



**I**NSTITUT **N**ATIONAL DES **S**CIENCES **A**PPLIQUEES

TOULOUSE

**Département de Génie Electrique & Informatique**

**PROJET DE FIN D’ETUDES**

**Spécialité : 5AE**

**Filière : ESPE**

**Stage ingénieur développement en électronique analogique**

|  |  |
| --- | --- |
| *Auteur* : | *Entreprise* : |
| Pannetier Marvyn | Thales |

|  |  |
| --- | --- |
| *Référent INSA* : | *Responsable du stage* : |
| Escriba Christophe | Tremblier Mégane |

Année 2021-2022

# Résumé

Ce rapport a pour but de présenter et décrire le déroulement de mon stage de fin d’études. Celui-ci est divisé en plusieurs sections afin de mieux appréhender les différentes étapes du stage. Dans un premier temps, une description du sujet est faite afin de cerner ces enjeux. Ensuite une partie est dédiée au planning initial et son évolution au cours du stage en fonctions des obstacles rencontrés ou non. La partie suivante, qui est la plus imposante concerne la réalisation du projet divisé en plusieurs étapes tels que la théorie ou simulation, chacune détaillée. Enfin une partie sur les tests et leur résultats suivi d’une conclusion viendrons terminer ce rapport. Après avoir lu ce rapport, le sujet et ses enjeux, les compétences que j’ai développées et mise à dispositions, mes réalisations, mes conclusions sur l’aspect technique comme humain sur cette expérience, seront clairs est connus du lecteur.

# Remerciements

Je tiens tout d’abord à remercier l’Institut National des Sciences Appliquées (INSA) pour m’avoir fait confiance. L’écoute et l’accompagnement dont j’ai bénéficié m’ont permis de trouver rapidement un stage, dans le but d’affiner mon projet professionnel et d’obtenir le diplôme auquel j’aspire depuis plusieurs années.   
  
Je remercie également Thales, qui a cru en mon potentiel et m’a accueilli au sein de ses équipes.

À ce titre, je souhaiterais remercier tout particulièrement madame, Mégane TREMBLIER, Elina FIAWOO ainsi que François ROBERT qui m’ont épaulées et conseillées et qui m’ont aussi transmis leur expertise dans le domaine de l’électronique analogique.

Ce stage m’a permis d’affiner certaines pistes pour bâtir mon projet d’orientation professionnel et signe l’aboutissement de mes études d’ingénieur.

# Table des matières

A (re)-générer (Menu Références -> Tables des Matières -> Insérer une Table des Matières)

Doit commencer sur une page recto

[Résumé ii](#_Toc12653521)

[Remerciements iii](#_Toc12653522)

[Table des matières iv](#_Toc12653523)

[Glossaire v](#_Toc12653524)

[Chapitre 1. Introduction 1](#_Toc12653525)

[Chapitre 2. Cadre et objectifs du stage 2](#_Toc12653526)

[Chapitre 3 et suivants. Réalisations 3](#_Toc12653527)

[Chapitre X. Conclusions et perspectives 4](#_Toc12653528)

[Annexes 4](#_Toc12653529)

[Chapitre Y. Consignes sur la rédaction (Titre niveau 1) 5](#_Toc12653530)

[1.1. Partie 1 (Titre niveau 2) 5](#_Toc12653531)

[1.1.1. Sous partie 1 (titre niveau 3) 5](#_Toc12653532)

[1.1.2. Sous partie 2 (titre niveau 3) 5](#_Toc12653533)

[1.2. Partie 2 (Titre niveau 2) 6](#_Toc12653534)

[Bibliographie 9](#_Toc12653535)

[Liste des Illustrations 10](#_Toc12653536)

# Glossaire

SEC: (Calculateur)

ACS: Alternating Current Signal

VDT: Variable Differential Transformer

ELAC:

FCC: Flight Control Computer

MFU: Multi Functions Unit

# Chapitre 1. Introduction

L’électronique analogique est un domaine vaste très présent dans de nombreux domaines. Le monde de l’aéronautique, étant le secteur d’activité principal de Thales, n’échappe pas à l’électronique analogique. En effet, même si la tendance est de plus en plus à l’utilisation d’électronique numérique, l’analogique reste néanmoins très présent et indispensable au bon fonctionnement des systèmes développés chez Thales.

Ce stage se déroule au sein de l’entité DMS de Thales, une entité plus orientée militaire, et à pour sujet le développement d’un circuit d’électronique analogique. Pour être plus précis, le but de ce stage est de reprendre un circuit existant et utilisé actuellement et concevoir, tester et valider un nouveau circuit analogique réalisant la même fonction tout en optimisant le coût, la surface, la consommation ou encore le rendement. L’aéronautique est un domaine où les circuits développés sont développés pour être fonctionnel plusieurs dizaines d’années, il est donc courant de trouver des cartes électronique développées avant les années 2000 par exemple. Cependant, les technologies ont grandement évolué ces dernières années, ce qui rend ces cartes beaucoup moins performantes sur les points cités précédemment. De plus, écologiquement parlant il est important de réduire les consommations des produits électroniques développés, ce qui donne à ce stage un enjeu plus fort, je trouve.

Au début de mon stage, 2 sujets plus spécifiques m’ont été proposés. Ils vont donc tous deux être présentés en détail dans la suite de ce rapport et le choix d’un d’eux sera justifié ensuite.

# Chapitre 2. Cadre et objectifs du stage

Les sujets qui vont être présenté ci-dessous, ne font pas partie d’un projet particulier mené par Thalès mais s’apparente plus à de la recherche technologique. En effet, la mission qui m’est confiée consiste à concevoir de nouveau circuits électronique pour remplacer les circuits utilisés actuellement et qui ont été conçu il y a plusieurs années. La but étant d’utiliser des technologies plus récente afin de diminuer la surface, le coût, l’efficacité…etc.

## Description des sujets

### 1.1.1. Sujet 1: Générateur de signaux alternatifs à base d’amplificateur de classe D

Le but de ce projet est de développer une nouvelle fonction analogique ACS\*, afin d'améliorer, si possible, la fonction actuelle. En effet, la solution actuelle utilise un amplificateur opérationnel de puissance linéaire et avait par conséquent une consommation et un rendement non optimaux. Environ 35% en considération optimiste en théorie. L'idée est donc de développer un nouveau circuit à l’aide d’un amplificateur de classe D à la place d'un amplificateur opérationnel linéaire, qui pourrait théoriquement avoir une meilleure efficacité. Cependant, certains points pourraient être problématiques, par exemple, le ripple de sortie due aux commutations qui peuvent engendrer des problèmes de CEM (EMI) et rendre ce circuit inutilisable car il ne respecte pas les gabarits d’émissions conduites imposés par les normes.

La fonction ACS est présente dans de nombreux calculateurs pour FCC (Flight Control Computer), car elle permet de stimuler les capteurs xVDT. Ces capteurs, représentés sur la figure 1, permettent de mesurer l'angle ou le mouvement en excitant la bobine primaire et en regardant les signaux de la bobine secondaire.

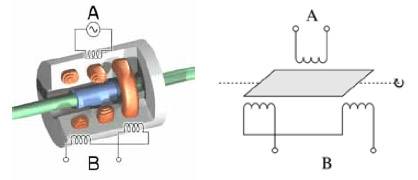


Figure 1: Schéma capteur LVDT

L'amplificateur de classe D sera une partie importante de ce projet. La figure 2, donne une vue globale de son fonctionnement, mais une étude plus spécifique sera faite dans le rapport.



Figure 2: Schéma simplifié d’un amplificateur de classe D

A partir de cette technologie, le but serait de concevoir un circuit générant une sinusoïde ayant une tension RMS imposée par le cahier des charges. De plus les capteurs de type xVDT sont excités par des tensions différentielles, c’est-à-dire que deux sinusoïdes de phases opposées sont appliquées aux bornes des capteurs. Il faut donc concevoir un circuit avec une sortie différentielle. Enfin une partie de ce sujet est axé sur l’asservissement de la tension différentielle au bornes du capteur, il faut donc designer un correcteur PI ou PID afin d’asservir cette tension afin qu’elle soit le plus stable possible.

### 1.1.2. Sujet 2: Solution de substitution à des DAC à l’aide de PWM

Le but de ce sujet est de pouvoir faire remplacer le DAC utilisé dans la conception actuelle par un circuit utilisant un PWM, suivi d'un filtre passe-bas. En jouant sur le duty cycle du PWM ainsi que sur la fréquence de sa porteuse et en utilisant un filtre passe bas on peut en retirer la composante continue. On arrive donc à retrouver le comportement d’un DAC générer notre tension continue à la valeur souhaitée. La Figure ci-dessous donne une idée clair du fonctionnement de ce système. On remarque un lien entre le duty cycle et al tension après filtrage, en commandant le duty cycle on peut donc générer la tension souhaitée en sortie, tout comme un DAC le fait.

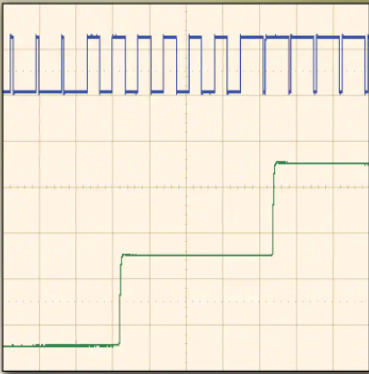


Figure 3 : Lien entre un PWM et le signal après le filtre

Cette solution a déjà fait ses preuves sur plusieurs autres systèmes embarqués et la littérature à son sujet est assez riche et claire. Le but de ce sujet est donc de concevoir un prototype de carte et d'évaluer précisément les gains ou les pertes en consommation, performances, coût et surface utilisée. L'objectif est bien sûr d'optimiser ces points.

En faisant une recherche rapide sur ce sujet, il semble qu'un des enjeux de cette méthode soit de trouver le juste équilibre entre la qualité du filtrage et le temps de réponse du système, selon l'application. En effet, la littérature indique que les filtres passe-bas utilisés sont des filtres d'ordre 1. Augmenter l'ordre de ce filtre rendrait la méthode beaucoup moins intéressante par rapport à la simple utilisation d'un DAC. De plus, réduire la fréquence de coupure du filtre augmentera le temps de réponse du système, mais permettra également d'obtenir un signal de sortie avec moins d'ondulation.

## 1.2. Choix du sujet et détails

Après quelques recherches pour comprendre les projets et leurs enjeux, j'ai décidé de choisir le premier sur la fonction ACS avec des amplificateurs de classe D. En effet, les deux sont très intéressants et pourraient m'apporter beaucoup de compétences, mais la problématique de l'amplificateur classe D avec de la commutation est quelque chose que je trouve vraiment attrayant et dans lequel j'aimerais aller plus loin.

Les deux sujets ont leurs propres particularités. Le second, avec le PWM est quelque chose de plus mature et avec plus de recul, mais les attentes sont par conséquent plus grandes. Cela signifie qu'à la fin du stage un prototype qui montre des améliorations doit être réalisé, alors qu'avec le premier projet le but est plus de déterminer si cette solution peut vraiment fonctionner et être intéressante. Bien sûr, cela ne signifie pas qu'il ne doit pas avoir un prototype complet qui fonctionne correctement à la fin. Dans chaque projet, le but est d'améliorer les solutions actuelles, mais le deuxième projet est un peu plus avancé et donc la problématique et les défis ne sont pas les mêmes.

Pour conclure ce choix, le premier projet a une dimension de challenge que j’apprécie particulièrement, et je suis sûr que j'apprécierai et apprendrai beaucoup en travaillant dessus.

Avant de passer à la suite, il est important de comprendre plus précisément ce qu’est un amplificateur de classe D. Premièrement, le but d'un amplificateur de classe D est d'amplifier la puissance d'un signal, cela signifie que la puissance (P= V\*I) sera plus grand après l’amplificateur qu'avant. Cela peut être fait en augmentant la valeur du courant et/ou de la tension. Si nous revenons à la [Figure 2](#fiure2), nous pouvons identifier plusieurs étapes.

En entrée, il y a deux signaux qui peuvent provenir d’un DAC ou d'un microcontrôleur par exemple. Le premier est le signal que nous voulons amplifier. Les amplificateurs de classe D sont souvent utilisés pour les applications audio pour lesquels le signal d'entrée est donc un signal audio. Pour notre application, ce signal sera une sinusoïde, car nous voulons une sinusoïde en sortie. Le deuxième signal est un signal en dents de scie. En utilisant un comparateur et ces deux signaux, nous pouvons créer un PWM représentant une sinusoïde via ces duty-cycles (SPWM). Ce n'est pas le seul moyen de générer un PWM, il en existe d'autres comme les modulations delta ou delta-sigma, qui permettent de contrôler la stabilité et l'erreur du SPWM, mais sont un peu plus difficiles à mettre en œuvre. La méthode utilisant un comparateur et une dent de scie mettra également les potentiels haut et bas PWM à Vcc et GND, ou Vcc- si l'alimentation est symétrique.



Figure 4: PWM modulation stage

Maintenant qu’un signal PWM est généré, nous pouvons l'utiliser pour contrôler l'étage de sortie avec ses MOSFET. Pour être plus précis cet étage est un demi-pont, les MOSFETS sont allumés et éteints alternativement, pour pousser et tirer le courant vers les potentiels d'alimentation. Le courant du signal sera amplifié dû aux caractéristiques des MOSFET et par conséquent la puissance aussi.



Figure 5: Amplifier stage

Enfin, pour récupérer la sinusoïde, un filtre doit être utilisé. Le filtre peut être un filtre passe-bas pour couper les hautes fréquences et ne garder que le sinus fondamental, mais un filtre passe-bande peut également être utilisé, si nous devons également couper le mode DC, pour supprimer le décalage. Après cette étape, nous avons la sinusoïde que nous voulions



Figure 6: Filter stage

Bien sûr, le fonctionnement du circuit qui va être développé pendant le stage va s’inspirer de ce fonctionnement mais ne va pas lui être identique à 100%. Le choix de l’architecture adapté au stage sera expliqué dans le chapitre 3, en fonction du cahier des charges et de l’objectif du stage.

## 1.3. Les objectifs et compétences

L’objectif fixé au début du stage était de concevoir le circuit décrit ci-dessus, d’estimer son rendement théoriquement ainsi que son coût et la surface qu’il prend, mais aussi de simuler ce circuit à l’aide du logiciel LTspice afin de confirmer la théorie et enfin, si le temps restant suffisait de faire un PCB avec des composants préalablement sélectionnés afin de faire des tests et mesures sur le circuit réel. En parallèle de ça, de la documentation concernant la théorie, mais aussi les simulations et les tests devait être rédigée afin de garder une trace claire de mon stage et réutilisable dans le futur. En résumé, je vais devoir appliquer mes compétences en électronique analogique et numérique, en automatique et informatique embarquées dû à l’asservissement de la tension de sortie expliqué plus tôt dans le rapport. J’ai notamment utiliser des logiciels sur lesquels j’ai été formé lors de mes études à l’INSA, LTspice pour les simulations électroniques, KICAD EDA pour la schématique et le routage MATLAB et Simulink pour les simulations de l’asservissement, STM32CubeIDE pour l’informatique embarquée, mais aussi des sites web tels que Octopart pour la gestion des BOM. De plus, j’ai découvert et me suis formé au logiciel Mathcad, un outil mathématique très puissant et utile.

J’ai réalisé toute ces tâches seul et non dans une équipe particulière, cependant j’ai eu un suivi hebdomadaire tout au long du stage afin de confirmer mes choix, de me réorienter dans la bonne direction si besoin et de me donner des conseils. Ce qui m’a permis d’avoir cette liberté au niveau de mes choix étant donné que je pouvais faire valider ceux-là par des personnes d’expériences et donc être sûr de ne pas m’égarer, mais aussi d’apprendre de leur expérience en discutant avec eux chaque semaine.

Dans la suite nous allons nous attarder sur la partie plus technique de mon stage, dans laquelle je vais détailler les différentes étapes que j’ai eu à traverser tout au long de mon stage.

# Chapitre 3 Réalisation

## 1.1. Planning

Une des premières choses que j'ai faites a été de créer un planning. Pour ce faire j'ai utilisé quelques documents qui présentent un cycle de vie d'un projet en V comme on peut le voir sur la figure 3 ci-dessous.

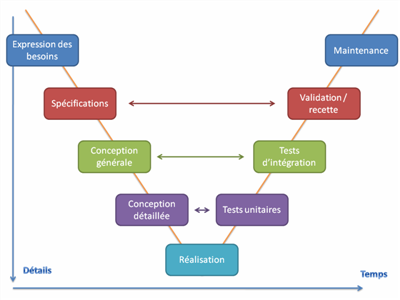


Figure 7 : Schéma du cycle de vie d'un projet

Dans un premier temps, j'ai décidé de faire mon planning au format GANTT. J'ai identifié à partir de la figure 3, les parties globales de ce projet puis j'ai essayé de trouver des sous-parties pour chacune des parties. Ensuite, j'ai estimé le temps pour chaque sous-partie et chaque partie et vérifié s'il était cohérent avec l'équipe qui m'encadrait sur ce projet. Enfin, j'ai obtenu ce que vous pouvez voir sur la figure suivante :

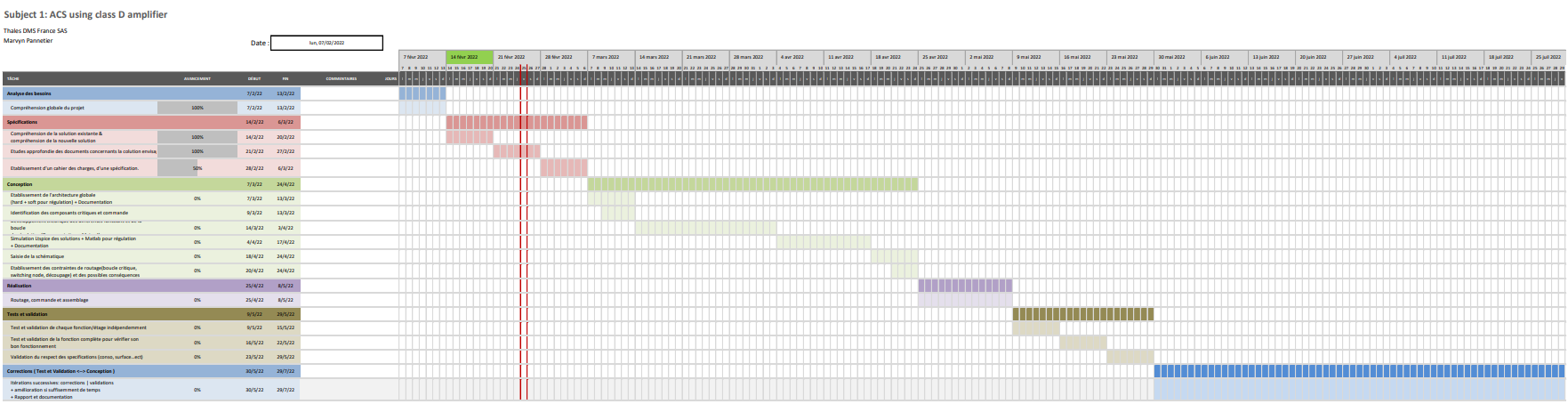


Figure 8: Vue globale du planning

Bien sûr, on ne pas voir grand-chose sur la figure 7, nous allons donc zoomer sur les différentes parties et les détaillées.

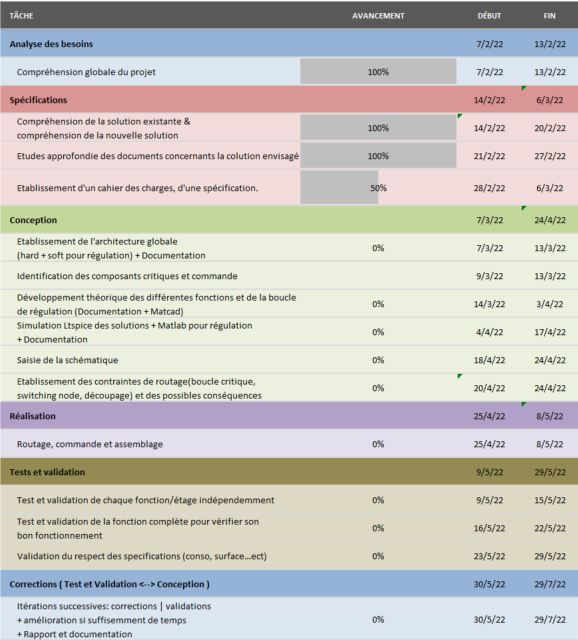


Figure 9: Zoom sur le planning

Sur la figure 5, toutes les parties et sous-parties apparaissent. Vous trouverez ci-dessous une liste des différentes parties et une explication de ce que je ferai à l'intérieur et du temps que j'ai estimé.

1. Analyse des besoins

Cette première partie consiste à appréhender le but du projet et ces enjeux, afin d’être efficace le plus tôt possible.

1. Spécification

Dans cette partie, mon objectif est de comprendre le projet dans sa globalité, d'avoir une première idée des circuits, composants qui seront nécessaires, et de faire des recherches sur les circuits principaux, comme l'amplificateur classe D. De plus, je dois faire un cahier des charges avec des valeurs, des besoins et des attentes claires. Ainsi, j'aurai mes objectifs pour la fin de mon stage.

1. Conception

C'est une partie importante car elle inclut de développer une architecture globale, de trouver des composants critiques, de théoriser et de simuler des solutions, et quand tout cela sera fait correctement, de créer un schéma final et quelques contraintes de routage importantes pour passer à l'étape suivante. Plus facile.

1. Implémentation

L'objectif de cette partie est de prévoir du temps pour acheminer, commander et assembler la carte prototype qui sera utilisée dans les parties suivantes.

1. Tests and validation

Afin de tester correctement le PCB, mon idée est d'abord de tester chaque circuit indépendamment et de les faire fonctionner, puis de tester tous les circuits ensemble pour s'assurer que les fonctions principales fonctionnent. Après cela, l'attention doit être portée sur le cahier des charges, répond-il à toutes les exigences ? Que peut-on encore améliorer ?

1. Corrections

Enfin, ce temps est là pour résoudre les problèmes s'il y en a, pour améliorer certaines choses pour mieux répondre au cahier des charges en revenant à la conception par exemple, mais aussi pour donner une réponse concernant la viabilité de cette solution, si c'est une bonne idée pour les futurs produits ou non. Encore une chose, ce temps servira également à finaliser la documentation et à capitaliser les informations même si cela se fait aussi pendant le reste du stage.

## 1.2. Evolution du planning

Les dates visibles sur la [Figure 9](#figure9) sont celles fixées dès le début du stage. Bien sûr celle-ci ont évolué en fonction des difficultés rencontrées ou non au fur et à mesure. Cette partie a pour but d’expliquer de façon général les changements qu’il y a eu sur ce projet et pourquoi.

Pour commencer, les deux premières parties se sont passé comme prévu et la 3ème partie sur la conception a même pu débuter fin février. Comme expliqué plus haut, ces deux premières parties consiste essentiellement en la compréhension du projet, des objectifs, la création du cahier des charges…etc. J’ai donc eu le temps nécessaire pour faire cela dans le temps que je m’étais fixé au tout début du stage.

Abordons à présent la partie conceptio, qui est sans aucun doute une étape majeur de ce stage.

Etat de l’art, explication des 3 architecture et du choix final

Conception : théorie( filtre(dimmensionnement), demi-pont (nmos pmos, méthode de commande), autom) + simu + automatique + simu

BOM choix des composatns et justification

Schématique, routage + moyen de tests

Total : environ 25-30 pages

A adapter le sens de « réalisations » selon le contexte (cela peut être un état de l’art, un travail de conception, un travail de développement, de validation, de tests, de gestion de projet, ….)

Ne pas forcément tout présenter mais faire en sorte que l’ensemble corresponde à un volume de travail pertinent.

Présentez l’architecture générale du projet sur lequel (ou dans lequel) vous avez travaillé afin de permettre au lecteur d’avoir une vue d’ensemble de votre travail.

Pour chaque réalisation présentée dans le rapport, explicitez les choix techniques effectués, le travail réalisé, le résultat obtenu, les outils utilisés, …

Bien évidemment, vous n’avez pas forcément la liberté de décider des choix techniques lors de votre PFE, mais dans le rapport on vous demande de prendre du recul sur les choix effectués et de fournir votre analyse de ces choix-là.

Ces chapitres de réalisation ne sont pas une « documentation technique » destinée à la société et n’ont pas vocation à être un « manuel utilisateur ».

Le rapport sert aux enseignants INSA à évaluer votre démarche, la prise de recul ou la synthèse que vous effectuez sur votre travail et l’analyse que vous pouvez mener. Les difficultés rencontrées ou les impasses peuvent être analysées dans ce rapport.

# Chapitre X. Conclusions et perspectives

Tout est dans le titre : vos conclusions sur le travail effectué dans ce stage, sur le projet, les perspectives éventuelles qui en découlent.

Un petit bilan :

* Conclusion sur le stage réalisé et sur les suites éventuelles de ce stage pour la société ou pour le laboratoire
* Ce que vous avez apporté pour la réalisation de ce sujet de stage
* Ce que ce stage vous a apporté (approfondissement, complément par rapport à votre formation INSA, par rapport à votre projet professionnel)

Environ 1 à 2 pages

# Annexes

Présentation de la société :

* Secteur ; cœur de métier ; types d’entreprise ; …..
* Nombre de salariés ; localisation ; …..

Et toute autre annexe que vous jugez utile

# Chapitre Y. Consignes sur la rédaction (Titre niveau 1)

Attention : chaque chapitre doit commencer sur une page recto !

## Partie 1 (Titre niveau 2)

### Sous partie 1 (titre niveau 3)

Ce modèle définit des styles pour les titres (niveau 1 à 4), pour le texte (Normal en police Garamond 12), pour les légendes de figures ou de tableaux, les tables des matières, des illustrations ou des tableaux. Vous devez impérativement respecter ces styles même si vous ne les trouvez pas à votre gout.

Si vous préférez utilisez latex pour écrire votre rapport, il n’y a pas de difficulté. Utilisez dans le cas le modèle envoyé..

Si le rapport est confidentiel, pensez à le mentionner sur la page de garde. Il est inutile de le rajouter sur chaque page du document.

Le nombre de pages attendu pour le rapport de stage est compris entre 40 et 50 pages (annexes non comprise, sauf cas particuliers d’étudiants en double diplôme).

Une attention particulière doit être portée aux respects des règles de grammaire et d’orthographe. Les éditeurs disposent de correcteurs, utilisez-les et faites-vous relire si besoin.

### Sous partie 2 (titre niveau 3)

Ceci est une phrase. Ceci est une phrase. Ceci est une phrase. Ceci est une phrase. Ceci est une phrase. Ceci est une phrase. Ceci est une phrase. Ceci est une phrase.

Ceci est une phrase. Ceci est une phrase. Ceci est une phrase. Ceci est une phrase. Ceci est une phrase. Ceci est une phrase. Ceci est une phrase. Ceci est une phrase.

Maintenant on a des choses à dire.

#### Sous sous partie. (titre niveau 4).

Ceci n’est rien

#### Sous sous partie. (titre niveau 4).

Toujours rien

## Partie 2 (Titre niveau 2)

Ne pas oublier de référencer les figures dans le texte et de donner une légende à chaque figure.

Exemple : Sur la Figure 1, deux moutons dans un pré nous regardent, un petit et un grand.



Figure 10. Ceci est un mouton

Pour générer automatiquement la liste des figures, aller dans le menu Références, puis Insérer une légende

Ne pas oublier de référencer les tableaux dans le texte et de donner une légende à chaque tableau.

Faire de même pour les tableaux comme ci-après.

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
|  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |

Tableau 1. Les jolis nombres

Pour faire des items :

* Voilà le premier item
* Et maintenant le second
* Et ainsi de suite

Et des listes numérotées

1. Premier item
2. Et le second
3. Et encore un autre

# Bibliographie

Doit commencer sur une page recto

# Liste des Illustrations

Doit commencer sur une page recto

[Figure 1. Ceci est un mouton 1](#_Toc397721280)