

Plasticité des systèmes: Outils de la rééducation et de la MPR

Pr Isabelle Bonan
Faculté de médecine de Rennes
Service de Médecine Physique et de Réadaptation (MPR)
Laboratoire EMPENN

1

Pourquoi parler de plasticité aujourd'hui?

- **La plasticité des systèmes est un concept structurant de la MPR**
- Connaissances sur la plasticité des systèmes fondamentales pour tout médecin MPR quelque soit son domaine
 - Connaître pronostic
 - Comprendre les modes action de la rééducation
 - savoir orienter et planifier l'ensemble du projet de rééducation
- Plasticité du cerveau, du SNP, de la moelle épinière, des muscles, os, système pulmonaire, système cardiaque,....
- Tous ces systèmes sont plastiques
- Les plasticités sont interdépendantes
- Les MPR s'intéressent à tous ces systèmes
- Aujourd'hui 3 systèmes

2

A quoi sert la plasticité des systèmes?

- En cas de lésion (ou de recherche d'optimisation par ex sport, cardio)
- Plasticité=
 - **Restitution** post-lesionnelle=récupération +/- complète de la déficience
 - ou **Adaptation fonctionnelle à la lésion**=adaptation du système à de nouvelles conditions de fonctionnement
- Notion de **Plasticité maladaptative +++**:
 - Ne permettant pas d'utiliser toutes les capacités de restitution et/ou d'adaptation fonctionnelle
 - aboutit à une récupération moins bonne
 - Déformation =dysplasie de hanche
 - Osteopenie post immobilisation
 - Amyotrophie post-immobilisation sous plâtre
 - sous utilisation acquise du membre supérieur après AVC
 - Douleur membre fantôme

3

Points clés à connaître

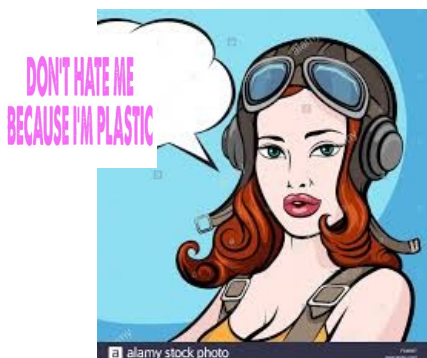
- La plasticité existe pour tous les systèmes
 - La plasticité osseuse
 - 3 points: Importance contraintes biomécaniques, site dépendant, vigilance pdt la croissance
 - La plasticité musculaire
 - 3 points: effet structurel musculaire spécifique type entrainement, modulation selon beaucoup de facteurs, modulation neurale et cérébrale
 - Plasticité cérébrale
 - 4 Points: induite par activité, réversible, parfois maladaptative, techniques spécifiques post lésion cérébrale
- = Une intrication des systèmes et de leur plasticité

4

PLAN

- Définition de la plasticité
- 3 exemples de plasticité
 - plasticité osseuse
 - Plasticité musculaire
 - plasticité cérébrale
- Qu'en déduire pour chacune dans le cadre de la MPR

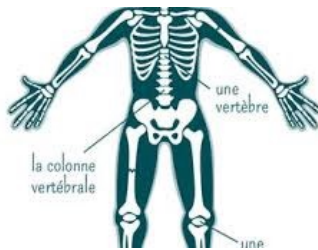
Définition: Comme certains matériaux, L'Homme est plastique



- Petit Robert: Qui est susceptible de se déformer sous l'action d'une **force extérieure** et de **conserver** sa forme lorsque la force a cessé d'agir
- Ex le plomb

Capacité à modifier **son organisation** et son **fonctionnement** en fonction des contraintes internes ou environnementales qui lui sont imposées

La plasticité de 3 systèmes intervenant dans la fonction motrice



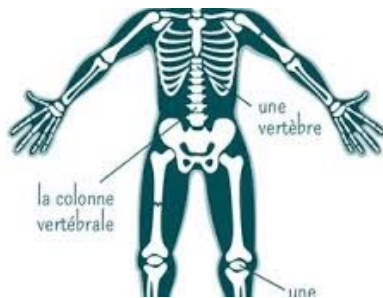
1) La plasticité osseuse



Problématique fréquente en MPR

- immobilisation
- interdiction appui
- chirurgie orthopédique
- sport et activité physique
- enfant

La plasticité osseuse



L'os est plastique
s'adapte aux contraintes **mécaniques** en
ajustant sa masse et sa géométrie,
=processus **tout au long de la vie**.
=crucial pour maintenir intégrité et
fonctionnalité du squelette

Rôle des tractions musculaires et de la
mise en charge+++

9

La plasticité osseuse

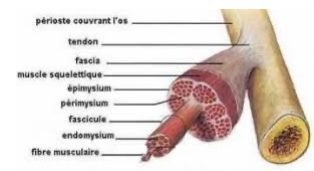
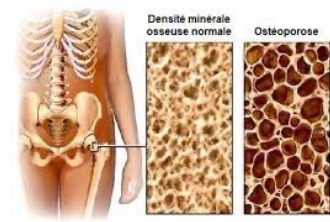
-Modelage osseux permanent

-Par les contraintes mécaniques:

La charge et tractions musculaires

Régulent l'activité métabolique des chondrocytes
(Gray 1988)

modulent les acteurs biochimiques du
modelage osseux (Josza 1979)



10

Effet des contraintes biomécaniques: quelques données à connaître

- **Effort dépendant:** intense et de courte durée > en endurance (*Hetland 1993*)
- **Site dépendant:** L'adaptation est locale et ne concerne que les os mis en charge ou recevant tractions
 - Sport asymétrique (tennis, squash) (*Kannus 1995*)
 - Marche rapide effet que sur les os porteurs (*Hatori 1993*)
 - Ostéopénie chez hémiplégique, paraplégique
- **Variation en fonction de l'âge,**
 - Très peu d'effet de l'AP si âge avancé seulement frein à perte osseuse (*Berard 1997*)

11

Immobilisation

- Adaptation osseuse à l'absence de contraintes = résorption
- immobilisation prolongée = ostéopénie au niveau des os porteurs (fémur, tibia) qui se corrige partiellement lors de la reprise de la charge
- Effet observé chez astronautes et patients immobilisés sur de longues périodes
- Ostéoporose segmentaire: paraplégique, hémiplégique
- Probable effet supplémentaire neuroinduit (*Charlotte logiou*)
- Intérêt de la verticalisation, renforcement musculaire

12

Chirurgie orthopédique

- **Ostéotomie correctrice** : l'os se remodèle progressivement pour s'adapter à nouvelle répartition des charges.
- Pour activer une consolidation: système d'arthrodèse non fixe=**dynamisation du montage**
- Remodelage **post-amputation**: Après une amputation, l'os du moignon s'adapte pour gérer les nouvelles contraintes mécaniques.



ex: Chez amputé fémoral épaissement cortical du moignon, lié aux sollicitations mécaniques locales (Smith 2002 et Johnson 2005)

→compréhension des techniques orthopédiques

13

sport et activité physique

- Adaptation à l'activité physique intense
 - Chez marathonien, ↑ densité minérale osseuse et épaissement cortical MI pour résister contraintes mécaniques répétées (B Lara 2016)
- L'activité physique est préventive de l'ostéoporose uniquement en charge ++++

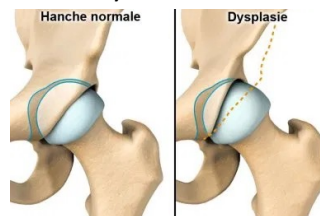
14

La plasticité osseuse pendant la croissance

- le niveau de l'activité physique peut expliquer 15 à 20% de la masse osseuse pendant enfance et adolescence (*Welten1994*)
- L'os en croissance s'adapte ++++ aux contraintes mécaniques
- L'absence de mise en charge et de mouvements actifs des membres inférieurs perturbe le développement normal du squelette
 - Risque +++ de déformations osseuses: hypotrophie, torsions, déformation avec des tractions musculaires insuffisantes, asymétriques (rôle de la spasticité, faiblesse)...

→ Prévention++++

-Positionnement -Traitement spasticité -chirurgie neuro-orthopédique
--



15

Qu'en déduire en MPR?

- Importance de l'activité musculaire (tractions) **et de la mise en charge**
 - Action site dépendant
 - Préoccupation ++ en MPR pédiatrique
 - Équilibre des forces pour construire squelette harmonieux
 - Réduire +++ période immobilisation
 - Maintien tout au long de la vie activité physique en charge + mouvements
 - Surveillance-prévention-traitement de l'ostéoporose patients paralysés
- **Couplage os-muscle dans la plasticité de la fonction locomotrice**

16

2) La plasticité musculaire



=Problématique fréquente en MPR
 Immobilisation au lit
 Immobilisation focale (plâtre, traumatisme)
 Renforcement moteur
 Réentraînement à l'effort
 Entraînement sportif

17

La plasticité musculaire

Rappel sur la physio musculaire

-Fibres lentes type 1 (capacité oxydative)

-Fibres rapides type 2 A et 2X (glycolitique)

↑et↓activité musculaire induit des changements phénotypique des fibres musculaires

Correspond à **changement** expression **génique**
 (codage pour les chaînes lourdes de myosine)

2 types entraînement:

-Entraînement en **endurance** : augmentation de la proportion de fibres de type I

-Entraînement en **force** : stimulation des fibres de type II
 (Gea 1997)

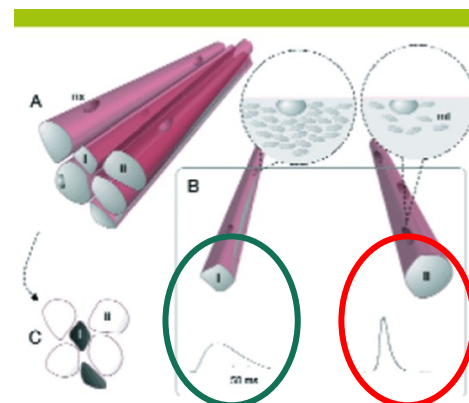


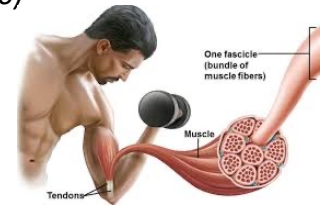
Figure 1. Types de fibres musculaires

A. Le tissu musculaire squelettique de mammifères est composé d'un mélange de fibres rapides (type I) et lentes (type II). B Les fibres de type I se distinguent des fibres de type II par leurs caractéristiques physiques (vitesse de contraction plus lente), morphologiques (taille plus petite) ainsi que métaboliques (nombre de mitochondries plus élevé). C. Délimitation des différents types de fibres au moyen d'un composé pigmenté précipité par l'activité de l'ATPase des chaînes lourdes de myosine.
 nx : noyaux ; mt : mitochondrie.

18

Le renforcement moteur

- Influence++ du type entraînement sur fibres musculaires (*Gea 1997*)
 - en force: ↑ fibres musculaires avec myosine à chaîne rapide
 - en endurance: ↑ fibres musculaires avec myosine à chaîne lente
- Sur type métabolisme
 - En force: ↑ capacités oxydatives
 - En endurance: ↑ nb mitochondries, capillaires (*Luthi 1986*)



19

La perte de force ou le gain en force: n'est pas qu'une histoire de fibres musculaires

- 1- Changements structurels musculaire contractile (proportion fibres I et II)
 - 2- Adaptations métaboliques :
L'entraînement améliore l'efficacité des mitochondries et des enzymes métaboliques
Modification infiltration graisseuse
- Mais aussi:**
- 3- Modulation neurale
 - 4- Modulation cérébrale



20

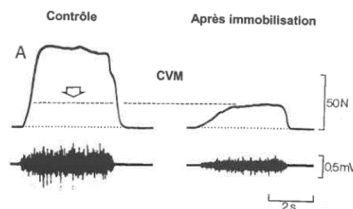
Modulation neurale

- A l'échelle neurale:

L'entraînement musculaire augmente la synchronisation entre les unités motrices par des changements dans les connections entre les motoneurones et la moelle épinière et l'immobilisation l'inverse

=Adaptation/désadaptation neuro-musculaire

entraîne une $\uparrow/\downarrow$ activation nerveuse



Plâtre avant-bras pdt 6 semaines:
 $\downarrow$ force max du muscle de 55%
 33% muscle + 22% déficit d'activation nerveuse
 (Duchateau 1987)

21

Modulation cérébrale

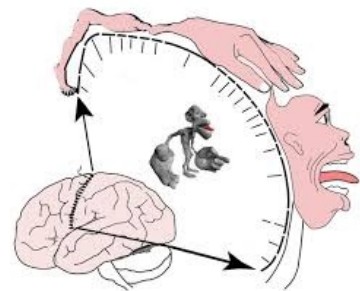
- A l'échelle du cerveau:

Modification de la **carte motrice**

Et des **autres zones du cerveau impliquées dans le geste**

=adaptation/désadaptation du geste dans sa globalité sensorimotrice

Ex: pianiste



22

Modification de la representation corticale

Exemple: Carte motrice **et sensorielle** de musiciens

Sont modifiés

- Cortex moteur primaire **carte motrice (rouge)**
- Planum temporal : du lobe temporal qui correspond à du cortex **auditif associatif (jaune)**
- Corps calleux : commissure transversale composée d'axones qui assure le transfert d'informations **entre les deux hémisphères** et leur coordination (orange)

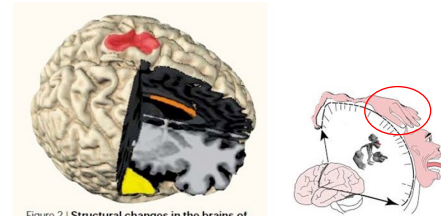


Figure 2 | Structural changes in the brains of musicians. Some of the brain areas that have been found to be enlarged in musicians in morphometric studies based on structural magnetic resonance imaging. Red, primary motor cortex; yellow, planum temporale; orange, anterior part of the corpus callosum.

Source : "The musician's brain as a model of neuroplasticity" (Münste et collègues, édité dans la revue Nature (vol 3: page 474, 2002))



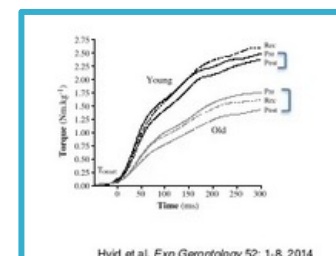
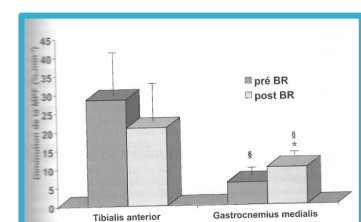
23

Immobilisation

Beaucoup de facteurs interviennent :

- Le statut musculaire: atrophie /normal/hypertrophié
- Caractéristiques du muscle
 - M posturaux/non posturaux (Baldwin 2013)
 - Muscles à fibres rapides /lentes (Duchateau 1998)
- Relation avec longueur du muscle:
 - ↑ atrophie si en position raccourcie/force-longueur
- Facteurs Génétiques
- Age

(Baldwin 2013, Duchateau 1998, Berger 1962, Duchateau 1987, St Pierre 1987, Appell 1990, Larsson 1996, Hvid 2014)



24

Immobilisation plâtrée

- Type immobilisation
 - Bed rest: 5 semaines ↓ 20% activité musculaire Qcps (*Berger 1962*),
 - Plâtre : 6 semaines au mb sup ↓ 55% la force max (*Duchateau 1987*)
- Positionnement du m: ↑ atrophie si en position raccourcie (*St Pierre 1987*)
- Effet très précoce
 - Amyotrophie exponentielle 3 à 4%/jour les premiers jours (*Appell 1990*)
- Récupération de la force très lente si immobilisation longue (*Larsson 1996*)
 - 4 j pour 10 j immobilisation versus 30 à 40 j pour 50j immobilisation

25

Au total pour la plasticité musculaire

- Effet structurel musculaire induit très spécifique du type l'entraînement/diminution activité
 - Facteurs importants à prendre en compte pour la rééducation: type muscle, état du muscle, effet longueur du muscle, effet durée
 - Modulation à l'échelle métabolique
 - Modulation neurale = coordination des unités motrices
 - Modulation cérébrale = modification représentation corticale
 - Effet également sur la structure osseuse
 - Mais aussi cardio-pneumo non abordé ici
- complexe neuro-moteur et squelettique est un tout

26

Qu'en déduire pour la rééducation musculaire?

- Différenciation de la rééducation selon le type et l'état des muscles
- Importance positionnement immobilisation/renforcement
- Garder schéma moteur pour limiter perte dans représentation corticale
 - Imagerie mentale/neurofeedback/miroir therapie
- Reprogrammation entité neuromusculaire et cérébrale



27

3) Plasticité cérébrale



- S'exprime en dehors de toute pathologie
- Après cérébrolésion
- Notion de plasticité cérébrale maladaptative

28

Sujet sain

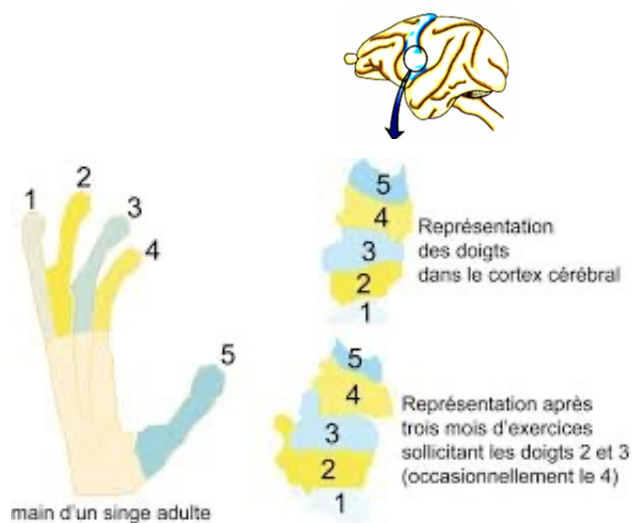
- 1eres études chez le singe
- Puis Homme

29

1eres études chez le singe modification de la carte motrice par execution d'une tâche motrice



Entraînement
différencié des doigts
= Modification de la
carte corticale
différenciée



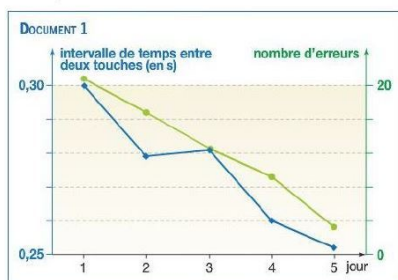
30

Réplication chez l'HOMME « sain » en TMS

- 5 jours entraînement avec 1 main d'une séquence (répétition 20 fois)

- 1) Amélioration dextérité motrice
- 2) Expansion Carte motrice main D

- → **effet dose et répétition +++**



Groupes		Activité des zones du cortex moteur des muscles fléchisseurs et extenseurs du plus long doigt (majeur) de la main droite.				
		Jour 1	Jour 2	Jour 3	Jour 4	Jour 5
Groupe 1 :	Muscles fléchisseurs					
	Muscles extenseurs					
Groupe 2	Muscles fléchisseurs					
	Muscles extenseurs					
Groupe 3	Muscles fléchisseurs					
	Muscles extenseurs					

Elbert 1998

31

En pathologie

- Amputation
- Organes sensoriels
- AVC

32

L'absence d'utilisation d'un membre modifie la carte motrice

Amputation + greffe des mains (Lyon)

Avant la greffe, disparition zone de la main et élargissement carte motrice du coude et de l'épaule

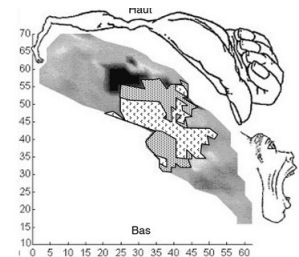
Après 4 ans greffe des mains

Résultats en IRMf

Re-"colonisation" "progressive de la zone main

-idem amputé membre inférieur

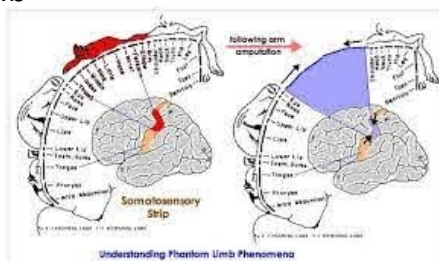
Zone activée uniquement avant la greffe
Zone activée 6 mois après la greffe
Zone activée avant et 6 mois après la greffe



33

Plasticités maladaptatives du cerveau sain

- Les douleurs de membre fantôme
- Le SDRC: douleur + exclusion du mb



Lésion appareil musculo-squelettique
→ plasticité du cerveau maladaptative

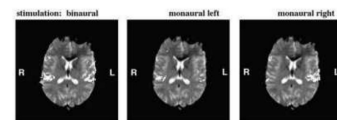


Makin 2017, Lotze 2001

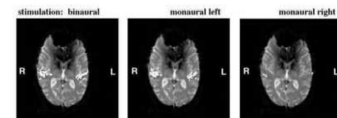
34

Plasticité cross modale

- Surdité unilatérale
 - Augmentation représentation de l'oreille saine dans **le cortex controlatéral**
 - Augmentation du nombre de neurones activés par l'oreille saine
 - Surdité complète bilat rale=Plasticit  **cross-modale**
 - Perte progressive de la tonotopie du cortex auditif
 - R aff rentation du cortex par les afférences visuelles
 - Le langage signé et la lecture labiale occupe la zone corticale auditive
 - ce qui g ne la réactivation du cortex par les sons si Implant cochléaire
- Idem Patients aveugles: utilisation du cortex visuel pour audition spatiale et localisation auditive



Sujets normaux entendants : Stimulation monaurale, latéralisation vers le cortex auditif controlatéral.



Surdité unilatérale: Stimulation de l'oreille saine, activation corticale bilatérale. Comparable aux réponses binaurales des sujets normaux entendants . Plasticité ou réorganisation
Scheffler, Cereb. Cortex. 1998

35

Qu'en déduire pour la rééducation chez ces sujets au cerveau sain?

- La fonction module la représentation corticale
- Et l'absence d'utilisation=modification la carte corticale au profit d'autres utilisation
- Lutte contre Plasticité maladaptative

36

Que faire en rééducation contre la plasticité maladaptative cerveau sain?

- Agir sur le cerveau: +++, imagerie mentale, thérapie miroir



- Et Réinvestir le membre exclu

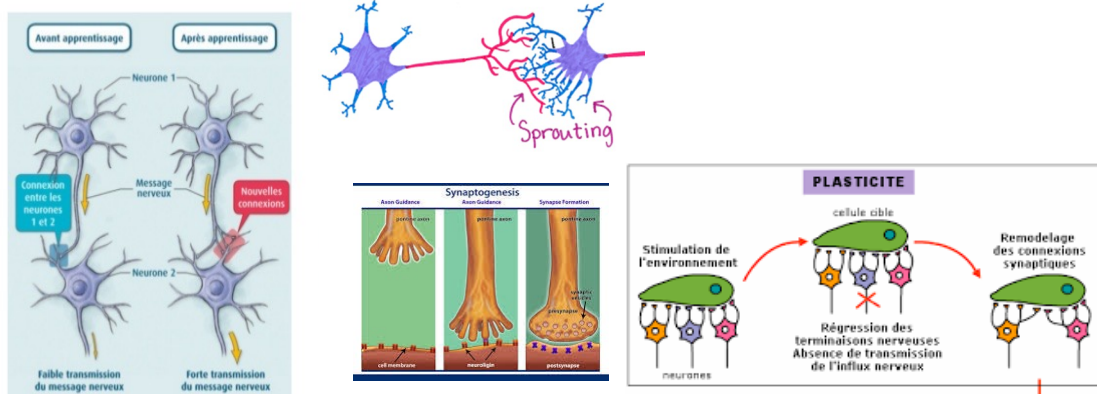
37

La plasticité après AVC



38

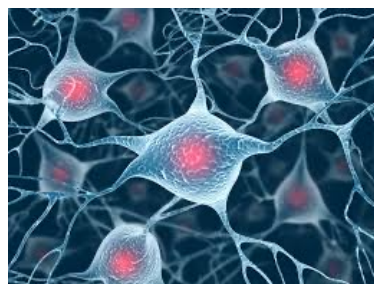
Processus de reparation Réparation à l'échelle des neurones



39

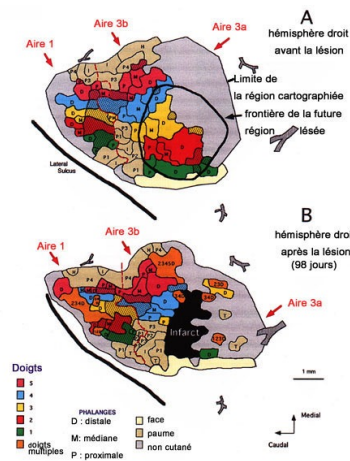
réparation à l'échelle des reseaux de neurones

- Mise en circulation reseaux inutilisés
- Création de nouveaux réseaux



40

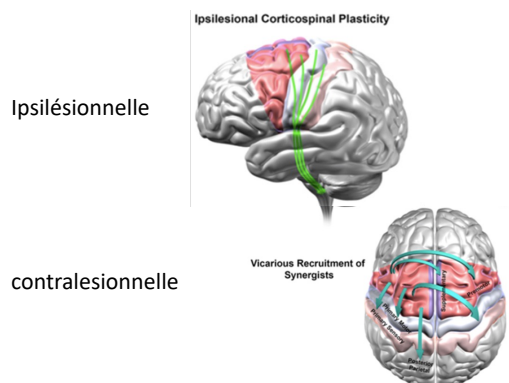
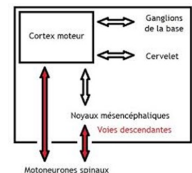
Plasticité cérébrale après AVC les zones adjacentes ou périlésionnelles les plus favorables pour une récupération optimale



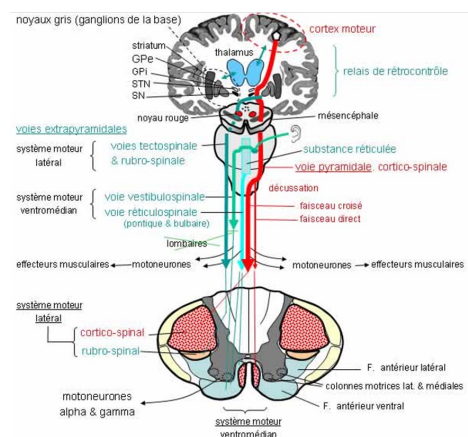
Jaillard 2005

41

Plasticités plus à distance récupération beaucoup moins favorable



Réseau moteur accessoire



42

A l'échelle du cerveau: Plusieurs processus de compensation

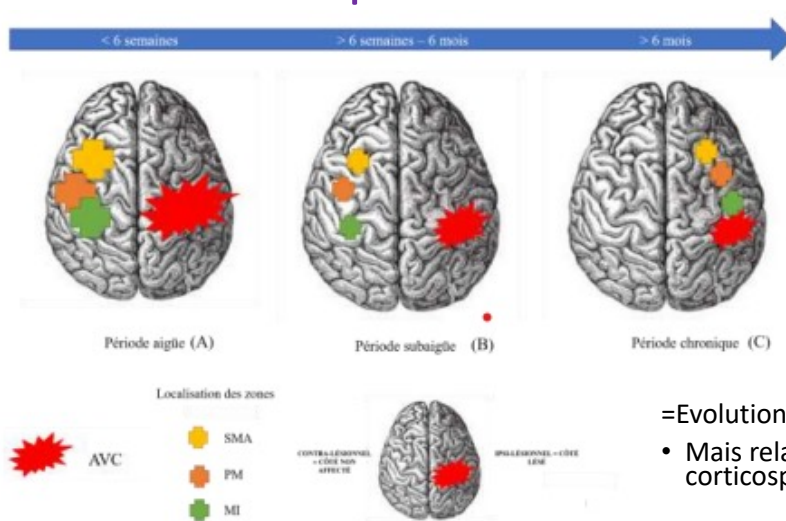
- Utilisation zones adjacentes à la lésion
- Utilisation zones périlésionnelles
- Utilisation zones prémotrice et aire motrice supplémentaire ipsilésionnelle
- Utilisation aire sensitive ipsilésionnelle
- Cortex controlatéral M1
- Cortex controlatérale zones prémotrice et aire motrice supplémentaire, sensitive controlatérales
- Réseaux moteurs descendant accessoires rubro ou réticulospinal

récupération



43

Ce que l'on observe au cours du temps relatéralisation ipsilésionnelle



=Evolution favorable

- Mais relatéralisation si faisceau corticospinal intègre

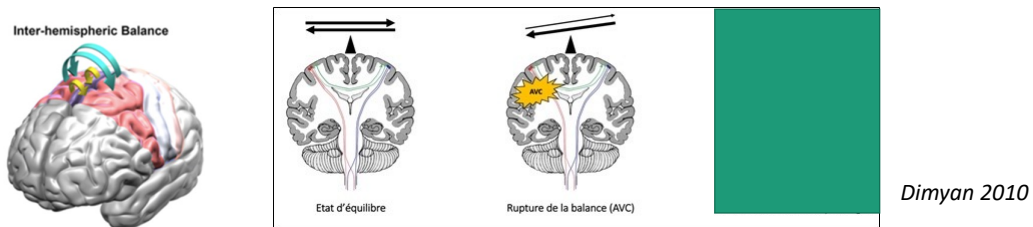
Loubinoux 2017

44

Autre notion indispensable indispensable pour comprendre la plasticité cérébrale:

Il existe une coopération/compétition interhémisphérique

- Encore beaucoup d'inconnus
- Probablement différente en fonction du délai post lésionnel
- De la nature et de l'étendue de la lésion



45

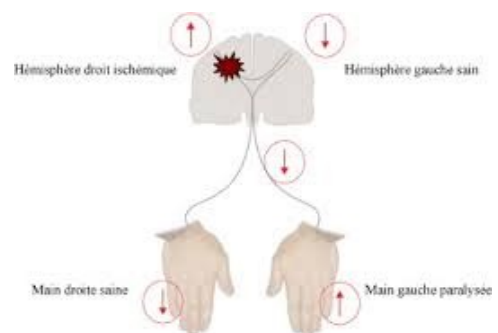
Notion de plasticité maladaptative post AVC

- En l'absence de stimulation ipsilésionnelle

=**Syndrome de sous utilisation acquise**

=récupération non optimale

activation contra-lésionnelle persiste



46

Qu'en déduire pour la MPR Les techniques pour orienter la plasticité cérébrale post AVC



47

Techniques pour entrainer l'hémiphère lésé et lutter contre sous utilisation acquise:

- Stimuler le membre supérieur lésé
- Freiner l'hémisphère controlatéral
- Observation d'une action active les zones motrices
- Le mouvement passif active les zones motrices
- L'imagerie mentale active les zones motrices
- Il est possible d'apprendre à activer des zones spécifiques du cerveau en produisant une boucle de neurofeedback
- Il est possible de tromper le cerveau par le reflet dans un miroir
- La stimulation sensitive a une action sur la motricité

1)Borgas 2018, 2)Lindberg 2004, 3)Decety 1996, 4) Baniqued 2021, 5)Broderich 2018, 6) Schutz 2015

48

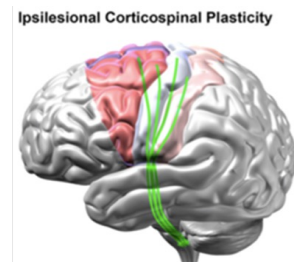
Enjeu en rééducation: stimuler les zones motrices ou prémotrices ipsilésionnelles pour une meilleure récupération

Meilleure récupération si ipsilésionnel*

- (sur)utiliser la main paralysée pour relatéraliser +++
 - Mobilisation activopassive
 - Mobilisation active



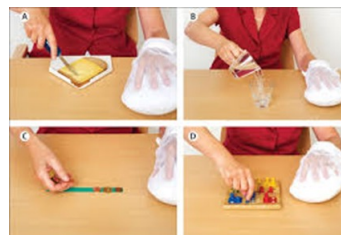
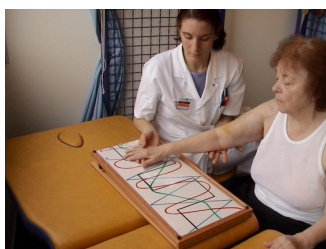
(*si intégrité faisceau corticospinal)



Ward 2003

49

lutter contre sous utilisation acquise la thérapie par la contrainte



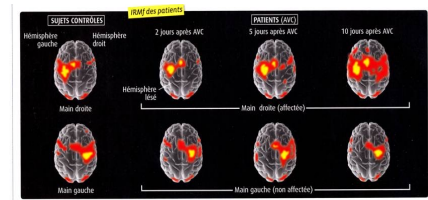
Ne pas laisser le patient se relatéraliser côté « sain » ++++
=Garder carte motrice ipsilésionnelle

50

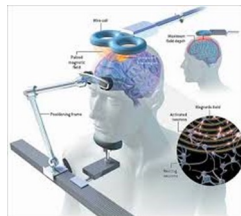
Agir sur Balance interhémisphérique: Stimuler l'hémisphère lésé ou freiner hémisphère sain par rTMS ou TDCS

Les principes:

- Stimuler zones cibles de l'hémisphère lésé
- Freiner l'hémisphère controlatéral



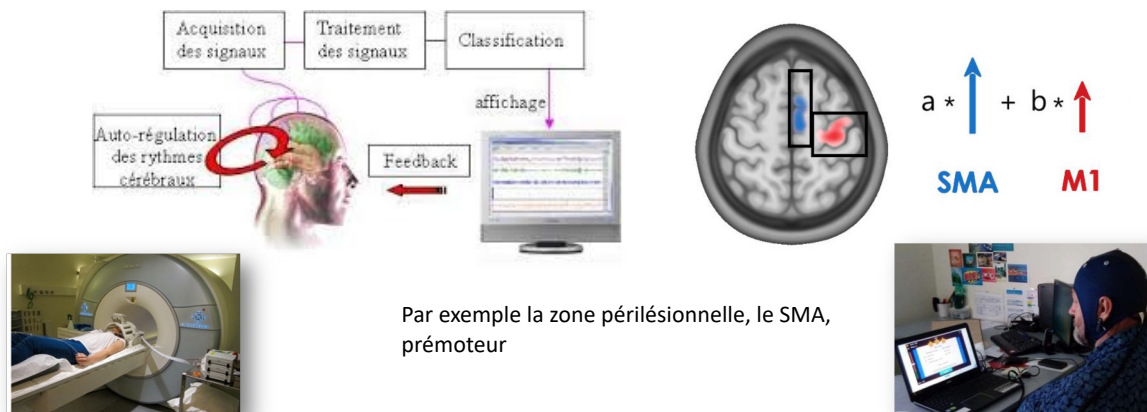
▲ Une étude de la récupération motrice après un accident vasculaire cérébral (AVC).



51

Le neurofeedback

Capacité du patient à stimuler zones cibles
les plus appropriées pour optimiser la
récupération



52

Mobilisation passive: Elle active les zones motrices

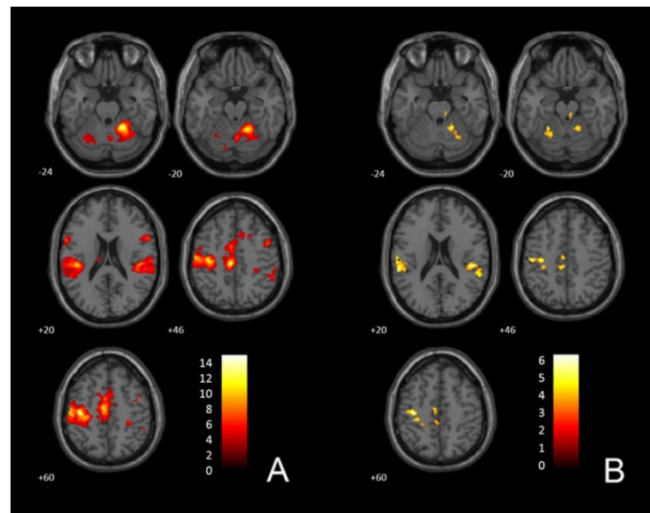
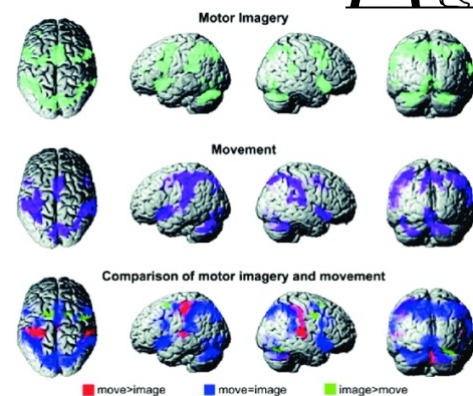
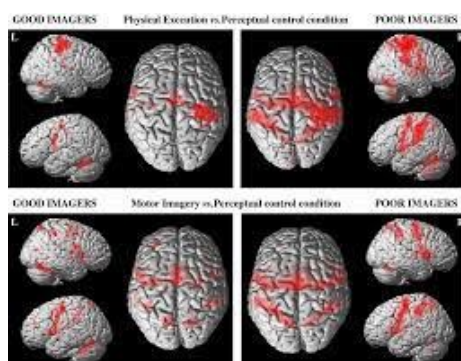


Fig. 1.17 Passive task-fMRI brain activity in healthy controls (A) and in stroke patients (B). (Hannan et al., 2017)

53

Imagerie mentale elle active zones motrices



Taub 2015

54

L'observation d'action

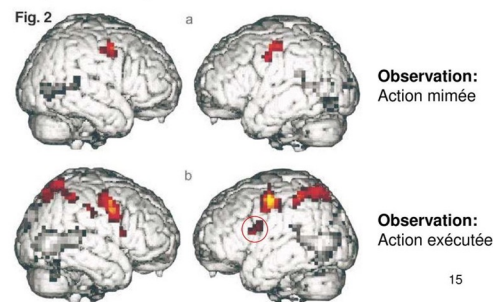
Les principes:

- Utiliser neurones miroirs



Neurones Miroirs

- Observation lorsque l'action est mimée ou exécutée (humain):



55

Thérapie par le miroir
active l'hémisphère lésé en utilisant
reflet mouvement main saine

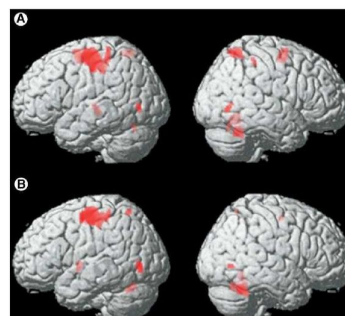


Figure 8 – Illustration de l'activité du cerveau en absence de miroir (A) et en condition miroir (B) (d'après Mathys et al., Arch Phys Med Rehabil. 2009 ; 90:675-681)

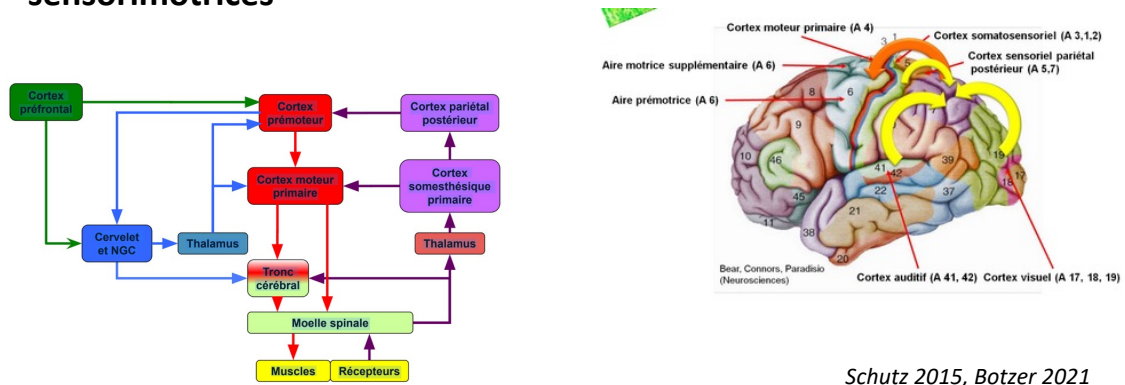
14

Broderich 2018

56

Il y a des interactions très importantes entre les aires motrices et les aires sensorielles

Entraîner les zones sensorielles améliore la motricité → techniques sensorimotrices



Schutz 2015, Botzer 2021

57

En conclusion

- La plasticité existe pour tous les systèmes
- Elle est physiologique en l'absence de pathologie
- Existe à l'échelle structurelle, métabolique et fonctionnelle de toutes les structures du corps pour s'adapter aux contraintes internes et environnementales
- À connaître +++
- Implication pour nos programmes de rééducation
- Mieux comprendre mécanismes action techniques de rééducation et établir le pronostic
- Intrication de la plasticité des différents systèmes
- Unité de la MPR

58

Merci pour votre attention