



**HAL**  
open science

**REVUE DES METHODES D'EVALUATION DES  
CONTRAINTES ERGONOMIQUES DES  
OPERATIONS DE PRODUCTION ET DE LEUR  
INTEGRATION DANS UN SYSTEME DE  
PRODUCTION CYBER-PHYSIQUE**

Nicolas Murcia, Olivier Cardin, Abdelmoula Mohafid

► **To cite this version:**

Nicolas Murcia, Olivier Cardin, Abdelmoula Mohafid. REVUE DES METHODES D'EVALUATION DES CONTRAINTES ERGONOMIQUES DES OPERATIONS DE PRODUCTION ET DE LEUR INTEGRATION DANS UN SYSTEME DE PRODUCTION CYBER-PHYSIQUE. 13<sup>ème</sup> CONFERENCE INTERNATIONALE DE MODELISATION, OPTIMISATION ET SIMULATION (MOSIM2020), 12-14 Nov 2020, AGADIR, Maroc, Nov 2020, AGADIR (virtual), Maroc. hal-03192803

**HAL Id: hal-03192803**

**<https://hal.science/hal-03192803v1>**

Submitted on 8 Apr 2021

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# REVUE DES METHODES D'EVALUATION DES CONTRAINTES ERGONOMIQUES DES OPERATIONS DE PRODUCTION ET DE LEUR INTEGRATION DANS UN SYSTEME DE PRODUCTION CYBER- PHYSIQUE

**MURCIA Nicolas**

LS2N, UMR CNRS 6004, Université de Nantes, IUT de  
Nantes, 44 470 Carquefou, France  
AIRBUS, 60 Rue Anatole France, 44550 Montoir-de-Bre-  
tagne, France

Nicolas.murcia@ls2n.fr

**CARDIN Olivier**

LS2N, UMR CNRS 6004, Université de Nantes, IUT de  
Nantes, 44 470 Carquefou, France

Olivier.Cardin@ls2n.fr

**MOHAFID Abdelmoula**

LS2N, UMR CNRS 6004, Université de Nantes, IUT de  
Nantes, 44 470 Carquefou, France

Abdelmoula.Mohafid@ls2n.fr

**RESUME :** *Ces dernières années les facteurs humains sont devenus une variable de plus en plus décisive dans l'organisation des processus de production de l'industrie manufacturière. Le déploiement futur de systèmes cyber-physiques de production impose une meilleure prise en compte de ces objectifs, à la fois en termes prévisionnels qu'en temps-réel. Dans cet article, nous proposons une revue des différentes méthodes d'évaluation ergonomique et une évaluation des possibilités pour intégrer les variables ergonomiques dans les processus d'optimisation de l'affectation des opérations de production. Une large variété d'outils et de méthodes ont été développés afin de mesurer et d'évaluer les risques à la fois physiques mais aussi psycho-sociaux dans un environnement de travail. Nous effectuons alors une revue des principales méthodes décrites dans la littérature, catégorisées en trois principales sections : les méthodes d'observation, les méthodes d'auto-évaluation et celles basées sur les mesures. Cette grande diversité de méthodes d'évaluation est directement liée à la flexibilité requise par les experts de la santé pour analyser précisément les différentes situations sur le terrain. La plupart des méthodes d'ordonnancement des tâches prenant en compte l'ergonomie qui ont été examinées utilisent une méthode de mesure différente, ce qui rend difficile une comparaison de l'efficacité d'une possible optimisation.*

**MOTS-CLES :** *Industrie 4.0, Ergonomie, Facteurs humains, Système cyber-physique de production*

## 1 INTRODUCTION

Un des objectifs majeurs de l'Industrie 4.0 est d'introduire le facteur humain dans la gestion des processus de fabrication, la sécurité au travail est naturellement devenue une préoccupation importante pour l'industrie manufacturière dans le cadre de l'amélioration des performances. Au cours des vingt dernières années, le développement des méthodes de fabrication a augmenté le risque de maladies professionnelles pour les travailleurs, en partie en raison

de la transition des processus de fabrication vers le Lean management. Le Lean management contribue à une intensification du travail à cause d'une réduction des durées de cycle de production (Koukoulaki 2014). Les travailleurs des industries manufacturières effectuent généralement des tâches répétitives qui les exposent à une charge de travail physique intense pouvant induire des troubles liés au travail tels que des troubles musculo-squelettiques (Antwi-Afari et al. 2017). Les troubles musculo-squelettiques (TMS) sont des troubles qui affectent les tissus mous du corps humain (c'est-à-dire les muscles, nerfs, tendons, ligaments, etc.) et limitent les mouvements du corps

(Bernard and Putz-Anderson 1997). Les TMS ont un impact social énorme, car un tiers des travailleurs européens de tous les secteurs d'activité souffrent actuellement de TMS, ce qui représente environ 45 millions de personnes (Parot-Schinkel et al. 2012). En Europe, les risques de TMS sont amplifiés par le phénomène du "vieillessement de la main-d'œuvre" (Bevan 2015), la population de travailleurs âgés de 50 ans ou plus est 2 fois plus importante que celle des travailleurs âgés de 25 ans ou moins. Les TMS ont des effets néfastes sur la qualité de vie des travailleurs et constituent la principale cause d'absences pour maladie professionnelle et de journées de travail perdues (Roux 2005). Le coût de la perte de productivité due aux TMS est estimé à près de 2% du produit intérieur brut en Europe (Bevan 2015). Les principaux facteurs de risque des TMS sont les contraintes biomécaniques, mais il est largement admis que les maladies professionnelles au travail sont causées par un ensemble de contraintes multifactorielles (David 2005).

Le déploiement des systèmes cyber-physiques de production (CPPS) dans l'industrie du futur implique une prise en compte de nombreuses contraintes dans l'organisation de production, visant à améliorer simultanément la performance de l'outil de production à la fois en termes de productivité qu'en terme de soutenabilité. Dans ce contexte, il est nécessaire de mieux maîtriser la mesure et l'évaluation de la pénibilité des opérations de production et de leur impact sur les opérateurs.

La pénibilité d'une tâche est l'effort perçu pour la réaliser. Il s'agit de la donnée ergonomique principale utilisée pour évaluer les caractéristiques d'un travail. Pour évaluer cette pénibilité et le risque physique, il existe trois catégories de méthodes : les méthodes d'observation, les questionnaires d'auto-évaluation et les méthodes de mesure (David 2005). Le choix de la méthode d'évaluation ergonomique est basé sur l'objectif de l'évaluation, les caractéristiques du travail à évaluer et les ressources disponibles pour la collecte et l'analyse de l'évaluation. Pour réduire ces risques physiques et psychologiques, les responsables organisationnels œuvrent en collaboration avec les ergonomes, pour trouver des solutions à ces problématiques ergonomiques. Ce processus est schématisé dans la figure 1. Avant d'entreprendre toute action ergonomique, la première étape consiste à identifier le risque physique, comme une mauvaise posture, une charge lourde ou une importante répétitivité des tâches, qui pourraient, à terme, provoquer des TMS chez les travailleurs.

Cette identification peut se faire directement à partir des plaintes des travailleurs qui mettent en évidence une situation pénible pendant leur travail. Les risques physiques importants peuvent également être mis en évidence par une augmentation des maladies professionnelles ou un absentéisme important pour l'usine ou plus précisément au poste de travail. Ces identifications conduisent à une évaluation ergonomique réalisée avec l'aide d'un expert de la santé qui choisit une méthode de mesure afin d'identifier les risques physiques et d'évaluer leur niveau pour la situation identifiée. Une fois l'évaluation effectuée, l'objectif est de trouver une solution qui respecte un budget et qui réduit les risques pour les travailleurs. La solution proposée est souvent une amélioration du design du poste de travail ou l'ajout d'une solution technique, par exemple un exosquelette pour soulager le travailleur lorsqu'il porte une charge. L'évaluation ergonomique se termine par le retour d'information du travailleur et l'évaluation de la méthode utilisée pour améliorer la situation de travail.

Aujourd'hui, de nombreuses solutions techniques impliquant une modification du poste de travail sont soit déjà utilisées en pratique, soit, si elles ne le sont pas, trop coûteuses pour être réalisables dans l'industrie. Dans les deux cas, les risques sont toujours présents car aucune solution n'est efficace à 100% sur le long terme. Dans ce contexte, nous nous intéressons aux méthodes développées par les managers, en collaboration avec des spécialistes de la santé afin de réduire les risques de développer des maladies professionnelles pour les travailleurs de l'industrie.

Dans cet article, nous décrivons le processus global d'équilibrage des opérations de productions prenant en compte l'ergonomie dans la littérature. Nous comparons ensuite les différentes méthodes utilisées pour recueillir des données sur les différents risques ergonomiques. Ces méthodes sont classées en trois sous-catégories qui sont les méthodes d'observation, les méthodes d'auto-évaluation et les méthodes de mesure. Nous proposons par la suite une discussion sur ces méthodes et leur utilisation dans l'équilibrage des tâches basé sur l'ergonomie. Cette étude est le point de départ d'une réflexion sur l'intégration des données ergonomiques dans un système de production cyber-physique et cherche à apporter une vue d'ensemble plus récente des différentes méthodes de mesures ergonomiques, notamment les méthodes virtuelles.

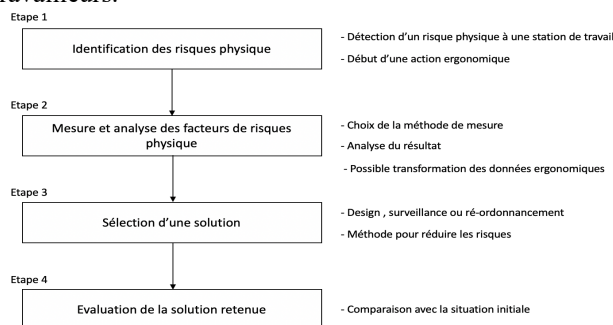


Figure 1 : Exemple de processus d'évaluation ergonomique

## 2 PROCESSUS D'EQUILIBRAGE DES TACHES BASE SUR L'ERGONOMIE DANS LA LITTERATURE

Des études et des enquêtes ont montré que les mouvements répétitifs au travail constituent l'un des principaux facteurs de risque de maladies professionnelles, au même titre que les postures contraignantes et la levée de poids lourds (van Tulder et al. 2007). Les premiers cas de rotation des postes de travail sont apparus en 1975 avec le développement du nouveau système de production de Toyota et la première utilisation de la gestion allégée des ressources humaines (Muramatsu et al. 1987). Cette idée de rotation des postes est venue des travailleurs qui voulaient plus de flexibilité pour la période de leur pause. Les ergonomes et les responsables organisationnels de l'industrie ont alors commencé à développer la rotation des postes de travail comme solution pour réduire la pression répétitive sur les travailleurs. Les données ergonomiques sont complexes à utiliser et il est nécessaire de les traiter afin de pouvoir les utiliser comme variable de décision dans les CPPS. La plupart des processus d'équilibrage des postes basés sur l'ergonomie dans la littérature et leur application ont un processus similaire.

Pour ce processus, nous avons identifié trois phases différentes (voir figure 2), la première s'articulant autour de l'identification et de la mesure des facteurs de risque ergonomiques. Le premier choix important est la sélection des facteurs de risque ergonomiques utilisés dans l'optimisation, par exemple il peut être axé autour des risques physiques tels que les risques posturaux, ou des risques psychosociaux comme le bien-être au travail. Dans les deux cas, ces risques ergonomiques sont mesurés avec l'aide d'un expert de la santé selon une méthode d'évaluation précise choisie au préalable. Une fois que les variables de risque ergonomique sont définies et associées à une valeur représentant le niveau de risque, le problème d'optimisation basé sur l'ergonomie se pose. Étant donné

que les mesures ergonomiques sont souvent des valeurs qualitatives, les données peuvent nécessiter une adaptation afin de s'inscrire dans un problème d'optimisation. Par exemple, une mesure par la méthode des couleurs peut être transformée en un score (Moussavi et al. 2019) ou un niveau d'exposition peut être transformé en une probabilité de risque de blessure (Sobhani et al. 2017). Les problèmes d'optimisation de l'effet sur le travail sont principalement simulés comme un problème d'équilibrage de ligne ou de rotation de poste (Padula et al. 2017; Grosse et al. 2017; Otto and Battaïa 2017). La répartition du risque physique entre les opérateurs de production est l'objectif le plus courant dans ces différentes formulations. Certaines études prennent également en compte l'aspect économique, en formulant une approche multi-objectifs entre les variables économiques et ergonomiques (Otto and Battaïa 2017). Lorsque le problème a été formulé, la phase restante consiste à trouver un moyen de le résoudre et à évaluer le résultat de l'optimisation, qui consiste le plus souvent à utiliser un solveur ou un algorithme reposant sur une méthode méta-heuristique. L'évaluation du résultat n'est pas triviale car les variables ergonomiques sont difficiles à quantifier, et les résultats attendus sont généralement sur le long terme, ce qui rend d'autant plus difficile cette évaluation. Une méthode d'évaluation envisageable est d'effectuer une comparaison avec la situation initiale et le lien avec le retour d'information des opérateurs de production peut donner une bonne évaluation de la méthode d'optimisation. Dans les prochains paragraphes nous examinerons plus en détail la phase 1, qui est l'évaluation des risques ergonomiques au travail, et nous passerons en revue les différentes méthodes d'évaluation ergonomique.

## 3 METHODES D'OBSERVATION

Les méthodes d'observation sont couramment choisies pour évaluer les risques physiques. Utilisées par les experts de la santé, elles consistent à examiner les processus de travail et à évaluer les facteurs de risque pour le travailleur selon une liste de contrôle ou une grille.

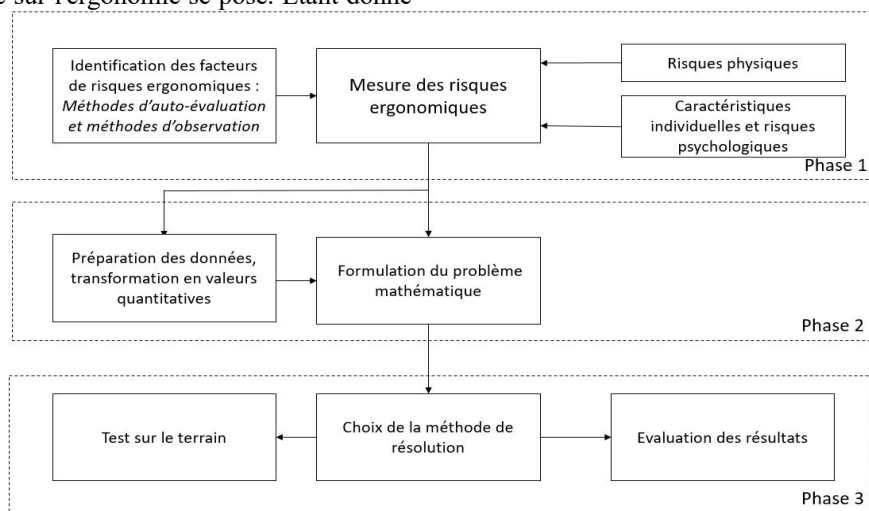


Figure 2 : Vue d'ensemble d'un processus de Job-Balancing avec prise en compte de l'ergonomie

Ces méthodes permettent de rapidement repérer les situations dangereuses à partir de l'évaluation de la durée d'exposition, de l'intensité de la tâche, de la répétitivité de l'exposition à un risque et les positions posturales inconfortables.

Dans l'industrie automobile, les méthodes d'observation sont largement utilisées pour évaluer les contraintes ergonomiques pour chaque poste de travail. Le résultat est représenté par un niveau de risque sur un critère donné, quantitativement avec un score ou qualitativement avec un code couleur, le rouge représentant un risque physique important, le jaune un risque modéré et le vert une situation sûre. Il existe plus de 30 méthodes d'observation (Takala et al. 2010) avec des différences sensibles sur la partie du corps étudiée et des seuils pour les différents facteurs d'expositions aux risques ergonomiques (Chiasson et al. 2012). Une comparaison des méthodes d'évaluation ergonomique par observation grandement répandues est effectuée dans le tableau 1. Ces évaluations de l'exposition aux risques physiques basées sur l'observation

mesurent principalement les risques liés aux postures et à l'intensité d'une tâche sur l'ensemble du corps ou sur certaines régions. Cependant, ces méthodes donnent souvent des résultats différents et ne sont pas directement comparables, principalement parce que cela dépend de l'observation et parce qu'il n'existe pas de normes définies pour les mesures ergonomiques (McAtamney and Nigel Corlett 1993; Chiasson et al. 2012; Yildirim et al. 2014). Il est en effet impossible qu'une méthode d'observation soit optimale pour tous les scénarii et les paramètres à mesurer influencent la sélection de la meilleure méthode (Chiasson et al. 2012). Des méthodes plus avancées, y compris l'analyse vidéo des tâches, ont été développées pour améliorer la précision de l'évaluation ergonomique. L'analyse vidéo permet aux ergonomes de vérifier plusieurs fois et d'évaluer une situation de travail donnée et permet également d'avoir une réflexion avec le travailleur sur la pénibilité de cette situation.

Méthode de mesure des risques	Description de la méthode	Critères utilisés	Exemple d'étude utilisant cette méthode
RULA : Rapid Upper Limb Assessment (McAtamney and Nigel Corlett 1993)	Enquête sur les troubles des membres supérieurs liés au travail et spécifiques aux tâches répétitives	Posture du cou, tronc et jambes ; Énergie dépensée ; Force et répétition	(Jaturanonda and Nanthavanij; Bautista et al. 2016)
REBA : Rapid entire body assessment (Hignett and McAtamney 2000)	Méthode d'évaluation des postures pénibles sur l'ensemble du corps (tronc, cou, jambes, bras et poignets)	Posture of the body, intensity, movement, repetition and coupling	(Yoon et al. 2016)
OWAS: Ovako working posture Analysis System (Karhu et al. 1977)	Analyse de la pénibilité d'une posture sur l'ensemble du corps	Posture du corps complet	(Hellig et al. 2018)
OCRA : Occupational Repetitive actions (Occhipinti 1998)	Méthode d'évaluation de l'impact de la charge de travail sur le haut du corps	Posture, du corps, charge portée et vibration	(Boenzi et al. 2016)
EWAS : European Assembly Worksheet	Outil de dépistage de l'impact de la charge de travail sur l'ensemble du corps	Posture, intensité de l'action, mouvement et manipulation de charges	(Otto and Scholl 2013)
Revised NIOSH lifting Equation (Garg et al. 2014)	Méthode d'observation pour analyser l'impact physique et psychologique du port de charge sur les opérateurs de production	Posture et port de charges	(Otto and Scholl 2011; Bautista et al. 2016)
QEC : Quick Exposure Check	Méthode d'observation mis en correspondance avec l'évaluation de l'opérateur de production, étude sur l'intégralité du corps	Posture et intensité de l'action effectuée	(Li and Buckle 1998)
SI : Strain Index	Analyse du risque pour les mains et les poignets	Position de la main, répétitivité durée et intensité de l'action	(Moore and Garg 1995)

Tableau 1 : Comparaison des méthodes d'évaluation des risques par observation les plus courantes dans la littérature

#### 4 METHODES D'AUTO-EVALUATION

Les méthodes d'auto-évaluation ont été développées pour recueillir des données directement auprès des travailleurs en leur posant des questions sur leur santé et la perception des risques physiques au travail. Ces méthodes sont principalement utilisées dans des études visant à évaluer les facteurs de risque au travail et leur impact sur la santé des sujets. Lors d'études sur l'évaluation des risques ergonomiques au travail, un questionnaire d'auto-évaluation peut être utilisé pour identifier les différents facteurs de risque et leur impact sur la santé des travailleurs. Ces risques ergonomiques comprennent des risques physiques tels qu'une mauvaise posture, un effort important, des mouvements répétitifs et des levées de poids importantes (Yildirim et al. 2014). Des informations personnelles telles que l'âge, le sexe ou la taille sont également demandées lors d'un questionnaire d'auto-évaluation afin de mettre en évidence les liens entre ces informations et les syndromes musculo-squelettiques (Widanarko et al. 2015). Le questionnaire d'auto-évaluation peut également évaluer les facteurs de risque organisationnels et psychosociaux (Bugajska et al. 2013; Abubakar and Wang 2019). Les avantages des méthodes d'auto-évaluation sont la possibilité d'effectuer une enquête sur une large population et de recueillir des données dans le temps. Dans la plupart des

articles utilisant des méthodes d'auto-évaluation au cours d'une enquête ergonomique dans une industrie manufacturière, les questionnaires sont utilisés comme point de départ afin d'identifier la prévalence des symptômes de TMS dans la population étudiée. Toutefois, la fiabilité de ces enquêtes peut être altérée par les sentiments et les activités hors du travail des répondants et par une éventuelle mauvaise interprétation des questions (Barrero et al. 2009). Quelques exemples d'études utilisant la méthode d'auto-évaluation sont détaillés dans le tableau 2. L'un des questionnaires les plus fréquemment utilisés est le Questionnaire nordique musculo-squelettique qui recueille des données sur la douleur ressentie par les travailleurs au cours des sept derniers jours et des douze derniers mois pour chaque partie du corps, et les met en relation avec leurs informations personnelles (Kuorinka et al. 1987). Le questionnaire Karasek est une autre méthode d'auto-évaluation qui vise à mesurer le stress au travail en recueillant des données sur l'aspect psychosocial du travail (Karasek et al. 1998).

Les questionnaires d'auto-évaluation sont également utilisés dans les études de cohortes médicales à grande échelle afin d'évaluer la prévalence des TMS dans la population générale et les facteurs de risque associés (CONSTANCES team et al. 2015).

Reference	Description de la méthode d'auto-évaluation	Population de l'étude	Risques de TMS mis en évidence
(Landau et al. 2008)	Évaluation de la population de travailleurs : âge, ancienneté, taille, IMC, satisfaction au travail et pression perçue.	Travailleurs dans l'industrie automobile (n=1700)	L'âge et la difficulté des tâches à effectuer
(Menzel et al. 2004)	Questionnaire mesurant la douleur/inconfort au travail au cours de la dernière semaine, son intensité et l'interférence avec la capacité à travailler.	Personnel infirmier (n=113)	Nombre de tâches à haut risque par heure, nombre de patients en surpoids et le statut d'infirmière.
(Widanarko et al. 2015)	Questionnaire sur les symptômes musculo-squelettiques pour chaque partie du corps selon l'âge et le sexe	Travailleurs sélectionnés au hasard en Nouvelle-Zélande (n = 3003)	Localisation du risque de TMS sur le corps en fonction des réponses aux questionnaires
(Márquez Gómez 2020)	Utilisation d'un questionnaire nordique standardisé afin de calculer la prévalence des troubles musculo-squelettiques	Travailleurs dans le découpage de viande (n = 174)	Risques à la fois physiques mais aussi psychologiques
(Acaröz Candan et al. 2019)	Utilisation du questionnaire musculo-squelettique nordique pour déterminer les symptômes des TMS pour chaque région du corps	Travailleuses dans une usine de décorticage de noisettes (n=162)	Ancienneté dans l'entreprise et mauvais résultats au questionnaire

Tableau 2 : Études utilisant les méthodes d'auto-évaluation

## 5 METHODES BASEES SUR LES MESURES

### 5.1 Méthodes de mesures directes

Les méthodes de mesure directe consistent à fixer des capteurs sur les segments du corps du sujet pour mesurer les variables d'exposition au travail (David 2005). Parmi les outils utilisés figurent l'électromyographie, les accéléromètres, les outils de mesure de force et la technologie de capture de mouvement, qui permet d'évaluer la contrainte d'exposition du sujet lors d'une opération technique. Alors que les deux autres méthodes de mesure des risques ergonomiques mesurent une approximation des risques physiques, les méthodes de mesure directe sont très précises et donnent des informations explicites sur l'exposition physique. Ces méthodes de mesures directes ont été, dans un premier temps, développées afin de mesurer les capacités des athlètes. Cependant, elles sont rarement appliquées dans l'industrie manufacturière car elles sont trop coûteuses à développer et il est presque impossible de recueillir des données auprès d'une large population.

Ces méthodes sont également peu utilisées en pratique car elles mesurent une énorme quantité de données difficiles à traiter sur une courte période et la période étudiée n'est généralement pas assez longue pour montrer une exposition importante à un risque physique. En fait, cette précision de haute qualité n'est souvent pas nécessaire pour choisir une solution technique permettant de réduire le risque physique sur un poste de travail. Un autre inconvénient de ces méthodes est la difficulté de recueillir des données sur une longue période et le risque que les travailleurs portant l'appareil de mesure ne puissent pas effectuer la tâche pendant l'expérience comme ils le feraient en pratique.

### 5.2 Méthodes de mesures virtuelles

Traditionnellement, l'évaluation de l'ergonomie dans l'industrie est un outil utilisé pour identifier les domaines d'amélioration dans une situation de travail déjà existante. Cependant, une nouvelle tendance se dessine, au lieu de développer une solution pour alléger un risque physique pour l'opérateur de production, l'objectif est de prendre en compte les contraintes ergonomiques lors de la conception du poste de travail. Grâce aux outils de simulation numérique et de réalité virtuelle, il devient possible de prévoir un éventuel risque physique pour l'opérateur de production directement pendant la phase de conception du poste de travail (Micheli and Marzorati 2018). Les industries sont intéressées par l'intégration des contraintes ergonomiques directement dans la phase de conception du poste de travail, car cela coûterait moins cher que de prendre des mesures correctives pour alléger les contraintes physiques d'un poste de travail à l'avenir (Hu et al. 2011) et permettrait une intégration directe des facteurs humains au centre des décisions. La capture de mouvement est un outil prometteur pour mesurer les contraintes ergonomiques. Des méthodes de capture de mouvement basées sur des capteurs pour évaluer les contraintes

ergonomiques ont commencé à être développées il y a 15 ans, mais cette méthode n'a pas encore fait son apparition dans l'industrie manufacturière car l'équipement est coûteux et considéré comme peu pratique pour les opérations de fabrication de processus (Oyekan et al. 2017). Plus récemment, des méthodes sans capteurs ont été mises au point et ont attiré l'attention des chercheurs. Un exemple d'outil utilisé est Microsoft Kinect, qui est dérivé du secteur des jeux (Bortolini et al. 2020).

Les technologies de capture de mouvement apportent une aide importante pour saisir et suivre les actions exactes effectuées au cours d'un processus de fabrication. Ces mesures peuvent être traitées afin de simuler virtuellement un jumeau numérique de l'opérateur de production dans un environnement de travail virtuel. Cette simulation peut déterminer les situations à risque selon des paramètres et des critères d'évaluation prédéterminés et peut être utilisée pour calculer l'impact d'une possible modification de l'environnement de travail. Dans l'industrie ces méthodes ne sont pas souvent exploitées, et le plus souvent à une échelle expérimentale. Cependant au fur et à mesure que cette technologie gagnera en maturité, nous pouvons nous attendre à un intérêt croissant de la part des entreprises de production dans les années à venir.

## 6 DISCUSSION

Les TMS se développent tout au long d'une vie, une preuve de la réduction des risques physiques et donc une réduction du risque de développer une maladie professionnelle grâce à un équilibrage des tâches est difficile à obtenir car elle nécessite une étude à long terme. Cependant, la perception des conditions de travail des opérateurs de production est un bon indicateur des avantages des méthodes de planification. Cela permet de montrer l'efficacité de ces méthodes d'optimisation à court et moyen terme. Dans la littérature, il existe plus d'une centaine de méthodes différentes identifiées pour mesurer les risques ergonomiques (Takala et al. 2010), en pratique ce nombre tend à augmenter car les experts de la santé peuvent adapter ces méthodes à leur situation exacte. Cependant, ces méthodes produisent souvent des résultats différents pour une même situation (Chiasson et al. 2012). Ces différences s'expliquent notamment par des écarts entre les seuils de pénibilité définis par les différentes méthodes d'évaluation ergonomiques. Certaines méthodes visent à mesurer l'importance des risques physiques, tandis que d'autres mesurent une valeur d'inconfort ou même la douleur liée au travail sur une période donnée. De plus, un autre aspect qui rend plus difficile cette étude est la marche de manœuvre que possèdent les travailleurs afin de réaliser leurs tâches. En effet le temps pour réaliser la tâche, l'espace disponible pour la réaliser ainsi que la charge mentale sont des facteurs qui influent directement sur la pénibilité de la tâche (Lanfranchi and Duveau

2008). Cette importante disparité dans les méthodes de mesure ergonomique se retrouve dans les données utilisées pour les différentes méthodes d'équilibrage du travail basées sur l'ergonomie utilisées dans la littérature (Otto and Battaia 2017). Cette disparité rend également impossible une comparaison directe des différentes solutions énumérées. Cependant, l'avantage de disposer d'un large éventail de méthodes d'évaluation des risques ergonomiques est de permettre aux experts de la santé de choisir la méthode mieux adaptée à leurs besoins et aux contraintes de l'environnement dans lequel la mesure est effectuée. Cela donne la possibilité d'obtenir des données plus précises pour une éventuelle optimisation en tenant compte des données ergonomiques. Par ailleurs, l'état de santé d'un travailleur ainsi que le risque qu'il développe une TMS dépend d'un très grand nombre de facteurs qui sont souvent impossible à connaître quotidiennement. La fatigue, les facteurs psychosociaux sont des exemples de paramètres qui dépendent de la vie professionnelle mais également de la vie personnelle et il n'est donc pas possible de les connaître en temps réel sans demander directement au travailleur concerné et donc effectuer un questionnaire. Paradoxalement, dans le cadre de la 4e révolution industrielle, les méthodes d'évaluation de l'ergonomie les plus utilisées actuellement semblent être les questionnaires d'auto-évaluation et les méthodes d'observation, qui sont des méthodes plus traditionnelles que les méthodes de mesures virtuelles par exemple. Ce décalage avec le développement technologique s'explique par le coût élevé et le temps consacré aux outils de mesure les plus récents. Cette tendance peut également s'expliquer par le fait que les données ergonomiques sont difficiles à traiter et à utiliser dans les modèles mathématiques, et qu'elles augmentent considérablement la complexité de l'algorithme d'optimisation basé sur l'ergonomie. En résumé, l'industrie 4.0 a pour objectif de prendre en compte les critères ergonomiques dans la gestion d'usine en temps réel, mais l'ensemble du processus n'est pas encore prêt. Les gestionnaires aimeraient disposer d'un outil intégré permettant de résoudre le problème d'optimisation en prenant en compte l'ergonomie de manière automatisée, mais, les mesures ne sont pas normalisées, la technologie n'est pas prête et les modèles sont trop complexes pour une intégration au cœur d'un système de production cyber-physique. Cette complexité s'explique par le nombre important d'aléas qui peuvent survenir en pratique (tâches non-finies dans les délais, pièces non livrées, défauts de fabrication, absence d'un travailleur...). La prise de décision par l'humain reste indispensable pour résoudre ces problématiques en temps réel sans interrompre la production. Par conséquent, la conclusion est que, pendant cette phase transitoire, il convient de se concentrer sur les outils d'aide à la décision visant à faciliter l'attribution des tâches aux opérateurs avec une évaluation de leurs contraintes passées.

## 7 CONCLUSION

Ce document propose une vue d'ensemble des différents outils utilisés pour effectuer des évaluations ergonomiques dans l'industrie manufacturière. Au fil des ans, de nombreux outils ont été mis au point, issus d'un large éventail de méthodes d'évaluation ergonomique. Sur le terrain, une évaluation ergonomique est souvent coûteuse car elle nécessite du temps et l'expertise d'ergonomes. Il est donc primordial d'avoir une bonne connaissance de l'environnement pour déterminer le cadre de l'étude et les risques potentiels. Ce large éventail d'outils explique la diversité des méthodes de mesure des données ergonomiques dans l'équilibrage des tâches basé sur l'ergonomie. Cependant, la complexité des algorithmes d'équilibrage de ligne prenant en compte ces contraintes empêche généralement les responsables d'intégrer ces calculs directement dans les systèmes de production de leurs ateliers. Par conséquent, des outils d'aide à la décision pourraient être développés afin de faire face à cette impasse technologique actuelle.

## REFERENCES

- Abubakar MI, Wang Q (2019) Key human factors and their effects on human centered assembly performance. *International Journal of Industrial Ergonomics* 69:48–57. <https://doi.org/10.1016/j.ergon.2018.09.009>
- Acaröz Candan S, Sahin UK, Akoğlu S (2019) The investigation of work-related musculoskeletal disorders among female workers in a hazelnut factory: Prevalence, working posture, work-related and psychosocial factors. *International Journal of Industrial Ergonomics* 74:102838. <https://doi.org/10.1016/j.ergon.2019.102838>
- Antwi-Afari MF, Li H, Edwards DJ, et al (2017) Biomechanical analysis of risk factors for work-related musculoskeletal disorders during repetitive lifting task in construction workers. *Automation in Construction* 83:41–47. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2017.07.007>
- Barrero LH, Katz JN, Dennerlein JT (2009) Validity of self-reported mechanical demands for occupational epidemiologic research of musculoskeletal disorders. *Scand J Work Environ Health* 35:245–260. <https://doi.org/10.5271/sjweh.1335>
- Bautista J, Alfaro-Pozo R, Batalla-García C (2016) Maximizing comfort in Assembly Lines with temporal, spatial and ergonomic attributes. *International Journal of Computational Intelligence Systems* 9:788–799. <https://doi.org/10.1080/18756891.2016.1204125>
- Bevan S (2015) Economic impact of musculoskeletal disorders (MSDs) on work in Europe. *Best Practice & Research Clinical Rheumatology* 29:356–373. <https://doi.org/10.1016/j.berh.2015.08.002>
- Boenzi F, Digiesi S, Facchini F, Mummolo G (2016) Ergonomic improvement through job rotations in repetitive manual tasks in case of limited specialization and differentiated ergonomic requirements. *IFAC-PapersOnLine* 49:1667–1672. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.07.820>
- Bortolini M, Faccio M, Gamberi M, Pilati F (2020)



- Motion Analysis System (MAS) for production and ergonomics assessment in the manufacturing processes. *Computers & Industrial Engineering* 139:105485. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2018.10.046>
- Bugajska J, Zolnierczyk-Zreda D, Jędryka-Góral A, et al (2013) Psychological factors at work and musculoskeletal disorders: a one year prospective study. *Rheumatol Int* 33:2975–2983. <https://doi.org/10.1007/s00296-013-2843-8>
- Chiasson M-È, Imbeau D, Aubry K, Delisle A (2012) Comparing the results of eight methods used to evaluate risk factors associated with musculoskeletal disorders. *International Journal of Industrial Ergonomics* 42:478–488. <https://doi.org/10.1016/j.ergon.2012.07.003>
- CONSTANCES team, Zins M, Goldberg M (2015) The French CONSTANCES population-based cohort: design, inclusion and follow-up. *Eur J Epidemiol* 30:1317–1328. <https://doi.org/10.1007/s10654-015-0096-4>
- David GC (2005) Ergonomic methods for assessing exposure to risk factors for work-related musculoskeletal disorders. *Occupational Medicine* 55:190–199. <https://doi.org/10.1093/occmed/kqi082>
- Garg A, Boda S, Hegmann KT, et al (2014) The NIOSH Lifting Equation and Low-Back Pain, Part 1. *Human Factors* 23
- Grosse EH, Calzavara M, Glock CH, Sgarbossa F (2017) Incorporating human factors into decision support models for production and logistics: current state of research. *IFAC-PapersOnLine* 50:6900–6905. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2017.08.1214>
- Hellig T, Mertens A, Brandl C (2018) The interaction effect of working postures on muscle activity and subjective discomfort during static working postures and its correlation with OWAS. *International Journal of Industrial Ergonomics* 68:25–33. <https://doi.org/10.1016/j.ergon.2018.06.006>
- Hignett S, McAtamney L (2000) Rapid Entire Body Assessment (REBA). *Applied Ergonomics* 31:201–205. [https://doi.org/10.1016/S0003-6870\(99\)00039-3](https://doi.org/10.1016/S0003-6870(99)00039-3)
- Hu B, Ma L, Zhang W, et al (2011) Predicting real-world ergonomic measurements by simulation in a virtual environment. *International Journal of Industrial Ergonomics* 41:64–71. <https://doi.org/10.1016/j.ergon.2010.10.001>
- Jaturanonda C, Nanthavanij S Heuristic Procedure for Two-Criterion Assembly Line Balancing Problem. 13
- Karasek R, Brisson C, Kawakami N, et al (1998) The Job Content Questionnaire (JCQ): An instrument for internationally comparative assessments of psychosocial job characteristics. *Journal of Occupational Health Psychology* 3:322–355. <https://doi.org/10.1037/1076-8998.3.4.322>
- Karhu O, Kansu P, Kuorinka I (1977) Correcting working postures in industry: A practical method for analysis. *Applied Ergonomics* 8:199–201. [https://doi.org/10.1016/0003-6870\(77\)90164-8](https://doi.org/10.1016/0003-6870(77)90164-8)
- Koukoulaki T (2014) The impact of lean production on musculoskeletal and psychosocial risks: An examination of sociotechnical trends over 20 years. *Applied Ergonomics* 45:198–212. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2013.07.018>
- Kuorinka I, Jonsson B, Kilbom A, et al (1987) Standardised Nordic questionnaires for the analysis of musculoskeletal symptoms. *Applied Ergonomics* 18:233–237. [https://doi.org/10.1016/0003-6870\(87\)90010-X](https://doi.org/10.1016/0003-6870(87)90010-X)
- Landau K, Rademacher H, Meschke H, et al (2008) Musculoskeletal disorders in assembly jobs in the automotive industry with special reference to age management aspects. *International Journal of Industrial Ergonomics* 38:561–576. <https://doi.org/10.1016/j.ergon.2008.01.006>
- Lanfranchi J-B, Duveau A (2008) Explicative models of musculoskeletal disorders (MSD): From biomechanical and psychosocial factors to clinical analysis of ergonomics. *European Review of Applied Psychology* 58:201–213. <https://doi.org/10.1016/j.erap.2008.09.004>
- Li G, Buckle P (1998) A Practical Method for the Assessment of Work-Related Musculoskeletal Risks - Quick Exposure Check (QEC). *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting* 42:1351–1355. <https://doi.org/10.1177/154193129804201905>
- Márquez Gómez M (2020) Prediction of work-related musculoskeletal discomfort in the meat processing industry using statistical models. *International Journal of Industrial Ergonomics* 75:102876. <https://doi.org/10.1016/j.ergon.2019.102876>
- McAtamney L, Nigel Corlett E (1993) RULA: a survey method for the investigation of work-related upper limb disorders. *Applied Ergonomics* 24:91–99. [https://doi.org/10.1016/0003-6870\(93\)90080-S](https://doi.org/10.1016/0003-6870(93)90080-S)
- Menzel NN, Brooks SM, Bernard TE, Nelson A (2004) The physical workload of nursing personnel: association with musculoskeletal discomfort. *International Journal of Nursing Studies* 41:859–867. <https://doi.org/10.1016/j.ijnurstu.2004.03.012>
- Micheli GJL, Marzorati LM (2018) Beyond OCRA: Predictive UL-WMSD risk assessment for safe assembly design. *International Journal of Industrial Ergonomics* 65:74–83. <https://doi.org/10.1016/j.ergon.2017.07.005>
- Moore JS, Garg A (1995) The strain index: a proposed method to analyze jobs for risk of distal upper extremity disorders. *American Industrial Hygiene Association Journal*
- Moussavi SE, Zare M, Mahdjoub M, Grunder O (2019) Balancing high operator's workload through a new job rotation approach: Application to an automotive assembly line. *International Journal of Industrial Ergonomics* 71:136–144. <https://doi.org/10.1016/j.ergon.2019.03.003>
- Muramatsu R, Miyazaki H, Ishii K (1987) A Successful Application of Job Enlargement/Enrichment at Toyota. *IIE Transactions* 19:451–459. <https://doi.org/10.1080/07408178708975419>
- Occhipinti E (1998) OCRA: a concise index for the assessment of exposure to repetitive movements of the upper limbs. *Ergonomics* 41:1290–1311. <https://doi.org/10.1080/001401398186315>
- Otto A, Battaia O (2017) Reducing physical ergonomic risks at assembly lines by line balancing and job rotation: A survey. *Computers & Industrial Engineering* 111:467–480. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2017.04.011>
- Otto A, Scholl A (2013) Reducing ergonomic risks by job rotation scheduling. *OR Spectrum* 35:711–733.

- <https://doi.org/10.1007/s00291-012-0291-6>
- Otto A, Scholl A (2011) Incorporating ergonomic risks into assembly line balancing. *European Journal of Operational Research* 212:277–286. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2011.01.056>
- Oyekan J, Prabhu V, Tiwari A, et al (2017) Remote real-time collaboration through synchronous exchange of digitised human–workpiece interactions. *Future Generation Computer Systems* 67:83–93. <https://doi.org/10.1016/j.future.2016.08.012>
- Padula RS, Comper MLC, Sparer EH, Dennerlein JT (2017) Job rotation designed to prevent musculoskeletal disorders and control risk in manufacturing industries: A systematic review. *Applied Ergonomics* 58:386–397. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2016.07.018>
- Parot-Schinkel E, Descatha A, Ha C, et al (2012) Prevalence of multisite musculoskeletal symptoms: a French cross-sectional working population-based study. *BMC Musculoskeletal Disord* 13:122. <https://doi.org/10.1186/1471-2474-13-122>
- Roux CH (2005) Impact of musculoskeletal disorders on quality of life: an inception cohort study. *Annals of the Rheumatic Diseases* 64:606–611. <https://doi.org/10.1136/ard.2004.020784>
- Sobhani A, Wahab MIM, Neumann WP (2017) Incorporating human factors-related performance variation in optimizing a serial system. *European Journal of Operational Research* 257:69–83. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2016.06.057>
- Takala E-P, Pehkonen I, Forsman M, et al (2010) Systematic evaluation of observational methods assessing biomechanical exposures at work. *Scand J Work Environ Health* 36:3–24. <https://doi.org/10.5271/sjweh.2876>
- van Tulder M, Malmivaara A, Koes B (2007) Repetitive strain injury. *The Lancet* 369:1815–1822. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(07\)60820-4](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(07)60820-4)
- Widanarko B, Legg S, Devereux J, Stevenson M (2015) Interaction between physical and psychosocial risk factors on the presence of neck/shoulder symptoms and its consequences. *Ergonomics* 58:1507–1518. <https://doi.org/10.1080/00140139.2015.1019936>
- Yildirim Y, Gunay S, Karadibak D (2014) Identifying factors associated with low back pain among employees working at a package producing industry. *BMR* 27:25–32. <https://doi.org/10.3233/BMR-130415>
- Yoon S-Y, Ko J, Jung M-C (2016) A model for developing job rotation schedules that eliminate sequential high workloads and minimize between-worker variability in cumulative daily workloads: Application to automotive assembly lines. *Applied Ergonomics* 55:8–15. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2016.01.011>