



Améliorations d'un simulateur de catenaire ferroviaire à but pédagogique, dans le cadre d'une pré-industrialisation

Floréal Trinidad

► To cite this version:

Floréal Trinidad. Améliorations d'un simulateur de catenaire ferroviaire à but pédagogique, dans le cadre d'une pré-industrialisation. Génie mécanique [physics.class-ph]. 2014. dumas-01377583

HAL Id: dumas-01377583

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-01377583>

Submitted on 7 Oct 2016

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

CONSERVATOIRE NATIONAL DES ARTS ET METIERS

CENTRE REGIONAL ASSOCIE D'ORLEANS

MEMOIRE

Présenté en vue d'obtenir

Le DIPLOME D'INGENIEUR CNAM

SPECIALITE : MECANIQUE

Par

FLOREAL TRINIDAD

**AMELIORATIONS D'UN SIMULATEUR DE CATENAIRE FERROVIAIRE A BUT PEDAGOGIQUE,
DANS LE CADRE D'UNE PRE-INDUSTRIALISATION.**

Soutenu le 05 novembre 2014

JURY

PRESIDENT : Georges VENIZELOS, Maître de Conférence et Responsable de l'équipe pédagogique Systèmes Mécaniques du département ISME de l'école SIT1 au CNAM.

MEMBRES :

-Gérard WOLLENSACK, Directeur Pédagogique et Scientifique au CNAM Région Centre.

-Yann CHAMAILLARD, Maître de conférences de l'université d'Orléans.

-Guillaume COLIN, Maître de conférences de l'université d'Orléans.

Dominique NELSON GRUEL, Maître de conférences de l'université d'Orléans.

AMELIORATIONS D'UN SIMULATEUR DE CATENAIRE FERROVIAIRE A BUT PEDAGOGIQUE, DANS LE CADRE D'UNE PRE-INDUSTRIALISATION.

Mémoire d'ingénieur CNAM – Orléans, juin 2014.

RESUME :

L'objectif de cette étude, est d'apporter une vision industrielle à un simulateur de caténaire ferroviaire, dont le but premier est pédagogique. Pour cela, une description détaillée du simulateur sera effectuée, et à partir de l'existant, d'envisager des pistes d'améliorations possibles. Une fois ces pistes établies, elles seront, dans la mesure du possible, réalisées directement, ou à défaut, décrites de façon à constituer les axes de développements futurs de cette machine.

A travers cette étude, les différences entre les visions expérimentales, propres aux laboratoires, et les visions propres aux entreprises seront mises en évidence, pour paradoxalement, nous démontrer les liens nécessaires entre ces deux approches dans l'élaboration d'un projet.

Mots clés : Sécurité, fiabilité, régulation, industrie, structure mécanique.

ABSTRACT :

The objective of this study is to present the evolution of a catenary simulator, from a pedagogical target/objective, toward more industrial applications. For that, a detailed description of the simulator will be done and the different components and functioning principles will be presented. This data will offer directions of development for orienting this simulator toward technical issues specific to transport industry. The final target of this work is to propose answers closer to reality.

In this study, the differences between the experimental approaches, specific to laboratories and the those specific to industrial companies, will be presented in order to, paradoxically, demonstrate the necessary relationship between them in the development of a project.

Keywords: Security, fiability, régulation, industry, mechanical structure.

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier vivement l'ensemble du corps enseignant de la filière Mécanique du CNAM, pour toute l'aide qu'ils m'ont accordé durant ces 15 années parmi eux.

Je remercie plus particulièrement Mr Alain LETOURNEUX et Mr Christian DECOLON, tous deux enseignants de mécanique au CNAM, pour leurs compétences et la gentillesse dont ils ont constamment fait preuve avec moi.

J'ai une pensée émue pour Mr MASSON, enseignant en mathématique, grâce à qui toute mon aventure au CNAM a commencé.

Enfin, je remercie très chaleureusement Mr Gérard WOLLENSACK, directeur pédagogique et scientifique au CNAM en région Centre, pour la patience et la disponibilité qu'il m'a accordé tout au long de son enseignement, mais aussi pour toutes les valeurs humaines qu'il détient. Sans sa présence et son soutien, mon aventure au CNAM aurait été infiniment moins riche.

Mes remerciements vont aussi à Mme Valérie CHAMBERLAIN, inspectrice au CARSAT du Loiret, pour son amabilité et tous ses précieux conseils.

Je tiens à remercier les membres du laboratoire PRISME, et plus particulièrement Yann CHAMAILLARD, Guillaume COLIN, et Dominique NELSON tous trois enseignants chercheurs, pour m'avoir accueilli au sein de leur équipe et m'avoir confié le sujet du présent mémoire.

Mes remerciements s'adressent aussi à Mr Benoît BELLICAUD et Mr Toum BOUM CAM, tous deux techniciens et futurs ingénieurs chez PRISME, pour tout l'appui technique et toute la disponibilité dont ils ont su faire preuve pour m'aider sur l'aspect pratique du sujet.

Il me reste enfin à remercier les membres de ma famille, je pense ainsi à mes enfants, qui ont eu la bonne idée de ne pas trop perturber mes courtes nuits de façon à rendre ces derniers mois moins fatigants, et à Céline MATEOS, ma femme, qui n'a jamais douté du bien fondé de ma démarche au CNAM et n'a cessé de me soutenir pendant toutes ces années.

Sommaire

RESUME :	2
REMERCIEMENTS	3
Liste des figures.....	6
Notations et abréviations.....	8
1. Introduction générale.....	9
1.1. L'école d'ingénieur polytech d'Orléans	9
1.2. Le laboratoire PRISME	10
1.2 .1. Le pôle F2ME	12
1.2.2. Le pôle IRAuS.....	13
1.2.3. Lien entre les deux pôles	14
2. Présentation de la problématique :	15
2.1. Les phénomènes limitants la vitesse des trains.....	15
2.2. La solution envisagée	17
2.3. Une problématique réelle difficile à résoudre.....	18
2.4. Conclusion	18
3. Objet de l'étude	19
3.1. Contexte de l'étude	19
3.2. Présentation du simulateur de caténaire	19
3.3. Fonctionnement général du simulateur.	20
3.4 Type de régulation utilisée par le simulateur:	22
4. Du prototype à la machine industrielle	26
4.1. Pourquoi modifier le simulateur.....	26
4.2. Cadre des modifications	26
4.3. Présentation de la norme	27
4.4 Cahier des charges	27
5. Critique des éléments existants	28
5.1. Introduction :	28
5.2. La pompe hydraulique :	28
5.3. Le joncteur/disjoncteur à accumulateur.....	31
5.4. Fiabilité des composants.	34
5.5 Mesures de bruit :	37

6. Bilan général.....	39
7. Les améliorations du simulateur de caténaire	40
7.1. Introduction	40
7.2. L'évaluation des risques	41
7.2.1. L'implication de tous	42
7.2.2 : Identification et classification des risques	45
7.2.3. Liens qui unissent l'implication des personnes à l'analyse des risques	47
7.2.4. Critique de la méthode d'analyse des risques	48
7.2.5. Description du « scénario à risque » propre au simulateur de caténaire	50
7.3. Conclusion sur l'analyse des risques.....	53
8. Propositions de voies d'amélioration	54
8.1 Critique des améliorations envisagées	56
8.1.1. Critiques du groupe hydraulique	56
8.1.2. Critique de la partie électrique	57
9. Validation du portique et compatibilité avec le groupe autorégulé	58
9.1. Méthode dite des « déformée »	59
9.2. Méthode discrétisée.....	66
9.3. Comparaison des résultats	76
9.4.Conclusion sur les calculs :	78
10. Bilan final et Perspectives :.....	79
11. Conclusion	81
12. Bibliographie	82
ANNEXE 1	83
ANNEXE 2	91
ANNEXE 3	114

Liste des figures.

Fig.1 : Logo de l'école POLYTECH d'Orléans.	9
Fig.2 : Logo du laboratoire PRISME	10
Fig.3 : Visualisation d'explosion dans un moteur à chambre transparente	12
Fig.4 : Caméra haute vitesse (20000 images/s).	13
Fig.5 : Schématisation du « mur de la caténaire ».	15
Fig.6 : Alignement d'une caténaire par pendule.	16
Fig.7 : Vue d'ensemble du simulateur de caténaire.	19
Fig.8 : Simulation d'une caténaire de train.	20
Fig.9 : Schéma général du simulateur.	21
Fig.10 : Schéma de régulation du simulateur.	22
Fig.11 : Schéma type d'une régulation par fonction PID en boucle fermée.	23
Fig.12 : Comportement d'un système correctement régulé par PID.	24
Fig.13 : Logo de la norme ISO 9000 recherchée par le laboratoire.	26
Fig.14 : Schéma d'une pompe hydraulique axiale simple.	29
Fig.15 : Pompe régulée par plateau inclinable.	30
Fig.16 : Conjoncteur/disjoncteur à accumulateur.	31
Fig.17 : Schéma de fonctionnement d'un CDA.	32
Fig.18 : Coupe d'un accumulateur à gaz.	33
Fig.19 : Comparaison des taux de défaillance des principaux éléments.	35
Fig.20 : Dispositions réglementaires liées au bruit (source INRS).	38
Fig.21 : Grille DIGEST représentant l'implication du laboratoire en matière de sécurité.	43
Fig.22 : Exemple de livret d'accueil diffusé en milieu industriel.	44
Fig.23 : AMDEC réalisée à la suite du questionnaire de certification.	46
Fig.24 : L'enchaînement qui provoque un accident imprévisible.	50

Fig.25 : Exemple de groupe hydraulique autorégulé.	54
Fig.26 : Structure étudiée, représentée sous CATIA.	58
Fig.27 : Représentation du problème.	59
Fig.28 : Etude de la poutre OA.	60
Fig.29 : Diagrammes des efforts axiaux et des moments de flexion.	61
Fig.30 : Etude de la poutre AB.	63
Fig.31 : Diagrammes des efforts tranchants et des moments de flexion.	64
Fig.32 : Représentation des contraintes de la poutre 1.	77
Fig.33 : Représentation des contraintes de la poutre 2.	78

Notations et abréviations.

AMDEC : Analyse des Modes de Défaillance de leurs Effets et de leurs criticités.

BRGM : Bureau de Recherche Géologique et Minière.

CDA : Conjoncteur/Disjoncteur à Accumulateur.

CNRS : Centre National de la Recherche Scientifique.

F2ME : Fluide Mécanique Matériaux Energétique.

INRS : institut national de recherche et de sécurité.

IRAUS : Image Robotique Automatique et Signal.

LHM : Liquide Hydraulique Minéral.

MTBF : Moyenne des Temps de Bon Fonctionnement.

PID : Proportionnel, intégral, dérivé.

PSA : Peugeot Société Anonyme.

1. Introduction générale

1.1. L'école d'ingénieur polytech d'Orléans



Fig.1 : Logo de l'école POLYTECH d'Orléans.

Fondée en 2004, par la fusion de L'ESEM (Ecole Supérieure de l'Energie et des Matériaux) et de l'ESPEO (Ecole Supérieure des Procédés Electroniques et optiques), l'école polytechnique de l'université d'Orléans (dite POLYTECH Orléans) est l'école d'ingénieur de l'université d'Orléans. Elle est matériellement présente sur le campus de l'université, côtoyant ainsi les autres facultés.

POLYTECH Orléans fait partie du réseau POLYTECH, qui regroupe 13 écoles (Nice, Paris, Annecy-Chambéry, Nantes, Clermont-Ferrand, Lille, Marseille, Montpellier, Tours, Grenoble, Paris sud). L'école est accréditée par la Commission des Titres d'Ingénieurs (CTI), et est également membre de la Conférence des Grandes Ecoles (CGE).

L'école dispense un enseignement dans les 5 spécialités suivantes :

- -Génie civil et géo-environnement.
- -Ecotechnologies électroniques et optiques.
- -Mécanique, énergétique, matériaux, mécatronique.
- -Management de la production.
- -Intelligence du bâtiment.

En plus de ces enseignements, les élèves ingénieurs reçoivent aussi des cours de langues et de communication, qui couplés avec des partenariats d'entreprises (CNRS, BRGM, PSA, etc.) et des échanges avec des écoles étrangères, favorisent l'acquisition d'expériences et de compétences.

1.2. Le laboratoire PRISME



Fig. 2 : Logo du laboratoire PRISME.

Le laboratoire PRISME (laboratoire Pluridisciplinaire de Recherche en Ingénierie des Systèmes, Mécanique, Énergétique) est un des 6 laboratoires qui constituent l'outil de recherche de POLYTECH Orléans. Composé d'un effectif de 180 personnes environ (102 enseignants-chercheurs, 70 doctorants et post-doctorants, 8 ingénieurs techniciens et administratifs), et dirigé par Mr Azeddine KOURTAT, il se situe à proximité d'autres laboratoires (une trentaine au total) qui eux appartiennent, ou sont associés, aux entreprises situées près du campus universitaire. Parmi ces entreprises, nous pouvons citer de grands groupes comme, TOTAL, THALES, Lyonnaise des Eaux, ou des instituts à caractère plus scientifiques tels que l'INRA, le BRGM, le CNRS etc. Bien évidemment, tous ces laboratoires sont « connectés » entre eux, et s'appuie sur l'expérience et les compétences des uns et des autres pour faire avancer leurs recherches.

Polytech Orléans, et donc l'université l'Orléans, par le biais de ses 6 laboratoires, se trouve particulièrement bien doté en matière de recherche. En mettant l'accent sur la pluridisciplinarité et les « éco-recherches », Polytech Orléans se place dans un contexte favorable à ce qui semble être les défis technique futurs.

Les 5 autres laboratoires associés à Polytech Orléans sont :

- Le GREMI : Groupe de Recherche sur les Milieux Ionisés.
- Le CRMD : Centre de Recherche sur la Matière Divisée.
- L'ISTO : Institut des Sciences de la Terre d'Orléans.
- Le CEMHTI : laboratoire des Conditions Extrêmes et Matériaux Hautes Températures et irradiations.
- ICARE : Institut de Combustion Aérodynamiques Réactivité et Environnement.

Ce travail a été effectué dans l'enceinte du laboratoire PRISME, aussi il sera décrit de façon plus poussée.

Labellisé par le ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche (UPRES n°4229), PRISME est un laboratoire à vocation pluridisciplinaire dans le domaine des sciences pour l'ingénieur. Il s'articule autour de deux plateformes distinctes :

- le pôle Fluide Mécanique Matériaux Energétique (**F2ME**).
- le pôle Image Robotique Automatique et Signal (**IRAuS**).

Le domaine d'étude de PRISME, est la recherche appliquée, qui rappelons-le, ne visent pas à obtenir des connaissances nouvelles (les bases de nouvelles théories ne seront pas jetées), mais à exploiter nos connaissances actuelles de façon à pouvoir cerner, puis maîtriser les phénomènes du domaine de l'ingénierie. Il en découle des domaines d'applications nouveaux, qui nécessitent que PRISME, utilise ses moyens humains et techniques, et souvent d'autres compétences dites transverses, de façon faire évoluer le panorama technologique existant.

La différence entre les pôles F2ME et IRAuS, qui composent PRISME peut se décrire simplement. Bien qu'œuvrant dans un même but, les deux pôles se différencient du fait que F2ME obtient des données ou observe des phénomènes par le biais de ses équipements (des cliquetis dans un moteur, par exemple), F2ME génère donc une cause et en observe les conséquences ; tandis qu'IRAuS se penche sur les moyens à entreprendre pour tenter de gérer le phénomène observé (gestion automatique du point d'injection, dans le cas des cliquetis). Les résultats sont mis en commun, pour au final, maîtriser le phénomène.

Il va sans dire qu'en fonction des observations, les solutions à mettre en œuvre parallèlement, peuvent sortir du domaine de compétence de PRISME, donc chacun peut comprendre l'importance des partenariats entre laboratoires, d'où découlera un réseau dense de compétences susceptibles d'être utilisées par tous.

Il est important de noter que PRISME possède une antenne située au cœur de l'Ecole Nationale Supérieure de BOURGES (ENSI BOURGES), plus spécialisée dans la maîtrise des risques industriels (MRI), et la sécurité des technologies informatiques (STI). Cette antenne veille à l'analyse et à la gestion des risques générés par la recherche, et dans ce domaine, le champ d'étude est vaste. Associés aux risques évidents, et pour lesquels tout le monde devient de plus en plus sensible (l'exemple type est le risque environnemental), l'ENSI s'attache à décrire les situations, les machines, les produits ou encore les gestes, qui peuvent en se combinant, devenir des sources potentielles de risque.

1.2 .1. Le pôle F2ME

Le pôle F2ME axe ses actions de recherche autour des 6 thématiques suivantes :

- -Ecoulement des systèmes aérodynamiques.
- -Energie, combustion et moteurs.
- -Combustion et explosion.
- -Dynamique des matériaux et des structures.
- -Mécanique des matériaux hétérogènes.
- -Génie civil.

Les chercheurs du pôle F2ME disposent pour leurs recherches d'équipements de premier ordre, ainsi le laboratoire est, entre autre, équipé d'une soufflerie (dite soufflerie Malavart) et d'un parc de 11 bancs d'essai moteur, permettant de simuler des situations critiques ou inhabituelles. Ces équipements permettent donc l'observation et la reproduction de phénomènes, qui peuvent perturber ou améliorer un fonctionnement. L'ajout d'un paramètre nouveau, contraint un système à fonctionner de façon inattendue, et donc de s'approcher de ses limites de fonctionnement, les chercheurs tâchent dès lors de repousser ces limites de façon à élargir le champ de fonctionnement du système, et donc de l'améliorer.

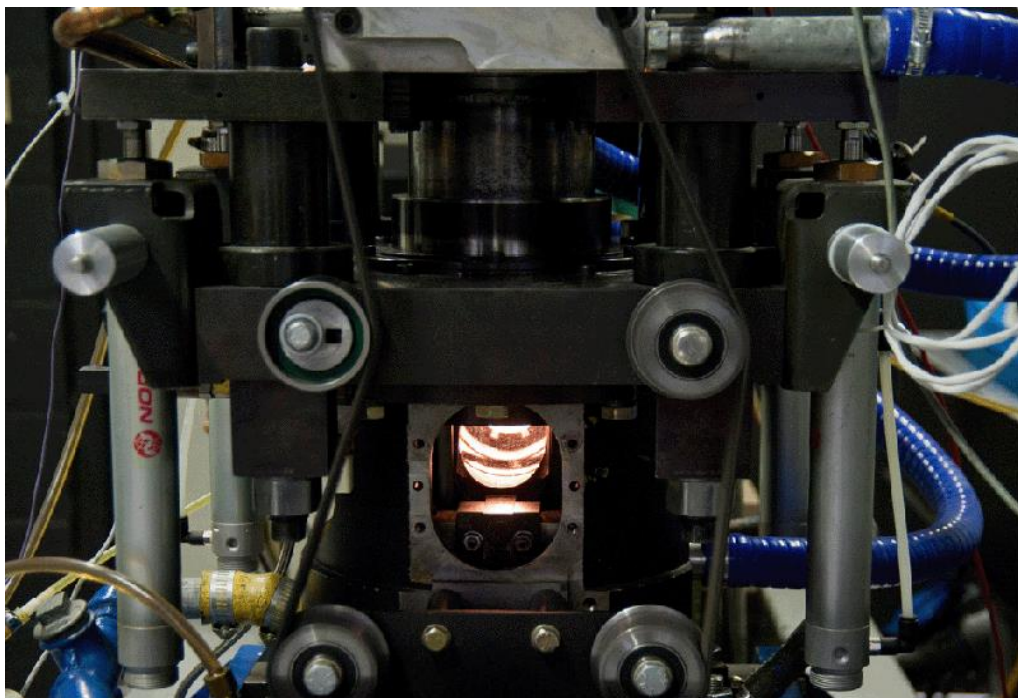


Fig.3 : Visualisation d'explosion dans un moteur à chambre transparente.

1.2.2. Le pôle IRAuS

IRAuS (Image Robotique Automatisme et Signal), est le pôle qui traite les signaux. Cette dénomination est vaste, et montre à elle seule l'extrême variété de la tâche qui incombe aux chercheurs de ce pôle. En simplifiant, on peut dire qu'IRAuS développe ses actions de recherche autour des axes suivants :

- -Image et vision.
- -Traitement du signal.
- -Robotique.
- Automatique.

Sans détailler les axes de recherche listés ci-dessus, il est facile de voir que ceux-ci trouvent des champs d'applications immenses. Nos sociétés sont maintenant, littéralement envahies par des capteurs qui détectent l'image, le son, le mouvement, la présence, la vitesse, bref tous les paramètres qui régissent les machines et les systèmes créés. Les machines les plus anciennes ayant simplement l'homme pour tout automatisme.

Bien sûr, la technologie étant plus avancée au fil du temps, les cinq sens humain ne suffisent plus pour observer et capter des paramètres, qui en parallèle donneront aussi une information plus fine et plus complexe à décrire. C'est là toute la mission d'IRAuS, pouvoir récolter l'information, en créant le système qui comporte la technologie adéquate à ce qui doit être mesuré, et interpréter cette information de façon à en décrire les caractéristiques et éventuellement en émettre des extrapolations.



Fig.4 : Caméra haute vitesse (20000 images/s).

1.2.3. Lien entre les deux pôles

PRISME, ayant pour vocation de travailler de façon pluridisciplinaire, voit ses compétences augmentées du fait de la complémentarité de ses pôles F2ME et IRAuS. Cette complémentarité s'explique naturellement non pas par la nécessité de créer et/ou de faire évoluer les techniques (cette mission est d'ailleurs communes à tous les laboratoires de recherche), mais par la technicité qu'il convient de déployer pour pouvoir, aujourd'hui, développer une recherche.

A l'image de nombreux domaines, l'ingénierie ne se cantonne pas à des domaines cloisonnés, sans rapport les uns avec les autres, et dont les applications constituent la finalité des recherches. Les techniques évoluent conjointement, et nul ne peut prétendre aujourd'hui, posséder toutes les connaissances propres dans un domaine. Aussi, le monde de la recherche évoluant de la même façon, travaille en développant des équipes constituées de spécialistes divers. L'efficacité de ces équipes est autant due aux compétences intrinsèques de ses membres, qu'au panel diversifié de leurs compétences, et si l'objet de recherche peut-être parfaitement ciblé et défini, l'aboutissement et l'obtention de résultats seront directement dictés par l'aptitude des équipes à déployer des ressources aussi larges que profondes.

PRISME évolue dans le schéma précédemment décrit, et dès lors, les liens qui rattachent F2ME et IRAuS deviennent évidents. Les recherches entreprises chez F2ME, et qui sont plutôt orientées vers les énergies et les matériaux, n'ont que peu de chance d'aboutir sans l'aide d'IRAuS, qui lui captera les données qui décriront les phénomènes. Inversement, IRAuS ne peut prétendre à la paternité d'un capteur quelconque, que s'il a été physiquement testé dans un système conçu très souvent, et de façon spécifique, chez F2ME. Ce mode de travail implique non seulement une relation constante entre les deux pôles, mais aussi une analyse conjointe des résultats avant validation.

Les liens qui viennent d'être décrits, ne sont cependant pas suffisants pour palier à l'extrême diversité des besoins en matière de recherche. Un exemple peut-être donné par une recherche récente, visant à développer une prothèse médicale, ou une partie des compétences techniques ont été apportées par PRISME, mais qui a nécessité l'intervention de médecins, de biomécaniciens, et d'entreprises d'usinage spécialisées, pour aboutir. A l'image de cet exemple, il semble évident pour les chercheurs de sortir de leurs laboratoires non seulement parce que certains sujets d'études le nécessitent, mais aussi pour pouvoir tisser et utiliser les réseaux nécessaires à ces études. Inscrit dans cette logique, PRISME s'engage dans des actions de partenariat aux côtés de grands groupes scientifiques, et d'entreprises, dont les besoins en compétences sont constants. Les résultats des recherches sont généralement publiés, et contribuent à l'évolution des réseaux de travail.

2. Présentation de la problématique :

2.1. Les phénomènes limitants la vitesse des trains

Disposant, pour la plupart, de moteurs électriques, les locomotives modernes nécessitent de disposer d'une source de courant. Chaque train circulant sur sa propre voie (il faudrait plutôt dire un tronçon de voie), celle-ci dispose d'une « rallonge » électrique appelée caténaire, constituée d'un câble conducteur d'électricité. La caténaire étant suspendue au-dessus des locomotives, celles-ci sont dotées d'un dispositif appelé pantographe, qui vient « gratter » la caténaire, et établit la liaison électrique entre le consommateur de courant (la locomotive), et la source de courant (la caténaire). Ce système d'alimentation, est très répandu et parfaitement visible sur quasiment toutes les voies ferrées du réseau national [1].

Du fait de sa disposition aérienne, la caténaire est accrochée à des poteaux (appelés piédroits dans le milieu ferroviaire), distant de 50 mètres dans le cas des lignes à haute vitesse (63 mètres sur les lignes standards). De par son propre poids, le fil décrit des vagues dont les flèches sont maximales à mi-distance entre chaque poteau. Cette succession de vague, impose au pantographe, qui lui est fixe, de soulever la caténaire entre les poteaux (flèche maxi de la caténaire) et parfois de ne plus être en contact avec celle-ci au niveau des poteaux.

Deux problèmes majeurs se posent alors :

1. Le contact entre l'archet du pantographe et la caténaire, crée une onde qui se déplace le long de la caténaire à une certaine vitesse (environ 500 km/h). Lorsque le train approche cette vitesse, il « rattrape » l'onde qui forme une vague juste au-devant du pantographe et qui soulève la caténaire, privant le véhicule moteur d'énergie. Le train butte sur ce phénomène appelé « mur de la caténaire », et qui n'a pas été dépassé à ce jour [1] [2].

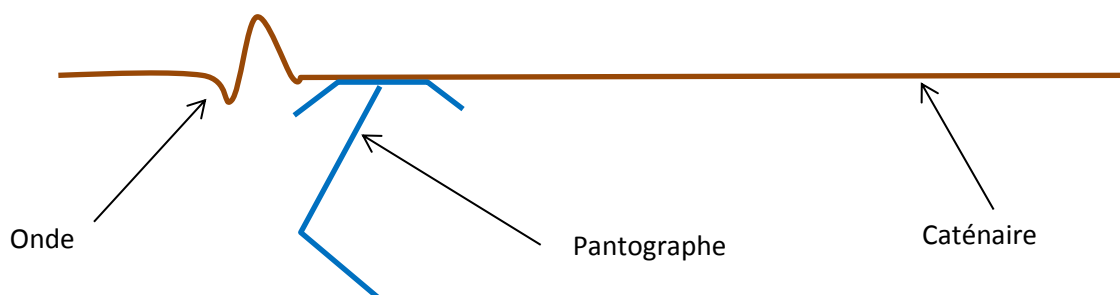


Fig.5. Schématisation du « mur de la caténaire ».

2. A des vitesses plus réduites, ce problème de mur n'est pas rencontré, mais il convient néanmoins d'aligner parfaitement la caténaire, de façon à éviter « l'effet vague » qui apparaît entre les poteaux. Cet alignement est obtenu en plaçant un câble de soutien sous lequel sera suspendue la caténaire. C'est ce câble qui ondulera en lieu et place de la caténaire, l'alignement de celle-ci étant obtenu par pendules à l'image des ponts suspendus, mais cela oblige la compagnie de transport à placer une infrastructure lourde et onéreuse, pour sa mise en place.

L'alignement vertical imparfait de la caténaire, induit des pertes de contact avec le pantographe. Cela se traduit par la génération d'arcs électriques préjudiciables pour les moteurs des trains, ainsi que pour la caténaire elle-même, les arcs électriques provoquant une usure prononcée du couple pantographe/caténaire.

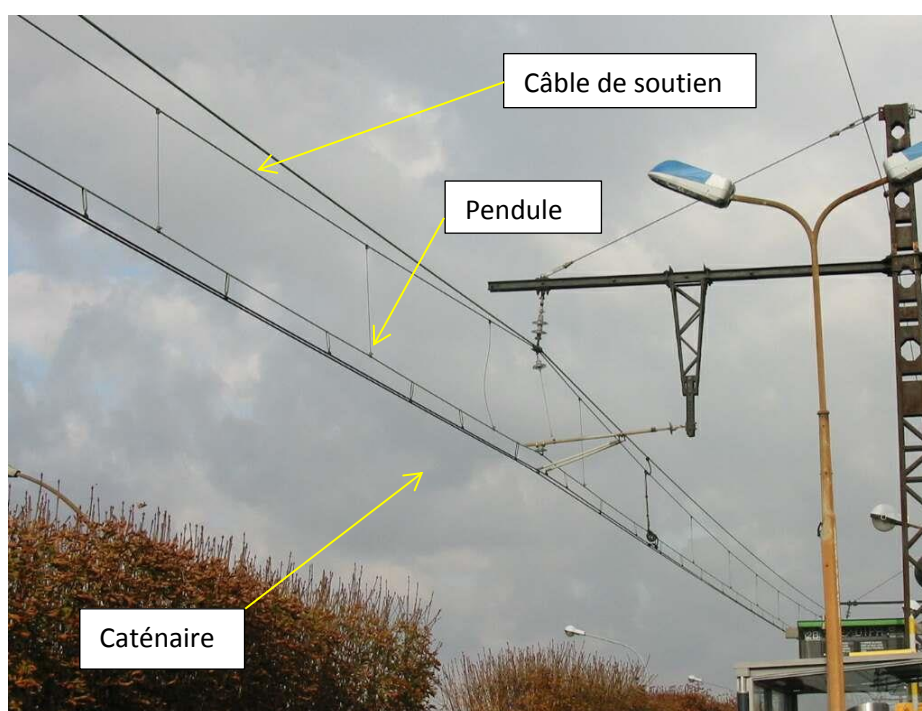


Fig.6 : Alignement d'une caténaire par pendules.

Il faut différencier ces deux problèmes, en disant que le « mur de la caténaire » se pose dans le cas bien spécifique des trains à haute vitesse flirtant avec les limites de leurs capacités. Avant même d'être confronté à ce mur virtuel, les limites des TGV étaient dues au manque de puissance moteur et à la fragilité des transmissions.

L'effet de vague est par contre beaucoup plus général, et touche tous les trains. Sa résolution par mise en place de pendules, oblige à doubler les câblages et à sur dimensionner les supports, c'est donc sur ce point que porte l'effort de recherche des industriels de ce milieu, et qui est à l'origine des réflexions qui ont donné vie à la machine étudiée dans ce travail.

2.2. La solution envisagée

Comme il a déjà été dit au chapitre antérieur, le « mur de la caténaire » se pose comme un problème particulier, et ne sera pas abordé ici. En effet, les TGV évoluent à des vitesses commerciales d'environ 300 km/h, et donc bien en deçà de celles où apparaissent les effets limitants (aux alentours de 500 km/h). On peut cependant ajouter, pour information, qu'on repousse l'apparition du phénomène en jouant sur la tension des caténaires. On considère cependant, que le « mur » est aujourd'hui suffisamment éloigné des vitesses commerciales, et ne pose problème que lors des tentatives de record du monde de vitesse.

L'effet vague est, rappelons-le, bien plus général, et affecte tous les trains dès les basses vitesses. La solution d'équiper les lignes d'alimentation de pendules pose, elle aussi, des contraintes, puisque si elle permet d'atténuer fortement la flèche de la caténaire entre chaque poteau, elle impose une mise en place délicate (les pendules sont ajustés manuellement), rigoureuse (chaque pendule à un emplacement qui lui est propre), tout en alourdissant la maintenance de par le doublement des installations et la surveillance nécessaire de celles-ci.

La solution la plus efficace pour se soustraire des contraintes propres du système de compensation par pendule, serait de supprimer ce système. Cette solution radicale, aurait bien sûr, l'énorme inconvénient de ressusciter l'effet vague de la caténaire entre chaque poteau, ce qui nous ferait revenir à la problématique première.

On peut résumer en disant que la solution à apporter devra :

1. Permettre de supprimer le système d'alignement par pendule.
2. Contrer « l'effet vague » qui apparaît entre chaque poteau.

La solution sur laquelle a travaillé PRISME consiste à contrôler les mouvements du pantographe, de façon à lui faire suivre les positions prises par la caténaire. Pour cela, le laboratoire a conçu un système de régulation électronique, permettant de piloter les positions du pantographe à chaque instant, et de rectifier celle-ci en fonction des aléas du câble. Cette solution permettrait de s'affranchir de problèmes posés par le système des pendules, et pourrait s'intégrer dans les motrices existantes. Les problèmes de maintenance et d'infrastructure se trouveraient allégés, et l'on devine facilement l'effet bénéfique « en cascade » de cette solution.

En régulant la position du pantographe, on fait naître une autre contrainte qui est la force du contact entre le pantographe et la caténaire. Si le contact est trop fort, la caténaire sera arrachée, et s'il est trop faible le captage de courant sera insuffisant. Le travail de PRISME a donc répondu à deux exigences, réguler une position de pantographe, et réguler une force de contact.

2.3. Une problématique réelle difficile à résoudre

L'adoption d'un système de régulation pour commander le pantographe, et annuler les conséquences de « l'effet vague », reste à ce jour impossible. En effet, s'il est aisé de concevoir un système électronique de pilotage d'un pantographe, son application directe sur la machine se voit contrariée par une partie mécanique trop lourde.

Pour expliquer simplement cela, il faut rappeler que les poteaux d'une voie ferrée sont distants de 63 mètres, et donc la flèche de la caténaire est maximale à la moitié de cette distance (soit 31.5 mètres), qui pour un train corail roulant à 160 km/h est couverte en 0.7 secondes. Sachant qu'un système de pantographe pèse près de 300 kg, et est actionné hydrauliquement, il est impossible à ce système d'être suffisamment réactif pour suivre les évolutions de la caténaire. Le problème s'accroît encore plus si l'on considère les lignes à hautes vitesses, où les poteaux sont distants de 50 mètres seulement, avec des vitesses de train atteignant les 300 km/h. Dans le cas de ces lignes, le pantographe devrait passer de sa position mini, à sa position maxi en 0.3 seconde, ce qui est trop rapide pour la chaîne hydraulique et mécanique actionnant le pantographe.

2.4. Conclusion

L'effet vague, a été résolu grâce à l'alignement par pendules, méthode qui est elle-même source de grandes contraintes techniques et financières, et qui n'est donc pas complètement satisfaisante.

Une solution, pour s'affranchir de toutes ces contraintes, passe par l'élaboration de systèmes capables de mouvoir les pantographes en fonction des positions des caténaires. Pour cela, les systèmes de régulations électroniques constituent une solution.

Pour que les systèmes de régulation soient efficaces, ils doivent non seulement contrôler des positions, mais aussi des forces du couple pantographes/caténaire.

A ce jour, les organes mécaniques et hydrauliques de captage du courant, ne peuvent pas suivre les positions de la caténaire à des vitesses commerciales, et constituent donc les limites du système.

3. Objet de l'étude

3.1. Contexte de l'étude

Suite à la problématique posée par « l'effet vague » sur les lignes ferroviaires, PRISME a développé un prototype, destiné à simuler des régulations applicables au couple pantographe/caténaire. Ce prototype est communément appelé « simulateur de caténaire », appellation qui sera reprise, le plus souvent, dans les pages suivantes.

La machine ayant été créée, PRISME désire aujourd'hui percevoir certaines possibilités d'évolution de ce prototype, avec pour objectif une possible industrialisation. Venant du milieu industriel automobile, il m'a été demandé d'apporter ma vision personnelle sur ce sujet, qui me fournira la matière nécessaire à mon travail de fin d'étude.

3.2. Présentation du simulateur de caténaire

La machine présentée ici, trouve son origine dans un ancien projet de la société ALSTOM, qui, en répondant à une demande de la SNCF, voulait apporter les améliorations techniques, précédemment décrites, dans les systèmes de captage d'énergie.

Les expérimentations en conditions réelles, étant irréalisables à ce stade, un simulateur fut créé, et PRISME travailla sur la partie régulation de celui-ci. La machine resta au stade expérimental, et trouva une utilité pédagogique pour former de jeunes automaticiens.



Fig.7 : Vue d'ensemble du simulateur de caténaire.

3.3. Fonctionnement général du simulateur.

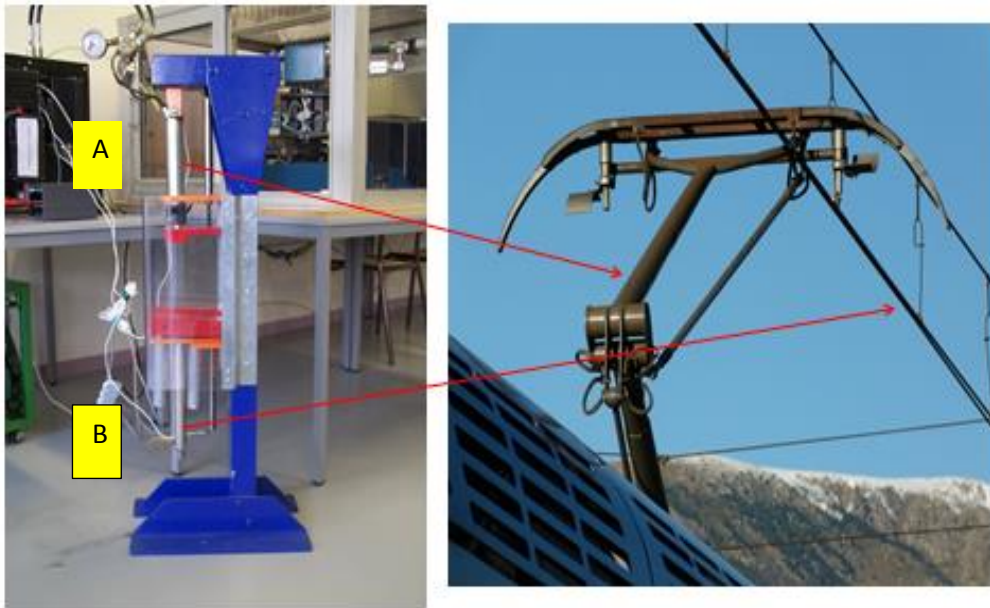


Fig.8 : Simulation d'une caténaire de train.

Comme illustré en figure 8, la machine simule le contact entre un pantographe et une caténaire, et tente à travers une régulation électronique, d'améliorer ce contact.

Pour cela, un vérin hydraulique (vérin supérieur appelé « A » sur la figure 8) reproduit l'effort du pantographe, et un vérin pneumatique (vérin inférieur nommé « B ») simule le poids de la caténaire. Entre ces vérins, s'établit un contact physique, que l'on rend instable (en jouant sur la position d'un des deux vérins), de façon à reproduire les inégalités de position d'une caténaire réelle. Le but n'est pas de chercher à simuler le comportement réel de la caténaire, mais de trouver une manière de contrôler le pantographe de façon à rendre son contact avec la caténaire parfait.

Le travail de simulation, n'est donc pas une réalisation mécanique parfaite de ce qui existe sur un train, mais une transposition destinée à trouver un mode de régulation qui améliorera le contact pantographe/caténaire. Tout le travail des élèves qui utilisent ce simulateur, consiste donc à essayer de créer et de régler un mode de régulation efficace.

Le schéma ci-dessous donne une image de la façon dont est construit le simulateur.

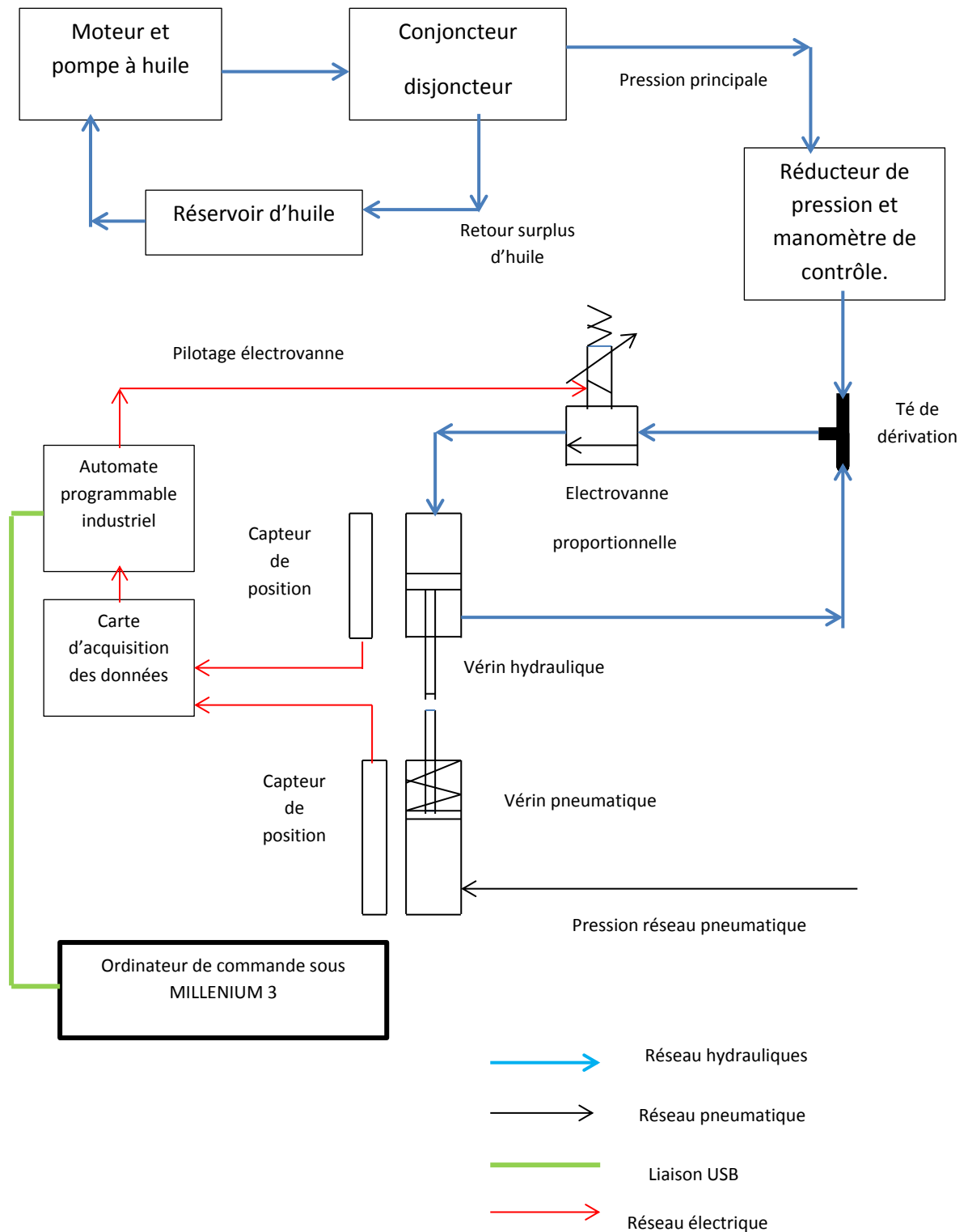


Fig.9 : Schéma général du simulateur.

Il est à noter que la machine fonctionne avec trois sources d'énergie.

3.4 Type de régulation utilisée par le simulateur:

Pour pouvoir réguler une action il faut disposer de trois choses, d'un moyen de mesurer des paramètres, d'un moyen de les comparer avec des valeurs souhaitées, d'un moyen d'action sur ces valeurs. Ce rôle est dévolu à la chaîne de régulation qui, physiquement sur la machine, est dotée de trois organes, l'organe de mesure (capteurs LVDT qui mesurent la position des vérins), l'organe de régulation (ordinateur et automate, dans lesquels sont programmées les valeurs souhaitées) qui est le cœur de la machine, et l'organe de contrôle (électrovanne qui agira de manière à piloter les vérins dans le sens désiré).

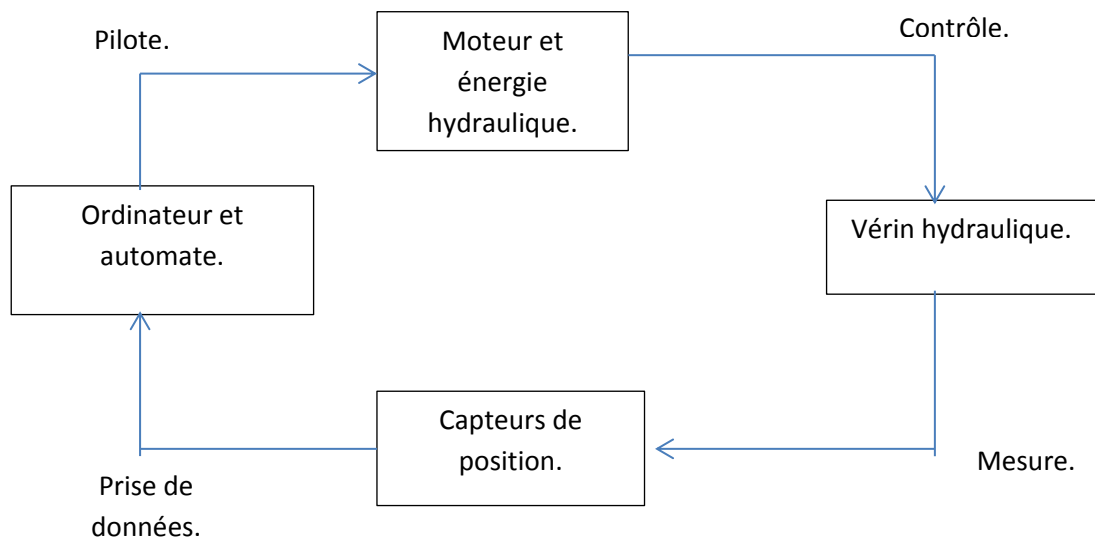


Fig.10. Schéma de régulation du simulateur.

En plus de ces trois maillons essentiels (organes de mesure, de régulation, et de contrôle), on distingue deux types de comportement dans les chaînes de régulation :

- Le comportement en régulation, où la consigne est constante et dans lequel le système gère les variations dues aux entrées perturbatrices. Cela est extrêmement courant dans les milieux industriels, c'est par exemple, le cas d'un four fonctionnant à une température définie (consigne fixe et constante), dont on doit ouvrir la porte ce qui modifie cette température (donnée perturbatrice).
- Le comportement en asservissement, où la consigne est variable ce qui correspond à une modification du point de fonctionnement du système, et où celui-ci doit constamment s'adapter. C'est le cas des pantographes des trains qui évoluent en fonction des fluctuations des caténaires, et que l'on tente de simuler sur la machine étudiée.

Pour beaucoup de mécaniciens, un vérin est un actionneur basique, il rentre et sort en actionnant un contact en fin de course qui vérifie que le travail a bien été effectué, les positions intermédiaires sont peu utilisées. Sur notre simulateur, la vision est toute autre, on ne cherche plus à obtenir une simple rentrée ou sortie, mais un contrôle total de toutes les positions du vérin. La logique du tout ou rien est perdu en faveur d'un asservissement commandé et contrôlé, bien plus efficace.

Pour percevoir la façon dont on peut réguler le mouvement d'un vérin, comme celui qui est installé sur le simulateur, il convient de décrire une des fonctions de régulation des plus utilisées dans l'industrie, qu'est la fonction PID (acronyme signifiant Proportionnelle-intégrale-dérivée).

L'implantation d'un PID dans le simulateur se schématise de la façon suivante:

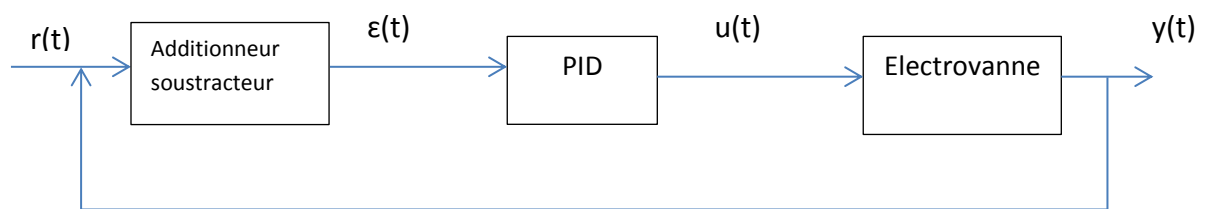


Fig.11 : Schéma type d'une régulation par fonction PID en boucle fermée.

Avec $r(t)$ qui est la consigne envoyée au système (position désirée).

$\varepsilon(t)$ est la différence entre la consigne et la valeur mesurée (on parle d'écart).

$u(t)$ est l'effort de commande pour passer de $y(t)$ à $r(t)$.

$y(t)$ est la valeur mesurée en sortie (position obtenue).

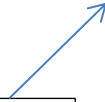
En boucle fermée, de multiples comparaisons ont lieu entre $r(t)$ et $y(t)$ (entrée et sortie du système), et ce pendant une période donnée (période d'échantillonnage) de manière à établir l'écart $\varepsilon(t)$. Le but est que la réponse en sortie $y(t)$ soit égale à la consigne $r(t)$ de façon à annuler $\varepsilon(t)$, d'où :

$$\varepsilon(t)=r(t)-y(t)$$

Il est à noter qu'en boucle fermée, il est nécessaire de disposer de la mesure de $y(t)$ faite **en sortie** du système, ceci peut-être gênant dans les systèmes devant être régulés avant même de démarrer, ou lorsqu'il est impossible d'effectuer cette mesure.

La fonction PID s'écrit mathématiquement de la façon suivante :

$$u(t) = K_p \varepsilon(t) + K_i \int \varepsilon(t) + K_d \frac{d\varepsilon(t)}{dt}$$



Partie
proportionnelle



Partie intégrale



Partie dérivée

Ou :

$u(t)$ est l'effort de commande.

$\varepsilon(t)$ est l'écart.

K_p , K_i et K_d sont des coefficients multiplicateurs à déterminer (appelés gains).

Dans le but d'expliquer et de visualiser la difficulté et le comportement d'un régulateur PID, le graphique suivant est nécessaire :

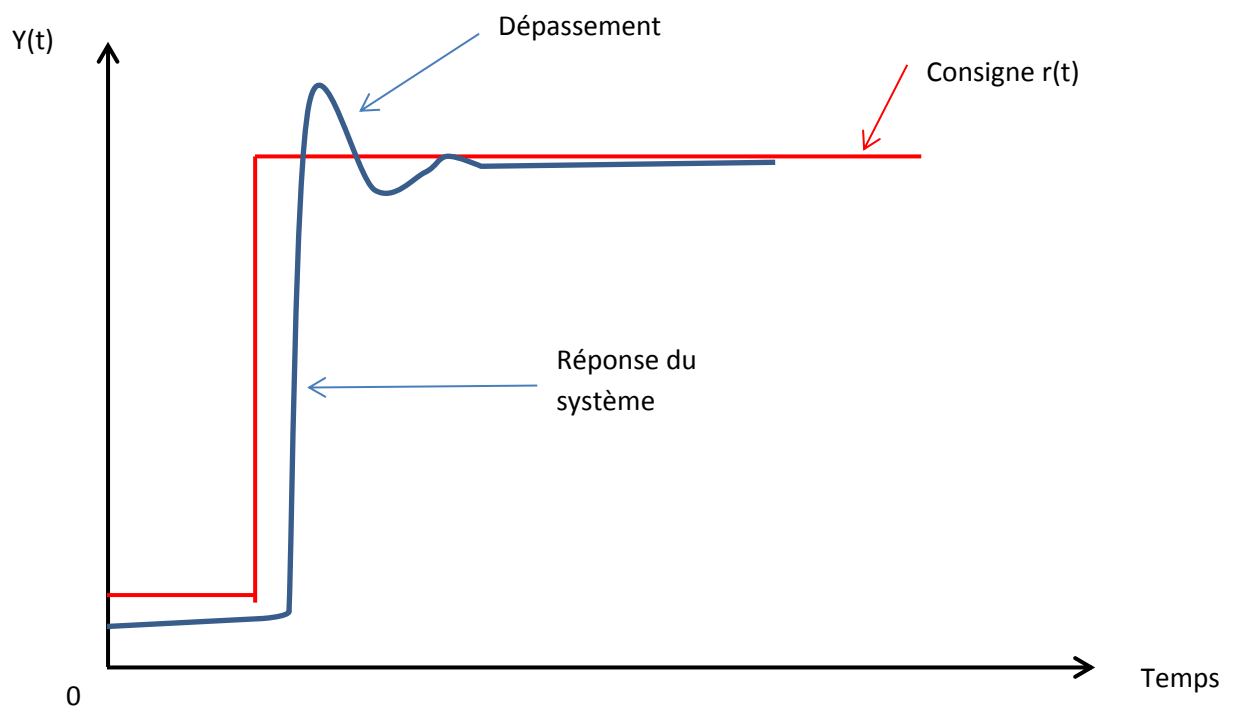


Fig.12 : Comportement d'un système correctement régulé par PID.

La figure 10, montre que face à une variation de la consigne (en rouge), le système, via le PID, s'adapte (courbe bleue) et poursuit la valeur de la consigne jusqu'à la rejoindre au mieux. Pour adopter ce comportement, chaque partie du PID joue un rôle [3].

-La partie proportionnelle $K_p \varepsilon(t)$, permet de donner de l'action de puissance et de suivre au plus vite le changement soudain de la valeur de consigne. La rapidité d'action est fonction de K_p qui ne doit cependant pas être trop grand de façon à ne pas provoquer d'oscillations.

-La partie intégrale $K_i \int \varepsilon(t)$, optimise la façon dont on converge vers la consigne. L'intégrale agit sur la surface de l'écart, et poursuit son action tant que cet écart n'est pas nul. Cela permet, entre autre d'annuler l'erreur statique (différence entre la consigne et la réaction du système en fin de signal), et d'apporter, si son dosage est correct, une certaine stabilité à l'action proportionnelle.

-La partie dérivée $K_d \frac{d\varepsilon(t)}{dt}$, est utilisée pour anticiper le dépassement (ou « over shoot ») et donc le gommer. Elle agit sur la vitesse de variation de l'écart et donc, elle compense les « temps morts » du système. Elle devient nulle dès que la vitesse de variation de l'écart est nulle, et correctement dosée, elle participe aussi à stabiliser l'action de la partie proportionnelle. Un gain K_d trop élevé, participe aussi à l'instabilité du système.

Le régulateur PID, même s'il est d'un emploi courant, a un fonctionnement qui n'est pas facile à appréhender. Les mathématiques n'arrivent pas à elles seules à définir le comportement futur d'une régulation, dont toute la maîtrise repose sur le choix des gains (coefficients K_p , K_i et K_d). Les équations qui décrivent les systèmes industriels sont établies à partir de modèles mathématiques, dans lesquels il faudrait incorporer tous les paramètres des organes qui composent le système (capacité calorifique, nombre de Reynolds, viscosité des fluides etc.), pour, au final, pouvoir choisir des valeurs de gain correctes. C'est un travail titanesque, qui ne se justifie pas pour la majorité des applications, et qui souvent se révèle impossible. Dans la pratique, les techniciens s'approchent des gains optimaux par étapes successives, sans savoir à l'avance les conséquences de leurs actes (augmenter le gain de la partie dérivée, peut par exemple, dérégler le comportement des parties proportionnelle et intégrale).

Le caractère aventureux du réglage d'un régulateur PID, explique le fait que chacun d'entre eux doit d'être conçu et ajusté en fonction du système auquel il est attribué, et rend les essais indispensables à la visualisation du comportement du régulateur. Les machines d'essai telles que notre simulateur, en permettant de pressentir ces comportements, sont donc indispensables à l'utilisation des régulateurs PID.

4. Du prototype à la machine industrielle

4.1. Pourquoi modifier le simulateur

Les modifications pouvant être apportées au simulateur, devront éradiquer les défaillances qui seront observées sur la machine. Puisque celle-ci est aujourd'hui, principalement, destinée à l'enseignement, il convient de la convertir en une machine pouvant être manipulée par des néophytes, dans des conditions de sécurité optimales.

Dès lors, il serait possible d'envisager une duplication et une diffusion de la machine vers les autres écoles du réseau POLYTECH. Cette diffusion, devra-être interprétée comme une industrialisation, et à ce titre, elle soumet le laboratoire PRISME aux obligations légales.

Toute la problématique, sera donc de faire cadrer ce qui a constitué un prototype jusqu'ici, avec ce qui se fait lors de la mise sur le marché d'une machine. Après une prise d'information, et après avoir été soumise à l'approbation des responsables de PRISME, c'est cette voie qui sera entreprise dans la suite de ce travail.

4.2. Cadre des modifications

Pour cadrer les modifications à apporter, la certification du simulateur selon la directive européenne 2006/42/CE a été décidée.[4] En effet, cette certification, en plus d'être aujourd'hui obligatoire pour les machines destinées à une mise sur le marché, reprend les principaux items du cahier des charges développé au paragraphe 4.4.

Cette proposition a été retenue par les responsables, et donc la certification du simulateur, constitue l'objectif de ce travail.

L'ambition, à plus long terme, sera de maîtriser ce processus de certification, afin de certifier un maximum de machines d'enseignement, et au final obtenir une certification ISO 9001 pour l'ensemble du laboratoire.



Fig.13 : Logo de la norme ISO 9001 recherchée par le laboratoire.

4.3. Présentation de la directive

La directive européenne 2006/42/CE dite « directive machine », est destinée rendre plus sûres les machines du continent européen. Pour cela, elle dicte une série de règles à apporter, qui sont communes à l'ensemble des pays européens qui constituent son cadre géographique d'application.

Le cadre d'intervention technique de cette directive, la rend applicable dès le stade de conception, et se poursuit lors de la construction et de l'utilisation des machines, ou des parties de machines.

Le but recherché par la directive est double. En premier lieu, il s'agit de sécuriser l'emploi des machines, et en second lieu, permettre une diffusion géographique de cette sécurisation. Les utilisateurs peuvent dès lors se garantir du fait, que les machines qu'ils utilisent ont comme socle commun de sécurité, cette directive, et qu'elle les couvre contre les risques communément encourus.

4.4 Cahier des charges

Déoulant de la problématique ci-dessus, à savoir pouvoir servir d'équipement aux écoles du réseau POLYTECH, et suite aux entretiens faits avec les responsables de PRISME, il a été établi que le simulateur, après modification, devra respecter le cahier des charges suivant :

- Etre conforme aux exigences sécuritaires en vigueur.
- Etre doté d'un dossier technique détaillant ses caractéristiques.
- Etre plus fiable et plus propre et moins bruyant que la version actuelle.
- Etre d'une maintenance aisée.
- Etre certifiable selon la directive 2006/42/CE.

Le cadre financier étant fluctuant au sein du laboratoire PRISME, chaque initiative d'achat devra être justifiée auprès d'un responsable. Il est entendu, et cela rejoint ce qui se fait en milieu industriel, que les coûts devront être contenus. Toutefois, des largesses seront acceptées dès qu'il s'agira de hausser le niveau de sécurité.

5. Critique des éléments existants

5.1. Introduction :

Les organes qui seront critiqués dans ce chapitre, ont été choisis d'après l'observation du fonctionnement du simulateur. L'objectif de certification posé dans le cahier des charges, impose une mise en sécurité de la machine, et il va sans dire que sur ce sujet aucune lacune ne peut être acceptée, c'est donc surtout ce critère qui va guider cette critique.

Loin d'avoir un historique négatif à son actif (aucun accident n'ayant jamais été recensé), il convient tout de même de regarder si la machine ne possède pas un potentiel de danger. En effet, il est bon de distinguer, lors de la prévention des risques, les accidents qui se sont déroulés (aucun à ce jour sur cette machine), et ceux dont la probabilité d'occurrence n'est pas nulle. En bref, on doit se poser la question de savoir si une machine qui n'a connu aucun accident, peut être qualifiée de machine sûre.

La distinction entre l'historique d'un accident, et l'idée qu'il puisse un jour survenir, est importante et permet de mener des actions proactives en matière de sécurité. Il ne s'agit pas d'élaborer des « scénarios catastrophes » qui peuvent faire sourire, mais de regarder si des éléments peuvent faire penser qu'un organe peut représenter un danger à un moment quelconque.

Sensibles aux arguments sécuritaires, les responsables de PRISME expriment une forte envie de voir le simulateur évoluer sur ce thème. Les descriptions qui suivent, concerneront donc principalement les organes suspectés de sécurité douteuse.

Pour conclure le chapitre, une mesure de bruit sera commentée, et son analyse viendra s'ajouter à l'argumentaire destiné à convaincre définitivement, les responsables de PRISME, d'apporter des changements à la machine.

5.2. La pompe hydraulique :

D'origine automobile, la pompe servait à mettre en pression le circuit hydraulique desservant les suspensions et le freinage des véhicules CITROËN équipés de systèmes hydropneumatiques. Il s'agit d'une pompe hydraulique à piston 5 axiaux, présentant une grande fiabilité de fonctionnement du fait de sa grande simplicité de conception.

Son principe de fonctionnement est simple, un moteur entraîne un arbre au bout duquel est usiné un plateau incliné. Ce plateau actionne une série de 5 pistons montés sur un barillet, et le mouvement de va et vient de chaque piston pompe un liquide hydraulique dans un réservoir, et le met en pression dans le circuit. Lorsqu'un piston est repoussé par son ressort, il aspire l'huile du réservoir, et lorsqu'il est poussé par le plateau incliné, il la repousse et fait monter en pression le circuit hydraulique.

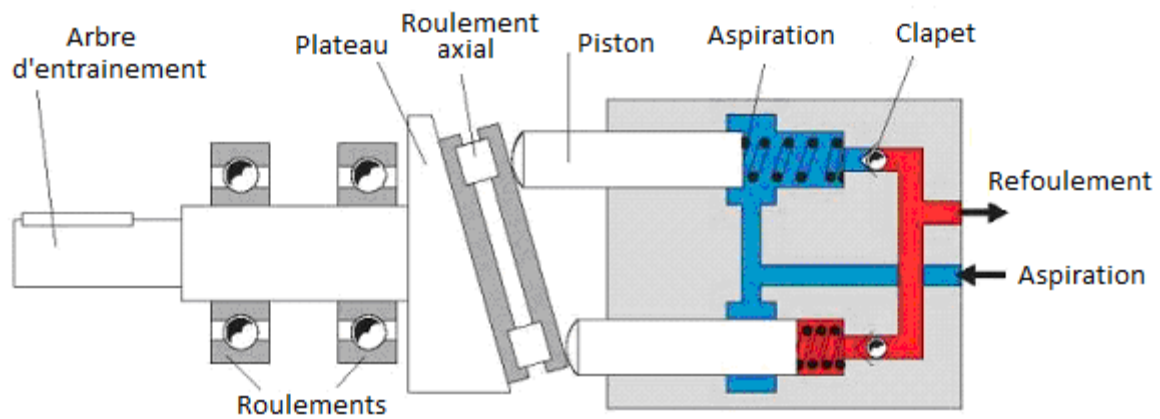


Fig.14 : Schéma d'une pompe hydraulique axiale simple.

Il est à noter que ce type de pompe ne présente aucune forme de régulation de pression en interne, en d'autres termes, tant qu'elle est actionnée par le moteur, celle-ci continue à envoyer du liquide dans le circuit qui voit sa pression augmenter de façon constante. Cela peut-être destructeur pour tous les organes hydrauliques qui constituent le simulateur, et peut même être dangereux pour les opérateurs, qui rappelons-le, sont pour la plupart des étudiants. Aussi, cette pompe, comme toutes les pompes non régulées, doit comporter à son aval immédiat, un système de régulation adapté, qui de façon cachée, participe à la protection du système et des opérateurs, donc joue un rôle crucial pour la sécurité.

On peut donc aisément comprendre que, même si elle n'a, jusqu'ici pas, posé de problèmes d'ordre sécuritaire, la pompe axiale est, malgré tout, un organe hydraulique mal adapté aux conditions d'enseignement. Sa faculté à monter en pression de manière quasi indéfinie est intéressante dans le monde automobile, où ce type de pompe doit fournir une énergie hydraulique, « quoi qu'il arrive », aux freins et à la suspension, mais ce système avoue ses limites sur une machine d'enseignement. Ici, rien ne justifie l'usage d'une telle pompe, la recherche de fortes pressions qui doivent se maintenir, coûte que coûte, n'étant pas un but en soi.

Dans ce cas précis, il est certain que les concepteurs du simulateur ne se sont pas posé de « questions industrielles » visant à anticiper la survenue de problèmes parallèles liés aux choix technologiques. Ici, la fonctionnalité primaire a justifiée l'utilisation de matériel récupéré et immédiatement disponible, dans le but de concevoir un prototype exploitable. L'industriel consciencieux, fait de même lors de la création d'un prototype, mais il dispose d'outils de résolution de problèmes, qui permettent de balayer la majorité des fonctions annexes et non désirées, induites par le choix de telle ou telle technologie, ouvrant ainsi les voies vers une possible industrialisation.

Cela étant, et puisque la pompe est potentiellement mal adaptée, une amélioration immédiate, destinée à abaisser le niveau de risque de la pompe et donc du simulateur, peut-

être proposée. Ces améliorations immédiates, industriellement appelées « mesures conservatoires », sont souvent utilisées en milieu industriel, pour contrer un effet néfaste soudain, partout où il peut exister.

Les mesures conservatoires ne doivent toutefois pas se substituer à une étude plus approfondie, seule apte à valider une décision. Ainsi, pour cette pompe, si nous identifions le manque de régulation comme source de problème, la mesure conservatoire consistera à choisir une pompe régulée, comme illustré à la figure 15.

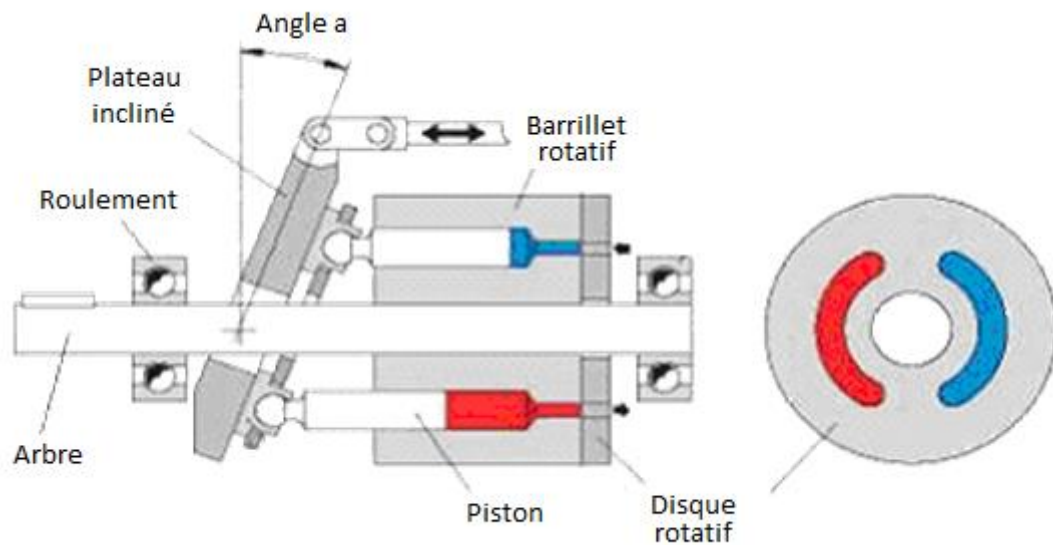


Fig.15 : Pompe régulée par plateau inclinable.

Il est à noter que le terme « régulation » s'applique ici à la pression délivrée par la pompe, et n'a rien à voir avec la régulation par PID évoquée dans d'autres chapitres. De plus, ce cas n'est donné qu'à titre d'exemple et ne sera pas proposé à PRISME, une solution plus systémique ayant été envisagée.

5.3. Le conjoncteur/disjoncteur à accumulateur.

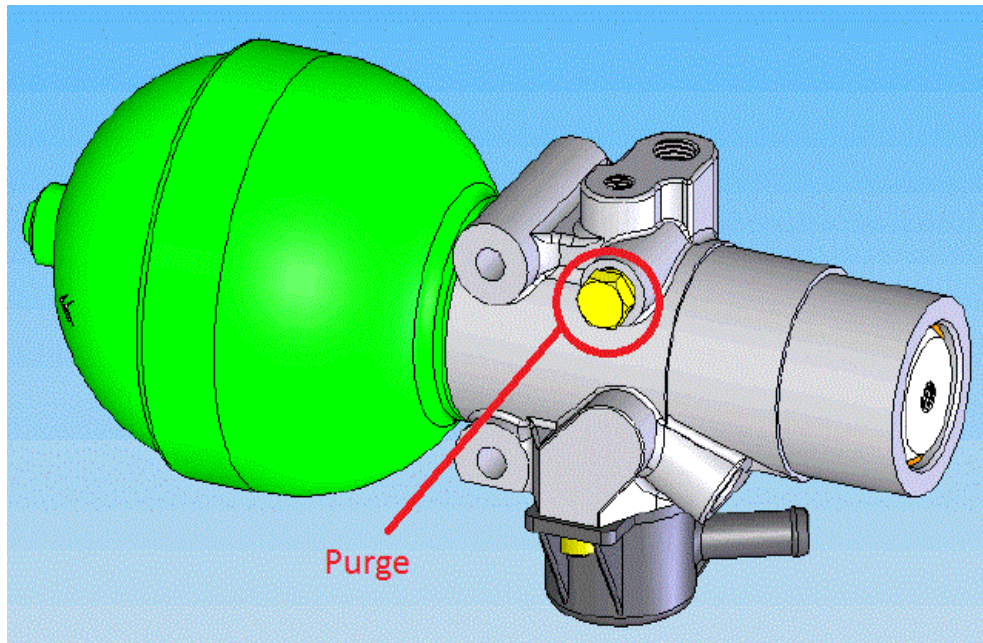


Fig.16 : Conjoncteur/disjoncteur à accumulateur.

Le rôle du conjoncteur/disjoncteur à accumulateur (CDA), est de réguler la pression du circuit de façon à la rendre compatible et acceptable par tous les organes hydrauliques du simulateur. Cette fonction est primordiale dans tout système hydraulique, et il est aisé de comprendre que la pression régnant dans les circuits doit impérativement être contrôlée.

En assurant cette fonction, le CDA vient contrer le risque de surpression induit par la pompe décrite au chapitre précédent, mais pour autant, on ne peut lui accorder le titre d'organe de sécurité du fait de sa faible fiabilité. En effet, tiré du milieu automobile, le CDA est normalement soumis à une maintenance assidue qui n'est pas assurée ici.

Pour bien démontrer le risque encouru, et le besoin de maintenance d'un CDA, il convient d'en décrire succinctement le fonctionnement.

L'appareil se scinde en deux parties distinctes qui sont le conjoncteur/disjoncteur d'une part, et l'accumulateur d'autre part. Bien que fonctionnant de façon complémentaire et assurant au final une seule et unique fonction (réguler la pression hydraulique du circuit), ces deux parties cachent des défauts intrinsèques qui, nous l'avons vu, peuvent la rendre inapte à l'utilisation dans un prototype.

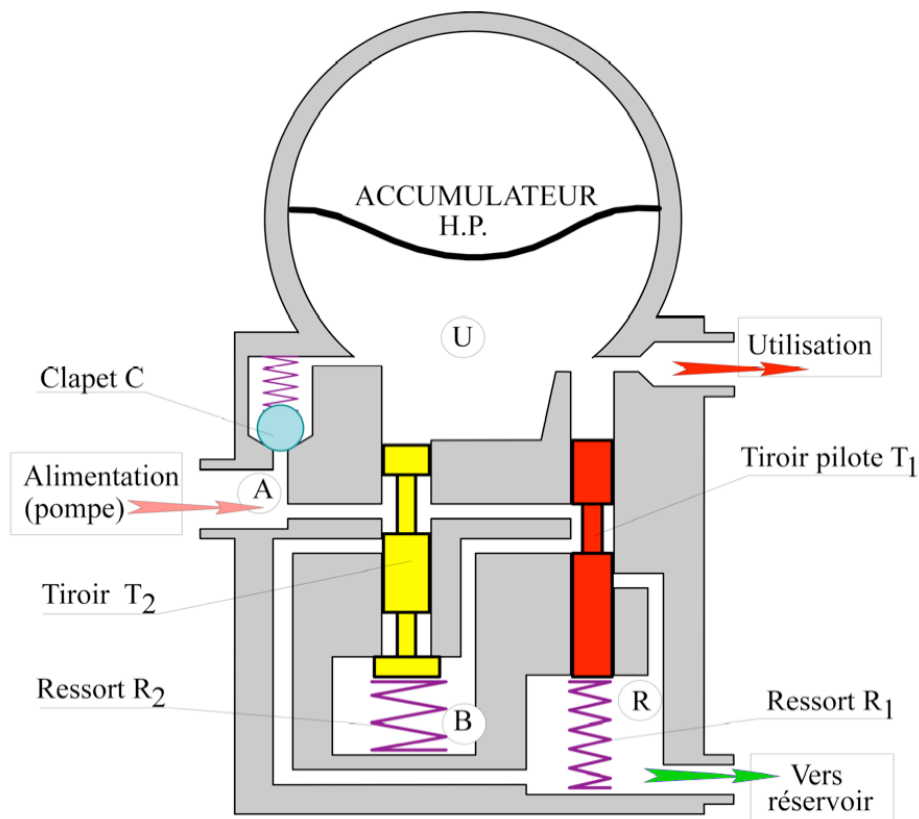


Fig.17 : Schéma de fonctionnement d'un CDA.

Le CDA fonctionne grâce à un système de tiroirs, qui pilotent et canalisent le fluide hydraulique en fonction de la pression de celui-ci. On peut, en fonction de la pression de ce fluide, identifier les phases de disjonction et de conjonction.

- 1- Lors d'une utilisation, le fluide arrive depuis la pompe hydraulique (repère A), passe par le clapet anti retour (repère C) et file vers son utilisation (flèche rouge).
- 2- Lorsque l'utilisation ne réclame plus de pression (vérin en fin de course, par exemple), la pompe continue à envoyer du fluide hydraulique (pompe non régulée) et la chambre repérée U monte en pression. Le tiroir pilote T1 s'abaisse (entraînant une baisse de pression dans U), le fluide est alors dirigé vers T2 qui s'abaisse. C'est la phase de **disjonction**. Les surplus de fluide et de pression retournent au réservoir principal.
- 3- Du fait de la chute de pression dans la chambre U (due à l'abaissement des tiroirs, et à l'utilisation du fluide en aval du système), le tiroir T1 revient à sa position initiale et renvoie le fluide sort de pompe vers la chambre B, ce qui fait remonter T2. Les tiroirs étant remontés, il y a **conjonction**, le fluide peut de nouveau passer par le clapet C et la chambre U pour réalimenter l'utilisation.

Le CDA fonctionne de façon cyclique, et les phases de conjonction/disjonction se succèdent en maintenant la pression entre deux valeurs définies par le tarage du ressort de clapet C.

Cette régulation se faisant très rapidement, l'appareil passant de la disjonction à la conjonction en 2/3 centièmes de seconde, et du fait que le fluide hydraulique est un liquide incompressible, des pics de pression peuvent apparaître dans le circuit hydraulique. Ces pics de pression, à l'image d'un système soumis au phénomène de cavitation, font subir aux organes et aux tuyaux hydrauliques des contraintes néfastes qu'il convient d'atténuer. Ce travail est effectué par l'accumulateur, rempli d'azote, qui compense les compressions/dépressions du circuit en modifiant son volume interne de gaz.

Lors d'une phase de disjonction (baisse soudaine de la pression dans le circuit), le volume d'azote sous pression, contenu dans l'accumulateur, augmente et compense les pertes. Pendant la conjonction (le circuit remonte en pression), le volume d'azote se réduit et « gomme » (du fait de la compressibilité du gaz) les à coup de surpression.

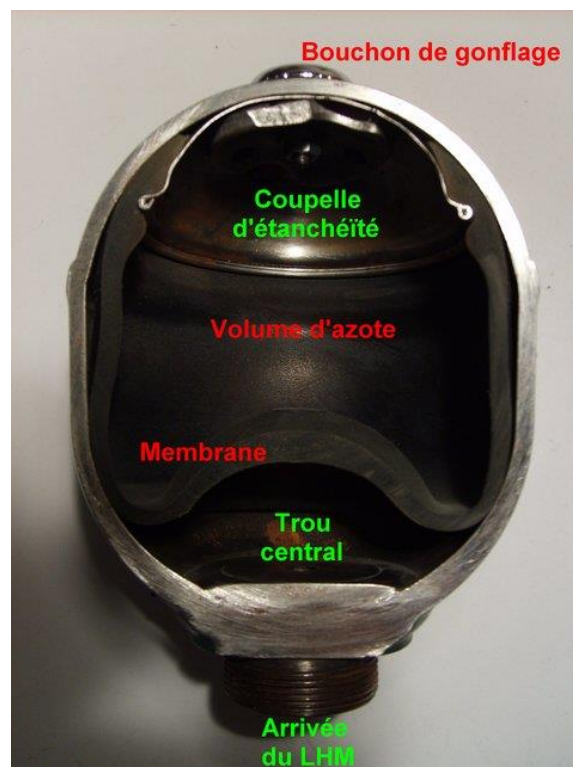


Fig.18. : Coupe d'un accumulateur à gaz.

L'accumulateur à gaz, sert d'amortisseur à une technologie hydraulique, basée, paradoxalement sur l'incompressibilité des fluides. Il sera cependant montré, dans la suite de notre étude, que ce type d'amortisseur, possède un déficit de fiabilité normalement compensé par une maintenance stricte. Récupéré du milieu automobile, ou cette technologie est tout à fait d'actualité, cet élément ne peut s'intégrer, tel quel, dans un prototype comme le simulateur de caténaire, sans soulever des questions, non plus d'ordre technique, mais sécuritaire.

5.4. Fiabilité des composants.

La fiabilité du simulateur est une donnée qui peut sembler secondaire dans cette étude, en effet, cette machine est destinée à fonctionner pendant des temps relativement courts et le temps imparti pour pratiquer des essais d'asservissement est lui aussi réduit. Pourtant l'observation conduit à penser qu'une approche fiabiliste est nécessaire, puisqu'avant même de pouvoir effectuer une première mise en route, le simulateur a dû subir une révision de sa partie hydraulique.

Le technicien affecté à la maintenance des machines du laboratoire, ne peut pas se fier à un fonctionnement parfait de l'appareil qui, si sa charge de travail était plus élevée, demanderait un temps de maintenance conséquent.

La maintenance est d'autant plus difficile à mettre en place qu'elle peut faire appel à des compétences diverses, des périodes de fonctionnement aléatoires, ou des temps d'immobilisation incertains. Qui plus est, il est bon, et ce pour garder à l'esprit la vision industrielle, d'anticiper les pannes éventuelles, et donc d'avoir une connaissance des organes les plus faibles.

Etant un prototype unique, le simulateur de caténaire ne peut faire l'objet d'essais destinés à déterminer son endurance. En effet, les lois de la fiabilité sont basées sur des statistiques dont les données sont fournies par des essais [5], par conséquent, une étude approfondie de fiabilité ne peut être menée puisque les essais sur une seule machine ne seraient pas représentatifs.

Une voie possible est, paradoxalement, donnée par l'origine des composants du simulateur, en effet, venant du monde de l'automobile, ces organes sont soumis à des contrôles déterminés par le constructeur, une extrapolation de ces contrôle donne une idée des fiabilités [6].

En prenant les éléments suivants :

Le moteur électrique.

La pompe hydraulique.

La courroie reliant le moteur et la pompe.

L'accumulateur sphérique monté sur le conjoncteur/disjoncteur.

Le conjoncteur/disjoncteur

L'électrovanne qui pilote le vérin.

Et en appliquant la formule du taux de défaillance :

$$\lambda = \frac{\text{nombre de pannes}}{\text{nombre d'heures d'utilisation}}$$

Il vient le diagramme suivant:

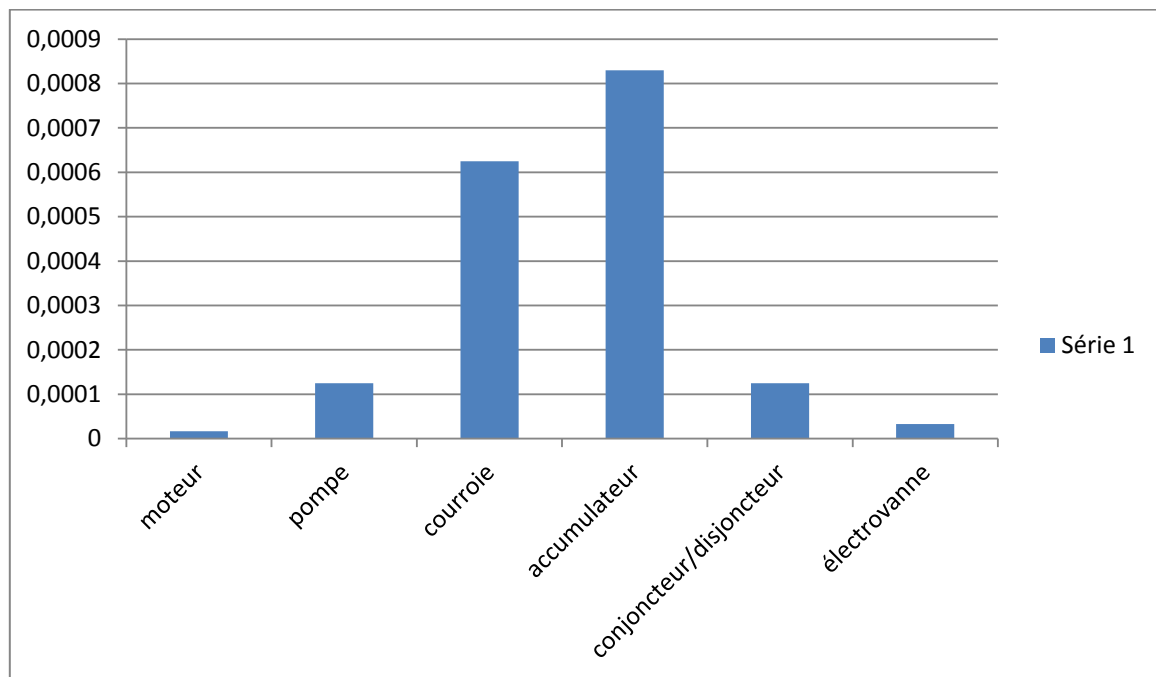


Fig.19 : Comparaison des taux de défaillance des principaux éléments.

Les taux de défaillances montrés en fig.21 ont été calculés grâce aux durées de vie exprimées par les constructeurs. Par exemple, la courroie (d'origine automobile) doit être remplacée tous les 80000 kilomètres, aussi si nous prenons comme base la distance de 50 kilomètres parcourus en 1heure, il vient :

$$\frac{8000}{50} = 1600 \text{ heures de fonctionnement}$$

$$\text{Soit } \lambda_{\text{courroie}} = \frac{1}{1600} = 0.000625$$

Du fait du caractère unique du prototype, et faute d'essais, le taux de défaillance est le seul indicateur qui puisse nous donner un ordre de grandeur de la fiabilité des éléments qui composent le simulateur.

Pourtant cet indicateur mesure mal la fiabilité, puisque les fiabilistes considèrent que la formule du taux de défaillance ne s'applique pas aux éléments constitués de caoutchouc (courroies, pneumatiques, membranes, joints), ceux-ci se dégradant non pas en fonction des heures d'utilisation, mais simplement en fonction du temps qui passe. La formule serait alors :

$$\lambda = \frac{\text{nombre de pannes}}{\text{nombre d'heures}}$$

Cette formule simple, permet de dire que les deux organes les moins fiables du simulateur sont la courroie de transmission reliant le moteur et la pompe, et l'accumulateur à gaz du conjoncteur/disjoncteur. Ces éléments sont donc à remplacer en priorité si l'on veut hausser le niveau de fiabilité du simulateur.

Cette idée est confortée par le fait que ces éléments, du fait de leur dangerosité potentielle, participent à l'architecture générale de l'appareil (grande cartérisation empêchant l'accès à la courroie) et aux anomalies déjà présentes (fuite d'huile dans le bac de rétention, visible sur la figure 15, due très certainement à la défaillance de l'accumulateur entraînant des pics de pression néfastes).

La liaison entre fiabilité et sécurité est, pour ce cas, mise en évidence, et l'on peut dire qu'une machine sûre est une machine dont les éléments de sécurité sont fiables

Généralement, une étude statistique, faite après observation d'une population donnée permet d'obtenir des données, et de dresser un graphique communément appelé « courbe en baignoire ». A partir de ce graphique, on établit la Moyenne des Temps de Bons Fonctionnements (MTBF), permettant d'apprécier la fiabilité. L'établissement d'un tel graphique n'a pas de sens sur un échantillon d'un individu, mais pourra être utilisé lorsqu'il sera construit un nombre suffisant de simulateurs, fournissant davantage de données.

Il s'agit là d'un des grands paradoxes des études de fiabilité, qui pour être optimales, nécessite qu'une série d'individus soit construite et testée, le consommateur pouvant d'ailleurs participer à son insu à ces tests « grandeur nature », évitant ainsi aux industriels des phases de validation longues et coûteuses.

Même si le simulateur, présenté ici, ne peut faire l'objet d'une étude de fiabilité sérieuse, les déficits sécuritaires liés aux organes considérés comme étant les moins fiables, justifient des modifications qui devront faire gagner celle-ci non seulement en fiabilité, mais aussi en temps de maintenance, et plus important, en sécurité.

Le lien entre fiabilité et sécurité est une chose nouvelle, que les concepteurs doivent aujourd'hui intégrer dans la conception et l'utilisation des machines.

Une bonne fiabilité permet d'apprécier la durée de fonctionnement des systèmes, et d'anticiper une action (maintenance par exemple) avant qu'une défaillance aux conséquences dangereuse n'arrive. D'ailleurs, la prévention des risques imposée par obligation légale (articles L4311-1 et suivants du code du travail), tient compte de la fiabilité. En fiabilisant les équipements, on dépasse cette obligation en n'ayant pas à prévoir des situations d'utilisations anormales (comme le fonctionnement en mode dégradé) qui auront été rendues impossibles grâce à la fiabilisation (les équipements ne feront que ce pourquoi ils ont été prévu, dans le temps qui leur est imparti).

La fiabilisation permet donc un meilleur contrôle des systèmes, et doit guider la démarche d'amélioration du simulateur de caténaire.

5.5 Mesures de bruit :

Afin de réduire le niveau sonore du simulateur, des mesures de bruit ont été réalisées. Les valeurs obtenues serviront de références pour proposer des améliorations, et permettront d'évaluer le gain sonore de la machine ainsi revue [7].

Ces mesures ont été faites dans le local où est situé le simulateur, lorsque celui-ci était vide (aucune autre personne présente), et avec toutes les autres machines coupées. Le local était donc dans ses conditions de silence maximales

L'appareil utilisé était un sonomètre SOLO 0.1 DB (appareil provenant, du laboratoire ICARE, qui s'est aussi chargé de l'étalonnage), et a été posé à un mètre de l'organe le plus bruyant (il s'agit de la pompe hydraulique) tout en étant dirigé vers celui-ci. La durée des mesures était d'une minute pour chaque mesure.

On doit ajouter que ces mesures de bruit n'ont pas été effectuées selon les prescriptions de la norme NF EN ISO 9612, qui détaille toutes les conditions nécessaires légales, de toute mesure de bruit. Aussi, les mesures faites ici, n'ont pas de valeurs légales, mais donnent une indication certaine de la dimension de ce problème.

Sur les cinq mesures effectuées, il a été choisi de se placer dans la pire des situations, et donc de retenir les valeurs de bruit les plus élevées, c'est-à-dire la « pire » des mesures.

Le sonomètre a donné les valeurs suivantes (valeurs exprimées en décibels pondérés A, ou dB(A), et en décibels pondérés C, ou dB(C)) :

- Valeurs les plus hautes : 85.8 dB(A) et 90.4 dB(C).
- Valeurs moyennes : 84.4 dB(A) et 89.8 dB(C).
- Valeur les plus basses : 82.3 dB(A) et 88.1 dB(C).

L'INRS nous fournit le tableau des principales dispositions réglementaires liées au bruit, et dont la lecture se passe de commentaires.

Quel que soit le niveau	– Évaluation du risque – Suppression ou réduction au minimum du risque, en particulier à la source – Consultation et participation des travailleurs pour l'évaluation des risques, les mesures de réduction, le choix des PICB – Bruit dans les locaux de repos réduit à un niveau compatible avec leur fonction
Au-dessus du seuil d'action inférieur $L_{EX,Bn} > 80 \text{ dB(A)}$ $L_{p,C,peak} > 135 \text{ dB(C)}$	– Mise à disposition des PICB – Information et formation des travailleurs (sur les risques liés au bruit, sur les mesures et les moyens de prévention collective et individuelle, sur l'usage des PICB, etc.) – Examens audiométriques préventifs proposés
Au-dessus du seuil d'action supérieur $L_{EX,Bn} > 85 \text{ dB(A)}$ $L_{p,C,peak} > 137 \text{ dB(C)}$	– Mise en œuvre d'un programme de mesures techniques de réduction d'exposition au bruit – Signalisation des lieux de travail bruyants et limitation d'accès – Utilisation des PICB – Examens audiométriques périodiques (surveillance médicale renforcée)
Au-dessus de la valeur limite d'exposition (VLE) (compte tenu de l'atténuation du PICB) $L_{EX,Bn} > 87 \text{ dB(A)}$ $L_{p,C,peak} > 140 \text{ dB(C)}$	– À ne dépasser en aucun cas ; mesures de réduction d'exposition sonore immédiate

Fig. 20 : Dispositions réglementaires liées au bruit (source INRS).

6. Bilan général.

Si l'on fait le constat de cette première partie de l'étude, on peut dire que le simulateur de caténaire, est une machine d'enseignement qui présente un potentiel de danger certain. Ici, le terme de danger ne s'applique pas uniquement aux personnes utilisatrices, mais aussi à la machine elle-même puisqu'elle subit les conséquences de ses pannes.

Même si aucun outil d'aide à la décision (AMDEC, FM TIPS, Diagramme d'ISHIKAWA, etc.) n'a été utilisé pour étayer ce propos, la liste des anomalies suivantes permet à ceux qui ont une culture technique de se convaincre que la machine mérite d'être revue. En listant les anomalies observées il vient :

- Un moteur électrique surdimensionné, au câblage non-conforme.
- Un câblage électrique désordonné [8].
- Des composants hydrauliques peu adaptés, associés à un fluide devenu corrosif, qui dégradent le circuit qui les alimente.
- Une cartérisation métallique « à trou » qui ne protège ni du risque de surpression hydraulique, ni du risque électrique.
- Un niveau sonore élevé, incompatible avec des conditions normales d'enseignement.

A l'évidence, notre simulateur doit faire l'objet de modifications. Celles-ci doivent porter, bien sûr, sur l'aspect sécuritaire, mais l'idéal serait d'envisager toutes les perspectives d'évolutions possibles. Des modifications rendant la machine plus fonctionnelle, moins bruyante, plus fiable etc. sont de nature à conforter une approche sécuritaire, et représentent presque toujours les différentes facettes d'un seul et même problème.

Le prochain chapitre, traitera donc des améliorations qui seront proposées aux responsables de PRISME. Rappelons que l'objectif fixé, est de préparer la machine à l'obtention d'une certification machine 2006/42/CE, contribuant elle-même à la certification ISO 9000 du laboratoire.

7. Les améliorations du simulateur de caténaire

7.1. Introduction

Entreprendre une démarche de certification est un travail de longue haleine. Il n'est pas concevable de certifier un laboratoire entier d'une traite, surtout si l'on ne peut pas s'appuyer sur une expérience antérieure. La certification ISO 9001, est donc un objectif ambitieux que se fixe le laboratoire.

A ce stade, une reconception de tous les équipements, toujours dans un but de certification, est inenvisageable, et mettrait en péril le fonctionnement même du laboratoire. Il convient donc d'introduire de façon douce, les éléments qui, mis bout à bout, permettront d'aller vers l'objectif. L'idéal est d'arrêter une date, à partir de laquelle, tous les nouveaux équipements entrant dans le laboratoire, devront correspondre à la démarche, de façon à ce que peu à peu, au gré des renouvellements, le laboratoire se voit doter des moyens d'accéder à la certification.

Les améliorations apportées à notre simulateur doivent s'inscrire dans cette logique, et permettre de franchir une étape vers notre but. Les différentes séquences d'amélioration du simulateur, vont par ailleurs, tracer la trame de ce qui devra être entrepris sur les autres machines du laboratoire pour, au final, pouvoir les certifier aussi. L'importance de la démarche de certification est donc double, non seulement elle permettra d'améliorer la machine, mais donnera également au laboratoire, un « mode d'emploi » à appliquer pour certifier d'autres réalisations.

7.2. L'évaluation des risques

L'évaluation des risques est une étape cruciale dans une démarche de certification. Elle permet d'identifier les risques générés par un procédé, ainsi que les risques découlant de toute modification de ce même procédé [9].

Le simulateur de caténaire est sur ce sujet un merveilleux exemple. En effet, celui-ci a été créé à partir d'éléments divers, auxquels se sont rajoutés des modifications de circonstance selon les besoins des utilisateurs. Au final, et en utilisant cette façon de faire, il s'est créé une machine dont on ne sait aujourd'hui dire si elle est adaptée ou pas aux conditions d'enseignement. Et bien que le simulateur fasse l'unanimité quant à son rôle pédagogique, cette étude n'a pour le moment cessé d'en dénoncer ses autres insuffisances.

Pour remédier à ces défauts, et parce qu'elle est nécessaire à la certification machine, une évaluation des risques doit être effectuée. Elle se déroule suivant les étapes suivantes :

1. Identification des risques.
2. Classification des risques.
3. Proposition de voies d'amélioration.
4. Critique et choix des améliorations proposées.

Cette évaluation sera réalisée en deux temps, identification et classification suivies des propositions et critiques. Une étape préalable sera dédiée à l'implication des membres du laboratoire dans cette démarche, et une critique globale viendra clôturer cette analyse de risque.

Le cadre de l'évaluation des risques permet de disposer :

- Des moyens techniques du laboratoire (aide de techniciens, mise à disposition d'outils et de connaissances).
- Du champ d'intervention limité à la salle où est situé le simulateur.
- De la liberté de choisir les outils opportuns pour réaliser l'évaluation.
- De moyens financiers qui seront étudiés en fonction des conclusions obtenues.

Selon les résultats obtenus, des préconisations seront proposées aux responsables de PRISME.

7.2.1. L'implication de tous

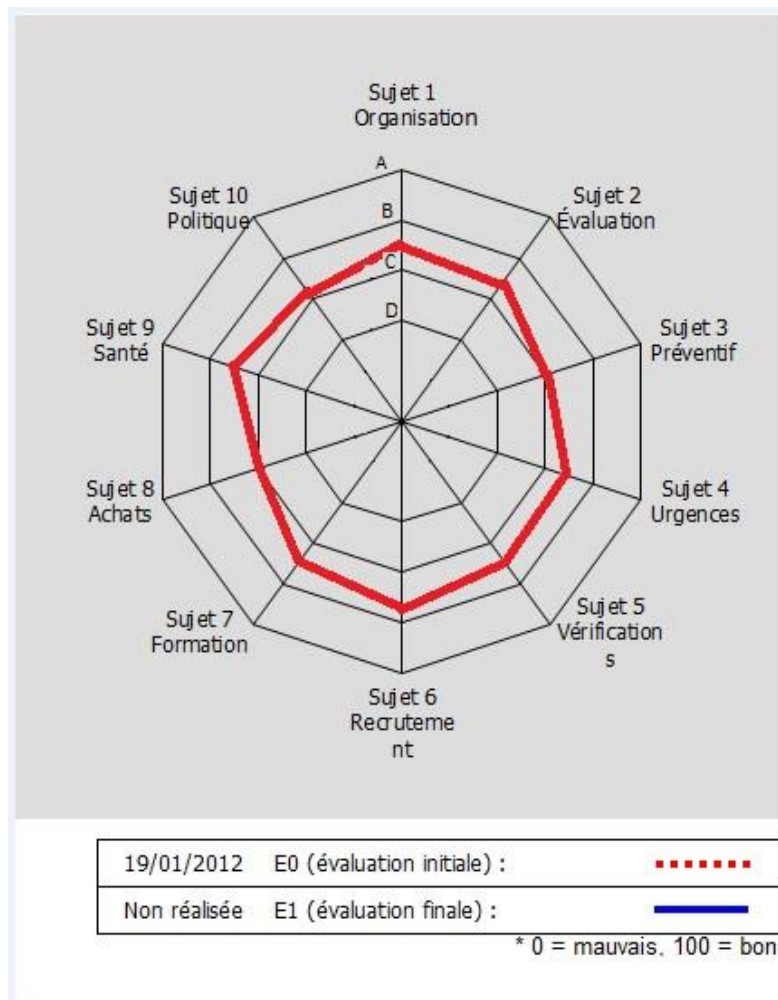
Un des grands principes de l'évaluation des risques, est d'impliquer toutes les personnes concernées. En effet, tous les intervenants doivent être convaincus de la démarche, au risque de voir les solutions émises ne pas être appliquées. Cela apparaît comme une évidence, pourtant un nombre important de victimes est constitué par les personnes ayant un comportement réfractaire face à ce qui leur est demandé en cas de situation à risque. Dans le cas du laboratoire PRISME, les exercices d'évacuation montrent par exemple, que tous les membres du personnel, n'évacuent pas systématiquement les locaux en cas d'alerte, constituant donc un foyer potentiel de victimes.

A travers cet exemple, il est facile de concevoir qu'une protection, si efficace soit-elle, ne sert à rien si elle n'est pas utilisée, son utilisation étant elle-même conditionnée par l'implication et la prise de conscience de ceux qui sont concernés.

L'outil, mis en place ici, pour évaluer l'implication des membres du laboratoire sur les questions de sécurité, est la grille DIGEST. Cette grille a été créée par l'INRS, et sert, habituellement, à évaluer le taux d'implication des membres d'une entreprise en matière de sécurité. La simplicité de cette grille la destine aux entreprises de moins de 50 salariés, et son emploi ici se justifie par le fait du petit nombre de personnes gravitant autour du simulateur (8 personnes environ, sans compter les élèves).

La grille DIGEST se dessine à partir du questionnaire qui lui est associé, et qui reprend les différentes thématiques des situations à risques existant dans les entreprises. Le lecteur trouvera le questionnaire, qui a servi à dessiner la grille de la figure 25, à la fin du document (annexe 1)

Cet outil n'est pas destiné à répertorier les situations à risque, mais à faire une « photographie instantanée » de l'état d'implication du laboratoire. Le but étant de créer une prise de conscience qui favorisera l'évolution positive de la situation. Voici les résultats obtenus, suivis des commentaires que l'on peut en faire.



Sujet	Bilan *	Mes axes de progrès
Sujet 1 – Organisation générale : organisation de la production, ordre, signalisation, accueil, porteur d'enjeu santé et sécurité au travail.	E0 :	Informar les nouveaux arrivants sur les lieux de rassemblement.
	E1 :	
Sujet 2 – Évaluation des risques	E0 :	Information/sensibilisation de tous les acteurs. Reconnaître les situations à risque.
	E1 :	
Sujet 3 – Actions préventives : aménagement en sécurité des postes et des situations de travail	E0 :	Evaluer le risque pour chaque TP, et informer les personnes qui y travailleront.
	E1 :	
Sujet 4 – Traitement des situations d'urgence (accidents, incendies, ...) et analyse des incidents, anomalies, accidents du travail	E0 :	Accessibilité aux trousses de 1er secours. Accessibilité au défibrillateur.
	E1 :	
Sujet 5 – Vérifications périodiques réglementaires et maintenance des équipements	E0 :	Etablir des plans de maintenance pour les équipements de travail.
	E1 :	
Sujet 6 – Attitude de l'entreprise vis-à-vis du recrutement des opérateurs (CDI, intérim, CDD, stagiaires, apprentis, ...)	E0 :	Etablir un livret d'accueil. Faire un "tour de présentation" des locaux.
	E1 :	
Sujet 7 – Formation continue en Santé et Sécurité au Travail, compétences, rôles, responsabilités	E0 :	Faire des réunions sécurité planifiées. Etablir des fiches d'expression du personnel.
	E1 :	
Sujet 8 – Achats (matériels, machines, matières, produits, constructions, services, ...), sous-traitance, chantiers	E0 :	Interroger les prestataires sur les mesures de sécurité mises en oeuvre.
	E1 :	
Sujet 9 – Santé au Travail et suivi médical	E0 :	Lister les postes les plus à risques avec le médecin du travail.
	E1 :	
Sujet 10 – Politique, objectifs, indicateurs, communication, valeurs en Santé et Sécurité au Travail	E0 :	A chaque nouveau TP, établir des audits avec les autres acteurs sécurité (CHSCT, MDT etc.)
	E1 :	

Fig.21 : Grille DIGEST représentant l'implication du laboratoire PRISME en matière de sécurité.

Au vu des résultats, la partie Automatique de PRISME, dont dépend notre simulateur, n'est pas si mal notée qu'il y paraît. S'alignant entre C et B sur la grille, les résultats ne présentent pas une grande disparité, si bien qu'on peut dire qu'il existe une conscience commune sur la question sécuritaire au sein du laboratoire.

Les insuffisances sont en fait dues à un manque d'information des différents acteurs sur les sujets de la sécurité. Ces insuffisances sont d'ailleurs en partie comblées par un apprentissage dû au hasard (les élèves qui évacuent l'établissement lors d'un exercice, vont connaître le lieu de rassemblement parce qu'ils suivent ceux qui le connaissent déjà, etc.), mais elles constituent l'axe de progression le plus important de cette enquête.

On peut donc conseiller à PRISME, de mettre en place des dispositifs tels que des panneaux d'informations, des livrets d'accueil pour les nouveaux arrivants, des réunions d'échange sécuritaires, etc. En un mot, d'avoir une politique de communication qui diffusera la connaissance des dangers, et la conduite à tenir à leurs égards.

Pour évaluer l'efficacité de ces mesures, une deuxième utilisation de la GRILLE est nécessaire, et permet de comparer les situations *a priori* et *a posteriori* leur mise en application.

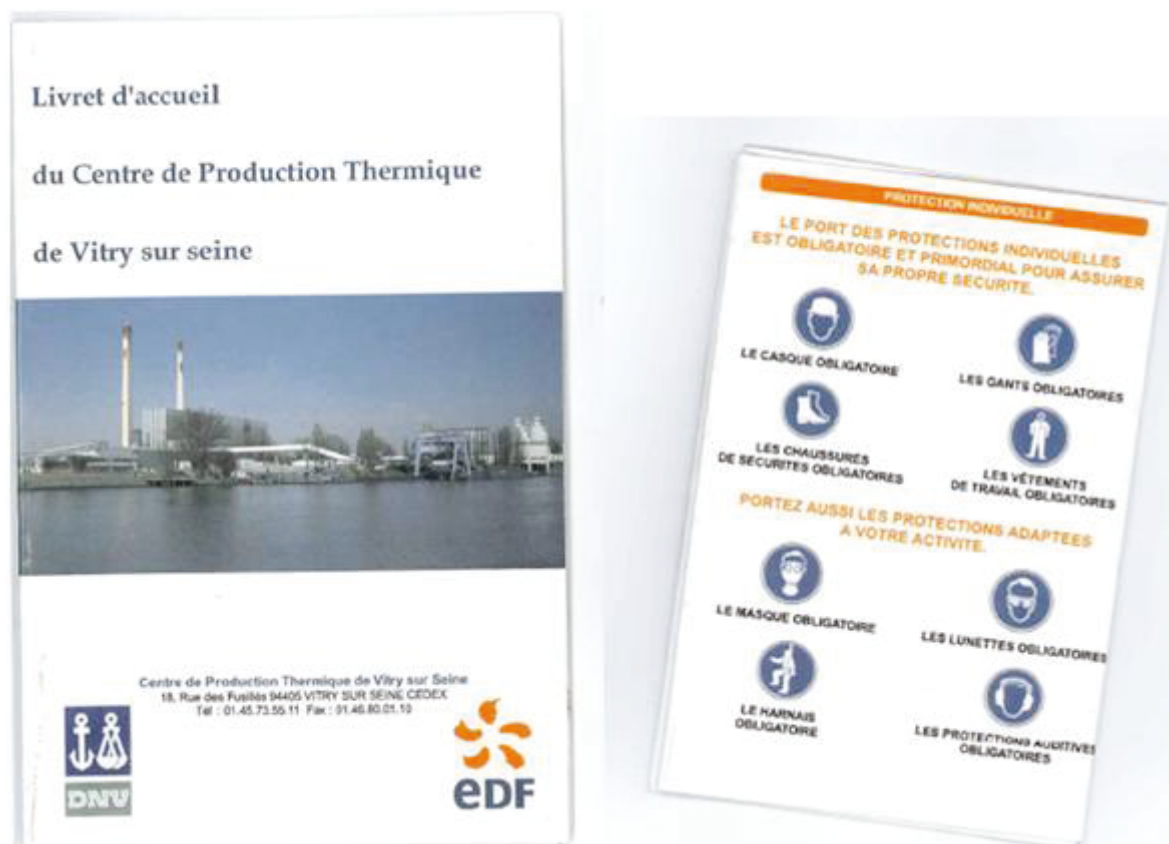


Fig.22 : Exemple de livret d'accueil diffusé en milieu industriel.

7.2.2 : Identification et classification des risques

Pour l'identification du risque, le législateur ne préconise aucun outil spécifique, chacun étant libre de choisir ce qui lui convient le mieux en fonction de ses besoins, et en la matière, l'offre est vaste.

Ayant comme objectif la certification du simulateur, il convenait de choisir un outil qui puisse s'appuyer sur la directive 2006/42/CE, de façon à rester proche de l'esprit de celle-ci. Des méthodes d'analyses extrêmement utilisées dans l'industrie (AMDEC, FM TIPS, sondages auprès des personnels, grilles INRS, etc.) ne répondaient pas complètement aux exigences de la directive, aussi un questionnaire listant les risques par rubrique, a spécialement été conçu pour le simulateur (annexe 2).

Ce questionnaire permet de répondre aux directives dictées par la norme, et ce rubrique après rubrique, ces directives sont d'ailleurs clairement nommées dans la marge de chaque tableau. De ce fait, en même temps que l'identification des risques se construit, il est mis en lumière les points sur lesquels il convient de travailler pour obtenir la certification.

Le questionnaire qui prend presque la forme d'une check-list, a tout de même le désavantage de ne pas établir une hiérarchisation des risques. Les risques ne sont donc pas classés fonction de leur occurrence et de leur gravité. Aussi, pour palier à ce manque, une AMDEC a également été réalisée (figure 23). En mêlant ces deux façon de faire, on peut à la fois identifier les risques (avec le questionnaire) et les classer (AMDEC), le questionnaire nous donne les actions à mener pour aller vers la certification, tandis que l'AMDEC propose les actions correctives à mettre en face de chaque risque.

Outre sa souplesse de mise en œuvre (puisque le questionnaire s'adapte à presque toutes les machines rencontrées en industrie), le questionnaire simplifie l'utilisation de l'AMDEC en la guidant de façon à éviter de se retrouver avec un trop grand nombre de lignes, n'ayant pas de rapport avec la certification désirée.

Après avoir complété le questionnaire et établi l'AMDEC, il résulte que les risques évalués, sont de nature extrêmement variée. Aux risques hydrauliques, se superposent les risques électriques, mécaniques, d'environnement, etc. Le questionnaire établit la liste de tous ces points, tandis que l'AMDEC les classe par degré d'importance.

Bref, il vient rapidement à l'esprit du technicien, qu'une refonte totale de la machine, de manière à juguler tous les risques relevés, va s'avérer nécessaire et plus efficace que d'entreprendre des réparations isolées, dont les conséquences sur l'analyse des risques restent incertaines.

46

7.2.3. Liens qui unissent l'implication des personnes à l'analyse des risques

Si la grille DIGEST permet d'exposer l'implication des personnes en matière de sécurité, on peut légitimement se poser la question des liens qui l'unisse avec l'AMDEC et le questionnaire de certification. De manière naturelle, on peut penser qu'un personnel impliqué est moins sujet aux accidents qui sont, en majorité, traités et circonscrits par l'analyse. Rien dans la législation n'oblige, d'ailleurs, à mesurer l'implication des personnes au niveau sécuritaire, et aucun outil d'analyse n'a démontré une efficacité supérieure à un autre en matière de prévention. Pourtant, de par le simple fait qu'un accident n'est jamais la conséquence d'un seul facteur mais d'une somme de facteurs favorables, le fait d'avoir mêlé implication et analyse, permet d'anticiper à un degré supérieur la survenue d'un accident.

Nous avons vu que la grille DIGEST montrait une certaine homogénéité, qui nous a permis de conclure à une sensibilité particulière en matière de sécurité. L'AMDEC et le questionnaire, ont au contraire mis le doigt sur les manques du simulateur sur ce même sujet. Il serait intéressant de mettre tous ces indicateurs sous la même forme, et de comparer leurs faiblesses respectives, ce qui industriellement parlant n'est jamais fait. Si les manques à la sécurité d'une méthode, venait à se superposer avec ceux d'une autre, alors il y aurait toutes les raisons d'y voir un alignement de facteurs conduisant à l'accident.

Les liens qui unissent toutes ces méthodes de prévention des risques apparaissent dès lors de façon plus évidente. En ajoutant une grille d'implication à une analyse des risques, il est plus facile d'identifier les « fenêtres de tir » qui mènent à un accident. Si les AMDEC et autres questionnaires et grilles, pointent des anomalies de façon indépendante, il convient d'y remédier. Mais si tous les indicateurs montrent la même anomalie, alors on est sûr du caractère d'urgence de celle-ci, l'expérience montrant que l'accident arrivera par là. L'intérêt d'utiliser plusieurs outils d'analyse prend alors tout son sens.

La superposition de ces deux méthodes originales, permet donc de dépasser les directives légales en matière de prévention du risque, dictée par le code du travail (art. L 4311-1)

7.2.4. Critique de la méthode d'analyse des risques

Rappelons-le, ce travail a été demandé par PRISME de façon à intégrer une expérience industrielle, sur un prototype de laboratoire. En mixant une méthode utilisée au quotidien (AMDEC) dans l'industrie métallurgique avec une autre spécialement créée pour la circonstance (questionnaire de certification), on peut penser avoir cerné tous les problèmes. Pourtant, si cela semble au premier abord, répondre convenablement à la législation et au besoin de sécurité, il subsiste des insuffisances graves qui doivent être expliquées.

Le simulateur de caténaire n'a pas pour origine l'industrie métallurgique, mais l'industrie des transports, et celle-ci, même si elle utilise des outils de prévention similaires, n'accorde pas la même valeur aux résultats obtenus par les analyses. Les entreprises de transport ont les mêmes obligations légales en matière de prévention des risques, mais elles dépassent les exigences réglementaires en rajoutant à leurs études des éléments qui peuvent nous sembler pour le moins folkloriques.

L'industrie des transports possède un historique d'accidentologie qui nuit considérablement à son image, et si l'utilisation d'outils de prévention des risques réduit les accidents, elle ne permet pas pour autant leur disparition totale. Ce ne sont que des outils d'aide à la décision, qui sont parfois dépassés par l'impalpable réalité des faits. Malgré des AMDEC, sûrement très sérieuses et très documentées, des accidents surviennent malgré tout sans qu'on ait pu les prévenir. En s'inspirant des méthodes utilisées par le monde des transports, et empruntées à une autre industrie, nous tenterons d'aller plus loin que l'analyse des risques qui a été faite.

Le monde du transport, pour dépasser les outils de prévision, s'est inspiré de l'industrie cinématographique, seule capable d'élaborer des scénarios, il est vrai rocambolesque, mais qui au vu des circonstances qui génèrent un accident, ne sont pas dénuées d'intérêt. A titre d'exemple, aucune AMDEC n'aurait pu prévoir les événements du 11 septembre 2001. C'est pourquoi, de plus en plus de scénaristes de films, se voient sollicités pour élaborer des cas de figure, certainement très peu probables, mais non absurdes. Les nouvelles éventualités trouvées, viennent enrichir les prévisions, et permettent d'avancer en matière de prévention des risques.

La façon dont a été faite la prévention des risques de ce travail, n'échappe pas à la règle, et donc, dans l'AMDEC qui a été faite, la dernière ligne (voir la figure 23) est toute droite sortie de notre imagination. Cette ligne a été élaborée non seulement à partir d'une observation sur la machine (une fuite), mais aussi à l'aide de la conséquence la plus dramatique que l'on désire éviter (une blessure corporelle grave). L'occurrence des faits est quasi nulle, mais la gravité due à l'explosion d'un tuyau, doublée par l'indétectabilité d'un tel phénomène, ne

sont pas des paramètres absurdes. Il s'agit de l'application directe, sur notre machine, de ce qui a été dit précédemment.

7.2.5. Description du « scénario à risque » propre au simulateur de caténaire

Conformément à ce qui se pratique dans le milieu des transports, un « scénario » d'accident quasi unimaginable, a été incorporé dans l'AMDEC (dernière ligne de la figure 23). Décrivons-le.

Les chapitres antérieurs, ont dénoncés la disproportion du moteur électrique entraînant la pompe hydraulique, la mauvaise adaptabilité de celle-ci pour un usage d'enseignement, et les dysfonctionnements du système de régulation de pression (CDA) qui lui est associé. A partir de ces éléments, un enchainement d'évènements peut se mettre en place et provoquer des dommages que n'aurait pu prédire une AMDEC classique.

En imaginant un grippage du système de régulation de pression, due à l'action corrosive du liquide hydraulique (fluide LMH), aucun organe de sécurité ne viendrait interrompre l'action du moteur électrique qui continuerait d'actionner la pompe de façon continue. Cette même pompe, n'étant plus régulée, ferait monter le circuit à une pression très élevée, qui au mieux, causerait une fuite, et qui au pire provoquerait une rupture brutale catastrophique du circuit. Du fait de l'incompressibilité de l'huile, ce phénomène serait très rapide, et qui plus est, indétectable.

Ce phénomène, rappelons-le très improbable, pourrait avoir des conséquences dramatiques, on n'ose pas imaginer les conséquences sur un corps humain de gouttes d'huile expulsées du circuit sous plusieurs centaines de bars de pression. Toutes les fuites du système hydraulique doivent donc nous alerter, et il faut se poser la question de leurs causes. Dans le cas d'une surpression, une fuite peut constituer une échappatoire à un excès de pression, et donc l'accident pourrait arriver après une réparation, ce qui le rendrait d'autant plus sournois.

Le déroulement de l'accident peut être représenté de la façon suivante :

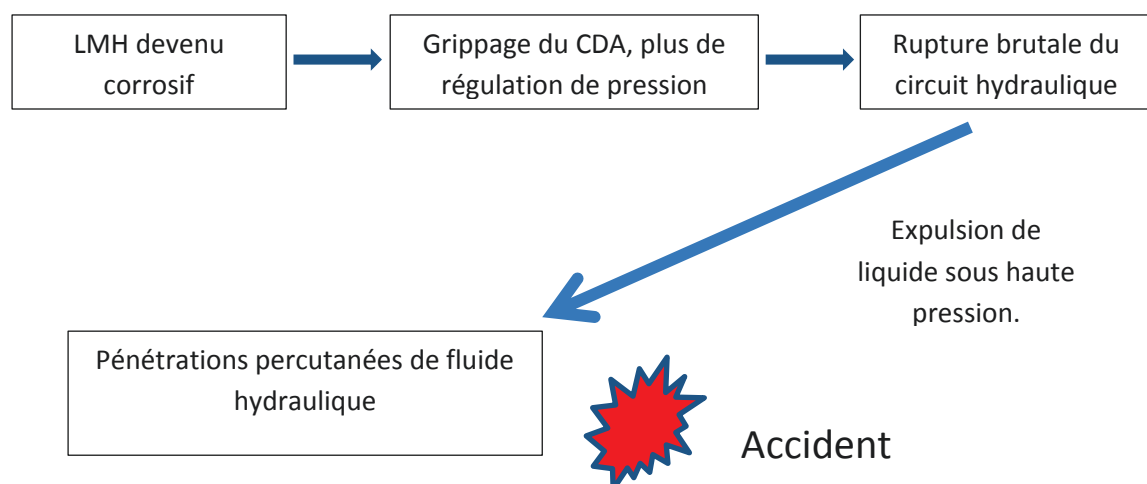


Fig.24 : L'enchainement qui provoque un accident imprévisible.

Un tel scénario impose d'y regarder à deux fois avant toute intervention sur une fuite, celle-ci étant, nous l'avons vu, favorable à une réduction du risque de surpression. La fuite décelée sur la machine est localisées au niveau du raccord électrovanne/circuit, et plus précisément, au niveau du joint équipant ce raccord. Un autre élément est donné par le fait que la fuite n'est visible que lorsque la machine est en fonctionnement, soit uniquement lorsque le circuit est en pression, et que les capacités du joint sont dépassées.

Les changements de joints réalisés par le technicien en charge de la machine, n'ont pas apportés d'améliorations définitives de la situation, laissant penser que notre hypothèse d'une surpression dans le circuit est plausible. L'usure des joints par vieillissement, est donc une éventualité que l'on peut exclure.

On ne peut cependant rien dire sur une ruine brutale des canalisations due à une éventuelle surpression, en effet, si l'on applique la formule du chaudronnier, tel que :

$$e = \frac{PR}{\delta y}$$

Avec :

e = épaisseur des parois de la canalisation en Mètres.

P = pression du circuit, en MPA.

δy = contrainte à la rupture du matériau en MPA (on considère cette contrainte comme étant égale à la limite élastique dans notre cas).

Il vient :

$$P = \frac{e\delta y}{R}$$

Ce qui avec les données suivantes :

Conduite de 6 mm de diamètre, soit de rayon $R=3\text{mm}$

Epaisseur de la paroi de la conduite de 0.6 mm

$\delta y = 400$ MPA pour une conduite en alliage d'aluminium.

Nous trouvons une pression maxi supportable par la conduite de 80 MPA, soit 800 bars, chiffre invérifiable, mais qui laisse croire à une grande résistance à la pression de la conduite.

Si le calcul à l'aide de la formule du chaudronnier, laisse croire à la solidité des conduites hydrauliques, on ne peut que constater les fuites présentes, malgré tout, sur la machine. Cette observation ne permet pas de dire que la dernière ligne ajoutée à notre AMDEC, et issue du fruit de notre imagination, soit absurde dans la mesure où il est certain que notre machine souffre de cette panne récurrente. Une cause indéterminée détruit les joints du simulateur, et il subsiste une forte présomption de l'existence de « pics » de pression fugaces, qui sans mettre à mal le circuit lui-même, détériorent les points les plus faibles de celui-ci, à savoir les joints.

L'existence de ces pics de pression, pourrait être démontrée en installant sur le circuit des capteurs suffisamment réactifs pour intercepter ce qui s'apparente, non pas à un signal, mais à du « bruit ». Il va sans dire que cette expérience, même si elle s'avérait concluante, ne ferait que conforter l'idée, générée par l'analyse des risques, qu'une reconception de la machine reste nécessaire, rendant caduque la nécessité d'acheter le matériel nécessaire pour l'entreprendre.

7.3. Conclusion sur l'analyse des risques

Nous sommes tous conscient du fait qu'une activité, quelle qu'elle soit, implique un risque. Professionnellement parlant, nous sommes tous convaincus d'œuvrer de façon à contenir ces risques, et nous pensons même les maîtriser. Cependant, la littérature spécialisée insiste sur le fait qu'il n'en est rien, et que notre nature même nous fait préférer le risque à la contrainte. Si se protéger du risque (une électrocution) implique une contrainte (descendre trois étages pour couper l'électricité), le risque sera toujours choisi. L'action du législateur, qui a dû imposer la prévention des risques, prouve que dans ce domaine il est nécessaire de forcer les choses pour nous contraindre tous, à intégrer la notion de sécurité.

En superposant deux méthodes de prévention (questionnaire et AMDEC), le but était de dépasser les directives légales en matière de prévention du risque dictée par le code du travail (art. L 4311-1). Ces directives légales ne doivent d'ailleurs être regardées que comme un minimum de ce qui doit être fait pour prévenir les accidents, et pourtant, rares sont les entreprises et les laboratoires qui vont au-delà de ce qui est décrété légalement.

Lister et classer les risques, n'est pas suffisant pour faire naître une conscience sécuritaire collective forte chez PRISME. Chacun voit mieux les situations à risques dans lesquelles se trouvent les autres, que la sienne propre. Aussi, la grille DIGEST en cernant cela, permet de penser le laboratoire, non plus comme une somme de personnes plus ou moins impliquées sécuritairement, mais comme une communauté dans laquelle chacun est responsable de la sécurité de l'autre. Ainsi, le facteur humain s'intègre à l'étude, et vient lui donner une dimension supplémentaire.

Dans ce travail, et à travers cette analyse des risques, ce qui a voulu être prouvé, c'est que la notion de sécurisation d'une machine, chose nécessaire à la certification, est un travail plus complexe qu'il n'y paraît, et pour lequel l'application stricte des méthodes de prévention est insuffisante. La prévention des risques est une activité aux facteurs multiples, qui est difficile à appréhender, et qui tend à dépasser l'intelligence de ceux qui la mettent en œuvre.

L'esprit qui a voulu être insufflé ici, est qu'en aucune façon on ne pourra prédire toutes les risques inhérents à notre simulateur, ni d'ailleurs ceux d'aucune autre machine. Sachant cela, il faut voir l'étude de risque, non pas comme un travail figé fait pendant la conception d'une machine, mais comme une tâche continue, inachevée, qui se meut à mesure de l'expérience et de la connaissance acquise sur les éléments auxquels elle s'applique. Si cet esprit prend racine au sein du laboratoire PRISME, alors il aura à lui seul démontré l'utilité de ce travail.

8. Propositions de voies d'amélioration

D'après les criticités révélées par l'AMDEC, il convient de proposer des mesures visant à améliorer les cases colorées de rouge, et donc notées avec les valeurs les plus fortes. Celles-ci sont d'ailleurs (exception faite de la cinquième ligne) toutes en relation avec la partie hydraulique du simulateur, et font état de défauts électriques, de fuites par surpression, etc.

Réparer les défauts constatés sur la partie hydraulique, conduirait sans doute à une amélioration de la machine, mais ne permettrait pas d'avancer vers la certification. Aussi, la solution la plus simple consiste à mettre en place un nouveau groupe hydraulique dédié, pourvu d'un système de régulation incorporé, sans entretien, et donc adapté au mieux à une utilisation dans le simulateur.



Fig.25 : Exemple de groupe hydraulique autorégulé.

Pour pouvoir équiper notre simulateur, un groupe hydraulique tel que celui illustré sur la figure 24, devra disposer d'un moteur monophasé, d'une pompe plus silencieuse, d'une régulation interne sans entretien, et devra fonctionner avec une huile neutre (non corrosive dans le temps), sous basse pression (20 bars environ), et sans carterisation. L'implantation

de ce type de groupe dans le simulateur, réduira la criticité de cinq lignes de l'AMDEC, prouvant ainsi son efficacité.

Par ailleurs, Mr Bruno BONHEUR, responsable financier de ce projet, a exprimé la nécessité de revoir la partie électrique du simulateur. Il avait identifié celle-ci comme étant potentiellement source de pannes, ce point étant d'ailleurs relevé dans l'AMDEC. Aussi, si on ne peut incriminer le câblage de la machine quant à son efficacité fonctionnelle, on ne peut pas dire que celui-ci ait été effectué dans toutes les règles de l'art (voir figure 7).

Pour corriger le manque de rigueur dans l'implantation du câblage de la machine, sans toutefois nuire à sa fonctionnalité avérée, il a été proposé à PRISME la conception d'une armoire électrique. Il va sans dire que cette armoire, en plus de reprendre de façon nette le câblage, devra intégrer de nouveaux organes de sécurité destinés à la rendre compatible avec la directive machine 2006/42/CE.

Le questionnaire d'identification des risques nous permet de dire que l'armoire électrique devra incorporer un sectionneur de tension et un relai de sécurité XPS, pour ce qui est des organes de sécurité, et que tous les éléments extérieurs devront être intégrés dans l'armoire elle-même. L'idée de proposer la création d'une armoire électrique, permet ainsi de soustraire les parties électriques « à risques » des possibles interventions des étudiants.

Au final, nous pouvons dire que pour améliorer notre simulateur en termes de sécurité tout en le rendant « certifiable », il faut l'équiper :

- D'un groupe hydraulique spécifique.
- D'une armoire intégrant tous les organes électriques.

8.1 Critique des améliorations envisagées

8.1.1. Critiques du groupe hydraulique

Le groupe hydraulique qui convient à l'amélioration de notre machine doit, rappelons-le, disposer d'un moteur électrique monophasé, d'une pompe silencieuse, d'une régulation interne sans entretien, et fonctionner avec une huile non corrosive. Tous ces critères de sécurité sont impératifs pour pouvoir enlever le carter métallique, lui-même source de risque, pour qu'au final le groupe hydraulique soit conforme à ce que dicte l'AMDEC. Mais la tarification des équipements étant souvent liée aux spécificités de ceux-ci, il est à craindre qu'en les multipliant, on finisse par provoquer une explosion du tarif qui causerait une remise en cause du projet.

Rappelons ici, qu'aucun budget n'a été défini pour modifier le simulateur, et que chaque proposition d'achat passe par l'accord de Mr BONHEUR, qui en tant que responsable financier, peut considérablement restreindre la portée de cette étude en n'accordant pas les financements demandés.

Un autre point concerne l'amélioration des conditions sonores de notre machine, qui reste pour le moment, un critère indéterminé. Les spécialistes en hydraulique contactés, ne peuvent garantir la fourniture d'un matériel silencieux, à cause de l'originalité même de celui-ci. En effet, le groupe hydraulique, sera construit spécifiquement en fonction des besoins précisés au fournisseur, il sera donc une machine unique dont on ne connaîtra les caractéristiques sonores, que lorsqu'elle sera palpable physiquement.

Sur ce point, les conditions techniques imposées aux fournisseurs se retournent contre nous, et nous ne pouvons pas de dire, *a priori*, si la modification du groupe apportera une amélioration du confort auditif. Si cela était avéré, un carter d'insonorisation devra être installé, et ses effets devront être intégrés dans l'analyse des risques. Là aussi, on ne peut prédire l'innocuité d'un tel carter sans l'avoir physiquement en main.

L'autre grande indétermination liée au changement du groupe hydraulique, est sa compatibilité avec la partie régulation. Il a été dit au cours de ce travail (voir page 21), que chaque système de régulation doit faire l'objet d'essais afin d'être validé sur un équipement. Dans notre cas, il est certain que la régulation devra être ajustée en fonction des caractéristiques du nouveau système hydraulique. Cette indétermination peut cependant être tempérée de par la souplesse qu'autorise le mode de programmation du simulateur, mais là aussi les doutes ne peuvent être levés à l'avance.

8.1.2. Critique de la partie électrique

La nouvelle partie électrique dont on se propose d'équiper le simulateur, est beaucoup moins sujet à la critique négative que la partie hydraulique. En effet, si le questionnaire de certification relève un manque d'éléments propre à la sécurité (sectionneurs, relai de sécurité), et que l'AMDEC pointe de possibles contacts avec des fils nus (toutefois, ces fils ne sont parcourus que par de faibles voltages et de faibles intensités), tous ces défauts seront définitivement gommés par l'installation de l'armoire électrique.

Une amélioration devra tout de même pouvoir être rajoutée à notre armoire, et consistera à percer des trous latéraux sur celle-ci, de façon à créer des sorties électriques isolées, sur lesquelles pourraient se brancher des cartes d'acquisitions de données.

Même si les équipements électriques restent chers, les responsables de PRISME ont une grande connaissance de ce milieu, et sont de ce fait favorables à son évolution. Mr Bruno BONHEUR avait lui-même soulevé les anomalies électriques révélées par l'AMDEC, et l'on peut considérer que l'amélioration de ce point a toujours fait l'unanimité autour de lui.

9. Validation du portique et compatibilité avec le groupe autorégulé

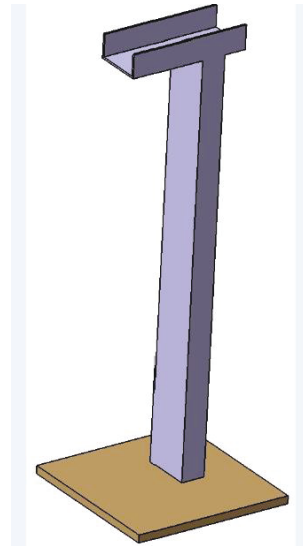


Fig.26 : structure étudiée, représentée sous CATIA.

La certification 2006/42/CE, nécessite que les études réalisées sur les machines soient disponibles pour d'éventuelles vérifications. Dans ce travail, et puisqu'il s'agit d'un mémoire réalisé en vue d'obtenir un diplôme de mécanique, nous nous proposons d'étudier le portique afin de valider sa compatibilité avec le groupe hydraulique que l'on veut installer.

Ce portique, fabriqué sans aucun calcul, n'a jamais été mis en doute quant à sa solidité, et l'objectif de l'étude mécanique qui suivra, n'est pas tant de démontrer son bon dimensionnement, que de fournir à PRISME un document technique. Ici, l'aspect mécanique sera vu, mais PRISME pourra compléter son dossier de certification en produisant d'autres documents portés sur des aspects techniques différents (électriques, automatiques, etc.).

Si l'on tient compte de la force normalement développée par le vérin hydraulique, déterminée comme suit :

$$F = P \times S \quad \text{avec :}$$

F = force en DaN

S = surface du piston du vérin (face sans tige), en cm².

P = pression de la pompe en bars.

En prenant P = 20 bars et S = 12.56 cm² (vérin de 4 cm de diamètre), On trouve :

$$F = 251.2 \text{ DaN}$$

9.1. Méthode dite des « déformée »

En appliquant la force calculée précédemment à notre structure, on peut représenter le système de la façon suivante[10] :

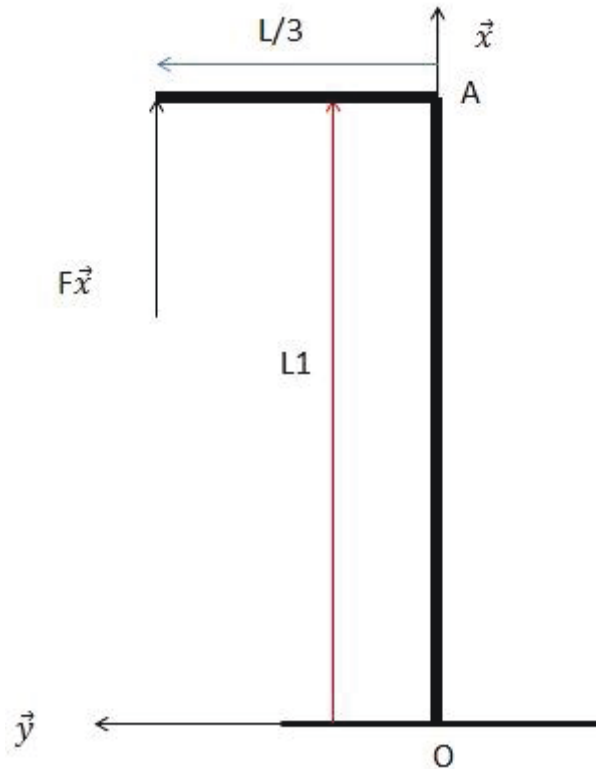


Fig.27 : Représentation du problème.

Pour étudier la structure, on considère que la structure est composée de la poutre **OA** de longueur **L**, et de la poutre **AB** de longueur **L/3**. Ces poutres ont le même module d'YOUNG **E** et le même moment quadratique **I**.

Ces poutres sont soudées entre elles au point **A**, selon un angle droit que l'on considère parfait, et l'ensemble de la structure est encastré en **O**.

On soumet la structure à l'action du vérin, qui transmet une force $\vec{F_x}$ (avec $F > 0$) au point d'application B.

Le repère $(O, \vec{x}, \vec{y}, \vec{z})$ est associé à la structure.

Ce qui permet d'écrire le torseur des efforts portés par la structure:

$$\{\Delta\}_B = \begin{Bmatrix} F\vec{x} \\ \vec{0} \end{Bmatrix}$$

On considère, puisque la structure ne cède pas, que le torseur des efforts est égal au torseur des efforts de cohésion [11].

$$\{\Delta\}_B = \{K\}$$

Si l'on étudie la poutre OA :

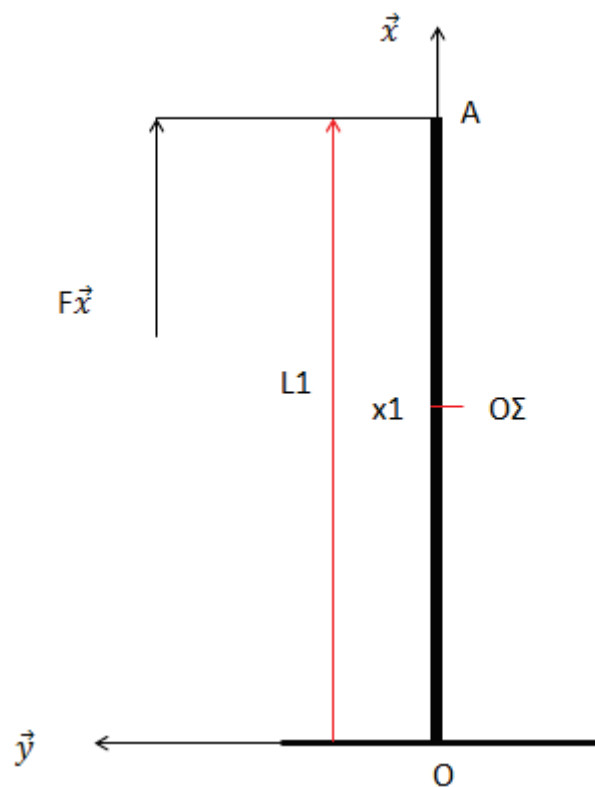


Fig.28 : Etude de la poutre OA

La résultante (ou somme) du torseur de cohésion est égale à $\vec{S}\{k\} = F\vec{x}$, ce qui nous permet d'écrire directement l'effort axial et l'effort tranchant :

$$N1 = F \quad \text{et} \quad T1 = 0$$

Et le moment en $O\Sigma$ du torseur des efforts donnés est égal à :

$$\overrightarrow{MO\Sigma} \{ \Delta \} = \overrightarrow{O\Sigma B} \wedge \vec{S} \{ \Delta \}$$

Avec : $\overrightarrow{O\Sigma B} = \overrightarrow{OB} - \overrightarrow{O O\Sigma} = (\overrightarrow{OA} + \overrightarrow{AB}) - \overrightarrow{O O\Sigma}$

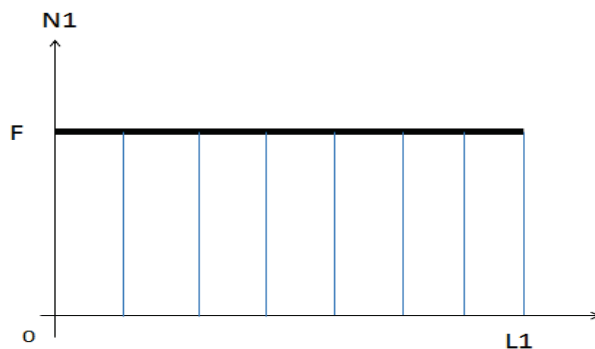
$$\overrightarrow{OA} = L1 \vec{x} \quad \overrightarrow{AB} = L2 \vec{y} \quad \overrightarrow{O O\Sigma} = x1 \vec{x}$$

Donc : $\overrightarrow{O\Sigma B} = (L1 \vec{x} + L2 \vec{y}) - x1 \vec{x}$

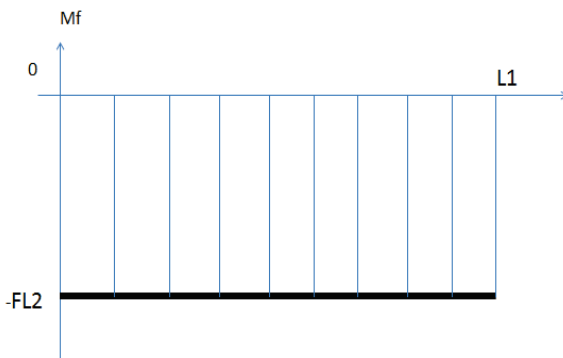
Ce qui fait : $\overrightarrow{MO\Sigma} \{ \Delta \} = [(L1 - x1)\vec{x} + L2 \vec{y}] \wedge F\vec{x} = -FL2 \vec{z}$

Le moment de flexion est donc donné directement : $Mf = -FL2$

La poutre OA est donc sollicitée en compression et en flexion.



Effort axial.



Moment de flexion

Fig.29 : Diagrammes des efforts axiaux et des moments de flexion.

A partir de la relation unissant le moment de flexion et la courbure, et en appelant v_1 le déplacement de la poutre, on peut écrire :

$$\frac{d^2 v_1}{dx_1^2} = \frac{M_f}{EI} = \frac{-FL}{EI}$$

Puis par intégration, on retrouve la pente de la déformée :

$$\frac{dv_1}{dx_1} = \frac{-FL}{EI} (x_1 + C_1)$$

Avec une nouvelle intégration, on obtient la déformée :

$$V_1 = \frac{-FL}{EI} \left(\frac{x_1^2}{2} + C_1 x_1 + D_1 \right)$$

Et en se plaçant à l'encastrement, soit au point 0, on détermine les constantes d'intégration C_1 et D_1 .

$$V_1(0) = 0 \quad \text{et} \quad \frac{dV_1}{dx_1}(0) = 0$$

$$\text{D'où :} \quad C_1 = 0 \quad \text{et} \quad D_1 = 0$$

Et finalement,

$$V_1 = \frac{-FL}{2EI} x_1^2 \quad \text{et} \quad \frac{dv_1}{dx_1} = \frac{-FL}{EI} x_1$$

Pour l'extrémité A de la poutre, telle que $x_1 = L_1$, on trouve :

$$V_1 = \frac{-FL}{2EI} L_1^2 \quad \text{et} \quad \frac{dv_1}{dx_1} = \frac{-FL}{EI} L_1$$

Si l'on étudie la poutre AB :

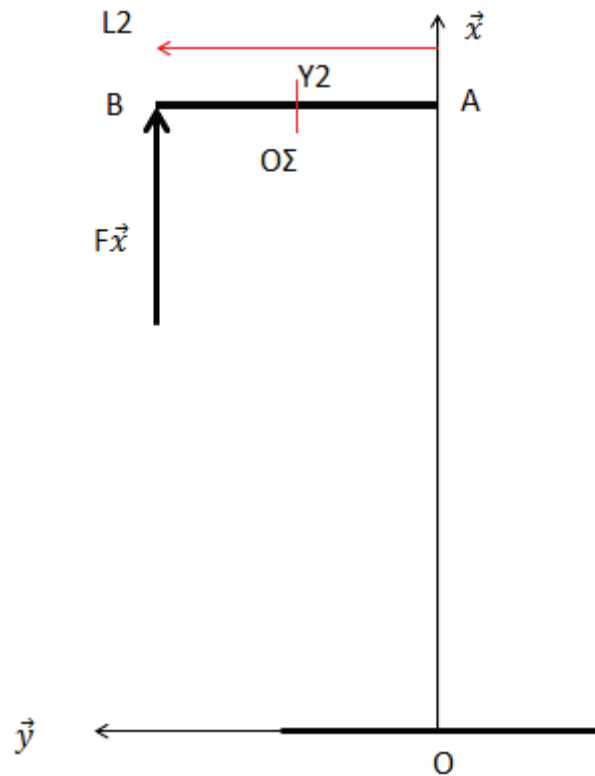


Fig.30 : Etude de la poutre AB.

Pour la poutre AB, le torseur des efforts donnés a pour expression :

$$\{\Delta\}_B = \left\{ \begin{matrix} F\vec{x} \\ \vec{0} \end{matrix} \right\}$$

Et là aussi, le torseur des efforts portés par la structure est égal au torseur des efforts de cohésion :

$$\{\Delta\}_B = \{K\}$$

La résultante du torseur de cohésion, nous donne immédiatement la valeur de l'effort tranchant T2 :

$$T_2 = F$$

Le moment en $O\Sigma$ du torseur des efforts de la structure est donné par :

$$\overrightarrow{MO\Sigma} \{ \Delta \} = \overrightarrow{O\Sigma B} \wedge \vec{S} \{ \Delta \}$$

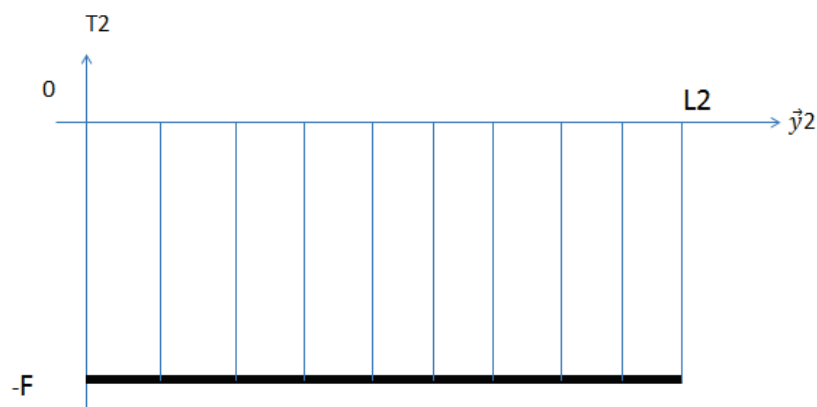
Avec : $\overrightarrow{O\Sigma B} = \overrightarrow{AB} - \overrightarrow{AO\Sigma} = (L2-Y2) \vec{y}$

Donc : $\overrightarrow{MO\Sigma} \{ \Delta \} = (L2-Y2) \vec{y} \wedge F \vec{x}$

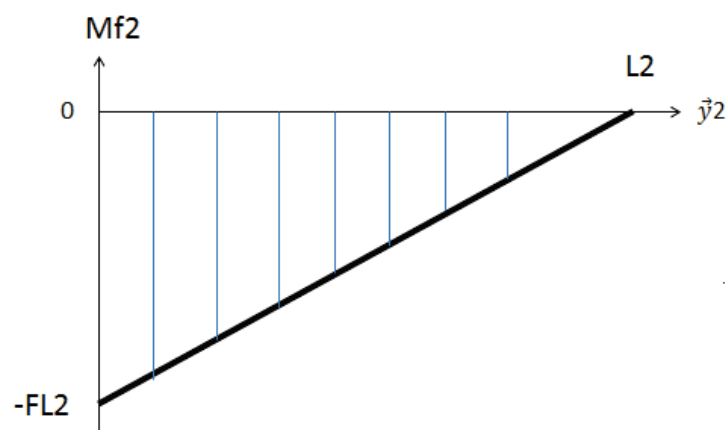
Soit : $\overrightarrow{MO\Sigma} \{ \Delta \} = -(L2-Y2) F \vec{z}$

D'où le moment de flexion : $Mf2 = -F (L2-Y2)$

La poutre **AB** est donc sollicitée en cisaillement et en flexion.



Effort tranchant



Moment de flexion

Fig.31 : Diagrammes des efforts tranchants et des moments de flexion.

Puis, en appelant v_2 le déplacement de la poutre, et par intégration de :

$$\frac{d^2 v_2}{dy_1^2} = \frac{M f_2}{EI} = \frac{-F}{EI} (L_2 - y_2)$$

Il vient la pente de la déformée :

$$\frac{dv_2}{dy_2} = \frac{-F}{EI} \left(L_2 y_2 - \frac{y_2^2}{2} + C_2 \right)$$

Puis la déformée:

$$v_2 = \frac{-F}{EI} \left(\frac{L_2 y_2^2}{2} + \frac{y_2^3}{6} + C_2 y_2 + D_2 \right)$$

On peut déterminer les deux constantes d'intégration C_2 et D_2 en s'aidant des conditions de raccordement situées point A :

$$v_2(0) = 0 \quad \text{et} \quad \frac{dv_2(0)}{dy_2} = \frac{dv_1}{dx_1}$$

Qui donne par identification :

$$D_2 = 0 \quad \text{et} \quad \frac{-F}{EI} C_2 = \frac{-FL_1 L_2}{EI}$$

Donc $C_2 = L_1 L_2$

On obtient donc les expressions suivantes :

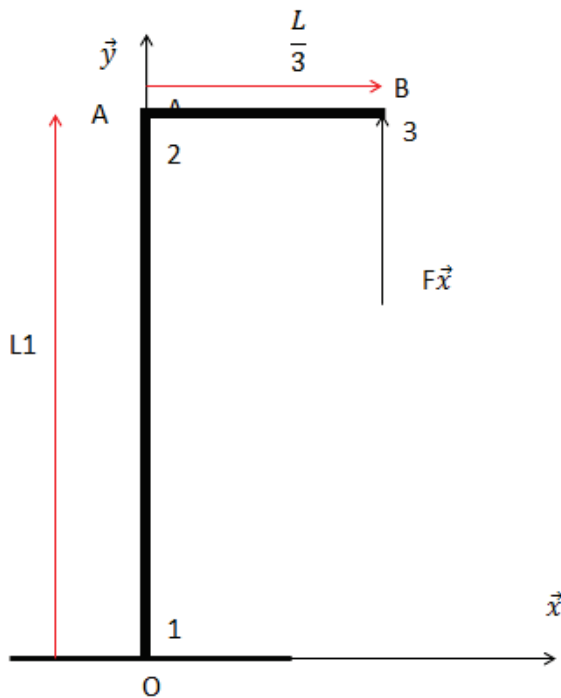
$$v_2 = \frac{-F}{6EI} y_2 (3 L_2 y_2 - y_2^2 + 6 L_1 L_2) \quad \text{et} \quad \frac{dv_2}{dy_2} = \frac{-F}{2EI} (2 L_2 y_2 - y_2^2 + 2 L_1 L_2)$$

Et comme à l'extrémité B de la poutre AB on B=L2, on peut écrire :

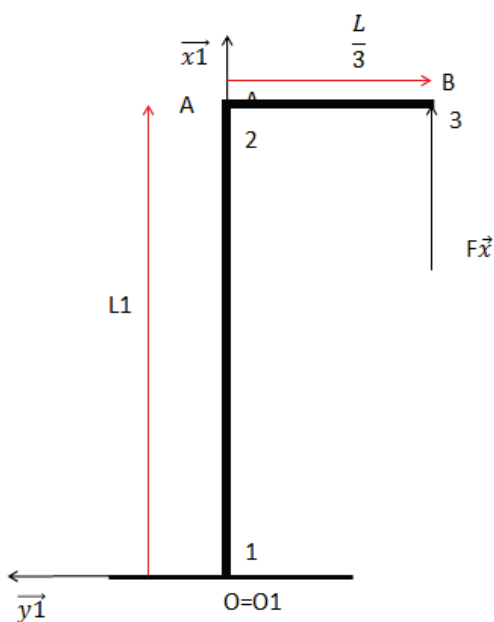
$$v_2(L_2) = \frac{-FL_2^2(3L_1+L_2)}{3EI} \quad \text{et} \quad \frac{dv_2}{dy_2}(L_2) = \frac{-FL_2(2L_1+L_2)}{2EI}$$

9.2. Méthode discrétisée

En prenant les repères suivants [12] :

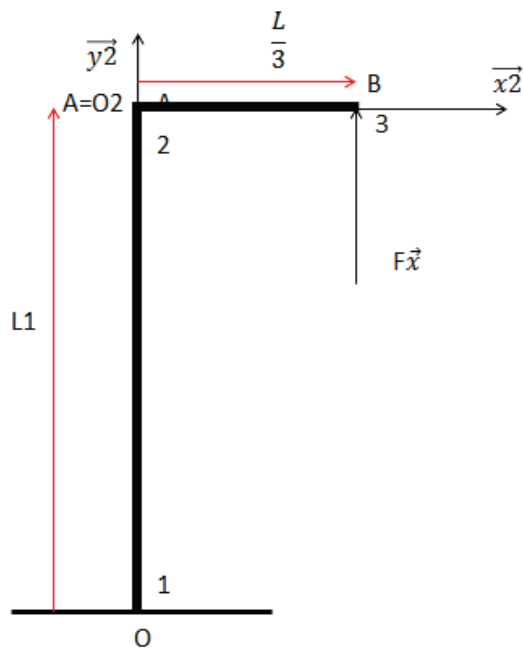


Repère global ($o/\vec{x}, \vec{y}, \vec{z}$)



Repère local ($o_1/\vec{x}_1, \vec{y}_1, \vec{z}_1$)

Servant à étudier (1-2)



Repère local $(o_2/\vec{x}_2, \vec{y}_2, \vec{z}_2)$
Servant à étudier (2-3)

Et en considérant les sept déplacements nodaux $U_1, \Theta_1, U_2, V_2, \Theta_2, V_3, \Theta_3$, on écrit :

Pour l'élément (1-2) :

$$-\delta W_i^{(1,2)} = [\delta v_1 \quad \delta \theta_1 \quad \delta v_2 \quad \delta \theta_2] \frac{EI}{l^3} \begin{bmatrix} 12 & 6l & -12 & 6l \\ 6l & 4l^2 & -6l & 2l^2 \\ -12 & -6l & 12 & -6l \\ 6l & 2l^2 & -6l & 4l^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1 \\ \theta_1 \\ v_2 \\ \theta_2 \end{bmatrix},$$

avec $U_1 = -v_1$, $U_2 = -v_2$, $\Theta_1 = \theta_1$ et $\Theta_2 = \theta_2$, l'expression précédente s'écrit :

$$-\delta W_i^{(1,2)} = [-\delta U_1 \quad \delta \Theta_1 \quad -\delta U_2 \quad \delta \Theta_2] \frac{EI}{l^3} \begin{bmatrix} 12 & 6l & -12 & 6l \\ 6l & 4l^2 & -6l & 2l^2 \\ -12 & -6l & 12 & -6l \\ 6l & 2l^2 & -6l & 4l^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -U_1 \\ \Theta_1 \\ -U_2 \\ \Theta_2 \end{bmatrix},$$

soit :

$$-\delta W_i^{(1,2)} = [\delta U_1 \quad \delta \Theta_1 \quad \delta U_2 \quad \delta \Theta_2] \frac{EI}{l^3} \begin{bmatrix} 12 & -6l & -12 & -6l \\ -6l & 4l^2 & 6l & 2l^2 \\ -12 & 6l & 12 & 6l \\ -6l & 2l^2 & 6l & 4l^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1 \\ \Theta_1 \\ U_2 \\ \Theta_2 \end{bmatrix}.$$

Pour l'élément (2,3), on obtient :

$$\begin{aligned} -\delta W_i^{(2,3)} &= [\delta v_2 \quad \delta \theta_2 \quad \delta v_3 \quad \delta \theta_3] \dots \\ &\dots \times \frac{27EI}{l^3} \begin{bmatrix} 12 & 2l & -12 & 2l \\ 2l & 4l^2/9 & -2l & 2l^2/9 \\ -12 & -2l & 12 & -2l \\ 6l & 2l^2/9 & -2l & 4l^2/9 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_2 \\ \theta_2 \\ v_3 \\ \theta_3 \end{bmatrix} \dots \\ &\dots = [\delta v_2 \quad \delta \theta_2 \quad \delta v_3 \quad \delta \theta_3] \frac{EI}{l^3} \begin{bmatrix} 324 & 54l & -324 & 54l \\ 54l & 12l^2 & -54l & 6l^2 \\ -324 & -54l & 324 & -54l \\ 54l & 6l^2 & -54l & 12l^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_2 \\ \theta_2 \\ v_3 \\ \theta_3 \end{bmatrix}, \end{aligned}$$

puis avec $V_2 = v_2$, $V_3 = v_3$, $\Theta_2 = \theta_2$ et $\Theta_3 = \theta_3$:

$$-\delta W_i^{(2,3)} = [\delta V_2 \quad \delta \Theta_2 \quad \delta V_3 \quad \delta \Theta_3] \frac{EI}{l^3} \begin{bmatrix} 324 & 54l & -324 & 54l \\ 54l & 12l^2 & -54l & 6l^2 \\ -324 & -54l & 324 & -54l \\ 54l & 6l^2 & -54l & 12l^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_2 \\ \Theta_2 \\ V_3 \\ \Theta_3 \end{bmatrix}$$

Après assemblage, le travail virtuel des efforts internes de la structure s'écrit :

$$-\delta W_i = [\delta U_1 \quad \delta \Theta_1 \quad \delta U_2 \quad \delta V_2 \quad \delta \Theta_2 \quad \delta V_3 \quad \delta \Theta_3] \dots$$

$$\dots \times \frac{EI}{l^3} \begin{bmatrix} 12 & -6l & -12 & 0 & -6l & 0 & 0 \\ -6l & 4l^2 & 6l & 0 & 2l^2 & 0 & 0 \\ -12l & 6l & 12 & 0 & 6l & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 324 & 54l & -324 & 54l \\ -6l & 2l^2 & 6l & 54l & 16l^2 & -54l & 6l^2 \\ 0 & 0 & 0 & -324 & -54l & 324 & -54l \\ 0 & 0 & 0 & 54l & 6l^2 & -54l & 12l^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1 \\ \Theta_1 \\ U_2 \\ V_2 \\ \Theta_2 \\ V_3 \\ \Theta_3 \end{bmatrix}.$$

Et le travail virtuel des efforts donnés (efforts du vérin) :

$$\delta W_F^{(2,3)} = F \delta v_3 = [\delta v_2 \quad \delta \theta_2 \quad \delta v_3 \quad \delta \theta_3] \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ F \\ 0 \end{bmatrix},$$

avec $V_2 = v_2$, $V_3 = v_3$, $\Theta_2 = \theta_2$ et $\Theta_3 = \theta_3$, on a :

$$\delta W_F^{(2,3)} = [\delta V_2 \quad \delta \Theta_2 \quad \delta V_3 \quad \delta \Theta_3] \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ F \\ 0 \end{bmatrix},$$

soit :

$$\delta W_F = [\delta U_1 \quad \delta \Theta_1 \quad \delta U_2 \quad \delta V_2 \quad \delta \Theta_2 \quad \delta V_3 \quad \delta \Theta_3] \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ F \\ 0 \end{bmatrix}$$

Les efforts de liaison s'écrivent :

$$\delta W_L = x_1 \delta u_1 + y_1 \delta v_1 + n_1 \delta \theta_1,$$

soit avec $u_1 = V_2$, $v_1 = -U_1$ et $\Theta_1 = \theta_1$, ainsi que $x_1 = Y_1$, $y_1 = -X_1$ et $n_1 = N_1$:

$$\delta W_L = X_1 \delta U_1 + Y_1 \delta V_2 + N_1 \delta \Theta_1,$$

puis :

$$\delta W_F = \begin{bmatrix} \delta U_1 & \delta \Theta_1 & \delta U_2 & \delta V_2 & \delta \Theta_2 & \delta V_3 & \delta \Theta_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ N_1 \\ 0 \\ Y_1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}.$$

Nous pouvons maintenant écrire la formulation variationnelle pour toute la structure :

$$\begin{aligned}
 & [\delta U_1 \quad \delta \Theta_1 \quad \delta U_2 \quad \delta V_2 \quad \delta \Theta_2 \quad \delta V_3 \quad \delta \Theta_3] \dots \\
 & \dots \times \left\{ \frac{EI}{l^3} \begin{bmatrix} 12 & -6l & -12 & 0 & -6l & 0 & 0 \\ -6l & 4l^2 & 6l & 0 & 2l^2 & 0 & 0 \\ -12l & 6l & 12 & 0 & 6l & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 324 & 54l & -324 & 54l \\ -6l & 2l^2 & 6l & 54l & 16l^2 & -54l & 6l^2 \\ 0 & 0 & 0 & -324 & -54l & 324 & -54l \\ 0 & 0 & 0 & 54l & 6l^2 & -54l & 12l^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1 \\ \Theta_1 \\ U_2 \\ V_2 \\ \Theta_2 \\ V_3 \\ \Theta_3 \end{bmatrix} \dots \right. \\
 & \left. \dots - \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ F \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} X_1 \\ N_1 \\ 0 \\ Y_1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \right\} = 0,
 \end{aligned}$$

Où $U_1, \Theta_1, U_2, V_2, \Theta_2, U_3, \Theta_3$, vérifient la relation $\forall \delta U_1, \forall \delta \Theta_1, \forall \delta U_2, \forall \delta V_2, \forall \delta \Theta_2, \forall \delta V_3$ et $\forall \delta \Theta_3$.

On peut maintenant calculer nos déplacements inconnus $U_2, \Theta_2, U_3, \Theta_3$, en posant :

$$[\delta U_2 \quad \delta \Theta_2 \quad \delta V_3 \quad \delta \Theta_3] \left\{ \frac{EI}{l^3} \begin{bmatrix} 12 & 6l & 0 & 0 \\ 6l & 16l^2 & -54l & 6l^2 \\ 0 & -54l & 324 & 54l \\ 0 & 6l^2 & 54l & 12l^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_2 \\ \Theta_2 \\ V_3 \\ \Theta_3 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ F \\ 0 \end{bmatrix} \right\} = 0,$$

où U_2, Θ_2, V_3 et Θ_3 vérifient la relation $\forall \delta U_2, \forall \delta \Theta_2, \forall \delta V_3$ et $\forall \delta \Theta_3$,

On déduit le système algébrique :

$$\frac{EI}{l^3} \begin{bmatrix} 12 & 6l & 0 & 0 \\ 6l & 16l^2 & -54l & 6l^2 \\ 0 & -54l & 324 & 54l \\ 0 & 6l^2 & 54l & 12l^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_2 \\ \Theta_2 \\ V_3 \\ \Theta_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ F \\ 0 \end{bmatrix},$$

Ou :

$$\begin{bmatrix} 12 & 6l & 0 & 0 \\ 6l & 16l^2 & -54l & 6l^2 \\ 0 & -54l & 324 & 54l \\ 0 & 6l^2 & 54l & 12l^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_2 \\ \Theta_2 \\ V_3 \\ \Theta_3 \end{bmatrix} = \frac{l^3}{EI} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ F \\ 0 \end{bmatrix}.$$

Les mineurs de la matrice carré de rang 4 sont égaux à :

$$M_{11} = \begin{vmatrix} 16l^2 & -54l & 6l^2 \\ -54l & 324 & -54l \\ 6l^2 & -54l & 12l^2 \end{vmatrix} = 3888l^4 = 2^4 \times 3^5 \times l^4,$$

$$M_{12} = \begin{vmatrix} 6l & -54l & 6l^2 \\ 0 & 324 & -54l \\ 0 & -54l & 12l^2 \end{vmatrix} = 5832l^3 = 2^3 \times 3^6 \times l^3,$$

$$M_{13} = \begin{vmatrix} 6l & 16l^2 & 6l^2 \\ 0 & -54l & -54l \\ 0 & 6l^2 & 12l^2 \end{vmatrix} = -1944l^4 = -2^3 \times 3^5 \times l^4,$$

$$M_{14} = \begin{vmatrix} 6l & 16l^2 & -54l \\ 0 & -54l & 324 \\ 0 & 6l^2 & -54l \end{vmatrix} = 5832l^3 = 2^3 \times 3^6 \times l^3,$$

$$M_{21} = \begin{vmatrix} 6l & 0 & 0 \\ -54l & 324 & -54l \\ 6l^2 & -54l & 12l^2 \end{vmatrix} = 5832l^3 = 2^3 \times 3^6 \times l^3,$$

$$M_{22} = \begin{vmatrix} 12 & 0 & 0 \\ 0 & 324 & -54l \\ 0 & -54l & 12l^2 \end{vmatrix} = 11664l^2 = 2^4 \times 3^6 \times l^2,$$

$$M_{23} = \begin{vmatrix} 12 & 6l & 0 \\ 0 & -54l & -54l \\ 0 & 6l^2 & 12l^2 \end{vmatrix} = -3888l^3 = -2^4 \times 3^5 \times l^3,$$

$$M_{24} = \begin{vmatrix} 12 & 6l & 0 \\ 0 & -54l & 324 \\ 0 & 6l^2 & -54l \end{vmatrix} = 11664l^2 = 2^4 \times 3^6 \times l^2$$

$$M_{31} = \begin{vmatrix} 6l & 0 & 0 \\ 16l^2 & -54l & 6l^2 \\ 6l^2 & -54l & 12l^2 \end{vmatrix} = -1944l^4 = -2^3 \times 3^5 \times l^4,$$

$$M_{32} = \begin{vmatrix} 12 & 0 & 0 \\ 6l & -54l & 6l^2 \\ 0 & -54l & 12l^2 \end{vmatrix} = -3888l^3 = -2^4 \times 3^5 \times l^3,$$

$$M_{33} = \begin{vmatrix} 12 & 6l & 0 \\ 6l & 16l^2 & 6l^2 \\ 0 & 6l^2 & 12l^2 \end{vmatrix} = 1440l^4 = 2^5 \times 3^2 \times 5 \times l^4,$$

$$M_{34} = \begin{vmatrix} 12 & 6l & 0 \\ 6l & 16l^2 & -54l \\ 0 & 6l^2 & -54l \end{vmatrix} = -4536l^3 = -2^3 \times 3^4 \times 7 \times l^3,$$

$$M_{41} = \begin{vmatrix} 6l & 0 & 6l \\ 16l^2 & -54l & 6l^2 \\ -54l & 324 & -54l \end{vmatrix} = 5832l^3 = 2^3 \times 3^6 \times l^3,$$

$$M_{42} = \begin{vmatrix} 12 & 0 & 0 \\ 6l & -54l & 6l^2 \\ 0 & 324 & -54l \end{vmatrix} = 11664l^2 = 2^4 \times 3^6 \times l^2,$$

$$M_{43} = \begin{vmatrix} 12 & 6l & 0 \\ 6l & 16l^2 & 6l^2 \\ 0 & -54l & -54l \end{vmatrix} = -4536l^3 = -2^3 \times 3^4 \times 7 \times l^3,$$

$$M_{44} = \begin{vmatrix} 12 & 6l & 0 \\ 0 & 6l & 16l^2 \\ 6l & -54l & 324 \end{vmatrix} = 54432l^2 = 2^5 \times 3^5 \times 7 \times l^2.$$

Le déterminant de la matrice a pour valeur :

$$\Delta = 12M_{11} - 6lM_{12} = 11664l^4 = 2^4 \times 3^6 \times l^4.$$

On obtient donc les déplacements nœuds inconnus :

$$\begin{bmatrix} U_2 \\ \Theta_2 \\ V_3 \\ \Theta_3 \end{bmatrix} = \frac{l^3}{11664l^4 EI} \begin{bmatrix} 3888l^4 & -5832l^3 & -1944l^4 & -5832l^3 \\ -5832l^3 & 11664l^2 & 3888l^3 & 11664l^2 \\ -1944l^4 & 3888l^3 & 1440l^4 & 4536l^3 \\ -5832l^3 & 11664l^2 & 4536l^3 & 54432l^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ F \\ 0 \end{bmatrix},$$

soit :

$$U_2 = -\frac{Fl^3}{6EI}, \quad \Theta_2 = \frac{Fl^2}{3EI}, \quad V_3 = \frac{10Fl^3}{81EI} \quad \text{et} \quad \Theta_3 = \frac{7Fl^2}{18EI}.$$

On peut compléter en calculant les efforts aux liaisons :

$$[\delta U_1 \quad \delta \Theta_1 \quad \delta V_2] \left\{ \frac{EI}{l^3} \begin{bmatrix} -12 & -6l & 0 & 0 \\ 6l & 2l^2 & 0 & 0 \\ 0 & 54l & -324 & 54l \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_2 \\ \Theta_2 \\ V_3 \\ \Theta_3 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} X_1 \\ N_1 \\ Y_1 \end{bmatrix} \right\} = 0,$$

où U_2, Θ_2, V_3 et Θ_3 solution vérifient la relation $\forall \delta U_1, \forall \delta \Theta_1$ et $\forall \delta V_2$.

Les inconnues de liaison sont donnés par :

$$\begin{bmatrix} X_1 \\ N_1 \\ Y_1 \end{bmatrix} = \frac{EI}{l^3} \begin{bmatrix} -12 & -6l & 0 & 0 \\ 6l & 2l^2 & 0 & 0 \\ 0 & 54l & -324 & 54l \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_2 \\ \Theta_2 \\ V_3 \\ \Theta_3 \end{bmatrix},$$

Soit :

$$\begin{bmatrix} X_1 \\ N_1 \\ Y_1 \end{bmatrix} = \frac{EI}{l^3} \begin{bmatrix} -12 & -6l & 0 & 0 \\ 6l & 2l^2 & 0 & 0 \\ 0 & 54l & -324 & 54l \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\frac{Fl^3}{6EI} \\ \frac{Fl^2}{3EI} \\ \frac{10Fl^3}{81EI} \\ \frac{7Fl^2}{18EI} \end{bmatrix}$$

D'où :

$$X_1 = 0, N_1 = -\frac{Fl}{3}, Y_1 = -F.$$

9.3. Comparaison des résultats

On peut maintenant comparer les résultats obtenus par la méthode des déformés, et par la méthode discrétisée.

Par la méthode des déformées :

$$v_1(L_1) = \frac{-FL_2 L_1^2}{2EI} \text{ et } \frac{dv_1}{dx_1}(L_1) = \frac{-FL_2 L_1}{EI}$$

$$v_2(L_2) = \frac{-FL_2^2(3L_1+L_2)}{3EI} \text{ et } \frac{dv_2}{dy_2}(L_2) = \frac{-FL_2(2L_1+L_2)}{2EI}$$

Par la méthode discrétisée :

$$U_2 = -\frac{Fl^3}{6EI}, \Theta_2 = \frac{Fl^2}{3EI}, V_3 = \frac{10Fl^3}{81EI} \text{ et } \Theta_3 = \frac{7Fl^2}{18EI}$$

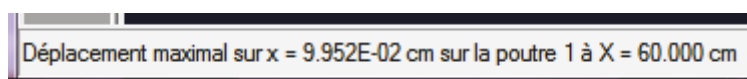
En effectuant l'application numérique (avec $L_1=60$ cm, et $L_2=20$ cm, $E= 210000$ MPa et I structure = $43,06 \text{ cm}^4$)

On obtient pour le déplacement maximal, sur l'axe X (abscisses), de la poutre 1 :

- 0.09952 cm avec la méthode discrétisée
- 0.09952 cm avec la méthode des déformées

Soit exactement les mêmes résultats.

En vérifiant ces résultats avec le logiciel RDM 6, nous trouvons :



Pour l'élément 2-3 (poutre 2) les déplacements calculés maximaux valent 0.07372 cm avec les deux méthodes.

Si l'on vérifie le calcul avec RDM 6 :

Déplacement maximal sur y = 7.414E-02 cm sur la poutre 2 à X = 20.000 cm

Le résultat est très similaire.

Pour ce qui est des contraintes admissibles, en utilisant RDM 6, et pour la poutre 1 :



Fig.32 : Représentation des contraintes de la poutre 1.

On trouve une contrainte maxi de 43.74 MPa, ce qui est une valeur éloignée des 200MPa maxi admissibles du matériau.

Et pour la poutre 2, en opérant de la même façon :



Fig.33 : Représentation des contraintes de la poutre 2.

On trouve une contrainte maximale de 45.21 MPa, ce qui là aussi, tend à nous rassurer quant à la résistance de la structure.

9.4.Conclusion sur les calculs :

Si les calculs qui viennent d'être effectuées semblent être superflus (rappelons que le simulateur fonctionnait auparavant avec un système hydraulique délivrant la même pression, donc faisant subir à la structure la même contrainte), ils sont cependant nécessaires à deux choses :

1. Fournir un calcul qui sera nécessaire à la certification de la machine, rappelons que sur ce thème, PRISME pourra compléter le dossier de certification avec des calculs dans d'autres domaines.
2. Faciliter la validation et donc l'achat d'un groupe hydraulique fournissant une pression adéquate (ici 20 bars), compatible aussi bien avec les contraintes mécaniques admissibles par le simulateur, qu'avec une utilisation pédagogique dans une salle de classe.

Cela étant, ce calcul devra être intégré au dossier de certification présenté dans l'annexe2.

10. Bilan final et Perspectives :

Au final, les modifications apportées au simulateur, ont permis d'améliorer la sécurité et le « confort » d'utilisation de la machine. Une grande bataille a été menée pour faire face au bruit engendré par la machine, et les dernières mesures donnent un volume sonore de 80.2 dB (A) et 85.7 dB(C), ce qui reste important, mais qui est sensiblement plus bas que les valeurs précédentes (voir page 38). De plus, le cadre de l'ancien groupe hydraulique a été conservé, de façon à pouvoir servir de support à des plaques iso phoniques, destinées à isoler phoniquement la partie hydraulique, et abaisser encore le volume sonore engendré.

A travers l'amélioration de la sécurité sur cette machine, il faut considérer que le changement de la façon de penser des acteurs du laboratoire, est la principale satisfaction qu'il faut retirer de ce travail. En effet, toutes les améliorations ont donné lieu à des échanges, et au cours de ceux-ci, il a été expliqué l'importance d'adopter des comportements allant vers la sécurité. Cette « mentalité sécuritaire », est le cheval de bataille de beaucoup d'industriels, qui veulent se démarquer, dans un monde où l'on surproduit, par une image dans laquelle la sécurité est une donnée importante. En adoptant la même attitude, les membres de PRISME seront acteurs de leur sécurité, et faciliteront l'obtention de la certification ISO 9001, recherchée par le laboratoire.

Les perspectives du simulateur doivent être envisagées en fonction du ressenti de PRISME sur ses possibilités de diffusion. Pour faciliter celle-ci, une miniaturisation de la machine est souhaitable, l'idéal étant d'en faire une version mobile, de façon à ce qu'elle soit transportable, et donc présentable dans les autres établissements universitaires. La miniaturisation des anciens éléments électroniques est facile, et leur coût serait compensé par celui des éléments mécaniques de taille moindre. On peut imaginer une « valise » informatisée, contenant des microéléments mécaniques fonctionnant sous énergie électrique, qui contiendrait entièrement le simulateur, et avec laquelle on pourrait véhiculer la machine en même temps que l'image du savoir-faire de PRISME.

Une autre perspective intéressante, serait de faire revenir la machine vers les orientations posées par le problème réel, à savoir la régulation de vraies caténaires de trains. Rappelons-le, ce simulateur fût créé à la base pour résoudre cette question, toujours irrésolue. Il a été dit au cours de ce travail, que la régulation d'un pantographe entier était impossible du fait des grandes vitesses des trains, mais on peut imaginer d'installer des systèmes de régulation plus petits, plus rapides, qui n'agiraient plus sur tout le pantographe, mais simplement sur l'archer (le dernier élément en contact avec la caténaire), installés au plus près de celui-ci et se soustrayant à l'inertie des éléments plus lourds. Pour de petits objets, les systèmes utilisés au quotidien par PRISME (notamment pour piloter des injecteurs), pourraient s'avérer efficaces, et donner au laboratoire une avance technique significative dans de possibles applications ferroviaires.

Les modifications apportées sur la machine (groupe hydraulique et armoire électrique aux normes) ont permis d'augmenter le niveau de sûreté de la machine, cependant, des fonctions utiles à l'enseignement ont été perdues, notamment la gestion de l'arrêt d'urgence qui se faisait auparavant via un programme, chose complètement interdite par la directive machine. Aussi, il faudra adapter le programme d'enseignement à ces nouvelles données, et être attentif à l'existence d'autres éléments de la machine, qui pourrait lui redonner de la souplesse pédagogique sans empiéter sur la sécurité. L'idéal pour réaliser cela, serait l'installation d'un automate de commande spécifique aux fonctions de sécurité [13], mais le prix d'un tel automate (autour de 4000 €, à comparer avec les 160 € que coûte l'automate actuel) est pour le moment prohibitif. La question reste toutefois ouverte, mais il est certain que cet élément électrique de sécurité, devra prendre place dans le simulateur dès lors qu'il sera décidé de s'en servir comme machine d'enseignement, apte à manipuler des fonctions de sécurité passant par les programmes.

11. Conclusion

De par ce que j'ai vu au cours de ce stage, et parce qu'au début de ce travail, il m'a été demandé de donner mon avis sur une possible industrialisation du simulateur ; je dirais que l'idée de certifier les prototypes du laboratoire, comme celle de certifier le laboratoire dans sa globalité, est une chose qui ne doit pas faire partie des priorités premières. L'utilisation de certifications dans le milieu industriel est aujourd'hui courante, mais l'énergie déployée pour obtenir et se maintenir au niveau des certifications requises, est telle, qu'aucun industriel ne se soumettrait à ces procédés s'il en avait le choix. Or, ce choix est donné aux laboratoires et aux écoles, du fait de leurs statuts, qui les autorise à ne pas se soumettre aux certifications, c'est un avantage que PRISME devrait conserver.

Qui plus est, j'ai pu percevoir chez les membres de PRISME, une réelle compétence dans la création de prototypes et de machines. Ces personnes sont capables de faire preuve d'une telle inventivité, que je n'hésite pas à dire qu'elles ont dépassé le stade de la technique pure pour s'approcher de celui de la création quasi artistique. Le fait de vouloir certifier un laboratoire comme PRISME, revient, selon moi, à brider cette part de créativité. Le laboratoire ne devra pas s'offusquer de mes paroles, et devra, au contraire, se tourner vers les industriels partenaires pour leur vendre cette spécificité. Les industriels mettant en œuvre des techniques dont les utilisateurs ne doivent surtout pas s'écarter, peuvent avoir besoin de structures comme PRISME, pour disposer de matière grise moins limitée par les normes, le temps, les protocoles, etc. Il y a là une vraie carte à jouer pour PRISME.

Une des choses les plus difficiles toutefois, fut de convaincre les décideurs financiers, du bien fondé de ma démarche. Jamais je n'aurais pensé devoir mettre en œuvre autre chose que mes compétences techniques dans ce projet, et pourtant j'ai appris qu'un projet, aussi modeste ou grandiose qu'il soit, doit toujours être défendu âprement pour pouvoir passer à travers le crible de ceux qui disposent des financements. Je saurai me souvenir de cette leçon en temps voulu.

Enfin, sur un plan plus personnel, j'ai beaucoup apprécié l'expérience humaine que j'ai vécue dans le laboratoire. Au-delà du fait d'avoir vu des domaines techniques qui m'étaient complètement inconnus, j'ai pu bénéficier de l'aide de personnes qui se sont toujours rendues disponibles pour moi, et avec qui j'ai pu partager plus que de simples compétences. A aucun moment je n'ai ressenti les hésitations vis-à-vis du « stagiaire », que j'ai pu percevoir chez d'autres personnes et dans d'autres structures. Ici, j'ai, au contraire, été perçu comme quelqu'un qui apportera quelque chose, dans un domaine peut-être moins familier que de coutume, et qui fait défaut. Si, derrière moi, j'ai pu laisser le même sentiment de fraternité dont j'ai bénéficié, alors je pense que j'aurai modestement rempli ma tâche.

12. Bibliographie

[1] Série d'article « caténaire 25 kv réellement tendue en N ». LOCO-REVUE n°453-459-461-493-496. M BEAUMONT.

[2] Article « Chevaucher les ondes ». Revue « POUR LA SCIENCE ». R LEHOUCQ, JM COURTY.

<http://rene.souty.free.fr/IMG/pdf/DocOndes.pdf>

[3] La régulation industrielle. Fiche n°25-26-27. Cours appartenant à l'université d'Orléans.

[4] Directive Européenne 2006/42/CE dite directive machine, portant sur la certification des machines et quasi machine

<http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2006:157:0024:0086:FR:PDF>

[5] Utilisation des techniques de fiabilité en mécanique. J C LIGERON, CI MARCOVICI. Pic Edition. 1970.

[6] Fiabilité des systèmes. P CHAPOUILLE, R de PAZZIS. Edition MASSON. 1968.

[7] Evaluer et mesurer l'exposition professionnelle au bruit. Fiche INRS ED 6035. C PICARD, B LAUDE. 2009.

[8] L'électricité pas à pas. J P HARTMANN, J M LEURENT, R ZENNER. Edition SAEP. 2000.

[9] L'évaluation des risques professionnels. Fiche INRS ED 5018 B ANDEOL-AUSSAGE, G DORNIER. 2005.

[10] Matériaux Métalliques 2^{ème} édition. M COLOMBIE. Editions DUNOD. 2008.

[11] Aide-mémoire Résistance des matériaux 9^{ème} édition. J GOULET, J P BOUTIN, F LEROUGE. Editions DUNOD. 2008.

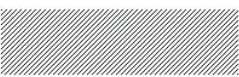
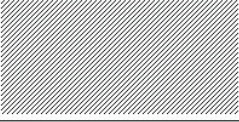
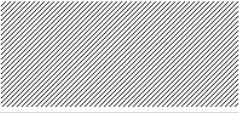
[12] Modélisation Mécanique des structures. C DECOLON, M BOREL. HERMES EDITION. 2000.

[13] Norme internationale CEI 61508-6 relative aux dispositifs électriques de sécurité
<http://lhc-mpwg-reliability.web.cern.ch/lhc-mpwg-reliability/documentation/BMT-cei-iec-61508-6.pdf>

ANNEXE 1

Questionnaire destiné à tracer la grille DIGEST, afin de déterminer l'implication des personnels sur les questions de sécurité.

Nom de l'entreprise	Polytech Orléans	Date évaluation initiale	29/03/2014
Personne ou département à contacter sur cette fiche	Mr Yann CHAMAILLARD	Date évaluation finale	A définir
Adresse		Effectif	
		N° SIRET	
Forme juridique et implantation		N° de risque	
Démarche de management S&ST ? ☐ Oui ☒ Non			
Si certification en sécurité, laquelle ?			

Sujet 1 – Organisation générale : organisation de la production, ordre, signalisation, accueil, porteur d'enjeu santé et sécurité au travail.					évaluation	
Objectif : J'améliore dans mon entreprise la notion d'organisation au travers de principes simples et visibles tels que l'organisation des commandes (1), le rangement (2), l'accueil (3) et le suivi de la Santé et Sécurité au Travail (4).					29/03/2014	A définir
	D	C	B	A	E0	E1
1	Nous n'avons pas une organisation formalisée par des documents écrits pour optimiser notre production par rapport aux commandes de nos clients.	Nous avons une organisation formalisée par des documents écrits pour optimiser notre production : préparation commande, planification, suivi et contrôle de gestion.	Nous avons une organisation formalisée par des documents écrits pour optimiser notre production : préparation commande, planification, suivi et contrôle de gestion. Nous commençons à évaluer nos fournisseurs et à faire des enquêtes de satisfaction clients.	Nous avons une organisation formalisée par des documents écrits pour optimiser notre production : préparation commande, planification, suivi et contrôle de gestion. Nous évaluons nos fournisseurs et faisons des enquêtes de satisfaction de nos clients.	B	
	Pas d'action menée sur ce thème.	Les locaux sont nettoyés, rangés et entretenus régulièrement.	Les locaux sont rénovés, rangés, propres et entretenus régulièrement.	Les locaux sont récents et fonctionnels, rangés et entretenus régulièrement.	B	
	Le rangement du matériel n'est pas organisé.	Le matériel est rangé.	Le matériel est identifié et rangé.	Le matériel est de technologie récente, identifié, maintenu, rangé.	B	
2	Pas d'action menée sur ce thème.	Les allées sont encombrées.	Les allées sont dégagées.	Les allées et accès sont dégagés.	A	
		Pas d'action menée sur ce thème.	Les panneaux de signalisation sont présents pour les risques importants.	Panneaux et marquage au sol présents.	B	
	Les récipients ne sont pas étiquetés.	Les récipients sont étiquetés, ceux entamés sont refermés.	Les récipients ont des étiquettes renseignant sur les risques. Ceux entamés sont refermés et rangés à part.	Les récipients des matières sont étiquetés, fermés, rangés, séparés des incompatibles, stockés dans un endroit protégé, ventilé.	B	
3		Pas d'action menée sur ce thème.	J'ai mis en place un lieu d'accueil, un affichage d'informations et une signalisation de circulation à l'intérieur du site pour les personnes extérieures (clients, sous-traitants, visiteurs, ...).	Toute personne extérieure (client, sous-traitant, visiteur, ...) est prise en charge : accueille, informée, documentée, suivie et encadrée tout au long de son parcours jusqu'à sa sortie.	C	
4		Pas d'action menée sur ce thème.	Je m'occupe personnellement de la sécurité et de la santé au travail quand c'est nécessaire.	Une personne référente « S et ST* » est identifiée. La délégation de la direction de mon entreprise à un salarié (congé ou maladie) est organisée.	B	

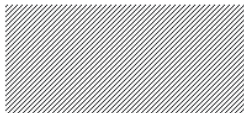
E0 : Possibilités de progrès Identifier l'accueil depuis l'extérieur du site. Mettre en place un plan du site à l'accueil. Informer sur l'identification des SST (Badges, affichage de panneaux). E1 : Possibilités de progrès	* voir glossaire
---	------------------

Sujet 2 – Évaluation des risques					évaluation	
Objectif : j'intègre dans nos pratiques professionnelles l'identification systématique des situations dangereuses et l'évaluation des risques (1), en prenant des précautions dans la mise en œuvre pour être autonome et avoir un résultat qui corresponde le plus possible à la réalité (2), et en faisant des mises à jour de façon régulière (3).					29/03/2014	A définir
	D	C	B	A	E0	E1
1	Je considère qu'il n'y a pas ou peu de situations dangereuses dans l'entreprise.	Je procède formellement aux identifications de certaines situations dangereuses.	Je procède régulièrement à l'inventaire des situations dangereuses prévisibles et à une évaluation des risques correspondants.	Notre évaluation des risques intègre les situations actuelles et futures de travail (projets de nouvelles machines, nouveaux locaux et équipements, nouveaux produits, ...).	C	
2	Pas d'action menée sur ce thème.	Je demande à une personne extérieure à l'entreprise (stagiaire, consultant, ...) de me rédiger le DUER* de mon entreprise.	Je m'investis personnellement et j'organise l'élaboration du DUER réglementaire de mon entreprise.	Nous consignons ces situations dangereuses actuelles et futures dans le DUER de notre entreprise.	B	
		Pas d'action menée sur ce thème.	Une partie de mon personnel participe occasionnellement à l'élaboration du DUER.	Tout notre personnel participe régulièrement à l'élaboration du DUER.	B	
3		Pas d'action menée sur ce thème.	Je mets à jour une fois par an le DUER.	Nous mettons à jour le DUER lors de tout événement important touchant à la S et ST.	B	

E0 : Possibilités de progrès Identifier les situations à risques, le plus précocement possible, en impliquant tous les acteurs (notamment les étudiants). E1 : Possibilités de progrès	* voir glossaire
---	------------------

Sujet 3 – Actions préventives : aménagement en sécurité des postes et des situations de travail					évaluation	
Objectif : à partir de l'évaluation des risques, je procède à la mise en œuvre des moyens de prévention les plus efficaces (1) dans le cadre d'un plan d'actions (2).					29/03/2014	A définir
					E0	E1
	D	C	B	A		
1	Je considère qu'en faisant attention, on évitera les « pépins ».	Je mets à disposition de chacun des protections individuelles* (chaussures, casques, lunettes, gants, protections auditives, ...).	Je fais porter des protections individuelles. J'ai un plan d'actions pour traiter les risques de mon entreprise. Ce plan privilégie les protections collectives* plutôt que les protections individuelles.	Notre plan d'actions de prévention respecte les principes généraux de prévention et intègre les situations actuelles et futures de travail dès la conception (projets de nouvelles machines, nouveaux locaux et équipements, nouveaux produits, ...).	C	
2	Pas d'action menée sur ce thème.	Quand le besoin se fait sentir je prends des mesures de prévention.	Mon personnel participe à l'élaboration du plan d'actions.	Notre personnel est associé systématiquement à l'élaboration du plan d'actions ainsi qu'à la réalisation de ces actions.	C	

E0 : Possibilités de progrès		* voir glossaire
Procéder à l'évaluation des risques pour chaque TP conçu, et informer les étudiants sur les risques propres à chacun d'eux.		
E1 : Possibilités de progrès		

Sujet 4 – Traitement des situations d'urgence (accidents, incendies, ...) et analyse des incidents, anomalies, accidents du travail					évaluation	
Objectif : je m'assure que les accidents du travail sont traités(1), analysés et que des mesures de prévention adaptées sont prises pour éviter qu'ils se reproduisent (2). En plus, je veille à ce que nous soyons prêts à réagir à des situations d'urgence (3).					29/03/2014	A définir
					E0	E1
	D	C	B	A		
1	Je pense que les accidents sont des péripéties malheureuses mais hélas inéluctables de la vie de notre entreprise. Je m'adapterai.	Si un accident ou un sinistre grave survenait, j'ai mis en place un affichage des numéros d'urgence.	Si un accident ou un sinistre survenait, je respecterais les consignes affichées et l'organisation prévue des secours ainsi que les procédures administratives légales (déclaration CERFA, ...).	Nous avons étudié les différents scénarii probables de situations d'urgence et la façon d'y faire face. Si un accident ou un sinistre survenait, nous serions prêts à agir.	B	
2	Pour chaque accident grave (avec arrêt), je suis convaincu de causes immédiates souvent liées au comportement ou au hasard et face auxquelles je me sens impuissant.	Pour chaque accident grave, je suis prêt à collaborer avec des enquêteurs pour essayer de comprendre et que ça ne se reproduise pas.	Pour chaque accident grave (avec arrêt), j'en parle avec mon personnel, nous recueillons les faits et les analysons selon une méthode définie reconnue (type arbre des causes). Cela nous permet d'identifier les causes (techniques, humaines et organisationnelles) sur lesquelles agir.	Pour chaque accident grave (avec arrêt) mais aussi pour les incidents, anomalies et presque'accidents nous en parlons avec le personnel, nous recueillons les faits et les analysons selon une méthode définie reconnue (type arbre des causes). Nous mettons en œuvre un plan d'actions qui exploite ces informations.	C	
3		Pas d'action menée sur ce thème.	Des moyens matériels sont en place pour traiter les situations d'urgence (trousse de pharmacie, téléphone d'urgence, extincteurs, ...).	Nous avons mis en place des moyens matériels et organisationnels pour faire face aux situations d'urgence et nous assurons des formations (SST, incendie, ...).	A	
E0 : Possibilités de progrès					* voir glossaire	
Améliorer l'accessibilité des trousse de secours/l'identification des secouristes. Refaire la peinture du point de rassemblement, et améliorer l'information sur son existence.						
E1 : Possibilités de progrès						

Sujet 5 – Vérifications périodiques réglementaires et maintenance des équipements					évaluation	
Objectif : je m'assure du maintien en bon état (1) de mon outil de production (machines, matériels, véhicules, moyens de protection, ...) avec le respect des vérifications réglementaires périodiques (2) (installations électriques, extincteurs, machines, véhicules et engins de manutention, appareils à pression, installation d'aspiration, ...) et des moyens d'anticipation (3).					29/03/2014	A définir
	D	C	B	A	E0	E1
1	Je traite les pannes de mes machines, de mes équipements de travail (outils, matériels, appareils, véhicules, ...) et les défauts des moyens de protection collectifs ou individuels.	Je fais une maintenance curative (après pannes) et partiellement préventive ; une grande partie reste curative.	Je fais une maintenance essentiellement préventive ; les pannes ont diminué mais il reste une petite partie curative.	Nous faisons une maintenance préventive voire prédictive (prise en compte des remarques des utilisateurs des équipements). Nous cherchons à améliorer la performance de nos équipements pour minimiser les pannes.	B	
2	Pas d'action menée sur ce thème.	Je fais vérifier à l'occasion certaines de nos machines, des équipements de travail et moyens de protection ; je fais parfois les mesures correctives suggérées par ces vérifications.	Je fais vérifier périodiquement pour ce qui est réglementaire nos machines, équipements de travail et moyens de protection (par une personne agréée) ; je fais faire quasiment toutes les mesures correctives suite à ces vérifications.	Nous planifions les vérifications de nos machines, équipements de travail et moyens de protection par une personne compétente pour ce qui n'est pas obligatoire et agréée pour ce qui est obligatoire ; nous réalisons toutes les mesures correctives suite à ces vérifications.	B	
3	Pas de gestion des équipements de rechange.	Nous avons un stock de matériels de rechange mais pas en relation avec la criticité des équipements.	Nous avons un stock de matériels de rechange pour une partie des équipements critiques.	Nous avons un stock de matériels de rechange pour tous les des équipements critiques.	C	
E0 : Possibilités de progrès * voir glossaire Mettre en place une politique de maintenance préventive, et d'essais avant mise en marche						
E1 : Possibilités de progrès 						

Sujet 6 – Attitude de l'entreprise vis-à-vis du recrutement des opérateurs (CDI, intérim, CDD, stagiaires, apprentis, ...)					évaluation	
Objectif : je m'assure que mon personnel récemment recruté a, au départ (1), et va avoir, grâce à l'accueil (2), les compétences pour réaliser les travaux qui lui sont confiés sans incidence néfaste sur sa sécurité et sa santé avec une attention particulière pour les intérimaires (3).					29/03/2014	A définir
	D	C	B	A	E0	E1
1	Je fais d'abord appel à du personnel disponible (permanent ou temporaire) pour pouvoir tenir les délais quand la charge de travail devient trop forte.	Je vérifie au moment de l'embauche que le personnel recruté (permanent ou temporaire) a les compétences et les formations obligatoires pour le poste.	J'évalue nos besoins en personnel à partir des commandes actuelles et les formations S et ST qui sont actuellement nécessaires.	J'anticipe en évaluant nos besoins en personnel actuels et potentiels des projets, en prenant en compte dans le recrutement toutes les formations S et ST nécessaires (actuelles et futures).	B	
2	Pas d'action menée sur ce thème.	J'accueille le nouveau et lui fais fournir des protections individuelles.	J'organise systématiquement l'accueil S et ST des nouveaux embauchés pour tous les postes de travail (ceux sur notre site et ceux sur les chantiers) en m'appuyant notamment sur le DUER.	Nous accueillons les nouveaux embauchés en nous appuyant sur des fiches de poste.	C	
	Pas d'action menée sur ce thème.	Pas de document remis à l'opérateur.	Un document sommaire est remis à l'opérateur.	Un livret d'accueil est remis et commenté à l'opérateur.	C	
	Pas d'action menée sur ce thème.	Pas d'accueil organisé des nouveaux salariés.	Une personne accueille le nouveau salarié et lui explique sommairement son métier.	Il existe un tuteur pour accompagner le nouveau salarié dans l'apprentissage du métier.	A	

3	Pas d'action menée sur ce thème.	Quand j'ai besoin d'un intérimaire, je ne lui donne pas des travaux interdits aux intérimaires et je communique à l'agence intérim les postes à risque particulier.	Quand j'ai besoin d'un intérimaire, j'échange avec l'agence d'intérim sur les risques encourus par l'intérimaire et les mesures de prévention nécessaires.	Nous échangeons régulièrement avec les agences d'intérim pour mieux définir les besoins et modes de fonctionnement mutuels pour obtenir une meilleure prévention. Chaque intérimaire est accompagné par un tuteur à chaque nouveau poste qu'il occupe.	C	
E0 : Possibilités de progrès * voir glossaire Informer les stagiaires des activités du laboratoire et des risques encourus. Faire avec les stagiaires des "tours" de présentation du laboratoire.						
E1 : Possibilités de progrès 						

Sujet 7 – Formation continue en Santé et Sécurité au Travail, compétences, rôles, responsabilités					évaluation	
Objectif : je m'assure que je dispose en permanence, par l'organisation (1) et la recherche d'efficacité (2) de la formation continue, de ressources humaines suffisamment compétentes pour réaliser le travail en sécurité.					29/03/2014	A définir
	D	C	B	A	E0	E1
1	Je considère que mon personnel est suffisamment compétent pour faire face aux risques potentiels.	J'organise des formations continues en sécurité (ex. CACES*, manipulation des extincteurs, secouristes, ...) en fonction des besoins que mon personnel exprime et que je retiens.	J'ai une méthode (document unique, plan de charge, ...) pour identifier les principaux besoins en formation S et ST pour certains postes de mon entreprise. Elle me permet d'organiser les formations continues en sécurité du personnel (CACES, manipulation des extincteurs, sauveteurs secouristes du travail, ...).	Nous intégrons systématiquement toutes les formations S et ST nécessaires (identifiées par notre méthode) sur les postes de travail, dans un plan de formation prenant en compte les risques actuels et futurs dans l'entreprise.	C	
2	Pas d'action menée sur ce thème.	Je sélectionne les organismes de formation au vu du prix proposé.	Je sélectionne les organismes de formation au meilleur rapport qualité-compétence / prix.	Je m'assure de l'efficacité de la formation par une évaluation de la compétence technique et pédagogique des organismes de formation.	B	

E0 : Possibilités de progrès * voir glossaire Mettre en place des fiches d'expression du personnel (ex: boîte aux lettres d'amélioration), des réunions collectives ou individuelles dans lesquelles le personnel peut exprimer ses observations. Etablir des visites dans les ateliers, de façon à rencontrer les acteurs dans leur milieu de travail.						
E1 : Possibilités de progrès 						

Sujet 8 – Achats (matériels, machines, matières, produits, constructions, services, ...), sous-traitance, chantiers					évaluation	
Objectif : je m'assure que les opérations d'acquisition à l'extérieur (fournisseur de produit, prestataire de service, ...) se font en sécurité lors de la négociation (1) et de la réception (2) avec une attention particulière pour les chantiers à l'extérieur de l'entreprise (3).					29/03/2014	A définir
	D	C	B	A	E0	E1
1	Les négociations lors de nos achats et demandes de prestations se font surtout sur des considérations techniques et commerciales : la sécurité est très rarement abordée.	J'examine parfois l'aspect sécurité lors d'appels d'offres importants à des prestataires ou fournisseurs ou au cours du déroulement d'un contrat (ou commande) passée à un fournisseur ou un sous-traitant.	J'examine systématiquement l'aspect sécurité lors des appels d'offres à des prestataires ou fournisseurs ou au cours du déroulement de tout contrat (ou commande) passée à un fournisseur ou un sous-traitant.	En sus de l'examen systématique sécurité lors d'achats, nous établissons un dialogue permanent avec nos fournisseurs et sous-traitants pour mieux définir les besoins en sécurité et les modes de fonctionnement mutuels.	C	
2	Pas d'action menée sur ce thème.	Lors de la réception d'un achat, je réagis vis à vis du fournisseur si une infraction à la réglementation du travail apparaît.	J'exige et archive les FDS* (fiches de données de sécurité) des produits achetés et ne réceptionne que des machines conformes CE ou des matériels conformes à la réglementation.	Nous avons une méthode de réception en sécurité et sélectionnons nos fournisseurs et sous-traitants en prenant en compte leur performance en Santé et Sécurité au Travail.	C	
3	Pas d'action menée sur ce thème.	Pour les chantiers hors du site de l'entreprise, j'interviens pendant le chantier (si je suis présent) pour faire face à un danger identifié.	J'analyse les risques professionnels sur nos chantiers (situations de co-activité, impact sur public, ...) lors d'une pré-visite commune avec le donneur d'ordres. Je prévois des permis de feu si nécessaire.	Nous traitons les risques sur nos chantiers et appliquons les procédures issues des risques liés à la co-activité et plans de prévention qui sont discutés avec nos équipes et respectés.	C	
E0 : Possibilités de progrès * voir glossaire Informer les acteurs du fait qu'il n'y a pas de petits ou grands chantiers (seul le risque prime). Questionner les prestataires sur les mesures de sécurité mises en œuvre.						
E1 : Possibilités de progrès 						

Sujet 9 – Santé au Travail et suivi médical					évaluation	
Objectif : je prends en compte avec l'aide de compétences (médecin du travail notamment) les risques d'atteinte à la santé au travail (particulièrement les maladies professionnelles) de mon personnel (1) et j'organise la prévention primaire de ces risques (2).					29/03/2014	A définir
	D	C	B	A	E0	E1
1	Je n'ai aucun contact direct avec le médecin du travail.	Je réagis quand mes salariés refusent parfois d'aller aux convocations d'aptitude du médecin du travail.	Je veille à ce que les visites réglementaires du médecin du travail (aptitude, reprise après arrêt) auprès des salariés soient réalisées. Pour les maladies professionnelles reconnues, je fais une analyse des causes et remèdes possibles avec le médecin du travail.	En sus des visites réglementaires médicales du travail et du traitement des maladies professionnelles, je sollicite personnellement et régulièrement l'avis du médecin du travail sur les aspects santé (troubles musculo-squelettiques, produits cancérogènes, risques psycho-sociaux, ...) pour aménager les postes de travail actuels et à venir.	B	

2	Je sollicite notre médecin du travail dans le cadre de son 1/3 temps* pour qu'il vienne sur notre site pour avoir son avis sur la santé au travail de mes salariés.	Je demande au médecin du travail lors de son tiers temps de me communiquer et me commenter la FICHE d'ENTREPRISE*.	Pour les postes de travail les plus vulnérables, j'organise une surveillance spéciale avec des examens de mesures physiques (bruit, rayonnement, température) ou chimiques (produits cancérigènes, ...) ou médicaux (radios, audiogramme, ...) ou biologiques (analyses d'urine ou de sang, ...).	Si besoin, je fais appel à des compétences externes (exemple : ergonome) pour trouver des solutions à des problèmes difficiles.	C
E0 : Possibilités de progrès * voir glossaire Etablir une liste des postes des plus à risques, et des personnes les plus exposées.					
E1 : Possibilités de progrès 					

Sujet 10 – Politique, objectifs, indicateurs, communication, valeurs en Santé et Sécurité au Travail					évaluation	
Objectif : j'ai une démarche structurée d'amélioration continue de la prévention des risques professionnels basée sur une politique, des objectifs et indicateurs (1), une communication avec mes partenaires (2) et des valeurs (3).					29/03/2014	A définir
	D	C	B	A	E0	E1
1	Je n'ai pas d'engagement ni d'objectifs précis en Santé et Sécurité au Travail : c'est un sujet que j'aborde peu en dehors de la survenue d'un accident grave.	J'ai fixé quelques objectifs de prévention que je mets en œuvre.	Je fixe quelques objectifs de prévention que j'essaie d'atteindre au quotidien et que je vérifie régulièrement au travers d'indicateurs simples.	Nos objectifs et nos indicateurs sont définis dans le cadre d'une politique générale S et ST affichée et connue de tous avec une recherche d'amélioration continue.	C	
2		Je n'ai pas de contact avec mes principaux interlocuteurs externes (SDIS, SMUR*, médecine du travail, inspection du travail, CMA*, OP*, OPPBTP*, CARSAT*, ...).	Je communique avec mes principaux interlocuteurs externes (SDIS, SMUR*, médecine du travail, inspection du travail, CMA*, OP*, OPPBTP*, CARSAT*, ...).	Je communique avec tous mes salariés et partenaires (clients, institutionnels, fournisseurs, assureur, ...) et prends en compte leurs remarques pour améliorer l'efficacité de notre démarche.	C	
3	Pas d'action menée sur ce thème.	Je me donne les moyens pour satisfaire à la réglementation.	Je cherche à aller au-delà du simple respect de la réglementation et je partage ce point de vue avec quelques collaborateurs.	La démarche de prévention des risques correspond à une éthique avec des valeurs affichées au sein de notre entreprise, claires et surtout partagées avec les salariés.	B	
E0 : Possibilités de progrès * voir glossaire Lors de la fabrication d'un TP, d'une expérience, etc. Ne pas hésiter en cas de doute, à faire appel aux intervenants sécurité (CARSAT, CHSCT, MDT, etc.).						
E1 : Possibilités de progrès 						

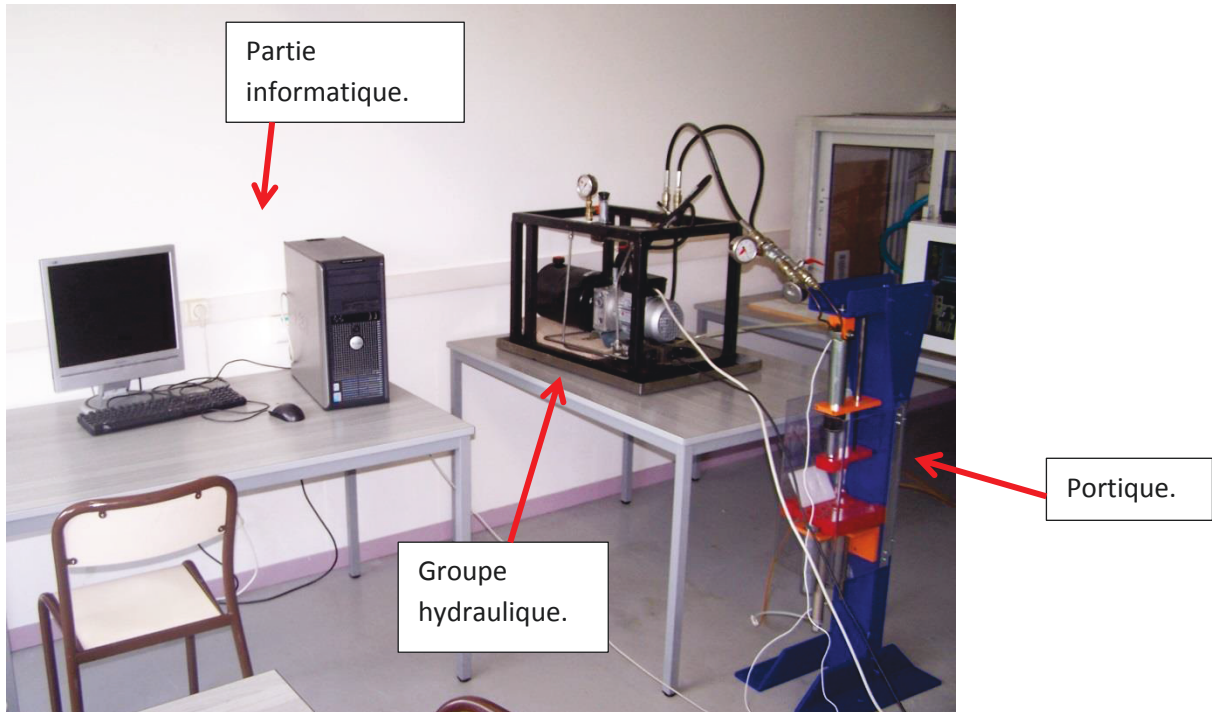
ANNEXE 2

Dossier technique relatif à la certification 2006/42/CE comprenant :

- Une description générale de la machine.
- Un questionnaire destiné à établir une analyse des risques en fonction des exigences spécifiées par la directive 2006/42/CE.
- Une déclaration de conformité CE.
- Les schémas de câblages des éléments électriques.

Description générale de la machine

Simulateur de caténaire :



Fonction :

Cette machine est un simulateur, qui sert à programmer et à visualiser des modes de régulation. Les utilisateurs utilisent l'informatique pour établir un programme sous MILLENIUM 3 (langage utilisé par l'automate industriel inclus dans le simulateur), et le valide directement sur la machine en observant les réactions de celle-ci. Le but étant d'obtenir des fonctions de régulation stables.

Informations complémentaires :

La machine ne contient pas de composants soumis à maintenance par les utilisateurs.

En aucun cas, les utilisateurs ne sont autorisés à ouvrir et/ou intervenir sur les éléments qu'ils jugeraient défectueux. Si toutefois une anomalie était constatée, les utilisateurs devront stopper immédiatement toute action sur la machine, et prévenir les techniciens responsables de la maintenance.

Risques résiduels

Le simulateur présenté ici, a été conçu de façon à minimiser au maximum tous les risques dû à l'utilisation. Cependant, des risques subsistent si :

- a) Les schémas hydrauliques et électriques sont modifiés, et/ou des composants sont retirés ou ajoutés.
- b) L'on se sert du simulateur pour une fonction autre que celle pour lequel il est prévu.
- c) Si, avant chaque utilisation, les techniciens responsables de la maintenance, n'ont pas vérifié que la machine est dans un état de marche satisfaisant.
- d) Un nouveau protecteur empêchant l'accès total aux vérins, n'est pas installé. Le protecteur actuel peut s'avérer insuffisant dans le cas où une personne voudrait toucher, de façon intentionnelle, les vérins.

Analyse des risques, établie de façon à établir un accès pratique à la démarche de certification 2006/42/CE.

Introduction

Ce document atteste que le simulateur de caténaire, machine concernée par cette évaluation, satisfait aux exigences essentielles de santé et de sécurité, énoncées dans la directive machine 2006/42/CE (article 1).

La procédure suivie pour établir cette évaluation, a consisté à établir une « check-list » reprenant tous les points listés par l'article 1 de la directive machine. A partir de cela, des questions relatives à ce que préconise la directive, ont été formulées et organisées en rubriques, de façon à d'établir un questionnaire mettant en relief les non-conformités de la machine.

Les non-conformités relevées par le questionnaire, ont été supprimées et/ou modifiées, de façon à rendre la machine aussi peu dangereuse que possible.

En répondant favorablement (exception faite du tableau D2) à ce questionnaire, on s'assure, non seulement, du minimum de sécurité requis pour diffuser une machine, mais aussi de la conformité de celle-ci avec la directive Européenne.

Ce questionnaire a une portée plus large que l'étude menée ici, et peut servir pour certifier d'autres machines (hors véhicules).

Evaluation des risques par rubrique pour une machine en phase de conception.

Désignation : Simulateur de caténaire.

Date de fabrication : 2000

Fabricant : Laboratoire PRISME Ecole POLYTECH d'Orléans.

Les éléments cochés « NON » sont les points à traiter (sauf tableau D2).

A : Marquage machine.

Annexe 1		OUI	NON	Sans Objet.
	Nom et adresse du fabricant.	X		
1.7.3	Marquage CE.	X		
	Type.			X
	Numéro de série.	X		
	Année de fabrication.	X		
	Marquage ATEX.			X

B : Notice d'instruction.

Annexe 1		OUI	NON	Sans objet.
1.1.2-c	Notice réalisée.	X		
1.3.2-i				
1.7.4.1				
1.7.4.2				
1.7.4.3				

C. Risque mécanique.

	C1 : Stabilité.			
		OUI	NON	Sans objet.
Annexe 1				
1.3.1	Sur roulettes avec freins.			X
	Fixation au sol.			X
	Pose sur sol.	X		
	Fixation sur machine.			X
	Autre.	X		
	Stabilité estimée comme correcte.	X		

	C2 : Rupture en service.			
		OUI	NON	Sans objet.
Annexe 1				
1.3.2	Résistance à la fatigue, la corrosion, l'abrasion.	X		
	Résistance à l'éclatement mécanique (ex : meule).			X
	Résistance des canalisations et flexibles.	X		

	C3 : Chutes et projections d'objets.		
Annexe 1	OUI	NON	Sans objet.
1.3.3			X
1.4.2.1-b5	Protection contre les chutes d'objets, les projections d'outillage et de copeaux.		

	C4 : Arêtes et angles vifs, surfaces rugueuses.		
Annexe 1	OUI	NON	Sans objet.
1.3.4	X		
	Absence d'éléments susceptibles de blesser.		

	C5 : Machines combinées.		
Annexe 1	OUI	NON	Sans objet.
1.3.5	X		
	Protection interdisant l'accès aux organes mobiles.		
	Protection pour les machines nécessitant une reprise manuelle entre deux opérations.		
			X

	C6 : Généralités sur les protections contre les éléments mobiles			
Annexe1		OUI	NON	Sans objet.
	<u>Les protecteurs :</u>			
1.3.6	Doivent être robustes.	X		
1.3.7	Ne doivent pas occasionner d'autres risques.	X		
1.3.8	Sont situés à bonne distance de la zone	X		
1.3.9	dangereuse.			
1.4.1	Ne doivent pas trop limiter l'observation du cycle.	X		
	Doivent permettre le réglage et l'entretien.	X		
	Interdire l'atteinte de tout élément mobile.	X		
	<u>Les protecteurs fixes :</u>			
1.4.2.1	Doivent être solidement maintenus en place.	X		
	Doivent se démonter à l'aide d'outils.	X		
	Les fixations restent solidaires de la machine ou des protecteurs lors des démontages.	X		
	Ne restent pas en place seules.	X		
	<u>Les protections mobiles :</u>			
1.4.2.2	Leur ouverture provoque l'arrêt.			X
	Ouverture impossible tant qu'il y a mouvement (cas des machines à forte inertie).			X
	<u>Protecteurs réglables :</u>			
1.4.2.3	Doivent pouvoir se régler aisément, sans outil, en manuel comme en automatique.			X
	<u>Autres dispositifs de protection :</u>			
1.4.3	Présence de tapis sensibles.			X
	Présence de systèmes immatériels.			X
	Présence de système de maintien à distance.			X

D : Risques dus à l'énergie électrique.

	D1 : Energie électrique.			
Annexe1		OUI	NON	Sans objet.
1.5.1	Présence de protection pour les circuits de puissance et de commande.	X		
1.5.2				
1.6.3	Présence de prise de terre (alimentation, et neutre au secondaire pour les transformateurs).	X		
	Protection contre les contacts directs.	X		
	Raccordement en un seul point des conducteurs de terre.	X		
	Repérage des circuits non-sectionnés (fil orange).			X

	D2 : Energies autres qu'électriques.			
An. 1		OUI	NON	Sans objet.
1.5.3	Présences d'énergies pouvant générer un risque :	X		
1.6.3	Pneumatique.			X
	Hydraulique.		X	
	Thermique.		X	
	Fluides divers (sous pression, inflammables etc.).	X		
	Autres.		X	
Nota : Ici, ce sont les points notés « OUI » qui seront à traiter, ce tableau fait exception à la règle. Le réseau pneumatique du simulateur, n'est pas recensé comme étant à risque.				

E : Sécurité, fiabilité.

	E1 : organes et commandes de sécurité, de fiabilité.			
		OUI	NON	Sans objet.
An. 1	Fiabilité des circuits de commande et de puissance (pilotage de l'arrêt et de la mise en marche, pas de démarrages intempestifs, ou d'empêchement d'arrêt).	X		
1.2.1				
1.2.6	Pas de chute d'éléments, lors de mise en marche, d'arrêt.	X		
1.5.11	Conformité des A/U (signalisation, accessibilité, pouvoir d'arrêt).	X		
	Conformité des autres dispositifs de sécurité (ex : élingues, ceintures, crochets de levage).			X
	Si machine dédiée à la sécurité, faire la conception selon la norme ISO.en.13849-1.			X

F. Visibilité.

	F1 : Risques liés aux défauts d'éclairage.			
		OUI	NON	Sans objet.
Annexe1				
1.1.4.	Eclairage insuffisant pour réaliser le travail.	X		
	Eclairage du poste de travail.	X		
	Eclairage des armoires électriques.	X		
	Eclairage des points de maintenance.	X		

G. Manutention.

	F1 : Risques liés aux opérations de manutention.		
Annexe1	OUI	NON	Sans objet.
1.1.5.			X
1.7.3			X

H. Accès et conditions d'intervention.

	H1 : Moyens d'accès sécurisés.		
Annexe1	OUI	NON	Sans objet.
1.1.15.			
1.6.2.	Présence de moyens sécurisés pour l'utilisation, la maintenance, le réglage (escaliers, échelles, passerelles, lignes de vie, avertisseurs de personnes isolées, etc.)		X

	H2 : Dépannages et interventions.			
Annexe1		OUI	NON	Sans objet.
1.6.1.	Accès simple aux points d'intervention.	X		
1.6.4.	Accès aux points d'interventions sécurisés.			X
1.6.5.				

	H3 : Séparation des sources d'énergie.			
Annexe1		OUI	NON	Sans objet.
1.6.3.	Présence de dispositifs de condamnation et de mise à la purge :	X		
1.6.4.	-Présence d'un sectionneur électrique.	X		
	-Présence d'une vanne à purge pneumatique.	X		
	-Présence d'une vanne d'arrêt pour les fluides.	X		
	Présence d'éléments nécessitant une action volontaire pour remettre les énergies.	X		
	Présence d'éléments permettant la vérification d'absence d'énergie (manomètre, veilleuse, etc.)	X		
	Signalétique présente sur les éléments conservant de l'énergie (condensateurs, batteries, cuve d'air, réservoirs d'eau chaude, etc.)			X

I. Dispositions relatives à la conduite de la machine.

	I1 : Ergonomie, exigences générales.			
Annexe1		OUI	NON	Sans objet.
1.1.2 d	Ergonomie du poste respectée de façon « naturelle », en cas de doute demander une étude ergonomique.	X		
1.1.2 e				
1.1.6				
1.1.7.				
1.1.8.				

	I2 : Visibilité.			
Annexe1		OUI	NON	Sans objet.
1.1.2 b	Vision correcte des zones dangereuses depuis le poste de travail.	X		
1.5.14				
1.7.0	Si mauvaise vision des zones dangereuses, système muni d'avertisseur de démarrage et d'arrêt.			X

	I3 : Organes de service.			
Annexe1		OUI	NON	Sans objet.
1.2.2 a	Les organes de commande sont implantés de façon logique, et sont identifiés.	X		
	Protection des organes de commande contre les manœuvres involontaires (boutons affleurants, leviers à encliquetage, pédales capotées, etc.)	X		
	Les organes de commande sont situés en dehors des zones dangereuses.	X		
	Aucun organe de commande ne doit piloter la machine si une personne est dans une zone dangereuse.	X		
	Présence d'un organe de commande à action volontaire pour la mise en route.	X		
1.2.3	Si plusieurs postes de mise en marche, présence d'un sélecteur ne validant qu'un seul poste à la fois.			X
1.2.4 I	Présence d'un organe de commande de l'arrêt général.	X		
	L'ordre de d'arrêt doit être prioritaire sur l'ordre de marche.	X		
	Un dispositif de coupure est toujours associé à un variateur.			X

	I4 : Arrêt d'urgence.			
Annexe1		OUI	NON	Sans objet.
1.2.4 II	Présence d'un BAU à blocage mécanique.	X		
	BAU accessible et clairement identifié.	X		
	BAU présent sur tous les postes de commande.			X
	La désactivation du BAU ne fait qu'autoriser la remise en marche, elle ne l'ordonne pas.	X		

	I4 : Arrêt d'urgence.			
	OUI	NON	Sans objet.	
Annexe1 1.2.4 4	Le BAU arrête aussi les machines en amont et en aval, si leurs fonctionnements sont source de danger.		X	

	I5 : Sélecteur de marche.			
	OUI	NON	Sans objet.	
Annexe1 1.2.5	Les mouvements ne sont possibles, que si le sélecteur de marche est dans la position correspondante.		X	
	L'opérateur a la visibilité nécessaire à une mise en marche sans danger (des boîtiers mobiles peuvent être prévus).		X	

	I6 : Dispositif d'information.			
	OUI	NON	Sans objet.	
Annexe1 1.2.2 b 1.7.0	Présence de fiches de mise en marche et d'arrêt.		X	

	I6 : Dispositif d'alerte			
Annexe1		OUI	NON	Sans objet.
1.7.1	Présence d'un dispositif d'alerte si un fonctionnement défectueux peut entraîner un danger.			X

	I7 : Risques résiduels.			
Annexe1		OUI	NON	Sans objet.
1.7.2	Présence de moyens d'information des risques résiduels (pictogrammes, etc.)			X

J. Autres risques.

	J1 : Autres risques.			
Annexe1		OUI	NON	Sans objet.
1.1.3	Machine conçue sans matériaux dangereux pour la santé et la sécurité.	X		
1.6.5	L'utilisation, la récupération et l'évacuation des produits se fait sans risques.	X		

	J2 : Erreurs de montage.			
Annexe1		OUI	NON	Sans objet.
1.5.4	Présence de détrompeurs pour les éléments déconnectables.	X		
	Présence de détrompeurs sur les pièces ou les carters.			X

	J3 : Températures extrêmes, incendie, explosion.			
Annexe1		OUI	NON	Sans objet.
1.5.5	Tous les éléments susceptibles de provoquer des brûlures par contact ou projection, sont identifiés. Ils devront être calorifugés ou inaccessible.			X
1.5.6	La machine doit être conçue et construite de façon à éviter tout risque d'incendie.	X		
1.5.7	La machine doit être conçue et construite de façon à éviter tout risque d'explosion.	X		

	J4 : Bruit.			
Annexe1		OUI	NON	Sans objet.
1.5.8	La machine doit être conçue et construite de façon à réduire plus bas niveau, les risques liés au bruit.	X		
	Le bruit a-t-il été estimé, évalué, mesuré.	X		

	J5 : Vibration.			
Annexe1	OUI	NON	Sans objet.	
1.5.9			X	La machine doit être conçue et construite de façon à réduire plus bas niveau, les risques liés aux vibrations.
1.1.8			X	Les vibrations ont-elles été estimées, évaluées, mesurées.

	J6 : Rayonnement.			
Annexe1	OUI	NON	Sans objet.	
1.5.10			X	La machine doit être conçue et construite de façon à réduire plus bas niveau, les risques liés aux rayonnements.
1.5.11			X	L'utilisation de lasers, ne doit pas porter atteinte à la santé.
1.5.12			X	L'équipement laser doit être conçu de façon à éviter tout rayonnement involontaire.

	J7 : Emissions de matières dangereuses.			
Annexe1	OUI	NON	Sans objet.	
1.5.13	X			La machine doit être conçue et construite de façon à éviter le contact avec la peau et les muqueuses, l'ingestion et l'inhalation, ainsi que la pénétration percutanée des substances et matières dangereuses qu'elle utilise.

	J8 : Risques liés à la foudre.			
	OUI	NON	Sans objet.	
Annexe1 1.5.16	Les machines nécessitant une protection contre les risques liés à la foudre pendant leurs utilisations, doivent être équipées de systèmes permettant l'évacuation de la charge électrique résultante à la terre.			X

	J9 : Règles techniques supplémentaires applicables aux machines agro-alimentaires.			
	OUI	NON	Sans objet.	
Annexe2 2.1 de a à g	Machine conçue et fabriquée de façon à éviter les risques d'infection, de maladie, et de contagion. Les règles d'hygiène de la directive doivent être observées.			X

	J10 : Règles techniques supplémentaires applicables aux machines mobiles.			
	OUI	NON	Sans objet.	
Annexe3 3.1 à 3.7	Risques spécifiques liés aux machines mobiles devant être conduites. Se référer à la norme.			X

	J11 : Règles techniques supplémentaires applicables aux machines levant des charges.			
Annexe4		OUI	NON	Sans objet.
4.1 à	Risques spécifiques liés aux machines de levage.			X
4.3.4	Les accessoires de levage doivent être certifiés CE.			X

	J12 : Règles techniques supplémentaires applicables aux machines destinées au levage/déplacement des personnes.			
Annexe6		OUI	NON	Sans objet.
6.0 à 6.5	Risques spécifiques liés au levage/déplacement des personnes. Se référer aux annexes citées.			X
				X

K. Présence des déclarations CE.

	K1 : Présence des déclarations obligatoires.			
R4313-59		OUI	NON	Sans objet.
R4311-6	Une fiche de déclaration a-t-elle été établie.	X		
	Une fiche de déclaration d'incorporation a-t-elle été établie.			X

Déclaration de conformité CE

Le fabricant :

Laboratoire PRISME (laboratoire Pluridisciplinaire de Recherche en Ingénierie des Systèmes, Mécanique, Energétique), situé 8 rue Léonard de VINCI 45072 Orléans Cedex 2,

Déclare que la machine désignée ci-dessous :

Simulateur de caténaire à fonction pédagogique, modèle 1, série 1,

est conforme aux dispositions de la directive, dite directive machine, n°2006/42/CE, et aux législations nationales la transposant.

De par les documents établis dans le dossier de certification, il apparaît que la machine précédemment citée satisfait à l'ensemble des dispositions pertinentes de la présente directive.

Conformément à l'annexe IX de la directive, une procédure d'examen de type CE a été réalisée par l'organisme notifié suivant :

APAVE Orléans

12 chemin du pont Cotelte

45073 ORLEANS

Pour lequel il a été établi le numéro d'attestation suivant :

Normes appliquées : EN 292 (ISO/CEI 12100, principes généraux de conception).

EN 982(ISO/CEI 4413, sécurité des systèmes hydraulique).

Fait à,

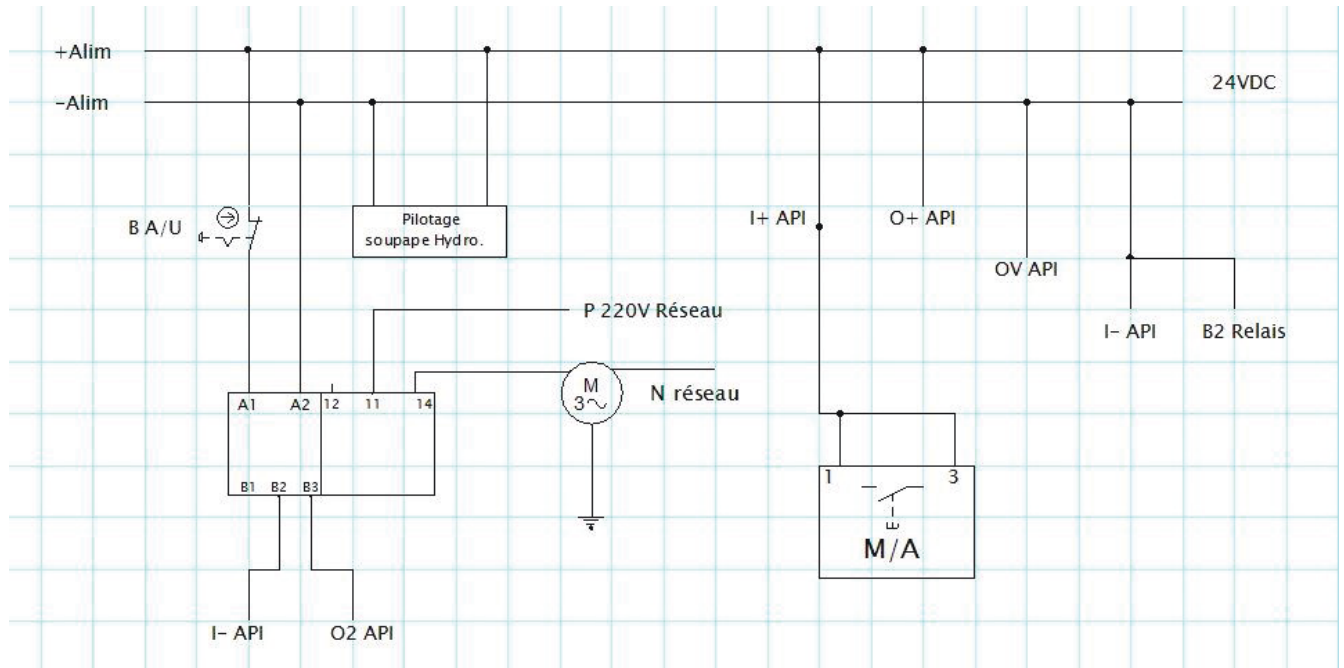
Le,

Par Mr,

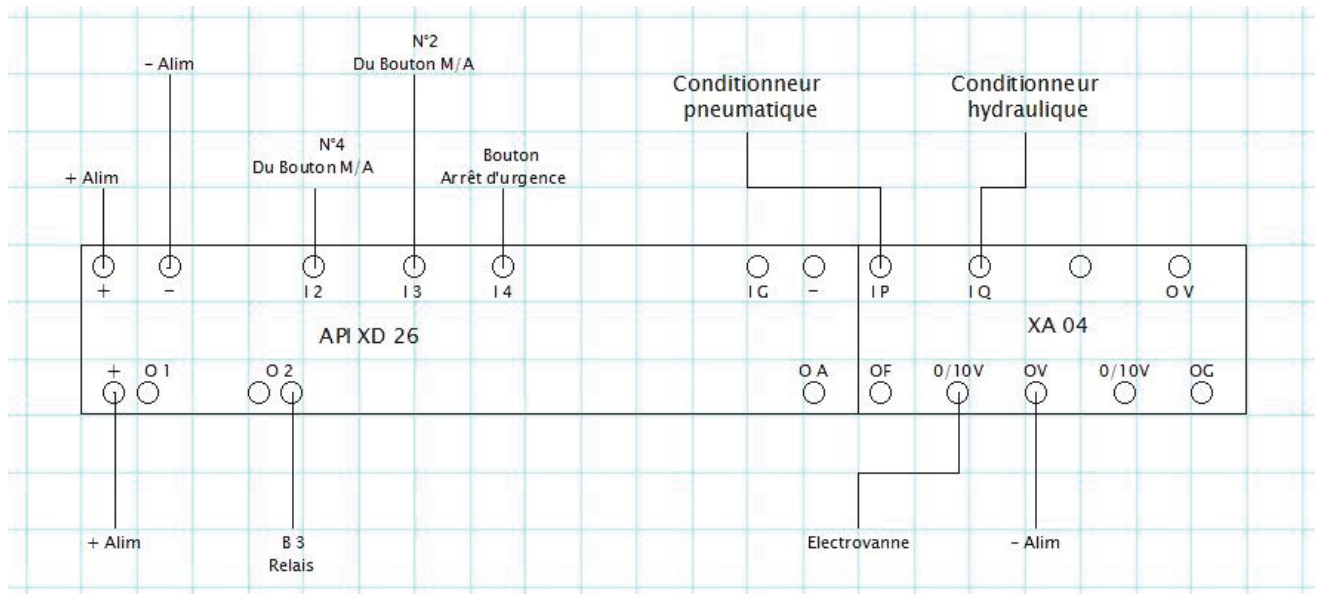
Fonction,

Schémas de câblage des éléments électriques.

Éléments secondaires



Câblage de l'automate



ANNEXE 3

Chiffrage des éléments destinés à l'amélioration du simulateur de caténaire.

Éléments à commander sur le site FRANCO BELGE :

1. 1 armoire ATLANTIC 500x400x250	ref.035507	153.90 € HT
2. 1 sectionneur général	ref.022503	53.84 € HT
3. 2 répartiteurs 220V	ref.004881	31.54 € HT
4. 1 disjoncteur avant alimentation	ref.406772	17.21€ HT
5. 300 embouts de câbles	ref.037644	5.45€ HT
6. 1 plaque lina 12.5	ref.036009	38.40€ HT
7. 1 rail lina	ref.047722	7.94€ HT
8. 1 goulotte lina	ref.036206	4.87€ HT
9. 1 relais de sécurité XPS AC	ref.3721	93.41€HT

TOTAL.....406.56 € HT

Élément à commander sur le site RADIOSPARES :

- 1 alimentation dr120 24VDC 5A.....ref.282-502.....92.37€ TTC

Élément à commander chez HYDROTEC (devis fourni) :

- 1 centrale hydraulique 0.37 kW.....770€ HT