

Projet Intensif

Commande à distance d'un système par réseau IP

H. Descoubes, P. Lefebvre, M. Frikel, O. Gehan
hugo.descoubes@ensicaen.fr
Majeure SATE

Signal Automatique pour les Télécommunications et systèmes Embarqués
Spécialité Electronique et Physique Appliquée
Ecole Nationale Supérieure d'Ingénieurs de Caen
6 Bd Maréchal Juin, 14050 Caen cedex 04

Résumé :

L'objectif de cet article est de présenter un projet intensif réalisé pour la première fois à l'ENSICAEN dans la spécialité Electronique et Physique Appliquée. Cet exercice a été mis en place courant octobre 2012 sur 9 jours de formation banalisés. Le public visé était un groupe de 16 élèves ingénieurs en 3^{ème} et dernière année d'école (BAC+5) en spécialité Electronique et Physique Appliquée. Ce groupe d'étudiant travaille en majeure SATE, option offrant une spécialisation dans les domaines du Signal et de l'Automatique pour les Télécommunication, ainsi qu'en Systèmes Embarqués. Le projet proposé exigeait des compétences pluridisciplinaires dans les domaines de l'Automatique, des Réseaux, de l'Instrumentation, du développement logiciel sur ordinateur et des Systèmes Embarqués. Bien plus qu'un simple TP avancé (Travail Pratique), nos objectifs étaient multiples. Les parties gestion, suivi de projet, relations clients y tenaient une part non négligeable.

Mots clés : Projet, Equipe, Client, Automatique, Systèmes Embarqués, Réseaux, Systèmes Temps Réel

1 Introduction

Cet article vous présente un projet intensif réalisé pour la première fois à l'ENSICAEN dans la spécialité Electronique et Physique Appliquée. Ce type d'exercice est déjà mis en place dans notre école au sein de la spécialité Informatique sur des durées plus courtes (4-5 jours). Cependant, les contraintes associées à notre cahier des charges imposant la mise en œuvre de matériel, impliquent une période de développement plus longue. L'architecture de ce document respecte chronologiquement l'élaboration, la réalisation puis l'analyse post-projet du travail effectué :

1. Introduction
 - 1.1. Contexte
 - 1.2. Objectifs
2. Gestion et suivi de projet
3. Solution technique
 - 3.1. Cahier des charges
 - 3.2. Logiciel embarqué
 - 3.3. Logiciel sur ordinateur
 - 3.4. Automatique
4. Analyse post-projet
 - 4.1. Analyse côté enseignant
 - 4.2. Analyse côté étudiant
5. Conclusion
6. Remerciements

1.1 Contexte

Un aspect essentiel de ce projet était de tenir un jeu de rôle, aussi bien côté étudiant qu'enseignant, afin de maintenir une motivation et un investissement constant tout au long des 9 jours. L'équipe enseignante se positionnait en tant que client lançant sur le marché un appel d'offre. Les étudiants étaient réunis en 3 équipes de 5 à 6 élèves ayant toutes un chef de projet, lui-même étudiant du groupe. Chaque équipe représentait une société répondant à l'appel d'offre (cf. fig 1). Des noms d'entreprises, logos et chartes graphiques de documents furent d'ailleurs inventés par les différentes équipes pour l'occasion. Le seul intermédiaire entre le client et la société répondant à l'appel d'offre était le chef de projet.

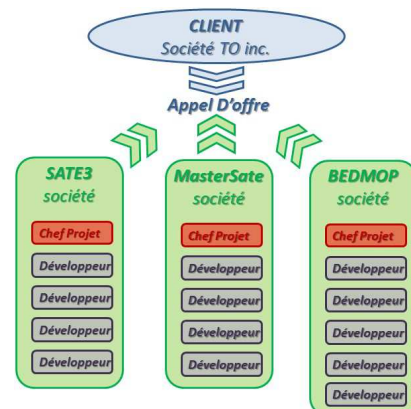


Fig. 1 : Modèle relationnel du projet

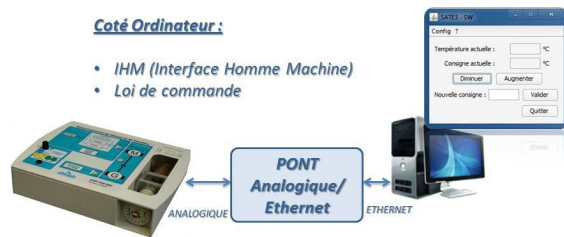


Fig. 2 : Architecture application, commande à distance par réseau IP

Durant la totalité du projet, les équipes enseignantes de l'école ne devaient apporter aucun support technique aux élèves. Le travail s'est donc déroulé en parfaite autonomie, les étudiants ayant accès durant la totalité du projet à une salle où étaient installés les différents procédés à commander, les ordinateurs et tout le matériel nécessaire à la réalisation de l'application.

Le cahier des charges était volontairement succinct, les étudiants ayant notamment comme objectif d'en extraire l'essentiel afin de pouvoir poser les spécifications fonctionnelles et techniques de leur application. Charge à eux de demander au client des précisions sur le cahier des charges s'ils en ressentaient le besoin. Nous avons d'ailleurs dès le début prévu un cahier des charges changeant en cours de projet afin d'observer le comportement des élèves face à ce type de situation.

Techniquement parlant, le travail demandé consistait à réaliser l'asservissement d'un procédé à travers un réseau IP (cf. fig.2), chaque équipe ayant un système différent à asservir. Les étudiants devaient développer l'environnement logiciel embarqué sur le pont Ethernet/Analogique ainsi que celui exécuté sur ordinateur. La loi de commande devait être enfouie dans le logiciel côté PC qui devait proposer une IHM à l'utilisateur (Interface Homme Machine).

Le pont ou bridge Ethernet/Analogique est réalisé via une maquette de développement embarquant un microcontrôleur ou MCU (Micro Controller Unit). Le cahier des charges sera présenté plus en détails dans la suite de ce document en partie 3.

1.2 Objectifs

Les objectifs visés à travers ce projet étaient multiples. Énumérons les principaux points sur lesquels nous souhaitons développer des compétences :

- **Travail en Equipe :** Illustrer les contraintes du travail en équipe en tant que développeur ou chef de projet. Il faut s'accommoder des

caractères de chacun afin de mener le projet à terme tout en assurant une bonne cohésion, ce qui n'est pas toujours évident. Le chef de projet doit notamment jouer un rôle essentiel, sur des aspects de gestion/suivi de projet, des aspects techniques et de relation client bien évidemment, mais également sur la bonne orchestration des rapports humains au sein de son équipe.

- **Approche Projet :** Savoir répondre et faire face de façon pragmatique à un appel d'offre client et un cahier des charges changeant. Assurer une grande rigueur quant aux relations et les échanges avec les clients tout en sachant affirmer son point de vue sur des aspects techniques ou managériaux.
- **Autonomie :** Mettre les élèves dans un contexte de travail sans aucun support technique sur un cahier des charges mettant en œuvre de nouvelles compétences non encore abordées au sein de l'école.
- **Gestion et suivi de projet :** Nous souhaitons un interlocuteur unique entre client (enseignants) et société répondant à l'appel d'offre (chef de projet, étudiant). Le chef de projet doit assurer et anticiper la bonne planification de son projet (tâches, temps et ressources humaines), son bon suivi, être à même de modifier le plan d'exécution et la répartition des ressources en court de projet, servir de support sur certains développements tout en assurant la communication avec le client.
- **Gestion du temps :** Comme pour beaucoup de sociétés, le cycle de vie d'un projet amène des périodes plus ou moins riches et exigeantes en charge de travail. Les derniers temps avant la remise d'un produit au client peuvent être gourmands en énergie.
- **Gestion du stress :** Mettre en avant l'esprit critique des élèves ingénieurs en mettant toujours plus en doute leurs choix et solutions techniques, notamment durant des périodes où la fatigue et le stress sont présents.
- **Compétences et Connaissances :** Développer de nouvelles compétences et en assoier d'anciennes afin de préparer sereinement la dernière année de formation à l'école. Mettre en avant le fait qu'avec leur formation actuelle les élèves ingénieurs sont capables de s'adapter rapidement à de nouveaux outils et de nouvelles compétences non développées jusqu'à présent. Devant la complexité de certains problèmes quelques élèves se sentent dépassés. Ce projet doit leur permettre de développer plus de confiance en eux-mêmes.

2 Gestion et suivi de projet

Afin d'assurer une implication et une motivation étudiante continues durant la totalité du projet nous devons assurer de notre côté un suivi et un jeu de rôle soutenu. Le suivi de projet se faisait via des réunions client régulières afin de suivre l'avancement du travail de chaque équipe. Ces réunions étaient réalisées en salle des actes, pièce solennelle inconnue des élèves et généralement dédiée à l'accueil d'officiels.

Ayant pointé à mi-parcours quelques problèmes et maladroites quant aux solutions techniques proposées, nous avons pris alors l'initiative de nous rendre dans leurs locaux avec notre propre équipe technique. Notre équipe Client était constituée de 3 élèves de 2^{ème} année SATE et 3 élèves de 3^{ème} année Spécialité Informatique, tous préparés et conscients du cahier des charges.

Observons chronologiquement le déroulement du projet en faisant apparaître les dates clés :

- **Mercredi 26 septembre 19h :** Présentation du projet intensif et présentation de l'appel d'offre. Création des équipes et choix des chefs de projet.
- **Jeudi 27 septembre 17h :** Réunion de présentation des plans d'exécution des projets.
- **Lundi 01 octobre 14h :** Réunion de présentation d'avancement des projets.
- **Mardi 02 octobre 19h :** Visite au sein de leurs locaux avec notre équipe technique.
- **Mercredi 03 octobre 18h :** Evolution du cahier des charges.
- **Jeudi 04 octobre 15h :** Dernière réunion de présentation d'avancement des projets.
- **Vendredi 05 octobre 16h :** Présentation des projets et d'une vidéo de 3mn. Il était alloué 40mn par équipe. Environ 30-40 personnes étaient présentes (enseignants et élèves).

3 Solution technique

3.1 Cahier des charges

Le cahier des charges imposé durant la présentation du projet était succinct. Le matériel était imposé, néanmoins certaines solutions logicielles étaient laissées au libre choix des équipes de développement.



Fig. 3 : Architecture fonctionnelle de l'application

Le projet consiste à réaliser l'asservissement d'un procédé depuis un ordinateur (cf. fig. 3). La solution finale devait être polyvalente et devait pouvoir s'adapter à n'importe quel procédé piloté par des grandeurs analogiques comprises entre 0V et 10V. L'algorithme de commande devait être exécuté sur ordinateur. En ajout au cahier des charges initial, en cas de perte de connexion du réseau, le microcontrôleur ou MCU devait basculer en mode autonome et assurer l'asservissement du système. Après rétablissement de la communication IP, l'ordinateur devait reprendre la main et exécuter à nouveau l'algorithme de commande.

Une partie des outils et de la solution logicielle embarquée étaient imposés :

- Conversion analogique numérique réalisée par CAN (Convertisseur Analogique Numérique) AD7634 de Analog Device.
- Développement sur MCU 32bits PIC32MX795F512L de Microchip. Utilisation de la maquette de développement explorer 16 (cf. fig. 4).
- Le MCU doit embarquer un RTOS (Real Time Operating System) ou système d'exploitation temps réel.
- L'algorithme de commande doit par défaut être exécuté par l'ordinateur.
- Développement d'une IHM côté PC (paramétrage réseau, configuration manuelle régulateur, Affichage pseudo-temps réel des grandeurs significatives de l'asservissement, mode identification automatique ...)

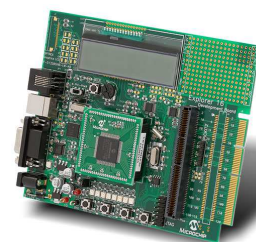


Fig.4 : maquette de développement explorer 16

Bien entendu, comme nous nous trouvons dans le cadre d'une formation d'ingénieur, les élèves ne devaient pas utiliser des outils de prototypage rapide (Simulink, Labview ..) et devait être à même de maîtriser l'application de A à Z. Ce qui reflète la réalité industrielle.

A partir de maintenant, nous vous présenterons une seule des solutions proposées par les différentes équipes (société MasterSate). Celle qui nous semble techniquement la plus aboutie, mais qui paradoxalement n'a pas été celle retenue par le client. Nous aurons l'occasion de vous présenter ultérieurement notre choix et sa justification en partie 5.

3.2 Logiciel embarqué

Une grosse partie du projet consistait à développer le logiciel embarqué sur MCU (cf. fig 5). Le chef de projet devait notamment avec l'aide de son équipe définir l'architecture logicielle de l'application embarquée. Ceci passe par la définition des spécifications fonctionnelles et techniques.

L'approche des différentes équipes a été sur ce point très rigoureuse. La première étape était de valider indépendamment tous les modules logiciels et matériels de l'application :

- **Gestion des périphériques standards du MCU :** GPIO (General Purpose Input Output), UART (Universal Asynchronous Receiver Transmitter), SPI (Serial Peripheral Interface), PWM (Pulse Width Modulation) ou MLI (Modulation de Largeur d'Impulsion) et Timer (compteur matériel).
- **Validation librairie AD7634 :** bibliothèque de fonctions en langage C assurant le pilotage du CAN AD7634.
- **Validation RTOS :** Le choix des étudiants s'est naturellement porté vers FreeRTOS, un exécutif temps réel libre et open source. Cet outil avait déjà été découvert à l'école dans le cadre de la formation.
- **Validation Librairie Réseau :** Les différents groupes ont pris l'initiative de travailler avec la librairie réseau de Microchip (outil libre et open source). Les élèves n'avaient jamais développé d'application réseau sur MCU.

Une fois les tests unitaires réalisés, les tests d'intégration ont été abordés. Cette étape est loin d'être la plus simple contrairement à ce que l'on pourrait croire. Tous les groupes ont été confrontés à de grosses contraintes techniques liées notamment à des soucis de routage des cartes de développement.

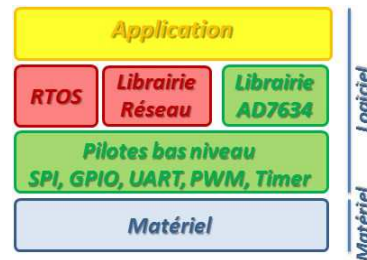


Fig. 5: Pile logicielle embarquée sur MCU

3.3 Logiciel sur ordinateur

Cette partie fut également l'un des points délicat du projet. Nos étudiants sont des élèves ingénieurs spécialisés en Electronique et non en Informatique. Même si durant leur formation les élèves ont pu suivre des enseignements de développement logiciel sur ordinateur (C, JAVA, UML, algorithmique), le cahier des charges imposé allait bien au-delà de leurs compétences. Il exigeait notamment les contraintes suivantes :

- Interface conviviale et intuitive avec l'utilisateur (mode débutant et mode expert).
- Affichage pseudo-temps réel des grandeurs significatives de l'asservissement (consigne, mesure et commande)
- Communication réseau. L'IHM encapsule 2 clients IP, un client TCP et un client UDP.
- Affichage d'un terminal réseau permettant de nous assurer à chaque instant de l'état de la communication.

Le choix de cette équipe s'est naturellement tourné vers la boîte à outils QT et du développement C/C++ (cf. fig. 6). L'un des développeurs avait déjà de l'expérience sur ces outils.

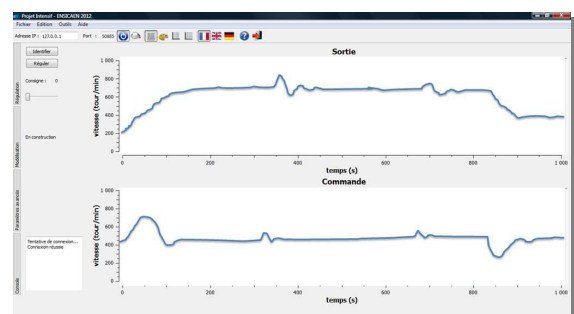


Fig. 6 : IHM développée en C++/QT

3.4 Automatique

La partie Automatique exigeait un niveau important d'abstraction, les différentes grandeurs significatives de l'asservissement traversant un grand nombre de couches logicielles, réseaux et matérielles.

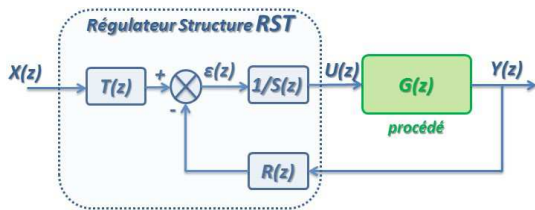


Fig. 7 : Régulateur numérique structure RST

Les étudiants se sont tournés vers une solution déjà vue en formation à l'école en deuxième année, les techniques de commande avancées de systèmes linéaires et non-linéaire étant vues durant leur dernière année d'étude.

Le régulateur choisi est un régulateur numérique à structure RST dont la synthèse a été réalisée par placement de pôle (cf. fig. 7). La structure RST, dont le PID est un cas particulier, possède l'avantage d'être universelle pour l'ensemble des régulateurs linéaires, c'est-à-dire indépendante de la méthode de synthèse choisie. Le problème d'Automatique de ce projet concerne la synthèse d'une loi de commande linéaire pour des systèmes possédant des modes vibratoires non modélisés et un retard non négligeable. Ce dernier point est naturellement l'un des aspects critiques de la commande à travers le réseau. A partir des connaissances actuelles des étudiants, ces deux problématiques ne pouvaient être traitées qu'à l'aide d'une analyse de la robustesse du système de commande par rapport aux erreurs de modélisation.

En effet, les grandeurs de commande et de mesure circulent sur un réseau IP, protocole offrant de fortes latences. Ce type de réseau n'est pas déterministe. L'un des premiers travaux de chaque équipe a d'ailleurs été d'estimer le temps de latence du réseau sur différents types de boucles. Ces mesures ont ensuite été traitées et comparées aux contraintes imposées par la dynamique du système, notamment au vu du choix de la période d'échantillonnage.

Pour conclure, durant la présentation finale, des tests sur procédé (Machine à courant continu) ont révélé un bon comportement au regard de la poursuite et le bon rejet de perturbation d'entrée sur le système. L'affichage pseudo-temps réel sur ordinateur des différentes grandeurs de l'asservissement aide grandement à la validation des deux points cités précédemment.

Après 9 jours de projet intensif, la quasi-totalité du cahier des charges était remplie et un prototype opérationnel était présent pour attester de leur travail devant le client. Une présentation PowerPoint a également été réalisée ainsi qu'un film de 3mn, spécialement préparé pour le CETSIS 2013.

4 Analyse post-projet

Plus qu'un simple TP, nous souhaitons attirer l'attention des élèves sur l'importance d'une bonne gestion de projet tant d'un point de vue organisationnel qu'humain. Nous souhaitons en particulier pointer du doigt l'intérêt de structurer dès le début un projet afin d'en assurer son bon suivi et sa bonne réalisation. Le contexte se prêtait donc bien à illustrer le cycle de vie en V d'un projet industriel (cf. fig. 8).

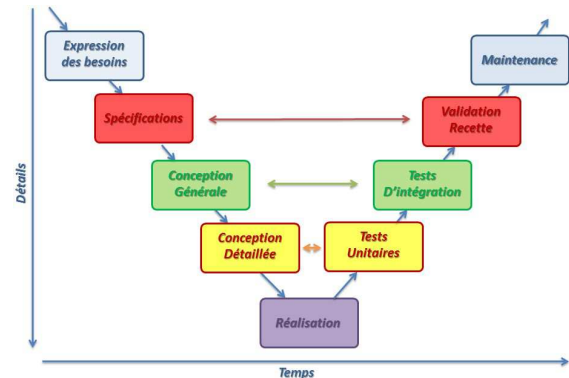


Fig. 8 : Cycle de vie d'un projet

Nous allons maintenant reprendre nos différents objectifs initiaux et vous présenter notre analyse. Ensuite, les retours des étudiants vous seront présentés de façon synthétique.

4.1 Analyse côté enseignant

- **Travail en Equipe** : Difficile de commenter cette partie, nous n'étions pas au sein des équipes durant le projet.
- **Approche Projet** : Il y a du bon et du moins bon, dans tous les cas il faut en tirer des enseignements.
 - **Mr M. société SATE3** : Très bon suivi tout au long du projet. Jeu de rôle en place dès la première réunion. Un peu trop de zèle en début de projet a coûté à son équipe un accroissement du cahier des charges.
 - **Mr J. société BEDMOP** : Très bon départ à la première réunion mais nous avons senti un essoufflement voir un arrêt du suivi dès la seconde rencontre. Dommage, cela a coûté un contrat à cette équipe.
 - **Mlle H. société MasterSate** : Départ très timide et trop scolaire. En revanche, revirement complet à mi-parcours pour finir sur un suivi rigoureux.
 - **Chefs de projet** : l'emploi dès le début du projet d'outils dédiés auraient rendu la tâche plus aisée. Fait par MasterSate trop tard.

- **Tous les élèves :** Le jeu de rôle a pris quelques jours pour se mettre en place mais a été relativement bien suivi.
- **Autonomie :** Très bonne surprise de notre côté. L'autonomie fut totale malgré beaucoup de maladresses techniques. Cependant, cela reste encore normal à ce stade de la formation. Charge aux élèves d'asseoir maintenant leurs connaissances et d'en développer de nouvelles afin d'être convaincu des solutions qu'ils avanceront dans le futur.
- **Gestion et Suivi de projet :** Difficile de commenter cette partie. Aux élèves de présenter leurs ressentis en tant que chef de projet ou développeur puis d'en tirer des enseignements.
- **Gestion du temps :** Très bonne surprise également. Nous avons vu des élèves motivés et impliqués ne comptant pas leurs heures tout au long du projet, surtout vers la fin.
- **Gestion du stress :** De ce côté-là, il y avait du bon et du moins bon. A des questions techniques posées par des personnes maîtrisant le sujet, il est parfois préférable de dire "je ne sais pas, je me documente et je vous tiens rapidement informé" plutôt que de bricoler une réponse hasardeuse pouvant affecter la crédibilité de l'ingénieur. Il s'agit de l'une des compétences les plus difficiles à développer et à mettre en œuvre pour un ingénieur. C'est pourtant l'une des plus importantes, l'esprit critique.
- **Compétences et Connaissances :** Sur ces aspects, très bonne surprise. Les étudiants ont très rapidement su mettre en application leurs précédents acquis puis adopter une démarche ingénieur et un esprit critique quant à l'utilisation de nouveaux outils. Par exemple pour le développement de l'IHM.

4.2 Analyse côté étudiant

Durant les semaines suivant le projet, un document centralisant et synthétisant les retours et remarques des élèves fut rédigé. Observons en quelques points les principaux commentaires étudiants.

- **Travail en équipe, gestion et suivi de projet :** Les étudiants ont pris conscience de l'importance du chef de projet et donc d'une bonne structuration, logistique et coordination durant tout le déroulement de l'exercice. Le chef de projet doit assurer en temps plein la coordination du projet, ne servir que de support sur certains traitements et ne doit surtout pas être accaparé par une tâche technique précise.
- **Approche Projet :** Importance du jeu de rôle mitigé en fonction des élèves interrogés.

Certains étudiants auraient appréciés des réunions à distance (visioconférences ou téléphoniques).

- **Autonomie :** Très peu de difficultés à mettre en œuvre des compétences déjà vu en enseignements, ce n'était en revanche pas le cas pour de nouvelles technologies sur des délais aussi courts.
- **Gestion du temps et du stress :** Les élèves regrettent le trop grand nombre d'évolutions en cours de projet du cahier des charges initial. Nous serons attentifs sur ce point les années suivantes.
- **Compétences et Connaissances :** Ensemble positif pour les étudiants ayant travaillé sur de nouvelles technologies ou outils, mais en revanche plus mitigé pour les autres. Travailler sur des processeurs proposés par d'autres fondeurs aurait été un plus.

5 Conclusion

Au final, la société retenue n'est ni celle ayant offert la meilleure solution technique, ni celle ayant assuré la meilleure communication durant les présentations finales. Après délibération du conseil constitué de 5 enseignants, notre choix s'est porté vers la société ayant compris le mieux nos attentes et ayant assuré le suivi le plus rigoureux. Il s'agit de la société MASTER3. Rappelons que les élèves travaillaient en autonomie et que nos seuls contacts avec eux étaient les réunions en cours de projet, les nombreux échanges de mails ainsi que la visite au sein de leurs locaux. Nous nous sommes efforcés de choisir notre future société partenaire de la façon la plus objective possible.

Pour conclure, nous sommes dans l'ensemble très satisfaits du travail réalisé par les étudiants ainsi que par leur implication. Nous espérons que cette expérience ait apporté un plus à leur formation, notamment au regard des objectifs que nous nous étions fixés. D'ores et déjà, d'autres majeures de l'école seraient intéressées par cette formule.

6 Remerciements

Un grand merci à tous les élèves ayant suivi ce projet. Merci pour votre implication et votre motivation :

BERNARDI Jean-David, DELGADO Pablo, EL AZHAR Ahd, FABRE Cyrille, GERARDIN Ludovic, GIRAULT Léo, GUINOIS Morgan, LANTERI Rémi, LIAIS Jean-Baptiste, MAREAU Julien, MARPAUD Cyril, NDIAYE Mouhamed, OLIVIER Jérôme, PIRET Hélène, PROST Pierrick, STARCK Gaëtan