

Intelligence artificielle et véhicule autonome

Compte rendu de la présentation du 14 mars 2017, à l'Hôtel 1K

Compte rendu rédigé par Laure MUSELLI & ANDSI

En bref...

Arnaud de LA FORTELLE, directeur du Centre de Robotique de MINES ParisTech, présente les travaux de son laboratoire dans le domaine du véhicule autonome sur route. Refusant une approche déterministe de la technologie, il insiste sur la nécessité de considérer les solutions techniques comme faisant partie, au même titre que les enjeux sociaux et humains, d'un système auquel il convient de trouver une gouvernance. Après avoir rappelé les principes de l'intelligence artificielle et les mythes qui lui sont associés, il explique pourquoi cette technologie ne peut à elle seule résoudre tous les problèmes posés par la conduite autonome. Il propose finalement un modèle mathématique de simulation de conduite autonome et coopérative sur route, alliant planification et contrôle.

L'Association Nationale des Directeurs des Systèmes d'Information organise des débats et en diffuse des comptes-rendus, les idées restant de la seule responsabilité de leurs auteurs. Elle peut également diffuser les commentaires que suscitent ces documents.

Intelligence artificielle et véhicule autonome : enjeux et mythes

Le véhicule autonome existe depuis une vingtaine d'années, commercialisé par des sociétés telles que Robotsoft, Frog ou Navigation systems. Sur autoroute, certaines solutions d'assistance à la conduite fonctionnent déjà très bien depuis une vingtaine d'années car grosso modo, elles nécessitent seulement d'être capable d'effectuer du contrôle latéral pour ne pas dépasser les lignes blanches, et du contrôle longitudinal, pour ne pas percuter la voiture précédente. En revanche, son déploiement à grande échelle sur route, déjà annoncé par certains constructeurs pour 2008 (cas de l'autoroute), est sans cesse repoussé. Et une problématique majeure du véhicule autonome concerne la façon de pouvoir le faire circuler en ville.

Un tel déploiement s'annonce comme une véritable rupture, et nécessite de réfléchir en termes de système, dont les éléments sociétaux et managériaux sont partie prenante. En opposition à une vision déterministe de la technologie, qui se gouvernerait elle-même et que personne ne maîtriserait une fois développée, la question de la gouvernance d'un tel système doit donc être prise en compte dans le processus même de développement de solutions technologiques.

L'intelligence artificielle et la conduite autonome, véhiculent en effet de nombreux mythes porteurs de problématiques sociales, parmi lesquels :

« **La conduite autonome va tuer le métier de l'assurance** ». L'assurance automobile représente en effet 70% du marché de l'assurance, et 90% des accidents, qui sont le fait d'erreurs humaines, seraient évités. De plus, les véhicules autonomes appartiendront vraisemblablement à des flottes automobiles plutôt qu'à des particuliers, ce qui pose le problème de la distribution des assurances par les agents généraux. Certains constructeurs comme Volvo ont en effet annoncé qu'ils fourniraient des voitures assurées à leurs clients.

« **L'intelligence artificielle va tuer tous les emplois** ». Bien qu'on ne puisse pas affirmer que l'intelligence artificielle est plus efficace que l'intelligence humaine, on peut dire qu'elle s'avère plus rapide et moins coûteuse, et qu'elle impacte tous les secteurs d'activité. Cette menace pourrait donc être réelle.

« **Les robots vont supplanter l'humanité** ». Tesla a déjà montré que les robots pouvaient tuer des humains ; néanmoins, les décisions prises par les robots – et les véhicules autonomes sont des robots – restent très techniques. Le dilemme du « trolley », qui implique de choisir les personnes à sacrifier en cas d'accident, et qui pose la question d'une décision morale, est très éloignée de la réalité de la technique. En fait l'intelligence artificielle, au travers de

choix non-explicites, pose beaucoup de problématiques sociales (p. ex. discrimination implicite). Il n'est pas à l'ordre du jour, aujourd'hui, de laisser ces problématiques à l'appréciation d'un robot, ni de s'orienter vers des raisonnements transhumanistes (fusion robot/humain).

Machine learning, deep learning et intelligence artificielle : état de l'art et limites dans un contexte de conduite autonome

L'intelligence artificielle d'aujourd'hui est tirée par le deep learning (mais n'y est pas réduite), qui est un réseau de neurones, qui dérive lui-même des perceptrons des années 50.

Le « **deep learning** » consiste à simuler des réseaux de neurones, en les positionnant en couches. Pendant des décennies, les résultats obtenus à partir de ces réseaux de neurones disposés généralement en 3 couches de 100 à 1000 neurones ne se sont pas avérés très concluants.

Le « **machine learning** », pour sa part, consiste en des techniques probabilistes permettant, par exemple, de partager de gros ensembles de données en deux nuages de points : 51% de bons cas et 49% des mauvais cas. Selon la théorie de l'information, l'information est nulle lorsque la répartition est de 50-50 entre les deux nuages. Dans le cas d'une répartition à 49-51, on commence à obtenir un peu d'information. Avec des probabilités de se tromper de 0,99, mais indépendantes (ou presque), si on combine à la puissance $n=1000$, c'est-à-dire lorsque l'on dispose de milliers de points à peu près indépendants, cette probabilité tend vers 0. En utilisant cette technique, il est par exemple possible de détecter plus de 90% des piétons présents sur un parcours.

Grâce à des réseaux de neurones de grande taille (de l'ordre du million ou de la dizaine de millions), superposant non plus 3 mais 13 voire 30 couches, et des échantillons d'apprentissage de plusieurs milliers d'images labellisées et de millions d'images non-labellisées, ces techniques ont permis de passer à une probabilité d'erreur de 95% à une probabilité d'erreur de 99,5%. Cela revient à se tromper environs une fois sur 200. Aujourd'hui, le deep learning s'applique extrêmement bien aux données très structurées de type image, les signaux d'images pouvant être convolués très facilement, rendant par exemple la reconnaissance de visages facilement réalisable. En revanche, l'utilisation de cette technique reste encore très compliquée sur de grandes bases de données, ne se prêtant pas à la convolution et nécessitant de vrais neurones et une puissance de calcul très importante.

L'**intelligence artificielle** implique la notion d'apprentissage. Sur des bases de données de centaines de millions d'images, il est possible d'apprendre sur chaque image, puis de corriger le réseau de neurones et, par apprentissage, de le faire converger. Pour réaliser cela à grande échelle, une puissance de calcul très importante est nécessaire, qui implique des clusters de calcul. Une fois le réseau de neurones constitué, celui-ci peut être figé et enregistré, afin de le faire tourner en temps réel. Tous ces outils sont aujourd'hui en open source, et il est donc possible de récupérer des couches basses déjà développées, afin de rajouter soi-même des couches hautes.

L'intelligence artificielle permet aujourd'hui de faire la distinction entre piétons et cyclistes, de reconnaître la chaussée, mais atteint ses limites dès lors qu'il s'agit de résoudre les problématiques liées à la conduite autonome. Le réseau peut en effet apprendre à partir de catégories connues. En revanche, aller au-delà de la classification est plus compliqué, comme lorsque l'on souhaite entraîner un réseau de neurones à deviner la manœuvre d'un véhicule, grâce à des données de trajectoire et de contexte.

Par ailleurs, la conduite autonome nécessite de reconnaître tous les objets d'un carrefour, alors que la probabilité d'erreur de l'intelligence artificielle est de l'ordre de 1 sur 1000. Quand on sait qu'un automobiliste parisien croise plus de 1000 piétons par jour et qu'il existe plusieurs millions d'automobilistes sur Paris, on ne peut se permettre de rater un piéton sur 1000. Pour cette raison, les solutions de conduite autonome doivent combiner l'intelligence artificielle à d'autres outils.

Le **Centre de Robotique de MINES ParisTech**, qui mène des projets de recherche concernant le véhicule intelligent, est ainsi multidisciplinaire, avec des activités liées au contrôle, à la réalité virtuelle et à l'interaction avec les robots, à la logistique, à la cartographie 3D, à la robotique et à la perception et l'intelligence artificielle. Il s'agit d'un centre de recherche d'une cinquantaine de personnes dont 15 professeurs, qui contribuent à l'enseignement ainsi qu'au transfert d'innovation. La collaboration avec l'industrie est centrale et s'effectue notamment au travers de la Chaire « Conduite automatisée – Drive for All », financée par PSA, Safran et Valeo, qui déploie trois véhicules : l'un à Berkeley aux Etats-Unis, l'autre à Paris (aux Mines), et le dernier à l'université Jiao-Tong de Shanghai en Chine. Cette chaire repose sur un modèle de partenariat dans lequel les financeurs ne possèdent pas de propriété sur les technologies développées, qui restent publiques. Leur participation leur assure en revanche une avance de phase.

Un modèle de simulation de conduite autonome et coopérative sur route

La question fondamentale de la conduite en ville concerne les carrefours, qui sont de véritables goulots d'étranglement et créent les embouteillages en agglomération. La problématique consiste à estimer les intentions des autres conducteurs et de les prendre en compte pour les rendre compatibles (en faisant par exemple freiner un véhicule lorsqu'un autre arrive dans un carrefour), afin d'organiser des ronds-points efficaces sans embouteillages.

On se trouve ici face à des questions de planification coopérative (afin de déterminer, lorsque deux véhicules autonomes se rencontrent, lequel doit avancer avant l'autre) et de perception (afin de détecter, par exemple, piétons et cyclistes).

Le paradoxe de la conduite autonome et coopérative.

Comment être à la fois autonome et coopératif ?

- L'**autonomie**, en termes de conduite, se résume à une certaine forme d'indépendance, puisqu'elle suppose de prendre ses décisions soi-même ;
- **La coopération**, pour sa part, suppose de délibérer avec les autres pour décider quelle décision prendre.

Il s'agit de décortiquer scientifiquement les mécanismes que l'humain met en œuvre de façon naturelle. Le problème de l'interaction avec les autres usagers ne peut en effet être totalement résolu par l'intelligence artificielle, du fait de l'erreur sur mille qui n'est pas acceptable.

Planification à partir d'une optimisation multi-critères

Afin de résoudre le problème de façon plus fiable, il faut choisir les critères à optimiser, qui peuvent aller au-delà du critère d'efficacité et de sécurité, comme :

- **Planification vs. réaction**, la planification consistant à planifier l'action dans le temps, en définissant le passage en fonction de l'ordre d'arrivée, et la réaction consistant à déterminer son action en fonction des actions des autres (que l'on ne peut observer qu'au dernier moment).
- **Centralisé vs. distribué**, centralisé impliquant une anticipation à partir d'une information parfaite sur ce que font les autres, et distribué une information imparfaite et une capacité de réaction grâce à de l'intelligence distribuée
- **Homogène vs. hétérogène**, les véhicules n'étant pas forcément tous identiques (camions, voitures, deux-roues) et pouvant accélérer ou freiner de façons différentes, être plus ou moins coopératifs, etc...
- **Coopératif vs. égoïste**, qui dépend de la culture du pays (les Etats-Unis ont une culture peu coopérative, alors que la Chine impose la coopération).

On applique alors le paradigme robotique « **Perception – Planification – Contrôle** ».

L'objectif est de **planifier** une trajectoire à partir de l'optimisation d'une grille d'analyse développée sur la base des critères choisis. L'idée consiste, à partir de la destination désirée et des obstacles, à tenter une trajectoire optimisée se rapprochant le plus près et le plus vite possible de cette destination, tout en gardant un certain nombre de critères en tête.

Une telle planification suppose une bonne **perception** de l'environnement (et notamment du positionnement des piétons), mais également une assez faible réactivité (on doit connaître l'ensemble de ses propres actions pour les 10 secondes à venir). D'où l'importance des méthodes de **contrôle**, de plus en plus perfectionnées, qui améliorent la réactivité en cas de non-respect de la trajectoire planifiée et font progresser l'efficacité du processus pour éviter tout blocage.

Une solution mathématique aux problèmes d'autonomie coopérative : le contrôle sur une classe d'homotopies

Soit une situation où deux véhicules se voient et comprennent mutuellement l'intention de l'autre (soit par l'application de règles comme la priorité à droite, soit par observation). Une décision mutuelle est prise à un moment donné, l'un passant devant et l'autre derrière.

Il s'agit donc de faire un choix binaire que l'on résout mathématiquement en considérant qu'il n'existe que deux classes de trajectoire, des classes d'homotopie (x_1 et x_2), que l'on peut déformer continûment dans le plan. L'une

passer au-dessus et l'autre au-dessous (c'est-à-dire qu'un véhicule passe en premier et l'autre en second), sans qu'il y ait d'autre solution (pas de retour en arrière possible). La planification est donc réduite à effectuer un choix binaire (planification), puis à être purement réactif, grâce à la mise en place d'un contrôle, pour que le deuxième véhicule attende que le premier passe pour avancer.

Ce modèle permet d'obtenir la garantie mathématique d'un système jamais bloqué et d'une absence de collision. Il est applicable à une simulation à n véhicules, où ces derniers sont capables de réagir et de freiner en cas de besoin. Dans ce cas, au lieu d'un choix binaire, chacun des n véhicules exprime son passage avant ou après les autres, au sein d'une matrice binaire $n \times n$ qui donne un graphe de priorité et permet de décrire l'intersection fermée d'un certain nombre d'ensembles, qui permet de caractériser tous les inter-blocages. Pratiquement, l'inter-blocage a lieu lorsqu'un cycle se mord la queue et que plus personne ne peut avancer :

$$\bigcap_{(i,j) \in E(\mathcal{C})} cl(\chi_{i \succ j}^{\text{obs}}) = \emptyset$$

Les problèmes liés à ce modèle concernent la quantité trop importante de graphes de priorité ($2^{n(n-1)/2}$). Cependant, on peut démontrer grâce à la théorie que si on trouve un moyen de projeter la trajectoire dans l'avenir, il est possible de construire un graphe de priorité identique pour toutes les trajectoires, qui ne bloquera jamais. Après avoir assigné les priorités, il est alors possible de construire une loi de contrôle à l'intérieur de la classe d'homotopie (priority-aware control), permettant à un ensemble de véhicules d'accélérer ou de freiner sans risque de collision.

Les **hypothèses sous-jacentes** à ce modèle mathématique (une information parfaite et un « logiciel » de conduite identique pour tous les véhicules) étant **assez peu réalistes**, le passage à la pratique peut révéler des dysfonctionnements.

En revanche, **les conclusions sont valides quelles que soient les hypothèses mathématiques** : dans tous les cas de figure, le véhicule passe devant ou derrière, grâce à la déformation de trajectoire permettant d'accélérer ou de freiner de façon sécurisée. Même si la loi de contrôle ne fonctionne pas correctement, les principes généraux restent vrais, rendant possible la réalisation d'un système coopératif et autonome : si les conducteurs s'entendent deux à deux (priorités), si la loi de contrôle est raisonnable et que personne ne viole les priorités définies, chacun peut alors conduire sa voiture comme il le souhaite.

La solution mathématique au problème des priorités de l'autonomie coopérative passe ainsi par un contrôle sur une classe d'homotopies. Elle dispense d'anticiper les décisions de l'ensemble des conducteurs, car il suffit de définir des règles de priorité par paire de véhicules, ce qui diminue la complexité du système.

Conclusion :

Intelligence artificielle et véhicule autonome sont finalement très découplés. Aujourd'hui, l'intelligence artificielle doit être utilisée dans le domaine de la perception, afin d'identifier et de classer des objets. En revanche, dès que l'on commence vouloir réaliser une planification coopérative pour faire avancer un ensemble de véhicules, des règles plus solides sont nécessaires. En effet, dès lors qu'il faut être capable d'expliquer et de justifier une accélération ou un freinage à un moment particulier, l'intelligence artificielle n'est plus appropriée. Elle est assimilable à de l'intuition et ne fournit donc pas les mêmes garanties qu'un modèle mathématique, c'est-à-dire des invariants (sous forme de classes d'homotopie). Construire un invariant revient à donner des priorités, à partir desquelles un assureur peut par exemple attribuer les responsabilités d'un éventuel accident, ce qui est essentiel en termes de déploiement.

Aujourd'hui, le véhicule autonome soulève de nouveaux problèmes assez peu mentionnés, parmi lesquels une baisse du remplissage des véhicules, faisant courir le risque, en cas de déploiement massif, d'un blocage des axes routiers. En effet, il suffirait de diminuer de 5% le nombre de voitures en Ile-de-France pour que le trafic soit totalement fluide. A l'inverse, une augmentation de 5% de ce nombre de voitures générerait plusieurs centaines de kilomètres de bouchons supplémentaires.

Dans le futur, de nombreuses formes d'intelligence artificielle coexisteront au sein de millions de robots, qui échangeront des données tout en restant décentralisées. C'est d'ailleurs cette décentralisation qui permettra d'éviter une prise de contrôle à distance des robots, tordant ainsi le cou au mythe de l'intelligence artificielle unique contrôlant tout (*big brother*). Il convient dès lors de se demander comment instaurer de la gouvernance au sein de ce système. Quelle en sera l'entité de référence ? On peut par ailleurs imaginer qu'un objet puisse appartenir à plusieurs entités simultanément, avec des règles de gouvernance différentes suivant l'entité considérée. Par exemple, une voiture peut avoir ses propres règles de gouvernance si elle est seule, puis obéir aux règles d'un groupe de voitures, et éventuellement à celles d'un carrefour intelligent, lorsqu'elle s'approche de ce dernier, qui devient alors l'entité appropriée. Il est donc très important de déterminer, dans chaque cas, des schémas définissant la place de la

planification et de la coopération, ainsi que celle de la réserve de contrôle, afin de définir une gouvernance du système complet. A travers cette gouvernance, l'enjeu pour l'homme est de garder la main sur ces systèmes.

Débat

Intervenant : Le fait que Tesla mette en open source tous ses brevets va-t-il favoriser l'interaction entre tous les véhicules ?

Arnaud de La Fortelle : C'est possible. De toute façon, dans l'automobile, les brevets sont davantage défensifs qu'offensifs. Par ailleurs, les principes théoriques qui peuvent servir la standardisation sont encore en train d'être décortiqués, et les scientifiques entre eux sont encore loin d'être d'accord en ce qui concerne la technologie la plus sûre et la plus efficace à mettre en œuvre. Il est donc très difficile pour les industriels de se mettre d'accord entre eux, sauf à faire émerger un standard de fait. J'ai participé à la standardisation de la communication de la conduite autonome en général. Nous avons discuté entre spécialistes, avec la Commission Européenne et des industriels, et la conclusion a été qu'il valait mieux arrêter de standardiser, car personne n'était encore très clair sur la nature de ce qu'il fallait standardiser.

Int. : Votre modèle suppose quand même que tout le monde accepte les mêmes règles, ce qui n'est pas évident ! Sur la place de l'Etoile, personne ne les respecte !

A. L. F. : La question de la gouvernance implique de savoir si l'on est prêt à avoir une gouvernance forte du véhicule autonome et des robots, ou si l'on souhaite leur laisser énormément d'autonomie. On se trouve là face à un débat sociétal. Par exemple, les Japonais n'ont aucun problème avec des robots qui auraient une énorme autonomie, car ils ont un mythe positif du robot sauveur. En revanche, les Français ont un mythe du robot négatif qui tue les emplois. Pourtant, l'Allemagne a créé énormément d'emplois dans l'industrie, alors qu'ils ont cinq fois plus de robots qu'en France. Je ne crois donc pas du tout à ce mythe.

Int. : On voit de temps en temps dans la presse des dates comme 2020 et 2025 concernant le déploiement de masse. Est-ce que cette date est actée ?

A. L. F. : J'avais eu une discussion avec un assureur qui avait réalisé une étude de marché. Sa conclusion était qu'en 2020, vous auriez des véhicules automatisés. Il existe une différence entre véhicule autonome et véhicule automatisé. Automatisé signifie que dans certains contextes, vous pouvez donner à un automate la conduite de votre véhicule, mais lorsque vous sortez du contexte, cela n'est plus possible. Le véhicule automatisé est prêt et fonctionne, sans pour autant être aussi bien que l'humain. Autonome signifie que vous pouvez prendre des décisions dans n'importe quel contexte. Je ne crois pas un instant au véhicule autonome avant 2030. En 2020, nous aurons probablement des véhicules haut de gamme automatisés dans certaines circonstances, des navettes automatisées sur leurs trajets. L'autonomie, elle, se construira au fur et à mesure que le domaine de fonctionnement s'élargira. Aujourd'hui, elle fonctionne bien en Californie, car il n'y a pas de neige et peu de pluie, ainsi que sur les autoroutes américaines.

Int. : C'est un peu le modèle de la Tesla qui se généraliserait ?

A. L. F. : Oui. Et d'ailleurs, aujourd'hui, ce qui est impressionnant chez Tesla, c'est d'avoir eu le culot d'y aller et de pouvoir recueillir des quantités très importantes de donnée. Ils n'ont pas besoin de toutes ces données pour rendre le véhicule plus intelligent en tant que tel, mais ils analysent tous les incidents et accidents qui se produisent, afin de les corriger.

Int. : On ne peut pas encore parler d'intelligence ! Il faut plutôt identifier tous les cas possibles...

A. L. F. : Il s'agit effectivement plus de big data que de véritable intelligence artificielle. C'est d'ailleurs tout l'enjeu de mon discours. D'autres applications d'intelligence artificielle sont beaucoup plus impressionnantes que ça. Par exemple, en allant sur votre compte Facebook, on peut savoir si vous êtes un bon conducteur ou pas. C'est beaucoup plus du big data, dans lequel on mouline les données, on pose des règles, on réalise des inférences statistiques, mais ce n'est pas du deep learning. C'est autre chose. Techniquement, Aujourd'hui, les domaines dans lesquels on doit mobiliser de l'intelligence artificielle sont essentiellement relatifs à la vision, et l'on essaie d'étendre cela à d'autres capteurs de type laser, radars, etc... En revanche, on utilise plutôt du big data pour apprendre à avoir les bonnes règles de conduite au bon endroit, ainsi que les bonnes règles basées sur les bonnes théories.

Int. : Est-ce que ce n'est pas sur le fret qu'il sera le plus facile de se lancer ? Les trains de marchandises ?

A. L. F. : Les constructeurs de camions sont en train de se lancer. Aujourd'hui, la conduite effective d'un conducteur de poids lourd, compte tenu des contraintes horaires imposées, est de l'ordre de 700km sur trois jours. Si l'on regroupe ces camions en « platoons », un conducteur à l'avant peut se charger des cas difficiles, pendant que ceux à l'arrière freinent et accélèrent. Légalement, il semblerait que le temps de conduite du conducteur se trouvant à l'arrière du platoon ne soit compté ni dans son temps de conduite, ni dans son temps de repos, et qu'un roulement puisse se

faire à la tête du peloton. L'autonomie des camions peut alors être augmentée de 700 à 1200km. Ce n'est pas dans l'économie des heures des chauffeurs que se réalise le bénéfice, mais dans l'étendue du bassin de livraison. Une autre très grosse source d'économie concerne également l'usure du camion, qui est beaucoup plus faible lorsqu'il est conduit par un automate.

Int. : Et les réseaux dans tout cela ? Est-ce que des progrès dans les réseaux et les télécommunications pourraient avoir un impact sur la conduite autonome ?

A. L. F. Oui et non. La coopération nécessite des protocoles, afin que les gens se mettent d'accord. De ce point de vue-là, il existe encore des progrès à faire. En revanche, l'accord avec les autres véhicules se fait sur un bit d'information, ce qui ne nécessite pas une énorme bande passante. Il serait certes nécessaire d'avoir plus d'informations sur l'ensemble des véhicules alentour, et de communiquer les données des capteurs, ce qui cette fois, nécessiterait énormément de bande passante, alors qu'en termes de sécurité, il est préférable de recevoir le moins d'informations possible, car ces échanges sont sources d'attaques. Il existe donc un vrai problème de segmentation et de définition de l'information nécessaire. L'étude que nous avons menée a permis de définir quelle était l'information strictement nécessaire, mais il faudra un peu plus d'information pour arriver à faire fonctionner correctement le système. Le principal challenge concernant les réseaux de communication concerne leur capacité à gérer des objets avec un certain niveau de sécurité. Si la bande passante en tant que telle est d'ores et déjà suffisante pour beaucoup d'applications, la disponibilité du réseau, en revanche, n'est pas du tout garantie, le réseau pouvant être brouillé, surtout lorsqu'il est basé sur le wifi. Il serait intéressant de bénéficier de réseaux très hétérogènes, avec deux ou trois canaux différents concordants, beaucoup plus difficiles à brouiller, car possédant des propriétés physiques liées à l'émetteur.

Présentation de l'orateur

Arnaud de LA FORTELLE est directeur du Centre de Robotique de MINES ParisTech et titulaire de la Chaire « Conduite automatisée – Drive for All » sur les véhicules autonomes avec PSA, Valeo et Safran.

Brigitte D'ANDREA-NOVEL, Directrice adjointe du Centre de Robotique de MINES ParisTech a participé aux débats.