

CIGI QUALITA MOSIM 2023

Robotisation de l'agriculture et gestion des risques : étude de cas basée sur la cueillette de brocolis

DAMIEN BURLET-VIENNEY¹, SABRINA JOCELYN¹, ÉRIC LAPALME², MARIE-PHILIPPE BEAUCHAMP²,
ROXANNE BEAUCHAMP², MATHIEU GOULET³, MARTIN DE MONTIGNY³

¹ IRSST (Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail)
505, boul. de Maisonneuve O., Montréal, QC, H3A 3C2, Canada
damien.burletvienney@irsst.qc.ca
sabrina.jocelyn@irsst.qc.ca

² LAPALME GESTION CONCEPTION MÉCANIQUE
1471, boul. Lionel-Boulet, suite 27, Varennes, QC, J3X 1P7, Canada
elapalme@lgcm.ca
mbeauchamp@lgcm.ca
rbeauchamp@lgcm.ca

³ CRVI (Centre de robotique et de vision industrielle)
205, rue Monseigneur-Bourget, Lévis, QC, G6V 7M8, Canada
mathieu.goulet@cegeplevis.ca
martin.demontigny@cegeplevis.ca

Résumé – Lors de développements de nouveaux équipements robotisés, les aspects de santé et de sécurité du travail (SST) ne sont souvent pas la première préoccupation des concepteurs qui tentent, dans un premier temps, de développer un produit fonctionnel. Toutefois, lorsque ces technologies se rapprochent d'une commercialisation et d'une introduction dans les milieux de travail, la question de la SST devient un élément incontournable notamment pour le respect des réglementations en vigueur. Le cas d'étude proposé dans cet article porte sur le secteur agricole et la robotisation de la cueillette de brocolis en champ. L'équipement développé consiste en une structure, remorquée et alimentée en puissance via un tracteur, qui supporte quatre robots industriels associés à un système de vision. Cet article présente les résultats de l'appréciation des risques et les moyens de réduction de risques retenus pour la phase de développement et d'expérimentation de l'équipement. Ce travail, fruit d'une collaboration entre les équipes de conception, de développement et de SST, a tenu compte des contraintes propres au travail en champ.

Abstract – When developing new robotic equipment, occupational health and safety (OHS) aspects are often not the primary concern of designers, who try, first, to develop a functional product. However, as these technologies come closer to being commercialised and introduced into the workplace, the question of OHS becomes an unavoidable factor particularly in terms of compliance with the regulations in force. The case study proposed in this article concerns the agricultural sector and the robotization of broccoli picking in the field. The developed equipment consists of a structure, towed and powered by a tractor, which supports four industrial robots associated with a vision system. This article presents the results of the risk assessment as well as the risk reduction measures retained for risk management during the development and experimentation phase of the equipment. This work was a collaborative effort between the design, development and OHS teams and took into account the constraints of working in the field.

Mots clés – robotisation, automatisation, agriculture, gestion des risques, santé et sécurité du travail

Keywords – robotization, automation, agriculture, risk management, occupational health and safety

1 AUTOMATISATION ET ROBOTISATION EN AGRICULTURE

1.1 Une révolution en marche

Le nombre de robots en opération est en constante augmentation, témoin notamment d'une automatisation des milieux de travail. En 2021, on comptait 3,48 millions de robots en opération à travers le monde avec une augmentation annuelle moyenne de 14%. Pour la seule année 2021, plus de 500 000 nouveaux robots ont été installés [International

federation of robotics (IFR), 2022]. La notion de « robot » utilisée par l'IFR inclut à la fois les robots de service (ex. robot mobile pour le transport de charge en entrepôt, robot d'aide à la manipulation de patients dans les hôpitaux) et les robots industriels (ex. conventionnel ou collaboratif) au sens de l'Organisation internationale de normalisation (ISO) [ISO, 2011]. Les secteurs de l'électronique, de la fabrication automobile et de pièces en métal sont les secteurs où l'on compte le plus de robots. Les tâches de manutention, de

soudage et d'assemblage sont les plus ciblées en matière de robotisation [IFR, 2022].

De nombreux facteurs sont favorables à l'automatisation et à la robotisation dans les milieux de travail ; aux premiers chefs : la numérisation du commerce, les changements démographiques avec notamment le vieillissement de la main d'œuvre, une demande croissante en produits électroniques ou encore une recherche de gain en matière de sécurité, de productivité et de flexibilité selon les principes de l'Industrie 4.0 [Danjou, Rivest & Pellerin, 2017].

Le secteur agricole est particulièrement concerné par la poussée de l'automatisation et de la robotisation. Par exemple, le secteur agricole fait partie du top 5 des secteurs d'activité pour l'utilisation de robots de service en 2021 [IFR, 2022]. L'automatisation du secteur agricole est regroupée sous des termes comme « agriculture 4.0 » ou « *smart farm* » avec comme objectif une agriculture plus efficace et plus respectueuse de l'environnement [Javaid et al., 2022]. Parmi les principales raisons de l'automatisation et de la robotisation dans le secteur agricole, on retrouve le besoin d'une augmentation de la productivité et de la précision dans un contexte où la population mondiale est en forte augmentation et où l'utilisation de produits tels que les pesticides est remise en cause [Brown, 2018]. Il y a aussi la pénurie de main d'œuvre dans le secteur.

L'agriculture est un bon candidat à l'automatisation de par la nature répétitive, normalisée et physiquement exigeante de certaines tâches en champ. En particulier, la robotisation (*agrobotic*) fait l'objet d'un nombre important de recherches et d'innovations [Pearson et al., 2022]. La taille du marché mondial des robots autonomes agricoles était de 3,9 milliards de dollars en 2021 et devrait atteindre 10,5 milliards de dollars d'ici 2027, à un taux de croissance annuel composé de 19,2 % [Research And Markets, 2022].

Concrètement, la robotisation sur une ferme peut se traduire par l'utilisation de tracteurs et de robots autonomes ou encore de drones. Ces équipements peuvent servir pour automatiser le désherbage et la lutte contre les ravageurs, la plantation et l'ensemencement, la cueillette en champ et arboricole, la surveillance des cultures et de l'environnement ou encore l'entretien de cultures en serres ou dans des entrepôts de croissance [Brown, 2018]. Couplés à l'intelligence artificielle, ces systèmes permettent, sur le papier, de gagner en productivité et en précision (ex. réduction de pesticides, réduction du gaspillage). Aussi, le contexte d'utilisation amène à pouvoir fonctionner 24 h/24 et donc avoir trois quarts de travail plutôt qu'un. Pearson et al. [2022] est un exemple de référence récente qui fournit de nombreuses références scientifiques sur le sujet. Aussi, il est fait mention de plusieurs difficultés à surmonter quant à l'utilisation de la robotique dans les champs : (1) avoir un système capable de fonctionner dans un environnement non structuré, en évolution et exposé aux conditions climatiques, (2) fournir un niveau de qualité au moins équivalent aux méthodes traditionnelles, (3) être rentable et (4) être intrinsèquement sûr et fiable (sécurité des humains, préservation de l'environnement, de la récolte et des machines). Malgré de nombreux progrès ces dernières années, les coûts ou encore la maturité des technologies sont les principaux freins à l'adoption d'équipements robotisés sur une exploitation agricole [Bechar & Vigneault, 2016].

La robotisation de la cueillette de brocolis en champ et notamment les aspects de sécurisation sont l'objet de cet article. Cette robotisation sert à pallier la pénurie de main-d'œuvre dans le secteur, tout en réduisant la pénibilité associée à la cueillette manuelle de brocolis.

1.2 Robotisation de la cueillette

Selon Kootstra et al. [2021], la cueillette de cultures de grande valeur (récolte sélective), telles que les pommes, les tomates et les brocolis, est actuellement principalement effectuée par des humains. Cette tâche est l'une des plus exigeantes en main-d'œuvre et l'une des plus coûteuses. Cette situation explique le grand intérêt pour le développement de robots de cueillette. Wang et al. [2022] et Kootstra et al. [2021] offrent des revues de la littérature récente. Il est notamment question de développement en lien avec le traitement d'images et l'intelligence artificielle (IA) pour la détection du fruit ou du légume en environnement réel, de la coordination du bras vers la cible ou encore de l'efficacité et de l'adéquation de l'outil de préhension. Spécifiquement sur la cueillette de cruciféracées (brocoli et chou-fleur) en environnement ouvert, Koostra et al. [2021] recense trois projets récents. Kusumam et al. [2017] et Block et al. [2020] ont développé des algorithmes de vision 3D utilisant l'apprentissage automatique et l'apprentissage profond pour détecter les têtes de brocoli. Klein et al. [2019] ont présenté une étude de faisabilité pour le développement d'un robot de récolte sélective pour le chou-fleur. Leur prototype se composait de trois caméras *RGB-D* pour la détection des cultures et l'évaluation de la maturité, et de deux bras robotiques, un pour cueillir et un pour couper le chou-fleur.

La récolte sélective est une tâche difficile pour un robot, en raison des variations élevées dans l'environnement, du niveau de fiabilité des systèmes de vision, des coûts et de l'impératif de préserver l'intégrité des plants et des fruits ou légumes cueillis. L'enjeu de sécurité des humains qui collaborent est aussi brièvement mentionné [Wang et al., 2022].

1.3 Robotisation en champ et santé-sécurité au travail

Weaver et al. [2022] ont effectué une revue de la littérature sur l'utilisation de la robotisation du secteur agricole à partir de 2015. Sur les 465 articles retenus, 53% portaient sur les technologies dont le but était d'augmenter les récoltes comme les robots de cueillette, 12% concernaient l'augmentation de l'efficacité de la production notamment en lien avec les tracteurs autonomes et 25% portaient sur la qualité des récoltes avec la surveillance de maladie par drones. Seuls 10 % des articles portaient sur des technologies dont le but principal était de contribuer à réduire les risques pour la santé et la sécurité au travail (ex. exosquelettes pour les tâches répétitives). Ainsi, il appert que la recherche dans le domaine est pour le moment centrée sur la technologie dans un objectif d'améliorer la production agricole et la qualité des cultures plutôt que d'atteindre des objectifs de santé et de sécurité au travail (SST) en tant que tels [Jones et al., 2021]. Malgré le potentiel, il existe encore d'importantes lacunes dans les connaissances concernant les effets de ces technologies émergentes sur la SST des travailleurs agricoles. Des recherches spécifiques seront nécessaires pour mieux comprendre les mécanismes d'adoption de ces technologies incluant les paramètres liés à la SST [Weaver et al., 2022 ; Jones et al., 2021].

Lors de développements de nouvelles technologies robotiques en laboratoire, les concepteurs et les développeurs doivent anticiper les aspects de sécurité pour maximiser leur intégration dans le concept final et ainsi minimiser les risques pour les futurs utilisateurs [ISO, 2011 ; Behm, 2005]. Par exemple, Gopinath & Johansen [2016] ou encore Gualtieri et al. [2022] se sont intéressés à la gestion des risques lors de l'intégration d'applications de robotiques collaboratives. Lorsque ces technologies se rapprochent d'une introduction dans les milieux de travail, et notamment dans le champ, la question de la SST devient un facteur incontournable

notamment pour le respect des réglementations en vigueur. Lowenberg-DeBoer et al. [2020] donne un exemple (traduction libre) : « certains pays de l'Union européenne exigent qu'un superviseur humain soit physiquement présent dans le champ où un robot de culture travaille. [...] Si l'objectif est la sécurité humaine, de meilleurs capteurs pour détecter les humains sur le terrain ou des clôtures pour réduire les rencontres humain-robot seraient-ils une solution plus rentable ? ». Sur ce point, il convient de mentionner qu'il est rarement envisageable de robotiser l'ensemble des opérations et que la présence de travailleurs est souvent inévitable.

Il semble donc primordial de placer la SST au cœur des préoccupations lors du développement de nouveaux produits robotisés. Sur ce sujet, un certain nombre d'articles se sont concentrés sur les tracteurs autonomes et semi-autonomes. La question de la vigilance du conducteur dans la conduite des tracteurs semi-autonomes a été abordée par Bashiri & Mann [2014]. Il en ressort qu'intégrer le conducteur dans la boucle de tâche augmentera sa vigilance. La question de la détection d'obstacles à l'aide de capteurs tels que les Lidars et les caméras thermiques a également été étudiée. À cause de la présence des plants, une des difficultés est de repérer un obstacle et de différencier un humain dans l'environnement [Johnson et al., 2009 ; Van Evert & Nieuwenhuizen, 2012].

Tiusanen et al. [2020] offrent d'ailleurs une cartographie des normes en lien avec la sécurité pour les machines mobiles autonomes. On retiendra dans le secteur agricole la norme ISO 18497:2018 sur la sécurisation à la conception des tracteurs agricoles hautement automatisés et la norme ISO 17757:2019 sur les engins de terrassement autonomes et semi-autonomes [ISO, 2018 ; 2019]. Le principal risque couvert est celui lié à la détection d'obstacle et de personnes. Sur le sujet de la détection d'objets et de personnes, les normes ISO 16001:2017 et ISO 21810-1:2022 traitent des dispositifs de détection et la manière d'utiliser l'information de détection (ex. avertissement ou évitement) [ISO, 2017 ; 2022].

Sur la question de la robotique industrielle, la norme internationale de référence est la norme ISO 10218-1 [ISO, 2011]. Cette norme s'applique dans un cadre industriel pour sécuriser une application robotique. L'esprit de cette norme peut toutefois être étendu dans un contexte agricole. Si la robotique est collaborative, la spécification technique ISO/TS 15066:2016 est le document de référence [ISO, 2016].

Le cas d'étude proposé dans cet article est un tracteur, avec conducteur, équipé de bras robotiques industriels pour la robotisation de la cueillette de brocolis. Comme il ne s'agit pas d'un tracteur autonome ni semi-autonome, les normes en robotique industrielle sont les plus à même de s'appliquer pour la sécurisation de la cellule robotique. Cet article présente et discute des résultats de l'appréciation des risques.

2 CAS D'ETUDE PROPOSE

2.1 Description du prototype étudié

La cueillette manuelle de brocolis se fait traditionnellement par des travailleurs munis d'un couteau marchant devant un tracteur. Les travailleurs lancent le brocoli cueilli derrière eux sur un convoyeur remorqué par le tracteur. Il s'agit, entre autres, d'une tâche qui présente des risques de troubles musculo-squelettiques élevés.

Le prototype développé par Lapalme Gestion Conception Mécanique (LGCM) et ses fournisseurs de services, dans sa version de mai 2022, consiste en un tracteur qui remorque une structure supportant quatre bras robotiques et une source d'alimentation (Figure 1). Ces robots ont une charge utile et

une portée suffisantes pour accomplir la tâche dans la zone de travail. Les robots sont fixés avec leur base vers le haut. Ce sont des robots multiaxes permettant de se déplacer dans l'aire de travail à une vitesse suffisante pour cueillir les brocolis. Chacun des bras est associé à un système de vision. Ce système est capable de repérer les têtes de brocolis mures dans les plants (Figure 2). Le tracteur, dont la vitesse d'avance est ajustée par le conducteur, tire également deux convoyeurs (alimentation hydraulique) et une remorque. Ainsi, les brocolis sont acheminés jusqu'à la remorque en arrière où des travailleurs les emballent. Ce prototype a été appelé « Système Agricole Multifonction Intelligent (SAMI) » et est en instance de brevet. Les éléments présentés sont à l'étape expérimentale. Le tracteur avance à une vitesse similaire à celle d'un cueilleur afin de donner le temps aux robots de détecter et de cueillir les brocolis. Une fois le brocoli repéré avec la caméra, les mouvements du robot sont calculés en trois dimensions. Le robot attrape ensuite le brocoli à l'aide de son préhenseur pneumatique conçu pour attraper le brocoli sans l'abîmer. Le pied du brocoli est coupé à l'aide d'une lame solidaire de la structure du préhenseur (ne peut être illustrer pour des raisons de confidentialité). La lame n'est pas protégée dans la version actuelle. Le robot dépose ensuite le brocoli sur le convoyeur. Les travailleurs dans la remorque en arrière pour emballer les brocolis pourraient, entre autres, avoir à intervenir lors d'un blocage des convoyeurs. Ils doivent être en mesure de communiquer avec le conducteur en cas de problème. En opération normale, il n'y a pas de travailleur à pied dans le champ à proximité du tracteur en fonctionnement. Le dégagement hors de la zone de récolte se fait vers l'arrière, sauf pour le pilote qui entre et sort de la cabine lorsque le procédé et le tracteur sont immobilisés. Toutefois, dans un exercice d'appréciation et de réduction des risques, il faut considérer la présence occasionnelle/inopinée de travailleurs-piéton à proximité de la cellule robotique.

Les chercheurs en SST ont été contactés par les concepteurs/développeurs pour pousser les réflexions en matière de gestion des risques. Une des difficultés vécues par les concepteurs était d'appréhender l'utilisation des normes de sécurité applicables en robotique industrielle à un contexte comme celui du SAMI à savoir un équipement agricole mobile utilisé en champ dans un environnement ouvert avec des contraintes environnementales importantes. Également, certaines problématiques ont rapidement été identifiées, comme le fait de ne pas pouvoir protéger la cellule robotique jusqu'au sol à cause de la présence des plants, la présence prévue de travailleurs à proximité (ex. emballeurs) ou encore le danger que représente l'outil de coupe. Aussi, une partie de la sécurité repose sur la vigilance du conducteur du tracteur. L'utilisation de la robotique en agriculture étant en émergence, ce cas d'étude permet d'explorer et de développer des connaissances sur ces différents points.



Figure 1. Robots cueilleur et systèmes de vision fixés sur une structure remorquée par le tracteur



Figure 2. Détection de la tête du brocoli par le traitement d'images pour la reconnaissance de formes

2.2 Objectif

Le but visé par la collaboration entre les équipes de conception, de développement et les chercheurs en SST a été d'effectuer une appréciation des risques sur un prototype du SAMI pour la phase de vie correspondant au développement et à l'expérimentation et de proposer des moyens de réduction de risques qui tiennent compte des contraintes du secteur agricole. Lors de cette phase, les situations de proximité entre les équipes de développement et le SAMI sont possibles, voire nécessaires (ex. cueillette de données, calibrage, dépannage, débouillage). La version du prototype présentée à la section 2.1 (mai 2022) a été considérée pour l'appréciation des risques. Les risques liés à la cellule robotique ont été particulièrement ciblés, mais l'ensemble du système a été étudié.

Une appréciation des risques spécifique à l'utilisation du SAMI en condition de production sera nécessaire. Les présents résultats pour la phase de développement et d'expérimentation pourront servir de base de réflexion.

2.3 Méthodologie

Le SAMI étant une machine, ou plutôt un ensemble de machines, la section « Machines » du Règlement en santé et en sécurité du travail (RSST) [RLRQ c. S-2.1, r. 13] et la démarche classique en appréciation et en réduction du risque pour les machines issue de la norme ISO 12100 [ISO, 2010] ont été utilisés comme cadre de travail (Figure 3). Les normes en robotique et en automatisation citées à la section 1.3 ont également été consultées.

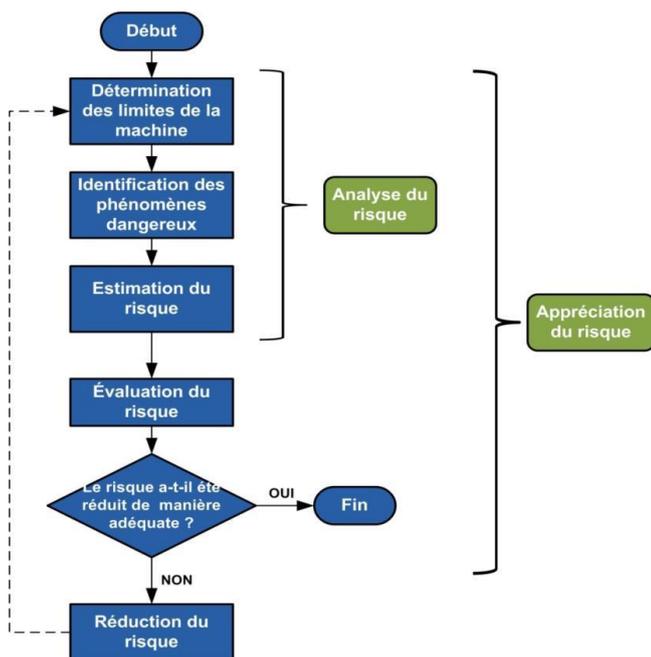


Figure 3. Résumé de la démarche d'appréciation et de réduction du risque issue de la norme ISO 12100 (ISO, 2010) (voir la norme pour la démarche complète)

L'analyse du risque consiste dans les grandes lignes à déterminer les limites de la machine étudiée, à identifier les phénomènes dangereux (ex. mécanique, électrique) et à estimer (quantifier) les risques associés à ces phénomènes dangereux. Le risque est généralement défini comme la « combinaison de la probabilité d'un dommage et de la gravité de ce dommage » [ISO, 2010]. L'outil d'estimation du risque qui a été utilisé dans cette étude est celui de la prochaine version de la norme ISO 10218-2 en robotique industrielle. Ce choix a été fait, d'abord, en raison de ses quatre niveaux de dommage qui le rendent moins biaisé que l'outil de l'ISO 13849-1 comprenant deux niveaux [Chinniah et al., 2011; Gauthier et al., 2018]. Aussi, il permet de lier le niveau de risque obtenu à un niveau de performance (niveau de fiabilité) requis pour le système de commande impliqué lors de la réduction de risques, le cas échéant. En effet, l'outil de la prochaine ISO 10218-2 possède cinq niveaux de risque comme le nombre de niveaux de performance dans la norme ISO 13849-1 [ISO, 2015a]. Les paramètres de l'outil pour l'estimation sont la gravité du dommage (4 niveaux : mineur, modéré, sérieux, catastrophique), l'exposition de la ou des personnes au phénomène dangereux (2 niveaux : faible, élevé), la possibilité d'éviter ou de limiter le dommage (3 niveaux : évitable, raisonnablement évitable, inévitable) et la probabilité d'occurrence de l'événement dangereux (3 niveaux : faible, moyen, élevé). Pour des raisons de confidentialité, il n'est pas possible d'illustrer la matrice de risque dans cet article.

L'estimation du risque se fait dans un premier temps sans prendre en compte les mesures de réduction de risques (MRR) en place. Une fois les risques initiaux estimés, il faut déterminer si les risques sont acceptables (évaluation du risque) et les réduire si nécessaire. L'analyse du risque suivie de l'évaluation du risque constitue ce qu'on appelle l'appréciation du risque. Une boucle de rétroaction est ensuite effectuée avec les MRR choisies pour vérifier que les risques ont été réduits de manière acceptable.

Comme suggéré dans les normes, l'appréciation des risques a été réalisée conjointement avec les parties prenantes, à savoir le concepteur et les développeurs dans ce cas-ci. Au final, une douzaine de rencontres de travail ont eu lieu sur une période de cinq mois afin de préciser le fonctionnement du SAMI, les mesures déjà mises en place ainsi que pour discuter des résultats de l'analyse du risque et des MRR à envisager.

Dans un premier temps, la liste des risques a été définie. La description d'un risque comprend le phénomène dangereux (ex. robot en mouvement), une situation dangereuse (ex. partie du corps dans la trajectoire du robot), un événement dangereux (ex. robot bouge de manière inopinée à cause d'une défaillance technique) et un dommage (ex. contusion). Il y a eu ensuite trois itérations pour l'estimation du risque : sans mesure de réduction de risques (itération No. 1), avec les MRR déjà en place ou en cours d'intégration en mai 2022 (itération No. 2) puis avec les MRR proposées pour les risques jugés toujours inacceptables (itération No. 3). De manière préliminaire, un risque de niveau 1 ou 2 (sur l'échelle de cinq niveaux) était jugé acceptable. Entre les itérations No. 2 et 3, les MRR supplémentaires proposées ont fait l'objet de discussion afin de retenir des mesures réalistes que ce soit en termes de coûts, de durabilité et d'utilisabilité.

3 RESULTATS ET DISCUSSION

3.1 Analyse initiale du risque

Le Tableau 1 résume les principaux risques répertoriés par l'équipe pour la phase « Tests, recherche et développement »

du cycle de vie de du SAMI (version mai 2022). Le niveau de risque maximal pour les risques associés à chaque phénomène dangereux, sans tenir compte des mesures de réduction de risques, a été indiqué (itération No. 1).

Les interventions de maintenance nécessitant une procédure de cadenassage n'ont pas été traitées ici tout comme les risques liés à l'application de pesticides, la chute de plain-pied lors de déplacement en champ et autres risques spécifiques à la conception du tracteur (ex. bruit, vibration).

Les risques ont été répartis en quatre grands groupes, ceux liés (1) au tracteur, (2) aux robots, (3) aux convoyeurs et (4) à l'alimentation en électricité. Sans MRR, les risques étaient pour la plupart inacceptables puisque la gravité du dommage et la probabilité d'occurrence étaient élevées.

Les convoyeurs, la prise de force du tracteur (PTO) et la source d'alimentation génèrent des risques communs en sécurité des machines. Il convient entre autres de protéger les zones dangereuses dont l'accès n'est pas ou rarement requis par des protecteurs et de mettre en place des moyens complémentaires (ex. arrêt d'urgence, équipement de protection individuelle (EPI), consignes de sécurité) en se basant sur les normes de référence [ISO, 2010].

Pour les convoyeurs, une conception qui réduit les possibilités de bourrage et qui fonctionne avec une vitesse et une puissance minimale pour le bon fonctionnement sont à privilégier.

Pour le risque électrique, les mesures inspirées de la norme ISO 16230-1: 2015 ont été appliquées [ISO, 2015b]. Dans tous les cas, aucune intervention sur les équipements ne doit se faire sans procédure de contrôle des énergies selon les articles 188.1 à 189.1 du RSST [RLRQ c. S-2.1, r. 13]. Une source d'alimentation moins bruyante sera également installée dans la prochaine version du SAMI et une protection auditive sera imposée si les normes ne sont pas respectées.

Pour les risques de chute de hauteur depuis la remorque ou lors des montées-descentes, des garde-corps et des mains-courantes, non considérées à l'itération No. 1, ont été installés conformément aux obligations du RSST.

Concernant les robots, les risques associés aux contacts dynamiques (partie du corps non contrainte lors du contact) et quasi statiques (partie du corps entre le robot en mouvement et une structure) ont été séparés puisque le niveau de gravité n'est pas le même. Les contacts quasi statiques sont considérés comme plus risqués. Les événements dangereux ont également été détaillés avec notamment un fonctionnement normal (la personne entre dans la trajectoire du robot) et un démarrage inopiné que ce soit pour des raisons techniques ou humaines. Le démarrage inopiné est considéré comme plus problématique à cause notamment du fait que la personne risque d'être plus proche du robot en plus d'être surprise.

Tableau 1. Principaux risques identifiés et estimation des risques sans mesure de réduction de risques

Phénomène dangereux et dommages associés	Situations dangereuses	Événements dangereux	Niveau de risque sans MRR
Tracteur : Personnel circulant autour du tracteur (pour une inspection visuelle, un diagnostic, une discussion avec le conducteur, etc.), personnel proche de la prise de force, personnel montant ou descendant de l'équipement			
Vitesse d'avance normale (similaire à un cueilleur humain) ou manœuvre : écrasement, contusion	Personne positionnée sur la trajectoire du tracteur, de la structure supportant les robots ou des remorques	Déplacement ou départ inopiné générant un contact	5 (démarrage inopiné avec une personne devant la remorque)
Prise de force (PTO) en rotation : entraînement, amputation	Personne à proximité de la prise de force	Partie du corps ou vêtement dans la zone d'entraînement ou démarrage inopiné	5
Gravité (chute de hauteur) : entorse, fracture	Montée/Descente de la cabine ou d'une remorque, déplacement sur la remorque	Perte d'équilibre	5 (chute depuis la remorque)
Robots : Intervention dans ou proche de la cellule de robots			
Robot en mouvement (bras ou base, max. théorique 4 m/s) : contusion, fracture	Partie du corps dans la trajectoire du robot	Robot normalement en mouvement ou démarrage inopiné (défaillance technique ou d'une tierce personne) générant un contact dynamique	4 (démarrage inopiné)
	Partie du corps entre deux sections du robot ou entre le robot et une surface fixe	Robot normalement en mouvement ou démarrage inopiné (défaillance technique ou d'une tierce personne) générant un contact quasi statique	5 (démarrage inopiné)
Lame de coupe : coupure profonde, lacération	Partie du corps sur la trajectoire de l'outil de coupe	Robot en mouvement ou mouvement de coupe de la lame : fonctionnement normal ou démarrage inopiné générant un contact ; projection de la lame : rupture décrochage.	5 (mouvement de coupe, démarrage inopiné)
Mouvement du préhenseur : pincement, écrasement	Partie du corps dans la zone de saisie du préhenseur	Mouvement normal ou démarrage inopiné (défaillance technique ou tierce personne) générant un contact quasi statique	3
Chute du bras : contusion, écrasement	Partie du corps dans la trajectoire de la chute	Rupture de la fixation du robot ou de l'outil	4
Énergie pneumatique : complications diverses, contusion	Personne à proximité des raccords pneumatiques	Bris de raccord (fuite, mouvement de fouet)	4
Convoyeur : Intervention du type inspection, nettoyage, débouillage (dû à des brocolis ou feuilles accumulés), diagnostic ou autre. Intervention depuis le sol, depuis le chariot ou en s'agrippant sur la structure du SAMI			
Convoyeurs en mouvement : entraînement, coincement, amputation	Personne à proximité d'une partie en mouvement ou d'une zone d'entraînement	Partie du corps ou vêtement dans une zone d'entraînement ou démarrage inopiné	5 (démarrage inopiné, proximité avec le tambour)
Énergie thermique : brûlure	Personne à proximité du moteur	Contact par inadvertance avec le moteur chaud	4
Chute d'un convoyeur : contusion, écrasement	Personne avec une partie du corps placée en dessous du convoyeur	Problème de fixation, soubresaut à cause du terrain inégal	3
Énergie hydraulique : complications diverses, contusion	Personne à proximité des raccords hydrauliques	Bris d'un raccord hydraulique	4
Source de tension : Intervention sur la source d'alimentation, dans l'armoire électrique, sur le câblage et les connexions			
Courant de fuite : électrisation	Structure chargée électriquement à cause d'un courant de fuite	Partie du corps fait le pont entre différents potentiels	4
Bruit de la source d'alimentation : perte d'audition	Personne à proximité de la source d'alimentation	Exposition excédant les exigences réglementaires	5

Finalement, un contact avec la lame de coupe a été traité à part d'un contact avec le bras puisque la gravité sera plus élevée. Pour rappel, l'itération No. 1 (Tableau 1) ne prend en compte aucune MRR. La section suivante détaille spécifiquement les choix pour réduire les risques en lien avec les quatre robots.

3.2 Mesures de réduction de risques pour les robots

Le Tableau 2 résume les MRR correspondant aux risques détaillés au Tableau 1 pour les robots et le déplacement du tracteur. Pour les risques considérés encore non acceptables après l'itération No. 2 ($\geq 3/5$), des MRR supplémentaires ont été choisies à l'itération No. 3 en prenant en compte la vision et les contraintes du concepteur. Durant l'exercice de réduction de risques pour les robots, il a souvent été impossible de réduire la gravité des dommages associés aux risques. Par exemple, il n'était pas possible de réduire la vitesse des robots. Conséquemment, l'équipe a cherché à réduire autant que possible la probabilité du dommage en proposant des MRR qui agissent sur les trois paramètres de cette probabilité : 1) l'exposition, 2) l'occurrence de l'événement dangereux et 3) la possibilité d'éviter ou de limiter le dommage (cf. section 2.3). La protection de la zone des robots a été un exercice difficile. En effet, l'utilisation de protecteurs (fixes ou mobiles avec interverrouillage) autour de la zone des robots n'était pas

souhaitée par le concepteur de par les contraintes de production et le fait de rechercher une conception la plus épurée possible. Le concepteur cherche notamment à éviter un poids trop important, une détérioration prévisible du matériel en champ, ainsi que des problématiques de nettoyage, d'inspection, de présence d'insectes/vermines/animaux, d'accumulation diverse et ultimement des problèmes sanitaires. De plus, il n'est pas possible de protéger la zone dangereuse jusqu'au sol à cause des plants qu'on ne veut pas abîmer. Également, les conditions de fonctionnement (ex. conditions climatiques, poussières, vibrations, soubresaut, environnement) ne permettent pas l'utilisation de dispositifs de sécurité utilisés dans un contexte d'usine (ex. rideau optique). La solution retenue pour le moment est l'installation de câbles d'arrêt d'urgence tout autour de la zone des robots pour délimiter le périmètre et permettre l'arrêt en cas de problème. La surveillance de la zone des robots et la prévention de la présence de personnes autour lors d'un redémarrage sont donc plutôt assurées par des procédures de travail, l'augmentation de la communication entre les différents acteurs et la vigilance du conducteur (ex. rotation des conducteurs, caméra de surveillance de la zone, alarme de démarrage, moyens de communication, contact visuel).

Tableau 2. MRR pour les risques en lien avec les mouvements des robots et l'avance du tracteur

Risque	MRR déjà en place ou en cours (Itération No. 2)	MRR à mettre en place ou amélioration (Itération No. 3)
Personnel circulant autour du tracteur et de la zone des robots (pour une inspection visuelle, un diagnostic, une discussion avec le conducteur, etc.)	<ul style="list-style-type: none"> - Vitesse d'avance lente du tracteur. - Contrôle de la zone « robots » basée sur la vigilance du conducteur + vigilance collective non-formalisée. - Approche de la zone des robots en restant en arrière du convoyeur (éloignement). - Câbles d'arrêt d'urgence (AU) en arrière du convoyeur. - Appel des personnes présentes avant de démarrer le tracteur. - Éclairage pour les opérations de nuit et lors des mauvais temps. 	<ul style="list-style-type: none"> - Rotation régulière du conducteur pour favoriser une vigilance soutenue sur une longue durée. Ajout d'une caméra pour faciliter l'observation de la cellule robotique. Détection de personnes dans la zone à considérer pour une version commercialisée (ex. tag RFID, caméra avec IA). - Procédure du type trois coups de klaxon avant de démarrer le tracteur. - Alarme sonore avant démarrage des robots. Tour lumineuse indiquant le mode de fonctionnement de la machine. - Communication efficace entre le conducteur et les autres acteurs (ex. rencontre pour planifier les opérations, communication radio). - Contact visuel avec le conducteur lorsqu'un travailleur circule autour du tracteur. Sinon, on doit arrêter le tracteur. - Câbles d'AU tout autour de la zone des robots pour délimiter le périmètre et permettre l'arrêt en cas de problème. - AU dans la cabine pour que le conducteur puisse arrêter le SAMI en cas de problème. - Alarmes sonores et visuelles en cabine suite à l'actionnement d'un des AU.
Intervention dans ou proche de la cellule de robots alors que les robots, leur préhenseur ou la lame bougent.	<ul style="list-style-type: none"> - En période de test, personne ne rentre dans la zone des robots sauf pour la calibration de la vision. Dans ce cas-ci, utilisation d'un mode de commande spécifique avec la manette de validation à trois positions. - Privilégier, dans la mesure du possible, des mouvements du robot plus bas que le cou conformément à l'ISO/TS 15066:2016. - Arrêt généré par le module de sécurité du robot si le robot sort de sa zone prédéfinie. - Préhenseur : Forces limitées par conception (doigts en silicone). - Lame: Limitation de l'utilisation et de la vitesse aux opérations nécessaires avec une orientation contrôlée. - Fonctions de sécurité non raccordées au réseau, ce qui limite les impacts des failles en cybersécurité. 	<ul style="list-style-type: none"> - Module de sécurité du robot programmé afin de protéger adéquatement l'ensemble de la zone des robots. - Arrêt sécuritaire automatique en cas de défaut ou de défaillance du robot. - Déplacements limités par des butées mécaniques ou virtuelles. - Lame : À surdimensionner en rupture pour éviter un éclatement (validation à faire en conditions réelles). Inspection visuelle quotidienne par une personne qualifiée. Port de gants anti-coupure lors de la manipulation de lame. - Programmation de sorte qu'un seul pendant d'apprentissage puisse être actif à la fois pour tous les robots. - Procédure envisagée pour entrer dans la zone des robots : <ul style="list-style-type: none"> o Lorsque possible, ne pas entrer dans la zone : mettre tout à l'arrêt et utiliser une perche (ex. débouillage). o Lorsque le mouvement des robots n'est pas requis, une procédure de cadenassage sera privilégiée incluant le tracteur, les robots, la protection des lames, etc. o Lorsque l'alimentation des robots est requise (ex. réglage) : <ul style="list-style-type: none"> ▪ Avant d'entrer dans la zone, le tracteur doit être arrêté, les robots doivent être placés en position d'entretien (sécuritaire). ▪ Un sélecteur sera verrouillé en position d'entrée dans la zone. Ce sélecteur, raccordé aux fonctions de sécurité, mettra les robots en mode de fonctionnement sécuritaire (ex. mode manuel) et les mouvements des lames seront empêchés comme en cas d'arrêt d'urgence. ▪ Une fois les lames et les robots immobiles, les couteaux seront recouverts d'un garde en restant à distance à l'aide d'un outil. - Port d'EPI pour les risques résiduels : bottes de sécurité, protection oculaire (projection, énergie pneumatique) et vêtements anti-coupure (ex. protège-tibias) lors de déplacements à proximité des robots en fonctionnement (projections de la lame).

L'utilisation d'un système de détection de travailleurs-piéton dans la zone (ex. marqueur RFID, caméra avec traitement d'images) pour aider le conducteur pourra être envisagée pour réduire les risques résiduels. Il s'agit d'une voie à explorer. Il est à noter que ce type de dispositifs n'est pas considéré comme un dispositif de sécurité, mais plutôt un dispositif d'avertissement [INRS, 2015; ISO, 2017]. En effet, le niveau de fiabilité n'est pas défini selon les exigences de la norme ISO 13849 [ISO, 2015a].

Concernant les mouvements du robot, plusieurs mesures à la conception ou à la programmation ont été envisagées comme la vérification des déplacements des bras dans un volume prédéfini et un arrêt commandé par le module de sécurité fourni par le fabricant des robots, la conception du préhenseur ou encore la limitation de la vitesse de la lame lorsque possible.

Pour l'accès à la zone des robots en phase de tests (ex. réglage de vision), une procédure incluant la protection des lames à distance, un contrôle par système de commande verrouillé des énergies non nécessaires et le fait qu'un seul pendant d'apprentissage puisse être actif à la fois pour tous les robots a été suggéré. Les travailleurs impliqués dans le développement sont des professionnels formés et conscients des risques liés à l'utilisation des robots ce qui augmente, en principe, la probabilité que les procédures établies soient respectées. Ce type de mesure s'inscrit dans les méthodes alternatives au cadenassage permises par le RSST [RLRQ c. S-2.1, r. 13].

Finalement, les risques liés aux lames de coupe (c.-à-d. rupture et projection, lacérations) ont été un sujet de discussion important et complémentaire aux risques générés par les mouvements des bras. Au final, il a été convenu que les lames soient surdimensionnées à l'égard de leurs propriétés de résistance à la rupture et inspectées quotidiennement par une personne formée. Une validation du dimensionnement devra être effectuée par des tests en conditions réelles. Également, l'actionnement des lames ne se faisant qu'à hauteur de tibia dans les plants, les projections possibles sont limitées. Afin de gérer les risques résiduels, des EPI comme une protection oculaire et des protège-tibias ont été inscrits.

4 CONCLUSION

Cet article présente les résultats d'une appréciation des risques pour un système robotisé agricole pour la cueillette de brocolis. Cet exercice a été effectué pour gérer les risques lors de la phase de développement et d'expérimentation. Les mesures de réduction de risques proposées ont tenu compte des contraintes propres à l'opération en champ. Par exemple, pour le contrôle de l'accès à la zone robotique, les conditions sévères (exposé aux conditions climatiques, chocs et vibrations) ne permettent pas l'utilisation de dispositifs de sécurité classiques (ex. rideau optique). Aussi, les contraintes de nettoyage et sanitaires ne sont pas compatibles avec l'installation de protecteurs puisqu'ils favorisent les accumulations et la présence de vermines. Enfin, la présence de plants ne permet pas de sécuriser la zone robotique jusqu'au sol. Les mesures de réduction de risques choisies reposent donc soit sur la prévention intrinsèque (ex. surdimensionnement des propriétés mécaniques de la lame pour en limiter la rupture puis la projection), soit sur des procédures de travail pour limiter l'exposition (ex. rester derrière le convoyeur) ou soit sur des moyens d'avertissement et d'arrêt d'urgence comme la délimitation de la zone avec des câbles d'arrêt d'urgence. Le conducteur du tracteur joue également un rôle de surveillance important. Le niveau de vigilance de ce dernier a donc fait l'objet de propositions

comme la rotation du conducteur après plusieurs heures de conduite ou encore l'installation d'une caméra de surveillance pour la zone des robots. L'utilisation de caméra avec traitement d'images pour la détection de piéton pourrait également être envisagée devant le développement de ce type de technologies.

Au final, la zone dangereuse autour des robots reste « ouverte », dans le sens où l'accès n'est pas contrôlé notamment par des dispositifs de sécurité. À ce stade-ci, la question de l'acceptabilité des risques a pris tout son sens. Le milieu agricole, représenté ici par le concepteur, a en règle générale une tolérance au risque élevée (ex. travail manuel, exploitation familiale). Une conception épurée est également recherchée que ce soit pour les coûts, la durabilité ou la maintenabilité. Cette vision s'est confrontée aux prescriptions normatives utilisées dans le secteur industriel, représentées ici par les chercheurs en SST. L'évaluation et la réduction des risques se sont donc inscrites dans une approche de consensus ou l'accent a été mis sur la réduction de la probabilité du dommage plutôt que la réduction de la gravité du dommage. Finalement, l'aspect itératif de l'appréciation des risques fait que l'exercice devra être répété jusqu'à la version définitive de l'équipement afin de disposer de MRR adaptées à l'évolution de l'équipement.

5 REFERENCES

- Bashiri, B., & Mann, D. (2014). Automation and the situation awareness of drivers in agricultural semi-autonomous vehicles. *Biosystems Engineering*, 124, 8-15. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2014.06.002>
- Bechar A., & Vigneault, C. (2016). Agricultural robots for field operations: concepts and components. *Biosys Eng.*, 1(149), 94-111. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2016.11.004>
- Behm, M. (2005). Linking construction fatalities to the design for construction safety concept. *Saf. Sci.*, 43(8), 589-611. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2005.04.002>
- Blok, P.M., van Evert, F.K., Tielen, A.P.M., van Henten, E.J., & Kootstra, G. (2020). The effect of data augmentation and network simplification on the image-based detection of broccoli heads with Mask R-CNN. *J Field Robot*, 38, 85-104. <https://doi.org/10.1002/rob.21975>
- Brown, M. (2018). *Smart Farming – Automated and connected agriculture*. <https://www.engineering.com/story/smart-farming-automated-and-connected-agriculture>
- Chinniah, Y., Gauthier, F., Lambert, S., & Moulet, F. (2011). *Experimental analysis of tools used for estimating risk associated with industrial machines* (Report R-684). IRSST.
- Danjou, C., Rivest, L., & Pellerin, R. (2017, 3-5 mai). *Douze positionnements stratégiques pour l'Industrie 4.0 : entre processus, produit et service, de la surveillance à l'autonomie* [Communication]. Congrès international de génie industriel, Compiègne, France.
- Gauthier, F., Chinniah, Y., Burlet-Vienney, D., Aucourt, B., & Larouche, S. (2018). Risk Assessment in Safety of Machinery: Impact of Construction Flaws in Risk Estimation Parameters. *Safety Science*, 109(11), 421-433. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2018.06.024>
- Gopinath, V., & Johansen, K. (2016). Risk Assessment Process for Collaborative Assembly – A Job Safety Analysis Approach. *Procedia CIRP*, 44, 199-203.
- Gualtieri, L., Fraboni, F., De Marchi, M., & Rauch, E. (2022). Development and evaluation of design guidelines for cognitive ergonomics in human-robot collaborative

- assembly systems. *Applied Ergonomics*, 104, 1-15.
- Institut national de recherche et de sécurité (INRS). (2015). *Prévenir les collisions engins-piétons - La place des dispositifs de détection et d'aide visuelle* (Rapport n°ED6083). INRS. <http://www.inrs.fr/media.html?refINRS=ED%206083>
- International federation of robotics. (2022). *Market presentation world robotics 2022 extended version*. IFR. https://ifr.org/downloads/press2018/2022_WR_extended_version.pdf
- International Organization for Standardization. (2010). *Sécurité des machines - Principes généraux de conception - Appréciation du risque et réduction du risque*. Norme ISO12100.
- International Organization for Standardization. (2011). *Robots et dispositifs robotiques — Exigences de sécurité pour les robots industriels — Partie 1: Robots*. Norme ISO 10218-1.
- International Organization for Standardization. (2015a). *Sécurité des machines — Parties des systèmes de commande relatives à la sécurité — Partie 1: Principes généraux de conception*. Norme ISO 13849-1.
- International Organization for Standardization. (2015b). *Tracteurs et matériels agricoles — Sécurité des composants et des systèmes électriques et électroniques haute tension — Partie 1: Exigences générales*. Norme ISO 16230-1.
- International Organization for Standardization. (2016). *Robots et dispositifs robotiques — Robots coopératifs*. Norme ISO/TS 15066.
- International Organization for Standardization. (2017). *Engins de terrassement -- Dispositifs de détection d'objets (ODS) et d'aide visuelle (VA) -- Exigences de performances et essais*. Norme ISO 16001.
- International Organization for Standardization. (2018). *Tracteurs et matériels agricoles -- Sécurité des machines hautement automatisées -- Principes de conception*. Norme ISO 18497.
- International Organization for Standardization. (2019). *Engins de terrassement et exploitation minière — Sécurité de système de machine autonome et semi-autonome*. Norme ISO 17757.
- International Organization for Standardization. (2022). *Earth-moving machinery -- Collision awareness and avoidance — Part 1: General requirements*. Norme ISO 21815-1.
- Javaid, M., Haleem, A., Ravi Pratap Singh, R.P., & Suman, R. (2022). Enhancing smart farming through the applications of Agriculture 4.0 technologies. *International Journal of Intelligent Networks*, 3, 150-164. <https://doi.org/10.1016/j.ijin.2022.09.004>
- Johnson, D.A., Naffin, D.J., Puhalla, J.S., Sanchez, J., & Wellington, C.K. (2009). Development and Implementation of a Team of Robotic Tractors for Autonomous Peat Moss Harvesting. *Journal of Field Robotics*, 26(6-7), 549-571 https://www.ri.cmu.edu/pub_files/2009/6/20297_ftp.pdf
- Jones, A., Jakob, M., & McNamara, J. (2021). *Impact of new technologies on occupational safety and health in agriculture and forestry*. European Agency for Safety and Health at Work.
- Klein, F.B., Wilmot, A., Tejada, V.F.D., Rodriguez, B.L., Requena, I., Busch, S., Rondepierre, A., Auzeeri, T., Sauerwald, T., Andrews, W.F.P., Rihan, H., Fuller, M.P., & Stoelen, M.F. (2019, 8-11 juillet). *Proof-of-concept modular robot platform for cauliflower harvesting* [communication]. 2th European Conference on Precision Agriculture, Montpellier, France.
- Kootstra, G., Wang, X., Blok, P.M., et al. (2021). Selective Harvesting Robotics: Current Research, Trends, and Future Directions. *Curr Robot Rep*, 2, 95-104. <https://doi.org/10.1007/s43154-020-00034-1>
- Kusumam, K., Krajník, T., Pearson, S., Duckett, T., & Cielniak, G. (2017). 3D-vision based detection, localization, and sizing of broccoli heads in the field. *J Field Robot*, 34(8), 1505-1518. <https://doi.org/10.1002/rob.21726>
- Lowenberg-DeBoer, J., Huang, I.Y., Grigoriadis, V. et al. (2020). Economics of robots and automation in field crop production. *Precision Agric*, 21, 278-299. <https://doi.org/10.1007/s11119-019-09667-5>
- Pearson, S., Camacho-Villa, T.C., Valluru, R., et al. (2022). Robotics and Autonomous Systems for Net Zero Agriculture. *Curr Robot Rep*, 3, 57-64. <https://doi.org/10.1007/s43154-022-00077-6>
- Règlement sur la santé et la sécurité du travail. RLRQ, c. S-2.1, r.13.
- Research And Markets. (2022). *Agriculture Autonomous Robots Market - A Global and Regional Analysis: Focus Product and Application, Supply Chain Analysis, and Country Analysis - Analysis and Forecast, 2022-2027*. BIS Research.
- Tiusanen, R., Malm, T., & Ronkainen, A. (2020). An overview of current safety requirements for autonomous machines – review of standards. *Open Engineering*, 10, 665-673. <https://www.degruyter.com/document/doi/10.1515/eng-2020-0074/html>
- Van Evert, F., & Nieuwenhuizen, A. (2012, 28-31 août). Obstacle detection for autonomous vehicles in agriculture [communication]. 8th international conference on methods and techniques in behavioral research, Utrecht, Pays-Bas. <https://library.wur.nl/WebQuery/wurpubs/fulltext/264029>
- Wang, Z.H., Xun, Y., Wang, Y.K., & Yang, Q.H. (2022). Review of smart robots for fruit and vegetable picking in agriculture. *Int J Agric & Biol Eng*, 15(1), 33-54. <http://www.abepublishing.org/journals/index.php/ijabe/article/view/7232/pdf>
- Weaver, D., Salar Barim, M., Hayden, M., Elliott, K.C., Lincoln, J. et Flynn, M.A. (2022, 10-12 mai). *Literature Review: Does Improved Agriculture Technologies Mean Improved Safety?* [Communication]. National Occupational Injury Research Symposium (NOIRS).