



Article
scientifique

Revue de la
littérature

2023

Accepted
version

Open
Access

This is an author manuscript post-peer-reviewing (accepted version) of the original publication. The layout of the published version may differ .

Rôle du cervelet dans les émotions

Thomasson, Marine; Peron, Julie Anne

How to cite

THOMASSON, Marine, PERON, Julie Anne. Rôle du cervelet dans les émotions. In: Revue de neuropsychologie, neurosciences cognitives et cliniques, 2023, vol. 15, n° 1, p. 7–16. doi: 10.1684/nrp.2023.0739

This publication URL: <https://archive-ouverte.unige.ch/unige:170862>

Publication DOI: [10.1684/nrp.2023.0739](https://doi.org/10.1684/nrp.2023.0739)

Rôle du cervelet dans les émotions

Marine Thomasson^{1,2} & Julie Péron ^{1,2}

Affiliations :

¹ Laboratoire de Neuropsychologie Clinique et Expérimentale, Faculté de Psychologie et des Sciences de l'Éducation, Université de Genève, 40 bd du Pont d'Arve, 1205, Genève

² Unité de neuropsychologie clinique, Département de Neurologie, Hôpitaux Universitaires de Genève, Rue Gabrielle-Perret-Gentil 4, 1205 Genève, Suisse

Auteur correspondant :

Pr Julie Péron

julie.peron@unige.ch

Faculté de Psychologie et des Sciences de l'Éducation

Boulevard du Pont-d'Arve 40

1205 Genève, Suisse

Résumé

Le cervelet a pendant très longtemps été considéré comme une structure étant exclusivement réservée au contrôle moteur, et ce n'est que depuis la fin du siècle passé que des études neuroanatomiques, mais également cliniques et de neuroimagerie, ont contribué à suggérer un rôle du cervelet dans les processus émotionnels chez l'humain. Plus spécifiquement, de par son intégration au sein des circuits neuronaux distribués sous-tendant les fonctions sensorimotrices, associatives et limbiques, le cervelet se révèle être un candidat idéal pour participer aux différents processus se déroulant au sein des composantes sous-tendant l'épisode émotionnel. D'un point de vue fondamental, les résultats des divers travaux présentés dans cet article suggèrent une spécialisation et intégration fonctionnelle de ce petit cerveau dans les émotions. Notamment, des propositions récentes suggèrent le cervelet participerait à l'ajustement continu, en lien avec les modèles internes, du processus dit de « chunking ». Ces recherches ont également un impact clinique puisqu'elles permettent de sensibiliser les praticiens et chercheurs à une évaluation systématique des fonctions émotionnelles chez les personnes présentant un dysfonctionnement cérébelleux.

Mots clés : cervelet, émotion, cognition, macro-production, cérébro-lésé

Role of the cerebellum in emotions

Abstract

The role of the cerebellum during emotional processes has been neglected until recently in favor of its motor contribution. However, anatomical and neuroimaging studies point to the cerebellum's functional integration in the neural network involved in emotion processing. Additionally, results of clinical neuropsychological observations in humans have allowed researchers to develop theoretical propositions regarding the functional specialization and integration of brain networks beyond the cerebrum, including the basal ganglia and cerebellum, in the synchronization of emotion components. Indeed, componential approaches suggest that emotional processes are elicited and dynamically patterned by involving synchronized changes in distinct functional subsystem. All of these results lead to the hypothesis of a meta-cognitive role of the cerebellum during emotion processes and more particularly in very fine adjustment of emotional responses through its ability in detecting and minimizing prediction error based on differences in the current state and the intended goal state. In particular, recent proposals suggest that the cerebellum participates in the continuous adjustment, in connection with the internal models, of the so-called "chunking" process. The clinical repercussions of all this research are also significant since they invite the development of assessment and management tools that are better adapted to the functions underpinned by the cerebellum.

Key words: cerebellum, emotion, cognition, stroke

Jusqu'à la fin du 18^{ème} siècle, les fonctions sous-tendues par le cervelet demeuraient peu connues. Les célèbres cérébellectomies pratiquées par Flourens ont constitué un repère central dans l'Histoire puisque ces dernières ont permis de révéler le rôle moteur du cervelet, et plus spécifiquement sa capacité à coordonner les mouvements [1]. En revanche, les investigations relatives à l'implication cérébelleuse dans les processus émotionnels ont été, pendant de très nombreuses années, particulièrement marginalisées. Ainsi, dans cet article, nous retracerons tout d'abord les aspects historiques concernant le rôle émotionnel du cervelet (partie 1). Puis, en considérant l'émotion en tant que concept multi componentiel, nous verrons que ce « petit cerveau » prend part à chacun des processus opérants lors de la mise en œuvre des différentes composantes émotionnelles (partie 2). Sur la base des résultats de ces études, une modélisation du rôle de cette structure dans les émotions sera ensuite présentée (partie 3). L'article sera également émaillé de recommandations cliniques neuropsychologiques basées sur ces travaux empiriques. Finalement, une ouverture sur les perspectives futures dans ce domaine de recherche sera proposée.

1) Histoire

Dans la décennie qui suivit les expériences de Flourens, Combette [2] décrivit, dans la gazette des sciences médicales de Paris, le cas d'une jeune patiente qui lui avait été adressé pour des troubles moteurs, intellectuels et émotionnels. Décédée à l'âge de 11 ans, une autopsie permit d'observer une absence complète du cervelet (i.e., agénésie cérébelleuse). Suite à cette découverte, plusieurs cas de patients présentant un dysfonctionnement intellectuel et émotionnel dans le cadre d'une pathologie cérébelleuse ont été rapportés [1]. Malgré ces observations, l'hypothèse d'une implication du cervelet dans les fonctions cognitive et affectives n'a pas été intégrée dans la pensée dominante des chercheurs de l'époque, et a été largement éclipsée par l'idée selon laquelle le cervelet serait impliqué uniquement dans les fonctions motrices. Au milieu du XX^{ème} siècle, des descriptions de démence et de psychose

chez des patients souffrant de dégénérescence cérébelleuse ont commencé à apparaître. Knoepfel et Macken [3] ont par exemple décrit une série de cas de patients souffrant d'ataxie héréditaire qui présentaient, outre une déficience intellectuelle, une irritabilité et une labilité émotionnelle. Pratiquées dans les années 1970, les interventions thérapeutiques utilisant la stimulation du cervelet ont également permis de mettre en évidence de nouveaux liens entre le cervelet et les émotions. Nashold et Slaughter [4] ont, par exemple, stimulé le noyau denté du cervelet et le pédoncule cérébelleux supérieur afin de soulager l'hypertonie et ont observé que lors de cette stimulation, le patient rapportait un sentiment subjectif de peur. De même, l'implantation d'électrodes à la surface supérieure du cervelet pour contrôler l'épilepsie a démontré, en plus d'une amélioration des crises, une réduction de l'agressivité, de l'anxiété et de la dépression [5]. Heath, Cox & Lustick [6] ont même mis en évidence une augmentation des décharges neuronales au niveau du noyau fastigial cérébelleux chez un patient souffrant de troubles émotionnels lorsqu'il ressentait de la peur et de la colère.

Bien que peu nombreuses, ces études ont permis de fournir des preuves qu'une altération cérébelleuse (d'étiologie lésionnelle, dégénérative ou induite par stimulation) peut entraîner des modulations au niveau de l'expérience émotionnelle, soulignant ainsi l'hypothèse d'une spécialisation cérébelleuse dans le traitement émotionnel. La suggestion d'une intégration fonctionnelle du cervelet pour les processus émotionnels est aussi possible puisque d'autres recherches ont également mis en évidence des liens anatomiques et fonctionnels entre le cervelet et les régions appartenant au système sous-tendant les émotions [7]. Or, en s'inscrivant dans le cadre théorique d'une approche multi componentielle des émotions, nous allons voir dans la partie suivante que le cervelet pourrait participer au réseau sous-tendant différentes composantes émotionnelles.

2) Approche multi componentielle de l'émotion et cervelet

Le modèle des processus composant, élaboré par Scherer [8], conceptualise l'émotion comme un épisode de changement corrélé et synchronisé de l'état de cinq sous-composantes de l'organisme, en réponse à l'évaluation d'un stimulus interne (pensée, souvenir, sensation) ou externe (comportement des autres individus ou changement dans une situation) évalué comme pertinent pour l'organisme. Par conséquent, dans la perspective qu'une émotion est un processus continu d'évaluation, une succession très rapide d'étapes de traitement de stimulus (ou critères d'évaluation de stimulus (CES), appartenant à la composante d'évaluation cognitive) influencerait les autres sous-composantes de l'organisme (la physiologie périphérique, les tendances à l'action, l'expression motrice et le sentiment subjectif). Ainsi, suite à un événement spécifique, la production d'un sentiment subjectif conscient, à un instant t, aurait lieu suite à la synchronisation des 4 autres sous-composantes.

Nous allons voir que des études cliniques, mais également de neuroimagerie chez des participants sains, ont permis de démontrer que le cervelet serait impliqué dans plusieurs composantes du traitement émotionnel, et qu'il entretiendrait notamment des relations étroites avec des régions sous-tendant spécifiquement les fonctions en lien avec ces composantes.

2.1. Composante cognitive

Comme nous avons pu le voir dans la partie précédente de cet article (partie 1), outre les manifestations émotionnelles, des déficits cognitifs ont été observés suite à une atteinte cérébelleuse. Ce sont toutefois les travaux de Schmahmann et ses collaborateurs, menés à la fin des années 90, qui ont fortement contribué à enrichir les connaissances concernant le rôle du cervelet dans les fonctions non-motrices. En 1998, suite à des investigations neurologiques, neuropsychologiques et de neuroimagerie menées chez 20 patients présentant des lésions cérébelleuses, Schmahmann et Sherman ont pu définir une nouvelle entité clinique appelée le

« Syndrome Cérébelleux Cognitif et Affectif (CCAS) » (encadré 1) [9]. Ainsi, le cervelet serait impliqué dans plusieurs fonctions cognitives (exécutives, langagières, visuo-spatiales, ...) qui sont nécessaires aux processus d'évaluation lors d'un épisode émotionnel. Cela serait notamment possible grâce aux connexions très étroites que ce dernier entretient (et particulièrement, ses lobules postérieurs), tant sur le plan structurel et fonctionnel, avec les régions associatives [10]. Une étude de Leitão et collaborateurs [11] s'est par exemple intéressée aux substrats neuronaux qui seraient recrutés lors des différentes composantes émotionnelles en créant notamment un jeu vidéo permettant de manipuler deux critères d'évaluation, à savoir le critère de facilitation/obstruction aux buts-besoins et le potentiel de maîtrise. Les résultats d'IRMf ont mis en évidence des activations du cervelet lors de ces deux processus d'évaluation.

Encadré 1

Le Syndrome Cérébelleux Cognitif et Affectif

Définition. Ce syndrome se caractérise par des troubles des fonctions exécutives (difficultés de planification, flexibilité mentale, disponibilité lexicale et de mémoire de travail), de raisonnement abstrait, des difficultés linguistiques (agrammatisme, anomie légère) et prosodique, une diminution des capacités en cognition spatiale (altération de la mémoire visuo-spatiale et désorganisation visuo-spatiale), ainsi que des changements du comportement et la personnalité (émoussement des affects, comportement désinhibé ou inapproprié).

Evaluation. Afin d'aider à déterminer la présence d'un CCAS chez les patients souffrant d'une atteinte cérébelleuse, Hoche et collaborateurs [12] ont développé cette échelle de screening. Cette dernière évalue 10 sous-fonctions cognitives et émotionnelles pouvant être altérées en cas de CCAS et fournit un score brut total qui permet de déterminer si la présence du CCAS s'avère être « possible », « probable » ou « certaine ». Cet outil de dépistage, selon les résultats obtenus, permet également de cibler les fonctions à investiguer lors de la réalisation d'un bilan neuropsychologique plus exhaustif.

De manière tout aussi intéressante, ce « petit cerveau » serait impliqué lors de processus de prise de décision [13]. Il pourrait également participer à l'étape l'évaluation de la signification d'une action particulière en termes de conséquences sociales [8] puisque des activations cérébelleuses ont été retrouvées lors de tâche de résolution de dilemmes moraux [14].

2.2. Composante d'excitation physiologique et de sentiment subjectif

De par ses connexions avec la formation réticulée (i.e., une structure nerveuse située le long du tronc cérébral et jouant un rôle dans les fonctions somatiques et végétatives) ainsi qu'avec l'hypothalamus (une structure intervenant dans la régulation du système nerveux autonome et des fonctions endocriniennes), le cervelet serait capable d'intervenir dans la modulation de l'activité physiologique (« arousal » en anglais) au cours d'une expérience émotionnelle [15]. La plupart des études se sont intéressées aux réponses neuronales cérébelleuses en lien avec l'arousal dans des tâches émotionnelles, et ont notamment fait recours aux images de l'International Affective Picture System (IAPS) afin d'induire des états émotionnels chez les participants. Colibazzi et collaborateurs [16] ont, par exemple, mis en évidence des activations au niveau du vermis (la partie médiane du cervelet) suite à la présentation de stimuli émotionnels engendrant une forte activation physiologique et des activations dans le lobule cérébelleux VI droit associées à la présentation de stimuli déplaisants. Par conséquent, il semblerait que le cervelet intervienne lors du traitement de l'arousal, mais aussi lors du traitement de la valence (qu'elle soit positive ou négative). Une autre équipe de chercheurs a même pu observer une ségrégation et spécialisation fonctionnelle au sein du cervelet, en utilisant la magnétoencéphalographie, lors du traitement de ces dimensions émotionnelles [17]. Des activations cérébelleuses distinctes et très précoces (≈ 160 ms après le début de la présentation des stimuli) ont été constatées, avec tout d'abord un traitement de l'excitation physiologique opérant dans les lobules bilatéraux du vermis (VI et VIIIa) et dans le Crus II gauche, suivi par un traitement de la valence et de son interaction avec l'excitation physiologique ayant lieu dans l'hémisphère cérébelleux gauche (dans le lobule VI et le lobule V/Crus I).

D'autres auteurs ont aussi proposé une organisation topographique fonctionnelle du cervelet mais cette fois-ci selon le traitement des « émotions de base » en faisant appel à l'IRMf

[18]. Leurs résultats mettaient en évidence des patterns d'activations distincts, selon cinq émotions primaires (joie, peur, colère dégoût, tristesse) dans les régions postérieures du cervelet (voir figure 1). De plus, des chevauchements observés au niveau des activations pour certaines émotions suggèreraient l'existence de réseaux neuronaux communs. C'est, par exemple, le cas pour la colère et la peur, ce qui pourrait évoquer une implication cérébelleuse dans un réseau neuronal spécifique assurant le traitement des stimuli menaçant et participant à la mise en œuvre de réponses autonomes relatives à la peur et la colère (i.e., lutte ou fuite) [18]. En effet, le cervelet serait intégré fonctionnellement dans le réseau neuronal spécifique au traitement des stimuli aversifs composé de régions telles que le cortex cingulaire antérieur, l'hypothalamus et le gyrus parahippocampique [19].

[Figure 1 ici]

2.3. Composante de tendance à l'action

Le cervelet, ainsi que les noyaux gris centraux (NGC), pourraient coordonner les fonctions dopaminergiques et ainsi réguler les processus motivationnels et de récompense [20]. D'un point de vue clinique, des symptômes d'apathie ont, de manière intéressante, pu être observés à la suite de lésions cérébelleuses [1]. Il a même été démontré que la sévérité de l'apathie présente chez des patients avec maladie de Parkinson serait positivement corrélée au volume de matière grise dans le vermis de ces derniers [21]. D'un point de vu anatomique et fonctionnel, des relations entre le vermis, les NGC et les aires antérieures du cortex cérébral ont été mises en évidence [22] et suggèrent une contribution spécifique du vermis aux tendances d'action liées à l'approche et à la récompense ainsi que potentiellement au contrôle des impulsions. L'étude de Leitão et collaborateurs [11] précédemment mentionnée, s'intéressant aux systèmes neuronaux impliqués dans les différentes composantes émotionnelles à l'aide d'un jeu vidéo, mettait en évidence des activations au niveau du cortex cérébral (cortex

orbitofrontal, cortex cingulaire antérieur, aires médiales frontales, cortex visuel, cortex préfrontal dorsolatéral droit, lobes pariétaux inférieurs bilatéraux) et du cervelet (Lobules VI, Crus I gauches et Vermis) lors de comportements d'approche/évitement ou encore de recherche de récompense. Ceci corroborent notamment les résultats retrouvés dans une méta-analyse récente qui a révélé que des activations cérébelleuses, et plus spécifiquement dans les lobules V et VI droits, étaient retrouvées lors de tendances d'approche liées aux comportement d'agression [23]. En plus de démontrer que les comportements d'agression (condition active) induisaient des activations dans les régions antérieures du cervelet, cette étude a également montré que l'expérience/le ressenti de colère (condition passive) menait à des pics d'activations dans les régions postérieures du cervelet. Ceci corrobore les résultats d'études précédemment présentées qui suggéraient une participation cérébelleuse lors de l'expérience émotionnelle subjective et démontre l'existence de patterns d'activation distincts, au sein même du cervelet, pour différentes composantes émotionnelles.

2.4. Composante d'expression motrice

Cette composante permettrait de transmettre l'état affectif d'un interlocuteur via plusieurs canaux de communication, telles que les expressions faciales, vocales ou encore les gestes et la posture corporelle [8]. Or, une hypothèse a été suggérée selon laquelle le cervelet construirait des modèles internes de nos interactions sociales afin de prédire la manière dont les actions des autres personnes seront exécutées, ainsi que nos réponses les plus probables face à ces comportements [1]. Une implication cérébelleuse dans le traitement de signaux émotionnels essentiels lors de ces interactions sociales, tels que les expressions faciales et vocales, fut alors fortement suspectée.

2.4.1. Expressions faciales émotionnelles

Concernant les liens entre cervelet et les aspects de production des expressions faciales émotionnelles, une étude d'Heilman et collaborateurs [24] a mis en évidence, chez un patient souffrant d'ataxie cérébelleuse, une incapacité à imiter ou produire sur commande des expressions faciales émotionnelles. En parallèle, une étude IRMf menée chez des participants sains a démontré des modulations au niveau de l'activité cérébelleuse, ainsi qu'au niveau des aires motrices primaires et du cuneus, lors de changements spontanés au niveau de l'expression faciale [11]. En ce qui concerne l'implication du cervelet lors de la reconnaissance des expressions faciales émotionnelles, plusieurs études cliniques, de neuroimagerie, mais également à grâce à l'utilisation de technique de neuromodulation, ont permis de suggérer une spécialisation et intégration fonctionnelle de ce dernier lors de ce processus de traitement. Par exemple, des difficultés pour la reconnaissance des émotions faciales négatives ont pu être observée chez les patients souffrant d'ataxie spinocérébelleuse [19] ou encore chez des patients ayant eu un AVC du cervelet [25]. La stimulation du vermis, via des techniques de neuromodulation, a également mis en évidence des modifications chez les participants dans leur capacité à reconnaître explicitement ou implicitement des visages émotionnels [26]. Ces résultats amènent aussi à considérer l'intégration fonctionnelle du cervelet au sein des réseaux neuronaux sous-tendant le traitement des expressions faciales émotionnelles. Une méta-analyse, incluant 105 études IRMf investiguant la reconnaissance faciale des émotions, a en effet mis en évidence la présence du cervelet au sein de plusieurs systèmes neuronaux différentiels selon les émotions de base présentées [27]. L'hémisphère cérébelleux gauche s'intégrerait dans les réseaux neuronaux sous-tendant la reconnaissance de la joie et de la colère, alors que l'hémisphère droit serait impliqué dans le traitement de la peur. D'autres recherches ont plutôt suggéré que ce « petit cerveau » ferait partie des circuits neuronaux communs à la production et la perception des émotions faciales, qui permettent de faciliter la compréhension de l'état émotionnel d'autrui via l'implication des neurones miroirs. Une étude récente, menée

en IRMf chez 178 participants sains, a en effet investigué d'avantage cette hypothèse en postulant qu'il existerait des activations communes, pour l'observation et l'exécution de certaines expressions faciales émotionnelles [28]. En demandant aux participants de percevoir ou imiter des expressions faciales de joie ou de colère, ils ont pu observer des activations spécifiques à la colère dans le gyrus frontal inférieur gauche (partie operculaire) et dans les lobules VII et VIII des hémisphères cérébelleux. Ce réseau aurait déjà été identifié lors de la visualisation et la reconnaissance de violation des normes sociales, ce qui a permis aux auteurs de renforcer l'hypothèse selon laquelle un tel mécanisme miroir est essentiel pour la production de réactions émotionnellement adéquates et efficaces à notre environnement social [28].

Cependant, malgré le fait que le traitement des expressions vocales constitue également un élément fondamental lors des interactions sociales, nous allons voir que les travaux concernant la spécialisation et l'intégration fonctionnelle du cervelet dans le traitement des émotions véhiculées par la voix émergent également.

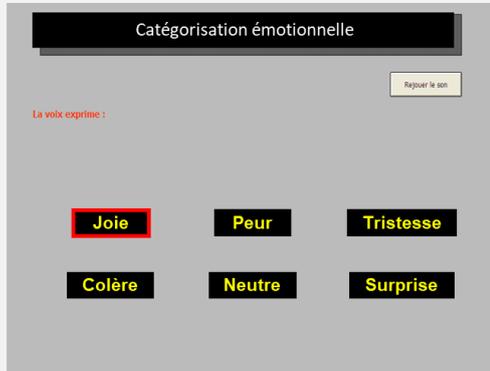
2.4.2. Expressions vocales émotionnelles

Malgré le double rôle cérébelleux qui a été proposé concernant la production et la perception de la parole [29], ainsi que les liens faits entre le cervelet et le traitement des émotions, les investigations concernant l'implication cérébelleuse dans les processus d'encodage et décodage de l'émotion dans la voix sont rares. Une étude clinique a fait état de difficultés chez un patient souffrant de dégénérescence cérébelleuse idiopathique pour produire ou imiter des phrases exprimées avec une émotion [24]. Une autre recherche investiguant les bases neuronales lors de la production de la prosodie émotionnelle chez les participants sains en IRMf a rapporté des activations importantes dans le vermis cérébelleux, en lien avec les variations de la fréquence fondamentale (f_0), suggérant ainsi que le vermis cérébelleux modulerait la fréquence fondamentale dans la production de la parole émotionnelle [30]. En ce qui concerne la reconnaissance des émotions vocales, seulement deux études cliniques se sont

intéressées aux performances de reconnaissance de la prosodie émotionnelle chez les patients présentant un dysfonctionnement cérébelleux. Une première étude menée chez 15 patients ayant eu un AVC ischémique cérébelleux, a montré que leur reconnaissance de la prosodie émotionnelle était altérée et ce particulièrement pour les émotions à valence négative et notamment la peur [25]. Une autre recherche, d'Heilman et collaborateurs [24], a rapporté des résultats contradictoires chez un patient atteint d'ataxie progressive. Aucune difficulté dans la reconnaissance des émotions n'avait été identifiée chez ce patient. Ce manque de consensus dans les résultats pourrait notamment reposer sur la différence de méthodologie de ces deux études et les nombreux biais qu'elles contiennent. Par exemple, ces études ont utilisé des épreuves impliquant un processus de catégorisation et de discrimination. Or, ces dernières sont connues pour être moins sensibles car entraînant des effets plafonds et/ou des biais dit de « catégorisation » [31] (encadré 2). De plus, au-delà du fait que le nombre de stimuli utilisés dans ces deux études soit très faible (remettant possiblement en cause la puissance statistique nécessaire pour pouvoir réaliser de solides inférences), les auteurs ont utilisé des phrases avec un contenu sémantique dans leur tâche émotionnelle. Or, lors de recherche en modalité auditive, il serait préférable d'utiliser des pseudo-phrases pour que le contenu sémantique des mots ne soit pas un facteur confondant [31].

Encadré 2

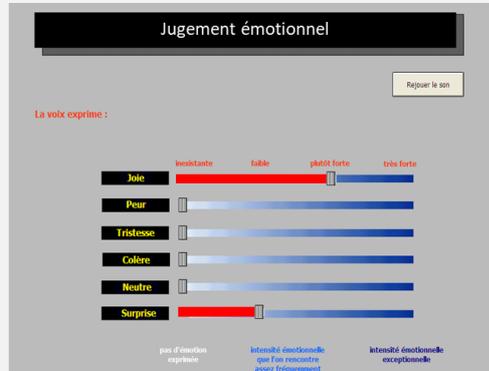
Illustration de deux méthodes permettant de recueillir des jugements émotionnels pour un stimulus exprimant la joie : la méthode présentée à gauche est plus susceptible d'entraîner un biais de catégorisation car elle ne permet pas de recueillir les jugements sur les échelles dites « non-cibles »



Consigne. Choisir quelle émotion est exprimée par la voix parmi les 6 émotions proposées.

Indice de congruence= 100.

Indice de discrimination= 100-0 = 100



Consigne. Juger à quel point les voix entendues expriment des émotions.

Indice de congruence= 75

Indice de discrimination= $75 - \left(\frac{40+0+0+0+0}{5} \right) = 67$

L'indice de congruence correspond à la note moyenne donnée à l'émotion cible.

L'indice de discrimination correspond à la différence entre la note donnée à l'émotion « cible » (congruence) et la moyenne des notes attribuées aux cinq autres émotions « non-cibles ».

Dans le contexte de l'étude de la reconnaissance de la prosodie émotionnelle, le modèle de Schirmer et Kotz [32] reste consensuel malgré de récentes et régulières mises à jour [33]. Selon ce modèle, le traitement de la prosodie émotionnelle est décrit comme un processus complexe qui serait opéré selon une chaîne de traitement, hiérarchisé en 3 étapes (voir figure 2) et sous-tendu par un réseau cérébral impliquant les structures de la voie auditive ventrale et celles impliquées dans les processus cognitifs et émotionnels. En outre, le cervelet pourrait intervenir dans chacune de ces étapes du traitement de la prosodie émotionnelle telles que décrites dans ce modèle.

[Figure 2 ici]

En effet, dès la *première étape de traitement sensoriel*, le cervelet pourrait contribuer au traitement de certaines informations acoustiques (telles que la fréquence fondamentale, l'intensité et la qualité vocale) qui permettent à un auditeur d'inférer l'état émotionnel d'un

individu. En ce qui concerne le traitement de la fréquence fondamentale, une étude a, par exemple, mis en évidence qu'une augmentation de l'activité dans certaines régions cérébelleuses (crus I et II, lobules VI, VIIB et VIIB) était retrouvée lors de tâche de discrimination de pitch (ou f_0), en comparaison à une écoute passive, réalisée par des participants sains [34]. Concernant l'intensité ou encore la qualité vocale, d'autres chercheurs se sont intéressés aux performances de patients présentant un dysfonctionnement cérébelleux dans des tâches de discrimination d'intensité ou de durée de son [35]. Ils ont montré que les patients rencontraient des difficultés pour la discrimination de durée entre deux sons mais ne présentaient pas de déficit pour la discrimination de l'intensité sonore. D'autres aires cérébelleuses, notamment le lobule VI et les Crus I et II ont aussi été associées au traitement des composantes acoustiques liées au timbre [36]. Il existerait, de plus, des sensibilités hémisphériques cérébelleuses potentiellement asymétriques selon la résolution temporelle des stimuli: l'hémisphère cérébelleux droit serait impliqué dans les modulations rapides du signal tandis que le gauche sous-tendrait le traitement des modulations lentes [37]. Les représentations de la structure temporelle, établies sur différentes échelles (courtes et longues), permettraient ainsi de guider les processus de pondérations réalisés lors de la transmission de l'information auditive entre les gyri et les sulci temporaux supérieurs [37].

Une étude réalisée au sein de notre équipe a permis de mettre en évidence la participation du cervelet lors de *l'étape d'intégration des indices acoustiques significatifs sur le plan émotionnel* [38]. Les performances en reconnaissance de prosodie émotionnelle ont été investiguées chez 24 patients avec AVC ischémique cérébelleux et chez 24 participants sains. Les paramètres acoustiques pertinents (liés à la fréquence, l'énergie, les aspects spectraux et temporels) ont été extraits des stimuli vocaux et insérés comme covariées dans notre modèle statistique afin d'observer la part de variance expliquée par ces derniers. Les résultats ont montré qu'une part significative de la variance des performances des patients, pour la tâche de

reconnaissance de la prosodie émotionnelle, était expliquée par divers paramètres acoustiques (tels que la fréquence fondamentale, l'amplitude ou encore les aspects spectraux).

Enfin, l'implication fonctionnelle cérébelleuse lors de *l'ultime étape sous-tendant les jugements évaluatifs de haut niveau* a été révélée par les difficultés observées chez les patients avec une atteinte cérébelleuse pour traiter les émotions, et notamment celles à valence négative (colère, peur, tristesse) ou neutre [38, 39]. Ceci s'accorde notamment avec les hypothèses présentes dans littérature concernant le rôle du cervelet postérieur dans le traitement des signaux émotionnels négatifs [19]. Les lobules VI, VIIb et le Crus I (les régions mises en lien avec les mauvaises attributions émotionnelles des patients dans le cadre de nos études) ont effectivement été proposés comme fortement impliqués lors de traitement d'émotions négatives [19]. Ces mêmes régions ont aussi été retrouvées comme fortement activées lors de tâches exécutives, ce qui conduit à suggérer que les parties latérales postérieures des hémisphères cérébelleux seraient plus largement impliquées dans les aspects cognitifs du traitement émotionnel (mémoire de travail, allocation de l'attention, évaluation des émotions, sélection des réponses [19]).

Ces résultats plaident donc en faveur d'un rôle fonctionnel du cervelet lors des trois étapes sous-tendant la reconnaissance des émotions vocales. Or, nous allons voir qu'en investiguant l'intégration fonctionnelle cérébelleuse lors de ce traitement de la prosodie émotionnelle, il est possible de proposer un modèle intégratif pour le traitement des émotions véhiculées par la voix.

3) Spécialisation et intégration fonctionnelle du cervelet dans les émotions

Nous nous sommes intéressés à l'intégration fonctionnelle du cervelet au sein des réseaux neuronaux sous-tendant le traitement des émotions véhiculées par la voix [40]. Les résultats ont montré que certaines performances déficitaires retrouvées chez les patients avec lésion du cervelet, notamment pour la reconnaissance de la prosodie de tristesse, étaient liées à

un réseau neuronal spécifique reliant le cervelet aux cortex frontal (gyrus frontal inférieur pars triangularis), temporal (gyrus temporal inférieur) et pariétal (lobule pariétal inférieur, gyrus postcentral et gyrus angulaire) gauches. Certaines de ces régions interviennent effectivement lors du traitement de la prosodie émotionnelle, notamment lors de processus de traitement de haut niveau comme la prise de décision (par exemple, le gyrus frontal inférieur) ou lors de processus d'intégration sémantique (par exemple le gyrus angulaire) [40]. Ces résultats corroboreraient également les hypothèses concernant le rôle du cervelet dans le traitement des informations opérant à une échelle temporelle très fine. Le réseau neuronal identifié dans cette étude était spécifiquement localisé dans l'hémisphère cérébral gauche, lui-même connu pour sous-tendre le traitement des informations temporelles survenant à une échelle courte [32, 33]. De plus, les performances déficitaires pour la reconnaissance de la prosodie de tristesse reflétaient bien les conséquences qui peuvent survenir à la suite d'une altération de l'analyse et de l'extraction de la structure temporelle fine des stimulus vocaux. En effet, la prosodie de tristesse est caractérisée par une faible variabilité au niveau de l'intensité et de la fréquence fondamentale mais également des irrégularités microstructurelles (c'est-à-dire des irrégularités à court terme dans la fréquence fondamentale, l'intensité et/ou la durée) [31] qu'il est nécessaire de traiter de manière optimale pour reconnaître cette prosodie.

Ainsi, sur la base de ces résultats prônant une spécialisation et intégration fonctionnelle du cervelet dans le traitement de la prosodie émotionnelle, un modèle intégratif a pu être élaboré (voir figure 3). Dans ce dernier, nous suggérons qu'un stimuli vocal émotionnel serait traité par le cortex cérébral, les NGC mais aussi le cervelet. Ce traitement serait notamment réalisé avec la participation de chaque région sensorimotrice, associative et limbique de ces différentes structures. En effet les hémisphères cérébelleux postérieurs participeraient à différentes étapes du traitement de la prosodie émotionnelle [38, 39] faisant elles-mêmes appel à ces différentes régions. Ainsi, à partir de l'extraction des modulations saillantes des propriétés du son réalisée

par ce dernier afin de construire une représentation interne des événements structurée temporellement, des interactions temporo-cérébelleuses réciproques permettraient d'ajuster la représentation corticale de l'information auditive à un moment pertinent [37]. Grâce à sa capacité à analyser des patterns temporels irréguliers [41], le cervelet serait capable de déceler les variations fines qui s'écarteraient éventuellement de ce qui est toléré en termes de réponse attendue (prédite sous forme modèle interne) par rapport à l'état actuel de l'individu [42]. Les NGC pourraient également utiliser cette représentation interne de la structure temporelle des séquences sonores pour recruter et synchroniser l'activité des structures corticales et sous-corticales requises pour le processus pertinent, ainsi que pour renforcer et affiner les unités des représentations de séquences précédemment établies (chunks), ou pour construire de nouvelles unités [20]. C'est notamment grâce à leur capacité à traiter les patterns temporels réguliers [41] que les NGC détecteraient la similarité avec des réponses qui ont été précédemment récompensées [22].

[Figure 3 ici]

Conclusion et perspectives futures

Depuis quelques années, un intérêt croissant s'est développé, tant dans le domaine clinique que neuroscientifique, pour étudier le rôle du cervelet dans les émotions. De manière plus générale, l'ensemble des résultats obtenus soulignent le rôle du cervelet, et de ses interactions avec d'autres structures, à la fois dans les processus de traitement de bas et haut niveau, afin de garantir une adaptation prédictive efficace lors de la rencontre avec un environnement dynamique. Ainsi, le consensus qui semble se dessiner quant à l'existence d'une implication significative du cervelet dans le traitement des émotions amène certains chercheurs à établir des liens avec les déficits sociocognitifs retrouvés dans certaines pathologies neuropsychiatriques et neurodéveloppementales. En effet, puisque des anomalies structurelles

et fonctionnelles du cervelet ont été observé chez les patients souffrant de schizophrénie, de trouble du spectre autistique, de trouble bipolaire, de trouble dépressif majeur ou encore de trouble de déficit de l'attention avec ou sans hyperactivité (pour une revue, voir [1]), des stratégies d'intervention thérapeutiques commencent à émerger. Par exemple, des chercheurs ont développé un protocole utilisant la stimulation magnétique transcrânienne pour améliorer la connectivité fonctionnelle entre les régions frontopariétales et le cervelet chez les patients souffrant de schizophrénie et ont pu observer une diminution des symptômes négatifs chez ces patients [43]. Ainsi, le progrès des connaissances quant au rôle non-moteur du cervelet encourage le développement de nouveaux outils d'évaluation afin de mieux détecter et caractériser les symptômes émergeant à la suite d'une atteinte cérébelleuse. Par conséquent, ces évaluations ouvriront la voie à des possibilités d'intervention thérapeutiques innovantes et constituent un message d'espoir pour l'amélioration de la qualité de vie des patients.

Bibliographie

1. Schmahmann JD. Emotional disorders and the cerebellum: Neurobiological substrates, neuropsychiatry, and therapeutic implications. *Handbook of Clinical Neurology*, 2021. 183: 109-154.
2. Combettes M. Absence complète du cervelet, des pédoncules postérieurs et de la protubérance cérébrale chez une jeune fille morte dans sa onzième année. *Bull Soc Anat Paris*, 1831. 5(148-57): 1.
3. Knoepfel H, Macken J. Le syndrome psycho-organique dans les hérédos-ataxies. *J Belge Neurol Psychiat*, 1947. 47: 314-23.
4. Nashold BS, Slaughter DG. Effects of stimulating or destroying the deep cerebellar regions in man. *Journal of neurosurgery*, 1969. 31(2): 172-186.
5. Riklan M, Marisak I, Cooper I, *The cerebellum, epilepsy and behavior*. 1974, Psychological studies of chronic cerebellar stimulation in man.
6. Heath RG, Cox AW, Lustick LS. Brain activity during emotional states. *American Journal of Psychiatry*, 1974. 131(8): 858-862.
7. Schutter DJ, Van Honk J. The cerebellum on the rise in human emotion. *The Cerebellum*, 2005. 4(4): 290-294.
8. Scherer KR. On the nature and function of emotion: A component process approach. *Approaches to emotion*, 1984. 2293(317): 31.
9. Schmahmann JD, Sherman JC. The cerebellar cognitive affective syndrome. *Brain: a journal of neurology*, 1998. 121(4): 561-579.
10. Buckner RL. The cerebellum and cognitive function: 25 years of insight from anatomy and neuroimaging. *Neuron*, 2013. 80(3): 807-815.
11. Leitão J, Meuleman B, Van De Ville D, *et al*. Computational imaging during video game playing shows dynamic synchronization of cortical and subcortical networks of emotions. *PLoS biology*, 2020. 18(11): e3000900.
12. Hoche F, Guell X, Vangel MG, *et al*. The cerebellar cognitive affective/Schmahmann syndrome scale. *Brain*, 2018. 141(1): 248-270.
13. Rosenbloom MH, Schmahmann JD, Price BH. The functional neuroanatomy of decision-making. *The Journal of neuropsychiatry and clinical neurosciences*, 2012. 24(3): 266-277.
14. Han H. Cerebellum and Emotion in Morality. In *Book.Cerebellum and Emotion in Morality*, Springer.2022 p. 179-194.
15. Schmahmann JD. The role of the cerebellum in affect and psychosis. *Journal of Neurolinguistics*, 2000. 13(2-3): 189-214.
16. Colibazzi T, Posner J, Wang Z, *et al*. Neural systems subserving valence and arousal during the experience of induced emotions. *Emotion*, 2010. 10(3): 377.
17. Styliadis C, Ioannides AA, Bamidis PD, *et al*. Distinct cerebellar lobules process arousal, valence and their interaction in parallel following a temporal hierarchy. *Neuroimage*, 2015. 110: 149-61.
18. Baumann O, Mattingley JB. Functional topography of primary emotion processing in the human cerebellum. *NeuroImage*, 2012. 61(4): 805-811.
19. Adamaszek M, D'Agata F, Ferrucci R, *et al*. Consensus Paper: Cerebellum and Emotion. *Cerebellum*, 2017. 16(2): 552-576.
20. Pierce JE, Péron JA. Reward-Based Learning and Emotional Habit Formation in the Cerebellum. In *Book.Reward-Based Learning and Emotional Habit Formation in the Cerebellum*, Springer.2022 p. 125-140.
21. Shin JH, Shin SA, Lee J-Y, *et al*. Precuneus degeneration and isolated apathy in patients with Parkinson's disease. *Neuroscience Letters*, 2017. 653: 250-257.
22. Bostan AC, Strick PL. The basal ganglia and the cerebellum: nodes in an integrated network. *Nature Reviews Neuroscience*, 2018. 19(6): 338-350.
23. Klaus J, Schutter DJ. Functional topography of anger and aggression in the human cerebellum. *NeuroImage*, 2021. 226: 117582.
24. Heilman K, Leon S, Burtis D, *et al*. Affective communication deficits associated with cerebellar degeneration. *Neurocase*, 2014. 20(1): 18-26.
25. Adamaszek M, D'Agata F, Kirkby KC, *et al*. Impairment of emotional facial expression and prosody discrimination due to ischemic cerebellar lesions. *Cerebellum*, 2014. 13(3): 338-45.
26. Ferrari C, Oldrati V, Gallucci M, *et al*. The role of the cerebellum in explicit and incidental processing of facial emotional expressions: a study with transcranial magnetic stimulation. *NeuroImage*, 2018. 169: 256-264.
27. Fusar-Poli P, Placentino A, Carletti F, *et al*. Functional atlas of emotional faces processing: a voxel-based meta-analysis of 105 functional magnetic resonance imaging studies. *J Psychiatry Neurosci*, 2009. 34(6): 418-32.
28. Krautheim JT, Steines M, Dannlowski U, *et al*. Emotion specific neural activation for the production and perception of facial expressions. *Cortex*, 2020. 127: 17-28.
29. Ackermann H. Cerebellar contributions to speech production and speech perception: psycholinguistic and neurobiological perspectives. *Trends in neurosciences*, 2008. 31(6): 265-272.
30. Pichon S, Kell CA. Affective and sensorimotor components of emotional prosody generation. *J Neurosci*, 2013. 33(4): 1640-50.
31. Grandjean D, Baenziger T. Chapitre 4. Expression vocale des émotions. In *Book.Chapitre 4. Expression vocale des émotions*.2014 p.

32. Schirmer A, Kotz SA. Beyond the right hemisphere: brain mechanisms mediating vocal emotional processing. *Trends in cognitive sciences*, 2006. 10(1): 24-30.
33. Grandjean D. Brain networks of emotional prosody processing. *Emotion Review*, 2021. 13(1): 34-43.
34. Petacchi A, Kaernbach C, Ratnam R, *et al.* Increased activation of the human cerebellum during pitch discrimination: a positron emission tomography (PET) study. *Hear Res*, 2011. 282(1-2): 35-48.
35. Ivry RB, Keele SW. Timing functions of the cerebellum. *J Cogn Neurosci*, 1989. 1(2): 136-52.
36. Alluri V, Toiviainen P, Jääskeläinen IP, *et al.* Large-scale brain networks emerge from dynamic processing of musical timbre, key and rhythm. *Neuroimage*, 2012. 59(4): 3677-3689.
37. Stockert A, Schwartz M, Poeppel D, *et al.* Temporo-cerebellar connectivity underlies timing constraints in audition. *bioRxiv*, 2021.
38. Thomasson M, Benis D, Saj A, *et al.* Sensory contribution to vocal emotion deficit in patients with cerebellar stroke. *NeuroImage: Clinical*, 2021. 31: 102690.
39. Thomasson M, Saj A, Benis D, *et al.* Cerebellar contribution to vocal emotion decoding: Insights from stroke and neuroimaging. *Neuropsychologia*, 2019. 132: 107141.
40. Thomasson M, Ceravolo L, Corradi-Dell'Acqua C, *et al.* Dysfunctional cerebello-cerebral network associated with vocal emotion impairments. submitted.
41. Breska A, Ivry RB. Double dissociation of single-interval and rhythmic temporal prediction in cerebellar degeneration and Parkinson's disease. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2018. 115(48): 12283-12288.
42. Ito M. Control of mental activities by internal models in the cerebellum. *Nature Reviews Neuroscience*, 2008. 9(4): 304-313.
43. Zhu L, Zhang W, Zhu Y, *et al.* Cerebellar theta burst stimulation for the treatment of negative symptoms of schizophrenia: A multicenter, double-blind, randomized controlled trial. *Psychiatry Research*, 2021. 305: 114204.
44. Thomasson M, Péron J. Principles of Brain and Emotion: Beyond the Cortico-Centric Bias. In *Book.Principles of Brain and Emotion: Beyond the Cortico-Centric Bias*, Springer.2022 p. 13-24.

Figures

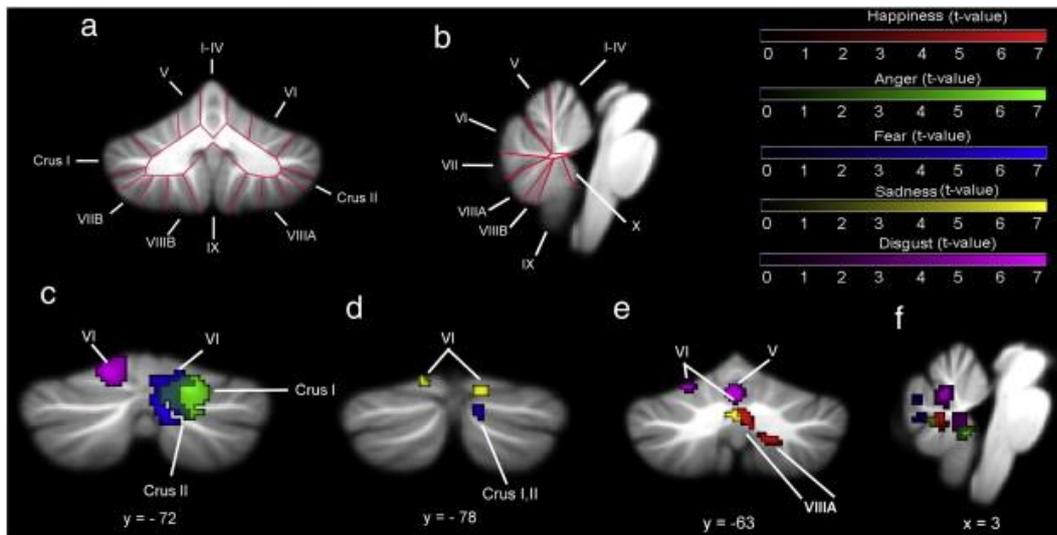


Figure 1. Différents patterns d'activation cérébelleux sont retrouvés pour différentes émotions spécifiques. Figure issue de l'article de Baumann & Mattingley (2012). Reproduit avec permission (numéro de licence : 5490231448183).

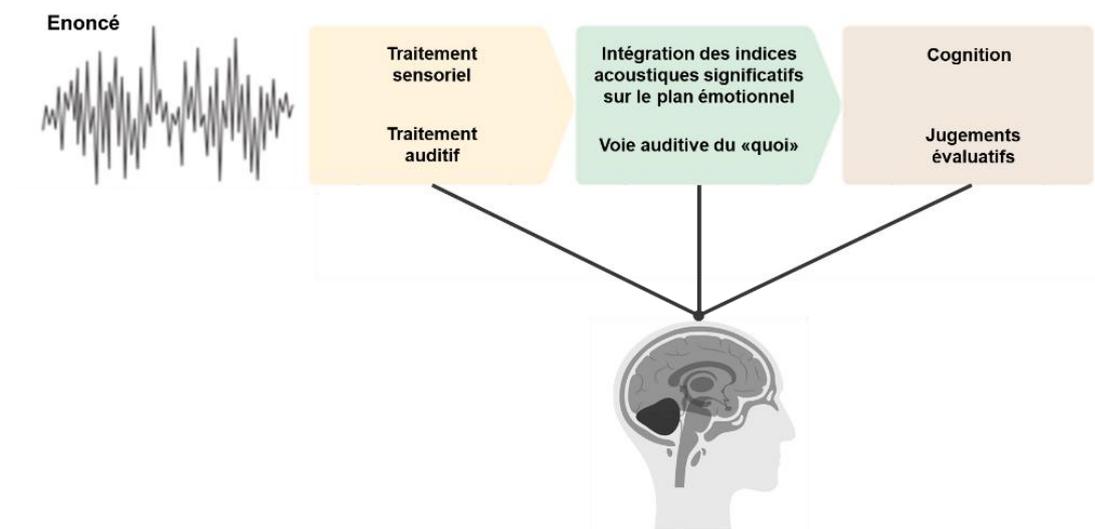


Figure 2. Représentation des trois étapes du traitement de la prosodie émotionnelle (traitement sensoriel, intégration des indices acoustiques significatifs sur le plan émotionnel et évaluation cognitive) selon le modèle neuropsychologique de la perception et du traitement de la prosodie émotionnelle. Adapté de Schirmer & Kotz, 2006 et Pierce & Péron, 2020.

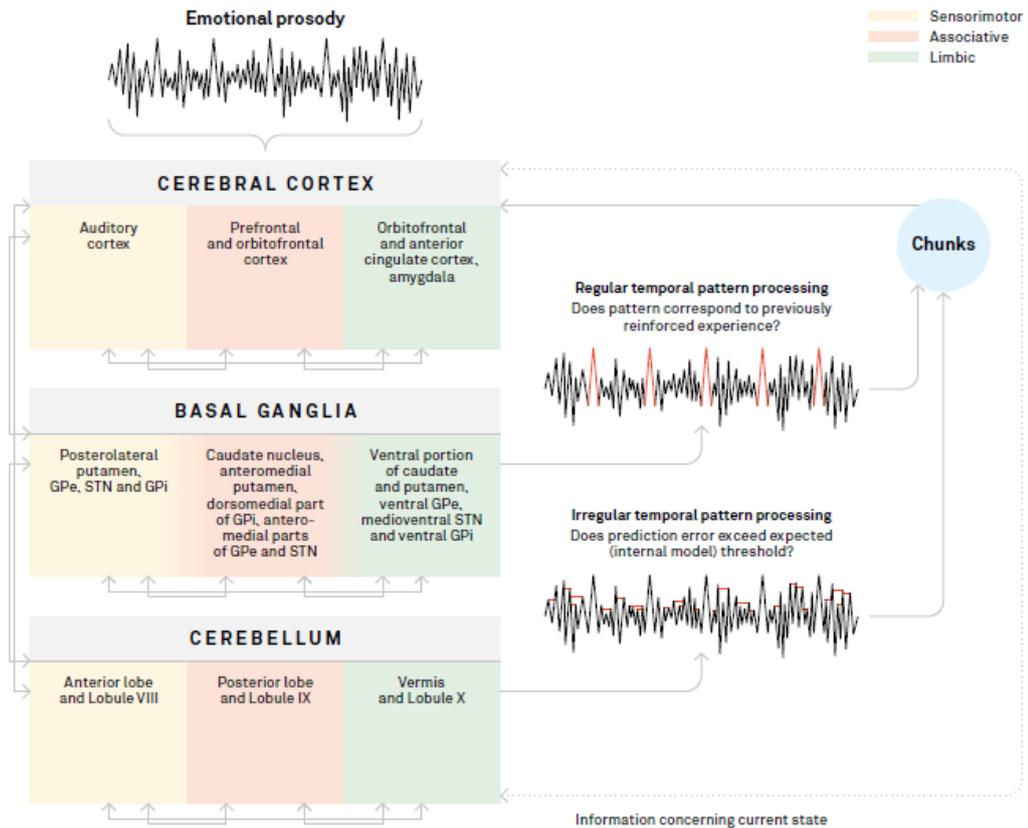


Figure 3. Proposition théorique du modèle intégratif du traitement de la prosodie émotionnelle, d'après Thomasson et Péron [44]. Un stimulus prosodique émotionnel est traité par le cortex cérébral, les noyaux gris centraux (NGC) et le cervelet. Chaque région sensorimotrice (jaune), associative (orange) et limbique (vert) de chaque structure participe à ce traitement. Les différences en termes de traitement de patterns temporels sont illustrées pour les NGC (traitement de patterns temporels réguliers) et pour le cervelet (traitement de patterns temporels irréguliers). Suite à une exposition répétée, les NGC participeraient à l'élaboration de « chunks » de cette expérience émotionnelle liée à ce stimulus. Le schéma d'activité neuronale associé pourra ainsi être réactivé automatiquement lors d'une rencontre ultérieure pour produire le comportement approprié. Le cervelet veille à l'adéquation de chaque élément de la réponse par rapport à l'état actuel et à l'état prédit, en modifiant, si nécessaire, les paramètres d'implémentation du modèle interne pour minimiser son erreur de prédiction. Ces informations peuvent également contribuer à renforcer et affiner les chunks et donc permettre de recruter et synchroniser l'activité des structures corticales et sous-corticales requises pour ce processus de manière encore plus efficiente.