



ÉCOLE
CENTRALE LYON



PE n° 38

Simulations d'écoulements pour des applications spatiales à l'aide d'une suite logicielle libre

Equipe Projet

- M. Jiashua GUO
- M. Zakara KABARA
- M. Ziyu ZHOU
- M. Corentin BRAULT
- M. Malo FLORY
- M. Grégoire POUTHIER

Equipe Pédagogique

- **Commanditaire:**
Centrale Lyon Cosmos
- **Tuteur:**
M. Christophe CORRE
- **Conseiller en gestion de projet:**
M. Frédéric DUBREUIL
- **Conseiller en communication:**
M. Patrick PONS



ÉCOLE
CENTRALE LYON

Table des matières

1. Contexte et motivation du projet
2. Cahier des charges fonctionnel
3. Démarche du PE
4. Méthodologie proposée
5. Décomposition des tâches
6. Planification et répartition des tâches
7. Budget

Glossaire

- **CLC** : Centrale Lyon Cosmos, commanditaire du projet
- **CFD** : Computational Fluid Dynamics. Discipline scientifique à la confluence de la mécanique des fluides, des mathématiques appliquées et de l'informatique dont l'objectif est le développement de méthodologies de simulation des écoulements à la fois précises et efficaces.
- **Solveur** : outil CFD permettant de simuler des écoulements en résolvant de façon discrète les lois de conservation qui les régissent.
- **Mailleur** : outil CFD permettant de construire les maillages des domaines fluides auxquels seront appliquées les méthodes de discrétisation du solveur CFD. Le mailleur peut inclure un modèleur géométrique permettant de construire les surfaces limitant le domaine fluide ensuite maillé.
- **Outil de visualisation** : logiciel permettant de produire des représentations graphiques (champs 3D et 2D, distributions 1D, etc) des solutions discrètes du solveur CFD.
- **SU2** : Solveur CFD libre de droits (LGPL 2.1) utilisé dans le PE.
- **Ansys Fluent** : Logiciel de CFD commercialisé par la société Ansys.
- **gmsh** : Logiciel de maillage libre de droits utilisé dans le PE.
- **Paraview** : Logiciel libre d'analyse et de visualisation des données

1. Contexte et motivation du projet

CLC est une association de l'Ecole Centrale de Lyon dont les objectifs sont de proposer des projets innovants aux élèves-ingénieurs de 1A et 2A et de promouvoir l'ingénierie aérospatiale au sein de l'École.

Les membres du CLC réalisent aujourd'hui leurs simulations numériques d'écoulements pour des configurations aérospatiales principalement à l'aide de la suite logicielle développée par la société Ansys, sous licence étudiante.

Cette stratégie comporte deux inconvénients majeurs :

- La licence étudiante des outils Ansys est bridée à des maillages de taille limitée, limite qui peut être rapidement atteinte pour la simulation de configurations 3D
- Le solveur fluide Ansys Fluent est une boîte noire (code fermé) qui ne peut être modifiée / adaptée à des besoins spécifiques que par le biais de User Defined Functions. Le développement de telles UDF reste délicat et limite intrinsèquement les possibilités d'adaptation du code aux besoins du CLC (par exemple simulation d'écoulements de gaz raréfiés).

D'autres inconvénients ont également été identifiés dans la stratégie de simulation mise en œuvre jusqu'à présent :

- Manque de documentation des outils logiciels. Chaque étudiant a tendance à développer son propre calcul sans prendre soin de le documenter afin qu'il puisse être réutilisé par la suite.
- Manque de support interne de la part des enseignants-chercheurs. Des supports pédagogiques existent (par exemple initiation Ansys Fluent dans l'action de formation FLE tc2 en 1A) mais le code commercial Ansys n'est pas un outil privilégié pour des usages recherche et il n'existe donc pas de communauté d'intérêt entre élèves-ingénieurs et enseignants-chercheurs pour la mise en œuvre de cet outil commercial.
- Limites de portabilité de l'outil Ansys. Il n'est pas possible d'installer le code et de l'exécuter (sous licence étudiante) en environnement Mac OS.

Le présent projet d'études a pour objectif d'apporter des solutions aux problèmes identifiés ci-dessus en développant une solution logicielle alternative pour les simulations d'écoulements réalisées au sein de l'association CLC.



2. Cahier des charges fonctionnel

Le produit auquel nous nous intéressons dans ce PE est une chaîne de calcul d'écoulements, constituée d'un mailleur (incluant un modelleur géométrique), d'un solveur fluide et d'un outil de visualisation et de post-traitement des résultats. Ce produit doit permettre de réaliser des simulations d'écoulements aérospatiaux d'intérêt pour l'association CLC. Les utilisateurs principaux de la chaîne de calcul sont les élèves ingénieurs 1A / 2A travaillant sur les projets CLC. Ces élèves ingénieurs sont amenés à interagir avec des enseignants-chercheurs auprès desquels ils peuvent chercher un support technique. Ils interagissent également avec les partenaires du CLC, notamment le CNES qui propose des études au CLC. La chaîne de calcul doit pouvoir être mise en œuvre dans une gamme variée d'environnement de travail et doit également être documentée afin que son utilisation soit pérenne (le CLC ne dispose pas de membres permanents : son bureau est régulièrement renouvelé avec le passage de nouvelles promotions d'élèves-ingénieurs, ce qui amène les enseignants-chercheurs à répondre tous les ans aux mêmes questions des élèves).

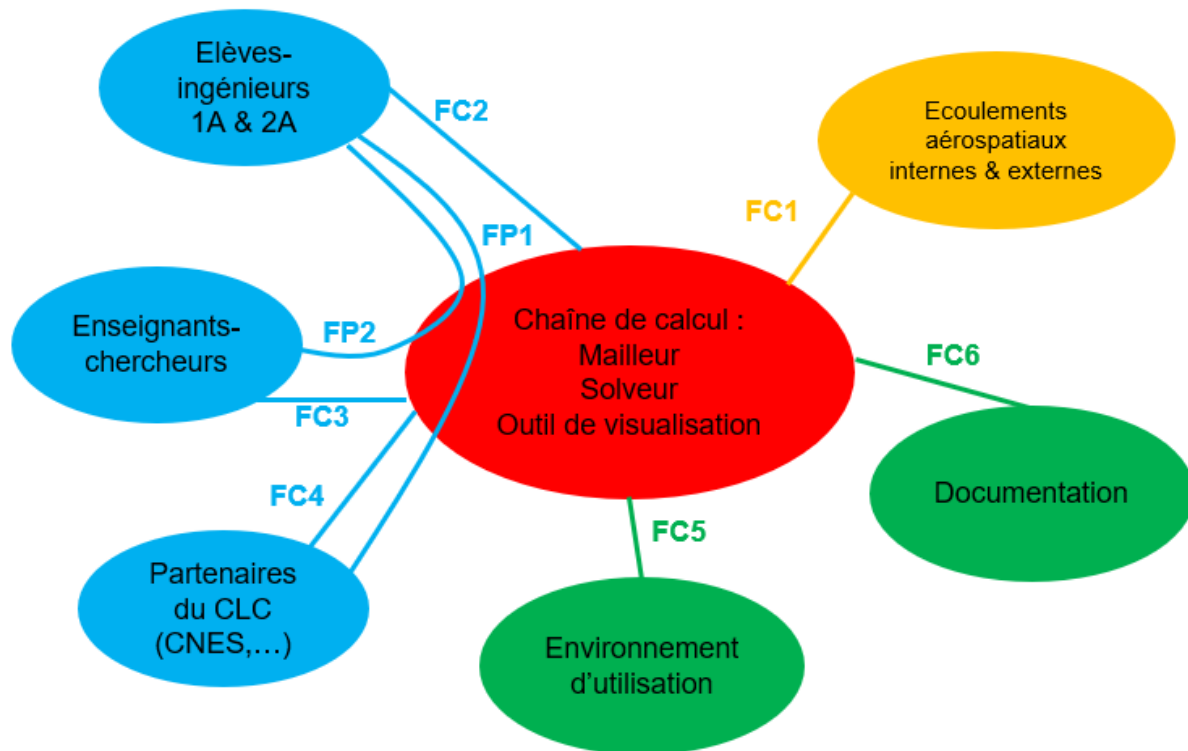


Figure 1 : diagramme fonctionnel de la chaîne de calcul développée et documentée dans le cadre du PE 38.

La Figure 1 présente le diagramme pieuvre associé à la chaîne de calcul développée dans notre PE.

Les fonctions contraintes FC identifiées sont :

FC1 : la chaîne doit permettre de réaliser les simulations d'écoulements aérodynamiques internes (dans des systèmes propulsifs) et externes (autour de fusées ou de navettes), d'intérêt pour l'association CLC.

FC2 : la chaîne doit pouvoir être utilisée en totalité (de la construction de la géométrie et de la génération du maillage à l'analyse des résultats en passant par l'exécution du solveur) par les élèves-ingénieurs impliqués dans les projets du CLC.

FC3 : la chaîne doit pouvoir être utilisée en partie au moins (par exemple reproduction d'un calcul avec données d'entrée fournies ou bien simplement visualisation de résultats) par des enseignants-chercheurs auxquels un support technique serait demandé.

FC4 : la chaîne doit pouvoir être utilisée en partie au moins (cf. FC3) par les partenaires du CLC.

FC5 : la chaîne de calcul doit pouvoir être exécutée sur tout environnement (Windows, Linux, Mac), sur portable individuel mais aussi possiblement cluster de calcul de l'Ecole Centrale de Lyon, voire d'autres moyens de calcul auxquels le CLC pourrait avoir accès.

FC6 : la chaîne de calcul doit être soigneusement documentée afin de permettre une utilisation pérenne au sein du CLC.

On identifie également 2 fonctions principales impliquant 2 catégories d'utilisateurs du produit :

FP1 : la chaîne de calcul doit permettre une interaction aisée entre élèves-ingénieurs et enseignants-chercheurs dont le support serait sollicité.

FP2 : la chaîne de calcul doit permettre une interaction aisée entre élèves-ingénieurs travaillant sur les projets du CLC et partenaires du CLC auxquels des résultats seraient présentés.

L'analyse de ce cahier des charges fonctionnel nous conduit donc à proposer une chaîne de calculs reposant sur des outils libres :

- Modeleur géométrique et mailleur **gms** <https://gms.info/> et <https://gitlab.onelab.info/gms/gms> pour les sources du code,
- Solveur fluide **SU2** <https://su2code.github.io/> pour la documentation et les sources du code,
- Outil de visualisation **Paraview** <https://www.paraview.org/> et <https://github.com/Kitware/ParaView> pour les sources du code.

Ces outils libres et ouverts ont été proposés au PE par le tuteur pédagogique car ils sont bien éprouvés et présentent une communauté d'utilisateurs, permettant de répondre aux questions techniques des élèves. D'un point de vue fonctionnel, cette combinaison **gms + SU2 + Paraview** permet bien de répondre à :

- FC1 (simulations d'intérêt pour le CLC), sans limitation sur la taille des calculs (autre que les moyens de calcul à disposition) et avec possibilité d'adaptation du solveur SU2 à de futurs développements puisque code ouvert



- FC2 (utilisation par les élèves ingénieurs) sous réserve d'un temps de prise en main, facilité par une documentation appropriée qui devra être fournie par le présent PE
- FC3 et FP1 (utilisation par et interaction avec les enseignants-chercheurs) dans la mesure où le logiciel SU2 est utilisé par certains enseignants-chercheurs du département MFAE. En outre, les sorties SU2 réalisées dans Paraview peuvent être directement visualisées par les enseignants-chercheurs via le même logiciel, qui est largement utilisé comme outil libre de visualisation.
- FC4 et FP2 (utilisation par et interaction avec les partenaires du CLC) dans la mesure où les sorties graphiques sous Paraview peuvent être directement visualisées par ces partenaires dès lors qu'ils sont par ailleurs utilisateurs de Paraview. En outre l'aspect libre du mailleur et du solveur rend également possible le portage de l'intégralité des calculs chez les partenaires dès lors en tout cas qu'une volonté d'utilisation de ces outils libres existe.
- FC5 (environnement d'utilisation) dans la mesure où les 3 logiciels proposés sont multi-plateformes
- FC6 (documentation) les 3 logiciels sont déjà documentés (notamment SU2 par le biais d'une série de tutoriels disponibles en ligne) mais cette documentation demandera à être adaptée pour bien répondre aux besoins des utilisateurs du CLC.

3. Démarche du PE

L'objectif du PE est donc de mettre à disposition des élèves-ingénieurs (et enseignants-chercheurs intéressés) une version bien documentée de la chaîne de calculs **gmsh + SU2 + Paraview**. Cette documentation n'a pas vocation à être générale : elle doit permettre la prise en main du code puis son application à des cas d'intérêt pour le CLC. En revanche cette documentation doit nécessairement inclure deux volets :

- Guides d'utilisation des différents outils, focalisés sur les opérations clés à effectuer pour produire un maillage, réaliser une simulation, produire un post-traitement. Ces guides doivent inclure des tutoriels illustrant les actions à réaliser sur des cas concrets, de difficulté croissante.
- Guide de bonnes pratiques mettant l'accent sur les choix pertinents en matière de maillage (gmsh) et de choix numériques (SU2) en particulier.

Afin de faciliter la transmission de l'ensemble des informations produites dans le cadre du PE, les guides et tutoriels seront déposés sur le site dédié au projet : https://su2clc.github.io/su2_clc/

4. Méthodologie proposée

La méthodologie de travail doit tenir compte du fait que le PE est constitué d'élèves-ingénieurs de 1A qui n'ont pas d'expérience particulière en matière de simulation d'écoulements. Il a donc été décidé d'organiser le travail en 4 grandes tâches ou Work Packages (WP) :

- **WP2: Réalisation de simulations d'écoulements**
 - Formation aux bases de la CFD
 - Compréhension du fonctionnement des logiciels utilisés
- **WP3: Réalisation de tutoriels**
 - Adaptation/traduction de tutoriels SU2 préexistants, incluant les volets pré-calcul (génération du maillage par gmsh) et post-calcul (visualisation des résultats). Ces tutoriels seront réalisés pour des configurations d'écoulements simples (écoulement non visqueux dans un canal avec bosse, écoulement laminaire stationnaire autour d'un

cylindre, écoulement turbulent stationnaire dans une tuyère ou sur un profil).

- Réalisation de nouveaux tutoriels pour des cas d'intérêt du CLC. Il s'agira de cas plus complexes que les précédents, qui pourront être pris en main sous réserve d'avoir réalisé les tutoriels des cas simples.
- **WP4: Création et alimentation d'un site internet pour le projet regroupant les tutoriels**
 - Création d'une page expliquant le but du projet
 - Création d'une page expliquant comment installer et exécuter les logiciels utiles aux simulations
 - Création d'une page regroupant les tutoriels permettant de réaliser des simulations

On souligne la différence de nature entre WP3 et WP4 : dans WP3 l'accent est mis sur le fond, *i.e.* la production des éléments constitutifs des tutoriels, tandis que dans WP4 l'accent est mis sur la forme, *i.e.* la qualité pédagogique et esthétique des tutoriels.

Ces 3 tâches sont complétées par :

- **WP1: Gestion du projet**

Les sous-tâches identifiées sont la production des livrables du projet autres que ceux du WP4 : rapports pour les RVP (Rendez-Vous de Pilotage), présentations pour ces RVP mais aussi pour les réunions de travail (avec tuteur et commanditaire) ainsi que livrables pour l'évaluation du PE (rapport final et soutenance finale). On peut mentionner ici qu'un espace partagé (par le groupe de PE et son tuteur pédagogique) a été mis en place sur le site Overleaf <https://www.overleaf.com/project/61485fdb9bb7521a9b5ca1b> dès le lancement du PE. Les comptes-rendus de séances de travail sont déposés par le groupe sur ce site. Le rapport final pourra également être produit en utilisant le même site et un modèle de rapport.

5. Décomposition des tâches

WP2 Réalisation de simulations CFD

- **WP2.1 Formation du groupe de PE à la CFD.** Le tuteur pédagogique a prévu de consacrer une partie des séances du PE tout au long de l'année à ce volet "formation", indispensable pour la réalisation de guides de "bonnes pratiques", qui puissent aider les utilisateurs au-delà d'un simple manuel utilisateur pour les 3 logiciels de la chaîne de calcul. Il est prévu que cette sous-tâche démarre à partir du mois de décembre quand le tuteur pédagogique sera disponible.

WP2.2, 2.3, 2.4 Compréhension des logiciels de la chaîne de calcul CFD.

Formation continue (tout au long du projet) nécessaire pour réaliser des simulations de difficulté croissante. Il s'agit de manipuler raisonnablement les différents logiciels (mailleur, solveur, visualisation des données).

WP3. Réalisation de tutoriels

- **WP3.1, 3.2 Traduction / adaptation de tutoriels préexistants sur SU2 :** Il s'agit de reconstruire des tutoriels déjà existants sur quelques cas simples sélectionnés en les adaptant pour les besoins du PE. En particulier, on prendra soin de détailler le volet "génération du maillage" (avec gmsh) et choix de post-traitement et visualisation (avec Paraview), qui sont souvent sous-développés dans les tutoriels existants de SU2.
- **WP3.3, 3.4, 3.5 Réalisation de nouveaux tutoriels pour cas d'intérêt pour CLC.** Il s'agit de comprendre, d'exécuter et d'expliquer à travers des tutoriels comment réaliser des simulations plus complexes qui correspondent à des configurations d'intérêt pour le CLC : simulation de l'écoulement interne avec transfert de chaleur dans une tuyère, simulation de l'écoulement externe autour d'un véhicule sub-orbital. Ces tutoriels plus évolués (qui sont encore à identifier) incluront eux-aussi le volet pré-traitement (maillage) et post-traitement ainsi que les bonnes pratiques associées (critères de construction du maillage, notamment en régime turbulent, vérification et validation d'une simulation, choix des quantités d'intérêt à analyser).

WP4. Création et alimentation du site

- **WP4.1 Présentation du projet :** Création d'une page expliquant le but du projet afin de faciliter la communication vers les promotions à venir d'élèves-ingénieurs mais aussi vers des partenaires du CLC auxquels un accès au site pourrait être ouvert.
- **WP4.2 Guide d'installation des logiciels.** Création d'une page qui explique comment obtenir les logiciels nécessaires pour effectuer les simulations. Elle inclut des liens pour télécharger ces logiciels ainsi qu'une aide à l'installation sous forme de mini tutoriels.
- **WP4.3 Tutoriels.** Création d'une page destinée à abriter les différents tutoriels réalisés par le PE : tutoriels « de base » afin de se former à l'utilisation des différents logiciels (gmsh, SU2, Paraview) sur des écoulements simples et d'autre part tutoriels plus avancés correspondant aux cas d'intérêts du CLC.

La planification des différentes tâches et sous-tâches est détaillée dans la section qui suit.

6. Planification et répartition des tâches

Le tableau ci-dessous récapitule les différentes tâches à réaliser dans le cadre du PE en fournissant également une estimation de durée et le cas échéant un phasage (sous-tâche devant précéder une autre sous-tâche). Ce tableau permet de produire les diagrammes PERT et GANTT présentés et commentés par la suite.

N°	Work Package	Tâche	Sous-tâche	Durée	Antécédent	Etape
1.0	Gestion du projet	Réunions commanditaire		A.E		1 + 2 + 3
1.1		Réus sans commanditaire		A.E		
1.2		Rédaction rendus RVP1		3 semaines		
1.3		Préparation RVP1		2 semaines	1.2	
1.4		Rédaction rendus RVP2		3 semaines	1.3	
1.5		Préparation RVP2		2 semaines	1.4	
1.6		Rédaction rapport		Un mois	1.5	
1.7		Préparation soutenance		2 semaines	1.6	
2.1	Réalisation de simulations CFD	Formation aux bases de la CFD		5 mois		1 + 2 + 3
2.2		Compréhension du fonctionnement des logiciels	GMSH	A.E		1+2+3
2.3			SU2	A.E		1+2+3
2.4			Paraview	A.E		1+2+3
3.1	Réalisation de tutoriels	Traduction / adaptation de tutoriels pre-existants	Traduction brute	3 semaines		1
3.2			Adaptation	2 semaines	3.1	1
3.3		Réalisation de nouveaux tutoriels	Détermination des cas d'intérêts	3 semaines (échange avec CL)		2
3.4			Simulation	1 mois	3.3	2
3.5			Documentation et rédaction des tutoriels	2 semaines	3.4	2+3
4.1	Création d'un site pour le projet	Création d'une page expliquant le but du projet		2 semaines		1
4.2		Création d'une page expliquant comment installer les logiciels utiles aux simulations		3 semaines		1+2
4.3		Création d'une page regroupant les tutoriels permettant de réaliser des simulations		2 semaines	3.4	2+3

Liste étapes :	
1	Formation et premiers éléments pédagogiques
2	Cas tests d'intérêt et leur documentation
3	Améliorations, finalisation, soutenance

Diagramme de GANTT

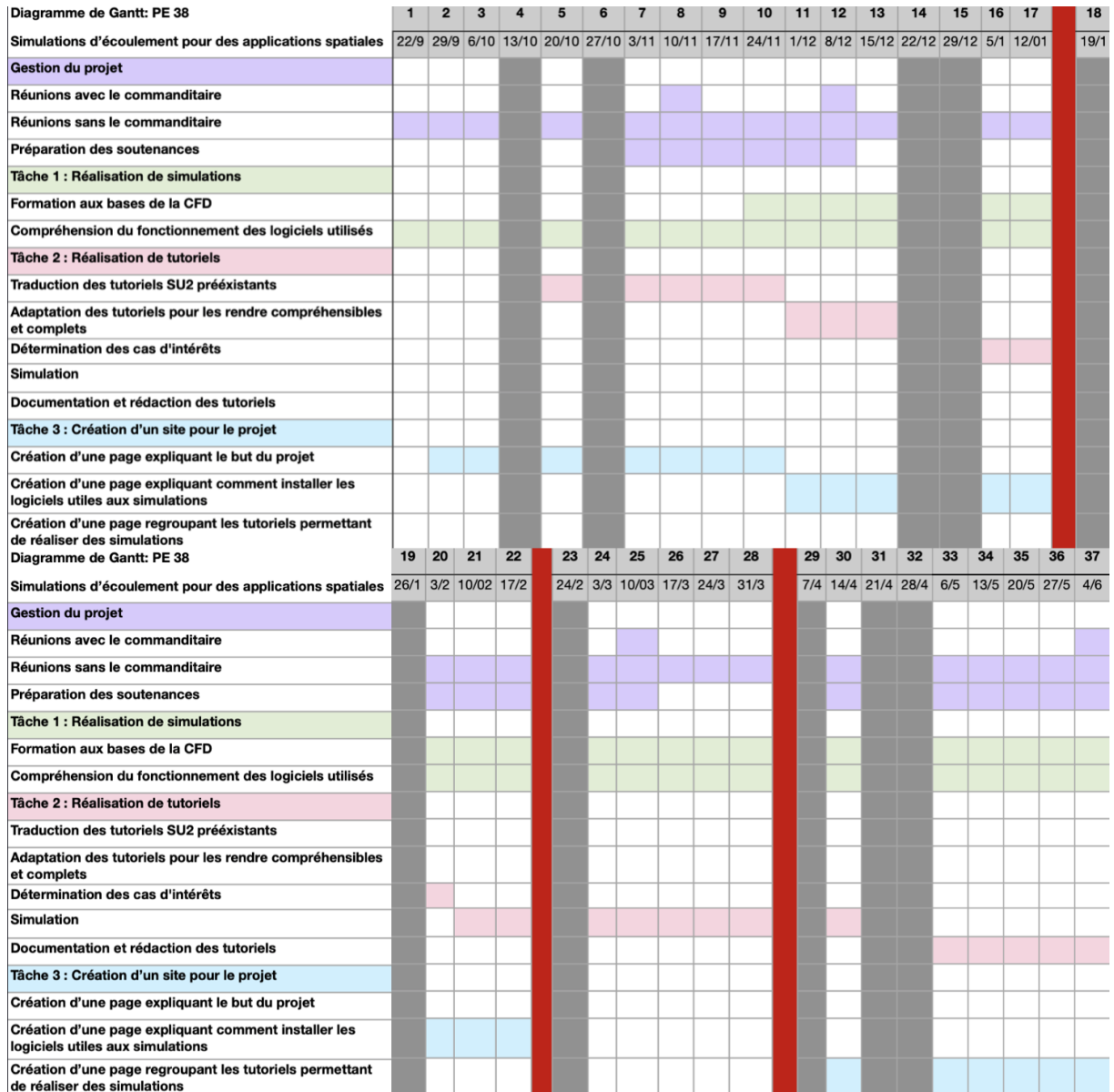
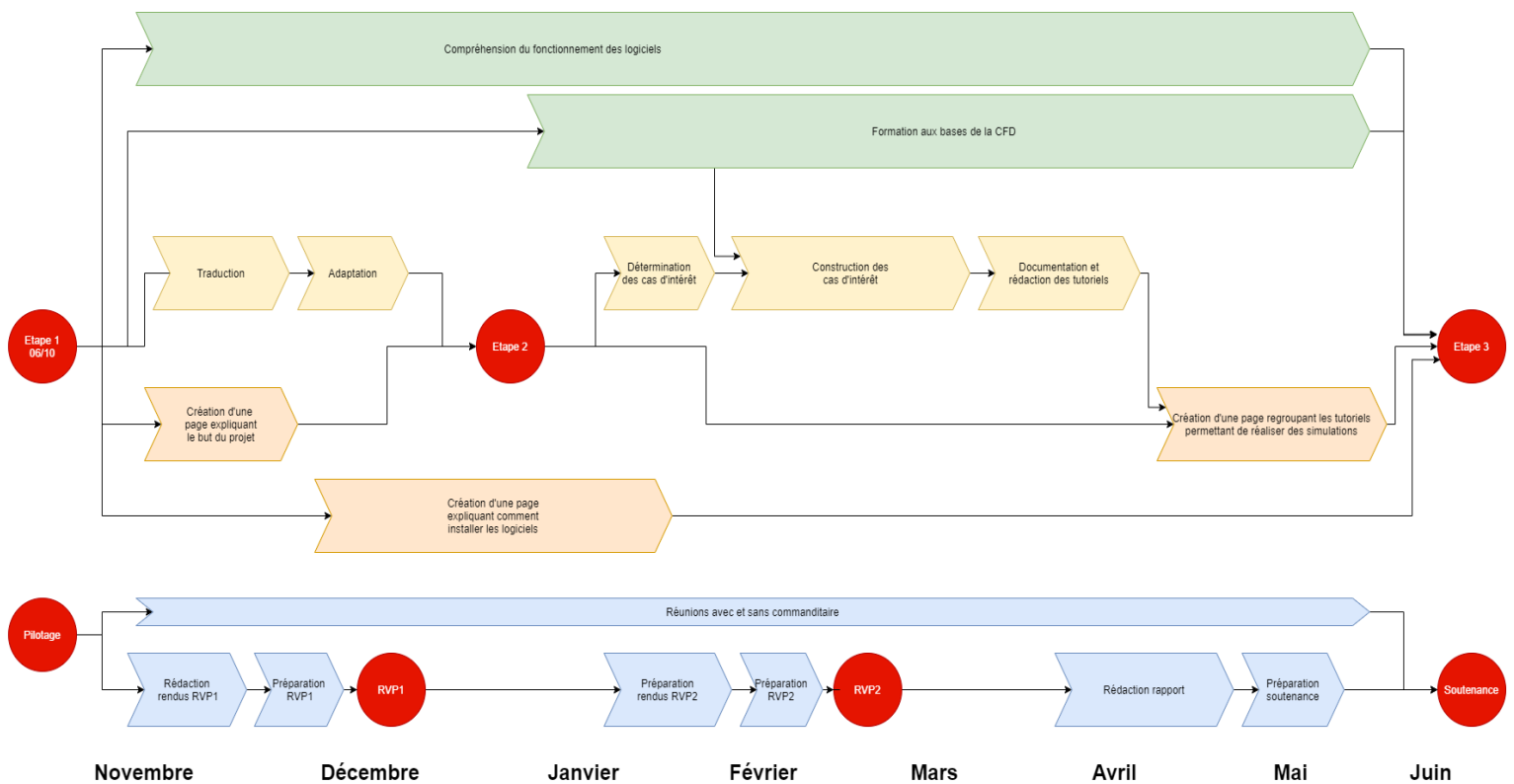


Diagramme de PERT



7. Budget

Le déroulement du PE38 n'induit pas de coût direct puisque seuls des logiciels libres sont utilisés avec un site hébergé gratuitement sur *github*. Il n'y a pas non plus de déplacements (et donc de frais associés) dans le cadre du PE.

Toutefois, plusieurs coûts indirects peuvent être identifiés :

- Réservation d'une salle chaque semaine pendant 4h (coût d'hébergement par le département MFAE)
- Suivi par le tuteur pédagogique : consignes hebdomadaires données depuis le démarrage du PE puis formations CFD à venir (coût de formation)
- Suivi par les conseillers GP et communication (coût de formation)

ANNEXES

Fiche de lancement du projet (1/2)

Fiche d'identité	Titre et éventuel acronyme : Mise en œuvre du logiciel libre de simulations d'écoulements SU2 pour des applications spatiales (SU2_CLC)
	Tuteur ou Commanditaire : Centrale Lyon Cosmos & département MFAE
Contexte	Origine du besoin : Centrale Lyon Cosmos (CLC) fait régulièrement appel à des outils de simulation numérique d'écoulements pour l'analyse de configurations d'intérêt (aérodynamique externe de fusée, aérodynamique interne d'une tuyère propulsive). Les outils généralement utilisés sont issus de la suite commerciale Ansys Workbench bridée pour l'utilisation par des étudiants. En outre, on note également un manque de suivi / de capitalisation des simulations réalisées une année.
	Enjeux : Doter le CLC d'outils de simulation libres (code communautaire SU2, mailleur libre et outil de post-traitement également libre) qui permettront de s'affranchir des limitations associées aux outils commerciaux de simulation d'écoulements. Doter le CLC d'un environnement numérique permettant de conserver d'une année sur l'autre le savoir-faire développé en matière de simulations d'écoulements pour les configurations étudiées (dépôt git, documentation, etc.).
Objectifs	Objectif général : Mise à disposition du CLC d'une chaîne de calcul bien documentée et mise en œuvre avec succès sur un panel de cas-tests d'intérêt (aérodynamique externe / interne).
	Indicateurs mesurables de réussite : Dépôt git documenté (incluant dépôt des cas-tests de référence).
	Nature du livrable principal : chaîne de calcul libre (mailleur / solveur / post-traitement), dépôt git documenté incluant les versions référencées des outils ainsi que la base de données des cas-tests traités.
Périmètre	Acteurs : CLC pour la définition de cas-tests d'intérêt pertinents Groupe de PE pour la réalisation des tâches conduisant à la production des livrables Tuteur pédagogique pour formation aux outils de simulation. Possiblement : communauté SU2
	Ressources : Gmsh3D / SU2 / Paraview pour la chaîne de calculs. Github pour la gestion des dépôts. Mendeley / Zotero pour la gestion des ressources bibliographiques. Overleaf pour la gestion de la documentation pendant le déroulement du projet.
	Environnement et interfaces du projet : Echange avec CLC pour optimiser l'expression du besoin (notamment cas-tests pertinents)
Contraintes	Coûts : Pas de coûts anticipés. Logiciels libres utilisés.
	Délais Jalons intermédiaires à définir lors de l'élaboration du planning :

Fiche de lancement du projet (2/2)

	<ul style="list-style-type: none">- Etape 1 : prise en main + documentation de la chaîne de calcul pour des cas-tests déjà référencés sur le site SU2 mais a priori pertinents pour CLC (par exemple calcul de l'écoulement dans une tuyère)- Etape 2 : réalisation de simulations « modèles » d'intérêt pour le CLC (configurations externes / internes)- Etape 3 : documentation et validation de la pérennité avec commanditaire
	<p>Autres contraintes</p> <p>Réflexion à avoir sur la contrainte de la langue : la communauté SU2 est anglophone. Il pourrait donc être pertinent que toute la documentation produite le soit en anglais. La langue de communication à l'intérieur du PE resterait bien sûr le français.</p>