

Université de Montréal

**Substrats neurophysiologiques du traitement émotionnel de l'information
visuelle chez les adultes vieillissants**

par

Josiane Héroux

Département de psychologie

Faculté des arts et des sciences

Essai présenté à la Faculté des études supérieures en vue de l'obtention du
grade de doctorat en psychologie (D. Psy.), option neuropsychologie clinique

Août 2018

© Josiane Héroux, 2018

Sommaire

Contexte. Bien que l'empathie soit une faculté essentielle tout au long de la vie, son étude dans le vieillissement normal demeure limitée et surtout réalisée au moyen de mesures subjectives. L'électroencéphalographie (EEG) apparaît une nouvelle avenue pour étudier l'empathie grâce au rythme mu. Cette étude visait à explorer l'évolution de l'empathie à travers le temps et entre les sexes en s'intéressant à la réponse neurophysiologique (rythme mu) consécutive à l'observation d'expressions faciales émotionnelles (EFE) et au score obtenu à un questionnaire d'empathie. **Méthode.** Un total de 65 participants, dont 33 jeunes adultes et 32 seniors, ont pris part à cette étude. Ils ont été exposés à de courts clips vidéo d'EFE de joie, de peur et neutres durant lesquels ils devaient tenter de ressentir l'émotion observée pendant l'enregistrement continu de leur activité cérébrale. Ils ont aussi complété le quotient d'empathie (QE). **Résultats.** Les jeunes adultes réagissaient plus fortement aux EFE à valence émotionnelle. Les seniors se percevaient comme moins empathiques et présentaient une réponse neurophysiologique équivalente entre les stimuli. Les femmes seniors montraient une plus grande réactivité face aux EFE neutres en comparaison aux jeunes femmes. Un effet de sexe en faveur des femmes a été observé dans la modulation du rythme mu et des capacités d'empathie supérieures ont été associées à un rythme mu plus important chez ces dernières. **Conclusion.** Le rythme mu semble constituer un marqueur neurophysiologique sensible à l'âge et au sexe dans le cadre d'un traitement empathique et pourrait donc servir de mesure objective à cet effet.

Mots-clés : Empathie, Vieillissement, Électroencéphalographie, Rythme mu, Expression faciales émotionnelles

Abstract

Background. Although empathy is an essential tool throughout life, its study in normal aging remains limited and largely supported by subjective measures. Electroencephalography (EEG) is a new avenue for studying empathy through mu rhythm. The purpose of this study was to explore the evolution of empathy through time and between sex by focusing on the neurophysiological response (mu rhythm) resulting from the observation of emotional facial expressions (EFE) and from the score obtained on an empathy questionnaire. **Methods.** A total of 65 participants, including 33 young adults and 32 seniors, took part in this study. They were exposed to short video clips of dynamic facial expressions of joy, fear and neutral during which they had to try to feel each exposed emotion while electroencephalography (EEG) responses were recorded. They also completed the Empathy Quotient (EQ). **Results.** Young adults reacted more strongly to emotional EFEs. Seniors perceived themselves as less empathetic and had an equivalent neurophysiological response between stimuli. Senior women were even more responsive to neutral EFEs than younger women. A sex effect in favor of women has been observed in the modulation of mu rhythm and higher empathy capacities have been associated with a higher mu rhythm in the latter. **Conclusion.** Mu rhythm appears to be an age and sex sensitive neurophysiological marker in empathic treatment and could therefore serve as an objective measure for this purpose.

Keywords: Empathy, Aging, Electroencephalography, Mu rhythms, Emotional Facial Expressions

Table des matières

Sommaire	ii
Abstract	iii
Liste des tableaux	v
Liste des figures	vi
Liste des abréviations	vii
Remerciements	viii
Contexte théorique	1
Position de la problématique	1
Définition de l'empathie.....	2
Développement de l'empathie.....	4
Empathie et vieillissement.....	5
Controverses quant à la trajectoire présumée de la composante affective de l'empathie	7
Découverte des neurones miroirs et leur rôle dans l'empathie.....	9
L'électroencéphalographie comme mesure de la résonance motrice	11
Rythme mu et empathie.....	12
Objectifs et hypothèses	13
Article.....	15
Introduction	16
Méthodologie.....	22
Résultats	29
Discussion	33
Conclusion.....	39
Références	41
Conclusion générale	46
Bibliographie.....	48

Liste des tableaux

Tableau 1. <i>Caractéristiques démographiques et cliniques des participants</i>	23
Tableau 2. <i>Statistiques descriptives de la modulation du rythme Mu lors de la présentation des EFE entre 500 et 1500 ms post-stimulus et du score au Quotient d'Empathie</i>	29

Liste des figures

<i>Figure 1.</i> Exemples standards de chaque stimulus : représentation temporelle de 0 à 500 ms de chaque EFE.....	26
<i>Figure 2.</i> Désynchronisation du rythme mu entre 500 et 1500 ms chez les seniors et les jeunes adultes.....	30
<i>Figure 3.</i> Désynchronisation du rythme mu entre 500 et 1500 ms chez les femmes et les hommes.....	31
<i>Figure 4.</i> Désynchronisation du rythme mu entre 500 et 1500 ms chez les jeunes femmes et les femmes seniors.....	32

Liste des abréviations

BAI: Beck Anxiety Inventory

BDI: Beck Depression Inventory

EEG: Électroencéphalographie

EFE: Expression Faciale Émotionnelle

EMG : Électromyographie

EQ : Empathy Quotient

IRMf : Imagerie par Résonance Magnétique fonctionnelle

SNM: Système de neurones miroirs

QE : Quotient d'Empathie

TdE : Théorie de l'esprit

Remerciements

J'adresse d'abord mes remerciements à mon directeur, Sven Joubert, ainsi qu'à mon co-directeur, Louis De Beaumont, pour la liberté que vous m'avez laissée et la confiance que vous m'avez accordée tout au long de mon parcours doctoral. Votre soutien et vos précieux conseils m'auront permis de me réaliser pleinement dans ce projet que je chérissais depuis toujours.

Je remercie aussi mes collègues de laboratoire, dont Samuel et Virginie, sans qui ce projet n'aurait pu être ce qu'il est aujourd'hui. J'aimerais aussi souligner l'importance de mes collègues et amies qui, de près ou de loin, auront contribué à rendre ces trois dernières années plus agréables et enrichissantes sur les plans personnel et professionnel.

Enfin, mes remerciements ne seraient complets sans mentionner ceux qui me sont le plus chers, mon conjoint et ma famille. Merci pour votre patience et votre support inconditionnel lors de mes moments de doute et de peur. Vos encouragements auront certainement contribué à nourrir ma persévérance dans la poursuite de cette aventure ô combien exigeante, mais gratifiante.

Contexte théorique

Position de la problématique

L'intérêt pour l'étude de l'empathie ne date pas d'hier en raison du potentiel de survie qu'elle confère aux différentes espèces. En effet, l'empathie possède une longue histoire sur le plan évolutif puisqu'elle constitue une composante fondamentale à la coexistence harmonieuse entre les individus (Decety, 2010). Au quotidien, elle permet notamment la création de liens sociaux et encourage la collaboration et l'entraide (Decety et Svetlova, 2012). Cela dit, l'empathie joue un rôle important dans la socialisation du jeune enfant qui perdure tout au long de sa vie (Tousignant, Eugène, et Jackson, 2017). Néanmoins, alors que le développement des capacités empathiques au cours de la petite enfance et de l'adolescence est aujourd'hui bien documenté (Bandstra, Chambers, McGrath, et Moore, 2011; Spinrad et Gal, 2018), l'état des connaissances sur l'empathie au cours du vieillissement demeure beaucoup plus limité. Actuellement, la méthode la plus courante pour évaluer les capacités d'empathie d'une personne repose sur une appréciation subjective de ses capacités évaluées à travers différents questionnaires (Pernigo et al., 2015). Bien que ces outils soient utiles, ils sont limités par le biais de désirabilité sociale encouru par ce type de mesure (Li, Meng, Li, Yang, et Yuan, 2016). Or, ces dernières années, l'étude de l'empathie par des mesures plus objectives suscite un regain d'intérêt et représente une nouvelle avenue en recherche (Narme et al., 2010; Pernigo et al., 2015).

Cet essai vise donc à examiner les effets du vieillissement normal sur les mécanismes neurophysiologiques impliqués dans le processus empathique par le biais de l'électroencéphalographie (EEG). De plus, ce projet vise à vérifier s'il existe une relation entre la réponse neurophysiologique sous-tendant l'empathie et le niveau d'empathie perçu des

participants, tel qu'évalué par un questionnaire de cognition sociale, le quotient d'empathie (QE). Dans un contexte de fin de vie qui approche, l'empathie pourrait s'avérer une faculté facilitatrice des transitions et modifications importantes qui surviennent à ce moment (ex. retraite, maladies, deuils, etc.). Ainsi, mieux comprendre son évolution au fil du temps pourrait éventuellement nous permettre de formuler des hypothèses d'intervention servant à préserver ou améliorer cette habileté sociale auprès des seniors.

Concernant la structure de cet essai, une brève recension des écrits abordant les principaux concepts théoriques de cette étude servira d'abord d'assise à l'article empirique qui en découle. La présentation de l'article suivra et une conclusion générale exposant quelques pistes de recherche futures sera finalement proposée.

Définition de l'empathie

En ce qui concerne la définition de l'empathie, puisqu'il s'agit d'un construit fondamental pour de nombreux champs épistémologiques, il semble exister autant de définitions que d'études menées à son sujet (de Vignemont et Singer, 2006). Néanmoins, de manière générale, l'empathie renvoie à la capacité d'un individu à partager, percevoir et comprendre l'expérience émotionnelle subjective d'un autre individu. Elle correspond au fait de comprendre, voire ressentir, ce que les autres vivent et pensent. L'empathie engage donc le déploiement de processus distincts, mais aussi complémentaires, ce qui lui confère un caractère multidimensionnel comportant à la fois des composantes affective et cognitive (Dvash et Shamay-Tsoory, 2014; Lamm, Batson, et Decety, 2007).

La dimension affective de l'empathie réfère à l'expérience émotionnelle subjective d'une émotion perçue. Elle surviendrait spontanément et témoigne d'une résonance avec la situation et les sentiments d'une autre personne perceptibles notamment par ses expressions faciales, son

regard, le ton de sa voix et son comportement (Decety et Jackson, 2004). L'empathie affective dépend donc largement de la manière dont les stimuli présents dans l'environnement sont perçus et traités par son observateur. Cela dit, plus un individu reproduit facilement des émotions perçues sur un visage, plus son niveau d'empathie est élevé, tel qu'évalué par un questionnaire (Balconi et Canavesio, 2013). La dimension cognitive de l'empathie désigne, quant à elle, la capacité de se mettre à la place de l'autre de sorte à mieux prédire ses actions et ses états mentaux (Decety, Michalska, et Kinzler, 2011). Cette dernière dimension fait appel à des processus plus complexes, dont les fonctions exécutives, et se réfère dans les études à la théorie de l'esprit (TdE) (Decety, 2011). De manière générale, la TdE correspond donc à la capacité à inférer et à attribuer des états mentaux à autrui et à soi-même. Elle contribue à la compréhension de l'autre en tant qu'individu différent de soi avec des croyances, intentions et sentiments qui lui sont propres (Bejanin, Laillier, Caillaud, Eustache, et Desgranges, 2016). Comme elle résulte d'un effort cognitif conscient, l'implication des fonctions exécutives est généralement suggérée dans le déploiement de cette faculté sociale (Rueda et Paz-Alonso, 2013).

Dès lors, selon cette perspective, l'empathie repose sur l'alliage d'un partage émotionnel automatique et de la capacité cognitive à adopter le point de vue subjectif de l'autre. Elle mobilise donc des ressources affectives et cognitives qui ne peuvent, individuellement, rendre compte de sa complexité. Néanmoins, chaque dimension (affective et cognitive) peut être initiée sans l'autre et s'étudier de manière isolée (Decety et Lamm, 2006; Shamay-Tsoory, 2011). En ce sens, les études proposent des trajectoires développementales distinctes selon qu'il s'agisse du pôle affectif ou cognitif de l'empathie (Sun, Luo, Zhang, Li et Li, 2017).

Développement de l'empathie

L'empathie est une habileté qui se développe et se raffine avec l'âge et par conséquent, avec la maturation du cortex cérébral (Greimel et al., 2010). De la petite enfance à l'âge adulte, elle émerge d'abord sous forme de « contagion émotionnelle » pour ensuite se complexifier et intégrer une composante cognitive permettant une distinction entre soi et l'autre (Cheng, Chen, Decety, 2014). Ainsi, la dimension affective de l'empathie se développe plus tôt que la dimension cognitive (Decety, 2011). À cet effet, après seulement quelques heures suivant leur naissance, les bébés réagissent aux pleurs de leurs congénères en pleurant à leur tour (Sagi et Hoffman, 1976; Simner 1971). À ce même âge, ils expriment aussi une plus grande détresse en regard des pleurs de leurs semblables que lorsqu'ils entendent leurs propres pleurs (Dondi, Simion, et Caltran, 1999). Enfin, à 10 semaines, ils parviennent à discriminer certaines expressions faciales émotionnelles, dont la colère, la joie et la tristesse, ainsi qu'à imiter certaines d'entre elles (e.g., colère et joie) (Haviland et Lewica, 1987). Ainsi, avant même d'être pleinement conscients qu'ils existent indépendamment des autres, les bébés sont en mesure d'exprimer une forme primitive d'empathie. Dans l'ensemble, ces manifestations précoces confèrent un rôle essentiel à l'imitation dans l'empathie et suggèrent, par le fait même, que son expression relève, au moins en partie, d'une prédisposition innée à répondre aux émotions des autres (Decety, 2010).

En revanche, l'ensemble des dimensions de l'empathie se développe généralement un peu plus tard lorsque l'enfant devient plus conscient de son environnement et apte à initier des interactions avec ce dernier (Decety, 2011). Ainsi, ce n'est que vers l'âge de trois ou quatre ans qu'il est en mesure de comprendre que les autres peuvent avoir des pensées et des désirs différents des siens, devenant alors capable de se mettre à la place de l'autre (Wellman, 2010). Considérant que cette habileté est principalement soutenue par l'intégrité des régions frontales du cerveau, son

développement se poursuit jusqu'au début de l'âge adulte, stade auquel elles atteignent leur pleine maturation (Decety, 2010). Or, au cours du vieillissement normal, ce sont ces mêmes régions qui subissent le plus précocement des changements (Sugiura, 2016). Dans ce contexte, puisque l'intégrité des lobes frontaux revêt une importance cruciale dans l'expression du comportement empathique (Light et al., 2009), il apparaît important d'explorer la trajectoire évolutive quant aux capacités d'empathie jusqu'à la sénescence.

Empathie et vieillissement

Bien que les études demeurent rares et parfois contradictoires concernant la caractérisation des capacités empathiques au cours du vieillissement normal, celles-ci suggèrent que l'empathie cognitive diminue progressivement (Henry, Phillips, Ruffman, et Bailey, 2013; Moran, 2013; Sun et al., 2017), alors que l'empathie émotionnelle demeure comparable, voire même améliorée chez les personnes âgées (Sun et al., 2017; Sze, Gyurak, Goodking, et Levenson, 2012; Ze, Thoma, et Suchan, 2014).

Une explication à l'origine de ces trajectoires différentes repose sur l'idée que l'empathie cognitive s'avère plus exigeante en termes d'effort mental que l'empathie émotionnelle. En effet, étant donné que l'empathie cognitive relève du déploiement des structures frontales, et que ces dernières apparaissent particulièrement vulnérables aux effets du temps, le risque de déclin de l'empathie cognitive s'accroîtrait au fil du vieillissement (Duval, Piolino, Bejanin, Eustache, et Desgranges, 2011). Pour certains auteurs, l'empathie cognitive réfère à la précision dans la reconnaissance des émotions (Wieck et Kunzmann, 2015), et celle-ci serait particulièrement affectée au cours du vieillissement, et ce, dès l'âge de 50 ans. En effet, une vaste littérature met en lumière la présence de difficultés significatives dans l'analyse et la reconnaissance des émotions

auprès de cette population (Isaacowitz et Stanley, 2011; Sullivan, Campbell, Hutton, et Ruffman, 2017). Or, ces processus sont aussi considérés comme des étapes préalables à l'habileté empathique et donc, des difficultés précoces dans le traitement et la reconnaissance des émotions pourraient en affecter son expression optimale (Marshall, Hudson, Jones, et Fernandez, 1995).

Par ailleurs, il y aurait une évolution plus favorable en ce qui concerne la composante émotionnelle de l'empathie, notamment parce qu'elle repose sur des mécanismes instinctifs, échappant le plus souvent à la conscience. Ainsi, de manière générale, les personnes âgées sont comparables (Bailey, Henry, et Von Hippel, 2008; Beadle et al, 2012), sinon supérieures à une population d'adultes d'âge moyen (24 à 45 ans) et de jeunes adultes (19 à 25 ans) sur le plan de cette composante, lorsqu'évaluée par le biais de questionnaires (Ze et al., 2014). Ces résultats sont d'ailleurs compatibles avec la théorie de la sélectivité socio-émotionnelle, qui constitue un modèle théorique prédominant dans les études sur le vieillissement. Selon cette théorie, les personnes âgées, faisant preuve d'une plus grande sagesse et prenant conscience que le temps restant à vivre diminue, poursuivent des buts centrés sur une meilleure régulation émotionnelle pour ainsi limiter les expériences désagréables (Carstensen, 2006). Elles investissent donc davantage de ressources pour améliorer la qualité de leurs relations et portent préférentiellement attention aux informations positives qu'à celles à connotation négative (Carstensen, 2006; Scheibe et Carstensen, 2010). Ce processus renvoie au biais de positivité lié à l'âge et contribuerait ainsi au comportement empathique. Cela dit, malgré un déclin cognitif global et progressif, les personnes âgées favoriseraient activement leur bien-être social et émotionnel grâce à une régulation plus fréquente de leurs émotions ainsi qu'à une plus grande propension à adopter des comportements prosociaux envers les autres (Beadle, Sheehan, Dahlben, et Gutchess, 2013; Makowski, Sperduti, Blanchet, Nicolas, et Piolino, 2015; Sze et al., 2012).

En dépit de ces dissemblances quant aux trajectoires proposées des deux composantes de l'empathie, les données scientifiques proviennent largement de questionnaires, qui reposent sur une perception subjective de la personne interrogée. Par ailleurs, certaines contradictions observées dans la littérature pourraient relever notamment de particularités méthodologiques (Sun et al., 2017). À cet égard, bien que les études s'intéressent au même construit, les disparités entre les résultats obtenus à travers celles-ci sont principalement dues à la mesure, au type de tâche et au devis de recherche privilégiés. Par exemple, selon Grünh, Rebucal, Diehl, Lumley et Labouvie-Vief (2008), les changements de l'empathie dans le vieillissement normal refléteraient davantage des effets de cohorte plutôt que des effets d'âge dans les études transversales. En effet, ces derniers mettent plutôt en lumière une absence de différence significative dans l'évolution des capacités d'empathie suivant un devis longitudinal. Néanmoins, l'interprétation qui en découle demeure limitée puisqu'elle repose sur une mesure auto-rapportée qui ne permet pas d'exclure le risque de désirabilité sociale (Fan et Han, 2008). Par conséquent, ces dernières années, les tâches expérimentales prévalent sur l'emploi de questionnaires, ou du moins, elles sont combinées à ceux-ci, pour étudier l'empathie afin d'offrir un portrait plus objectif.

Controverses quant à la trajectoire présumée de la composante affective de l'empathie

Dans le cadre de ce projet, un intérêt particulier est porté sur l'empathie émotionnelle, qui demeure plus rarement étudiée que l'empathie cognitive. Bien qu'une majorité d'études indiquent une préservation de la composante affective de l'empathie avec l'âge, les mesures objectives pour l'étudier ne mettent pas en évidence une trajectoire linéaire au cours du vieillissement. Dans le domaine des neurosciences, l'empathie émotionnelle repose sur un lien direct entre la perception

et l'action. Ainsi, selon la théorie de la simulation, la perception d'une émotion activerait automatiquement chez son observateur les mêmes représentations somatiques et neuronales liées à son expérience directe (Preston et De Waal, 2002). Autrement dit, les mêmes muscles faciaux et régions cérébrales inhérentes à son expression s'activeraient spontanément lors de l'observation sur autrui, facilitant ainsi sa reconnaissance et sa compréhension. L'empathie émotionnelle résulterait ainsi d'un mécanisme de résonance motrice et affective dont l'imitation en serait son principal conducteur. Or, en vieillissant, les réponses somatiques et neuronales automatiques, qui témoignent de l'empathie émotionnelle, n'apparaissent plus aussi synchrones, comme le suggèrent les preuves empiriques (Hühnel, Fölster, Werheid, et Hess, 2014; Chen, Chen, Decety et Cheng, 2014). En ce sens, les effets de l'âge sur l'empathie émotionnelle pourraient être caractérisés par des patrons d'activation spécifiques selon qu'il s'agisse d'une mesure issue du système nerveux périphérique ou central.

D'une part, les données issues de l'électromyographie (EMG), dérivées de la contraction de muscles, montrent que les réponses somatiques automatiques inhérentes à l'observation d'expressions faciales émotionnelles (e.g., joie, colère, tristesse, dégoût) sont comparables au fil de l'âge (Bailey et Henry, 2009; Hühnel et al., 2014), suggérant une préservation de la réponse affective, telle que reflétée par un comportement imitatif intact. De façon analogue, l'augmentation de certains indices physiologiques, dont le rythme cardiaque et la réponse électrodermale durant l'observation de films visant à induire une réponse empathique, chez une population âgée de 60 à 80 ans, suggère une empathie affective accrue chez les seniors (Sze et al., 2012).

D'autre part, les données issues de l'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (IRMf), qui traduisent l'activité du cerveau lors de tâches cognitives, suggèrent plutôt une

diminution de l'empathie émotionnelle liée à l'âge (Chen et al., 2014; Riva et al., 2018). Pour ces chercheurs, ce patron d'évolution serait le reflet du déclin de certaines régions corticales fonctionnellement liées à l'habileté empathique. Plus spécifiquement, une moindre activation de l'insula et du cortex cingulaire dans une tâche d'empathie pour la douleur (Chen et al., 2014), de même qu'une moindre activation de l'insula antérieure dans une tâche d'empathie face au toucher, sont interprétées comme une perturbation de l'empathie émotionnelle chez les seniors (Riva et al., 2018). À la lumière de ces résultats, la réponse affective serait amenée à diminuer au cours du vieillissement normal exclusivement dans son expression neuronale.

Découverte des neurones miroirs et leur rôle dans l'empathie

À notre connaissance, seule l'IRMf a été utilisée pour caractériser les bases neurales de l'empathie auprès de la population âgée (Chen et al., 2014; Riva et al., 2018). Néanmoins, la récente découverte dans le champ des neurosciences d'un système de neurones miroirs présent chez l'Homme apporte des éléments nouveaux relatifs à la conceptualisation de l'empathie (Arnett, Roach, Elzy, et Jelsone-Swain, 2018; Li et al., 2017; Peled-Avron, Goldstein, Yellinek, Weissman-Fogel, et Shamay-Tsoory, 2017).

Depuis leur découverte chez le singe, les neurones miroirs constituent un sujet d'intérêt suscitant à la fois engouement et controverses au sein de la communauté scientifique. En effet, bien qu'il existe aujourd'hui des preuves directes en faveur de l'existence d'un tel système chez l'Homme (Molenberghs, Cunnington, et Mattingley, 2012), son rôle dans les comportements humains demeure largement débattu (Decety, 2010). Initialement, ces cellules ont retenu l'attention pour leurs propriétés dites miroirs puisqu'elles s'activent de façon semblable lors de l'exécution, de l'observation, et même de l'imagination d'une action. Ainsi, ces neurones joueraient un rôle

prépondérant dans le codage des actions et par le fait même, faciliteraient l'accès à leur intention (Bonini, 2017; Cook, Bird, Catmur, Press, et Heyes, 2014). L'implication présumée du système de neurones miroirs (SNM) dans la cognition sociale, et plus particulièrement dans l'empathie, repose justement sur le lien entre la perception et l'action. Par exemple, plusieurs données empiriques ont montré que l'observation de la douleur ou du dégoût chez autrui active les mêmes régions cérébrales impliquées dans son expérience directe (Fan, Duncan, de Greck, et Northoff, 2011; Jackson, Meltzoff, et Decety, 2005; Wiecker et al., 2003). De la même façon, l'observation et l'imitation de différentes expressions faciales émotionnelles engagent des populations neuronales qui se recouvrent, et ce, principalement au niveau des cortex moteur et sensorimoteur (Carr, Iacoboni, Dubeau, Mazziotta, et Lenzi, 2003; Rayson, Bonaiuto, Ferrari, et Murray, 2016). Ainsi, comme l'empathie se déploie préalablement par la voie d'un mécanisme de représentation de l'action, certains chercheurs assument qu'elle pourrait être en partie tributaire de l'activité des neurones miroirs (Iacoboni, 2009; Hoenen, Lübke, et Pause, 2015).

À l'origine, l'hypothèse la plus répandue conférait au SNM un rôle clé dans l'empathie, puisqu'il permettrait une simulation interne des actions observées chez autrui de façon à pouvoir en dégager une compréhension (Rizzolatti et Sinigaglia, 2010). Pertinemment, cette simulation interne représenterait un processus précoce de l'empathie affective en permettant une activation automatique des régions impliquées dans l'expression de l'émotion perçue, ce qui faciliterait le partage expérientiel entre soi et l'autre. Cette hypothèse, bien qu'encore débattue à ce jour, est étayée par certaines études qui montrent que les personnes présentant des capacités d'empathie supérieures présentent également un patron d'activation du SNM plus important (Brown, Gonzalez-Liencre, Tas, et Brüne, 2016; Peled-Avron et al., 2017; Woodruff, Martin, et Bilyk, 2011). Dès lors, considérant que les processus de perception et d'expression des émotions partagent

un codage neural commun, et que ce dernier suppose au moins en partie l'implication des neurones miroirs, certains chercheurs leur confèrent un rôle dans l'habileté empathique, et plus spécifiquement, dans sa composante émotionnelle. Étant donné que l'activité des cellules miroirs se traduit par une résonance motrice, l'EEG constitue une méthode d'évaluation pertinente pour mesurer ce phénomène.

L'électroencéphalographie comme mesure de la résonance motrice

L'électroencéphalographie (EEG), qui possède une excellente résolution temporelle de l'ordre de la milliseconde, est une méthode d'investigation non invasive privilégiée pour quantifier l'activité cérébrale (Luck, 2005). On sait depuis longtemps que les cellules corticales émettent un signal électrique en permanence et de manière spontanée, celui-ci pouvant être capté par des électrodes au niveau du cuir chevelu (Swartz et Goldensohn, 1998). Plus particulièrement, ce signal est représenté à l'EEG par différentes oscillations qui peuvent se décomposer en bandes de fréquences distinctes auxquelles sont associés une fréquence et un état physiologique particulier. Le spectre du signal ainsi obtenu se superpose en cinq bandes, soit delta (<4Hz), thêta (4-7Hz), alpha (8-13Hz), bêta (14-30Hz) et gamma (>30Hz), chacune d'elles correspondant au déploiement de régions cérébrales spécifiques. Par exemple, les ondes gamma et bêta sont essentiellement localisées dans les lobes frontaux, alors que les ondes alpha sont principalement générées par le cortex occipital (Klimesch, 1999). Ainsi, leur modulation respective pourrait constituer un indicateur de l'activité de populations neuronales spécifiques dans la réalisation de tâches cognitives ou le vécu d'états mentaux.

Typiquement, c'est au sein de la bande de fréquences alpha, et plus particulièrement par l'intermédiaire du rythme mu ou rythme sensorimoteur, que l'activité des neurones miroirs est

étudiée (Hobson et Bishop, 2017). Plus particulièrement, le rythme mu se caractérise par des oscillations cérébrales entre 8 et 13Hz dont l'activité maximale est enregistrée à partir des cortex moteur et sensorimoteur (Pineda, 2005). Lorsqu'un mouvement est initié, observé ou même seulement imaginé, le rythme mu s'active ou se désynchronise, entraînant alors une diminution de sa puissance spectrale à l'EEG (Neuper, Wörtz, et Pfurtscheller, 2006). Ainsi, la désynchronisation du rythme mu correspond à un plus grand déploiement neuronal des régions fonctionnellement liées aux expériences motrices et elle pourrait illustrer le degré de résonance entre soi et l'autre (Pineda, 2005).

Rythme mu et empathie

En accord avec la théorie de la simulation qui accorde un rôle essentiel à l'imitation motrice dans la perception et l'expression des émotions, le recours au rythme mu apparaît utile pour étudier des habiletés socialement plus complexes, dont l'empathie. En effet, des patrons d'activation communs sont observés dans l'expression et la perception d'émotions, ces derniers se reflétant par une désynchronisation du rythme mu comparable. De plus, le lien entre l'empathie et le recrutement du SNM est soutenu par plusieurs données empiriques qui montrent une association entre la modulation du rythme mu et le résultat à des questionnaires d'empathie (Brown et al., 2016; Peled-Avron et al., 2017; Woodruff et al., 2011). À cet égard, plus la suppression du rythme mu était importante, plus les capacités d'empathie auto-rapportées étaient élevées.

Enfin, d'autres facteurs qui influencent à leur tour la modulation du rythme mu sont à considérer. Par exemple, Moore, Gorodnitsky et Pineda (2012) ont objectivé une désynchronisation plus importante du rythme mu en réponse à l'observation d'expressions faciales qu'envers des stimuli contrôlés (e.g. observation de bâtiments). Dans un paradigme exposant les participants à l'observation d'une situation douloureuse (e.g. main touchée par une aiguille) et d'une situation

neutre (e.g. main touchée par un cure-oreille), il a aussi été trouvé que la condition émotionnelle engendrait une plus grande suppression du rythme mu chez les participants (Perry, Bentin, Bartal, Lamm, et Decety, 2010). Enfin, Yang, Decety, Lee, Chen, et Cheng (2009) ont montré une différence entre les sexes dans la réponse empathique, telle que reflétée par une suppression accentuée du rythme mu chez les femmes. Ce dernier résultat appuie notamment l'hypothèse d'une supériorité féminine dans le décodage des émotions et dans l'habileté empathique qui semble se maintenir au cours de la vie (Christov-Moore et al., 2014; O'Brien, Konrath, Grünh, et Hagen, 2012; Tracy et Giummarra, 2017).

Ainsi, de manière générale, la modulation du rythme mu pourrait dépendre de certains facteurs, dont notamment la nature et la valence des stimuli, de même que le sexe de l'observateur (Moore et al., 2012; Perry et al., 2010; Yang et al., 2009). Dans l'ensemble, ces résultats sont importants puisqu'ils sont en partie liés à l'expérience empathique et permettent d'orienter davantage nos hypothèses. Néanmoins, à notre connaissance, aucune étude ne semble rendre compte de la modulation du rythme mu, et donc indirectement de l'intégrité du SNM, en fonction de l'âge au sein d'un vieillissement normal. Pourtant, comme le rythme mu semble témoigner du déploiement des neurones miroirs et que ceux-ci sont présumément considérés en tant que base neurophysiologique de l'empathie, il apparaît pertinent et actuel d'utiliser cette mesure pour caractériser les capacités d'empathie des individus selon leur sexe et suivant une perspective intergénérationnelle.

Objectifs et hypothèses

Le présent essai doctoral vise donc à recourir à une mesure objective robustement liée à l'expérience empathique, soit le rythme mu, afin d'étudier l'empathie dans le vieillissement

normal. Plus spécifiquement, ce projet de recherche vise à explorer, auprès de jeunes adultes et de seniors, la modulation du rythme mu, reflétée sous forme de résonance motrice, dans un paradigme d'observation d'expressions faciales émotionnelles (EFE) de joie, de peur et neutres. De plus, comme il semble exister une disparité en faveur des femmes dans le niveau d'empathie perçu et objectivé, la présente étude s'intéresse aussi à caractériser l'effet de l'âge entre les sexes dans l'habileté empathique.

Au terme de cette étude, nous nous attendons à observer une désynchronisation du rythme mu moins prononcée chez le groupe des seniors en réponse aux stimuli à valence émotionnelle ainsi qu'un score inférieur au quotient d'empathie, ce qui appuierait l'hypothèse d'une diminution de l'empathie au cours de la vie. Or, comme les femmes présenteraient de meilleures capacités d'empathie, nous supposons qu'une désynchronisation accentuée du rythme mu soit objectivée chez ces dernières, et ce, peu importe leur âge. Nous prévoyons aussi trouver une association négative entre la désynchronisation du rythme mu et le résultat obtenu au quotient d'empathie (QE), qui reflétera qu'une désynchronisation accrue est reliée à des capacités d'empathie supérieures.

Article

Substrats neurophysiologiques du traitement émotionnel de l'information visuelle au cours du
vieillessement normal

Josiane Héroux¹, Samuel Guay¹, Sven Joubert¹, Virginie L. Blanchette², Christelle Beaulieu² et

Louis De Beaumont¹

Université de Montréal¹, Université du Québec à Trois-Rivières²

Note sur les auteurs

Josiane Héroux, Département de psychologie, Université de Montréal;

Samuel Guay, Département de psychologie, Université de Montréal;

Sven Joubert, Ph.D., Département de psychologie, Université de Montréal

Virginie Laroche Blanchette, Département de psychologie, Université du Québec à Trois-
Rivières;

Christelle Beaulieu, Département de psychologie, Université du Québec à Trois-Rivières

Louis De Beaumont, Ph.D., Département de chirurgie, Université de Montréal

Manuscrit en préparation pour soumission à la revue *Social Neuroscience*

Introduction

L'intérêt pour l'étude de l'empathie est partagé par plusieurs disciplines compte tenu de l'étendue d'avantages et de bienfaits que cette faculté sociale entraîne chez les individus. Au quotidien, l'empathie favorise la création de liens sociaux et encourage la collaboration et l'entraide (Decety et Svetlova, 2012). Elle constitue une composante fondamentale à la coexistence harmonieuse entre les individus et exerce un rôle important dans la socialisation de la jeune enfance jusqu'à la fin de vie (Tousignant, Eugène, et Jackson, 2017). D'ailleurs, un déficit au niveau de cette habileté est associé à un fonctionnement social réduit (Bailey, Henry, et Von Hippel, 2008). D'un point de vue développemental, l'empathie émerge instinctivement sous forme de contagion émotionnelle pour ensuite se raffiner avec l'âge et à mesure de la maturation des processus exécutifs (Decety et Svetlova, 2012). Plus spécifiquement, elle relève d'une disposition automatique à expérimenter et à partager une émotion perçue ainsi que d'un effort cognitif conscient pour comprendre et imaginer l'état affectif d'autrui (Decety et Jackson, 2004). Or, en vieillissant, les processus automatiques et contrôlés sous-tendus dans l'empathie semblent évolués différemment, laissant place à des trajectoires développementales distinctes (Wieck et Kunzmann, 2015). À cet égard, les études suggèrent que l'empathie cognitive diminue progressivement (Henry, Phillips, Ruffman, et Bailey, 2013; Moran, 2013; Sun, Luo, Zhang, Li et Li, 2017) alors que l'empathie émotionnelle demeure comparable, voire même améliorée au fil du temps (Sun et al., 2017; Sze, Gyurak, Goodking, et Levenson, 2012; Ze, Thoma, et Suchan, 2014). Une explication à l'origine de ces trajectoires différentes repose sur l'idée que l'empathie cognitive s'avère plus exigeante en termes d'effort mental et donc dépendante de l'intégrité des lobes frontaux qui deviennent plus vulnérables aux effets du temps que l'empathie émotionnelle. Cette dernière suivrait pour sa part une évolution plus favorable chez la population âgée qui, consciente d'une perspective de temps plus limitée, favoriserait activement leur bien-être social et émotionnel grâce

à une régulation plus fréquente de leurs émotions ainsi qu'à une plus grande propension à adopter des comportements prosociaux (Beadle, Sheehan, Dahlben, et Gutchess, 2013; Makowski, Sperduti, Blanchet, Nicolas, et Piolino, 2015; Sze et al., 2012). Néanmoins, dans un contexte de vieillissement normal, l'évidence demeure rare et provient largement de questionnaires (Pernigo et al., 2015), limitant ainsi l'interprétation des effets de l'âge sur l'empathie à une perception subjective et potentiellement biaisée par la désirabilité sociale des participants.

Ces dernières années, l'étude de l'empathie par des mesures plus objectives suscite un regain d'intérêt et représente une nouvelle avenue en recherche (Narme et al., 2010; Pernigo et al., 2015). Ainsi, les plus récentes études s'intéressant à l'empathie privilégient les tâches expérimentales, ou du moins combinent cette mesure à l'emploi d'un questionnaire, de sorte à offrir un portrait plus objectif de son évolution. Comme l'empathie émotionnelle demeure moins étudiée que l'empathie cognitive, un intérêt particulier est porté à cette dimension dans cette étude. À cet égard, bien qu'une préservation de la composante affective semble prévaloir avec l'âge, les mesures objectives pour l'étudier ne font pas état d'une trajectoire linéaire au cours du vieillissement. Dans sa conceptualisation moderne, l'empathie émotionnelle repose sur un lien direct entre la perception et l'action. Ainsi, la perception d'une émotion activerait automatiquement chez son observateur les mêmes représentations somatiques et neuronales liées à son expérience directe (Preston et De Waal, 2002). De fait, les mêmes muscles faciaux et régions cérébrales inhérentes à son expression s'activeraient spontanément, facilitant ainsi sa reconnaissance et sa compréhension. L'empathie émotionnelle résulterait ainsi d'un mécanisme de résonance motrice et affective dont l'imitation en serait son principal conducteur. Or, en vieillissant, les réponses somatiques et neuronales automatiques, qui témoignent de l'empathie émotionnelle, n'apparaissent plus aussi synchrones (Hühnel, Fölster, Werheid, et Hess, 2014; Chen, Chen, Decety et Cheng,

2014. À ce chapitre, les effets de l'âge sur l'empathie émotionnelle seraient caractérisés par des patrons d'activation spécifiques selon qu'il s'agisse d'une mesure issue du système nerveux périphérique ou central.

D'une part, les données issues de l'électromyographie (EMG), dérivées de la contraction de muscles, montrent que les réponses somatiques automatiques inhérentes à l'observation d'expressions faciales émotionnelles (e.g., joie, colère, tristesse, dégoût) sont comparables au fil de l'âge (Bailey et Henry, 2009; Hühnel et al., 2014), suggérant une préservation de la réponse affective, telle que reflétée par un comportement imitatif intact. De façon analogue, l'augmentation de certains indices physiologiques, dont le rythme cardiaque et la réponse électrodermale, durant l'observation de films visant à induire une réponse empathique, chez une population âgée de 60 à 80 ans suggère une empathie affective accrue chez les seniors (Sze et al., 2012). D'autre part, les données issues de l'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (IRMf), qui traduisent l'activité du cerveau lors de tâches cognitives, suggèrent plutôt une diminution de l'empathie émotionnelle liée à l'âge (Chen et al., 2014; Riva et al., 2018). Pour ces chercheurs, ce patron d'évolution serait le résultat du déclin lié à l'âge de certaines régions corticales fonctionnellement liées à l'habileté empathique. Plus spécifiquement, une moindre activation de l'insula et du cortex cingulaire dans une tâche d'empathie pour la douleur (Chen et al., 2014), de même qu'une moindre activation de l'insula antérieure dans une tâche d'empathie face au toucher, sont interprétées comme une perturbation de l'empathie émotionnelle chez les seniors (Riva et al., 2018). Ainsi, à la lumière de ces résultats, la réponse affective serait amenée à diminuer au cours du vieillissement normal exclusivement dans son expression neuronale.

Malgré le recours à des mesures objectives, des résultats inconstants subsistent. Une explication possible à l'origine de ces disparités relève de la nature des réponses inhérentes à l'empathie émotionnelle. Plus spécifiquement, comme la réponse affective semble diminuée au fil de l'âge uniquement au terme de son expression neuronale, cette étude s'intéresse à caractériser l'évolution de substrats neuronaux sous-tendus dans l'empathie suivant une perspective intergénérationnelle. Au meilleur de notre connaissance, seule l'IRMf a été utilisée pour caractériser les bases neurales de l'empathie auprès de la population âgée (Chen et al., 2014; Riva et al., 2018). Pourtant, d'autres techniques, dont l'électroencéphalographie (EEG), se prêtent plus facilement à son étude puisqu'elle offre un reflet en temps réel de la réponse neuronale inhérente à une stimulation particulière (Neumann et Westbury, 2011).

Plus particulièrement, l'électroencéphalographie (EEG) permet de quantifier objectivement l'activité cérébrale lors de la présentation de stimuli de natures variées (e.g., visuels ou auditifs). Au quotidien, les expressions faciales constituent un puissant moyen pour communiquer nos émotions faisant en sorte qu'elles sont souvent utilisées sous forme de stimuli pour étudier des habiletés socialement complexes, dont l'empathie (Moore, Gorodnitsky, et Pineda, 2012; Rayson, Bonaiuto, Ferrari et Murray, 2016). L'EEG a d'ailleurs permis de valider que l'observation d'émotions exprimées par le visage entraîne une activation cérébrale comparable des régions corticales impliquées et des muscles sollicités dans leur expression (Rayson et al., 2016). Pour certains chercheurs, cette activation neuronale relève de l'activation de cellules particulières, communément appelées neurones miroirs, dont la principale fonction permet d'accéder à la signification des actions. Comme elles s'activent de façon semblable lors de l'exécution, de l'observation et même de l'imagination d'une action, et comme l'empathie passe préalablement par un mécanisme de résonance entre soi et l'autre, certains assument que l'habileté empathique

pourrait être en partie tributaire de l'activité des neurones miroirs (Hoenen, Lübke, et Pause, 2015). Bien que l'existence même des neurones miroirs demeurent débattue à ce jour, leur implication dans l'empathie est étayée par des études montrant que des capacités supérieures d'empathie sont associées à un patron d'activation plus important du système de neurones miroirs (Brown, Gonzalez-Liencre, Tas, et Brüne, 2016; Peled-Avron, Goldstein, Yellinek, Weissman-Fogel, et Shamay-Tsoory, 2017; Woodruff, Martin, et Bilyk, 2011).

Typiquement, c'est au sein de la bande de fréquences alpha, et plus particulièrement par l'intermédiaire du rythme mu ou rythme sensorimoteur, que l'activité des neurones miroirs est étudiée (Hobson et Bishop, 2017). Celui-ci se caractérise par des oscillations entre 8 et 13 Hz dont l'activité maximale est issue des cortex moteur et sensorimoteur (Pineda, 2005). Lorsqu'un mouvement est initié, observé ou même seulement imaginé, le rythme mu s'active ou se désynchronise, entraînant alors une diminution de sa puissance spectrale à l'EEG (Neuper, Wörtz, et Pfurtscheller, 2006). Dans le cadre du traitement et de l'expression d'une émotion, un patron d'activation comparable est observé, ce qui valide son recours dans l'étude de l'empathie. Ainsi, une suppression plus importante du rythme mu est associée à des capacités d'empathie supérieures (Brown, et al., 2016; Peled-Avron et al., 2017; Woodruff et al., 2011), telle que mesurée par le biais de questionnaires d'empathie validés.

En plus de l'incidence du niveau d'empathie sur le rythme mu, la nature et la valence des stimuli de même que le sexe de l'observateur semblent influencer à leur tour sa modulation, témoignant alors de sa sensibilité à certains facteurs. Ainsi, une plus grande désynchronisation du rythme mu est observée pour des stimuli de visages en comparaison à des stimuli non humains (Moore et al., 2012), ainsi que pour des stimuli douloureux comparativement à des stimuli neutres

(Perry, Bentin, Bartal, Lamm, et Decety, 2010). Enfin, dans une tâche d'empathie, Yang, Decety, Lee, Chen, et Cheng (2009) ont observé des différences de sexe dans la suppression du rythme mu, ce qui appuie la thèse d'une supériorité féminine dans le décodage des émotions et dans l'habileté empathique. Cet écart entre le sexe semble d'ailleurs se maintenir au fil du temps, créant alors des différences entre les hommes et les femmes dans la disposition empathique (Christov-Moore et al., 2014; O'Brien, Konrath, Grühn, et Hagen, 2012; Tracy et Giummarra, 2017). Dans l'ensemble, ces résultats sont importants puisqu'ils sont aussi liés à l'expérience empathique et permettent d'orienter davantage nos hypothèses.

Néanmoins, à notre connaissance, aucune étude ne rend compte des effets de l'âge sur la réponse neurophysiologique inhérente à l'empathie. Aucune étude non plus ne semble caractériser la modulation du rythme mu, et donc indirectement l'intégrité du SNM, en fonction de l'âge et du sexe au sein du vieillissement normal. Pourtant, comme le vieillissement représente une période critique sur le plan socio-affectif, et parce que l'empathie pourrait faciliter les transitions et modifications importantes qui surviennent dans un contexte de fin de vie qui approche (Wieck et Kunzmann, 2015), il apparaît pertinent d'utiliser une mesure objective et actuelle, robustement liée à l'expérience empathique, soit le rythme mu, pour étayer les capacités d'empathie de manière intergénérationnelle. Plus spécifiquement, il sera possible de comparer la résonance motrice inhérente à l'observation d'expressions faciales émotionnelles (EFE) de joie, de peur et neutres chez des jeunes adultes (18-25 ans) et des seniors (55-75 ans). La modulation du rythme mu sera mesurée pour caractériser les effets de l'âge et du sexe dans l'empathie face à différentes émotions. Pertinemment, comme certaines données empiriques suggèrent une association entre le niveau d'empathie perçu et objectif (Brown et al., 2016; Peled-Avron et al., 2017; Woodruff et al., 2011), un intérêt sera porté envers la réponse neurale sous-tendue dans l'empathie et le score obtenu à un

questionnaire validé à cet effet pour l'ensemble des participants (Lepage, Lortie, Deal, et Théoret, 2014).

Suivant les changements qui s'opèrent en vieillissant au niveau cérébral et en accord avec les évidences issues de l'IRMf, il est attendu qu'une désynchronisation du rythme mu moins prononcée soit obtenue chez le groupe d'adultes âgés face aux stimuli à valence émotionnelle. Néanmoins, puisqu'il est suggéré que les femmes réagissent plus fortement à l'observation d'émotions expérimentées par autrui (Tracy et Giummarra, 2017), il est supposé qu'une désynchronisation plus importante soit objectivée chez ces dernières. Enfin, nous nous attendons à trouver une association entre la désynchronisation du rythme mu et le résultat obtenu au quotient d'empathie (QE), lequel sera plus faible chez la population âgée et masculine.

Méthodologie

Participants

Les données ont été recueillies auprès de 67 participants qui ont été répartis selon leur âge dans deux groupes distincts, l'un incluant des jeunes adultes âgés entre 18 et 25 ans et l'autre des seniors âgés entre 55 et 75 ans. De ce nombre, une jeune adulte femme et un homme senior ont été exclus d'emblée de l'étude, en raison d'un score trop élevé aux questionnaires de dépistage de symptômes dépressifs et/ou anxieux (se référer à la section respective pour plus de détails). L'échantillon final était donc constitué de 65 personnes, dont 33 jeunes adultes (*Moyenne d'âge* = 20,03; *ÉT* = 1,47; 14 femmes et 19 hommes) et 32 seniors (*Moyenne d'âge* = 62,15; *ÉT* = 4,35; 17 femmes et 15 hommes). Tous les participants étaient droitiers et avaient une vision normale ou corrigée par des lentilles ou des lunettes. Les deux groupes étaient aussi équivalents selon leur niveau de scolarité. Le Tableau I présente les caractéristiques démographiques et cliniques de l'échantillon. Seul l'âge entre les groupes était significativement différent, $F(1, 61) = 2684,07, p <$

,001. Le recrutement s'est effectué différemment pour chacun des groupes. Plus spécifiquement, les jeunes adultes ont été sélectionnés à partir d'une banque de données de noms, déjà constituée, d'étudiants intéressés à participer à des études menées par divers laboratoires du groupe de recherche Cognition, Neurosciences, Affect et Comportement (COGNAC) de l'Université du Québec à Trois-Rivières (UQTR). Les seniors ont été recrutés par le biais d'une publicité sur la page de l'Université du Troisième Âge (UTA) de Trois-Rivières ainsi qu'à l'aide d'affiches publicitaires apposées dans les classes de l'UTA.

Tableau 1.

Caractéristiques démographiques et cliniques des participants

		Âge	Niveau de scolarité	BDI-II	BAI
Seniors (55-75 ans)	Femmes (n = 17)	61,69 ± 3,77	14,82 ± 2,58	3,24 ± 2,54	3,76 ± 3,38
	Hommes (n = 15)	62,67 ± 5,01	14,13 ± 2,20	3,00 ± 3,44	4,20 ± 4,20
	Total (n = 32)	62,15 ± 4,35	14,50 ± 2,40	3,12 ± 2,95	3,97 ± 3,73
Jeunes adultes (18-25 ans)	Femmes (n = 14)	20,01 ± 1,22	14,21 ± 1,59	4,79 ± 2,69	6,64 ± 3,61
	Hommes (n = 19)	20,04 ± 1,66	13,74 ± 1,66	2,79 ± 2,02	3,84 ± 3,32
	Total (n = 33)	20,03 ± 1,47	13,94 ± 1,62	3,64 ± 2,50	5,03 ± 3,67
ANOVAs 2x2	GROUPE * SEXE F(1, 61) =	0,346 (p = ,559)	0,04 (p = ,836)	1,74 (p = ,193)	3,21 (p = ,078)
	GROUPE F(1, 61) =	2684,07 (p < ,001)	0,97 (p = ,330)	1,005 (p = ,168)	1,95 (p = ,320)
	SEXE F(1, 61) =	0,39 (p = ,535)	1,30 (p = ,259)	2,79 (p = ,195)	1,72 (p = ,100)

BDI-II = Beck Depression Inventory-II; BAI = Beck Anxiety Inventory;
Les nombres représentent Moyenne ± écart-type

Procédure

Un premier contact a été fait par téléphone avec chaque participant potentiel afin d'explorer leurs antécédents médicaux et leur état de santé actuel et ainsi valider leur éligibilité. Pour prendre part à l'étude, les participants ont satisfait les critères suivants: absence d'antécédents de traumatisme craniocérébral ou de commotion cérébrale, absence d'antécédents d'abus d'alcool ou de substance illicite, aucun problème de santé nécessitant une prise de médication régulière, de trouble psychiatrique, et de trouble d'apprentissage diagnostiqué. Une seule rencontre de 60 minutes a été nécessaire durant laquelle des questionnaires ont été complétés et la tâche expérimentale a été administrée. Tous les participants ont préalablement complété un formulaire de consentement. Une compensation financière de 50\$ leur a été remise à la fin de l'expérimentation pour leur participation ainsi que pour couvrir les frais de déplacement encourus. Cette étude a obtenu l'approbation du comité d'éthique institutionnel de l'Université du Québec à Trois-Rivières et de l'Université de Montréal.

Instruments de mesure

Questionnaires. Comme il a été démontré que l'humeur d'une personne influence le niveau d'empathie exprimé envers autrui (Li, Meng, Li, Yang, et Yuan, 2017), des questionnaires à cet effet ont été complétés par les participants. L'Inventaire de dépression de Beck (BDI-II : Beck, Steer, et Brown, 1996) et l'Inventaire d'anxiété de Beck (BAI : Beck, Epstein, Brown, et Steer, 1988) comportent chacun 21 items et servent à mesurer la sévérité des symptômes associés à la dépression clinique et à l'anxiété clinique, respectivement. Au terme de cette étude, les participants ayant rapporté des symptômes modérés à sévères de dépression et/ou d'anxiété ont été exclus. Suivant ce critère, deux participants dont une jeune femme (BAI = 17) et un homme senior (BDI-II = 21) ont été retirés de l'échantillon.

Le Quotient d'Empathie (QE : Baron-Cohen et Wheelwright, 2004) dans sa version française a été complété pour l'obtention d'une mesure auto-rapportée de l'empathie. Il s'agit d'un questionnaire de 60 items dont les deux tiers évaluent spécifiquement l'empathie, alors que le tiers restant regroupe des questions distractives pour éviter la focalisation du répondant sur la dimension empathique de l'outil. Les réponses sont données sur une échelle de Likert de quatre points, allant de fortement en désaccord à fortement en accord. Le score obtenu varie entre 0 et 80 où le niveau d'empathie s'accroît sur ce continuum. Un score inférieur à 33 représente un niveau faible, un score entre 33 à 52 correspond à un niveau modéré et un score supérieur à 52 reflète un niveau élevé d'empathie. Sa validation en français présente de bonnes qualités psychométriques, tant au niveau de sa fidélité ($r = 0,97$) que de sa cohérence interne ($\alpha = 0,92$) (Lepage, Lortie, Taschereau-Dumouchel, et Théoret, 2009).

Tâche d'empathie face à des expressions faciales émotionnelles (EFE). Chaque participant a été accueilli et invité à s'asseoir sur une chaise devant un ordinateur placé de telle sorte qu'une distance d'environ 70 cm séparait les yeux du participant de l'écran dans une salle d'expérimentation faiblement éclairée. Les principales consignes étaient de se tenir droit, de garder les yeux ouverts et d'éviter de bouger ou de contracter leur corps durant tout le processus d'acquisition des données électrophysiologiques. La procédure expérimentale comportait cinq blocs de 42 clips vidéo entre lesquels de courtes pauses d'une durée laissée à la discrétion du participant ont été insérées. La tâche était reprise par le participant en appuyant sur la barre d'espacement du clavier d'ordinateur.

Pour chaque bloc, 14 EFE de peur, 14 EFE de joie et 14 EFE neutres ont été présentées à l'ordinateur selon un ordre aléatoire. Les stimuli présentés étaient des visages dynamiques et en couleur, exprimés par sept acteurs et sept actrices, provenant d'une banque standardisée d'expressions faciales émotionnelles (Simon, Craig, Gosselin, Belin, et Rainville, 2008). La Figure I représente un exemple standard d'un acteur qui présentait les trois types d'EFE (peur, joie, neutre). Les participants devaient tenter d'expérimenter l'émotion exprimée à l'écran, et ce, pour tous les essais de la tâche. Ils devaient aussi conserver une expression faciale neutre durant la présentation des différents stimuli de sorte que la tâche mesure principalement l'activité cérébrale inhérente à la perception d'émotions. Chaque essai débutait par la présentation d'un clip de 500 ms et était suivi d'un intervalle de 1500 ms au cours duquel aucun stimulus n'était présenté. Une croix de fixation centrale était ensuite présentée à l'écran pour une durée aléatoire (entre 1000 ms et 2000 ms) et servait à indiquer la survenue d'un nouvel essai.

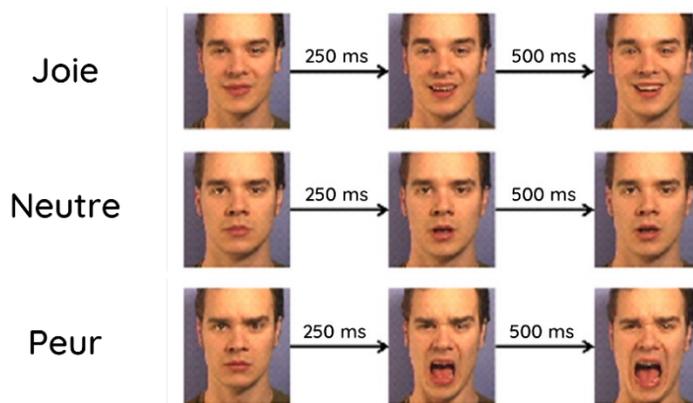


Figure 1. Exemples standards de chaque stimulus : représentation temporelle de 0 à 500 ms de chaque EFE

Acquisition et analyses des données électrophysiologiques

L'activité cérébrale a été enregistrée à l'aide de 64 électrodes placées selon le système international 10-20 et disposées sur un casque couvrant le scalp du participant et référencées au vertex. Une exception a été que deux électrodes placées à la mastoïde droite et gauche ont remplacé les sites

TP9 et TP10, lesquelles n'ont pas été utilisés. Toutes les électrodes ont été enregistrées avec une référence à la mastoïde gauche et les données ont été re-référencées hors ligne à la moyenne algébrique des électrodes mastoïdiennes (Luck, 2005). Quatre électrodes supplémentaires ont été placées au niveau des yeux, deux sur les pointes temporales (HEOG) et deux sur des régions infra/supra-orbitaires (VEOG), pour contrôler les artefacts liés aux mouvements oculaires. L'impédance des électrodes a été maintenue en dessous de 15k Ω durant toute la tâche expérimentale. L'enregistrement s'est fait de manière continue avec une fréquence d'échantillonnage de 512 Hz et une bande passante de 0,01 à 100 Hz.

Les données EEG ont été analysées à l'aide du logiciel Brain Vision Analyzer 2.0. Pour chacune des conditions expérimentales, l'interprétation de la réponse électrophysiologique inhérente à la perception d'EFE a résulté de l'analyse de la modulation du rythme mu engendrée par les stimuli. Plus spécifiquement, cette modulation a été enregistrée et analysée à partir des électrodes C5, C3, C1, CZ, C2, C4 et C6, lesquels correspondent aux sites principaux de l'activité motrice et donc s'avérant étroitement liées au rythme mu (Hobson et Bishop, 2017 ; Muthukumaraswamy, Johnson, et McNair, 2004). Des moyennes individuelles pour chacune des électrodes d'intérêt ont été effectuées et ont été moyennées pour évaluer l'ensemble des perturbations liées à l'événement selon la condition expérimentale. L'ensemble des analyses a été effectué dans une fenêtre temporelle de 1000 ms précédant l'apparition du stimulus et de 2000 ms suivant son apparition (-1000 ms à 2000ms). De plus, des analyses spectrales de type *Fast-Fourier Transform* ont été effectuées dans la fenêtre temporelle comprise entre 500 ms et 1500 ms suivant l'apparition du stimulus pour le calcul de la désynchronisation du rythme mu (bande spectrale entre 8 à 13 Hz) générée par chacun des trois types d'expression faciale émotionnelle. Cette fenêtre temporelle a d'ailleurs été antérieurement utilisée et validée par Moore et ses collègues (2012) qui ont montré qu'une modification dans la bande spectrale

du rythme mu était observable à partir d'environ 500 ms en réponse à l'observation de visages heureux et dégoûtés. Enfin, les essais contaminés par un trop grand nombre de clignements des yeux (VEOG >100 μ V), de mouvements oculaires horizontaux (HEOG >35 μ V) et/ou d'artéfacts (>80 μ V) ont été identifiés et exclus à l'aide d'une analyse par composante indépendante (Jung et al., 2000). À cet effet, deux participants, soit une jeune femme et une femme senior ont été exclues des analyses ultérieures, portant alors l'échantillon total à 63 participants, en raison du rejet d'un nombre excessif d'essais (> 33%) causé par des clignements et des mouvements répétitifs.

Analyses statistiques

Pour les analyses statistiques de cette tâche, les différences dans la réponse électrophysiologique entre les trois types d'expression faciale émotionnelle et les deux groupes de participants ont été analysées selon un modèle linéaire général à mesures répétées (ANOVA mixte 2 X 2 X 3), avec comme facteurs inter-sujets, le groupe d'âge et le sexe et comme facteur intra-sujet, la valence des stimuli (joie, peur et neutre). L'approche FDR (False Discovery Rate) a été privilégiée pour corriger nos manipulations statistiques. Enfin, dans un but exploratoire, des corrélations ont aussi été effectuées entre le score obtenu au QE, la réponse électrophysiologique présumément liée à l'expérience empathique ainsi que l'âge et le sexe des participants. Les degrés de liberté étaient corrigés avec la méthode Greenhouse-Geisser lorsque la sphéricité de Mauchly n'était pas respectée.

Résultats

Le Tableau II illustre les statistiques descriptives des participants en fonction de la modulation du rythme mu selon les EFE présentés ainsi qu'en fonction des scores obtenus au questionnaire d'empathie.

Tableau 2.

Statistiques descriptives de la modulation du rythme Mu lors de la présentation des EFE entre 500 et 1500 ms post-stimulus et du score au Quotient d'Empathie

	Seniors			Jeunes adultes			Total		
	Femmes (n = 16)	Hommes (n = 15)	Total (n = 31)	Femmes (n = 13)	Hommes (n = 19)	Total (n = 32)	Femmes (n = 29)	Hommes (n = 34)	Total (n = 63)
EFE de joie	5.51 ± 1.94	6.24 ± 1.65	5.86 ± 1.82	5.14 ± 1.59	6.89 ± 2.08	6.18 ± 2.06	5.34 ± 1.77	6.60 ± 1.90	6.02 ± 1.93
EFE de peur	5.52 ± 1.91	6.33 ± 1.83	5.91 ± 1.88	5.37 ± 1.40	7.04 ± 2.11	6.36 ± 2.01	5.45 ± 1.68	6.73 ± 2.00	6.14 ± 1.95
EFE neutres	5.12 ± 1.71	6.50 ± 1.79	5.79 ± 1.86	5.87 ± 1.97	7.24 ± 1.93	6.69 ± 2.03	5.46 ± 1.83	6.92 ± 1.88	6.24 ± 1.98
QE	40.52 ± 9.73	34.73 ± 8.54	37.81 ± 9.51	42.79 ± 8.17	42.16 ± 9.25	42.42 ± 8.67	41.55 ± 8.17	38.88 ± 9.57	40.15 ± 9.32

Les nombres représentent Moyenne ± écart-type

Un nombre inférieur est associé à une désynchronisation plus importante

Nous avons d'abord effectué une ANOVA factorielle mixte sur le rythme mu avec le Groupe (2 niveaux d'âge : jeune/senior) et le Sexe (2 niveaux : homme/femme) comme facteurs inter-sujets et la Valence émotionnelle (3 niveaux : neutre, joie, peur) comme facteur intra-sujet. L'interaction triple Groupe * Sexe * Valence s'est révélée significative ($F(1,74, 102,80) = 4.04; p = .025; \eta^2 = .064$). Cette analyse a de plus révélé deux autres effets statistiquement significatifs, soit l'interaction Groupe * Valence ($F(1,74, 102,80) = 4,66; p = .015; \eta^2 = .073$) ainsi que l'effet principal de sexe ($(F(1, 59) = 7,86; p = .007; \eta^2 = .118)$).

Pour investiguer davantage l'interaction Groupe * Valence émotionnelle, 2 ANOVAs intra-sujet ont été effectuées en fonction des groupes, indépendamment des sexes. La réponse

électrophysiologique des jeunes adultes différait significativement en fonction du type d'EFE, ($F(1,57, 48,50) = 5,12; p = .015; \eta p2 = .142$). Les analyses de contrastes ont montré que la réponse aux EFE neutres était plus grande qu'à celle des EFE de joie ($F(1, 31) = 6,55; p = .016; \eta p2 = .174$) et des EFE de peur ($F(1, 31) = 5.36; p = .027; \eta p2 = .147$). Toutefois, chez le groupe de seniors, le rythme mu évoqué à la présentation des EFE n'était pas significativement différent selon les différentes EFE présentées ($F(2, 60) = 0,63; p = .537; \eta p2 = .020$). Les données descriptives indiquent que ce sont les jeunes qui réagissent significativement plus aux EFE à valence émotionnelle comparativement aux EFE neutres. Le reste de l'ANOVA factorielle mixte ne présentait aucun autre effet statistiquement significatif [Effet principal de Groupe ($F(1, 59) = 0,81; p = .372; \eta p2 = .014$), effets d'interaction Valence * Sexe ($F(1,74, 102,80) = 1,74; p = .690; \eta p2 = .006$) et Groupe * Sexe ($F(1, 59) = 0,45; p = .503; \eta p2 = .008$).

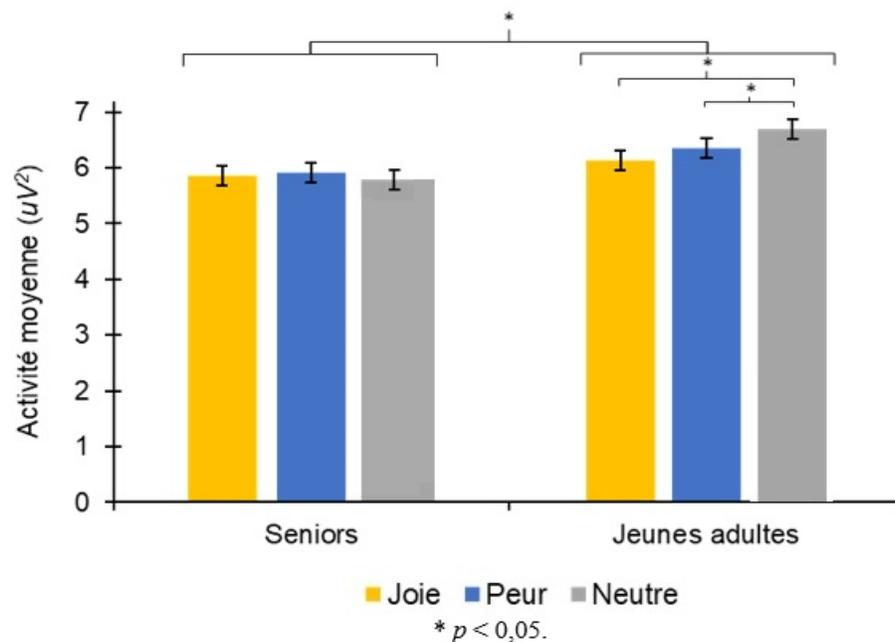


Figure 2. Désynchronisation du rythme mu entre 500 et 1500 ms chez les seniors et les jeunes adultes

Par la suite, nous avons décomposé l'interaction triple. À la lumière de l'effet principal de sexe obtenu, nous avons réalisé pour chacun des sexes des ANOVA mixte 2 X 3 avec comme

facteur inter-sujet le Groupe (2 niveaux; jeune et senior) et le facteur intra-sujet la Valence émotionnelle (3 niveaux : neutre, joie, peur). Chez les hommes, cette analyse n'a pas révélé d'effet d'interaction Groupe * Valence émotionnelle ($F(2, 64) = 0,11; p = .896; \eta p2 = .003$) ou un effet principal de Groupe ($F(1, 32) = 1,14; p = .294; \eta p2 = .034$). Cependant, un effet de Valence émotionnelle ($F(2, 64) = 4,52; p = .015; \eta p2 = .124$) s'est révélé significatif chez ces derniers dont les analyses de contrastes montrent une différence statistiquement significative entre les EFE de joie et neutres ($F(1, 32) = 8,68; p = .006; \eta p2 = .213$), mais pas entre les EFE de peur et neutres ($F(1, 32) = 2,93; p = .096; \eta p2 = .084$). Chez les femmes, cette analyse a révélé une interaction Groupe * Valence émotionnelle statistiquement significative ($F(1,53, 41,30) = 5,99; p = .009; \eta p2 = .182$), alors que les effets principaux de Groupe ($F(1, 27) = 0,015; p = .902; \eta p2 = .001$) et de Valence émotionnelle ($F(1,53, 41,30) = 0,30; p = .684; \eta p2 = .011$) n'étaient pas significatifs. Ce résultat nous indique qu'il s'agit du rythme mu des femmes, et non celui des hommes, qui se modifient selon les groupes d'âge en fonction des EFE.

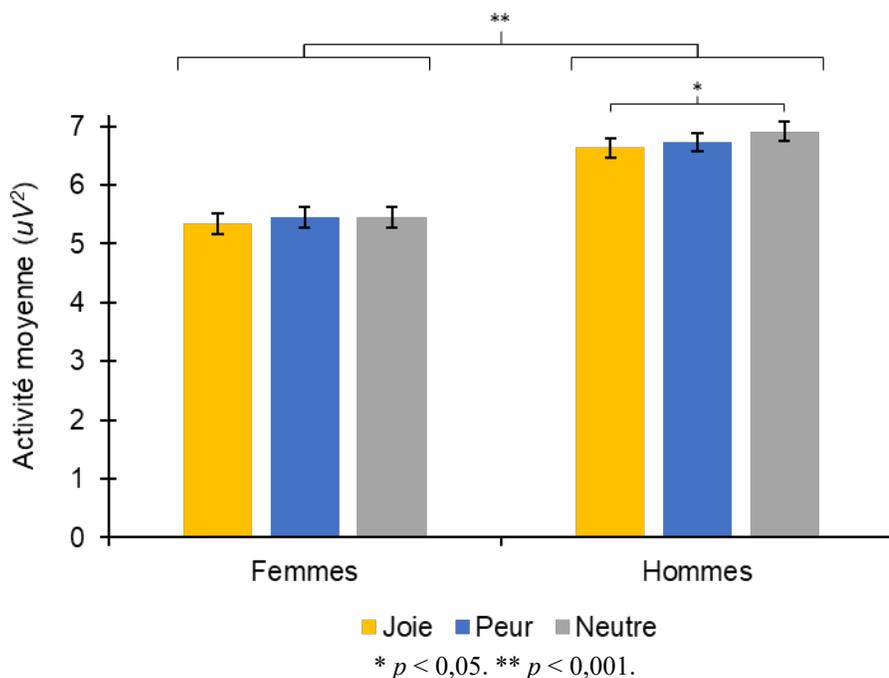


Figure 3. Désynchronisation du rythme mu entre 500 et 1500 ms chez les femmes et les hommes

Afin de vérifier où se trouvent les différences chez les femmes, des ANOVAs supplémentaires intra-sujet pour chaque groupe d'âge ont été effectuées et elles ont indiqué d'abord que, chez les femmes vieillissantes, la modulation du rythme mu était différente entre les différentes EFE, ($F(2, 30) = 4,19; p = .025; \eta^2 = .218$). Les analyses de contrastes ont montré que la réponse aux EFE neutres était inférieure à celle des EFE de joie ($F(1, 15) = 5,72; p = .03; \eta^2 = .276$) et des EFE de peur ($F(1, 15) = 5,08; p = .04; \eta^2 = .253$). Toutefois, chez le groupe de jeunes femmes, le rythme mu évoqué à la présentation des EFE n'était pas significativement différent selon les différentes EFE présentées ($F(1,31, 15,67) = 2,60; p = .121; \eta^2 = .178$). Les données descriptives indiquent que contrairement aux attentes, le rythme mu des femmes vieillissantes évoqué par des EFE neutres était plus désynchronisé que pour les stimuli à valence émotionnelle.

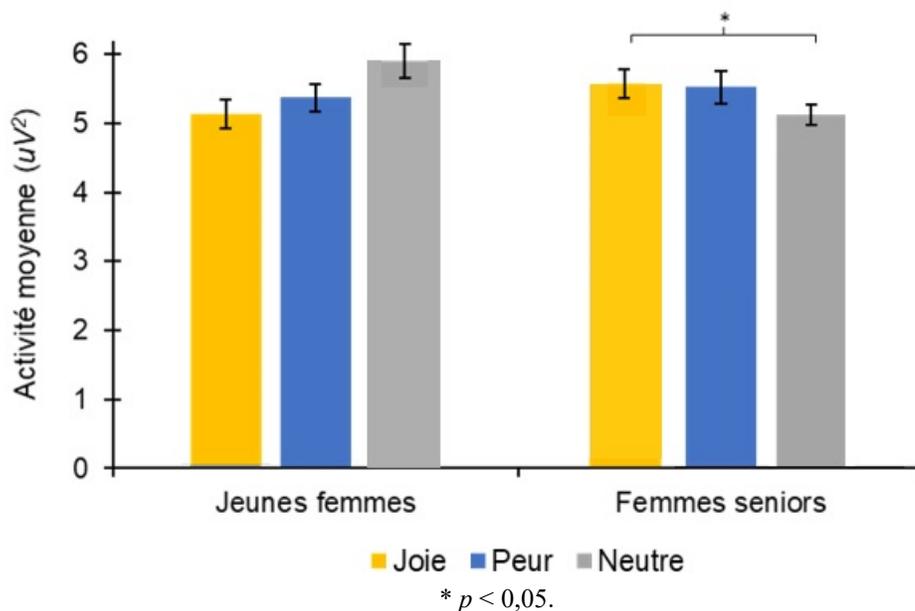


Figure 4. Désynchronisation du rythme mu entre 500 et 1500ms chez les jeunes femmes et les femmes seniors

Questionnaire sur l'empathie

Enfin, nous avons effectué une ANOVA 2 X 2 avec comme facteurs les groupes d'âge (jeunes, seniors) et sexe (homme, femme) sur le quotient empathique. L'interaction Groupe * Sexe

n'a pas atteint le seuil de signification ($F(1, 61) = 1,32; p = .255; \eta^2 = .021$), tout comme l'effet principal de sexe ($F(1, 61) = 2,04; p = .158; \eta^2 = .032$). En contrepartie, l'effet principal de Groupe ($F(1, 61) = 4,64; p = .035; \eta^2 = .071$) s'est avéré statistiquement significatif, faisant foi d'un plus faible score au questionnaire d'empathie chez les sujets vieillissants.

Analyses corrélationnelles QE et rythme mu

Nous avons donc réalisé une série d'analyses corrélationnelles de Pearson impliquant le quotient d'empathie et l'amplitude du rythme mu évoqué par les EFE. En premier lieu, nos analyses incluant tous les participants montrent que le QE ne corrèle pas avec aucune des trois conditions de valence (Joie : $r(61) = -0,004, p = .978$; Peur : $r(61) = -0,005, p = .978$; Neutre : $r(61) = -0,047, p = .978$). Ensuite, considérant notre effet principal de sexe, nous avons réalisé une série de corrélations de Pearson entre le QE et l'amplitude du rythme mu évoqué par les EFE des différentes conditions de valence en séparant les participants en fonction du sexe. Ces corrélations ont révélé une corrélation significative entre le QE et le rythme mu évoqué par les EFE chez les femmes seulement (Joie : $r(28) = -0,39, p = .039$; Peur : $r(28) = -0,43, p = .023$; Neutre : $r(28) = -0,465, p = .013$). Chez les hommes, aucune corrélation ne s'est avérée significative (Joie : $r(33) = 0,25, p = .16$; Peur : $r(33) = 0,24, p = .188$; Neutre : $r(33) = 0,25, p = .0157$).

Discussion

La présente étude avait pour principal objectif de caractériser les effets liés à l'âge et au sexe dans l'activation du rythme neurophysiologique présumément associé à l'empathie, soit le rythme mu, lors d'une tâche d'observation d'expressions faciales émotionnelles dans un contexte de vieillissement normal. De plus, cette étude visait à confirmer l'existence d'une association entre les niveaux d'empathie perçus à un questionnaire d'empathie et objectivés par

l'électroencéphalographie auprès de jeunes adultes et de seniors. Comme il existe encore à ce jour des disparités dans les données concernant l'évolution de l'empathie chez ces derniers, et que cette habileté pourrait se révéler déterminante pour mieux apprécier la fin de sa vie, il apparaissait pertinent d'utiliser la modulation du rythme mu en tant qu'indicateur et mesure objective des capacités d'empathie dans une perspective de vieillissement normal.

Nos résultats suggèrent d'abord qu'il existe des différences liées à l'âge dans le traitement des EFE qui se manifestent par des patrons d'activation neurophysiologique distincts selon l'âge de son observateur. Ainsi, les jeunes adultes présentent le patron de réponses généralement décrit dans la littérature (Perry et al., 2010). Ils font preuve d'une réactivité accrue envers les stimuli à valence émotionnelle et réagissent moins fortement au stimulus neutre, ce qui se reflète par une désynchronisation accentuée du rythme mu face aux stimuli de joie et de peur. Or, en vieillissant, ce traitement préférentiel en regard des émotions ne semble plus avoir lieu, tel que démontré par une modulation du rythme mu comparable entre les différentes EFE présentées chez les seniors. À cet égard, comme le traitement et la reconnaissance des émotions constituent des étapes préalables et nécessaires à l'habileté empathique, il est possible de penser que cette modification dans l'activation neurophysiologique du rythme mu au fil du temps témoigne de difficultés précoces au sein de ces processus (Isaacowitz et Stanley, 2011; Ruffman, Henry, Livingstone, et Phillips, 2008; Sullivan, Campbell, Hutton, et Ruffman, 2017).

Ensuite, en considérant l'incidence du sexe sur le rythme mu, nous avons aussi pu observer que les femmes seniors, en particulier, traitaient les stimuli d'une manière tout à fait inattendue : elles présentent une réactivité accrue envers les EFE neutres qui se reflète par une plus grande désynchronisation du rythme mu suivant l'observation de ce stimulus. Ce résultat, en plus de constituer un appui supplémentaire aux études d'IRMf ayant suggéré une diminution dans

l'efficacité du traitement émotionnel au cours de la vie (Chen et al., 2014; Riva et al., 2018), tend à montrer qu'avec l'avancement en âge, la réponse neurophysiologique liée à l'empathie se modifie de façon plus marquée chez les femmes face à des stimuli présentés visuellement. De manière tout à fait spéculative, il serait concevable de penser que cet écart actuellement observé chez les femmes seniors pourrait se creuser davantage à mesure qu'elles vieillissent, rendant alors ces dernières moins efficaces en contexte de traitement émotionnel.

À la lumière de ce résultat, nous avons de plus observé l'existence d'un effet de sexe dans le traitement émotionnel qui se traduit par une désynchronisation du rythme mu plus prononcée chez les femmes suivant l'observation d'expressions faciales émotionnelles. Bien que déjà étayé largement dans la littérature, ce résultat confirme à la fois l'incidence du sexe dans la modulation du rythme mu (Cheng, Yang, Lin, Lee, et Decety, 2008), et dans l'habileté empathique (Tracy et Giummarra, 2017). Cette différence entre les sexes, telle qu'illustrée par le degré de résonance motrice, réplique la conclusion tirée de l'étude de Yang et ses collègues (2009), laquelle s'était intéressée à cette même mesure dans un paradigme d'observation de la douleur. Pertinemment, cette disparité entre les sexes pourrait témoigner de différences dans l'activation cérébrale des hommes et des femmes. En effet, il a été montré que les régions corticales tributaires de l'activité des neurones miroirs ainsi que certaines structures cérébrales typiquement impliquées dans l'empathie sont recrutées par les femmes à un degré supérieur qu'à celui des hommes (Ruigrok et al., 2014; Schulte-Rüther, Markowitsch, Shah, Fink et Piefke, 2008). Ainsi, la présente étude montre que les femmes présentent un patron d'activation électrophysiologique plus important en réponse à l'observation d'EFE et ce, indépendamment de leur âge.

Nos résultats suggèrent aussi qu'il existe des différences inhérentes à la valence des stimuli qui se manifestent ici chez les hommes de notre étude. Plus particulièrement, un patron de

désynchronisation plus important en regard des EFE de joie par rapport aux EFE neutres a été objectivé alors qu'aucune différence significative n'a été trouvée entre les EFE de peur et les EFE neutres. Ce contraste est en accord avec la vision généralement véhiculée dans la littérature selon laquelle la joie constitue l'émotion la plus facilement reconnue et la peur une des expressions les plus difficiles à reconnaître (Rodger, Vizioli, Ouyang, et Caldara, 2015). Il va cependant à l'encontre de l'idée générale selon laquelle ce sont les femmes qui sont plus aptes à percevoir et à réagir aux émotions faciales positives dans un contexte de traitement automatique (Donges, Kersting, et Suslow, 2012).

En ce qui a trait aux résultats inhérents au QE, nous avons pu relever des associations entre la modulation du rythme mu et les scores obtenus au QE, lesquelles suggèrent l'existence d'un lien entre la perception subjective de l'empathie et son expression neurophysiologique. À cet égard, nos résultats indiquent qu'une désynchronisation accentuée du rythme mu est associée à des capacités d'empathie supérieures, mais ce, exclusivement pour la population féminine de notre échantillon. Cette démonstration corrobore les résultats de plusieurs études ayant montré une association entre le rythme mu et l'empathie auto-rapportée (Brown et al., 2016; Cheng et al., 2008; Woodruff et al., 2011), tout en soulignant la spécificité et la pertinence de ce marqueur neurophysiologique dans l'étude de la cognition sociale. Néanmoins, comme la littérature ne fait état d'aucune conclusion unanime à ce jour, certains chercheurs ayant échoué à démontrer un tel lien (Moore et al., 2012; Silas, Levy, Nielsen, Slade, et Holmes, 2010) et d'autres ayant montré une relation inverse (Perry et al., 2010), il importe de poursuivre les futures études en ce sens afin d'améliorer notre compréhension du rythme mu et son implication probable dans l'empathie.

Enfin, nous avons pu trouver un effet principal de groupe, lequel se traduit par des scores d'empathie légèrement inférieurs chez la population âgée comparativement aux jeunes adultes de

notre étude. Ce résultat fait sens avec le patron d'activation neurophysiologique observé et précédemment évoqué chez les seniors qui font preuve d'un traitement comparable, voire même moins efficient en regard des EFE au fil du temps. Il vient aussi appuyer les résultats antérieurs en faveur d'une diminution de l'empathie au fil du vieillissement (Grühn, Rebusal, Diehl, Lumley, et Labouvie-Vief, 2008; O'Brien et al., 2012) et suggère un déclin dans l'évolution des capacités d'empathie avec le temps. Nonobstant cette différence objectivée entre les jeunes adultes et les seniors, soulignons que les scores obtenus entre les deux groupes ne sont pas si différents et pourraient aussi témoigner de l'incidence de variables n'ayant pas été considérées dans le cadre de notre étude (ex. trait de personnalité, niveau d'éducation, etc).

Limites

Cette étude contient un certain nombre de limites qui pourraient influencer la portée de nos résultats. Une première limitation concerne la difficulté à dissocier l'apport du rythme mu à celui du rythme alpha postérieur, comme ils relèvent tous deux de la même bande spectrale, mais témoignent de phénomènes différents (Perry, Troje, et Bentin, 2010). Plus spécifiquement, le rythme mu apparaît maximal aux régions centrales et se désynchronise suivant l'exécution ou l'observation d'un mouvement biologique, alors que le rythme alpha est quant à lui minimalement affecté par ces actions et s'avère réactif à l'ouverture et à la fermeture des yeux (Pineda, 2005). Comme nos données ont été recueillies à partir d'électrodes centrales et que les participants ont tous été soumis à la même consigne, soit de garder les yeux ouverts et de tenter de ressentir l'émotion présentée, nous supposons, comme l'ont fait antérieurement certains chercheurs, qu'il s'agit du reflet de l'activité du rythme mu (Peled-Avron, Goldstein, Yellinek, Weissman-Fogel, et Shamay-Tsoory, 2017; Woodruff, Martin, et Bilyk, 2011). Également, il est aussi envisageable de penser que le degré de familiarité des stimuli présentés ait pu influencer l'interprétation du groupe

des seniors. En effet, comme les expressions faciales émotionnelles étaient exprimées exclusivement par des jeunes acteurs, il se peut que les participants plus âgés se soient sentis moins interpellés par ces derniers, et donc moins empathiques à leur égard. Il a d'ailleurs été montré que les difficultés liées à l'âge chez des seniors dans une tâche d'empathie disparaissent lorsque celle-ci illustre une problématique typiquement rencontrée à leur âge (Wieck et Kunzmann, 2015; Kunzmann et Isaacowitz, 2017). Ensuite, comme cette étude repose sur un devis transversal qui s'intéresse aux caractéristiques de deux populations d'âge distinct à un moment spécifique, nous ne pouvons exclure l'incidence probable d'un effet de cohorte. Ainsi, comme les seniors et les jeunes adultes relèvent d'époques différentes, ils n'ont pas vécu ou été témoins des mêmes événements et expériences, ce qui pourrait expliquer, du moins partiellement, les divergences dans l'interprétation des stimuli émotionnels en termes d'intensité. À cet effet, seule une étude longitudinale, répétant le même protocole expérimental, pourrait permettre de confirmer que l'écart observé dans la réponse neurophysiologique au fil de l'âge relève réellement de l'impact du vieillissement plutôt que de celui d'un effet de cohorte (Sun et al., 2017). Enfin, comme les participants du groupe de seniors ont majoritairement été recrutés en contexte académique, c'est-à-dire dans le contexte de cours universitaires dédiées à une population âgée de 50 ans et plus, il est possible que notre échantillon, chez qui l'on présume le maintien d'une bonne santé cognitive, s'avère peu représentatif de la population générale. Ainsi, pour assurer une meilleure représentativité de la population, il serait pertinent dans de prochaines études d'élargir le recrutement à différents lieux fréquentés par la population âgée de sorte à recruter des participants ayant différents niveaux de scolarité.

Conclusion

En somme, cette étude a permis de caractériser, pour la toute première fois, les différences liées à l'âge et au sexe dans l'activation du rythme neurophysiologique de l'empathie ainsi que dans la passation d'un questionnaire de cognition sociale standardisé. D'un point de vue clinique, les principaux résultats suggèrent que la réponse neurophysiologique du rythme mu constitue une mesure objective et sensible afin de dégager des différences dans le traitement empathique de vidéos d'expressions faciales émotionnelles. Nos résultats suggèrent que les seniors se perçoivent comme un peu moins empathiques, ce qui se reflète aussi objectivement par un patron neurophysiologique différent de celui des plus jeunes. Les femmes seniors, en particulier, subissent les plus importants changements dans la modulation du rythme mu qui pourraient suggérer une perte d'efficacité dans le traitement émotionnel au cours de la vie. Néanmoins, indépendamment de leur âge, les femmes présentent une plus grande réactivité neurophysiologique aux EFE. Enfin, la pertinence du rythme mu dans l'étude de la cognition sociale est ici démontrée chez les femmes par le fait qu'une désynchronisation accrue du rythme mu est associée à des capacités d'empathie supérieures. De manière générale, nos résultats appuient en partie la thèse d'une diminution de l'empathie chez les aînés et pourraient être consécutifs à l'atteinte progressive et précoce des régions frontales dans le vieillissement normal. Même si la résonance motrice constitue une manifestation automatique de l'empathie, il est possible de penser que son déploiement relève de processus contrôlés et donc dépendants de l'intégrité de ces régions devenant les plus vulnérables en vieillissant.

De futures recherches pourraient tenter de cerner de façon plus précise les liens possibles entre la désynchronisation du rythme mu et certaines variables, dont le sexe et la performance comportementale dans le traitement de l'information émotionnelle dans une perspective de

vieillesse normale et pathologique. Il serait aussi intéressant de décomposer le rythme mu en composante précoce et tardive, celles-ci pouvant représenter respectivement le pôle affectif et le pôle cognitif de l'empathie, pour ainsi vérifier s'il en ressort des patrons d'évolution différents selon le sexe et au fil du temps. Comme il est postulé que les hommes pourraient traiter les stimuli de façon plus cognitive (Christov-Moore et al., 2014), il est possible de penser que des patrons bien différents d'activation neurophysiologiques du rythme mu en résulteraient.

Références

- Bailey, P. E., & Henry, J. D. (2009). Subconscious facial expression mimicry is preserved in older adulthood. *Psychology and Aging, 24*(4), 995-1000.
- Bailey, P. E., Henry, J. D., & Von Hippel, W. (2008). Empathy and social functioning in late adulthood. *Aging and Mental Health, 12*(4), 499-503.
- Baron-Cohen, S., & Wheelwright, S. (2004). The empathy quotient: an investigation of adults with Asperger syndrome or high functioning autism, and normal sex differences. *Journal of autism and developmental disorders, 34*(2), 163-175.
- Beadle, J. N., Sheehan, A. H., Dahlben, B., & Gutchess, A. H. (2013). Aging, empathy, and prosociality. *Journals of Gerontology Series B: Psychological Sciences and Social Sciences, 70*(2), 213-222.
- Beck, A. T., Steer, R. A., & Brown, G. K. (1996). Beck depression inventory-II. *San Antonio, 78*(2), 490-498.
- Beck, A. T., Epstein, N., Brown, G., & Steer, R. A. (1988). An inventory for measuring clinical anxiety: psychometric properties. *Journal of consulting and clinical psychology, 56*(6), 893-897.
- Brown, E. C., Gonzalez-Liencre, C., Tas, C., & Brüne, M. (2016). Reward modulates the mirror neuron system in schizophrenia: A study into the mu rhythm suppression, empathy, and mental state attribution. *Social neuroscience, 11*(2), 175-186.
- Chen, Y. C., Chen, C. C., Decety, J., & Cheng, Y. (2014). Aging is associated with changes in the neural circuits underlying empathy. *Neurobiology of aging, 35*(4), 827-836.
- Cheng, Y., Yang, C. Y., Lin, C. P., Lee, P. L., & Decety, J. (2008). The perception of pain in others suppresses somatosensory oscillations: a magnetoencephalography study. *Neuroimage, 40*(4), 1833-1840.
- Christov-Moore, L., Simpson, E. A., Coudé, G., Grigaityte, K., Iacoboni, M., & Ferrari, P. F. (2014). Empathy: Gender effects in brain and behavior. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews, 46*, 604-627.
- Decety, J., & Jackson, P. L. (2004). The functional architecture of human empathy. *Behavioral and cognitive neuroscience reviews, 3*(2), 71-100.
- Decety, J., & Svetlova, M. (2012). Putting together phylogenetic and ontogenetic perspectives on empathy. *Developmental cognitive neuroscience, 2*(1), 1-24.
- Donges, U. S., Kersting, A., & Suslow, T. (2012). Women's greater ability to perceive happy facial emotion automatically: gender differences in affective priming. *PLoS One, 7*(7), e41745.

- Grühn, D., Rebucal, K., Diehl, M., Lumley, M., & Labouvie-Vief, G. (2008). Empathy across the adult lifespan: Longitudinal and experience-sampling findings. *Emotion, 8*, 753-765.
- Henry, J. D., Phillips, L. H., Ruffman, T., & Bailey, P. E. (2013). A meta-analytic review of age differences in theory of mind. *Psychology and Aging, 28*(3), 826-839.
- Hobson, H. M., & Bishop, D. V. (2017). The interpretation of mu suppression as an index of mirror neuron activity: past, present and future. *Royal Society open science, 4*(3), 160662.
- Hoenen, M., Lübke, K. T., & Pause, B. M. (2015). Somatosensory mu activity reflects imagined pain intensity of others. *Psychophysiology, 52*(12), 1551-1558.
- Hühnel, I., Fölster, M., Werheid, K., & Hess, U. (2014). Empathic reactions of younger and older adults: no age-related decline in affective responding. *Journal of Experimental Social Psychology, 50*, 136-143.
- Isaacowitz, D. M., & Stanley, J. T. (2011). Bringing an ecological perspective to the study of aging and recognition of emotional facial expressions: Past, current, and future methods. *Journal of nonverbal behavior, 35*(4), 261.
- Jung, T. P., Makeig, S., Humphries, C., Lee, T. W., Mckeown, M. J., Iragui, V., & Sejnowski, T. J. (2000). Removing electroencephalographic artifacts by blind source separation. *Psychophysiology, 37*(2), 163-178.
- Kunzmann, U., & Isaacowitz, D. (2017). Emotional aging: Taking the immediate context seriously. *Research in Human Development, 14*(3), 182-199.
- Lepage, J. F., Lortie, M., Deal, C. L., & Théoret, H. (2014). Empathy, autistic traits, and motor resonance in adults with Turner syndrome. *Social neuroscience, 9*(6), 601-609.
- Lepage, J. F., Lortie, M., Taschereau-Dumouchel, V., & Théoret, H. (2009). Validation of French-Canadian versions of the Empathy Quotient and Autism Spectrum Quotient. *Canadian Journal of Behavioural Science/Revue canadienne des sciences du comportement, 41*(4), 272-276.
- Luck, S. J. (2005). *An introduction to the event-related potential technique*. Cambridge, Mass: MIT Press.
- Li, X., Meng, X., Li, H., Yang, J., & Yuan, J. (2017). The impact of mood on empathy for pain: Evidence from an EEG study. *Psychophysiology, 54*(9), 1311-1322.
- Makowski, D., Sperduti, M., Blanchet, S., Nicolas, S., & Piolino, P. (2015). Emotion regulation and the cognitive decline in aging: beyond the paradox. *Geriatric et psychologie neuropsychiatrie du vieillissement, 13*(3), 301-308.
- Moore, A., Gorodnitsky, I., & Pineda, J. (2012). EEG mu component responses to viewing emotional faces. *Behavioural brain research, 226*(1), 309-316.

- Moran, J. M. (2013). Lifespan development: The effects of typical aging on theory of mind. *Behavioural Brain Research*, 237, 32-40.
- Muthukumaraswamy, S. D., Johnson, B. W., & McNair, N. A. (2004). Mu rhythm modulation during observation of an object-directed grasp. *Cognitive brain research*, 19(2), 195-201.
- Narme, P., Mouras, H., Loas, G., Krystkowiak, P., Roussel, M., Boucart, M., & Godefroy, O. (2010). Vers une approche neuropsychologique de l'empathie. *Revue de neuropsychologie*, 2(4), 292-298.
- Neumann, D. L., & Westbury, H. R. (2011). The psychophysiological measurement of empathy. *Psychology of empathy*, 119-142.
- Neuper, C., Wörtz, M., & Pfurtscheller, G. (2006). ERD/ERS patterns reflecting sensorimotor activation and deactivation. *Progress in brain research*, 159, 211-222.
- O'Brien, E., Konrath, S. H., Grün, D., & Hagen, A. L. (2012). Empathic concern and perspective taking: Linear and quadratic effects of age across the adult life span. *Journals of Gerontology Series B: Psychological Sciences and Social Sciences*, 68(2), 168-175.
- Peled-Avron, L., Goldstein, P., Yellinek, S., Weissman-Fogel, I., & Shamay-Tsoory, S. G. (2017). Empathy during consoling touch is modulated by mu-rhythm: An EEG study. *Neuropsychologia*.
- Pernigo, S., Gambina, G., Valbusa, V., Condoleo, M. T., Broggio, E., Beltramello, A., ... & Moro, V. (2015). Behavioral and neural correlates of visual emotion discrimination and empathy in mild cognitive impairment. *Behavioural brain research*, 294, 111-122.
- Perry, A., Bentin, S., Bartal, I. B. A., Lamm, C., & Decety, J. (2010). "Feeling" the pain of those who are different from us: Modulation of EEG in the mu/alpha range. *Cognitive, Affective, & Behavioral Neuroscience*, 10(4), 493-504.
- Perry, A., Troje, N. F., & Bentin, S. (2010). Exploring motor system contributions to the perception of social information: Evidence from EEG activity in the mu/alpha frequency range. *Social neuroscience*, 5(3), 272-284.
- Pineda, J. A. (2005). The functional significance of mu rhythms: translating "seeing" and "hearing" into "doing". *Brain Research Reviews*, 50(1), 57-68.
- Preston, S. D., & De Waal, F. B. (2002). Empathy: Its ultimate and proximate bases. *Behavioral and brain sciences*, 25(1), 1-20.
- Rayson, H., Bonaiuto, J. J., Ferrari, P. F., & Murray, L. (2016). Mu desynchronization during observation and execution of facial expressions in 30-month-old children. *Developmental cognitive neuroscience*, 19, 279-287.

- Riva, F., Tschernegg, M., Chiesa, P. A., Wagner, I. C., Kronbichler, M., Lamm, C., & Silani, G. (2018). Age-related differences in the neural correlates of empathy for pleasant and unpleasant touch in a female sample. *Neurobiology of aging*, *65*, 7-17.
- Rodger, H., Vizioli, L., Ouyang, X., & Caldara, R. (2015). Mapping the development of facial expression recognition. *Developmental science*, *18*(6), 926-939.
- Ruffman, T., Henry, J. D., Livingstone, V., & Phillips, L. H. (2008). A meta-analytic review of emotion recognition and aging: Implications for neuropsychological models of aging. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, *32*(4), 863-881.
- Ruigrok, A. N., Salimi-Khorshidi, G., Lai, M. C., Baron-Cohen, S., Lombardo, M. V., Tait, R. J., & Suckling, J. (2014). A meta-analysis of sex differences in human brain structure. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, *39*, 34-50.
- Schulte-Rüther, M., Markowitsch, H. J., Shah, N. J., Fink, G. R., & Piefke, M. (2008). Gender differences in brain networks supporting empathy. *Neuroimage*, *42*(1), 393-403.
- Silas, J., Levy, J. P., Nielsen, M. K., Slade, L., & Holmes, A. (2010). Sex and individual differences in induced and evoked EEG measures of action observation. *Neuropsychologia*, *48*(9), 2417-2426.
- Simon, D., Craig, K. D., Gosselin, F., Belin, P., & Rainville, P. (2008). Recognition and discrimination of prototypical dynamic expressions of pain and emotions. *PAIN®*, *135*(1-2), 55-64.
- Sullivan, S., Campbell, A., Hutton, S. B., & Ruffman, T. (2017). What's good for the goose is not good for the gander: Age and gender differences in scanning emotion faces. *The Journals of Gerontology: Series B*, *72*(3), 441-447.
- Sun, B., Luo, Z., Zhang, W., Li, W., & Li, X. (2017). Age-related differences in affective and cognitive empathy: self-report and performance-based evidence. *Aging, Neuropsychology, and Cognition*, 1-18.
- Sze, J. A., Gyurak, A., Goodkind, M. S., & Levenson, R. W. (2012). Greater emotional empathy and prosocial behavior in late life. *Emotion*, *12*(5), 1129-1140.
- Tousignant, B., Eugène, F., & Jackson, P. L. (2017). A developmental perspective on the neural bases of human empathy. *Infant Behavior and Development*, *48*, 5-12.
- Tracy, L. M., & Giummarra, M. J. (2017). Sex differences in empathy for pain: What is the role of autonomic regulation?. *Psychophysiology*, *54*(10), 1549-1558.
- Wieck, C., & Kunzmann, U. (2015). Age differences in empathy: Multidirectional and context-dependent. *Psychology and aging*, *30*(2), 407-419.

- Woodruff, C. C., Martin, T., & Bilyk, N. (2011). Differences in self-and other-induced Mu suppression are correlated with empathic abilities. *Brain research, 1405*, 69-76.
- Yang, C. Y., Decety, J., Lee, S., Chen, C., & Cheng, Y. (2009). Gender differences in the mu rhythm during empathy for pain: an electroencephalographic study. *Brain research, 1251*, 176-184.
- Ze, O., Thoma, P., & Suchan, B. (2014). Cognitive and affective empathy in younger and older individuals. *Aging & mental health, 18*(7), 929-935.

Conclusion générale

Pour conclure, cet essai doctoral constitue un premier effort ayant servi à promouvoir l'usage de mesures objectives, et plus particulièrement celle du rythme mu, pour étayer les capacités d'empathie au cours du vieillissement normal et ce, autrement que par l'obtention d'une perception subjective encline au biais de désirabilité sociale. Certes, même si son recours en tant que marqueur objectif du degré d'empathie envers autrui en est encore à ses débuts, le rythme mu est privilégié par un nombre croissant d'études comme mesure de l'empathie puisqu'il découle et fait sens avec certaines preuves empiriques associées, dont la théorie de la simulation et la découverte des neurones miroirs (Arnett, et al., 2018; Li et al., 2017; Peled-Avron et al., 2017). Bien qu'encore controversés, ces concepts théoriques semblent reliés entre eux et témoignent d'une disposition innée à reproduire automatiquement et inconsciemment les actions et états mentaux des autres de sorte à en faciliter leur reconnaissance et leur compréhension (Preston et De Waal, 2002).

À la lumière de nos résultats, la modulation du rythme mu semble se modifier à la fois en fonction du temps, du sexe et même de la valence des stimuli utilisés, ce qui apparaît cohérent avec la littérature. Certains de nos résultats amènent même à penser que les femmes pourraient présenter une plus grande sensibilité à réagir à cette mesure neurophysiologique (Cheng et al., 2008; Yang et al., 2009). Pertinemment, l'emploi de stratégies différenciées dans le traitement émotionnel pourrait être à l'origine des contrastes observés entre les sexes (Cheng et al., 2009; Lehane, 2015), voire même à travers les âges (Aine et al., 2006). En effet, en plus des différences anatomo-cérébrales entre les hommes et les femmes relevées précédemment (Ruigrok et al., 2014; Schulte-Rüther, Markowitsch, Shah, Fink et Piefke, 2008), ces dernières excellent davantage pour décoder et ressentir les émotions d'autrui, l'avancement en âge entraînerait une réorganisation corticale dont une activité préfrontale bilatérale accentuée en résulterait (Cabeza et al., 2004). Or, comme

cette même région s'avère la plus précocement affectée par les effets du temps (Sugiura, 2016), il apparaît cohérent que des modifications neurophysiologiques surviennent chez les plus âgés, ce que nous avons pu démontrer chez les seniors de notre étude, et de façon plus marquée chez les femmes.

Dans un avenir rapproché, les chercheurs pourraient s'inspirer de nos résultats pour mener à bien d'autres études qui permettraient d'améliorer notre compréhension de l'impact des modifications neurales au cours du vieillissement normal sur l'habileté empathique. Celles-ci pourraient notamment combiner deux approches, par exemple l'EMG et l'EEG, de sorte à explorer simultanément les différentes fonctions attribuées aux neurones miroirs, c'est-à-dire leur rôle dans l'alliage entre l'action et la perception. Dans le contexte du vieillissement normal, les données empiriques actuelles ne rendent compte que d'un versant, soit l'action ou la perception d'émotions, et ce qui en ressort dissocie ces deux processus. Dès lors, les futures études gagneraient à coupler ces deux versants pour ainsi mieux témoigner de l'intégrité du SNM en vieillissant, et quoique plus indirectement, préciser la trajectoire développementale de l'empathie telle que représentée par la résonance motrice découlant de différentes tâches d'empathie.

Bibliographie

- Aine, C. J., Woodruff, C. C., Knoefel, J. E., Adair, J. C., Hudson, D., Qualls, C., ... & Padilla, D. (2006). Aging: compensation or maturation?. *NeuroImage*, 32(4), 1891-1904.
- Arnett, K., Roach, A., Elzy, M., & Jelsone-Swain, L. (2018). Childhood emotional invalidation and right hemispheric mu suppression during a pain empathy task: An EEG study. *Social neuroscience*, 1-15.
- Bailey, P. E., & Henry, J. D. (2009). Subconscious facial expression mimicry is preserved in older adulthood. *Psychology and Aging*, 24(4), 995-1000.
- Bailey, P. E., Henry, J. D., & Von Hippel, W. (2008). Empathy and social functioning in late adulthood. *Aging and Mental Health*, 12(4), 499-503.
- Balconi, M., & Canavesio, Y. (2013). Emotional contagion and trait empathy in prosocial behavior in young people: the contribution of autonomic (facial feedback) and balanced emotional empathy scale (BEES) measures. *Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology*, 35(1), 41-48.
- Bandstra, N. F., Chambers, C. T., McGrath, P. J., & Moore, C. (2011). The behavioural expression of empathy to others' pain versus others' sadness in young children. *Pain*, 152(5), 1074-1082.
- Beadle, J. N., Paradiso, S., Kovach, C., Polgreen, L., Denburg, N. L., & Tranel, D. (2012). Effects of age-related differences in empathy on social economic decision-making. *International Psychogeriatrics*, 24(5), 822-833.
- Beadle, J. N., Sheehan, A. H., Dahlben, B., & Gutches, A. H. (2013). Aging, empathy, and prosociality. *Journals of Gerontology Series B: Psychological Sciences and Social Sciences*, 70(2), 213-222.
- Bejanin, A., Lailier, R., Caillaud, M., Eustache, F., & Desgranges, B. (2016). Neural substrates for theory of mind. *Revue de neuropsychologie*, 8(1), 6-15.
- Bonini, L. (2017). The extended mirror neuron network: anatomy, origin, and functions. *The Neuroscientist*, 23(1), 56-67.
- Brown, E. C., Gonzalez-Liencre, C., Tas, C., & Brüne, M. (2016). Reward modulates the mirror neuron system in schizophrenia: A study into the mu rhythm suppression, empathy, and mental state attribution. *Social neuroscience*, 11(2), 175-186.
- Cabeza, R., Daselaar, S. M., Dolcos, F., Prince, S. E., Budde, M., & Nyberg, L. (2004). Task-independent and Task-specific Age Effects on Brain Activity during Working Memory, Visual Attention and Episodic Retrieval. *Cerebral Cortex*, 14, 364-375.

- Carstensen, L. L. (2006). The influence of a sense of time on human development. *Science*, *312*(5782), 1913-1915.
- Carr, L., Iacoboni, M., Dubeau, M. C., Mazziotta, J. C., & Lenzi, G. L. (2003). Neural mechanisms of empathy in humans: a relay from neural systems for imitation to limbic areas. *Proceedings of the national Academy of Sciences*, *100*(9), 5497-5502.
- Chen, Y. C., Chen, C. C., Decety, J., & Cheng, Y. (2014). Aging is associated with changes in the neural circuits underlying empathy. *Neurobiology of aging*, *35*(4), 827-836.
- Cheng, Y., Chen, C., Decety, J. (2014). An EEG/ERP investigation of the development of empathy in early and middle childhood. *Developmental Cognitive Neuroscience*, *10*, 160-169.
- Cheng, Y., Chou, K. H., Decety, J., Chen, I. Y., Hung, D., Tzeng, O. L., & Lin, C. P. (2009). Sex differences in the neuroanatomy of human mirror-neuron system: a voxel-based morphometric investigation. *Neuroscience*, *158*(2), 713-720.
- Cheng, Y., Lee, P. L., Yang, C. Y., Lin, C. P., Hung, D., & Decety, J. (2008). Gender differences in the mu rhythm of the human mirror-neuron system. *PLoS One*, *3*(5), e2113.
- Christov-Moore, L., Simpson, E. A., Coudé, G., Grigaityte, K., Iacoboni, M., & Ferrari, P. F. (2014). Empathy: Gender effects in brain and behavior. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, *46*, 604-627.
- Cook, R., Bird, G., Catmur, C., Press, C., & Heyes, C. (2014). Mirror neurons: from origin to function. *Behavioral and Brain Sciences*, *37*(2), 177-192.
- Decety, J. (2010). The neurodevelopment of empathy in humans. *Developmental neuroscience*, *32*(4), 257-267.
- Decety, J. (2011). The neuroevolution of empathy. *Annals of the New York Academy of Sciences*, *1231*, 35-45.
- Decety, J., & Jackson, P. L. (2004). The functional architecture of human empathy. *Behavioral and cognitive neuroscience reviews*, *3*(2), 71-100.
- Decety, J., & Lamm, C. (2006). Human empathy through the lens of social neuroscience. *Scientific World Journal*, *6*, 1146-1163.
- Decety, J., Michalska, K. J., & Kinzler, K. D. (2011). The contribution of emotion and cognition to moral sensitivity: a neurodevelopmental study. *Cerebral cortex*, *22*(1), 209-220.
- Decety, J., & Svetlova, M. (2012). Putting together phylogenetic and ontogenetic perspectives on empathy. *Developmental cognitive neuroscience*, *2*(1), 1-24.
- De Vignemont, F., & Singer, T. (2006). The empathic brain: how, when and why? *Trends in cognitive sciences*, *10*(10), 435-441.

- Dondi, M., Simion, F., & Caltran, G. (1999). Can newborns discriminate between their own cry and the cry of another newborn infant? *Developmental Psychology*, *35*(2), 418-426.
- Duval, C., Piolino, P., Bejanin, A., Eustache, F., & Desgranges, B. (2011). Age effects on different components of theory of mind. *Consciousness and cognition*, *20*(3), 627-642.
- Dvash, J., & Shamay-Tsoory, S. G. (2014). Theory of mind and empathy as multidimensional constructs: Neurological foundations. *Topics in Language Disorders*, *34*(4), 282-295.
- Fan, Y., Duncan, N. W., de Greck, M., & Northoff, G. (2011). Is there a core neural network in empathy? An fMRI based quantitative meta-analysis. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, *35*(3), 903-911.
- Fan, Y., & Han, S. (2008). Temporal dynamic of neural mechanisms involved in empathy for pain: an event-related brain potential study. *Neuropsychologia*, *46*(1), 160-173.
- Greimel, E., Schulte-Rüther, M., Fink, G. R., Piefke, M., Herpertz-Dahlmann, B., & Konrad, K. (2010). Development of neural correlates of empathy from childhood to early adulthood: an fMRI study in boys and adult men. *Journal of Neural Transmission*, *117*(6), 781-791.
- Grühn, D., Rebucal, K., Diehl, M., Lumley, M., & Labouvie-Vief, G. (2008). Empathy across the adult lifespan: Longitudinal and experience-sampling findings. *Emotion*, *8*(6), 753-765.
- Haviland, J. M., & Lelwica, M. (1987). The induced affect response: 10-week-old infants' responses to three emotion expressions. *Developmental psychology*, *23*(1), 97-104.
- Henry, J. D., Phillips, L. H., Ruffman, T., & Bailey, P. E. (2013). A meta-analytic review of age differences in theory of mind. *Psychology and Aging*, *28*(3), 826-839.
- Hobson, H. M., & Bishop, D. V. (2017). The interpretation of mu suppression as an index of mirror neuron activity: past, present and future. *Royal Society open science*, *4*(3), 160662.
- Hoenen, M., Lübke, K. T., & Pause, B. M. (2015). Somatosensory mu activity reflects imagined pain intensity of others. *Psychophysiology*, *52*(12), 1551-1558.
- Hühnel, I., Fölster, M., Werheid, K., & Hess, U. (2014). Empathic reactions of younger and older adults: no age-related decline in affective responding. *Journal of Experimental Social Psychology*, *50*, 136-143.
- Iacoboni, M. (2009). Imitation, empathy, and mirror neurons. *Annual review of psychology*, *60*, 653-670.
- Isaacowitz, D. M., & Stanley, J. T. (2011). Bringing an ecological perspective to the study of aging and recognition of emotional facial expressions: Past, current, and future methods. *Journal of nonverbal behavior*, *35*(4), 261.

- Jackson, P. L., Meltzoff, A. N., & Decety, J. (2005). How do we perceive the pain of others? A window into the neural processes involved in empathy. *Neuroimage*, 24(3), 771-779.
- Klimesch, W. (1999). EEG alpha and theta oscillations reflect cognitive and memory performance: a review and analysis. *Brain research reviews*, 29(2-3), 169-195.
- Lamm, C., Batson, C. D., & Decety, J. (2007). The neural substrate of human empathy: Effects of perspective-taking and cognitive appraisal. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 19(1), 42-58.
- Lehane, C. M. (2015). Male and female differences in nonconscious mimicry: A systematic review. *Journal of European Psychology Students*, 6(3), 34-48.
- Li, X., Meng, X., Li, H., Yang, J., & Yuan, J. (2017). The impact of mood on empathy for pain: Evidence from an EEG study. *Psychophysiology*, 54(9), 1311-1322.
- Light, S. N., Coan, J. A., Zahn-Waxler, C., Frye, C., Goldsmith, H. H., & Davidson, R. J. (2009). Empathy is associated with dynamic change in prefrontal brain electrical activity during positive emotion in children. *Child development*, 80(4), 1210-1231.
- Luck, S. J. (2005). *An introduction to the event-related potential technique*. Cambridge, Mass: MIT Press.
- Makowski, D., Sperduti, M., Blanchet, S., Nicolas, S., & Piolino, P. (2015). Emotion regulation and the cognitive decline in aging: beyond the paradox. *Geriatric et psychologie neuropsychiatrie du vieillissement*, 13(3), 301-308.
- Marshall, W.L., Hudson, S.M., Jones, R., & Fernandez, Y.M. (1995). Empathy in sex offenders. *Clinical Psychology Review*, 15, 99-113.
- Molenberghs, P., Cunnington, R., & Mattingley, J. B. (2012). Brain regions with mirror properties: a meta-analysis of 125 human fMRI studies. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 36(1), 341-349.
- Moore, A., Gorodnitsky, I., & Pineda, J. (2012). EEG mu component responses to viewing emotional faces. *Behavioural brain research*, 226(1), 309-316.
- Moran, J. M. (2013). Lifespan development: The effects of typical aging on theory of mind. *Behavioural Brain Research*, 237, 32-40.
- Narme, P., Mouras, H., Loas, G., Krystkowiak, P., Roussel, M., Boucart, M., & Godefroy, O. (2010). Vers une approche neuropsychologique de l'empathie. *Revue de neuropsychologie*, 2(4), 292-298.
- Neuper, C., Wörtz, M., & Pfurtscheller, G. (2006). ERD/ERS patterns reflecting sensorimotor activation and deactivation. *Progress in brain research*, 159, 211-222.

- O'Brien, E., Konrath, S. H., Gröhn, D., & Hagen, A. L. (2012). Empathic concern and perspective taking: Linear and quadratic effects of age across the adult life span. *Journals of Gerontology Series B: Psychological Sciences and Social Sciences*, 68(2), 168-175.
- Peled-Avron, L., Goldstein, P., Yellinek, S., Weissman-Fogel, I., & Shamay-Tsoory, S. G. (2017). Empathy during consoling touch is modulated by mu-rhythm: An EEG study. *Neuropsychologia*.
- Pernigo, S., Gambina, G., Valbusa, V., Condoleo, M. T., Broggio, E., Beltramello, A., ... & Moro, V. (2015). Behavioral and neural correlates of visual emotion discrimination and empathy in mild cognitive impairment. *Behavioural brain research*, 294, 111-122.
- Perry, A., Bentin, S., Bartal, I. B. A., Lamm, C., & Decety, J. (2010). "Feeling" the pain of those who are different from us: Modulation of EEG in the mu/alpha range. *Cognitive, Affective, & Behavioral Neuroscience*, 10(4), 493-504.
- Pineda, J. A. (2005). The functional significance of mu rhythms: translating "seeing" and "hearing" into "doing". *Brain Research Reviews*, 50(1), 57-68.
- Preston, S. D., & De Waal, F. B. (2002). Empathy: Its ultimate and proximate bases. *Behavioral and brain sciences*, 25(1), 1-20.
- Rayson, H., Bonaiuto, J. J., Ferrari, P. F., & Murray, L. (2016). Mu desynchronization during observation and execution of facial expressions in 30-month-old children. *Developmental cognitive neuroscience*, 19, 279-287.
- Riva, F., Tschernegg, M., Chiesa, P. A., Wagner, I. C., Kronbichler, M., Lamm, C., & Silani, G. (2018). Age-related differences in the neural correlates of empathy for pleasant and unpleasant touch in a female sample. *Neurobiology of aging*, 65, 7-17.
- Rizzolatti, G., & Sinigaglia, C. (2010). The functional role of the parieto-frontal mirror circuit: interpretations and misinterpretations. *Nature reviews neuroscience*, 11(4), 264-274.
- Rueda, M. R., & Paz-Alonso, P. M. (2013). Les fonctions exécutives et le développement affectif. *Encyclopédie sur le développement des jeunes enfants*, 1-7.
- Ruigrok, A. N., Salimi-Khorshidi, G., Lai, M. C., Baron-Cohen, S., Lombardo, M. V., Tait, R. J., & Suckling, J. (2014). A meta-analysis of sex differences in human brain structure. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 39, 34-50.
- Sagi, A., & Hoffman, M. L. (1976). Empathic distress in the newborn. *Developmental Psychology*, 12(2), 175-176.
- Scheibe, S., & Carstensen, L. L. (2010). Emotional aging: Recent findings and future trends. *The Journals of Gerontology Series B: Psychological Sciences and Social Sciences*, 65(2), 135-144.

- Schulte-Rüther, M., Markowitsch, H. J., Shah, N. J., Fink, G. R., & Piefke, M. (2008). Gender differences in brain networks supporting empathy. *Neuroimage*, 42(1), 393-403.
- Shamay-Tsoory, S. G. (2011). The neural bases for empathy. *The Neuroscientist*, 17(1), 18-24.
- Simner, M. L. (1971). Newborn's response to the cry of another infant. *Developmental Psychology*, 5(1), 136-150.
- Spinrad, T. L., & Gal, D. E. (2018). Fostering prosocial behavior and empathy in young children. *Current opinion in psychology*, 20, 40-44.
- Sugiura, M. (2016). Functional neuroimaging of normal aging: Declining brain, adapting brain. *Aging Research Reviews*, 30, 61-72.
- Sullivan, S., Campbell, A., Hutton, S. B., & Ruffman, T. (2017). What's good for the goose is not good for the gander: Age and gender differences in scanning emotion faces. *The Journals of Gerontology: Series B*, 72(3), 441-447.
- Sun, B., Luo, Z., Zhang, W., Li, W., & Li, X. (2017). Age-related differences in affective and cognitive empathy: self-report and performance-based evidence. *Aging, Neuropsychology, and Cognition*, 1-18.
- Swartz, B.E., & Goldensohn, E.S. (1998). Timeline of the history of EEG and associated fields. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 106(2), 173-176.
- Sze, J. A., Gyurak, A., Goodkind, M. S., & Levenson, R. W. (2012). Greater emotional empathy and prosocial behavior in late life. *Emotion*, 12(5), 1129-1140.
- Tracy, L. M., & Giummarra, M. J. (2017). Sex differences in empathy for pain: What is the role of autonomic regulation?. *Psychophysiology*, 54(10), 1549-1558.
- Tousignant, B., Eugène, F., & Jackson, P. L. (2017). A developmental perspective on the neural bases of human empathy. *Infant Behavior and Development*, 48, 5-12.
- Wellman, H. M. (2011). Developing a theory of mind. *The Wiley-Blackwell handbook of childhood cognitive development*, 2, 258-284.
- Wieck, C., & Kunzmann, U. (2015). Age differences in empathy: Multidirectional and context-dependent. *Psychology and aging*, 30(2), 407-419.
- Wicker, B., Keysers, C., Plailly, J., Royet, J. P., Gallese, V., & Rizzolatti, G. (2003). Both of us disgusted in My insula: the common neural basis of seeing and feeling disgust. *Neuron*, 40(3), 655-664.
- Woodruff, C. C., Martin, T., & Bilyk, N. (2011). Differences in self-and other-induced Mu suppression are correlated with empathic abilities. *Brain research*, 1405, 69-76.

Yang, C. Y., Decety, J., Lee, S., Chen, C., & Cheng, Y. (2009). Gender differences in the mu rhythm during empathy for pain: an electroencephalographic study. *Brain research*, *1251*, 176-184.

Ze, O., Thoma, P., & Suchan, B. (2014). Cognitive and affective empathy in younger and older individuals. *Aging and Mental Health*, *18*(7), 929-935.