



56<sup>ème</sup> CONGRÈS SELF  
6 - 8 juillet 2022

**VULNÉRABILITÉS ET  
RISQUES ÉMERGENTS**  
penser et agir ensemble pour  
transformer durablement

**EBSCO**host

*The full text of SELF congresses  
proceedings in Ergonomics Abstracts is  
included in Academic Search Ultimate on  
EBSCOhost™*

[www.ergonomie-self.org](http://www.ergonomie-self.org)

→ Ergonomics abstract

# Directives de l'Association des Ingénieurs Allemands pour l'évaluation ergonomique dans les outils de l'usine numérique

Gert ZÜLCH

Institut de Technologie de Karlsruhe (KIT), Allemagne

Silvanerweg 10, D-76356 Weingarten (Baden)  
gert.zuelch@gefora-beratung.de

Résumé. Avec la directive partie 3633-6 en 2001, l'Association des Ingénieurs Allemands a commencé à s'occuper de la modélisation des travailleurs dans les modèles de simulation. L'accent a d'abord été mis sur l'évaluation en logistique de production et sur l'influence humaine sur la performance d'un système de travail. Aussi, les premières procédures physiologiques et psychologiques ont été montrées. La directive partie 4499-4 publiée en 2015, s'est penchée sur les aspects anthropométriques et physiologiques dans les outils de l'usine numérique. Le point de départ était la tâche de travail, et donc, selon Rohmert (1986), seulement sur une partie du concept du stress et de la charge de travail. Ici, l'accent principal sera mis sur la directive partie 4499-5 actuellement en préparation et donc sur l'évaluation ergonomique des influences environnementales physiques. Outre le pronostic des types essentiels de stress, les quelques méthodes existantes pour l'évaluation des types de charge sont également discutées. Enfin, une vision du pronostic ergonomique dans l'usine numérique est présentée. Il en résulte une multitude de tâches pour l'ergonomie jusqu'à ce que cette vision puisse être réalisée.

Mots-clés : Directives et recommandations ; Conception du lieu de travail et de l'équipement pour la santé et la sécurité ; Conception environnementale ; Utilisation de simulateurs.

---

\*Ce texte original a été produit dans le cadre du congrès de la Société d'Ergonomie de Langue Française qui s'est tenu à Genève les 6, 7 et 8 juillet 2022. Il est permis d'en faire une copie papier ou digitale pour un usage pédagogique ou universitaire, en citant la source exacte du document, qui est la suivante :

Zülch, G. (2022). Directives de l'Association des Ingénieurs Allemands pour l'évaluation ergonomique dans les outils de l'usine numérique. Actes du 56<sup>ème</sup> Congrès de la SELF, Vulnérabilités et risques émergents : penser et agir ensemble pour transformer durablement. Genève, 6 au 8 juillet 2022.

Aucun usage commercial ne peut en être fait sans l'accord des éditeurs ou archiveurs électroniques. Permission to make digital or hard copies of all or part of this work for personal or classroom use is granted without fee provided that copies are not made or distributed for profit or commercial advantage and that copies bear this notice and the full citation on the first page.



## Guidelines of the Association of German Engineers for the Ergonomic Evaluation in Digital Factory Tools

Abstract. With the guideline part 3633-6 in 2001, the Association of German Engineers began to deal with the modelling of workers in simulation procedures. This guideline emphasized the evaluation of production logistics and human influence on the performance of a work system. Furthermore, it showed the first physiological and psychological procedures. Guideline part 4499-4, published in 2015, looked at anthropometric and physiological aspects in digital factory tools. The starting point was the work task, and therefore, according to Rohmert (1986), only part of the stress and strain concept. The main subject of the presented paper will be the prepared guideline part 4499-5 with the ergonomic evaluation of physical environmental influences. In addition to predicting essential stress types, it discusses the few existing methods of predicting strain types. Finally, a vision of ergonomic prediction in the digital factory is presented. This results in a multitude of tasks for ergonomics until this vision can be realized.

Keywords: Guidelines and recommendations ; Workplace and equipment design for health and safety ; Environmental design ; Use of simulators.

## INTRODUCTION

De nos jours, les procédures logicielles jouent un rôle essentiel dans la planification de nouvelles installations de production, car les avantages et les faiblesses d'une éventuelle conception peuvent être identifiées avant la mise en œuvre. Des procédures de simulation sont utilisées pour cela depuis de nombreuses années, et ont été récemment de plus en plus complétées par des outils de l'usine numérique. Dans ce contexte, les « outils de l'usine numérique » désignent des méthodes de calcul qui traitent généralement un seul impact environnemental et ne sont pas (encore) intégrées dans un « système de l'usine numérique » complet. Ce dernier permettrait également la simulation des processus de production effectués par le personnel.

Cependant, si l'on se pose la question de l'influence de l'être humain sur la productivité d'un système de travail et quelle influence les installations de production et l'environnement de travail ont sur les travailleurs, de multiples questions restent sans réponse dans le monde virtuel. Si l'évaluation de la logistique de production des systèmes de travail a atteint un certain niveau dans la pratique, c'est encore moins le cas en ce qui concerne l'ergonomie. Dans les procédures logicielles existantes de l'usine numérique, les aspects anthropométriques et physiologiques du travail sont principalement considérés. Néanmoins, si l'on examine l'effet de l'influence de l'environnement sur les travailleurs, on ne rencontre que quelques exemples de pronostic ergonomique. Ceci doit être considéré d'un œil critique dans la mesure où de telles procédures devraient être d'une grande importance pour la santé et la sécurité au travail.

Bien qu'il existe un comité technique « Digital Human Modeling and Simulation » au sein de l'International Ergonomics Association, ce groupe de spécialistes s'occupe essentiellement de la modélisation biomécanique des êtres humains (voir par exemple, Briceno & Paul, 2018). De même, dans les congrès internationaux d'ergonomie (par exemple, Nunes, 2020) et dans les publications plus récentes en anglais (par exemple, Neumann et al., 2021), il n'y a pratiquement aucune référence à cela. Dans l'espace germanophone, il n'y a de même que quelques publications qui indiquent l'importance du pronostic des influences de l'environnement (pour une exception, voir Illmann et al., 2015).

## CRÉATION DES DIRECTIVES VDI

Ce texte de positionnement vise à montrer les directives de l'Association des Ingénieurs Allemands (« Verein Deutscher Ingenieure – VDI ») qui traitent du pronostic ergonomique dans les outils numériques. L'auteur de cet article était et est toujours le président des comités de directive mandatés pour développer des parties des directives discutées ici.

Le développement d'une nouvelle directive VDI ou d'une partie de celle-ci est généralement incité par le comité technique supérieur en sein de VDI, dans ce cas le comité technique « Digitale Fabrik ». Celui-ci charge un comité de directive spécialement instauré de son développement. L'élaboration de ce document s'étend souvent sur plusieurs années et comprend un grand nombre de réunions d'experts.

Vers la fin du processus d'édition, le comité de directive mandaté soumet une version préliminaire, qui doit être ensuite approuvée par le comité technique. Il en suit le travail rédactionnel fait par l'équipe éditoriale de VDI. La version provisoire résultante sera publiée et ouverte aux critiques.

Ce n'est qu'une fois les objections traitées que la version finale est publiée par l'éditeur Beuth à Berlin. Depuis peu les directives VDI sont publiées en allemand et en anglais. Les directives en versions imprimées et en ligne sont payantes puisqu'elles permettent de financer les activités de VDI.

## TYPES DE PRONOSTIC DU STRESS ET DE LA CHARGE DE TRAVAIL

Les directives VDI qui traitent le pronostic ergonomique dans les procédures de simulation et de l'usine numérique sont présentées ci-dessous. Le concept du stress et de la charge de travail selon Rohmert (1984, 1986) est particulièrement important pour l'analyse ergonomique, mais aussi pour le pronostic ergonomique (Figure 1).

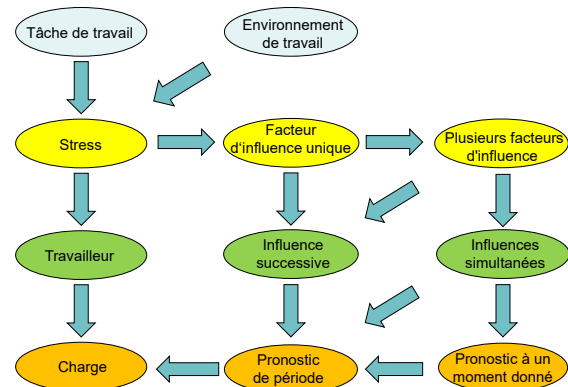


Figure 1 : Types de pronostic du stress et de la charge de travail (Zülch & Keller, 2021, p. 180, trad.)

Ce concept fait la distinction d'une part entre le stress venant de l'extérieur, causé par la tâche et l'environnement de travail et d'autre part la charge individuelle sur le corps humain causée par ce stress. Selon le type de stress, la personne réagit par une charge spécifique, par exemple par sa tension artérielle ou par une déficience musculaire. Une distinction doit aussi être faite entre le pronostic à un moment donné et le pronostic fondé sur une période longue.

En termes d'évaluation, une valeur numérique doit être attribuée à un type de stress ou de charge déterminé. Il est également nécessaire de juger en même temps les effets sur la santé et la sécurité au travail. Pour ce but, une comparaison normée par une valeur limite ou de confort est indispensable pour ce jugement.

## SIMULATION DE PRODUCTION LOGISTIQUE ET ERGONOMIQUE

Le début de ce développement a été la directive VDI 3633 partie 6 sur la représentation de l'être humain dans les procédures de simulation en 2001.

L'objectif était de prévoir l'influence du personnel sur la performance du système de travail depuis une perspective macro-ergonomique. Des critères de logistique de production ont été utilisés pour l'évaluation, tels que le rendement de production pendant une période ou la charge temporaire de travail du personnel. Le sujet principal du pronostic était le nombre et les qualifications des personnels employés fictivement.

Mais, les premiers travaux sur les pronostics physiologiques et psychologiques ont également été réalisés. Par exemple, l'influence du vieillissement de la main-d'œuvre sur la productivité d'un système d'assemblage a été simulée sur une période de 14 ans (Zülch et al., 2013a).

Un exemple récent est l'étude des systèmes de temps de travail en ce qui concerne les conflits potentiels des travailleurs avec leurs temps privés (Leupold et al., 2019). L'exemple de la Figure 2 montre l'organisation du temps de travail, dans lequel différents modèles de temps sont combinés en un système de temps de travail pour chacun des quatre groupes de travail travaillant simultanément. L'évaluation est établie sur le degré d'atteinte des objectifs, 100 % étant la valeur optimale et 0 % étant la valeur pessimiste. En plus de certaines évaluations logistiques de production, une influence du système de temps de travail sur les conflits avec les temps du personnel est aussi montrée (voir un autre exemple dans Zülch et al., 2013b).

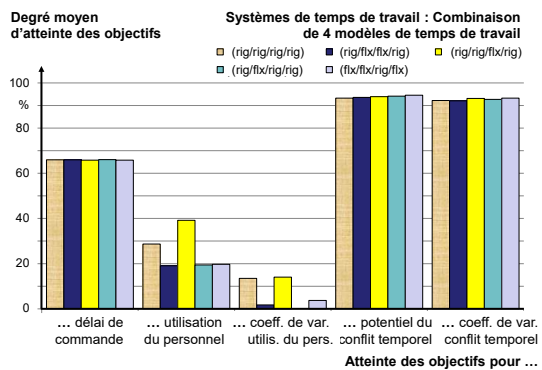


Figure 2 : Expédition de produits issus de laminoirs à froid : Résultats de la simulation des systèmes de temps de travail (Leupold et al., 2021, p. 589, trad.)

L'évaluation logistique de production des systèmes de travail commence progressivement à s'imposer dans la pratique opérationnelle. Étant donné que cette partie de la directive date de 2001, elle est actuellement en phase de révision en raison de développements postérieurs à sa publication.

## ÉVALUATION ANTHROPOMETRIQUE ET PHYSIOLOGIQUE DU TRAVAIL

Dans la directive VDI 4499 partie 5 de 2015, le pronostic ergonomique fondé sur la tâche de travail a d'abord fait l'objet d'une réflexion. Concernant la biomécanique, des outils d'anthropométrie et de physiologie du travail ont été discutés dans le cadre de l'usine numérique.

Un exemple typique sont les processus de travail dominés par l'aspect physiologique. Ces derniers

nécessitent la connexion avec une procédure de simulation événementielle dans le cas d'une prévision de la charge pendant la période concernée (Figure 3). Intéressant est une approche logicielle américaine qui permet de se prononcer sur la faisabilité pour un groupe spécifique de personnes et basé sur les valeurs limites biomécaniques de la charge de travail (Hoffmann et al., 2005 ; Center for Ergonomics, 2021).

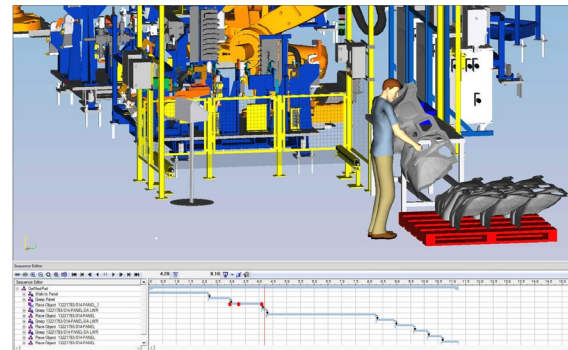


Figure 3 : Visualisation et diagramme de Gantt d'une séquence de mouvement (VDI 4499 partie 4, 2015, p. 32)

## PRONOSTIC DES INFLUENCES PHYSIQUES ENVIRONNEMENTALES

Le développement le plus récent de la directive VDI 4499 est la partie 5, attendue pour l'année 2022, qui traite le stress et la charge sur les travailleurs liés à l'environnement de travail. Cette partie se concentre sur les influences environnementales physiques identifiées par le comité de directive comme prioritaires dans un espace de travail clos. Les influences environnementales sont divisées en aspects de l'espace de travail, de l'air ambiant, des vibrations mécaniques et des ondes électromagnétiques.

Pour chacune des influences environnementales considérées, les procédures logicielles disponibles en Allemagne ainsi que les bases d'évaluation disponibles sous forme d'ordonnances et autres réglementations normatives sont discutées. De plus, au moins un exemple d'application est décrit pour chacune des influences environnementales discutées.

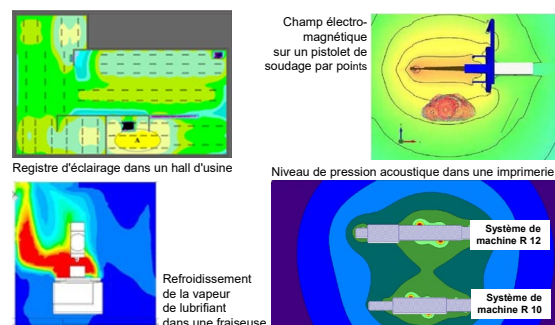


Figure 4 : Exemples de pronostic du stress lié à l'environnement de travail (voir projet VDI 4499 partie 5, 2021, pp. 16, trad.)

Il existe déjà des outils logiciels pour l'évaluation du stress lié aux influences environnementales (Figure 4). Des exemples typiques sont le pronostic du niveau de pression acoustique dans un atelier ou l'éclairage dans un hall d'usine. Des outils un peu plus inhabituels sont le pronostic des vapeurs de lubrifiant réfrigérant dans une machine-outil ou le champ électromagnétique d'un pistolet de soudage par points. Dans la plupart des cas, il s'agit d'outils isolés qui ne sont pas intégrés dans un des systèmes de l'usine numérique.

Les applications pour prédire la charge humaine par les influences environnementales sont bien moins disponibles. Cela inclut, par exemple, la charge sur les tissus humains d'un champ électromagnétique (Figure 5). La charge thermo-physiologique et radioactive sur les organes humains est d'une plus grande importance. Il est à noter cependant que cette dernière est désormais utilisée pour préparer un traitement médical, bien que ces procédures aient été développées initialement pour la santé et la sécurité au travail (Fill et al., 2004).

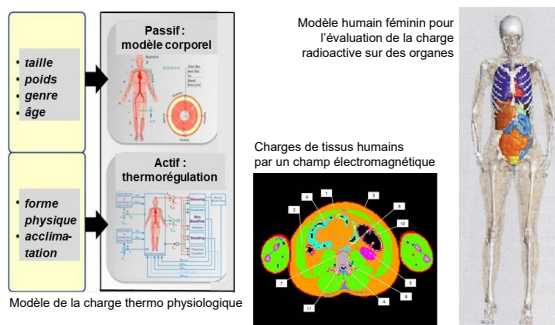


Figure 5: Pronostics de la charge imposée à la personne au travail par l'environnement physique (VDI 4499 partie 5, projet 2021, pp. 10, trad.)

## DISCUSSION SUR L'ETAT ACTUEL DE LA TECHNIQUE

Bien que les trois parties des directives présentent une multitude de procédures logicielles utiles au pronostic ergonomique de la situation de travail, elles présentent encore quelques lacunes. Jusqu'à présent, les simulations macro-ergonomiques ont beaucoup écarté les aspects sociologiques et psychologiques comme l'évaluation logistique de production de la composition des groupes de travail selon leur âge et leur sexe. Les aspects motivationnels sont également largement absents. Ces écarts sont principalement dus à l'absence de méthodes de calcul de ce pronostic.

Les procédures logicielles micro-ergonomiques dans les outils et les systèmes de l'usine numérique sont déjà bien placés par rapport au stress causé par la tâche de travail. Il existe par ailleurs de nombreuses valeurs limites issues des réglementations normatives en matière de santé et de sécurité au travail qui peuvent être utilisées pour leur jugement. D'autre part, il n'y a que quelques exemples de pronostic de la charge.

La prise en compte des influences environnementales dans les logiciels de l'usine numérique est actuellement la moins développée. L'évaluation des aspects du stress prédomine, tandis que de la charge

sur la personne travaillante nécessite des ajouts encore plus importants. Des aspects tels que le travail sous pression négative ou positive, les rayons optiques artificiels (sauf pour l'éclairage) et les rayonnements corpusculaires radioactifs manquent encore. Les facteurs chimiques et biologiques pouvant survenir lors du contact (avec la peau ou par ingestion) avec les objets et matériaux utilisés ne sont pas non plus traités. Dans cette approche, la discussion se limite à la propagation des influences physiques dans la zone de travail fermée, telles que les flux d'air.

## VISION DE L'ÉVALUATION ERGONOMIQUE DANS L'USINE NUMÉRIQUE

Il en résulte une multitude de tâches pour l'ergonomie. Cela comprend l'évaluation par période et le jugement des expositions successives et simultanées, et ce en particulier pour des types d'exposition combinés. Il existe des méthodes d'évaluation individuelle pour cela (Zülch & Zülch, 2017, pp. 43), mais une approche générale n'est pas apparente.

Il n'y a également que quelques réalisations pour le couplage nécessaire de la simulation avec l'usine numérique concernant les pronostics sur une période. De plus les questions sur la validité des méthodes de calcul doivent être posées et reposées continuellement. Enfin, les problèmes informatiques doivent être résolus afin d'éviter la double saisie des données dans les différents outils de l'usine numérique.

Cela conduit à une conclusion générale : De nombreux efforts de recherche et de développement sont encore nécessaires pour transformer la vision d'un pronostic ergonomique global en une réalité virtuelle (Figure 6).

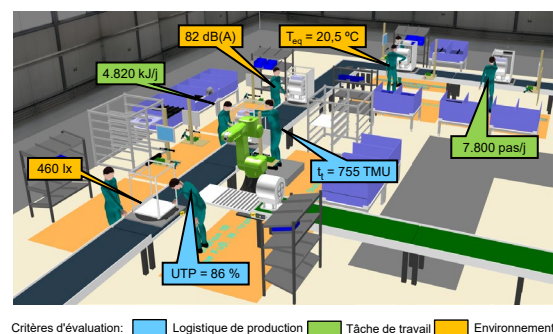


Figure 6 : Vision du pronostic du stress ergonomique dans l'usine numérique (Graphique d'usine : Spitzhörn / imk automotive, 2020)

## BIBLIOGRAPHIE

Briceno, L., & Paul, G. (2018). MakeHuman : A Review of the Modelling Framework. In Bagnara, S., Tartaglia, R., Albolino, S., Alexander, T., & Fujita, Y. (Éds.), IEA 2018 : Proceedings of the 20th Congress of the International Ergonomics Association (AISC, vol. 822), pp. 224–232. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-96077-7\\_23](https://doi.org/10.1007/978-3-319-96077-7_23)

- Center for Ergonomics (Éd.). (2021). *3DSSPP : Example Applications*. University of Michigan, Ann Arbor, MI. <https://c4e.engin.umich.edu/tools-services/3dsspp-software/3dsspp-example-applications>
- Fill, U.A., Zankl, M., Petoussi-Henss, N., Siebert, M., & Regulla, D. (2004). Adult female voxel models of different stature and photon conversion coefficients for radiation protection. *Health Physics*, 86(3), 253–272
- Hoffman, S.G., Chaffin, D.B., & Wagner, D.W. (2005). *Strength and Balance Guided Posture Selection during a Battery Maintenance Task*. University of Michigan, Ann Arbor, MI (06MV-38). [https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwiiu565sOTvAhWOjaQKHS2yC5sQFjABegQIAxAD&url=http%3A%2F%2Fwww.davidwwagner.com%2Fdocs%2FSAE-Hoffman2006\\_06MV-38.pdf&usq=AOvVaw2g1mfpdIXoxxz-si5xfkX](https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwiiu565sOTvAhWOjaQKHS2yC5sQFjABegQIAxAD&url=http%3A%2F%2Fwww.davidwwagner.com%2Fdocs%2FSAE-Hoffman2006_06MV-38.pdf&usq=AOvVaw2g1mfpdIXoxxz-si5xfkX)
- Illmann, B., Fritzsche, L., Ullmann, S., & Leidholdt, W. (2015). VerANTWORTung für die Arbeit der Zukunft. In Gesellschaft für Arbeitswissenschaft (Éd.), *Ganzheitliche Gefährdungsbeurteilung mit digitalen Menschmodellen – Die Integration von Umgebungsbedingungen in die Digitale Fabrik*. GfA Press, Dortmund. <http://gfa2015.gesellschaft-fuer-arbeitswissenschaft.de/inhalt/A.2.7.pdf>
- Leupold, M., van Hall, M., Höfer, K., & Zülch, G. (2021). Simulation Analysis of Alternative Personnel Structures in the Shipping Division of a Tinplate Manufacturer. In Dagli, C.H., & Süer, G.A. (Éds.), *25th International Conference on Production Research, Manufacturing Innovation : Cyber Physical Manufacturing (ICPR-25) part 1*, 583-590. Curran Associates, Red Hook, NY
- Neumann, W.P., Winkelhaus, S., Grosse, E.H., & Glock, C.H. (2021). *Industry 4.0 and the human factor - A systems framework and analysis methodology for successful development*. *Int. J. Prod. Econ.*, 233, 107992. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2020.107992>
- Nunes, I.L. (Éd.). (2019). *AHFE : International Conference on Applied Human Factors and Ergonomics* (AISC, vol. 781). Springer, Cham. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-94334-3>
- Rohmert, W. (1984). Das Belastungs-Beanspruchungs-Konzept. *Zeitschrift für Arbeitswissenschaft*, 38(4), 193-200. Voir aussi : <https://pascal-francis.inist.fr/vibad/index.php?action=getRecordDetail&idt=9119422>
- Rohmert, W. (1986). Ergonomics : concept of work, stress and strain. *Appl. Psychol.*, 35(2), 159-181. <https://doi.org/10.1111/j.1464-0597.1986.tb00911.x>
- Spitzhirn, M. (2020). *Communication personnelle*, 13 fév 2020. imk automotive, Chemnitz
- VDI 3633 partie 6:2001-10. (2001). *Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen - Abbildung des Personals in Simulationsmodellen*. Beuth, Berlin. <https://www.beuth.de/de/technische-regel/vdi-3633-blatt-6/44890290> (seulement en allemand)
- VDI 4499 partie 4:2015-03. (2015). *Digitale Fabrik - Ergonomische Abbildung des Menschen in der Digitalen Fabrik ; Digital factory - Ergonomic representation of humans in the digital factory*. Beuth, Berlin. <https://www.beuth.de/de/technische-regel/vdi-4499-blatt-4/222813009> (en allemand et anglais)
- VDI 4499 partie 5. (2021). *Digitale Fabrik - Prognose von Umgebungseinflüssen auf den arbeitenden Menschen* (projet, seulement en allemand)
- Zülch, G., Stock, P., Schmidt, D., & Leupold, M. (2013b). L'analyse des conflits de temps entre vie professionnelle et vie privée assistée par simulation. In SELF (Éd.), *Actes du 48ième Congrès de la Société d'Ergonomie de Langue Française*, 96-104. SELF, Paris. <https://ergonomie-self.org/wp-content/uploads/2017/02/SELF-Recueil-Actes-2013.pdf>
- Zülch, G., Waldherr, M., & Becker, M. (2013a). Effects of an Ageing Workforce on the Performance of Assembly Systems. In Schlick, C.M., Frieling, E., & Wegge, J. (Éds.), *Age-Differentiated Work Systems*, 65-87. Springer Netherland, Dordrecht. [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-35057-3\\_4](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-35057-3_4)
- Zülch, M., & Zülch, G. (2017). Production logistics and ergonomic evaluation of U-shaped assembly systems. *Int. J. Prod. Econ.*, 190, 37-44. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijpe.2017.01.004>