



### **Article original :**

Roelands, B. & Van Cutsem, J. (2023). Brain research into the mechanisms and consequences of mental fatigue. *Performance Enhancement & Health*, 10(4), 100239.

Sections traduites concernées : article complet

---

**Titre** : La recherche neurologique des mécanismes et conséquences de la fatigue mentale

**Mots-clés** : Non disponibles

**Résumé** : Non disponible

**Article** :

#### **1. Introduction à la fatigue mentale**

La "fatigue" est un phénomène complexe qui est décrit comme une rupture physiologique, une perception ou une émotion, un mécanisme important pour minimiser les blessures physiques, mais également comme un concept expérimental, un symptôme, un risque, une cause et une conséquence (Pattyn et al., 2018). Appréhendée du point de vue de la science du sport de l'exercice, la fatigue est un concept vague qui peut être induit à la fois cognitivement et physiquement (Roelands et al., 2022). Il existe une littérature abondante concernant la fatigue induite par l'exercice, dans laquelle une division générale entre fatigue périphérique et fatigue centrale est apparente. Toutefois, cela sort du cadre du présent éditorial. Au cours de la dernière décennie, la recherche s'intéressant à la fatigue cognitivement induite, la "fatigue mentale", a attiré une attention importante dans le domaine de la science du sport et de l'exercice. Ce phénomène peut être défini comme un état psychobiologique induit par une activité cognitive exigeante prolongée, qui aboutit à un sentiment subjectif de fatigue (ou "coup de barre")<sup>1</sup>, une diminution des capacités physiques et / ou cognitives, et / ou une altération de l'activation cérébrale (Habay et al., 2021). La fatigue mentale est un construit clairement identifié dans la vie quotidienne : elle peut s'ensuivre après seulement une quantité limitée de travail cognitif (par exemple : conduire un véhicule) chez des individus sains (Lal & Craig, 2001), elle peut provoquer un risque accru d'erreurs dans les professions telles que les chirurgiens (McCormick et al., 2012) et les contrôleurs du trafic aérien (Dasari et al., 2017) et elle représente également une part importante de nombreuses maladies neurologiques (comme la sclérose en plaques ou la maladie de Parkinson) (Chaudhuri & Behan, 2004). Outre les effets sur la vie quotidienne, il existe quantité de preuves qui suggèrent que la fatigue mentale a également un impact négatif et significatif sur la performance sportive, principalement sur les performances d'endurance (Van Cutsem et al., 2017) et les performances psychomotrices spécifiques au sport (Habay et al., 2021). En plus d'altérer la performance sportive, la fatigue mentale affecte négativement l'adaptabilité fonctionnelle de l'athlète. Ainsi, la fatigue mentale en contexte sportif doit être prise en considération non seulement dans la poursuite d'une performance optimale, mais également pour déterminer le risque de blessures et pour prendre des décisions de retour au sport (réathlétisation) après une période de réhabilitation (Verschueren et al., 2020). Bien que plusieurs

---

<sup>1</sup> Note du traducteur : Dans l'article original (en anglais), l'auteur utilise ici le terme "tiredness", différent du terme "fatigue" (qu'il cherche à définir dans cette phrase). Souvent traduit en français par "fatigue", "tiredness" fait ici référence à un état de fatigue plus spécifiquement : le "coup de barre", généralement plus circonscrit dans le temps, qui s'apparente plutôt à une certaine lassitude ou à un épuisement passager.



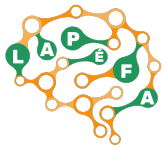
théories et hypothèses aient été avancées, la recherche des mécanismes sous-jacents à la survenue et aux conséquences de la fatigue mentale se poursuit au sein et en dehors des sciences du sport et de l'exercice. Cette quête des mécanismes relatifs à la fatigue mentale est stimulée par les avancées technologiques récentes qui permettent aux chercheurs d'approfondir toujours davantage l'étude des changements tant structurels que fonctionnels qui surviennent dans le cerveau durant et après une tâche cognitive prolongée. C'est l'objectif du présent éditorial de se pencher sur les médiateurs potentiels de la fatigue mentale, et d'identifier des techniques prometteuses qui pourraient être utilisés pour apporter des réponses. Nous espérons à notre tour encourager les chercheurs dans ce domaine à utiliser ces techniques partout et autant que possible.

## 2. Fatigue mentale et spectroscopie fonctionnelle proche infrarouge

Il a été établi que des changements de niveaux d'hémoglobine oxygénée et désoxygénée dans le cortex préfrontal peut constituer l'un des mécanismes expliquant les changements de performance (Davranche et al., 2016). L'hémodynamique décrite dans cette région du cerveau peut être mesurée en utilisant la spectroscopie fonctionnelle proche infrarouge (ou fNIRS pour *functional Near Infra-Red Spectroscopy*) préfrontale, une manière non-invasive de mesurer les changements d'hémoglobine oxygénée et désoxygénée. Il a déjà été montré qu'une tâche cognitive prolongée peut induire des changements d'oxygénation cérébrale. Li et al. (2009) ont administré à leurs sujets une tâche de conduite sur simulateur de trois heures qui a engendré un état de fatigue mentale. Les auteurs ont rapporté une augmentation de l'oxygénation dans le cortex frontal au début de la tâche de conduite, suivie d'une diminution de l'oxygénation en fin de tâche, et ils en ont conclu que cette oxygénation réduite dans le cortex préfrontal pourrait indiquer un apport réduit d'oxygène dans le cerveau, qui affecte le développement de la fatigue. Étonnamment, le rôle de l'oxygénation cérébrale n'a reçu que peu d'attention dans les études relatives aux mécanismes de la fatigue mentale. Des études ultérieures devraient et pourraient expliciter le rôle exact de l'oxygénation cérébrale dans la survenue de la fatigue mentale, ou dans ses effets sur les capacités de performance humaine, en intégrant la fNIRS comme une technique de surveillance cérébrale.

## 3. Fatigue mentale et électroencéphalographie

Une autre technique importante pour décrypter les mécanismes de la fatigue mentale est l'électroencéphalographie (EEG). Il s'agit d'une technique non-invasive utilisée pour enregistrer l'activité électrique des neurones corticaux à l'aide d'électrodes placés sur le scalp (Gorjan et al., 2022). Cette technique est beaucoup plus ancrée dans le champ de la recherche et fournit des informations fiables sur les changements d'activité cérébrale (bande spectrale de puissance), mais également en termes de localisation de ces changements. Une récente méta-analyse par Tran et al. (2020) a permis d'apporter un aperçu approfondi des changements observés dans l'activation cérébrale concomitants avec la fatigue mentale. Les auteurs en ont conclu que la fatigue mentale augmentait généralement l'activation cérébrale. Pour être plus précis, selon la littérature il devient apparent que la fatigue mentale accroît l'activité thêta dans les sites frontaux, centraux et postérieurs du cerveau et l'activité alpha dans les sites centraux et postérieurs (Tran et al., 2020). Ces bandes de fréquence peuvent être liées au contrôle de l'inhibition et à une réduction de la vigilance, indiquant que la fatigue mentale rend plus difficile le maintien de l'attention sur la tâche en cours, ce qui contribue à une performance moins efficace (Habay et al., 2021). Dans leur conclusion, Tran et al. (2020) ont suggéré que c'est principalement l'augmentation de l'activité thêta qui peut être considéré comme un marqueur physiologique valide et certain de la fatigue mentale. Bien que ce résultat soit d'une grande valeur, il existe également des inconvénients à utiliser l'EEG comme outil d'identification des mécanismes de la fatigue mentale, particulièrement lorsqu'il s'applique aux environnements sportifs. Combiner la réalisation d'un exercice physique en même temps que la mesure de



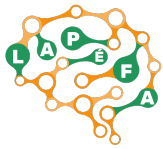
l'activité cérébrale est difficile. Tout d'abord, plus l'exercice devient intense, plus les artéfacts de mouvement vont dominer les enregistrements EEG. Deuxièmement, le résultat physiologique d'un exercice physique est la transpiration, qui, sous le bonnet d'EEG, donne lieu à des "cross-bridges", altérant là aussi la collecte de données. Ceci souligne l'importance du traitement des données, qui devrait évidemment avoir pour but d'éliminer une quantité suffisante de signaux indésirables des enregistrements EEG, tout en préservant autant que possible les données. Gorjan et al.,(2022) ont récemment produit des recommandations pour l'utilisation de différentes méthodes de traitement des données selon l'intensité du mouvement, et souligné les avantages et les inconvénients de chacune de ces méthodes. En général, la recherche interdisciplinaire mène à des avancées significatives dans la mise en pratique de l'EEG dans un cadre dynamique, permettant aux chercheurs d'accroître la validité écologique<sup>2</sup> des mesures. Cela offre l'opportunité d'investiguer plus en profondeur les mécanismes de la fatigue mentale, spécifiquement dans le cadre des sciences du sport.

#### 4. Fatigue mentale et imagerie et spectroscopie par résonance magnétique

La fNIRS et l'EEG sont deux techniques utilisables de manière mobile et donc, relativement faciles à utiliser dans un cadre sportif comparativement à d'autres techniques d'imagerie cérébrale bien connues mais moins mobiles telles que l'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (IRMf) et la spectroscopie par résonance magnétique (ou spectroscopie RMN). L'IRMf est un test non-invasif qui mesure l'activité cérébrale en détectant des changements associés au flux sanguin, alors que la spectroscopie RMN est un test diagnostique non-invasif pour mesurer les changements biochimiques dans le cerveau. En ce qui concerne l'IRMf, de multiples études ont été réalisées pour examiner les mécanismes de la fatigue mentale. Deux des dernières études publiées sur ce sujet sont les études de Gergelyfi et al. (2021) et Van Cutsem et al. (2022). Dans notre propre étude (i.e. Van Cutsem et al., 2022), nous avons souligné le fait que la discussion mécanistique sur comment la fatigue mentale altère la performance humaine est devenue complexe au fil du temps et nous avons tenté de fournir une certaine structure en divisant la discussion en (1) les mécanismes sous-tendant l'effet de temps passé sur la tâche et (2) les mécanismes sous-tendant les effets comportementaux, psychologiques et physiologiques par rebond qui sont souvent observés dans un paradigme de tâches séquentiel. Au final, nous avons démontré qu'une diminution de l'activité cérébrale associée à une inhibition de réponse, à la fois au niveau de la matière grise (i.e. cortex associatif somatosensoriel, gyrus supramarginal et cortex cingulaire dorso-antérieur) et de la matière blanche (i.e. corps calleux) était associée à une augmentation du niveau subjectif de fatigue mentale (i.e. effet psychologique par rebond), mais non à une diminution de la performance [i.e. un possible effet comportemental par rebond ; Van Cutsem et al. (2022)]. Ces résultats étayaient ceux de Gergelyfi et al. (2021), également centrés sur la discussion des mécanismes sous-tendant les effets par rebond. Ils ont rapporté que la fatigue mentale subjective, mais pas ses manifestations comportementales, était associée à une hypoactivité des réponses neuronales évoquées par la tâche (Gergelyfi et al., 2021). Les résultats des deux études reflètent l'énorme potentiel des futures recherches pour approfondir notre compréhension de ce sujet complexe en combinant des mesures d'IRMf avec une auto-évaluation subjective, des mesures d'activation du système nerveux autonome et périphérique et des mesures de performance.

La survenue de la fatigue mentale est souvent liée à une chute des "ressources", et ce terme "ressource" a été interprété différemment selon le champ de recherche [par exemple, attention, carburant métabolique, etc. ; voir Pattyn et al. (2018) pour plus d'informations sur la question]. De plus, outre un épuisement des

<sup>2</sup> Note du traducteur : En science, la validité écologique correspond au postulat selon lequel les comportements observés au cours d'une étude sont le reflet des comportements qui se produisent effectivement en milieu naturel. Pour ce faire, les conditions de passation doivent être au plus proche de la réalité, c'est-à-dire du milieu de vie de la population étudiée ou du patient concerné, en vue par la suite de pouvoir généraliser. On parle de validité écologique satisfaisante si le chercheur parvient à reproduire les conditions de vie des personnes étudiées.



"ressources", la fatigue mentale a également été liée à une accumulation de métabolites liés à l'énergie [par exemple, une accumulation d'adénosine (Marcora et al., 2009 ; Martin et al., 2018 ; Van Cutsem & Marcora, 2021)]. Dans l'une de nos autres études (i.e., Van Cutsem et al., 2020), nous sommes partis de cette suggestion que la fatigue mentale est liée à des altérations spécifiques des ressources énergétiques du cerveau pour faire l'hypothèse qu'une chute de la concentration cérébrale en phosphocréatine est liée à la fatigue mentale. Dans l'étude de Van Cutsem et al. (2020), nous avons évalué les propriétés anti-fatigue mentale de la créatine et trouvé qu'une supplémentation en créatine contrecarre partiellement la détérioration des performances comportementales induite par la fatigue mentale. Un constat qui, d'un point de vue mécaniste, justifie des recherches plus approfondies sur le rôle de la phosphocréatine cérébrale dans la fatigue mentale. Notre hypothèse dans cette étude était basée sur l'étude de Sappey-Marinier et al. (1992), qui montrait qu'une activation prolongée du cortex visuel est associée à une diminution de la concentration cérébrale en phosphocréatine ainsi qu'à une diminution concomitante de l'activité cérébrale liée au stimulus. La technique d'imagerie utilisée par Sappey-Marinier et al. (1992) pour visualiser les changements de concentration de phosphocréatine est la RMN et démontre la valeur ajoutée de la technique d'RMN pour la recherche sur la fatigue mentale. La recherche sur la fatigue mentale qui intègre des mesures d'RMN est rare. Cependant, très récemment, Wiehler et al. (2022) ont apporté de nouveaux éclairages concernant la dimension neuro-métabolique de la fatigue mentale, et ils ont utilisé la RMN pour cela. Les auteurs ont fait l'hypothèse que les tâches qui requièrent un contrôle cognitif devraient conduire à une accumulation de glutamate dans le cortex latéral préfrontal (ou IPFC pour *lateral PreFrontal Cortex*), une région connue pour son rôle dans les processus de contrôle cognitif (Wiehler et al., 2022). Cette accumulation amènerait le IPFC à fonctionner de manière moins efficace, affectant les autres processus de contrôle cognitif, tels que la prise de décision économique sur le fait de faire un effort ou d'attendre pour obtenir des récompenses (Scholey & Apps, 2022). Afin d'étudier cela, Wiehler et al. (2022) ont réalisé une surveillance des métabolites cérébraux au cours d'une journée ordinaire de travail, durant laquelle deux groupes de participants ont réalisé des tâches de contrôle cognitif soit très exigeantes soit faiblement exigeantes, intercalées avec des prises de décision économique. Les auteurs ont montré qu'à la fin de la journée, le travail cognitif exigeant avait généré une augmentation de la concentration en glutamate et de la diffusion glutamate / glutamine au niveau cortex latéral préfrontal, comparativement au travail cognitif de faible exigence et comparativement à une zone cérébrale de référence (cortex visuel primaire). Bien qu'un travail important reste à faire, les études actuelles ouvrent la voie à plus d'optimisation technologique pour permettre à la recherche d'examiner les fondements biologiques de la fatigue mentale.

## 5. Conclusion et perspectives futures

De manière générale, on observe que les recherches sur le phénomène de la fatigue ont pris une ampleur considérable au cours de la dernière décennie. Ceci est nécessaire car il est également devenu évident que la fatigue ne se limite pas à sa composante physique. Des études récentes ont pu mettre à jour les conséquences négatives de la fatigue mentale sur la capacité de performance humaine dans tous ses aspects (physiques, techniques et / ou cognitifs). Afin de répondre aux questions existentielles sur les mécanismes de la fatigue, nous comptons sur les avancées technologiques qui permettent une exploration plus en profondeur des mécanismes cérébraux à la base de la fatigue mentale. Plus notre connaissance de ces mécanismes est bonne, plus nous créons du potentiel pour développer des outils qui nous permettent de suivre (ou monitorer) et de détecter la fatigue mentale avant que ne surviennent des baisses de performance, que ce soit au niveau personnel, ou dans un cadre professionnel ou sportif. En outre, un savoir-faire amélioré sur les mécanismes cérébraux de la fatigue mentale permettront également de développer et de tester des contre-mesures visant à réduire les risques d'apparition d'effets négatifs [voir la revue de Proost et al. (2022) pour un aperçu des contre-mesures de la fatigue mentale qui ont été



étudiées jusqu'à présent].

## Reconnaissance

Bart Roelands est enseignant-chercheur au Collen-Francqui et membre du Programme de Recherche Stratégique (SRP77) "Exercice et Cerveau dans la Santé et la Maladie : La Valeur Ajoutée des Robots Centrés sur l'Humain".

## Références

Chaudhuri, A., & Behan, P. O. (2004). Fatigue in neurological disorders. *Lancet*, 363 (9413), 978–988. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(04\)15794-2](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(04)15794-2)

Dasari, D., Shou, G., & Ding, L. (2017). ICA-Derived EEG Correlates to Mental Fatigue, Effort, and Workload in a Realistically Simulated Air Traffic Control Task. *Front Neurosci*, 11, 297. <https://doi.org/10.3389/fnins.2017.00297>

Davranche, K., Casini, L., Arnal, P. J., Rupp, T., Perrey, S., & Verges, S. (2016). Cognitive functions and cerebral oxygenation changes during acute and prolonged hypoxic exposure. *Physiol Behav*, 164(Pt A), 189–197. <https://doi.org/10.1016/j.physbeh.2016.06.001>

Gergelyfi, M., Sanz-Arigita, E. J., Solopchuk, O., Dricot, L., Jacob, B., & Zénon, A. (2021). Mental fatigue correlates with depression of task-related network and augmented DMN activity but spares the reward circuit. *Neuroimage*, 243, Article 118532. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2021.118532>

Gorjan, D., Gramann, K., De Pauw, K., & Marusic, U. (2022). Removal of movement-induced EEG artifacts: current state of the art and guidelines. *J Neural Eng*, 19(1). <https://doi.org/10.1088/1741-2552/ac542c>

Habay, J., Proost, M., De Wachter, J., Díaz-García, J., De Pauw, K., Meeusen, R., ... Roelands, B. (2021). Mental Fatigue-Associated Decrease in Table Tennis Performance: Is There an Electrophysiological Signature? *Int J Environ Res Public Health*, 18 (24). <https://doi.org/10.3390/ijerph182412906>

Habay, J., Van Cutsem, J., Verschueren, J., De Bock, S., Proost, M., De Wachter, J., & Roelands, B. (2021). Mental Fatigue and Sport-Specific Psychomotor Performance: A Systematic Review. *Sports Med*. <https://doi.org/10.1007/s40279-021-01429-6>

Lal, S. K., & Craig, A. (2001). A critical review of the psychophysiology of driver fatigue. *Biol Psychol*, 55(3), 173–194. [https://doi.org/10.1016/s0301-0511\(00\)00085-5](https://doi.org/10.1016/s0301-0511(00)00085-5)

Li, Z., Zhang, M., Zhang, X., Dai, S., Yu, X., & Wang, Y. (2009). Assessment of cerebral oxygenation during prolonged simulated driving using near infrared spectroscopy: its implications for fatigue development. *Eur J Appl Physiol*, 107(3), 281–287. <https://doi.org/10.1007/s00421-009-1122-6>

Marcora, S. M., Staiano, W., & Manning, V. (2009). Mental fatigue impairs physical performance in humans. *J Appl Physiol* (1985), 106(3), 857–864. <https://doi.org/10.1152/jappphysiol.91324.2008>

Martin, K., Meeusen, R., Thompson, K. G., Keegan, R., & Rattray, B. (2018). Mental Fatigue Impairs Endurance Performance: A Physiological Explanation. *Sports Med*. <https://doi.org/10.1007/s40279-018-0946-9>

McCormick, F., Kadzielski, J., Landrigan, C. P., Evans, B., Herndon, J. H., & Rubash, H. E. (2012).



Surgeon fatigue: a prospective analysis of the incidence, risk, and intervals of predicted fatigue-related impairment in residents. *Arch Surg*, 147(5), 430–435. <https://doi.org/10.1001/archsurg.2012.84>

Pattyn, N., Van Cutsem, J., Dessy, E., & Mairesse, O. (2018). Bridging Exercise Science, Cognitive Psychology, and Medical Practice: Is "Cognitive Fatigue" a Remake of "The Emperor's New Clothes"? *Front Psychol*, 9, 1246. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2018.01246>

Proost, M., Habay, J., De Wachter, J., De Pauw, K., Rattray, B., Meeusen, R., & Van Cutsem, J. (2022). How to Tackle Mental Fatigue: A Systematic Review of Potential Countermeasures and Their Underlying Mechanisms. *Sports Med*. <https://doi.org/10.1007/s40279-022-01678-z>

Roelands, B., Kelly, V., Russell, S., & Habay, J. (2022). The Physiological Nature of Mental Fatigue: Current Knowledge and Future Avenues for Sport Science. *Int J Sports Physiol Perform*, 17(2), 149–150. <https://doi.org/10.1123/ijspp.2021-0524>

Sappey-Marinier, D., Calabrese, G., Fein, G., Hugg, J. W., Biggins, C., & Weiner, M. W. (1992). Effect of photic stimulation on human visual cortex lactate and phosphates using <sup>1</sup>H and <sup>31</sup>P magnetic resonance spectroscopy. *J Cereb Blood Flow Metab*, 12(4), 584–592. <https://doi.org/10.1038/jcbfm.1992.82>

Scholey, E., & Apps, M. A. J. (2022). Fatigue: Tough days at work change your prefrontal metabolites. *Curr Biol*, 32(16), R876–R879. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2022.06.088>

Tran, Y., Craig, A., Craig, R., Chai, R., & Nguyen, H. (2020). The influence of mental fatigue on brain activity: Evidence from a systematic review with meta-analyses. *Psychophysiology*, 57(5), e13554. <https://doi.org/10.1111/psyp.13554>

Van Cutsem, J., & Marcora, S. (2021). The Effects of Mental Fatigue on Sport Performance; An Update. In C. Englert & I. Taylor (Eds.), *Handbook of self-regulation and motivation in sport and exercise*.

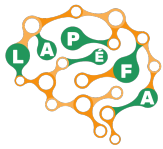
Van Cutsem, J., Marcora, S., De Pauw, K., Bailey, S., Meeusen, R., & Roelands, B. (2017). The Effects of Mental Fatigue on Physical Performance: A Systematic Review. *Sports Med*. <https://doi.org/10.1007/s40279-016-0672-0>

Van Cutsem, J., Roelands, B., Pluym, B., Tassignon, B., Verschueren, J. O., DE Pauw, K., & Meeusen, R. (2020). Can Creatine Combat the Mental Fatigue-associated Decrease in Visuomotor Skills? *Med Sci Sports Exerc*, 52(1), 120–130. <https://doi.org/10.1249/MSS.0000000000002122>

Van Cutsem, J., Van Schuerbeek, P., Pattyn, N., Raeymaekers, H., De Mey, J., Meeusen, R., & Roelands, B. (2022). A drop in cognitive performance, whodunit? Subjective mental fatigue, brain deactivation or increased parasympathetic activity? It's complicated! *Cortex*, 155, 30–45. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2022.06.006>

Verschueren, J. O., Tassignon, B., Proost, M., Teugels, A., VAN Cutsem, J., Roelands, B., ... Meeusen, R. (2020). Does Mental Fatigue Negatively Affect Outcomes of Functional Performance Tests? *Med Sci Sports Exerc*, 52(9), 2002–2010. <https://doi.org/10.1249/MSS.0000000000002323>

Wiehler, A., Branzoli, F., Adanyeguh, I., Mochel, F., & Pessiglione, M. (2022). A neuro-metabolic account of why daylong cognitive work alters the control of economic decisions. *Curr Biol*, 32(16), 3564–3575. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2022.07.010>. e3565.



**Affiliations institutionnelles des auteurs :**

Bart Roelands<sup>1,2</sup>, Jeroen Van Cutsem Jeroen<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup> Human Physiology and Sports Physiotherapy Research Group (MFYS)

<sup>2</sup> Brussels Human Robotics Research Center (BRUBOTICS), Vrije Universiteit Brussel, Brussels, Belgium

<sup>3</sup> VIPER Research Unit, Royal Military Academy, Brussels, Belgium

**Correspondance** : Bart Roelands, Human Physiology and Sports Physiotherapy Research Group, Vrije Universiteit Brussel, Brussels, Belgium

Adresse email : [Bart.Roelands@vub.be](mailto:Bart.Roelands@vub.be) (B. Roelands).