

Portfolio Département 5

Nous présentons dans le portfolio du département 5 “Systèmes complexes, intelligence artificielle et robotique” les 7 documents suivants.

Rapport détaillé. L’Université de Lorraine a demandé aux laboratoires de rédiger pour juin 2021 les bilans des laboratoires en vu de l’évaluation HCERES 2016-2020, ceci sans attendre les recommandations de l’HCERES. Nous avons donc rédigé un rapport complet (en anglais), structuré sur la base des anciennes évaluations de l’HCERES. Ce rapport contient une première partie qui présente une vision générale du département et de ses réalisations, suivi d’un rapport détaillé pour chacune des équipes au sein du département. Nous avons naturellement réutilisé pour le DAE une partie substantielle de la première partie, ce qui explique la présence de parties en anglais et en français dans le DAE. Nous présentons ce rapport complet dans le portfolio.

Nous présentons les six autres éléments suivant du portfolio dans la suite de ce document.

- **H2020 Resibot.** ERC portée par Jean-Baptiste Mouret , 2015-2021.
- **A Multimode Teleoperation Framework for Humanoid Loco-Manipulation : An Application for the iCub Robot.** Article publié par LARSEN dans IEEE Robotics & Automation Magazine; special issue “Humanoid robot applications in real world scenarios”, en collaboration avec l’Université de la Sapienza (Rome, Italie).
- **Automatic tracking of free-flying insects using cable-driven robot.** Article publié dans Science Robotics en 2020, sur une collaboration CRAN/LORIA/INRAE.
- **Head-to-head comparison of clustering methods for heterogenous data.** Article publié par CAPSID dans Scientific Reports.
- **EROS-DOCK : Protein-Protein Docking by Exhaustive Rotational Search.** Logiciel produit par CAPSID.
- **PIA2 eFran METAL.** Projet porté par KIWI sur la période 2016-2021, budget 1,4 million d’euros, financement de 6 thèses.

ERC Starting Grant « ResiBots »

Équipe LARSEN

Malgré près de 50 ans de recherche en robotique, la plupart des robots sont toujours des machines fragiles qui ne fonctionnent plus dès qu'un imprévu survient [2, 15]. L'objectif du projet ERC ResiBots (2015-2020) a été de proposer une approche générique à l'adaptation des robots afin de leur permettre de continuer leur mission en cas d'imprévu, notamment de dommage mécanique ou électronique.

L'approche classique pour tolérer des dommages est héritée des systèmes critiques, typiquement de l'aéronautique et de l'espace. Elle s'appuie sur des procédures de diagnostic, qui requièrent de nombreux systèmes proprioceptifs coûteux, complexes et rarement exhaustifs, et sur des « plans de secours », qui ne peuvent couvrir toutes les situations qu'un robot peut rencontrer.

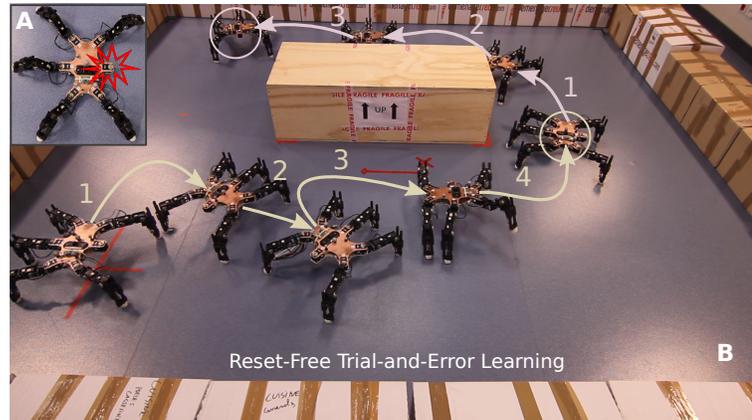
Le projet ResiBots propose de voir le problème sous un autre angle : face à un dommage imprévu, le robot peut utiliser une approche par essai erreur pour trouver une manière de continuer sa mission sans avoir besoin de comprendre la source du problème. Par exemple, un robot avec une patte endommagée peut essayer différentes manières de boiter jusqu'à en trouver une qui permet d'avancer en ligne droite, en ayant uniquement besoin d'un capteur permettant de connaître sa vitesse et direction de déplacement.

Ce type d'algorithme d'apprentissage par essai-erreur guidé par des signaux de récompense est appelé « apprentissage par renforcement » [18]. De nombreux algorithmes ont été proposés depuis les années 1990, suivant notamment s'il s'agit d'un problème discret (par exemple, un agent dans un labyrinthe qui cherche des récompenses) ou continu (par exemple, un robot qui cherche à apprendre à jouer au bilboquet). Malheureusement, ces algorithmes nécessitent de très nombreux essais pour trouver des « politiques » (que faire dans chaque situation) fonctionnelles, typiquement des centaines de milliers d'essais [7]. Ce type d'algorithme est donc inexploitable en l'état sur un robot réel (par opposition à une simulation) et encore moins quand un robot est livré à lui-même et doit trouver un moyen de continuer sa mission : dans ces cas, le robot doit pouvoir passer au mieux quelques minutes à essayer différentes idées avant de trouver une solution. En terme moderne, ces algorithmes doivent être *data-efficaces* (*data-efficient*) [7].

Le cœur du projet ResiBots est donc de proposer de nouveaux algorithmes d'apprentissage par essai-erreur qui ne nécessitent que quelques minutes d'apprentissage pour trouver un comportement de compensation sur un robot endommagé. L'idée principale du projet est d'utiliser des simulations du robot *intact* comme un a priori permettant de guider la recherche sans avoir à anticiper un type de dommage particulier. La plupart des expériences se sont déroulées sur un robot hexapode dont les pattes sont endommagées (une patte débranchée, deux pattes en moins, ...) et qui doit réapprendre à marcher, mais nous avons aussi utilisé des bras manipulateurs et le robot humanoïde iCub de l'équipe LARSEN.

Le projet s'est intéressé à deux grandes approches :

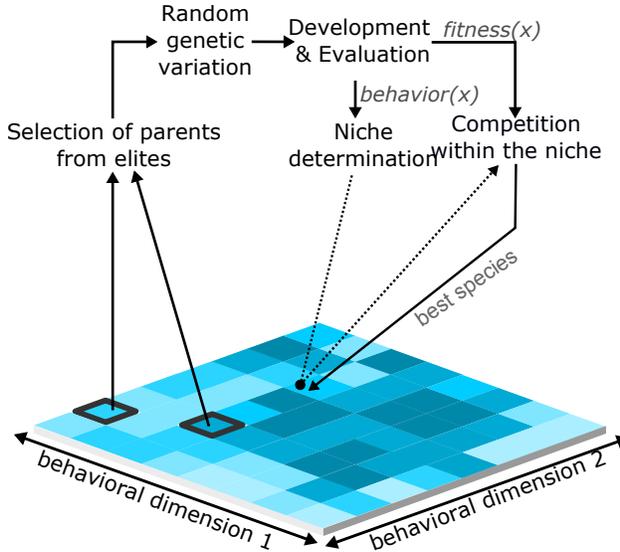
- l'utilisation des algorithmes de « Quality Diversity » pour fournir un répertoire de « bonnes idées » combinée à l'optimisation bayésienne pour chercher rapidement une solution ;



Scénario typique du projet ResiBots : un robot hexapode perd une patte et doit ré-apprendre à marcher pour terminer sa mission (ici rejoindre des points de passage). Extrait de [6].

— l'apprentissage d'un modèle de la dynamique du robot avec des processus gaussiens en modifiant le modèle intact (modèle marginal).

Le concept de la première approche est d'utiliser une simulation du robot intact pour trouver plus de 10,000 manières différentes de résoudre le problème, par exemple 10,000 manières différentes de marcher en ligne droite avec un robot hexapode. Pour cela, nous utilisons l'algorithme MAP-Elites que nous avons proposé en 2015 [8, 14] et étendu de nombreuses manières par la suite [9, 10, 19, 20]. Face à un dommage, le robot va chercher par essai-erreur le meilleur comportement parmi ces solutions prédéterminées, toutes de bonne qualité (sur le robot intact) [8, 16, 17]. Avec cette approche, un robot endommagé peut trouver une nouvelle marche en moins de 2 minutes (une dizaine d'essais).



Concept de l'algorithme de « Quality Diversity » MAP-Elites, qui cherche à trouver large ensemble de solutions qui minimisent une fonction de coût tout en se comportant toutes différemment. Extrait de [14].

— un modèle de la dynamique. Le défi est d'apprendre ce modèle en très peu d'essais. Nous avons proposé l'algorithme Black-DROPS (Black-Box Data-Efficient Robot Policy Search) qui permet d'apprendre des politiques sur des systèmes simples (par exemple un pendule inversé) en quelques dizaines de secondes [5, 12]. Puis nous avons utilisé le robot intact comme a priori pour apprendre, par exemple, au robot hexapode à marcher en seulement 5-10 essais [4]. Nous avons continué dans cette voie en exploitant le “meta-learning” pour apprendre en simulation des connaissances a priori qui permettent ensuite d'apprendre rapidement un nouveau modèle [11].

Au final, les deux approches permettent à un robot d'apprendre en une à deux minutes, ce qui est l'objectif que nous nous étions fixés. Les algorithmes développés ont reçu plusieurs prix (Prix la recherche 2016, Prix du meilleur article en vie artificielle 2016) et sont très cités. Les deux approches ont leurs forces et leurs faiblesses [7]. Les algorithmes basés sur la Quality Diversity [6, 8, 13, 16, 17] nécessitent très peu de calcul embarqué mais ne peuvent généralement pas trouver de comportement de compensation optimal. Par contraste, les approches basées sur l'apprentissage d'un modèle de la dynamique sont beaucoup plus coûteuses en calcul embarqué mais peuvent trouver des solutions de meilleure qualité [4, 5].

Au delà des applications en robotique du projet ResiBots, les algorithmes de Quality Diversity [14] que nous avons développés ont maintenant de très nombreux autres usages, de la génération automatique de

Néanmoins, il est nécessaire de prendre en compte l'environnement dans l'apprentissage — un robot ne peut pas essayer d'avancer s'il est face à un mur (voir figure ci-dessus) — et l'objectif — le robot a généralement besoin d'avancer dans sa mission. Pour cela, nous utilisons le même type d'algorithme de Quality Diversity pour pouvoir apprendre à marcher dans toutes les directions, puis l'algorithme Monte Carlo Tree Search pour séquencer des comportements élémentaires en prenant en compte l'incertitude de prédiction [6]. Le robot hexapode peut ainsi atteindre des ses objectifs malgré une patte cassée et sans intervention humaine. Ce type de méthode peut facilement être étendu pour prendre en compte plusieurs a priori [13], par exemple des dommages possibles, quand c'est utile.

Le deuxième type d'approche consiste à essayer d'apprendre un modèle qui prédit l'état suivant à partir de l'état actuel du robot et des ordres moteurs

Vidéos :

- Film (13') sur ResiBots [youtube]
- Algorithme RTE [6] : [youtube]
- Algorithme GP-MI [4] : [youtube]
- Algorithme MLEI [17] : [youtube]

contenu pour les jeux vidéos [1] à celle de nouvelles molécules [3] en passant par l’optimisation de formes aérodynamiques [9]. Dans tous ces cas, il est intéressant de pouvoir proposer de nombreuses solutions optimisées au lieu d’une unique solution optimale, qui ne convient souvent pas à l’utilisateur final. Par exemple, l’utilisateur peut choisir en fonction de son expertise, difficilement quantifiable dans une fonction de coût, ou en fonction de critères intangibles comme l’esthétique. Ces algorithmes ont donc largement dépassé la robotique ; ils sont maintenant le sujet de tutoriaux et de *workshops* dans les conférences internationales de *machine learning* et d’optimisation stochastique (ICML, GECCO). L’équipe a obtenu deux *best papers* à la conférence GECCO (principale conférence en évolution artificielle / optimisation stochastique) sur les algorithmes de « quality diversity ».

References

Les publications avec un astérisque ne sont pas des publications de l’équipe.

- [1] [*] Alberto Alvarez, Jose Maria Maria Font Fernandez, Steve Dahlskog, and Julian Togelius. Interactive constrained map-elites : Analysis and evaluation of the expressiveness of the feature dimensions. *IEEE Transactions on Games*, 2020.
- [2] [*] Christopher G Atkeson, PW Benezun, Nandan Banerjee, Dmitry Berenson, Christopher P Bove, Xiongyi Cui, Mathew DeDonato, Ruixiang Du, Siyuan Feng, Perry Franklin, et al. What happened at the darpa robotics challenge finals. In *The DARPA robotics challenge finals : Humanoid robots to the rescue*, pages 667–684. Springer, 2018.
- [3] [*] Léo Cazenille, Alexandre Baccouche, and Nathanaël Aubert-Kato. Automated exploration of dna-based structure self-assembly networks. *Royal Society open science*, 8(10) :210848, 2021.
- [4] Konstantinos Chatzilygeroudis and Jean-Baptiste Mouret. Using parameterized black-box priors to scale up model-based policy search for robotics. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 2018.
- [5] Konstantinos Chatzilygeroudis, Roberto Rama, Rituraj Kaushik, Dorian Goepp, Vassilis Vassiliades, and Jean-Baptiste Mouret. Black-Box Data-efficient Policy Search for Robotics. In *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Vancouver, Canada, September 2017.
- [6] Konstantinos Chatzilygeroudis, Vassilis Vassiliades, and Jean-Baptiste Mouret. Reset-free Trial-and-Error Learning for Robot Damage Recovery. *Robotics and Autonomous Systems*, pages 1–19, 2017.
- [7] Konstantinos Chatzilygeroudis, Vassilis Vassiliades, Freek Stulp, Sylvain Calinon, and Jean-Baptiste Mouret. A survey on policy search algorithms for learning robot controllers in a handful of trials. *IEEE Transactions on Robotics*, 2020.
- [8] Antoine Cully, Jeff Clune, Danesh Tarapore, and Jean-Baptiste Mouret. Robots that can adapt like animals. *Nature*, 521(7553) :503–507, May 2015.
- [9] Adam Gaier, Alexander Asteroth, and Jean-Baptiste Mouret. Data-efficient design exploration through surrogate-assisted illumination. *Evolutionary Computation*, 2018.
- [10] Adam Gaier, Alexander Asteroth, and Jean-Baptiste Mouret. Discovering Representations for Black-box Optimization. In *GECCO’20 - Genetic and Evolutionary Computation Conference*, volume 11, Cancun, Mexico, July 2020.
- [11] Rituraj Kaushik, Timothée Anne, and Jean-Baptiste Mouret. Fast online adaptation in robotics through meta-learning embeddings of simulated priors. In *2020 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pages 5269–5276. IEEE, 2020.

- [12] Rituraj Kaushik, Konstantinos Chatzilygeroudis, and Jean-Baptiste Mouret. Multi-objective model-based policy search for data-efficient learning with sparse rewards. In *Conference on Robot Learning (CoRL)*, Zurich, Switzerland, 2018.
- [13] Rituraj Kaushik, Pierre Desreumaux, and Jean-Baptiste Mouret. Adaptive prior selection for repertoire-based online learning in robotics. *Frontiers in Robotics and AI*, 2020.
- [14] Jean-Baptiste Mouret. Evolving the behavior of machines : from micro to macroevolution. *iScience*, page 101731, 2020.
- [15] [*] Keiji Nagatani, Seiga Kiribayashi, Yoshito Okada, Kazuki Otake, Kazuya Yoshida, Satoshi Tadokoro, Takeshi Nishimura, Tomoaki Yoshida, Eiji Koyanagi, Mineo Fukushima, et al. Emergency response to the nuclear accident at the fukushima daiichi nuclear power plants using mobile rescue robots. *Journal of Field Robotics*, 30(1) :44–63, 2013.
- [16] Supratik Paul, Konstantinos Chatzilygeroudis, Kamil Ciosek, Jean-Baptiste Mouret, Michael A Osborne, and Shimon Whiteson. Robust Reinforcement Learning with Bayesian Optimisation and Quadrature. *Journal of Machine Learning Research*, 21 :1 – 31, 2020.
- [17] Rémi Pautrat, Konstantinos Chatzilygeroudis, and Jean-Baptiste Mouret. Bayesian optimization with automatic prior selection for data-efficient direct policy search. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 2018.
- [18] [*] Richard S Sutton and Andrew G Barto. *Reinforcement learning : An introduction*. MIT press, 2018.
- [19] Vassilis Vassiliades, Konstantinos Chatzilygeroudis, and Jean-Baptiste Mouret. Using centroidal voronoi tessellations to scale up the multi-dimensional archive of phenotypic elites algorithm. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 2017.
- [20] Vassilis Vassiliades and Jean-Baptiste Mouret. Discovering the Elite Hypervolume by Leveraging Interspecies Correlation. In *Genetic and Evolutionary Computation Conference (GECCO)*, Kyoto, Japan, July 2018.

Article : « A Multimode Teleoperation Framework for Humanoid Loco-Manipulation : An Application for the iCub Robot »

Équipe LARSEN

en collaboration avec l'Université de la Sapienza (Rome, Italie)

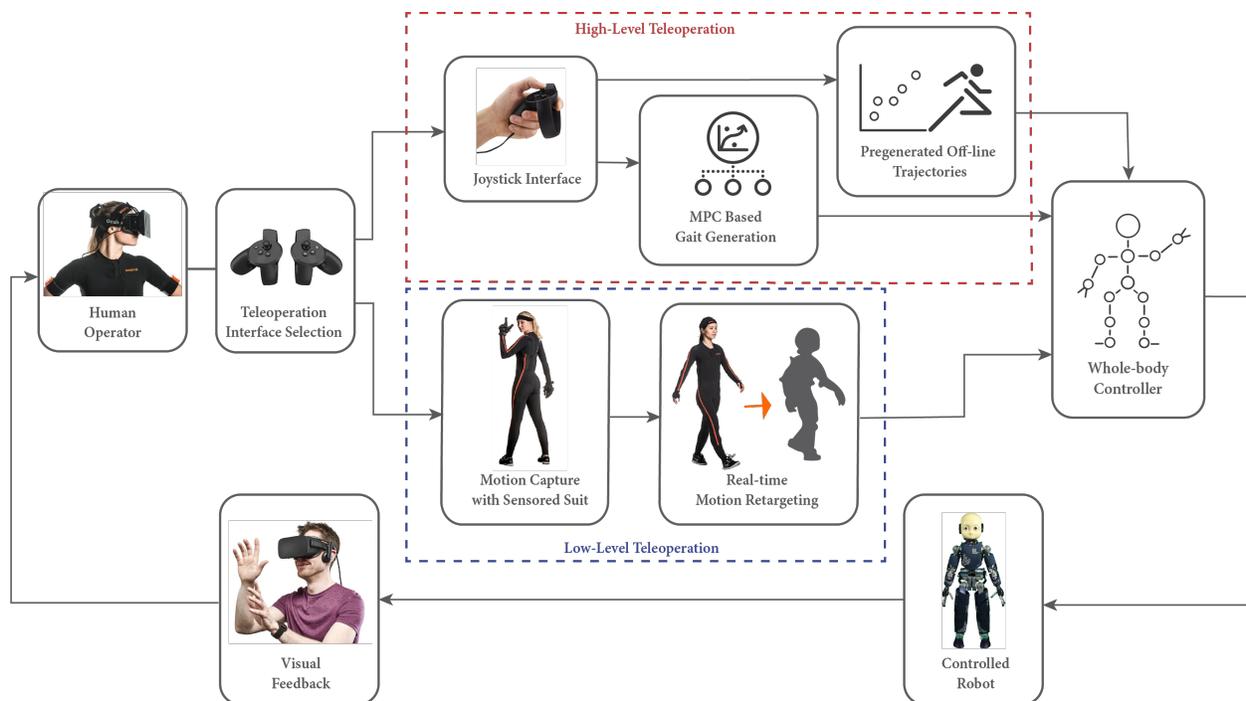
Les robots humanoïdes sont parmi les machines les plus polyvalentes jamais créées. Grâce à leurs deux mains, ils peuvent effectuer des manipulations bi-manuelles comme attraper de grosses caisses ; avec leurs jambes articulées, ils peuvent à la fois se pencher pour ramasser un objet sur le sol, tout en étant capable d'ouvrir un placard en hauteur ; ils peuvent aussi marcher sur un terrain accidenté, ramper, monter des escaliers, grimper une échelle, ou pousser une caisse. Par contraste avec la plupart des autres plateformes robotiques, ils ont une empreinte au sol qui leur permet de se glisser dans des passages étroits ou encombrés, ainsi que d'opérer dans des environnements initialement conçus pour des humains. En résumé, les robots humanoïdes ont le potentiel d'être aussi polyvalents que les humains.



Scénario typique de télé-opération humanoïde : un opérateur porte une combinaison de capture du mouvement et un casque de réalité virtuelle ; il déplace le robot puis peut exécuter des tâches « corps complet ».

Cette polyvalence est indispensable quand les robots sont envoyés dans des situations vraiment inattendues où les robots doivent effectuer une tâche pour laquelle ils n'ont pas pu être conçus à l'avance. Alors que les robots dans l'industrie manufacturière effectuent des tâches bien définies dans des environnements connus, beaucoup de situations nécessitent une adaptation créative — une « improvisation » des tâches. Par exemple, lorsqu'un robot est utilisé pour travailler dans des endroits peu ou pas accessibles comme dans l'espace, sur une plateforme pétrolière « automatisée », ou au fin fond de l'Antarctique, il est fort probable que le robot doit effectuer des tâches non prévues ou effectuer de manière nouvelle une tâche connue. De manière similaire, les accidents — naturels ou industriels — sont des événements qui sont, par définition, en dehors du fonctionnement « normal » et mal anticipés (sinon l'accident n'aurait probablement pas eu lieu). Dans ces situations, les robots sont critiques pour sauver des vies ou du matériel, mais on ne peut prévoir à l'avance comment. D'une manière générale, les robots humanoïdes sont idéaux pour toutes les missions à « haut risque / haut gain / haute incertitude » pour lesquelles la seule solution est pour le moment d'envoyer des humains, souvent au péril de leur vie.

Si la polyvalence des robots humanoïdes est indispensable pour s'adapter à des missions imprévues, les robots sont loin d'être assez autonomes pour improviser des solutions créatives, surtout dans des situations très complexes et risquées. *C'est pourquoi les robots humanoïdes affirment tout leur potentiel lorsqu'ils sont télé-opérés* : les capacités du robot et de l'opérateur sont alors combinées pour résoudre à distance des problèmes complexes. Bien que l'on puisse télé-opérer un robot humanoïde comme un robot classique, c'est-à-dire à partir de commandes haut-niveau et de joysticks, un robot humanoïde peut tirer parti de sa



Vue générale de l'approche multi-mode de la télé-opération humanoïde.

forme proche de celle des humains pour répliquer la posture et les gestes de l'opérateur, capturés avec un système de capture du mouvement. Nous appelons cette approche la télé-opération corps-complet. Le robot humanoïde devient alors une « projection » ou un « avatar » de l'opérateur qui permet de réaliser des tâches complexes de manière fluide et intuitive. De plus, il y a une bonne correspondance entre télé-opération et robots humanoïdes car ces robots, du fait de leur complexité et leur prix, ont surtout du sens dans les missions à très haute valeur ajoutée pour lesquelles le salaire d'un opérateur est négligeable, mais les enjeux sont trop importants pour laisser un robot décider par lui-même de son comportement.

Dans l'article de Penco *et al.* [1] (publié dans le numéro spécial « Humanoid robot applications in real world scenarios » d'IEEE RAM), nous présentons notre implémentation d'un système de télé-opération corps-complet d'un robot humanoïde, réalisée dans le cadre du projet européen H2020 AnDy (<https://andy-project.eu/>). L'opérateur porte une combinaison de capture de mouvement basée sur des capteurs inertiels (XSens) et télé-opère le robot iCub du laboratoire (photo page précédente).

Vidéos :

- Contrôleur corps complet pour la télé-opération : [\[youtube\]](#)
- Contrôleur optimisé : [\[youtube\]](#)
- Télé-opération du robot Talos : [\[youtube\]](#)

La première difficulté est de commander le robot distant à partir de la position de l'opérateur (*retargeting*). Il ne s'agit pas de simplement recopier les positions articulaires de l'opérateur car le robot a une cinématique/dynamique très différente et l'opérateur peut faire des mouvements dangereux pour le robot (e.g., tomber) : il faut donc à chaque pas temps (100Hz : toutes les 10 ms) recalculer les positions articulaires du robot pour garantir l'équilibre du robot tout en essayant de copier le mouvement le mieux possible. Pour résoudre ce problème, le robot résout à chaque pas temps un premier problème d'optimisation quadratique sous contrainte qui calcule une référence du centre de masse qui s'approche au mieux de celle de l'humain sous la contrainte de garantir l'équilibre (calculé via le Zero Moment Point – ZMP). Puis, le robot résout un second problème d'optimisation quadratique qui cherche les positions articulaires de manière à

(1) positionner les mains et les pieds dans l'espace cartésien au plus près de la consigne, (2) copier la posture de l'humain (e.g., genoux fléchis), sous la contrainte de respecter le modèle de la dynamique du robot. Nous avons ensuite optimisé les paramètres de ce contrôleur avec un algorithme d'optimisation non-linéaire multi-objectif [2].

Bien que le système permette de commander la position des pieds du robot, il est très difficile et inconfortable pour un opérateur de « mimer » la marche pour le robot. Nous proposons donc de gérer la marche différemment : en mode « marche », l'opérateur commande le robot humanoïde comme un robot mobile, c'est-à-dire en choisissant la direction et la vitesse de marche ; en mode « télé-opération », l'opérateur commande l'ensemble du corps du robot mais les pieds restent en contact avec le sol.

Pour générer de manière autonome le comportement de marche dans la direction souhaitée, le robot utilise un algorithme de Model Predictive Control (MPC). Pour cela, un premier problème d'optimisation quadratique est résolu en ligne pour choisir les orientations des pas (footsteps), un deuxième problème quadratique permet ensuite de calculer la position des pieds et du centre de masse en utilisant un modèle simplifié du robot (modèle du pendule inverse linéaire) sous des contraintes de faisabilité et de stabilité. Ces problèmes sont résolus toutes les 10 ms (100 Hz). Finalement, ces consignes de centre de masse et de position des pieds sont données au même contrôleur « bas niveau » que pour la télé-opération corps complet (décrit précédemment), ce qui nécessite de résoudre encore un problème d'optimisation quadratique.

Des extensions de ce travail sont en cours pour le robot Talos (robot humanoïde de taille humaine) [3] ainsi que pour compenser les retards de communication [4].

References

- [1] Luigi Penco, Nicola Scianca, Valerio Modugno, Leonardo Lanari, Giuseppe Oriolo, and Serena Ivaldi. A multimode teleoperation framework for humanoid loco-manipulation : An application for the icub robot. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 26(4) :73–82, 2019.
- [2] Luigi Penco, Enrico Mingo Hoffman, Valerio Modugno, Waldez Gomes, Jean-Baptiste Mouret, and Serena Ivaldi. Learning robust task priorities and gains for control of redundant robots. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 5(2) :2626–2633, 2020.
- [3] Eloïse Dalin, Ivan Bergonzani, Timothée Anne, Serena Ivaldi, and Jean-Baptiste Mouret. Whole-body teleoperation of the talos humanoid robot : preliminary results. In *ICRA 2021-5th Workshop on Teleoperation of Dynamic Legged Robots in Real Scenarios*, 2021.
- [4] Luigi Penco, Jean-Baptiste Mouret, and Serena Ivaldi. Prescient teleoperation of humanoid robots. *arXiv preprint arXiv :2107.01281*, 2022.

Article : Un robot à câbles pour suivre et filmer le vol des insectes

Équipe Neurorhythms, en collaboration avec le CRAN et l'INRAE
R. Pannequin (CRAN), M Jouaiti (LORIA), M Boutayeb (CRAN), P Lucas (INRAE), D Martinez (LORIA)

Le vol de l'insecte est une source d'inspiration pour de futures innovations en aéronautique et dronautique. Qui observe le vol des libellules, essaye d'attraper une mouche ou admire le vol des papillons dans son jardin, reste fasciné par les extraordinaires performances de vol des insectes, que l'on commence seulement à comprendre et qui reste mystérieux sur bien des points. Les insectes battent des ailes d'avant en arrière en modifiant constamment l'angle d'attaque. Un tourbillon d'air (vortex) se crée alors le long de l'aile en produisant suffisamment de portance, à l'image d'un surfeur qui créerait sa propre vague. Mais les phénomènes associés aux ailes battantes à l'échelle de l'insecte ne sont pas complètement compris. Par exemple, comment l'insecte contrôle-t-il son vol pour avancer ou tourner ? Pour l'étudier, les chercheurs ont souvent recours à des dispositifs expérimentaux où l'insecte est observé "de loin" : cependant, à une distance de quelques mètres, on ne perçoit que sa position, et non la configuration de ses ailes ou de son corps... Une autre approche consiste à maintenir l'insecte dans le champ de la caméra en le fixant par le thorax sur une tige : cependant, ce dispositif empêche l'inclinaison de l'animal dans les virages contrairement au vol libre. Dans ces conditions, difficile de trouver le bon compromis entre la liberté d'évolution du sujet et la proximité de la caméra (ou, autrement dit, le niveau de détail des images).

C'est ce qui a motivé l'équipe Neurorhythms à développer le premier robot-laboratoire suspendu et actionné par des câbles, capable de suivre et de filmer un insecte libre de ses mouvements (Fig. 1). A l'instar de la caméra "spider-cam" utilisée dans les stades pour filmer au plus près footballeurs ou rugbymen, un réseau de caméras est déplacé par des câbles, que déroulent ou enroulent des moteurs contrôlés, pour être au plus près de l'insecte pendant son vol. Les mesures de la position de l'insecte sont effectuées directement sur l'effecteur du robot, puis télétransmises à l'ordinateur commandant les enrouleurs des câbles. Grâce à un modèle géométrique du robot, la consigne de déplacement de l'effecteur est retranscrite sur chaque câble, afin d'obtenir les vitesses d'enroulement à appliquer aux moteurs. Et comme la trajectoire de l'insecte change vite, les calculs se répètent à chaque centième de seconde. Les vitesses d'enroulement sont ensuite ajustées par programmation quadratique afin de maintenir des valeurs acceptables sur les tensions des câbles. En effet, il s'agit ici de suivre l'insecte tout en maintenant la bonne tension dans chaque câble. En cas de tension trop élevée, il y a risque de rupture ; en cas de tension trop faible (voire nulle), la détermination de la pose de l'effecteur basée sur le modèle géométrique n'est plus valable.

A l'aide du robot à câbles, l'équipe Neurorhythms a pu étudier le vol libre de papillons de nuit *Agrotis ipsilon* (environ 2 cm de long) jusqu'à 3 mètres/seconde (Fig. 1). Les caméras embarquées sur l'effecteur mobile permettent d'enregistrer la trajectoire de vol et de capturer finement les mouvements de l'insecte et des ailes avec une grande résolution temporelle (à 600 images par secondes, ce qui est suffisant pour un insecte effectuant une trentaine de battements d'aile par seconde). Un modèle 3D articulé de l'insecte est apparié au flux vidéo de la caméra rapide afin d'extraire le motif du battement d'aile ainsi que l'inclinaison du corps de l'animal durant le vol. On note que le plan de battement est plutôt horizontal à basse vitesse avec un corps en position verticale alors que, à mesure que la vitesse de vol augmente, l'insecte s'incline horizontalement avec un plan de battement qui devient plus vertical. Ces résultats sont compatibles avec un modèle de vol de type hélicoptère où le mouvement vers l'avant résulte de l'inclinaison du plan de battement.

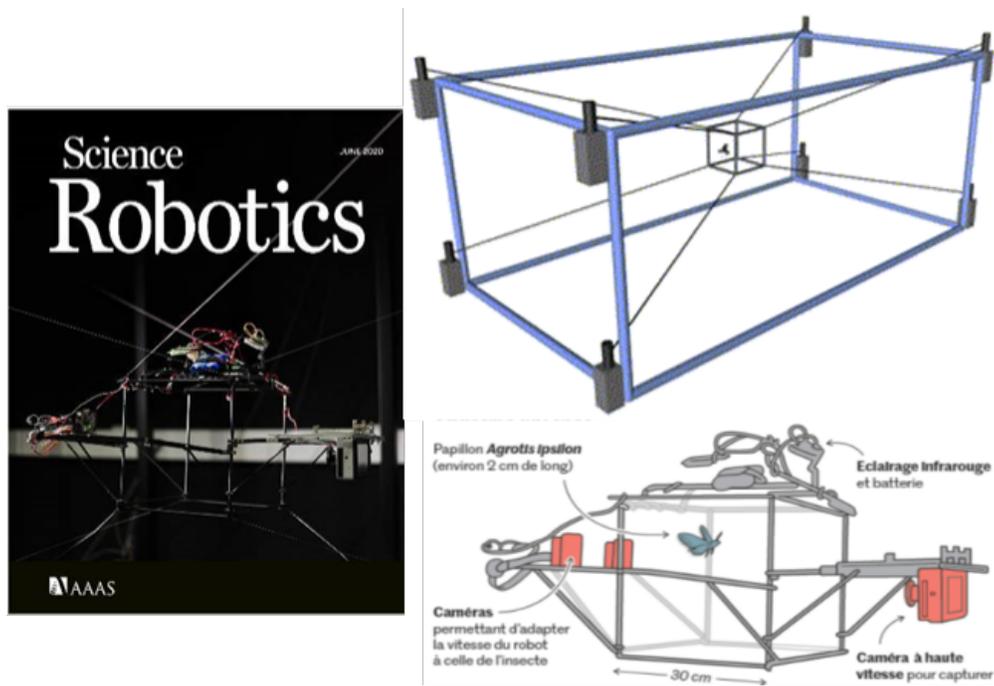


FIGURE 1 – Robot à câbles pour l'étude du vol de l'insecte publié dans Science Robotics (Pannequin et al., 2020). En haut à droite) structure du robot de 6m×4m×3m avec huit moteurs. En bas à droite) Effecteur du robot de 30cm×30cm×30cm embarquant un réseau de caméras et se déplaçant avec l'insecte.

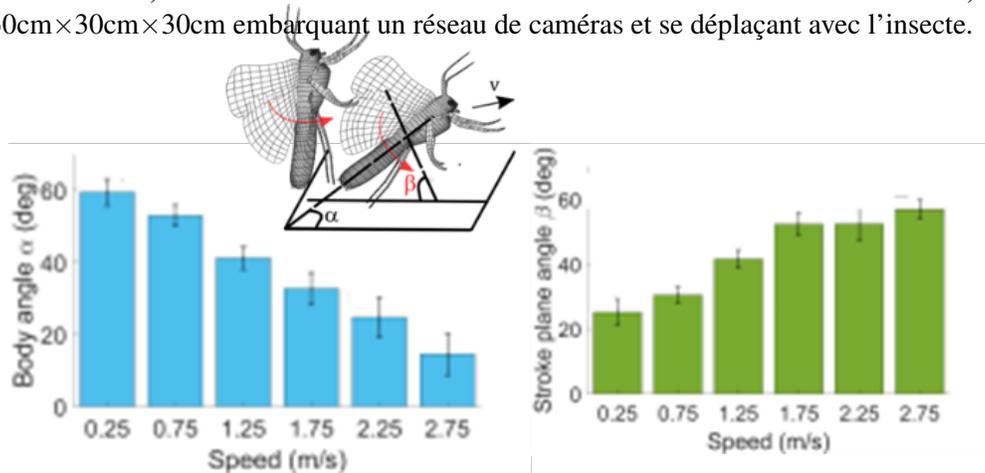


FIGURE 2 – Etude du vol d'Agrotis ipsilon. En haut) Modèle 3D articulé de l'insecte permettant d'extraire l'inclinaison du corps et du plan de battement. En bas à gauche) Angle du corps en fonction de la vitesse de déplacement. En bas à droite) Angle du plan de battement en fonction de la vitesse de déplacement.

References

- [1] Rémi Pannequin, Melanie Jouaiti, Mohamed Boutayeb, Philippe Lucas, and Dominique Martinez. Automatic tracking of free-flying insects using a cable-driven robot. *Science Robotics*, 5(43) :eabb2890, June 2020. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02891766>.

Article “Head-to-head comparison of clustering methods for heterogeneous data”

Équipe CAPSID

Published in 2021 in Nature/Scientific Reports [1], this study examines the performance of various clustering strategies for mixed data, i.e. data with both continuous and categorical variables. It is a joint project between the LORIA CAPSID and the CHRU Nancy CIC-P teams, with the participation of the LORIA OR-PAILLEUR team.

The choice of the most appropriate unsupervised machine-learning method for “heterogeneous” or “mixed” data, i.e. with both continuous and categorical variables, can be challenging. Our aim was to examine the performance of various clustering strategies for mixed data using both simulated and real-life data. We conducted a benchmark analysis of “ready-to-use” tools in R comparing 4 model-based methods (Kamila algorithm, Latent Class Analysis, Latent Class Model [LCM] and Clustering by Mixture Modeling) and 5 distance/dissimilarity-based methods (Gower distance or Unsupervised Extra Trees dissimilarity followed by hierarchical clustering or Partitioning Around Medoids, K-prototypes) for clustering mixed data.

Clustering performances were assessed by Adjusted Rand Index (ARI) on 1000 generated virtual populations consisting of mixed variables using 7 scenarios with varying population sizes, number of clusters, number of continuous and categorical variables, proportions of relevant (non-noisy) variables and degree of variable relevance (low, mild, high).

Clustering methods were then applied on the EPHEBUS randomized clinical trial data (a heart failure trial evaluating the effect of eplerenone) allowing to illustrate the differences between different clustering techniques.

The simulations revealed the dominance of K-prototypes, Kamila and LCM models over all other methods. Overall, methods using dissimilarity matrices in classical algorithms such as Partitioning Around Medoids and Hierarchical Clustering had a lower ARI compared to model-based methods in all scenarios.

When applying clustering methods to a real-life clinical dataset, LCM showed promising results with regard to differences in (1) clinical profiles across clusters, (2) prognostic performance (highest C-index) and (3) identification of patient subgroups with substantial treatment benefit.

The present findings suggest key differences in clustering performance between the tested algorithms (limited to tools readily available in R). In most of the tested scenarios, model-based methods (in particular the Kamila and LCM packages) and K-prototypes typically performed best in the setting of heterogeneous data. The simulated datasets are available for download on the MBI-DS4H platform web site at the LORIA <https://mbi-ds4h.loria.fr/clustering-of-mixed-data/>.

References

- [1] Gregoire Preud’homme, Kévin Duarte, Kevin Dalleau, Claire Lacomblez, Emmanuel Bresso, Malika Smaïl-Tabbone, Miguel Couceiro, Marie-Dominique Devignes, Masatake Kobayashi, Olivier Huttin, João Pedro Ferreira, Faiez Zannad, Patrick Rossignol, and Nicolas Girerd. Head-to-head comparison of clustering methods for heterogeneous data : a simulation-driven benchmark. *Scientific Reports*, 11(1) :4202, February 2021.

Logiciel “EROS-DOCK” : Protein-Protein Docking by Exhaustive Rotational Search

Équipe CAPSID

EROS-DOCK is a new algorithm for rigid docking of pairs of proteins that includes an exhaustive exploration of the 3D rotational space. It was developed in the CAPSID team by a PhD student Maria-Elisa Ruiz Echartea under the supervision of Dave W. Ritchie and Isaure Chauvot de Beauchêne. It was published in 2019 in *Bioinformatics* [1] and re-used in a second publication in *Proteins : Structure, Function and Bioinformatics* in 2020 [2]. The tool is freely available at <https://erosdock.loria.fr> and from the Inria software information system (<https://bil.inria.fr/fr/software/view/3706/>).

EROS-DOCK is a protein-protein docking program for Linux. It takes as input the 3D structures of two proteins in PDB format, and gives as output a list of transformation matrices describing the most probable relative positions of the two proteins in nature, together with a score (approximation of their binding energy for that position). On a modern workstation, docking times is in the order of few hours for a blind global search. The user can also provide knowledge of particular contact points at the surface of each protein, which accelerates the pruning of the solutions space (Fig. 3).

Fundamentally, EROS-DOCK is a coarse-grained docking approach that uses the physics-based ATTRACT scoring function in conjunction with a novel quaternion “pi-ball” representation of 3D rotational space. The pi-ball allows systematic exploration of the rotational space. A “branch-and-bound” algorithm is implemented in order to operate efficient pruning of rotations that will give steric clashes. Thus, more than 95% of candidate docking poses are eliminated, thus allowing the remaining non-clashing orientations to be calculated very efficiently. In this way, the approach combines the exhaustive coverage of classical FFT-based approaches with an “exact” high quality scoring function.

EROS-DOCK was tested on 173 benchmark docking complexes. According to the CAPRI (Critical Assessment of PRedicted Interactions) quality criteria, EROS-DOCK typically gives more acceptable or medium quality solutions than classical ATTRACT and ZDOCK software.

References

- [1] Maria Elisa Ruiz Echartea, Isaure Chauvot de Beauchêne, and David Ritchie. EROS-DOCK : Protein-Protein Docking Using Exhaustive Branch-and-Bound Rotational Search. *Bioinformatics*, 35(23) :5003–5010, 2019.
- [2] Maria Elisa Ruiz Echartea, David Ritchie, and Isaure Chauvot de Beauchêne. Using Restraints in EROS-Dock Improves Model Quality in Pairwise and Multicomponent Protein Docking. *Proteins - Structure, Function and Bioinformatics*, 88(8) :1121–1128, August 2020.

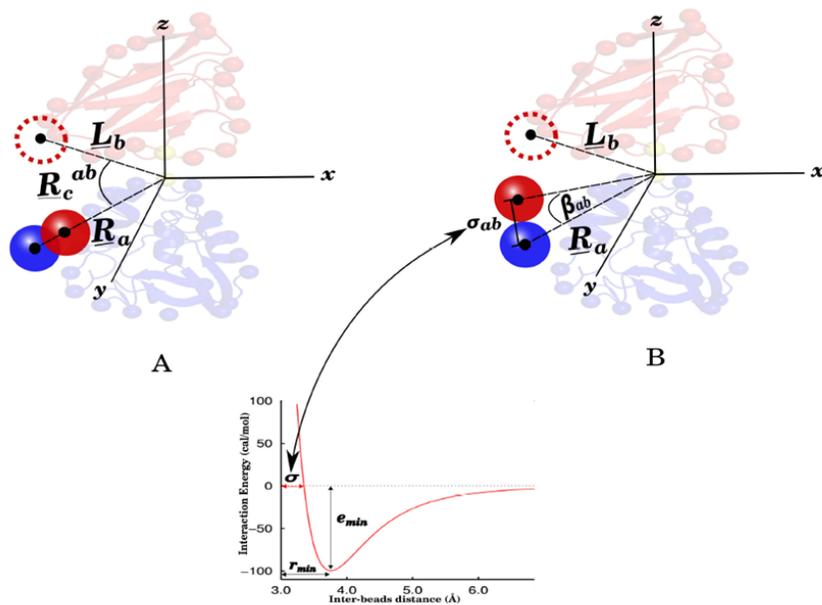


FIGURE 3 – (A) Illustration of the clash rotation, R^{ab}_c , between a bead L_b of the rotating Ligand partner and a bead R_a of the fixed Receptor partner. The vectors R_a and L_b are the position vectors of beads R_a and L_b , respectively. (B) Illustration of the clash cone angle calculated from the ligand and receptor vector lengths, L_b and R_a , and the contact distance from the ATTRACT potential for the pair (a, b). Rotations leading to such steric clashes are eliminated from the solution space thanks to the branch-and-bound algorithm.

PIA2 eFran METAL

Équipe KIWI

Le projet PIA 2 e-Fran METAL (Méthodes et Traces au service de l'apprentissage des Langues) vise à accompagner la transformation numérique des établissements scolaires français par la conception et l'expérimentation de nouveaux outils fondés sur l'intelligence artificielle (IA), en particulier la fouille de données et l'apprentissage automatique, le traitement automatique de la langue ou de la parole. Les recherches s'appuient sur une équipe multi-disciplinaire et s'organisent autour de deux axes principaux : (1) conception, développement et évaluation de plusieurs outils de suivi pédagogique individualisé et multidisciplinaire destinés aux élèves ou aux enseignants (Learning Analytics) et (2) conception et développement de technologies innovantes pour un apprentissage personnalisé des langues à l'écrit (grammaire française) et à l'oral (prononciation de langues vivantes). Le consortium comprend deux universités représentées par plusieurs laboratoires et équipe, deux entreprises, l'académie de Nancy-Metz et associe l'ESPE de Lorraine et plusieurs collectivités territoriales, pour un budget d'environ 1,4 Meuros. Coordiné par l'équipe KIWI du Loria, ce projet a associé des chercheurs de disciplines différentes (droit du numérique, IA, informatique, ergonomie cognitive, sciences de l'éducation), des profils différents (enseignants, élèves, chercheurs, ingénieurs) pour produire à la fois des contributions académiques (17 publications hors rapports) et des outils (un LRS par exemple) et a permis le financement de 6 thèses, de post-doctorants et d'ingénieurs.

Les résultats des travaux menés dans le projet METAL sont à la fois scientifiques et technologiques, puisque le projet a conduit aussi bien à la proposition de nouveaux algorithmes qu'au développement d'outils. Les principaux résultats obtenus dans l'axe 1 comportent :

- la mise en place d'un plan de collecte de traces d'usage laissées par les apprenants éthique et responsable (avec proposition d'une charte), la conception et le développement d'un entrepôt de données METALRS (<https://gitlab.univ-lorraine.fr/abboud6/meta>) reposant sur des standards et permettant le stockage et l'archivage des données éducatives collectées [5, 15].
- le développement d'un baromètre éducatif qui guide et motive les élèves dans leur apprentissage. Sa conception est le résultat de focus groupes réalisés avec des collégiens de classe de 5ème. Il intègre un algorithme innovant de fouille de motifs séquentiels multi-sources et généralisés baptisé G_SPM, dont l'objectif est déidentifier les motifs comportementaux fréquents (par exemple des motifs de comportement déapprenants). La variabilité intrinsèque à l'humain fait qu'un comportement donné peut avoir plusieurs réalisations observables au travers des traces numériques collectées. Dans ce contexte, les algorithmes de fouille de motifs de l'état de l'art font souvent face à un problème de manque de données. G_SPM est conçu pour pallier ce problème en formant des motifs généralisés, c'est-à-dire englobant des motifs similaires. Une évaluation a été faite à la fois sur la nature et la pertinence des motifs identifiés, mais également sur des aspects de temps d'exécution et de mémoire [6, 10]. De plus, le projet METAL a permis la conception d'un nouvel algorithme de recommandation de ressources éducatives à l'élève "au bon moment", dans l'objectif de conserver sa motivation et de respecter son rythme d'apprentissage [11].
- le développement d'un tableau de bord pour accompagner les enseignants en leur fournissant des recommandations engageantes pour les élèves. La conception du tableau de bord a été réalisée suite à l'organisation d'ateliers de conception collaborative menés en partenariat avec le projet e-FRAN e-Tac. Les recherches ont essentiellement porté sur la mesure de l'effort de l'apprenant. Dans cet objectif, a été collecté un jeu de données comprenant pour 120 collégiens de 6 collèges de la région en train d'effectuer différentes activités dans le cadre de leur apprentissage, des données physiologiques et comportementales (acquises à l'aide de smartwatches et d'oculomètres), subjectives (réponses à des questionnaires, notamment sur l'effort perdu) et de performance (pourcentage de bonnes réponses aux exercices). Une analyse approfondie a notamment montré une corrélation forte entre la performance des élèves et une combinaison de données comportementales et physiologiques. Plusieurs

formalisations mathématiques de variables explicatives de l'effort et de l'engagement à partir de ces données ont été proposées. Il a en particulier été montré qu'il est possible de prédire efficacement l'effort perdu des élèves pour des activités non encore effectuées à partir de leur utilisation du clavier, de la souris, de leur regard, de leur rythme cardiaque, etc., sans avoir besoin de données subjectives. Ce résultat particulièrement intéressant ouvre la voie à une mesure et une prédiction en temps réel de l'effort des élèves, qui nécessitait jusqu'alors de passer par des questionnaires à la fin des activités. Le travail s'est conclu par la proposition d'un nouveau modèle de recommandations engageantes sur la base des modèles d'effort proposés, avec l'objectif de maximiser l'effort des apprenants en leur proposant d'effectuer les bonnes activités au bon moment, sur la base d'une formalisation mathématique de la technique du pied-dans-la-porte [12–14].

- la proposition de l'infrastructure du système de recommandation compatible avec l'entrepôt de données METALRS par la société Sailendra en collaboration avec le Loria ainsi que la pré-industrialisation des algorithmes IA développés.
- une étude des données oculométriques pour étudier la qualité de l'apprentissage complète cet axe. Une première expérience d'apprentissage de l'Esperanto au printemps 2019 a été réalisée et a permis la constitution d'un corpus de traces pour 158 collégiens (81 filles, 77 garçons) de Meurthe-et-Moselle issus de 4 établissements. L'expérience d'une heure environ consiste à répondre au test WISC-V (référence internationale pour la mesure de l'intelligence, de la mémoire et de la maîtrise de la langue maternelle de l'enfant), à apprendre une leçon d'Esperanto et à restituer les connaissances à travers un quiz relatif. Pendant les phases de mémorisation et de restitution, les élèves étaient munis de lunettes d'eye-tracking Tobii Glasses 2 cadencées à 100Hz. 87 passations sont exploitables à l'issue d'une phase de vérification et de correction des données [1].

Les actions réalisées dans l'axe 2 comprennent :

- la génération semi-automatique d'exercices de grammaire française en fonction d'un but pédagogique, du niveau de l'apprenant, voire de contraintes spécifiées par l'enseignant. Le travail a porté sur la conception et l'évaluation de méthodes neuronales pour la génération de phrases qui puissent servir de support à la création d'exercices de grammaires. Concrètement cela implique de générer automatiquement des phrases réalisant les constructions syntaxiques étudiées par les apprenants. Il a été développé une méthode permettant la génération de phrases en anglais, sous contraintes syntaxiques et à partir de triplets RDF (Rich Description Framework). La recherche s'est ensuite concentrée sur le français et une méthode permettant de générer des phrases en français à partir de représentations sémantiques abstraites a été mise au point. Un exerciceur pour la grammaire écrite du français a été réalisé. Le code, la documentation utilisateur et la documentation développeurs sont disponibles sur github (<https://gitlab.inria.fr/gardent/METAL-SYNALP>) [7–9].
- la prononciation d'une langue vivante étrangère par une tête parlante virtuelle 3D et la reconnaissance des prononciations de l'élève. Les aspects recherche de cette action portent sur deux volets : le développement d'un professeur virtuel (une tête parlante parlant allemand) et des techniques d'évaluation de la prononciation. Le développement de la tête parlante a abouti : une tête parlante peut être animée à partir d'un enregistrement de la parole audio. Les évaluations réalisées montrent que l'articulation de la tête parlante est intelligible et réaliste. Pour les aspects développement, une plateforme d'apprentissage des langues sur le web comprenant deux applications a été développée : Flashcards et évaluation de la prononciation. La première application propose un ensemble d'outils pour l'enseignant pour améliorer la prononciation des sons de parole en allemand. L'application Flashcards se base principalement sur un professeur virtuel (tête parlante) qui communique avec l'apprenant en allemand et lui montre comment on prononce des mots et des phrases en allemand [2–4].

Les recherches et les développements réalisés dans le cadre du projet METAL ont conduit à différentes actions comme notamment :

- le projet LOLA (Laboratoire Ouvert en Learning Analytics), lancé par le Loria et soutenu en par-

ticulier par le MENJS, exploite les travaux autour de METALRS pour proposer un environnement sécurisé de partage de données et d'évaluation d'algorithmes de Learning Analytics pour la recherche et le développement. L'entrepôt de données éducatives et les méthodes d'évaluations développées dans LOLA sont à la base des travaux menés par le LORIA dans le projet ERASMUS + AI4T.

- des thèses poursuivent, complètent ou approfondissent des travaux initiés dans METAL. Citons par exemple la thèse financée par le rectorat Nancy-Metz sur la recommandation multi-échelle de ressources éducatives (projet PEACE).
- les outils développés dans METAL seront expérimentés en situation réelle dans le cadre des e-lab mis en place dans le projet FEDER PLANETE, en collaboration avec l'académie Nancy-Metz.

Le projet METAL a financé six thèses dont 5 en informatique (4 soutenues et 1 abandon lors de la rédaction avec une publication de rang A [1]) [2,6,7,12] et 1 thèse en droit (abandon lors de la rédaction pour raisons de santé).

References

- [1] Maël Beuget, Sylvain Castagnos, Christophe Luxembourger, and Anne Boyer. Eye Gaze Sequence Analysis to Model Memory in E-education. In *20th international conference on Artificial Intelligence in Education (AIED 2019)*, Chicago, United States, June 2019.
- [2] Théo Biasutto-Lervat. *Modélisation de la coarticulation multimodale : vers l'animation d'une tête parlante intelligible*. Theses, Université de Lorraine, January 2021.
- [3] Théo Biasutto-Lervat, Sara Dahmani, and Slim Ouni. Modeling Labial Coarticulation with Bidirectional Gated Recurrent Networks and Transfer Learning. In *INTERSPEECH 2019 - 20th Annual Conference of the International Speech Communication Association*, Graz, Austria, September 2019.
- [4] Théo Biasutto-Lervat and Slim Ouni. Phoneme-to-Articulatory mapping using bidirectional gated RNN. In *Interspeech 2018 - 19th Annual Conference of the International Speech Communication Association*, Hyderabad, India, September 2018.
- [5] Armelle Brun, Geoffray Bonnin, Sylvain Castagnos, Azim Roussanaly, and Anne Boyer. Learning Analytics Made in France : The METAL project. *International Journal of Information and Learning Technology*, 3(36) :16, 2019.
- [6] Julie Bu Daher. *Sequential Pattern Generalization for Mining Multi-source Data*. Theses, Université de Lorraine, December 2020.
- [7] Émilie Colin. *Traitement automatique des langues et génération automatique d'exercices de grammaire*. Theses, Université de Lorraine, June 2020.
- [8] Émilie Colin and Claire Gardent. Generating Syntactic Paraphrases. In *Proceedings of the 2018 Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing*, pages 937–943, Brussels, Belgium, October 2018. Association for Computational Linguistics.
- [9] Emilie Colin and Claire Gardent. Generating Text from Anonymised Structures. In *Proceedings of the 12th International Conference on Natural Language Generation*, pages 112 – 117, Hong Kong, China, October 2019.
- [10] Julie Bu Daher and Armelle Brun. Handling Item Similarity in Behavioral Patterns through General Pattern Mining. In *The 2020 IEEE/WIC/ACM International Joint Conference on Web Intelligence and Intelligent Agent Technology (WI-IAT'20)*, Sydney/Virtual, Australia, December 2020.

- [11] Oriane Dermay and Armelle Brun. Can we Take Advantage of Time-Interval Pattern Mining to Model Students Activity? In *Proceedings of The 13th International Conference on Educational Data Mining (EDM 2020)*, Ifrane, Morocco, July 2020.
- [12] Barbara Moissa. *Maximizing students' engagement through effort-based recommendations*. Theses, Université de Lorraine, December 2021.
- [13] Barbara Moissa, Geoffray Bonnin, and Boyer Anne. Towards the exploitation of multimodal data to measure students' mental effort. In *2020 IEEE 20th International Conference on Advanced Learning Technologies (ICALT)*, 2020 IEEE 20th International Conference on Advanced Learning Technologies (ICALT), Tartu/ Virtual, Estonia, July 2020.
- [14] Barbara Moissa, Geoffray Bonnin, and Anne Boyer. Measuring and Predicting Students' Effort : A Study on the Feasibility of Cognitive Load Measures to Real-Life Scenarios. In *European Conference on Technology Enhanced Learning*, volume 12884 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 363–367, Bozen-Bolzano, Italy, 2021. Springer International Publishing.
- [15] Azim Roussanaly, Thomas Toulotte, Laura Infante Blanco, Anne Boyer, Armelle Brun, and Geoffray Bonnin. *Projet METAL : Plan de collecte de données*. Research report, Université de Lorraine (Nancy); CNRS, December 2017.