

Proposition de sujet de thèse-Contrats Doctoraux 2024-2027

Titre du sujet :

Conception et commande optimale de robots parallèles à câbles reconfigurables pour des applications de fabrication additive de grandes dimensions

Laboratoire d'accueil : Institut Clément Ader UMR CNRS 5312

Thématique : Robotique parallèles à câbles, Conception Mécanique et Commande.

1) Résumé

La fabrication additive (FA) pour la construction de bâtiments est en plein essor car elle permet de réduire les coûts. Cependant, les moyens actuellement utilisés n'offrent pas beaucoup de flexibilité. Afin de s'adapter aux topographies des sites de construction et à la géométrie des bâtiments, l'architecture mécanique qui entraîne la tête d'impression doit pouvoir s'adapter facilement à son environnement. Pour cela le mécanisme utilisé doit avoir un grand espace de travail, être reconfigurable, simple d'utilisation, facilement transportable et suffisamment précis. Les robots parallèles à câble (RPC) peuvent être une alternative pour offrir cette adaptabilité à la FA de grandes dimensions. Les RPC sont moins précis que leurs homologues à segments rigides car l'utilisation de câbles rend l'architecture plus souple. La prise en compte de la déformation des câbles peut réduire cette imprécision. Cependant, la variation des modules de Young des câbles due à la boucle d'hystérésis est très difficile à quantifier en temps réel. La position des points d'ancrage des poulies influence fortement la précision de la plateforme mobile (PM). Dans ce contexte, l'objectif général est de développer une architecture ainsi qu'une commande optimale de RPC reconfigurable pour des applications de FA de grandes dimensions.

2) Contexte et état de l'art

L'augmentation des quartiers précaires touche le monde entier, cela peut impacter jusqu'à 90% de la population dans les pays les plus pauvres. Ce développement du mal logement est une conséquence directe d'un coût trop élevé de fabrication des habitations. La FA peut grandement aider à réduire les coûts en diminuant le temps d'immobilisation des chantiers et en consommant moins de matériaux, améliorant ainsi l'impact écologique dans le contexte actuel de développement durable. Cela contribuera aux ODD 9 et 11 (objectif de développement durable 9 - innovation et infrastructures et 11 - villes et communautés durables) de l'Agenda 2030 de l'ONU, auprès duquel l'état français s'est engagé. D'autre part, avec les moyens existants nous constatons déjà une économie financière de l'ordre de 15%. Il est envisageable d'avoir des gains pouvant aller de 20 à 30% une fois les processus éprouvés. Ces dernières années, les méthodes de FA ont été grandement développées et ont rapidement été intégrées au sein de l'industrie. La FA regroupe les processus qui produisent des pièces en déposant des matériaux couche par couche. Il est alors possible de produire des formes complexes sans avoir besoin d'outillage [1]. La FA a été appliquée à de nombreux secteurs comme l'aéronautique, la santé ou bien encore la construction. Néanmoins, une des limites des processus de FA existants concerne la taille des produits fabriqués. De ce fait, la FA de grandes dimensions est un domaine relativement récent du monde de la recherche. Une des applications principales de la FA de grandes dimensions est la construction d'ouvrage de bâtiment [2,3].

L'objectif de la FA de grandes dimensions est de réduire les coûts en ayant une plus grande automatisation durant la construction. Ce qui est essentiel en FA pour la construction sur site est d'avoir un robot possédant un grand espace de travail, reconfigurable, simple d'utilisation, facilement transportable et suffisamment précis pour déplacer la tête d'impression tout en évitant les collisions avec son milieu. Comparés aux mécanismes rigides traditionnels, les RPC peuvent être une solution efficace pour la FA de grandes dimensions. En effet, les RPC possèdent un grand espace de travail, un rapport charge/poids plus élevé et un faible coût lié à leur architecture formée de câbles, de poulies et d'enrouleurs [4]. De plus, ils sont suffisamment flexibles et modulaires grâce au repositionnement possible des points d'ancrage des câbles pour s'adapter à différents environnements.

L'architecture d'un RPC comprend un cadre externe rigide où sont fixés les enrouleurs et les poulies de renvoi. Dans le cas de la FA de grandes dimensions pour la construction, le cadre externe doit être composé de pylônes repositionnables d'où la terminologie de RPC reconfigurables. Le RPC comprend également une Plateforme Mobile (PM) qui est reliée aux actionneurs par des câbles flexibles ne pouvant être utilisés qu'en traction. En FA, la PM doit accueillir la tête d'impression. Les RPC suspendus où les câbles arrivent uniquement par le dessus de la PM simplifient le problème d'interférence des câbles et ont l'avantage de ne pas occuper le niveau du sol. De plus, pour faire de la FA, les six degrés de liberté de la PM sont nécessaires. L'utilisation d'un RPC suspendu à six câbles semble être la configuration la plus indiquée. Il faudra cependant prendre en compte les effets de l'environnement extérieur comme par exemple le vent.

La première imprimante 3D commercialisée (la SLA-250) et la première application d'un RPC moderne (la Skycam) datent d'une trentaine d'années. Il a fallu attendre plus de 20 ans pour que ces deux technologies soient utilisées ensemble. C'est donc seulement depuis environ 8-9 ans que la recherche investigate la FA par RPC. Néanmoins, l'étude de la FA de grandes dimensions par RPC reconfigurable pour de la construction in situ d'ouvrage de bâtiment n'a jamais été réalisée à notre connaissance. En effet, nous pouvons citer les travaux de [2,3] qui traitent de la FA pour le bâtiment, mais avec des robots sériels. [5] étudie l'application de RPC de grande dimension reconfigurable, mais pour des opérations de sauvetage. [6,7] travaillent sur de la FA par RPC, mais pour des pièces de petites dimensions. Il existe peu de travaux qui se rapprochent de ce sujet de thèse, les plus analogues sont [8,9,10] qui montrent la faisabilité de l'utilisation des RPC pour de la FA de grandes dimensions pour la construction. Cependant, ce sont des RPC d'architecture fixe, donc destinés à fabriquer des pièces en atelier puis à les transporter sur site. Ils ne sont pas suffisamment modulaires pour des constructions directement sur chantier avec des formes et des tailles très diverses.

De plus, la mise en place d'un RPC sur site rendrait plus flexibles et simplifierait les chantiers en fabriquant les fondations, les murs, les isolants ou encore en aidant à la pose de containers ou d'éléments préfabriqués, voire même remplacer les échafaudages. La pénibilité du travail des ouvriers s'en trouverait grandement réduite, puisque seulement deux ou trois techniciens seront nécessaires au pilotage de ce type de robot. Ce nouveau moyen qu'est la FA par RPC reconfigurable pour la construction in situ est en rupture significative avec les moyens actuels du bâtiment. L'état de l'art montre que ce sujet est novateur et il permettra de contribuer à l'intégration de la FA dans le milieu du bâtiment. D'autre part, ce sujet a parfaitement sa place dans la thématique « Robotique dans l'usine du futur » portée par le CNRS ou bien le défi clé « Robotique centrée sur l'humain » portée par la région Occitanie. En effet, il projette de mieux comprendre et d'amplifier le développement de la FA de grandes dimensions par RPC pour que la France reste compétitive dans cette technologie innovante de la construction.

3) Verrous scientifiques

La recherche internationale en FA réalisée par RPC est très récente. Il n'existe que quelques applications pour des pièces supérieures à $1m^3$, mais celles-ci sont fabriquées en atelier et avec une architecture de RPC fixe. De plus, les maisons construites à l'heure actuelle directement sur site en FA sont réalisées par des systèmes robotiques sériels ou parallèles composés de segments rigides et dépassent difficilement les $100m^2$ sans avoir à déplacer la base du robot. En effet, ce type de mécanisme est peu flexible et devient vite complexe d'utilisation quand il faut obtenir un espace de travail suffisamment important pour de la FA de pièces de plusieurs m^3 . Les RPC amèneront plus de flexibilité et permettront la réalisation de bâtiments bien plus grands, aussi bien en termes de surface au sol que de hauteur. Les principes de base utilisés pour modéliser les RPC sont relativement simples. Cependant, l'état de l'art des RPC montre clairement plusieurs problèmes fondamentaux récurrents et leur mise en œuvre reste délicate. Plusieurs problèmes pratiques se posent, tels que le contrôle précis des longueurs de câble ou la prise en compte du comportement non-linéaire des câbles. En plus d'une architecture mécanique robuste, une commande optimale prenant en compte les sources d'incertitudes sur les paramètres de conception doit être mise en place. En effet, les avantages attribués par les câbles introduisent également des inconvénients. Les verrous scientifiques sont encore trop nombreux pour une application industrielle à grande échelle.

Néanmoins, la variété des prototypes réalisés montre les possibilités importantes données par les RPC [5,7,8]. Le plein potentiel des RPC n'a pas encore été exploité. L'utilisation directement sur chantier des RPC reconfigurables dans le domaine de la FA de grandes dimensions est novatrice et a le potentiel de réécrire les règles de la construction d'ouvrage de bâtiment. L'amélioration de la précision des RPC de grandes dimensions est donc un défi sociétal important, qui pourrait grandement aider à la résolution du mal logement dans le monde par des constructions rapides, qualitatives et à faible coût. L'aspect novateur de ce sujet de recherche vient également de la méthode employée. En effet, à la différence de la grande majorité des études connexes à cette thématique scientifique, elle n'utilise pas des moyens fragiles et coûteux d'asservissement de la commande par capteur pour corriger l'erreur de positionnement de la PM [6]. Ces solutions semblent peu adaptées à la FA de grandes dimensions, dont les objectifs sont de diminuer les coûts et d'être simple d'utilisation. La méthode d'amélioration de la précision se concentre dans ce sujet de thèse sur la recherche de l'architecture et de la commande optimale du RPC en connaissant la topographie du site d'implantation et le type de construction à réaliser.

De plus, la faisabilité d'utilisation des RPC pour la FA n'est plus à démontrer, mais il reste encore de nombreux points d'amélioration pour les adapter à la construction de grandes dimensions [8,9,10]. Les principaux défauts des RPC sont leur comportement vibratoire, la définition de leur espace de travail et leur faible précision [11]. En FA une précision insuffisante entraîne une mauvaise qualité des pièces, voire une détérioration de la tête d'impression. La faible précision des RPC vient de l'accumulation d'erreurs et d'incertitudes géométriques et mécaniques inévitables. Nous pouvons citer par exemple, la précision des actionneurs, le comportement élastique non-linéaire des câbles, la raideur des pylônes ou bien encore les intervalles de tolérance de fabrication et les jeux fonctionnels. L'influence de ces incertitudes sur la précision des RPC n'est à ce jour pas suffisamment quantifiée et prise en compte dans la commande.

4) Objectifs

Dans ce contexte, la proposition de sujet de thèse a pour objectif général d'améliorer la précision des robots parallèles à câbles reconfigurables pour des applications directement sur site de FA de grandes dimensions. L'approche utilisée dans ce projet est de rendre l'architecture et la commande du RPC plus robuste. Pour cela, il faut identifier par une analyse de sensibilité les paramètres géométriques et/ou mécaniques les plus influents sur la précision et essayer de les maîtriser au mieux [12,13,14]. De plus, chaque site et chaque construction étant différents, l'implantation du RPC dans son environnement de travail est une étape essentielle pour avoir une architecture optimale vis-à-vis de la précision de la tête d'impression. Pour cela, il faut optimiser la position des points d'ancrage des câbles afin de maximiser la précision de la PM et utiliser une commande adaptée. Pour réaliser les objectifs, trois étapes sont mises en place. Premièrement, utiliser les modèles élasto-géométriques caténaux existants de modélisation des RPC et y ajouter la raideur des pylônes et le déséquilibre possible de la PM dû à l'apport de matériaux en FA. Le but est d'y propager de l'incertitude afin d'analyser la sensibilité des paramètres. Par exemple, l'incertitude sur les modules de Young des câbles qui subissent un phénomène d'hystérésis. Ces modèles sont nécessaires car la FA de grandes dimensions utilise de très grandes longueurs de câble, ce qui impose la prise en compte de leur fléchissement [15]. Cette analyse de sensibilité permettra l'amélioration intrinsèque de la robustesse de l'architecture et de la commande ceci afin d'avoir une meilleure précision du positionnement de la PM du RPC. Deuxièmement, mettre en place une méthodologie de détermination de l'architecture optimale du RPC reconfigurable pour une application donnée de FA de grandes dimensions. C'est-à-dire, utiliser des méthodes d'optimisation globale [16] pour déterminer l'implantation optimale sur site, et pour une construction donnée, des points d'ancrage des câbles afin d'obtenir la meilleure précision de positionnement de la tête d'impression. La dernière étape est l'utilisation d'un prototype afin d'effectuer une campagne expérimentale pour valider la méthodologie de détermination de l'architecture optimale. L'objectif étant la validation du concept, le matériau de dépôt utilisé sera de la mousse de polyuréthane car elle est légère, suffisamment solide après une polymérisation rapide. Elle offre également des possibilités en termes de formes, similaires à celles des matériaux biosourcés comme l'argile [8]. La PM sera alors préchargée pour simuler la masse réelle du matériau. Les résultats des travaux menés dans ce projet pourront donc être étendus au dépôt de matériau de construction biosourcés ou bien être appliqués plus directement pour le dépôt de mousse isolante sur des bâtiments neufs lors de leur construction afin de satisfaire les normes énergétiques en vigueur.

5) Programme prévisionnel de la thèse

Pour mener à bien les différents objectifs, 8 Lots de Travail (LT) sont planifiés :

- **LT1** : Coordination du projet et recrutement doctorant.e.
- **LT2** : Bibliographie sur les travaux de recherche de la FA, des RPC et de l'optimisation globale.
- **LT3** : Réalisation des modèles du RPC suspendu reconfigurable : Dans la littérature, les modèles sont développés pour une commande en temps réel. Ils ont de nombreuses hypothèses simplificatrices afin d'avoir une résolution numérique rapide. Pour déterminer l'architecture optimale du RPC les modèles numériques doivent être les plus complets possibles. Le temps de calcul n'est pas une contrainte puisque la recherche de l'architecture optimale se fera préalablement à l'utilisation du RPC, en connaissant le site d'implantation et la géométrie à réaliser. Les paramètres de conception habituellement négligés devront être modélisés, comme

la variation du point de sortie du câble de l'enrouleur, l'architecture des poulies, le système d'accroche des câbles sur la PM, la rigidité de la structure ou bien encore le fléchissement et le comportement élastique non-linéaire des câbles. Les travaux de modélisation ont déjà été initiés par l'équipe formée autour de ce sujet [17].

- **LT4** : Analyse de sensibilité globale des paramètres géométriques et mécaniques : Les modèles numériques seront enrichis d'un maximum de paramètres géométriques et mécaniques. Ces paramètres sont sujet à des incertitudes aléatoires et épistémiques, comme la répétabilité des enrouleurs ou bien la déformation réelle du câble composé de plusieurs torons [18]. Une quantification de ces incertitudes est dans un premier temps nécessaire. Puis, une propagation des incertitudes doit être faite dans les modèles afin d'étudier leurs impacts sur la précision du RPC. Une analyse de sensibilité globale permettra d'identifier les paramètres les plus influents dans le but de réaliser une conception préliminaire robuste. Nous utiliserons les compétences de l'équipe et choisirons les outils d'analyses les plus adaptés aux RPC. Par exemple les méthodes de Monte Carlo, les plans d'expériences ou les indices de Sobol [19] qui n'ont jamais été utilisés dans le cadre des RPC.

- **LT5** : Utilisation du prototype : L'obtention de plusieurs subventions nous ont permis d'avoir tous les éléments constituant un RPC avant le démarrage de la thèse. De plus, l'équipe formée autour de ce projet possède les compétences nécessaires en conception, fabrication mécanique et en commande que ce soit au niveau de la recherche ou de l'enseignement. La mise en place d'une commande robuste des actionneurs s'appuyant sur l'analyse de sensibilité du lot LT4 sera réalisée dans le lot LT5 pour le pilotage du RPC [20,21]. Cela permettra un bon suivi des trajectoires en fabrication additive de grandes dimensions.

- **LT6** : Méthodologie de détermination de l'architecture optimale du RPC : Une fois la conception préliminaire robuste réalisée, il faudra déterminer l'implantation optimale du RPC. Le RPC de ce sujet de recherche est reconfigurable à la différence des architectures fixes actuellement développées. Il faudra déterminer la position optimale des pylônes du RPC en connaissant la précision souhaitée, la topographie du site ainsi que la géométrie de la construction à réaliser. Cette synthèse d'architecture passera par l'inversion d'un premier modèle via des algorithmes d'optimisation déjà utilisés dans l'équipe dans d'autres domaines d'application (ex. : algorithmes génétiques, analyse d'intervalles ou bien encore le *branch and bound*).

- **LT7** : Protocole expérimental et campagne d'essais : L'objectif de ce lot est double. Premièrement la campagne d'essais servira à enrichir le modèle défini au LT4 en récoltant un maximum d'informations sur les erreurs réelles de suivi de trajectoires en FA. L'ICA possède déjà les moyens pour mesurer les erreurs de positions de la tête d'impression du RPC (MetraScan3D). Le modèle enrichi sera inversé afin d'obtenir une nouvelle implantation du RPC plus adaptée aux conditions expérimentales. Nous utiliserons le filtre de Kalman pour post-traiter les données expérimentales incomplètes ou bruitées [22]. Deuxièmement, la campagne d'essais permettra de valider la méthodologie du LT6 ainsi qu'un potentiel avenir des RPC pour de la FA de grandes dimensions. Le matériau utilisé pour valider le concept sera de la mousse de polyuréthane car, en plus des avantages cités précédemment, elle est relativement peu coûteuse et peut être stockée dans un état prêt à être déposé durant plusieurs mois.

- **LT8** : Valorisation des résultats et rédaction du manuscrit de thèse.

6) Bibliographie

- [1] A. Diourté, F. Bugarin, C. Bordreuil et S. Segonds. « **Continuous three-dimensional path planning (CTPP) for complex thin parts with wire arc additive manufacturing** », *Additive Manufacturing*, pp.101622, 2020.
- [2] N.D. Watson, N.A. Meisel, S.G. Bilén, J. Duarte, et S. Nazarian, « Large-scale additive manufacturing of concrete using a 6-axis robotic arm for autonomous habitat construction », *An Additive Manufacturing Conference*, 2019.
- [3] K. Subrin, T. Bressac, S. Garnier, A. Ambiehl, E. Paquet et B. Furet, « Improvement of the mobile robot location dedicated for habitable house construction by 3D printing », *International Federation of Automatic Control*, 2018.
- [4] L. Gagliardini, S. Caro, M. Gouttefarde et A. Girin, « Discrete reconfiguration planning for cable-driven parallel robots », *Mechanism and Machine Theory*, vol.100, pp.313–337, 2016.
- [5] P. Bosscher, L. Robert, I. Williams et M. Tummino, « A concept for rapidly-deployable cable robot search and rescue systems », *ASME Conferences and Computers and Information in Engineering*, 2005.
- [6] S. Qian, K. Bao, B. Zi et N. Wang « Kinematic Calibration of a Cable-Driven Parallel Robot for 3D Printing », *Sensors*, vol.18, 2018.
- [7] B. Zi, N. Wang, S. Qian et K. Bao, « Design, stiffness analysis and experimental study of a cable-driven parallel 3D printer », *Mechanism and Machine Theory*, vol.132, pp.207-222, 2019.
- [8] E. Barnett et C. Gosselin, « Large-Scale 3D Printing With A Cable-Suspended Robot », *Additive Manufacturing*, vol.7, 2015.
- [9] J.-B. Izard, A. Dubor, P.-E. Herve, E. Cabay, D. Culla, M. Rodriguez et M. Barrado, « Large-scale 3D printing with cable-driven parallel robots », *Construction Robotics*, vol.1, pp.69-76, 2017.
- [10] T. Bruckmann and R. Boumann, « Simulation and optimization of automated masonry construction using cable robots », *Advanced Engineering Informatics*, vol. 50, pp.101388, 2021.
- [11] H. Yuan, E. Courteille et D. Deblaise, « Static and dynamic stiffness analyses of cable-driven parallel robots with non-negligible cable mass and elasticity », *Mechanism and Machine Theory*, vol.85, pp.64-81, 2015.
- [12] S. Caro, N. **Binaud** et P. Wenger, « Sensitivity Analysis of 3-RPR Planar Parallel Manipulators », *ASME Journal of Mechanical Design*, vol.131, pp.121005-1–121005-13, 2009.
- [13] N. **Binaud**, S. Caro et P. Wenger, « Comparison of 3-RPR Planar Parallel Manipulators with Regard to their Dexterity and Sensitivity to Geometric Uncertainties », *Meccanica*, vol.46, no.1, pp.75-88, 2011.
- [14] M. Azib, F. Baudoin, N. **Binaud**, C. Villeneuve-Faure, G. Teyssède, F. Bugarin et S. Segonds. « Sensitivity analysis of the electrostatic interaction between the atomic force microscopy probe and a thin dielectric film with 3D-localized charge cloud », *Journal of Applied Physics, American Institute of Physics*, vol.125, no.4, pp.045305, 2019.
- [15] J.-P. Merlet, « Some properties of the Irvine cable model and their use for the kinematic analysis of cable-driven parallel robots », *Mechanism and Machine Theory*, vol.135, pp.271-280, 2019.
- [16] F. Bugarin, D. Henrion et J.-B. Lasserre, « Minimizing the sum of many rational functions », *Mathematical Programming Computation*, vol.8, 2015.
- [17] T. Paty, N. **Binaud**, S. Caro et S. Segonds, « Cable-Driven Parallel Robot Modelling Considering Pulley Kinematics and Cable Elasticity », *Mechanism and Machine Theory*, vol.159, 2021.
- [18] T. Paty, N. **Binaud**, Wang H. et S. Segonds, “Sensitivity Analysis of a Suspended Cable-Driven Parallel Robot to Design Parameters”, *Journal of Mechanisms and Robotics*, Vol.15, 2022.
- [19] I. Alhossen, F. Bugarin, S. Segonds, F. Baudoin, G. Teyssède, « Use of Sobol indexes for efficient parameter estimation in a charge transport model », *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 26(2), p.584-592, 2016.
- [20] B. **Tondu** et P. Lopez, “Modeling and Control of McKibben Artificial Muscle Robot Actuators”, *IEEE Control Systems Magazine*, vol. 20, 2000.
- [21] G. K. H. Shankar Lal Das, B. **Tondu**, F. Forget et al., “Controlling a multi-joint arm actuated by pneumatic muscles with quasi-DDP optimal control”, *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2016.
- [22] Y. Wang, N. **Binaud**, C. Gogu, C. Bes et J. Fu, « Determination of Paris' law constants and crack length evolution via Extended and Unscented Kalman filter: An application to aircraft fuselage panels », *Mechanical Systems and Signal Processing, Elsevier*, 80, p.262-281. 2016.

Encadrement :

Directeur de thèse : Nicolas Binaud, MCF, Université Toulouse III / ICA-CNRS UMR 5312

Contexte institutionnel :

Le (la) candidat(e) sera accueillie à Toulouse au sein de l'Institut Clément Ader UMR CNRS 5312, il (elle) sera rattaché(e) au groupe Modélisation des Systèmes et Microsystèmes Mécaniques (MS2M). L'inscription se fera via l'école doctorale MEGeP (Mécanique, Énergétique, Génie civil & Procédés).

Financement de thèse :

Bourse ministérielle / Contrat doctoral de 36 mois, suivant le taux en vigueur, 1er janvier 2024 : 2100 euros brut mensuel. Possibilité de complément via des enseignements jusqu'à 64h équivalent TD par année.

Date de début du contrat : 01/10/2024

Profil du candidat / Compétences requises :

Le (la) candidat(e) sera issu d'un Bac+5 en génie mécanique ou robotique (master recherche ou école d'ingénieur). Dans l'idéal, le (la) candidat(e) devra avoir une bonne formation en conception mécanique et des bases solides en commande de robot. Des notions en mécatronique seront appréciées. Il (elle) devra avoir une bonne aptitude à la rédaction scientifique (langue française et anglaise), et une aisance pour présenter des travaux de recherche en congrès. A noter qu'il n'y a pas de candidat pressenti.

Modalités de candidature :

Les candidats feront parvenir un CV et une lettre de motivation à : nicolas.binaud@univ-tlse3.fr

Les candidatures qui auront été sélectionnées feront l'objet d'une audition en vue d'un classement. Des éléments complémentaires pourront être demandés à cette occasion (mémoire de stage, complément de relevés de notes etc. ...). Lors de l'audition, le (la) candidat(e) explicitera brièvement son parcours et se positionnera par rapport au sujet en proposant des pistes de travail.

Contacts :

Nicolas Binaud : +33 (0) 5 61 17 10 67 / nicolas.binaud@univ-tlse3.fr