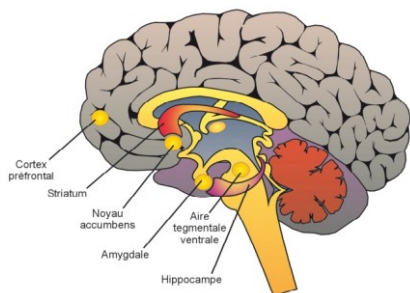


Note n° **20**

Neurosciences et responsabilité de l'enfant

Novembre 2019



Source : INSERM. Conduites addictives chez les adolescents. Usages, prévention et accompagnement. Collection Expertise collective, Inserm, 2014

Résumé

- Depuis trente ans, les neurosciences ont donné à la notion d'immaturité des mineurs, qui justifie l'autonomie du droit pénal qui leur est applicable, un véritable contenu scientifique¹.
- Pendant l'adolescence, se déroule en effet une réorganisation structurelle et fonctionnelle d'ampleur du cerveau humain, tandis que, concomitamment, se produisent de profondes transformations cognitives, psychologiques et comportementales. C'est seulement au terme de ce processus que les jeunes sujets disposent des capacités de discernement et de contrôle des actes permettant de les considérer comme pleinement responsables d'un point de vue pénal.
- Malgré cet apport à la réflexion sur la justice des mineurs, les neurosciences ne permettent pas de définir scientifiquement un âge de la responsabilité pénale. Par ailleurs, à ce jour, les techniques d'imagerie cérébrale ne constituent pas à elles seules un outil fiable d'expertise judiciaire.

M. Michel Amiel, sénateur

La justice spécialisée pour les enfants en quête de fondements scientifiques

Le mot « enfant » est utilisé ici en référence à l'ordonnance du 2 février 1945, qui traite de l'enfance délinquante. Il résulte de ce texte fondateur que l'enfance, sur un plan pénal, se définit comme la période de la vie qui s'achève avec la minorité² et pendant laquelle la loi écarte l'application du droit pénal général au profit d'un traitement pénal spécifique. Ce dernier respecte en France deux règles, que le Conseil constitutionnel a dégagées et érigées en principe constitutionnel³ :

- la première veut que la responsabilité pénale des enfants soit atténuée en raison de leur âge. C'est ce qu'on appelle l'excuse de minorité⁴ ;
- la seconde que les mesures prononcées en réponse aux infractions qu'ils commettent le soient par des juridictions spécialisées ou selon des procédures adaptées⁵ et que ces mesures visent, autant que possible, leur relèvement éducatif et moral⁶.

Bien qu'ancienne, l'institution par la loi d'une justice spécialisée pour les enfants s'est longtemps passée de justification scientifique pour se fonder essentiellement sur le sens commun, c'est-à-dire sur la croyance collective, nourrie par le constat que n'importe quel adulte peut faire, que la pleine acquisition des capacités de discernement et de contrôle de soi nécessaires pour répondre de ses actes devant un tribunal ne s'acquiert qu'avec l'âge. C'est bien l'immaturité de l'enfant, le fait qu'il soit un être en développement, qui justifie doctrinalement

que sa responsabilité pénale soit appréciée et modulée en fonction de son degré de maturité.

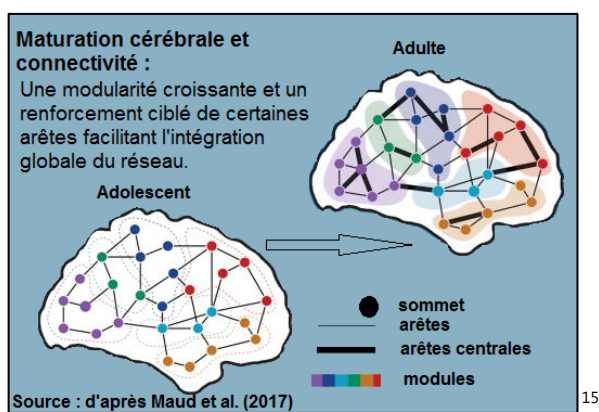
La présente note vise donc, d'une part, à établir si les progrès des neurosciences au cours des trente dernières années ont changé notre compréhension de cette notion d'immaturité, d'autre part, à se demander ce que cela implique quant à l'organisation et au fonctionnement de la justice des mineurs.

Une réorganisation structurelle et fonctionnelle du cerveau se produit pendant l'adolescence

Les progrès des techniques non invasives d'observation du cerveau⁷ ont permis de confirmer que le cerveau adolescent n'est pas un cerveau adulte en « miniature ». Il possède des spécificités anatomiques et fonctionnelles marquées⁸. À partir de la puberté et jusqu'à la troisième décennie de l'existence, sous l'effet complexe et encore mal cerné de mécanismes biologiques endogènes et d'interactions avec l'environnement social, il se produit en effet :

- une destruction massive de synapses au sein des différentes aires cérébrales, ce qui entraîne une forte réduction du volume de substance grise⁹. Cet élagage synaptique¹⁰ n'est pas synchrone dans les différentes parties du cerveau. La région du cortex préfrontal¹¹, dont le fonctionnement est étroitement lié aux fonctions cognitives exécutives¹², connaît une maturation plus lente que le système limbique¹³ – qui lui est impliqué dans les états émotionnels comme la peur, l'agressivité, le stress, le plaisir ou le désir ;

- un fort développement de la substance blanche, et donc de la connectivité structurelle entre les aires cérébrales. L'imagerie par tenseur de diffusion¹⁴, qui permet de visualiser la structure des faisceaux d'axones myélinisés, révèle une transformation profonde de cette structure au cours de l'adolescence, notamment avec un développement des fibres reliant le cortex au thalamus, au noyau lenticulaire et au noyau caudé. L'analyse des données de neuroimagerie fonctionnelle à l'aide de la théorie des graphes confirme que ce processus se traduit par un renforcement sensible de la synergie de fonctionnement des aires cérébrales. Chez l'adulte, la corrélation d'activation entre des zones cérébrales éloignées, notamment lors de l'exécution des tâches exécutives, est sensiblement plus forte que chez l'adolescent : l'adulte mobilise donc simultanément des régions cérébrales dispersées, là où l'adolescent mobilise des circuits cérébraux beaucoup plus localisés.

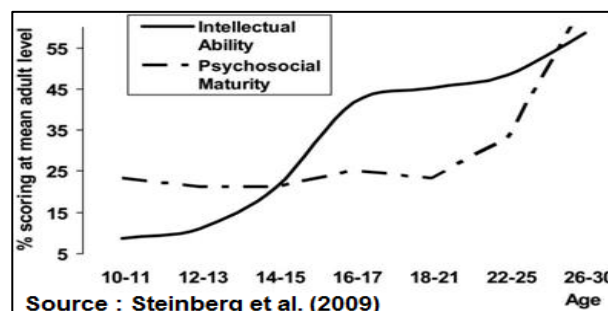


La maturation cérébrale s'accompagne d'un fort développement cognitif et psychosocial

Parallèlement à la maturation neurobiologique du cerveau, se produisent pendant l'adolescence de profonds changements cognitifs, psychologiques, relationnels et comportementaux. On observe¹⁶ notamment que :

- les capacités cognitives impliquées dans le raisonnement logique progressent fortement à partir de 11 ans, en moyenne, pour atteindre un niveau comparable à celui des adultes vers 15-16 ans. À cet âge, la plupart des individus sont capables de raisonner abstraitement, d'évaluer le sens et la conséquence des actes et en définitive de prendre des décisions de la même manière que des adultes, du moins en l'absence de tensions émotionnelles et d'influence des pairs ;
- les capacités qui définissent la maturité psychosociale progressent fortement à partir de 14-15 ans et leur développement se poursuit au-delà de l'adolescence, jusqu'à la trentaine. L'évaluation de cette maturité psychosociale à travers des tests psychologiques prend en compte l'attitude face au

risque¹⁷, la tendance à rechercher des sensations fortes, l'impulsivité, la résistance à l'influence des pairs et la capacité à intégrer des considérations de long terme dans la prise de décision. On observe que, dans ces divers domaines, les jeunes sujets atteignent le niveau de performance médian des adultes seulement vers 22-23 ans. Il existe donc des écarts sensibles, dans les capacités de maîtrise de soi, entre les adolescents et les jeunes adultes et des adultes plus mûrs¹⁸.



Maturation cérébrale et conduites adolescentes : des liens qu'on cherche à mieux comprendre

La maturation cérébrale et les changements psychocognitifs et comportementaux qui surviennent à partir de la puberté sont, selon toute vraisemblance, étroitement liés. Comprendre leurs interactions constitue aujourd'hui l'un des axes majeurs de recherche en neurosciences cognitives. Ces dernières recourent aux techniques d'imagerie cérébrale fonctionnelle pour observer les modifications qui se produisent dans le cerveau au moment où les sujets accomplissent une tâche. Cela permet d'établir des corrélations toujours plus précises et systématiques entre ce qui se passe à l'intérieur du cerveau (notamment en termes d'activation des aires cérébrales) et les états émotionnels, les processus cognitifs et les comportements¹⁹.

L'hypothèse privilégiée par les neurosciences pour expliquer les spécificités de l'agir adolescent, notamment la sensibilité accrue aux récompenses immédiates ou à l'influence des pairs, l'engagement plus marqué dans les activités à risque ou une moindre capacité à contrôler pulsions et émotions, est que « l'immaturité des structures corticales impliquées dans les processus décisionnels de haut niveau, situées principalement au sein du cortex préfrontal, les placerait sous l'influence excessive du système limbique, ainsi que des systèmes de récompense²⁰ et de punition »²¹. Ce décalage dans le temps entre la maturation des centres émotionnels et celle des systèmes supérieurs de contrôle reviendrait à « démarrer le moteur sans disposer d'un conducteur qualifié »²².

Sans qu'on soit encore capable de décrire de façon précise et exhaustive les mécanismes en jeu, les neurosciences cognitives tendent à confirmer cette

hypothèse d'un lien entre maturation cérébrale et particularités de l'agir des adolescents :

- on observe, chez ces derniers, une activation relativement plus forte que chez les adultes des aires cérébrales impliquées dans les réactions émotionnelles lors de la réalisation d'expériences mettant en jeu une charge émotive. Cette sur-activation s'observe notamment au niveau de l'amygdale, dont on sait qu'elle est impliquée dans les réactions de peur, de colère ou de stress. Ce constat est cohérent avec la tendance comportementale des adolescents, prouvée par les tests psychologiques, à agir de manière plus impulsive que les adultes ; il est également cohérent avec les observations qui montrent la relative précocité de l'élagage synaptique au niveau du système limbique²³ ;

- en ce qui concerne le système de la récompense et les circuits dopaminergiques qui le sous-tendent, les études de neuro imagerie mettent en évidence une hyperactivité du striatum pendant l'adolescence au cours de la réalisation des tâches liées à l'évaluation des rapports bénéfices/coûts/risques des actions. Par ailleurs, on sait désormais que les niveaux de disponibilité en dopamine, ainsi que la densité en récepteurs en dopamine, sont plus élevés dans le cerveau pendant l'adolescence. Cette observation est cohérente avec les données comportementales prouvant que les adolescents font preuve d'un intérêt relativement plus fort que les adultes pour les perspectives de récompense de court terme et pour les expériences susceptibles de procurer des sensations fortes ;

- enfin, les études d'imagerie structurelle montrent que les connexions entre le cortex préfrontal et le cerveau émotionnel, notamment le striatum, sont les plus tardives à se mettre en place. L'intégration entre les noyaux sous-corticaux, où sont initiées les réactions émotionnelles, et les centres préfrontaux impliqués dans les processus d'inhibition et de contrôle demeure ainsi incomplète jusqu'aux premières années de l'âge adulte. Cela est cohérent avec le fait que les adolescents sont moins performants que les adultes dans la réalisation des tâches exécutives en situation émotionnellement « chaude ». Cela est également cohérent avec les observations de neuroimagerie fonctionnelle qui démontrent une synergie de fonctionnement plus forte chez l'adulte que chez l'enfant entre zones cérébrales éloignées.

Les principes qui fondent la justice des mineurs sont confortés par les neurosciences

L'amélioration de la connaissance du cerveau adolescent depuis trente ans permet d'éclairer plusieurs aspects du débat public sur la justice des mineurs, sans toutefois, à ce stade, en bouleverser les

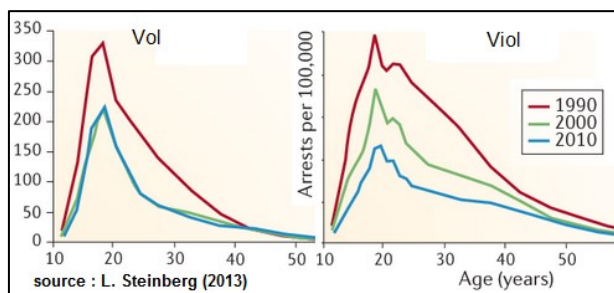
termes²⁴. En premier lieu, les neurosciences confirment que le discernement et le contrôle des actes, qui sont deux conditions nécessaires de la responsabilité pénale²⁵, sont bien liés à des facultés qui ne s'acquièrent qu'au terme d'un long processus de maturation neurobiologique et de développement psycho-cognitif. Présumer qu'un enfant ou un adolescent les possède de la même façon qu'un adulte est en contradiction avec ce que révèlent les neurosciences développementales²⁶. Ces dernières confortent donc l'autonomie du droit pénal des mineurs par rapport au droit pénal général.

Les neurosciences éclairent également les notions juridiques de discernement et de contrôle des actes. Sur un plan neurobiologique et cognitif, ces deux notions renvoient à des aptitudes différentes, qui reposent sur des circuits neuronaux distincts et se développent selon des rythmes spécifiques. Un adolescent peut être capable « à froid » de discerner la portée de ses actes et ne pas être en mesure d'adopter une attitude appropriée dans une situation réelle où il subit l'influence des pairs ou des émotions fortes. Cela confirme l'intérêt de maintenir deux âges-pivot dans la justice des mineurs : celui de la responsabilité pénale, qui correspond à l'âge d'accès au discernement, et celui plus tardif jusqu'auquel peut être invoquée une excuse de minorité, qui correspond à la maturité des fonctions de contrôle.

Un troisième point important concerne l'évaluation de la dangerosité et des risques de récidive. Les neurosciences établissent que le processus « normal »²⁷ de développement des êtres humains se traduit, pendant l'adolescence, par une multiplication des comportements impulsifs ou transgressifs, qui peuvent conduire, dans les situations les plus défavorables, à des conduites délinquantes pendant cette période de la vie²⁸. Symétriquement, la fin de la période des bouleversements adolescents favorise aussi un retour à des logiques comportementales plus rationnelles du point de vue adulte. Ces observations suggèrent que la délinquance juvénile possède une forte composante transitoire et que la dangerosité des mineurs délinquants peut s'analyser, dans de nombreux cas, non pas comme un caractère intrinsèque des individus concernés, mais comme un désordre momentané et réversible de leur comportement.

Cela est cohérent avec les observations statistiques qui montrent que la fréquence des conduites pénalement réprouvées ou des comportements à risque suit une courbe en forme de U inversé, appelée « courbe du crime », qui croît rapidement au cours de l'adolescence, atteint un maximum autour de 18-20 ans, puis diminue rapidement et fortement à l'âge adulte. Grâce aux neurosciences, on comprend désormais mieux les raisons de ce pic : il correspond

précisément à la période de la vie où les capacités exécutives de contrôle se mettent en place.



La composante transitoire de la délinquance juvénile contribue à légitimer la prééminence des mesures d'éducation et de protection des mineurs²⁹. En effet, si la justice doit punir et prendre des mesures de protection de la société, elle doit aussi préparer l'avenir en évitant d'enfermer les mineurs délinquants dans une définition figée qui ne correspond pas à la réalité d'un processus de maturation en cours et d'un risque de récidive relativement faible. Protéger et éduquer le mineur délinquant se justifie pleinement dès lors que l'immatunité de sa constitution peut expliquer son comportement coupable et laisse présager une évolution favorable au fur et à mesure qu'il gagnera en maturité³⁰.

Ces mesures de protection et d'éducation sont d'autant plus nécessaires que les neurosciences ont réévalué l'importance de l'adolescence dans le développement cérébral et psycho-cognitif. On sait désormais que tout ne se joue pas au stade fœtal et pendant la petite enfance. L'adolescence est une autre période clé de la construction de l'intellect et de la personnalité. La réponse judiciaire à la délinquance juvénile ne peut donc ignorer les implications de cette extrême plasticité du cerveau et du psychisme adolescents. Créer un environnement affectif, social et culturel favorable est particulièrement important dans cette phase cruciale de la vie où le futur adulte est en gestation³¹. Ainsi, placer un mineur délinquant dans un milieu carcéral fermé, où il va se construire au seul contact d'autres délinquants, c'est créer les conditions qui risquent d'en faire un délinquant plus endurci. De même, ne pas soustraire un mineur à l'influence d'un milieu affectif, familial ou social délétère qui le pousse vers la délinquance, c'est l'enfermer dans un destin délinquant. On peut désormais s'appuyer sur des arguments neuroscientifiques pour défendre ces idées.

Un dernier apport des neurosciences à la réflexion sur la justice des mineurs concerne le statut pénal des jeunes adultes. Dans la mesure où la maturation neurobiologique des circuits impliqués dans les fonctions exécutives se poursuit bien après l'âge de la majorité, il peut être opportun de permettre l'application à de jeunes adultes de certaines

dispositions de la justice des mineurs³², de manière à éviter un passage brutal, à l'âge de 18 ans, au régime pénal des adultes. Les jeunes adultes délinquants dont la maturation cérébrale et le développement psychologique sont inachevés peuvent en effet avoir d'un besoin d'un peu de temps supplémentaire pour achever leur construction dans des conditions propices.

Le neurodroit reste cependant une chimère en l'état actuel de la science

Au-delà de la confirmation de ces principes généraux, les neurosciences ne permettent pas de formuler des préconisations précises sur un sujet au cœur de la justice des mineurs, à savoir la définition de seuils d'âge. À quel âge doit-on présumer le discernement acquis et situer l'âge de la responsabilité pénale ? Jusqu'à quel âge doit-on présumer qu'il existe une moindre capacité de contrôle justifiant une excuse de minorité ? Aucun résultat neuroscientifique ne permet aujourd'hui de répondre à ces questions. La forte variabilité interindividuelle³³ des processus de maturation cérébrale, cognitive et psychologique, qui reflète à la fois les spécificités natives de chaque individu mais également – et de façon tout aussi cruciale – les différences de contextes affectif, culturel et social dans lesquels cet individu interagit et se construit, ne permettent pas de décrire un chemin ni un calendrier uniques de maturation et donc de définir des seuils d'âge applicables à tous³⁴. Cela ne veut pas dire qu'instaurer un âge légal de la responsabilité pénale soit injustifié, mais que cela relève de la responsabilité politique et non de la science.

Enfin, il faut souligner avec force les limites, voire même les risques, du recours aux neurosciences en tant qu'outil d'expertise judiciaire, qu'il s'agisse d'établir la responsabilité d'une personne ou d'évaluer sa dangerosité³⁵. Les neurosciences permettent en effet de décrire le fonctionnement du cerveau humain, mais seulement à partir du traitement statistique de nombreuses observations individuelles³⁶. Utiles dans le cadre de la recherche médicale et scientifique, ces résultats de nature probabiliste ne sont donc pas pertinents pour aider la justice à juger ou anticiper un comportement individuel³⁷. Il faut en particulier souligner l'absence de fondement neuroscientifique à une expertise fiable de la dangerosité, qui prétendrait « dépister » des personnes à risque avant tout passage à l'acte. L'utilisation des neurosciences à cette fin constituerait un dévoiement porteur de menaces graves pour les libertés individuelles et l'état de droit³⁸.

Sites Internet de l'OPECST :

<http://www.assemblee-nationale.fr/commissions/opecst-index.asp>

<http://www.senat.fr/opecst/>

Références

¹ Les neurosciences sont susceptibles d'intéresser de nombreux aspects de la vie pratique –notamment l'éducation. La présente note s'intéresse cependant uniquement aux implications des avancées neuroscientifiques dans le domaine du droit pénal, et plus précisément encore, du droit pénal applicable aux enfants. Il est certain que d'autres enjeux importants pourraient faire l'objet d'une note similaire de l'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques. La question des liens entre neurosciences et pédagogie en fait partie.

² Selon l'article 388 du code civil, le mineur est l'individu de l'un ou l'autre sexe qui n'a point encore l'âge de dix-huit ans accomplis.

³ Principe énoncé par le Conseil constitutionnel dans sa décision n° 2002-461 DC du 29 août 2002. Le Conseil a jugé que, de la loi du 12 avril 1906 sur la majorité pénale à l'ordonnance de 1945 relative à l'enfance délinquante, en passant par la loi du 22 juillet 1912 sur les tribunaux pour enfants, les lois de la République ont constamment reconnu ces deux règles, ce qui justifie qu'elles soient érigées en principe constitutionnel.

⁴ L'excuse de minorité permet l'atténuation des peines infligées à un mineur reconnu pénalement responsable mais en même temps encore trop immature pour mériter une peine aussi lourde qu'un adulte. En France, l'excuse de minorité conduit à réduire de moitié la peine encourue par les majeurs. Elle peut être écartée pour les mineurs âgés de 16 ans révolus à titre exceptionnel et de façon motivée. L'idée que la responsabilité pénale doit être appréciée et modulée en fonction de l'âge se retrouve dans la plupart des systèmes juridiques européens. C'est également une idée ancienne, puisqu'en droit romain, l'âge constituait déjà une cause normale ou naturelle d'irresponsabilité, décroissant avec l'âge selon trois situations :

- l'*infancia*, jusqu'à 7 ans ;
- l'*infanciae proximus*, état proche de l'enfance mais loin de la puberté ;
- le *puberti proximus*, qui se terminait à 14 ans pour les garçons et 12 ans pour les filles.

Selon l'appartenance à l'une de ces catégories, le régime d'irresponsabilité n'était pas le même. Ainsi, déjà dans l'Antiquité, s'affirmait la volonté d'appréhender la responsabilité selon l'âge et le degré de maturité.

⁵ Parmi les institutions spécifiques qui ont en charge la justice des mineurs en France, figure le juge des enfants. C'est la clé de voûte du système, puisqu'il est compétent au civil comme au pénal et qu'il a le pouvoir d'initier la procédure, de l'instruire, de juger l'affaire et de suivre l'application de ses décisions, ce qui constitue un cas unique dans le droit français.

⁶ La justice des mineurs institue ainsi la prééminence de l'éducatif sur le répressif et met en place un suivi éducatif spécifique, l'éducation surveillée, qui est devenue la protection judiciaire de la jeunesse.

⁷ Parmi ces techniques d'observation, il est pertinent de distinguer les techniques d'imagerie structurelle et les techniques d'imagerie fonctionnelle :

- les techniques d'imagerie cérébrale structurelle (ou anatomique) regroupent, d'une part, la tomographie par absorption de rayons X, qui permet de construire une image du cerveau à partir de plusieurs images prises aux rayons X selon différents angles, d'autre part, l'imagerie par résonance magnétique (IRM), qui construit des images en exploitant l'« écho » produit par les atomes d'hydrogène contenus dans le corps, lorsqu'ils reviennent à leur état initial après avoir été « basculés » par un champ magnétique de grande intensité. L'IRM, apparue à la fin des années 1970, présente une résolution spatiale beaucoup plus fine que la tomographie par absorption de rayons X. Ces deux techniques permettent de détecter des lésions, notamment des tumeurs ;

- les techniques de l'imagerie cérébrale fonctionnelle sont utilisées pour estimer l'activité cérébrale. Évidemment, elles ne permettent pas d'observer la pensée elle-même, mais seulement certaines modifications physiologiques qui surviennent à l'occasion de l'activité cérébrale. La plus ancienne de ces techniques est l'électro-encéphalographie (EEG), qui permet d'enregistrer l'activité électrique du cerveau (avec une très bonne précision temporelle mais une faible définition spatiale). La tomographie par émission de positons (« PET scan » en anglais) détecte la modification de la circulation sanguine cérébrale qui se produit à l'occasion de l'activation d'un groupe de neurones : celle-ci s'accompagne d'une dilatation des capillaires sanguins cérébraux afin d'apporter plus de sang, et donc plus d'oxygène, pour permettre l'activité des neurones. On peut mesurer les variations de circulation sanguine en captant les positons émis par de l'eau ou du glucose radioactifs préalablement injectés au sujet observé. Enfin l'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (IRMf) exploite le même phénomène physiologique que la tomographie par émission de positons (dilatation des vaisseaux sanguins des régions actives du cerveau) mais elle le fait en exploitant un autre signal, en l'occurrence les variations locales de concentration de désoxy-hémoglobine (hémoglobine débarrassée de son oxygène). Des concentrations élevées de désoxy-hémoglobine (détectées par les perturbations du champ magnétique que génère cette molécule) indiquent qu'un apport d'oxygène sanguin important a eu lieu, ce qui est un indicateur indirect d'un accroissement local de l'activité cérébrale.

Si les progrès de l'imagerie cérébrale ont joué un rôle majeur dans l'essor des neurosciences depuis trente ans, il faut souligner toutefois que les neurosciences s'appuient aussi sur des techniques de biologie invasives et sur l'étude des animaux de laboratoire ou des cellules en culture. Par exemple, le guidage axonal, le processus qui permet à un neurone d'étendre ses projections à une autre zone du cerveau, lointaine, est étudié dans des neurones en culture.

⁸ Pour cette raison, l'adolescence ne peut plus être considérée seulement comme une pure construction sociologique ni être réduite à l'ensemble des transformations somatiques/pubertaires. Il y a bien une dimension neurobiologique dans les phénomènes adolescents. On peut par ailleurs souligner que, depuis quelques années, le champ des neurosciences, tenant compte du fait que le cerveau passe par des phases de développement fortement différenciées, tend à se spécialiser de plus en plus en fonction de l'âge. Le cerveau adolescent ou le cerveau de l'enfant deviennent ainsi des domaines de recherche séparés, qui ont leurs experts et leur littérature spécialisés.

⁹ On distingue dans le système nerveux la substance (ou matière) grise et la substance blanche. La première est formée des corps cellulaires des neurones, des dendrites et des axones non myélinisés. La seconde est constituée essentiellement d'axones myélinisés – la myéline étant une sorte de gaine entourant les axones et accélérant la transmission de l'influx nerveux. La substance grise est principalement située, au niveau du système nerveux central, dans le cortex et les noyaux gris centraux. La substance blanche occupe le reste de l'espace cérébral : elle relie les différentes aires et noyaux constitutifs de la substance grise et assure la circulation de l'information entre les centres cérébraux.

¹⁰ Le détail des mécanismes qui commandent l'élagage synaptique (*pruning* en anglais) n'est pas encore parfaitement connu, mais on sait que le processus n'est pas aléatoire. Il comporte une dimension sélective et adaptative : sont conservées les connexions synaptiques les plus sollicitées ; sont éliminées celles qui servent peu ou pas. L'élagage aboutit à simplifier localement l'organisation synaptique, avec un gain d'efficacité du fonctionnement cérébral. Il faut souligner que des dysfonctionnements dans le processus d'élagage synaptique sont désormais soupçonnés de jouer un rôle majeur dans l'apparition de certains problèmes neuro-développementaux, tels que l'autisme ou l'épilepsie (élagage déficient), ainsi que la schizophrénie (élagage excessif).

¹¹ Le cortex cérébral est formé de circonvolutions (ou gyri) séparées par des rainures profondes (ou fissures) et superficielles (ou sillons). Dans chaque hémisphère, des sillons plus profonds que les autres divisent la surface du cortex en lobes : le lobe frontal à l'avant, le lobe pariétal au-dessus et légèrement en arrière, le lobe occipital à l'arrière, le lobe temporal sur les côtés et le lobe insulaire recouvert partiellement du lobe temporal, pariétal et frontal. Le cortex préfrontal fait partie du cortex frontal. C'est une vaste région qui comporte le cortex préfrontal dorsolatéral, le cortex préfrontal ventrolatéral et le cortex préfrontal orbitofrontal. Elle joue un rôle central dans toutes les fonctions cognitives complexes et notamment dans les fonctions exécutives. À travers ses liens avec le cerveau limbique et le circuit de la récompense, elle intervient dans le contrôle conscient des réactions émotionnelles et des comportements liés au plaisir et au désir.

¹² Les fonctions cognitives que les psychologues qualifient d'exécutives sont celles qui permettent de définir un comportement adapté dans les situations où les réponses routinisées sont inappropriées. Elles sont donc essentielles pour la régulation du comportement face à des contextes complexes ou nouveaux. Les principales fonctionnalités exécutives identifiées par les psychologues sont la flexibilité mentale (*switch*), qui est la capacité de changer de tâche ou de passer d'une opération cognitive à une autre ; la planification, qui est la capacité à organiser une séquence d'actions dans le temps ; enfin, le contrôle et la régulation de l'action, qui comprennent à la fois la capacité de mise à jour (*updating*), c'est-à-dire la capacité à intégrer de l'information nouvelle pour mettre à jour de la mémoire de travail, et la capacité d'inhibition, qui regroupe les mécanismes de suppression des cognitions et réactions spontanées, ainsi que la capacité de résister aux interférences causées par l'information non pertinente.

¹³ Le système limbique intègre plusieurs structures corticales et sous corticales parmi lesquelles des parties de l'hypothalamus, du thalamus, de l'hippocampe ou de l'amygdale. Il intervient dans la dynamique et le contrôle du comportement émotionnel (plaisir, peur, agressivité). Il participe aussi au circuit du plaisir (cf note 20 *infra*) à travers certaines de ses structures (amygdale, hippocampe et cortex insulaire). On le désigne souvent comme le cerveau émotionnel, même si l'on sait aujourd'hui que les émotions, comme les pensées, n'ont pas un siège défini dans le cerveau. Il joue aussi un rôle majeur dans les apprentissages et la mémoire.

¹⁴ Cette technique exploite l'imagerie par résonance magnétique (IRM). Elle permet d'observer les directions de diffusion des molécules d'eau. Comme cette diffusion est contrainte par les tissus environnants, les images obtenues permettent de représenter la position et l'orientation des structures fibreuses, en particulier des faisceaux de matière blanche du cerveau. L'imagerie par tenseur de diffusion offre donc une cartographie précise des réseaux d'axones dans le cerveau et permet de voir comment ces réseaux se reconfigurent au cours du développement cérébral de l'adolescence.

¹⁵ On trouvera un lexique des concepts utilisés pour décrire la connectivité cérébrale structurelle et fonctionnelle dans Van den Heuvel et Sporns (2013) –cf bibliographie *infra*. Un module est un groupe de sommets dans le réseau qui ont entre eux des connexions denses et un nombre relativement faible de connexions avec les sommets situés en-dehors de leur module.

¹⁶ Ce ne sont pas les neurosciences au sens strict, mais plutôt la psychologie expérimentale qui permet de décrire les transformations cognitives, psychologiques et comportementales qui surviennent à l'adolescence. On peut signaler que ces transformations sont également décrites, avec d'autres concepts, par la psychanalyse de l'adolescent. Cette dernière souligne en effet que l'agir adolescent se caractérise par le primat de la quête sexuelle et de la recherche d'identification avec les pairs, ce qui se traduit par des traits comportementaux tels que la nécessité de résoudre les dilemmes

immédiatement, les tendances grégaires, l'impulsivité, le désir de passer à l'acte, une prise de risque plus marquée que chez les adultes ou encore un contrôle émotionnel plus fréquemment marqué soit par un excès d'inhibition, soit au contraire par une inhibition insuffisante conduisant à la violence.

¹⁷ L'évaluation du risque et la connaissance du risque sont deux notions qu'il est essentiel de bien distinguer. Ce qui distingue les adolescents des adultes du point de vue du rapport au risque, ce n'est pas que les adolescents ne connaissent pas les risques associés à telle ou telle action ; c'est qu'ils les pondèrent différemment. À partir de 15-16 ans, de nombreuses expériences ont en effet montré que les jeunes ont une connaissance « intellectuelle » des risques proche de celle des adultes. Ils savent aussi bien qu'eux les conséquences probables de leurs choix. Cela ne les empêche pourtant pas de prendre fréquemment des décisions aberrantes du point de vue de la rationalité adulte. Deux phénomènes altèrent en effet leur rapport au risque. En premier lieu, on observe que la présence ou le regard de pairs conduit les adolescents à accroître très fortement leurs prises de risque. Dans leur esprit, les enjeux en termes d'image de soi et de réputation auprès des pairs sont en effet pondérés beaucoup plus fortement que chez les adultes. Ainsi, tout en sachant aussi bien qu'un adulte qu'il est dangereux de monter dans un véhicule conduit par une personne ivre, l'adolescent ou le jeune adulte a plus de chances d'y monter qu'un adulte parce que le risque d'avoir un accident est contrebalancé, dans son esprit, par le risque de donner une mauvaise image de soi. Un autre élément déterminant de la logique de l'adolescent face au risque est sa préférence plus forte pour le présent. Les risques de moyen ou long terme, bien qu'ils soient connus, pèsent moins que les bénéfices attendus ici et maintenant.

¹⁸ Dans une large mesure, les sciences du comportement confirment que le portrait que donne le sens commun du comportement adolescent n'est pas complètement dénué de fondements empiriques.

¹⁹ Les neurosciences cognitives sont une discipline scientifique en plein essor qui crée un pont entre les neurosciences au sens strict et les sciences du comportement. Longtemps, cerveau et pensée sont en effet demeurés des champs d'étude relativement distincts : le noyau dur des neurosciences, issu de la médecine et de la biologie, se concentrait sur l'anatomie et le fonctionnement du cerveau, mais communiquait peu avec les disciplines chargées de l'étude des comportements et des représentations, telles que la psychologie ou la psychanalyse – et réciproquement. Cela s'explique par l'absence d'outils d'observation adéquats pour lier ces deux approches. Bien avant l'apparition des moyens modernes d'observation de l'activité cérébrale, des observations cliniques avaient bien évidemment prouvé l'existence de liens entre la structure anatomique et le fonctionnement électro-biochimique du système nerveux et les manières de penser, de sentir et d'agir. On sait par exemple, depuis longtemps, que certains types de lésions cérébrales ou la prise de certains médicaments peuvent avoir un effet sur l'humeur, la désinhibition des pulsions et l'adoption de conduites aberrantes, délictuelles ou criminelles. On peut citer le cas célèbre de Phineas Gage qui, en 1848, a développé un syndrome frontal à la suite d'un accident au cours duquel son lobe temporal gauche a été perforé par une barre à mine. Par ailleurs, les études sur les animaux ont depuis longtemps permis d'explorer les liens entre cerveau et comportements, sans qu'il soit bien entendu envisageable de généraliser les expériences animales sur des êtres humains. On peut citer les travaux fondateurs d'Olds et Milner qui, en 1954, ont découvert le circuit de la récompense à partir d'expériences sur des rats auxquels des électrodes avaient été implantées. Cependant, c'est bien le développement spectaculaire, à partir des années 1990, des techniques non invasives d'observation du cerveau, notamment de la neuroimagerie fonctionnelle, qui a permis d'entreprendre l'étude systématique des liens entre la pensée et l'action et leurs soubassements neurobiologiques et d'étendre cette étude des situations pathologiques aux situations non pathologiques. Malgré des progrès scientifiques rapides, les liens entre cerveau et pensée demeurent cependant encore mal compris et rien ne permet de déduire la pensée du fonctionnement cérébral. En particulier, la maturation psychologique et cognitive des sujets adolescents ne peut être considérée comme une simple conséquence de la maturation anatomique et fonctionnelle de leur cerveau. On comprend déjà suffisamment bien les processus en jeu pour savoir que les transformations du cerveau et du psychisme pendant l'adolescence sont certes sous la dépendance de variables biologiques, mais aussi, et de façon tout aussi cruciale, de l'environnement affectif, culturel et social et des interactions qui s'y produisent. Cette dialectique complexe entre le biologique et le social dans la construction du psychisme ôte, d'emblée, toute pertinence scientifique au réductionnisme biologique.

²⁰ Le circuit de la récompense est organisé autour du faisceau médian du télencéphale (souvent désigné par l'acronyme MFB, pour *medial forebrain bundle*). Ce faisceau d'axones relie l'aire tegmentale ventrale (ATV) où sont situés les corps cellulaires donnant naissance à ces axones au noyau accumbens (qui avec les parties ventromédiales du noyau caudé et du putamen forme le striatum ventral), mais aussi à d'autres structures cérébrales comme l'amygdale, le septum ou le cortex préfrontal (voir schéma sur la première page de cette note). Il s'agit d'un circuit dopaminergique, c'est-à-dire qui utilise la dopamine comme neurotransmetteur. Lorsqu'il est activé, la dopamine est libérée dans ces différentes structures, notamment le noyau accumbens via la voie méso-limbique et le cortex préfrontal via la voie méso-corticale.

Le circuit de la punition (periventricular system ou PVS) intervient dans la réponse aux stimuli déplaisants ou aux perspectives de situations déplaisantes. Il implique l'hypothalamus, le thalamus et la substance grise centrale entourant l'aqueduc de Sylvius, avec des centres secondaires dans l'amygdale, l'hippocampe, l'habénula. Un des neurotransmetteurs qui intervient dans son fonctionnement est l'acétylcholine. Son activation se traduit in fine par la stimulation de la glande surrénale qui libère de l'adrénaline pour préparer aux réactions de fuite ou de lutte. La stimulation du circuit de la punition peut inhiber le circuit de la récompense.

²¹ Jacques DAYAN, Bérangère GUILLERY-GIRARD, « *Conduites adolescentes et développement cérébral : psychanalyse et neurosciences* » ; Adolescence, 2011, p. 480.

²² « *Starting the engine without a skilled worker* ». Cf. R. Dahl, "Affect regulation, brain development and behavioral/emotional health in adolescence", CNS Spectrum, 6, 2001.

²³ Comme on le voit, il n'y a pas de démonstration directe à travers une description complète des mécanismes faisant le lien entre fonctionnement du cerveau et comportements. C'est la cohérence globale de multiples observations, réalisées à des échelles différentes, qui renforce la présomption d'un lien entre maturation neurobiologique précoce du système limbique et réactivité émotionnelle accrue des adolescents.

²⁴ Comme le fait remarquer Laurence Steinberg, le psychologue américain de l'adolescence, la force des arguments neuroscientifiques tient moins au fait qu'ils bouleversent nos représentations de l'adolescence qu'au fait que leurs conclusions convergent avec le savoir commun et les résultats anciennement établis par les sciences du comportement (cf L. Steinberg, « The influence of neuroscience on US Supreme Court decisions about adolescents' criminal culpability », Nature Reviews/Neurosciences, vol.14, July, 2013).

²⁵ En application de l'article 122-1 du code pénal, une personne qui, au moment où elle a commis les actes qui lui sont reprochés, n'était pas en capacité d'en discerner la portée et les conséquences ou n'était pas en mesure de les contrôler - c'est-à-dire de s'abstenir de les accomplir – doit normalement voir sa responsabilité écartée ou atténuée. L'article 122-8, qui concerne plus spécifiquement la responsabilité pénale des mineurs, ne fait pour sa part référence qu'à la notion de discernement : « *Les mineurs capables de discernement sont pénalement responsables des crimes, délits ou contraventions dont ils ont été reconnus coupables* ».

²⁶ Présumer signifie donner quelque chose comme probable. Statistiquement, l'immaturité cérébrale et psycho-cognitive des enfants et des adolescents est aujourd'hui un fait établi. Cette vérité statistique n'empêche cependant pas qu'il existe de très fortes différences interindividuelles dans les rythmes de développement des capacités de discernement et de contrôle. Certains jeunes atteignent beaucoup plus tôt que d'autres des capacités de discernement et de contrôle proches de celles des adultes standard. On commence à mieux cerner quelques facteurs qui contribuent à expliquer cette variabilité. On sait désormais qu'il existe un décalage de maturation cérébrale entre filles et garçons durant la période péripubertaire, avec des implications psychologiques et comportementales. De même, les influences hormonales et celles des substances addictives sont des facteurs majeurs de variabilité interindividuelle de la maturation cérébrale au cours de l'adolescence. De plus, des antécédents de maltraitance infantile, plus fréquents chez les adolescents et adultes délinquants que dans la population générale selon l'épidémiologie, ont été reliés à des différences statistiques anatomiques et fonctionnelles allant jusqu'à l'histologie cellulaire et les voies de transduction chez des adultes.

²⁷ Les caractéristiques de l'agir adolescent qu'on peut interpréter de manière négative (excès d'impulsivité, exposition excessive au risque, résistance insuffisante aux pairs, etc.) sont souvent présentées par les neuroscientifiques comme des caractéristiques favorables pour l'espèce sur le long terme. Elles correspondent sans doute à une exigence adaptative sélectionnée par le processus évolutif. Impossible en effet de devenir adulte sans s'autonomiser et donc sans découvrir, expérimenter, prendre le risque d'essayer et de se tromper, sans également développer des relations sociales en-dehors des cercles d'origine. Au niveau individuel, les changements de l'adolescence sont un facteur d'accroissement des risques et des dangers auxquels chacun s'expose, mais au niveau de l'espèce, ces changements favorisent une capacité d'adaptation et de résilience plus importante. « *Dans une perspective évolutionniste, ces modifications permettent non seulement la transition vers l'âge adulte, mais aussi une adaptation fine aux changements sociaux opérés dans l'intervalle des générations.* » (DAYAN, GUILLERY-GIRARD, op.cit., p. 480).

²⁸ Les transformations neurobiologiques et psycho-cognitives de l'adolescence ne conduisent évidemment pas tous les individus à adopter des comportements à risques et encore moins délinquants. L'engagement dans des parcours délinquants est multifactoriel, impliquant aussi (et sans doute surtout) des processus sociaux, culturels, éducatifs. Les changements typiques de l'adolescence, sur le plan neurobiologique et psycho-cognitif, n'en constituent pas moins un facteur d'accroissement de la fréquence des conduites à risque et des comportements délinquants, même si ce facteur est un facteur parmi beaucoup d'autres. Si tous les adolescents ne sont pas des délinquants, inversement, toute la délinquance juvénile n'est pas rattachable aux changements neurobiologiques et psycho-cognitifs de l'adolescence.

²⁹ Selon l'exposé des motifs de l'ordonnance de 1945 sur l'enfance délinquante, « *la République française entend protéger efficacement les mineurs, et plus particulièrement les mineurs délinquants* ». La philosophie qui inspire ce texte est que l'enfance délinquante nécessite d'être protégée en même temps que punie. Cette philosophie est confortée par les progrès des neurosciences : si le manque de maturité du mineur contribue à expliquer ses écarts de conduite, cela justifie en effet qu'on l'aide à gagner en maturité pour sortir de la délinquance. C'est l'intérêt du jeune délinquant, mais aussi de la société.

³⁰ Un des enjeux de la justice des mineurs est d'évaluer aussi précisément que possible les facteurs qui déterminent la dangerosité des adolescents délinquants. Lors de son audition, le professeur Jean-Luc Martinot a opéré une distinction intéressante entre « l'agression chaude », qui renvoie à des troubles de conduite liés à la difficulté que peuvent avoir

certaines individus à contrôler leurs émotions, notamment au cours de l'adolescence du fait de l'immaturité des fonctions exécutives, et « l'agression froide », qui est le fait de personnes qui agissent de manière rationnelle et planifiée. Si la maturation cérébrale et le développement des capacités de contrôle peuvent progressivement réduire la dangerosité dans le premier cas, il n'en va pas de même dans le second. Le pronostic sur l'évolution de la dangerosité doit évidemment se faire au cas par cas en se fondant sur une analyse précise des comportements et des logiques délinquantes.

³¹ La notion de neuroplasticité et les preuves empiriques qui l'étayent ôtent définitivement toute pertinence aux conceptions biologistes ou réductionnistes qui prétendent déduire la pensée du biologique, le mental du cérébral. La neuroplasticité place en effet le cerveau au croisement du biologique et de l'environnement, du naturel et du culturel, les deux étant en interaction permanente.

³² C'est déjà le cas dans plusieurs pays européens. En Italie, en Allemagne, aux Pays-Bas et en Espagne, le juge peut appliquer le droit des mineurs à des jeunes entre 18 et 21 ans.

³³ Les différences interindividuelles sont les différences observables d'un individu à l'autre. Les différences intra-individuelles sont les différences observables chez un même individu, à des moments ou dans des circonstances différentes.

³⁴ La Cour Suprême des États-Unis s'est certes fondée sur les neurosciences pour justifier ses décisions récentes déclarant inconstitutionnelles la peine de mort ou la réclusion à perpétuité sans possibilité de libération conditionnelle pour les personnes de moins de 18 ans (Décisions « Roper v. Simmon »s de 2005, « Graham v. Florida » de 2010 et « Miller v. Alabama » de 2012). On peut naturellement se féliciter de ces décisions du point de vue du respect des droits humains, tout en constatant néanmoins que rien, dans les neurosciences, ne permet aujourd'hui de justifier que de tels seuils soient ou ne soient pas établis et, s'il le sont, qu'ils le soient à 18 ans plutôt qu'à un autre âge. De même, aucun résultat neuroscientifique ne permet de justifier qu'un mineur soit de plein droit déclaré irresponsable au-dessous d'un certain âge. Le droit pénal des mineurs en France, à la différence de la plupart des autres pays européens, a fait le choix, jusqu'à présent, de ne pas fixer un âge légal de la responsabilité pénale, se contentant d'indiquer que « *les mineurs capables de discernement sont responsables des crimes, délits ou contraventions dont ils sont reconnus coupables* » (article 122-8 du code pénal). Ce choix n'est pas infondé au regard des connaissances neuroscientifiques actuelles.

³⁵ Dans nombre de pays, on observe un recours croissant à l'utilisation des neurosciences à des fins d'expertise judiciaire, avec néanmoins de fortes différences qui renvoient sans doute aux spécificités nationales de l'organisation et du fonctionnement des institutions judiciaires. Les neurosciences peuvent être convoquées au service de la justice dans des cas de figures assez divers. Il peut s'agir de : a) prouver l'irresponsabilité pénale d'un accusé ou atténuer sa responsabilité ; b) établir la preuve du dommage causé à la victime comme élément matériel de l'infraction ; c) prouver l'altération du discernement en droit civil ; d) établir l'impossibilité pour une personne de participer au procès, au nom du droit à un procès équitable et du respect du droit à la défense ; e) évaluer et prévenir le risque de récidive.

³⁶ La pertinence de l'imagerie cérébrale structurelle est plus grande. Identifier la présence d'une tumeur dans les aires cérébrales impliquées dans les processus d'inhibition des pulsions ou des phénomènes d'empathie peut par exemple contribuer à expliquer certains comportements criminels.

³⁷ Si on prétend l'utiliser comme outil d'expertise, l'imagerie cérébrale fonctionnelle se heurte à une double limite : 1) les enregistrements de l'activité cérébrale qu'elle fournit sont réalisés dans des situations expérimentales et non dans des situations réelles – ce qui ne permet pas d'appréhender l'impact souvent déterminant du contexte, notamment émotionnel ; 2) l'enregistrement des données cérébrales fonctionnelles est marqué par de fortes variations intra-individuelles, qui empêchent la justice de considérer tel enregistrement précis comme un mode de preuve fiable devant un tribunal.

³⁷ L'obsession de la prévention, de la prédiction, de la personnalisation, issue de la fameuse médecine 3 P (préventive, prédictive, personnalisée), dont les apports à la recherche de facteurs de vulnérabilité, de pronostic ou de traitements mieux adaptés sont reconnus, ne devrait pas conduire à enfermer l'individu dans des cases et cela dès le plus jeune âge, comme le préconisait notamment le rapport INSERM : « troubles des conduites chez l'enfant et l'adolescent » (2005). Dans le sentiment d'insécurité ambiant, sous prétexte de dépister des personnes à risque, avant tout passage à l'acte, il y a un risque de glissement de la culpabilité à la dangerosité, faisant que le couple responsabilité-libre arbitre s'effrite au profit d'un certain déterminisme scientifique, certes plus élaboré que celui développé au XIX^e par Franz Joseph Gall, qui prétendait associer le caractère d'un être humain et les bosses de son crâne, ou par Cesare Lombroso, qui, dans son célèbre ouvrage, *L'homme criminel* (1887), établissait une corrélation statistique entre le faciès et les mœurs de la personne. Même si ces théories peuvent aujourd'hui prêter à sourire, elles relèvent de la même logique que celles, plus près de nous, du chromosome Y surnuméraire (dit chromosome du crime) ou bien de thèses « localisationnistes » qui prétendent expliquer tel comportement violent par un dysfonctionnement du système limbique, ou tel excès d'agressivité par un déficit de certains neurotransmetteurs. On assiste de plus en plus de la part de la justice, à un recours aux expertises scientifiques : psychiatriques et même IRM fonctionnelle aux USA à titre préventif et prédictif, avec le risque de transférer le pouvoir normatif aux scientifiques, alors qu'il doit relever du droit. Ainsi, au nom du principe de précaution, il serait tentant pour notre société qui ne supporte plus le risque ni l'incertitude, de se raccrocher à une forme d'hygiénisme, passant d'une société disciplinaire à une société de contrôle.

Bibliographie

Baum G.L., Ciric R., Roalf D.R., Betzel R.F., Moore T.M., Shinohara R.T., Kahn A.E., Vandekar S.N., Rupert P.E., Quarmley M., Cook P.A., Elliott M.A., Ruparel K., Gur R.E., Gur R.C., Bassett D.S., Satterthwaite T.D., Modular Segregation of Structural Brain Networks Supports the Development of Executive Function in Youth. *Curr Biol.* 2017 Jun 5;27(11):1561-1572

Cohen A.O., Breiner K., Steinberg L., Bonnie R.J., Scott E.S., Taylor-Thompson K.A., Rudolph M.D., Chein J., Richeson J.A., Heller A.S., Silverman M.R., Dellarco D.V., Fair D.A., Galván A., Casey B.J. When Is an Adolescent an Adult? Assessing Cognitive Control in Emotional and Nonemotional Contexts. *Psychol Sci.* 2016 Apr;27(4):549-62

Casey, B., Jones, R. M., & Somerville, L. H. (2011). Braking and Accelerating of the Adolescent Brain. *J Res Adolesc*, 21(1), 21-33

Chein, J., Albert, D., O'Brien, L., Uckert, K., & Steinberg, L. (2011). Peers increase adolescent risk taking by enhancing activity in the brain's reward circuitry. *Dev Sci*, 14(2)

Dayan J., Guillery-Girard B., Conduites adolescentes et développement cérébral : psychanalyse et neurosciences, *Adolescence* 2011/3 (n° 77), 479-515

Gardner M1, Steinberg L, Peer influence on risk taking, risk preference, and risky decision making in adolescence and adulthood: an experimental study. *Dev Psychol.* 2005 Jul;41(4):625-35

Gogtay N., Giedd J. N., Lusk L., Hayashi K. M., Greenstein D., Vaituzis A. C., Thompson P. M. (2004). Dynamic mapping of human cortical development during childhood through early adulthood. *Proc Natl Acad Sci U S A*, 101(21)

Grosbras M.H., Jansen M., Leonard G., McIntosh A., Osswald K., Poulsen C., Steinberg L., Toro R., Paus T. Neural mechanisms of resistance to peer influence in early adolescence. *J Neurosci.* 2007 Jul 25; 27(30):8040-5

Grosbras M. H., Ross P. D., Belin, P. (2018). Categorical emotion recognition from voice improves during childhood and adolescence. *Sci Rep*, 8(1), 14791

Hallquist, M. N., Geier, C. F., & Luna, B. (2018). Incentives facilitate developmental improvement in inhibitory control by modulating control-related networks. *Neuroimage*, 172, 369-380

Larrieu P., Neurosciences et droit pénal. Le cerveau dans le prétoire, Paris, L'Harmattan, 2015

Lebel, C., & Deoni, S. (2018). The development of brain white matter microstructure. *Neuroimage*, 182, 207-218

Lebel C1, Beaulieu C. , Longitudinal development of human brain wiring continues from childhood into adulthood., *J Neurosci.* 2011 Jul 27;31(30):10937-47

Lebel, C., Treit, S., & Beaulieu, C. (2019). A review of diffusion MRI of typical white matter development from early childhood to young adulthood. *NMR Biomed*, 32(4)

Luna B1, Padmanabhan A, O'Hearn K. What has fMRI told us about the development of cognitive control through adolescence? *Brain Cogn.* 2010 Feb;72(1):101-13

Luna B., Paulsen D. J., Padmanabhan A., Geier C. (2013). The teenage brain: Cognitive control and motivation. *Current Directions in Psychological Science*, 22(2), 94-100

Oullier O. (coordination), Le cerveau et la loi : analyse de l'émergence du neurodroit, Centre d'analyse stratégique, septembre 2012

Shaw, P., Kabani, N. J., Lerch, J. P., Eckstrand, K., Lenroot, R., Gogtay, N., Wise, S. P. (2008). Neurodevelopmental trajectories of the human cerebral cortex. *J Neurosci*, 28(14), 3586-3594

Somerville, L. H., & Casey, B. J. (2010). Developmental neurobiology of cognitive control and motivational systems. *Curr Opin Neurobiol*, 20(2), 236-241

Steinberg L., A Social Neuroscience Perspective on Adolescent Risk-Taking. *Dev Rev*. 2008 Mar; 28(1):78-106

Steinberg L., & Monahan, K. C. (). Age differences in resistance to peer influence. 2007 *Dev Psychol*, 43(6), 1531-1543

Steinberg L, Graham S, O'Brien L, Woolard J, Cauffman E, Banich M. Age differences in future orientation and delay discounting. *Child Dev*. 2009; 80(1):28–44

Steinberg L.; Cauffman E.; Woolard J.; Graham S.; Banich M. Are adolescents less mature than adults?: minors' access to abortion, the juvenile death penalty, and the alleged APA "flip-flop". *Am Psychol*. 2009; 64(7):583-94 (

Van den Heuvel M.P., Sporns O. Network hubs in the human brain. *Trends in Cognitive Sciences*, December 2013, Vol.17, No.12

Personnes auditionnées

- Mme Martine CADOR, directeur de recherches au CNRS

- M. Hervé CHNEIWEISS, neurobiologiste et président du Comité d'éthique de l'INSERM

- M. Jacques DAYAN, pédopsychiatre au CHU de Caen, professeur, ancien expert près la cour d'appel de Rennes

- Mme Marie-Hélène GROSBAS, chercheur au Laboratoire de neurosciences cognitives – CNRS UMR 7291 Aix-Marseille Université

- M. Olivier HOUDÉ, administrateur de l'Institut universitaire de France, professeur à l'Université Paris Descartes, directeur honoraire de l'UMR CNRS 8240 à La Sorbonne

- Mme Peggy LARRIEU, maître de conférences, Université d'Aix-Marseille

- M. Jean-Luc MARTINOT, directeur de recherches à l'INSERM, pédopsychiatre, ACCA, AIHP. Directeur de l'UMR 1000, Digiteo Labs, Bat. 660, Université Paris-Saclay, Gif-sur-Yvette

- M. Olivier OULLIER, président de la société de neuroinformatique EMOTIV, professeur à Aix-Marseille université et membre du comité scientifique de l'OPECST.