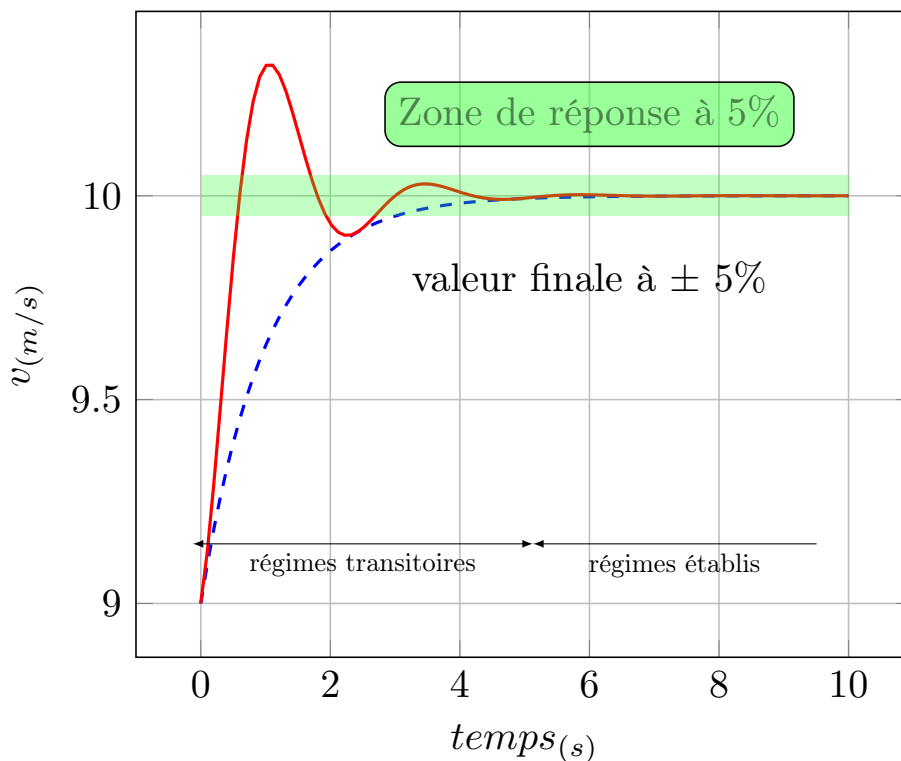


FIGURE 1 – Illustration régimes transitoire/établi et temps de réponse à 5%