

# **Mécanismes cérébraux de la lecture**

**Stanislas Dehaene**

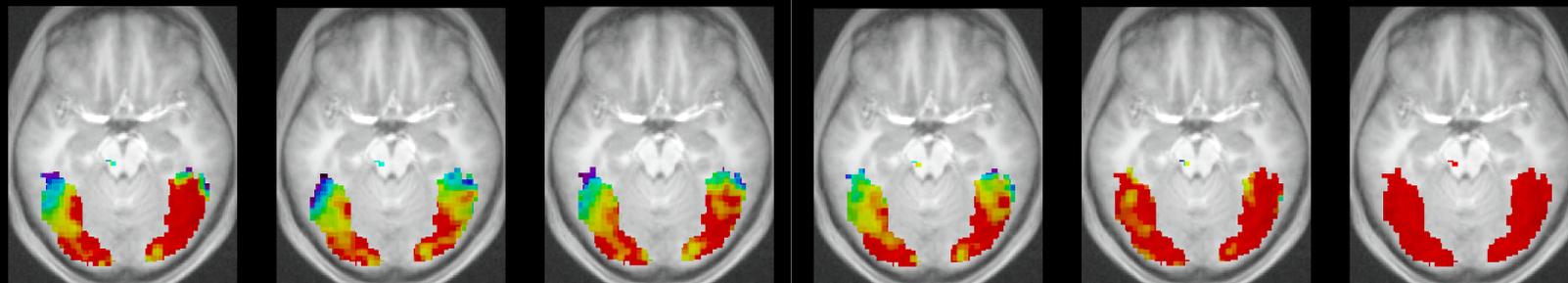
**Chaire de Psychologie Cognitive Expérimentale**

## **Quatrième Cours**

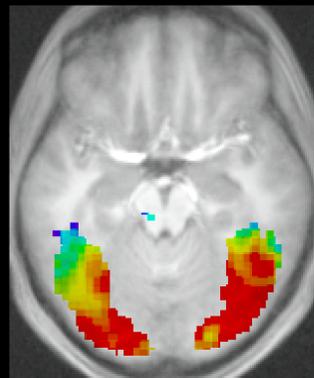
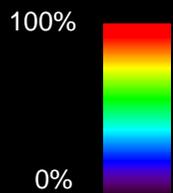
### **L'hypothèse des deux voies de lecture**

# Organisation hiérarchique du cortex occipito-temporal\* pour la reconnaissance visuelle des mots

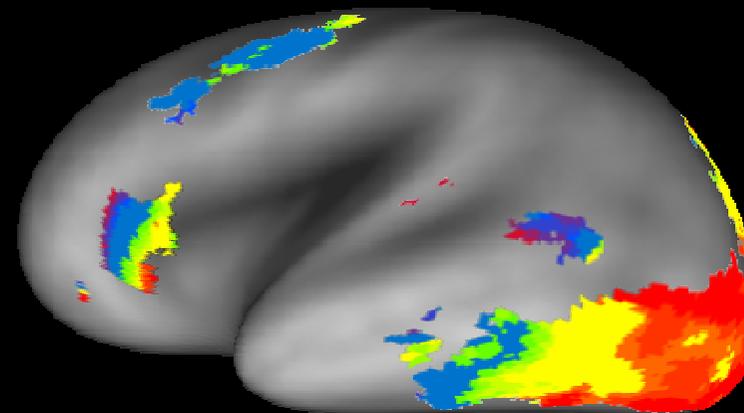
False Font	Infrequent Letters	Frequent Letters	Frequent Bigrams	Frequent Quadrigrams	Words
᠎ᠮᠮᠮᠮᠮᠮ	JZWYWK	QOADTQ	QUMBSS	AVONIL	MOUTON



False fonts    Infrequent letters    Frequent letters    Bigrams    Quadrigrams    Words



Average of non-word stimuli



Percent activation relative to words in the occipitotemporal cortex

# Le modèle LCD (Local Combination Detectors)

Dehaene et al. *TICS*, 2005

## Aire présumée

## Unité codée

## Structure du champ récepteur

## Exemples de stimuli préférés

Sillon occipito-temporal gauche?  
( $y \approx -48$ )

Petits mots et chaînes récurrentes de lettres (morphèmes)

TE EN  
EN NT  
TN ET

TENT sentent  
CONTENT

Sillon occipito-temporal gauche?  
( $y \approx -56$ )

Bigrammes locaux (« ouverts »)

EEN NN

EEN En

Aire V8 bilatérale?  
( $y \approx -64$ )

Détecteurs de l'identité abstraite des lettres

E e

E e

Aire V4 bilatérale?

Forme des lettres (dans une casse donnée)

E E e

E E e

Aire V2 bilatérale

Contours locaux (fragments de lettres)

F F

F F

Aire V1 bilatérale

Barres orientées

+

+

Corps genouillé latéral

Contraste local

- + -

- + -

- + -



# Rôles respectifs de la voie ventrale et de la voie dorsale dans l'identification visuelle des mots

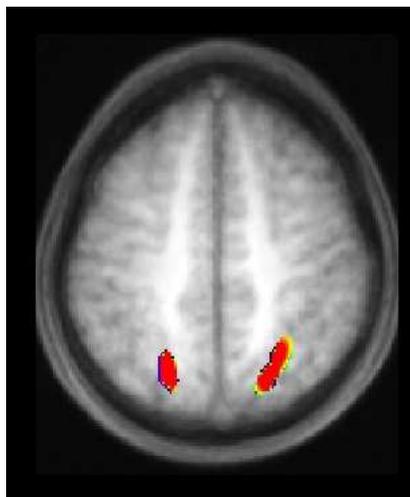
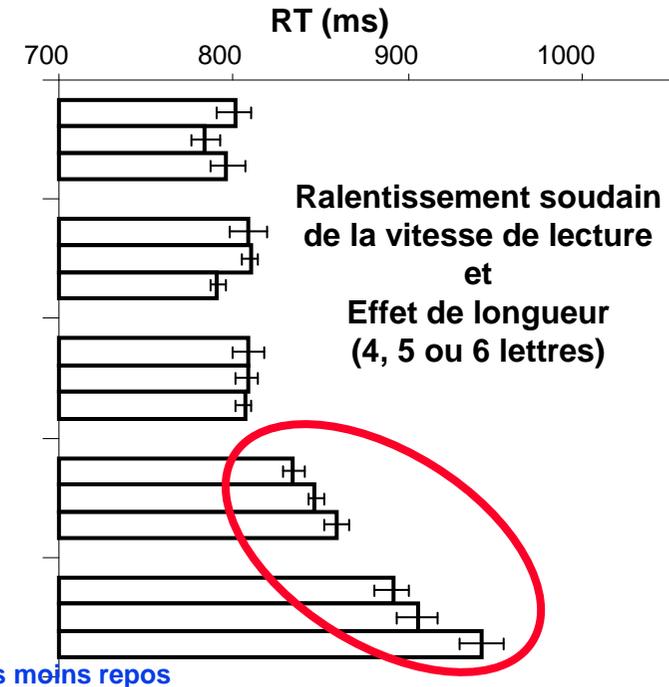
- Selon le modèle LCD, chez un lecteur expert, la voie ventrale code automatiquement les chaînes de lettres sous forme d'une hiérarchie de lettres, bigrammes, morphèmes...
- Cependant, il existe des limites très nettes à l'invariance des neurones de la voie inféro-temporale ventrale
  - les neurones ont des champs récepteurs limités: l'expertise pour la lecture ne doit être acquise que pour une région limitée du champ visuel
  - les neurones ne résistent pas à plus de 40 degrés de rotation de l'image (Logothetis et coll., 1995)
  - les neurones-bigrammes ne devraient pas résister à plus de 2 lettres d'espacement
- Le modèle LCD prédit qu'au delà de ces limites, la reconnaissance automatique par la voie ventrale cesse d'être possible.
- Le sujet doit alors recourir à une stratégie de lecture attentive et sérielle, sous l'égide des régions occipito-pariétales impliquées dans l'orientation de l'attention spatiale

# Test du modèle LCD par la dégradation des mots

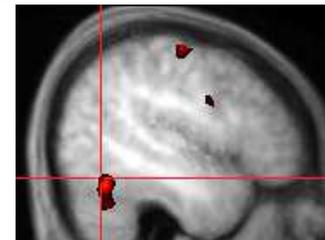
Trois modes de dégradation des mots

	Rotation	Espacement	Position
1	fête	fête	fête
2	fête	fête	fête
3	fête	fête	fête
4	fête	fête	fête
5	fête	fête	fête

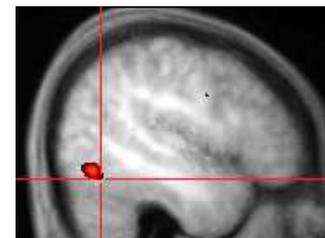
Prédiction d'un seuil critique



Survenue soudaine d'une activation commune aux trois modes de dégradation des mots



Corrélation avec temps de lecture



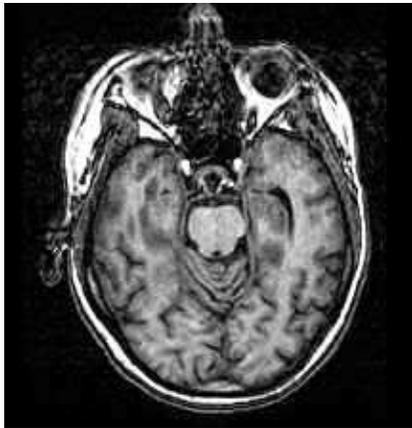
Amplification de l'activation de la partie postérieure de l'aire de la forme visuelle des mots (au niveau du codage des lettres)

Cohen, Dehaene, Vinckier et al (submitted)

# Test du modèle LCD chez un patient avec lésion bipariétale

Vinckier, Cohen, Dehaene et al. JOCN, 2006

Voie ventrale normale



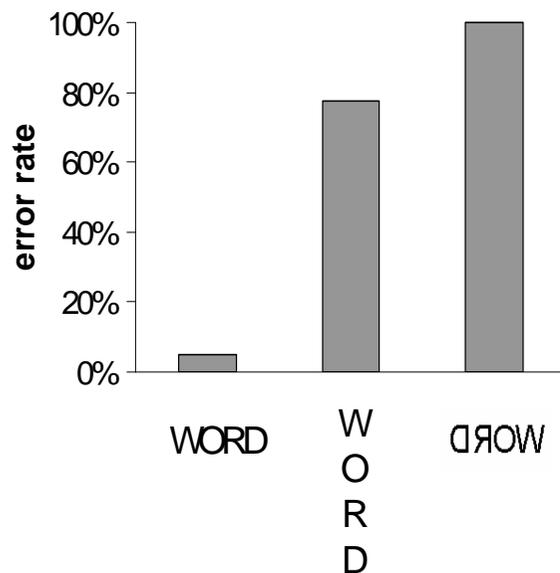
Voie dorsale lésée de façon bilatérale



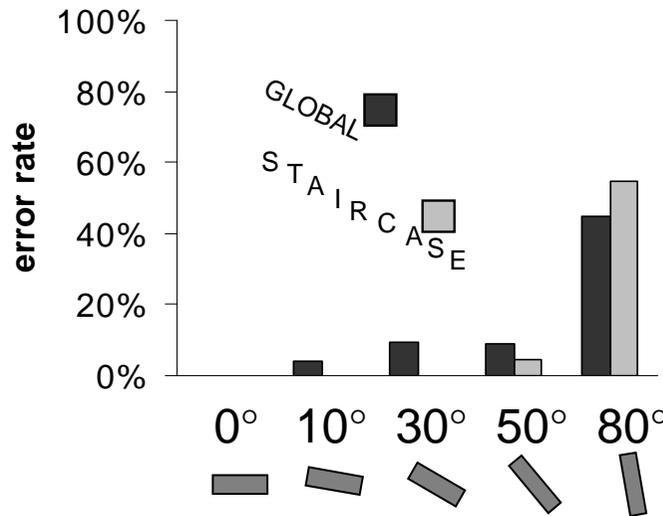
- A la suite d'une maladie dégénérative pariétale bilatérale, ce patient est devenu incapable de déployer son attention de façon sérielle dans l'espace (simultanagnosie), et donc de lire lettre à lettre.

- Nous avons utilisé cette situation afin d'explorer les limites de la voie occipito-temporale ventrale

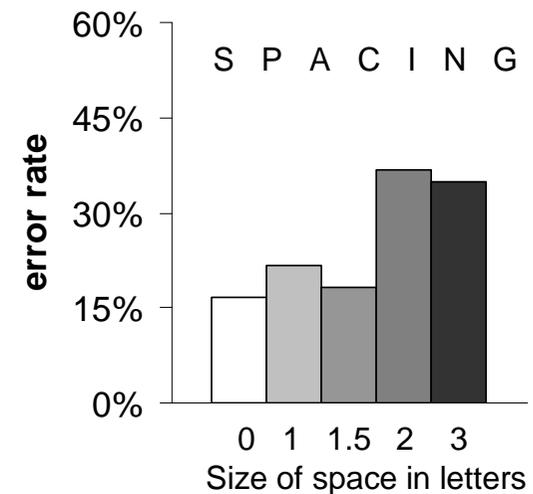
### Orientation



### Angle de rotation



### Espacement



# Conclusion: l'identification visuelle des mots

- L'identification des mots écrits requiert la collaboration des voies visuelles ventrale et dorsale
- L'apprentissage de la lecture « recycle » une fraction de la voie visuelle ventrale pour la **reconnaissance rapide, parallèle et automatique** des mots écrits
- Cette région conserve ses dispositions (vraisemblablement d'origine génétique) pour l'apprentissage d'une hiérarchie visuelle d'invariance croissante, mais les préférences des neurones se modifient avec l'exposition à la lecture: bien que des détecteurs élémentaires de T, X, L existent chez les autres primates, leur organisation est amplifiée chez l'homme et des détecteurs spécialisées apparaissent pour les groupes de lettres utiles à la lecture experte (modèle LCD).
- La voie dorsale, elle, contribue à la **lecture sérielle et attentive**
  - chez l'adulte pour la lecture de mots dégradés et de pseudo-mots
  - chez l'enfant au cours du déchiffrage?

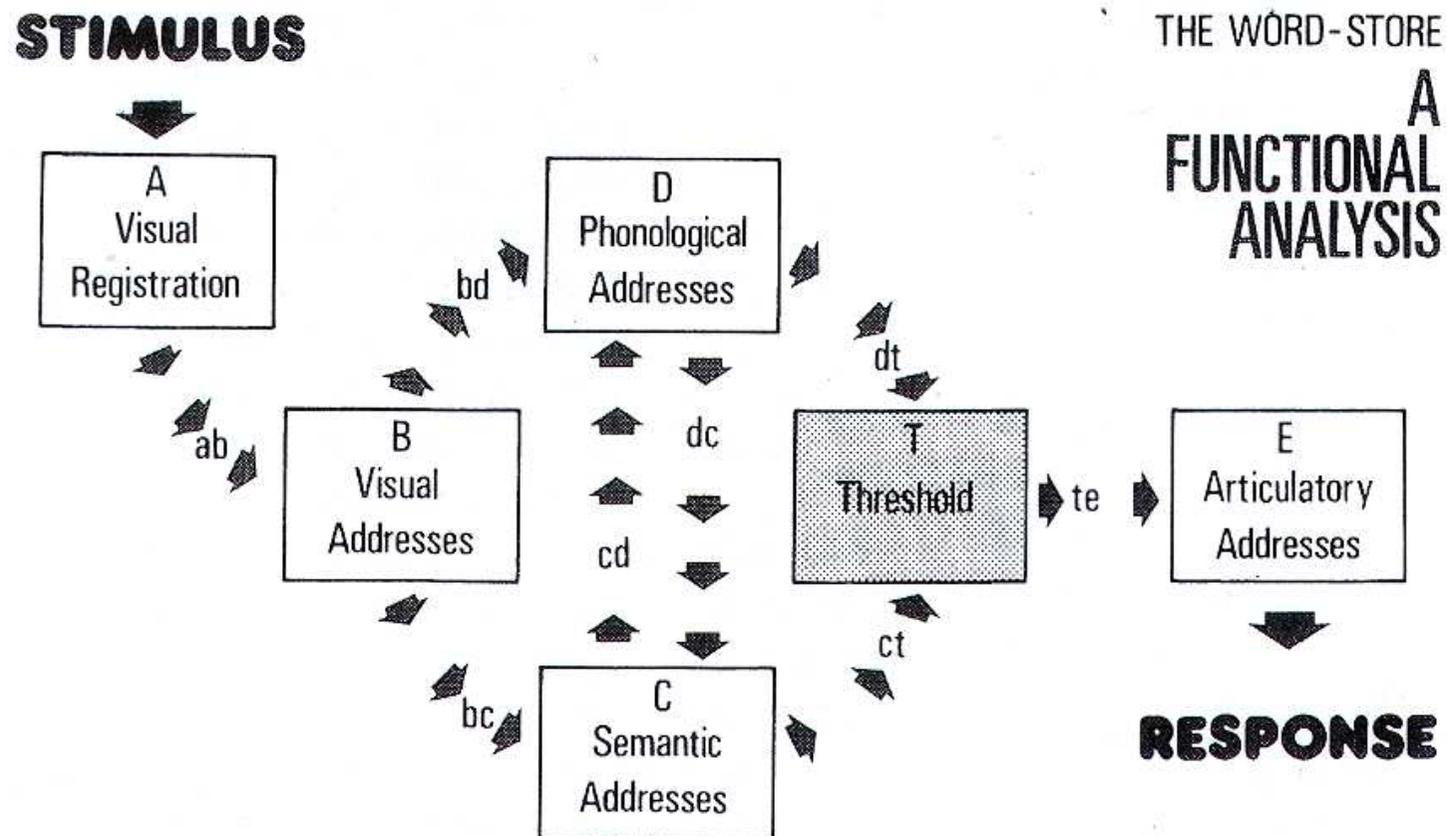
# Au delà de la forme visuelle du mot: l'apport de l'analyse des erreurs de lecture en neuropsychologie (Marshall & Newcombe, 1966, 1973)

- **Alexies périphériques**
  - Erreurs de substitution ou de réarrangement de lettres: apple → able, but → put, town → down
  - Gradient spatial: la fin des mots (ou le début) est particulièrement affectée
- **Alexie « profonde » ou centrale: accès au sens, pas à la prononciation**
  - Erreurs de substitution sémantique: sick → ill, little → small, large → big, hen → egg... chicken... duck.. turkey
  - Comportement d'approche sémantique:  
Holland → « well... yes... I know, I know... It's a country, not Europe,... no... not Germany... it's small... it was captured... Belgium! That's it, Belgium »;  
Hôpital → « Je sais ce que c'est, c'est les docteurs... les malades... ma-la-mala, non ce n'est pas malade »
- **Alexie « de surface » : préservation partielle des correspondances graphèmes-phonèmes »**
  - Erreurs de phonèmes correspondant à une « sur-régularisation » :  
En français: lit → « lite »; En anglais: island → « izland », bike → « bik »
  - Néologismes nombreux

# Un modèle à deux routes de lecture

(Marshall & Newcombe, 1966, 1973)

- Idées clés:
  - Les erreurs de lecture chez les patients ne sont pas aléatoires.
  - Elles existent également, à un degré moindre, chez le lecteur normal et reflètent l'opération d'un circuit organisé en deux routes et partiellement dégradé.



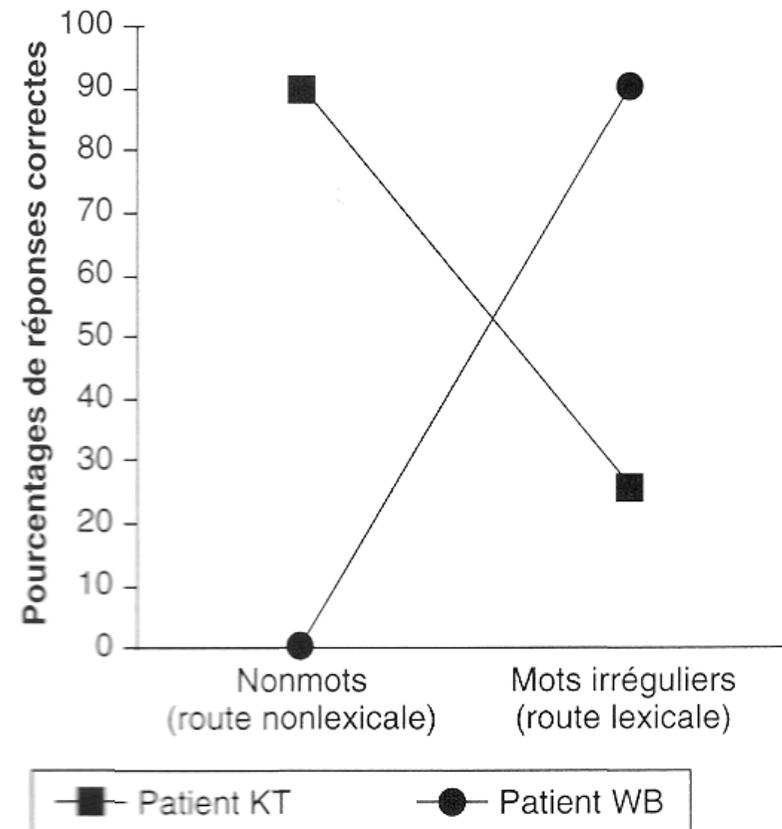
# Quelques critères déterminant le passage par l'une ou par l'autre route

Trois catégories essentielles de chaînes de caractères doivent être distinguées:

- les pseudo-mots comme « bakifo (voie de surface uniquement)
- les mots réguliers comme « bateau » (voie de surface et voie profonde)
- les mots irréguliers comme « oignon » (voie profonde uniquement)

Autres facteurs débattus:

- la fréquence
- l'ambigüité
- l'homophonie
- la concrétude



# Un bref aperçu de la psycholinguistique des voies de lecture

- Les deux voies de lecture sont-elles utilisées en parallèle dans la lecture normale?
- Ou bien utilisons-nous principalement un accès direct au lexique et au sens (théorie de l'accès direct)?
- Ou bien passons-nous toujours par une voie phonologique (théorie de la médiation phonologique)?

Les recherches en psycholinguistique suggèrent que **l'information phonologique est automatiquement et systématiquement activée.**

- effet de **pseudo-homophonie** en décision lexicale (Coltheart et al, 1977):

Ralentissement lorsqu'il s'agit de rejeter des pseudo-mots comme « chèse » ou « roze »

→ Toutefois, cet effet n'est pas toujours répliqué et pourrait dépendre du niveau de lecture: (Seidenberg et al., 1996)

→ L'accès à la phonologie pourrait n'exister que pour les pseudo-mots

- effet d'**homophonie en catégorisation sémantique** (Van Orden 1987; Van Orden et al. 1988, 1992):

Ralentissement lorsqu'il s'agit de catégoriser des homophones n'appartenant pas à la catégorie cible

Par exemple FLOWER → ROWS ??? (contrôle ROBS)

Dans certaines expériences, cet effet est observé même pour des mots très fréquents et témoignerait donc d'un accès obligatoire à la phonologie

# Un bref aperçu de la psycholinguistique des voies de lecture (2)

## -Effets d'**amorçage phonologique**:

(Exemples d'expériences en langue anglaise : Perfetti & Bell, 1991 ; Lukatela, Frost, & Turvey, 1998 ; en langue française : Ferrand & Grainger, 1992, 1993, 1994)

- La **ressemblance phonologique** entre un mot amorce et un mot cible contribue à accélérer la décision lexicale du mot cible

Exemples:

- TRIBE → BRIBE

- EIGHT → MATE

- ralentissement pour COUCH-TOUCH

- Ces effets d'amorçage phonologique s'observent même lorsque **la présentation du mot amorce est brève et masquée**

Exemples:

- nert-NERF versus nerg-NERF versus tabe-NERF

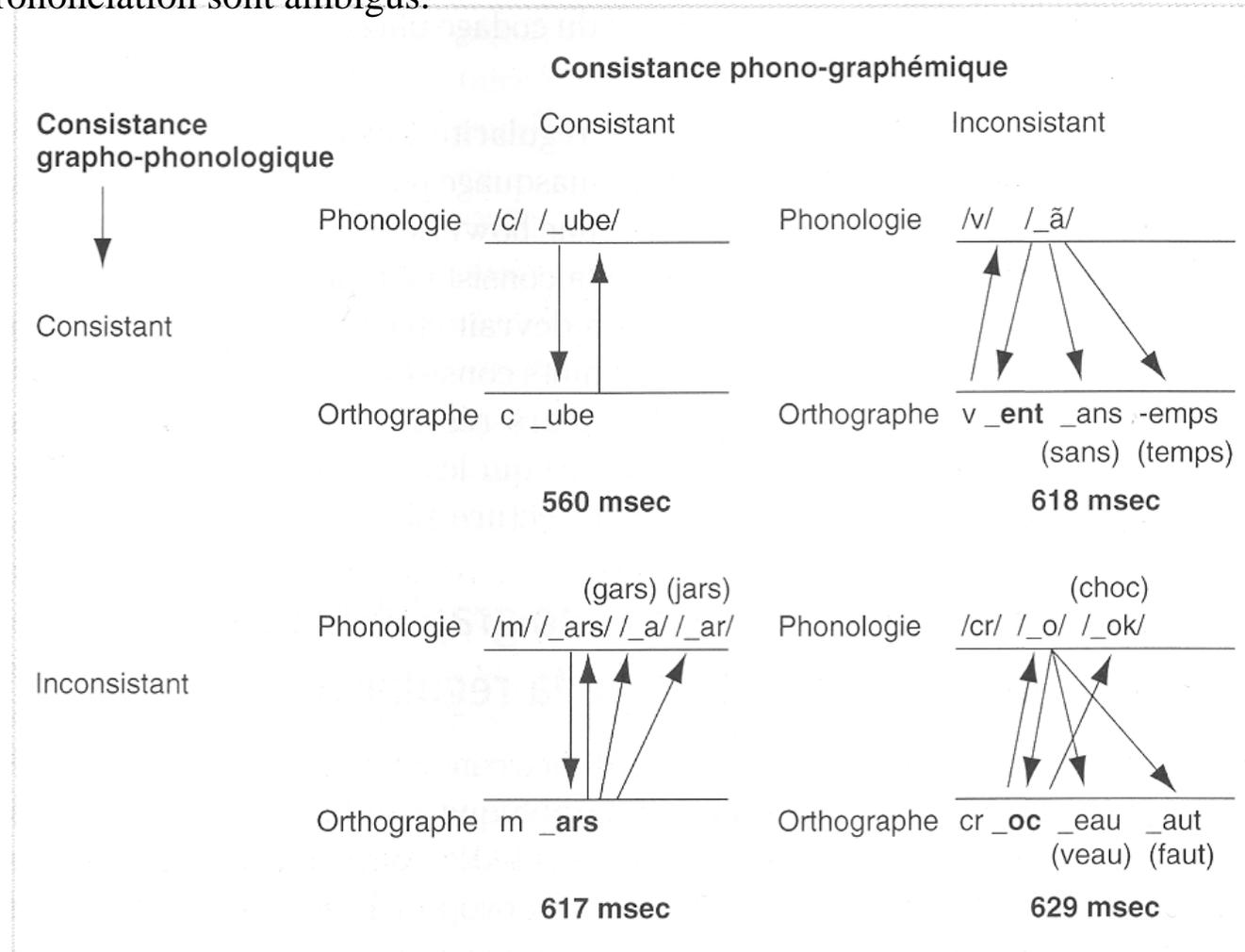
Les effets phonologiques n'apparaissent qu'à des temps de présentation longs (>50 ms) alors que les effets orthographiques apparaissent également à des temps courts (<50 ms).

# Effets de régularité et de « consistance »

- Il s'agit de la cohérence (« consistency ») avec laquelle une lettre ou un groupe de lettre est transcrite en phonèmes (consistance *grapho-phonologique*), et vice-versa (consistance *phono-graphémique*)

-Le temps de reconnaissance et de dénomination d'une chaîne de lettres se ralentit lorsque les liens qu'elle entretient avec la prononciation sont ambigus.

Ziegler et al (1997):  
Décision lexicale plus lente  
pour les mots doublements  
inconsistants



# Le modèle de Coltheart et al. (2001): « dual-route cascaded model » (DRC)

Le modèle dispose en fait de 3 routes:

- Une voie de conversion graphème-phonème, modélisée par un système de règles
- Une voie lexicale non-sémantique, modélisée par un réseau connexionniste interactif à codage local (mais sans apprentissage)
- Une voie lexicale sémantique (non modélisée)

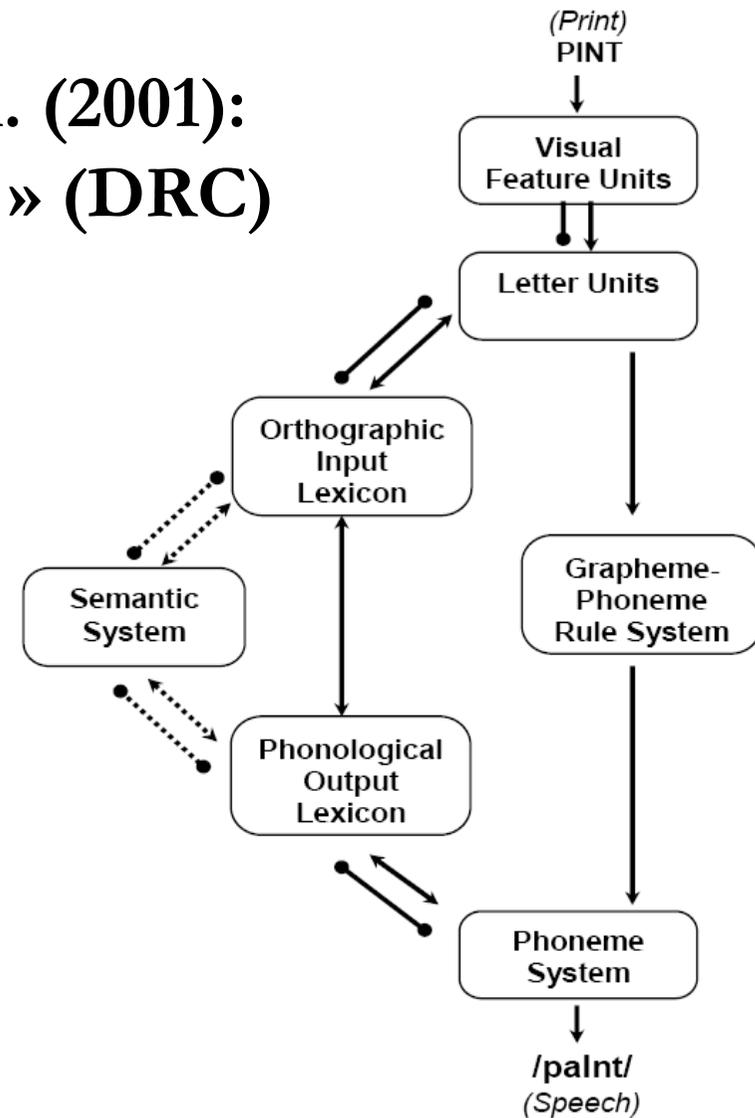


Figure 2. The Dual-Route Cascaded (DRC) model (adapted with permission from Coltheart, Curtis, Atkins, & Haller, 1993). The lexical-semantic route of the model is not implemented (dashed lines).

# Le modèle « triangle » de Seidenberg & McClelland (1989)

Modélisation par un réseau connexionniste avec représentations distribuées et apprentissage

- Une voie de conversion graphème-phonème (la seule modélisée dans l'article original de Seidenberg & McClelland, 1989; améliorée par Plaut et al., 1996).
- Une voie lexicale sémantique, modélisée ultérieurement par Harm & Seidenberg (2004).

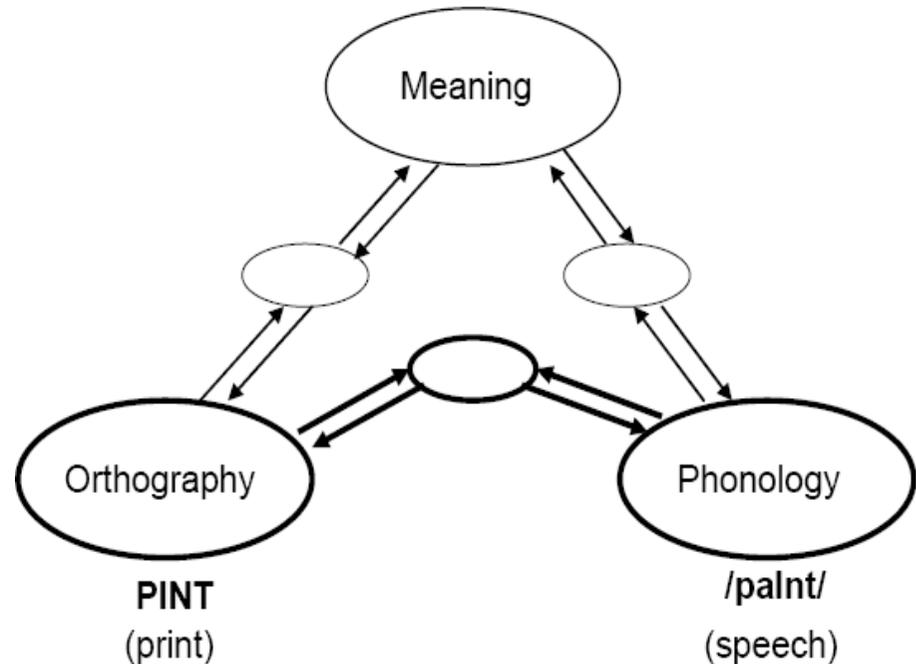


Figure 1. The Triangle model (adapted with permission from Seidenberg & McClelland, 1989). The part of the model implemented by Seidenberg and McClelland and also Plaut et al. (1996) is shown in bold.

# Le modèle de Zorzi, Houghton & Butterworth (1998): « Connectionist Dual Process » (CDP)

Modélisation par un réseau  
connexionniste avec représentations  
localistes et apprentissage

L'apprentissage « réparti »  
spontanément les connaissances entre  
deux voies:

- Une voie directe d'*assemblage phonologique*, sans unités cachées, donc capable d'apprendre seulement les conversions graphèmes-phonèmes simples
- Une voie de *récupération phonologique*

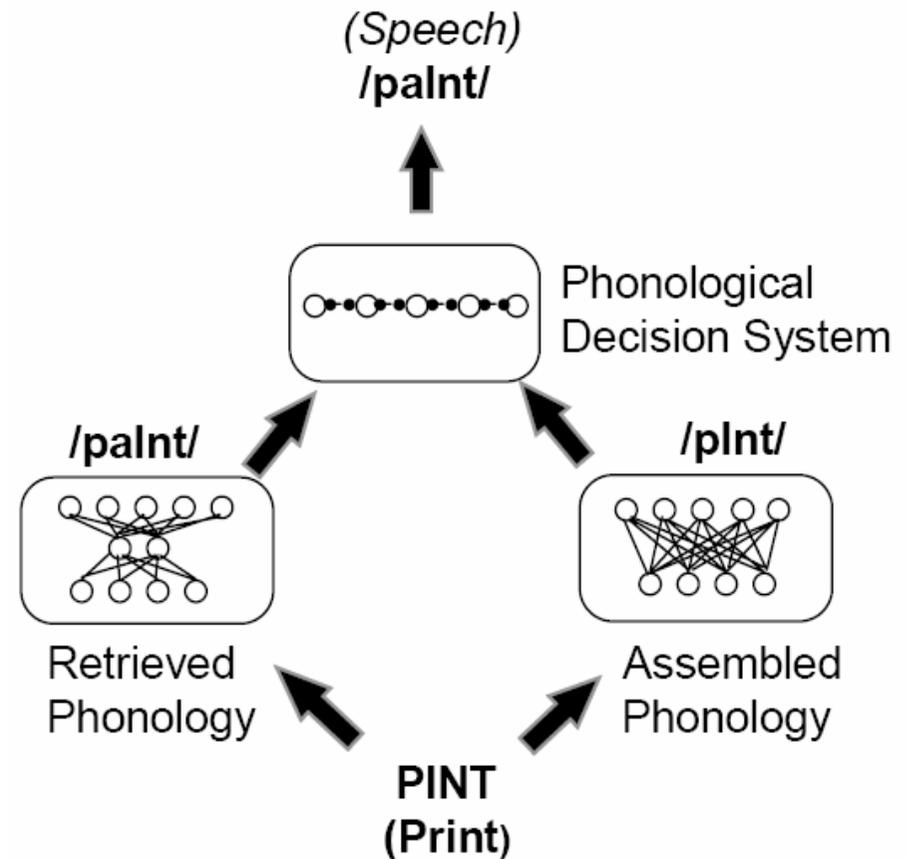
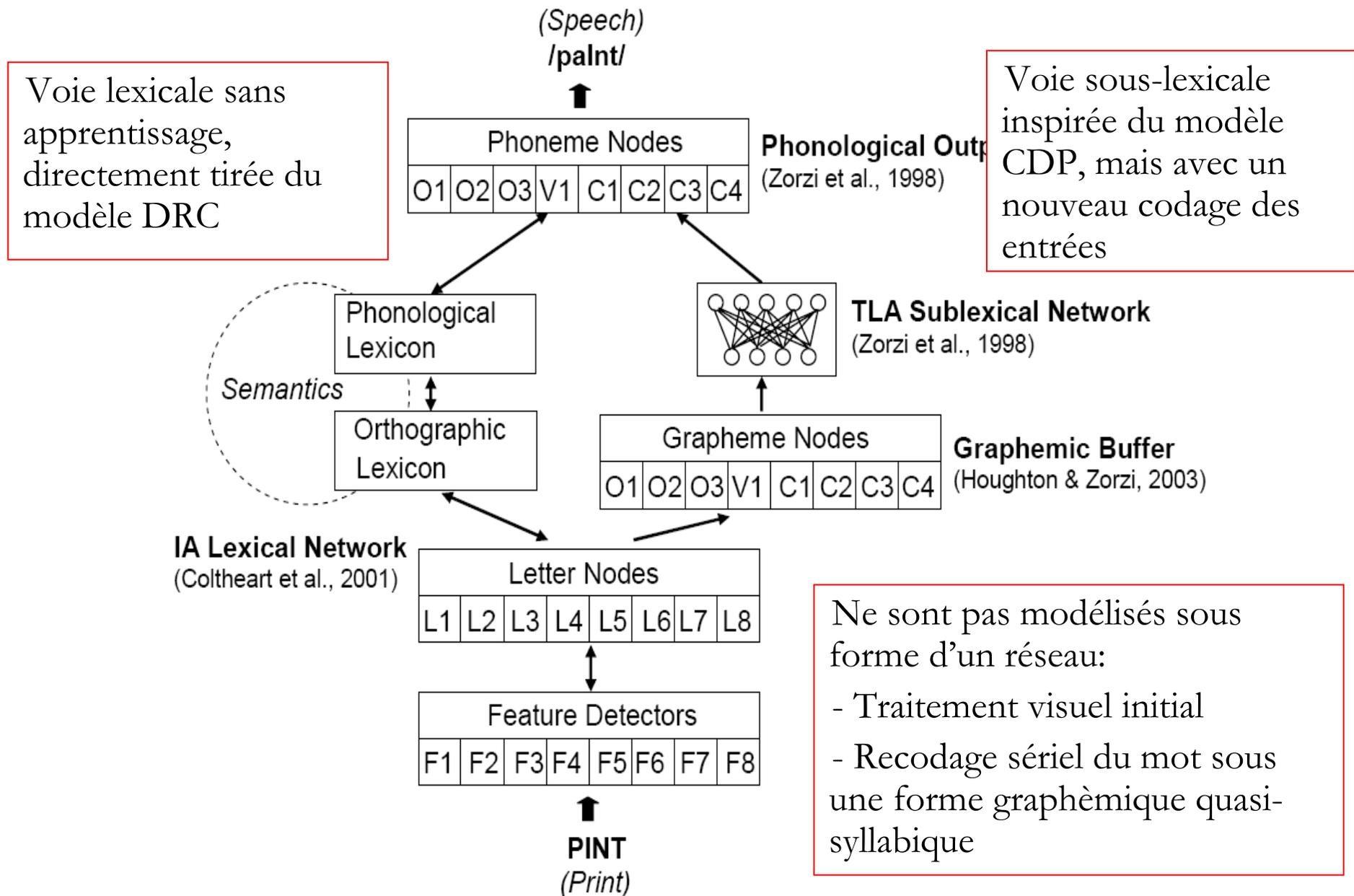


Figure 3. The Connectionist Dual Process (CDP) model (adapted with permission from Zorzi, Houghton, and Butterworth, 1998a).

# Le modèle de Perry, Ziegler et Zorzi (2007): CDP+ = synthèse des modèles CDP et DRC



## La série de tests de référence (« benchmarks ») proposée par Perry et al. (2007)

Name of Effect	Benchmark data set	Description	Triangle	DRC	CDP+
Frequency	Jared (2002, Exp. 2) Weekes (1997)	High-frequency words are faster/more accurate than low-frequency words	+	+	+
Lexicality	McCann & Besner (1987) Weekes (1997)	Words are faster/more accurate than pseudowords	+	+	+
Frequency × Regularity	Paap & Noel (1991) Jared (2002, Exp. 2)	Irregular words are slower/less accurate than regular words. Jared (2002) reports no interaction with frequency.	-	+	+
Word Consistency	Jared (2002, Exp. 1)	Inconsistent words are slower/less accurate than consistent words. The size of the effect depends on friend/enemy ratio	+	-	+
Nonword Consistency	Andrews & Scarrat (1998)	Nonword pronunciations show graded consistency effects, that is, people do not always use the most common grapheme-phoneme correspondences	-	-	+
Length × Lexicality	Weekes (1997) Ziegler et al. (2001)	Naming latencies increase linearly with each additional letter	-	+	+
Position of Irregularity	Rastle & Coltheart (1999)	The size of the regularity effect is bigger for words with first position irregularities (e.g., <u>ch</u> ef) than for words with second- or third-position irregularities	-	+	+

## La série de tests de référence (« benchmarks ») proposée par Perry et al. (2007)

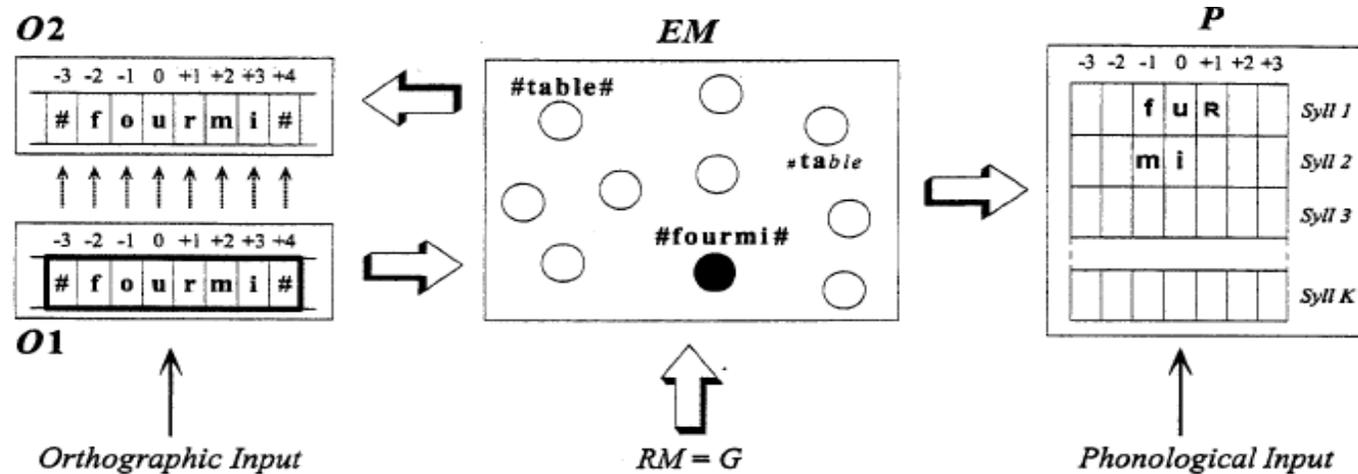
Name of Effect	Benchmark data set	Description	Triangle	DRC	CDP+
Body Neighborhood	Ziegler et al. (2001)	Words with many body neighbors are faster/more accurate than words with few body neighbors	-	-	+
Masked Priming	Forster & Davis (1991)	Words preceded by an onset prime are faster/more accurate than words preceded by unrelated primes	?	+	+
Pseudohomophone Advantage	McCann & Besner (1987) Reynolds & Besner (2005)	Nonwords that sound like real words (e.g., bloo) are faster/more accurate than orthographic controls	+	+	+
Surface Dyslexia	Patterson & Behrmann (1997)	Patient MP: specific impairment of irregular word reading, which is modulated by the consistency ratio of the words	+	-	+
Phonological Dyslexia	Derouesné & Beauvois (1985)†	Patient LB: specific impairment of nonword reading, which is reduced when nonwords are orthographically similar pseudohomophones	(+)§	+	+
Large-Scale Databases	Spieler & Balota (1997) Balota & Spieler (1998)	Naming latencies of the model are regressed onto the average naming latency of each item in large-scale databases containing thousands of items	-	-	+

# Le modèle de Ans, Carbonnel et Valdois (1998)

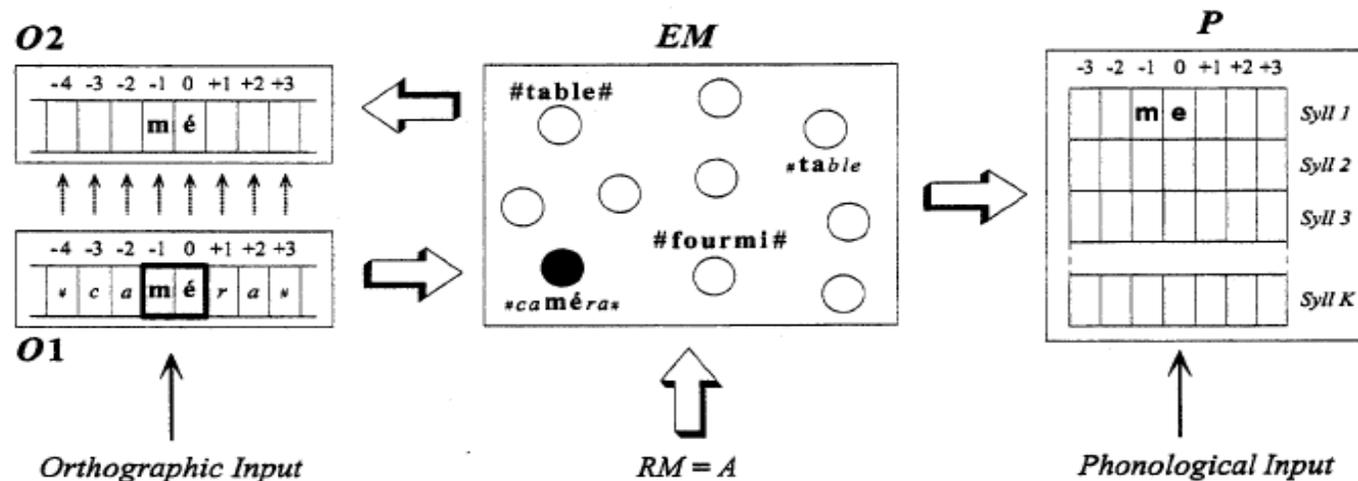
Contrairement aux autres modèles, ce modèle

- n'est pas limité au seul traitement des mots mono-syllabiques
- disponible de deux « modes »: lecture globale ou lecture analytique
- dispose d'une procédure de comparaison entre l'entrée visuelle et la sortie

**Mode de lecture globale**



**Mode de lecture analytique**



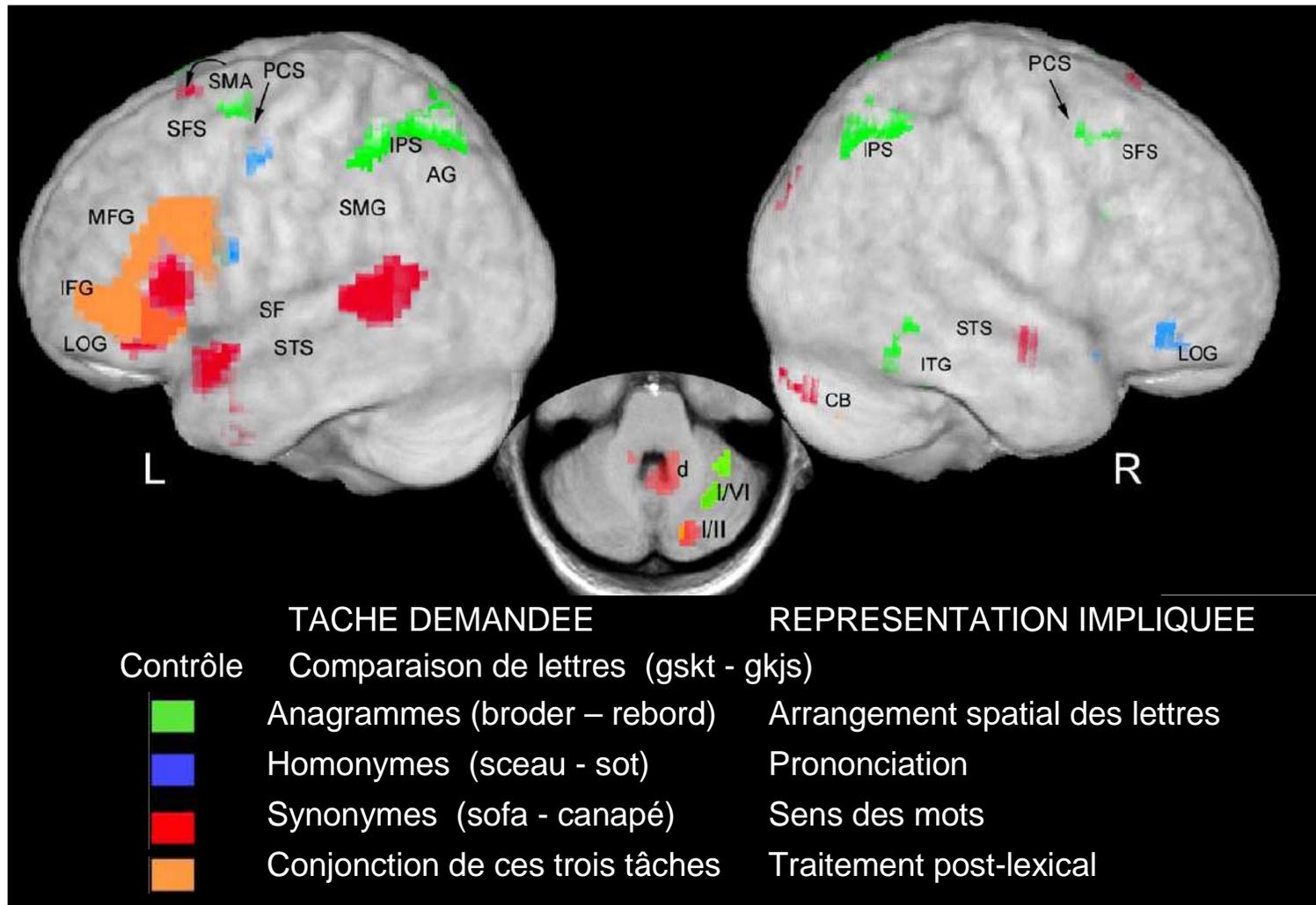
# L'imagerie cérébrale des voies de lecture

- Deux grands types de méthodes ont été utilisés pour moduler le passage par une voie lexicale versus une voie de conversion graphème-phonème
- **Méthode « à stimulus variable »:**
  - lecture de mots versus pseudo-mots
  - mots réguliers versus irréguliers
  - mots fréquents (stockés) versus rares (peu ou pas codés dans le lexique)
- **Méthode « à stimulus constant et tâche variable »:**
  - voie phonologique: jugement de rime
  - voie lexico-sémantique: jugement de synonymie
  - tâche de contrôle: jugement de similarité orthographique

**Les résultats de ces différentes méthodes convergent, bien qu'il demeure de nombreuses différences non-expliquées**

(voir Fiez & Petersen, 1998 ; Price, 1998 ; Jobard, Crivello, & Tzourio-Mazoyer, 2003 ; Mechelli, Gorno-Tempini, & Price, 2003 ; Price et coll., 2003)

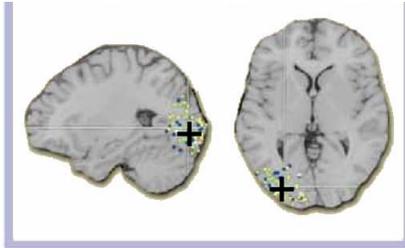
# Un exemple: l'expérience de Gitelman et coll. (2005, NeuroImage)



- A chaque essai, les sujets voyaient une paire de mots et devaient juger de leur similarité au niveau des lettres, des sons, ou du sens.

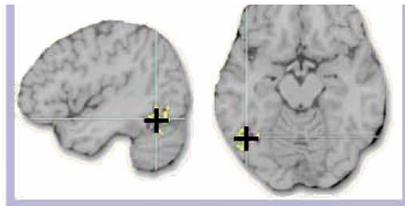
- Trois réseaux bien distincts sont retrouvés

## Traitement visuel précoce



## Reconnaissance visuelle

Région occipito-temporale  
-44, -58, -15



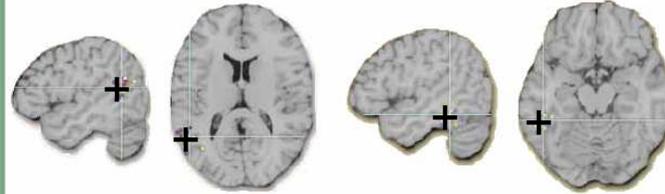
Méta-analyse de 35 études

(Jobard et al., 2003, *NeuroImage*)

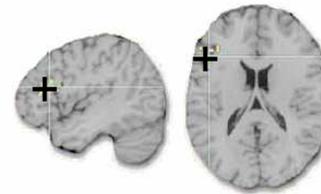
## Accès au sens

Gyrus temporal moyen  
-49, -54, 13

Région temporale basale  
-48, -41, -16



Gyrus frontal inférieur (*pars triangularis*)  
-44, 23, 17

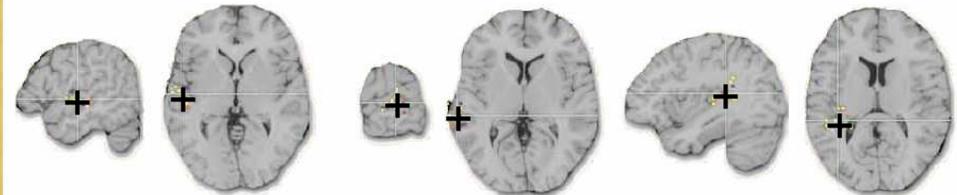


## Conversion en sons

Gyrus temporal supérieur  
-53, -13, 0

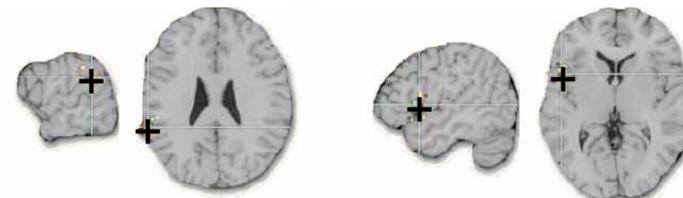
Gyrus temporal moyen  
-63, -30, 4

Gyrus temporal supérieur  
-37, -35, 12



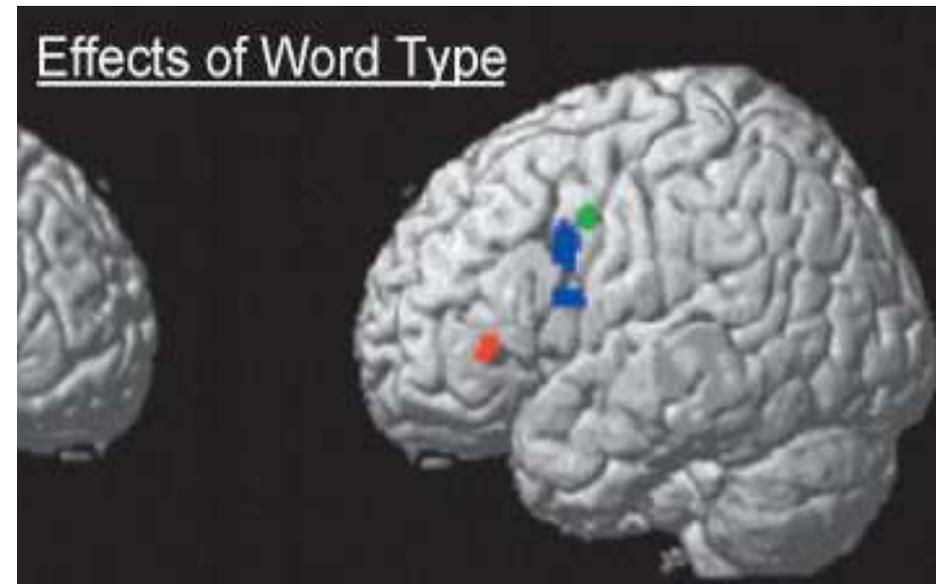
Gyrus supramarginal  
-60, -41, 25

Gyrus frontal inférieur (*pars opercularis*)  
-50, 10, 4

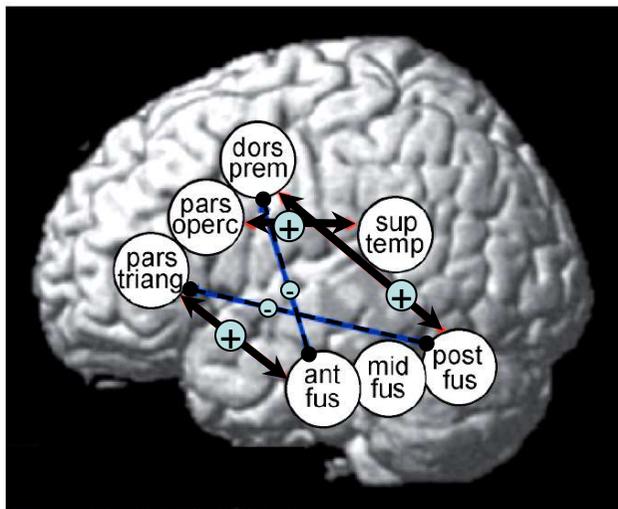


# Visualisation des réseaux par la « connectivité fonctionnelle »: l'expérience de Mechelli et Price (2005, J Cognitive Neuroscience)

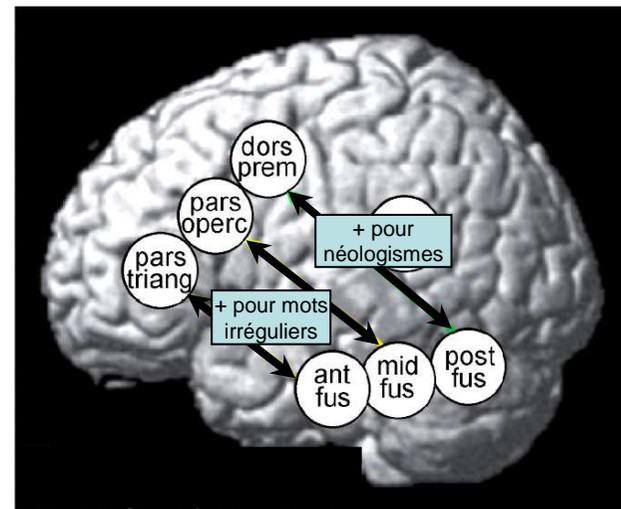
- Quatre types de stimuli: mots réguliers (cult), mots irréguliers (doubt), pseudo-mots (tholt), fausse police
- Tâche de lecture silencieuse
- **gyrus frontal inf, pars triangularis**, plus activé par les mots irréguliers que par les pseudo-mots
- **gyrus frontal inf, pars opercularis**, plus activé par pseudo-mots et mots irréguliers que par les mots réguliers
- cortex prémoteur dorsal**, plus activé par les pseudo-mots que par les mots irréguliers



Connectivité fonctionnelle permanente

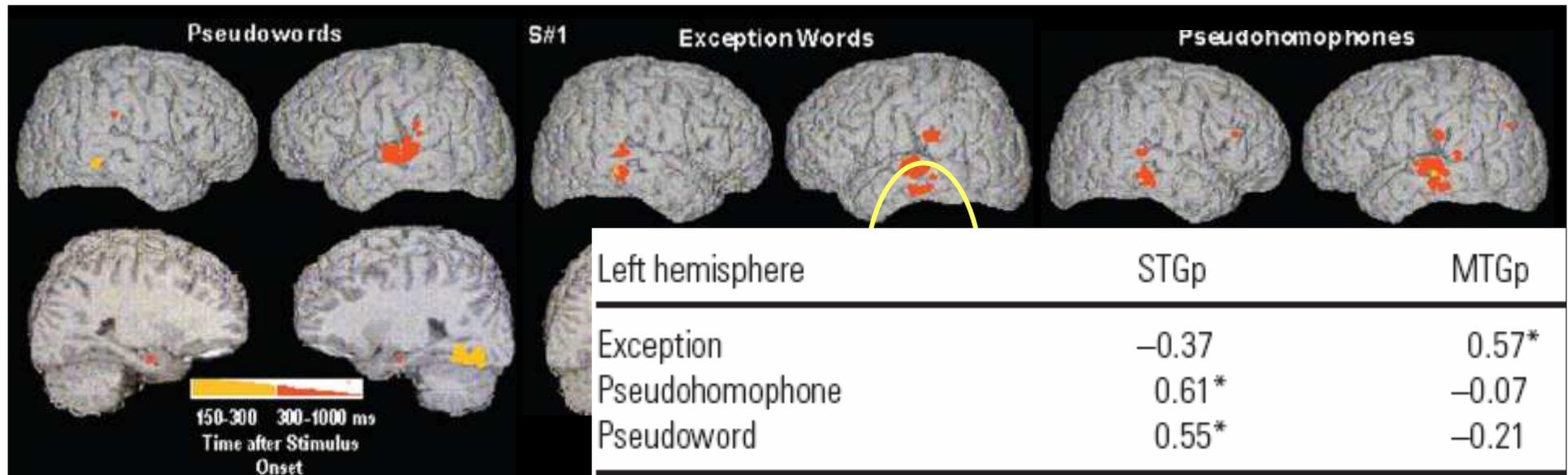


Effets du type de chaîne lue



# Le déroulé temporel des deux voies de lecture: l'expérience de MEG de Simos et coll. (2002, Cerebral Cortex)

- Tâche de dénomination à haute voix de trois types de stimuli:
- pseudo-mots tels que « traphe » ou « glos » → conversion graphème-phonème uniquement
- mots irréguliers tels que « oignon » ou « femme » → voie lexicale uniquement
- pseudo-homophones tels que « grau » ou « taite » → conversion, puis accès possible au lexique



- Activation identique jusqu'à 200 ms environ (forme visuelle des mots)
- Pseudo-mots et pseudo-homophones n'activent pas précocément la région temporale moyenne, qui est seulement activée par les mots.
- Toutefois cette région s'active tardivement pour les pseudo-homophones
- Pas de différence dans la région temporale supérieure (activation automatique dans tous les cas), mais différence remarquable dans la prédiction des latences de lecture:
- la latence d'activation du gyrus temporal moyen prédit la vitesse de lecture des mots irréguliers
- la latence d'activation du gyrus temporal moyen prédit la vitesse de lecture des pseudo-mots

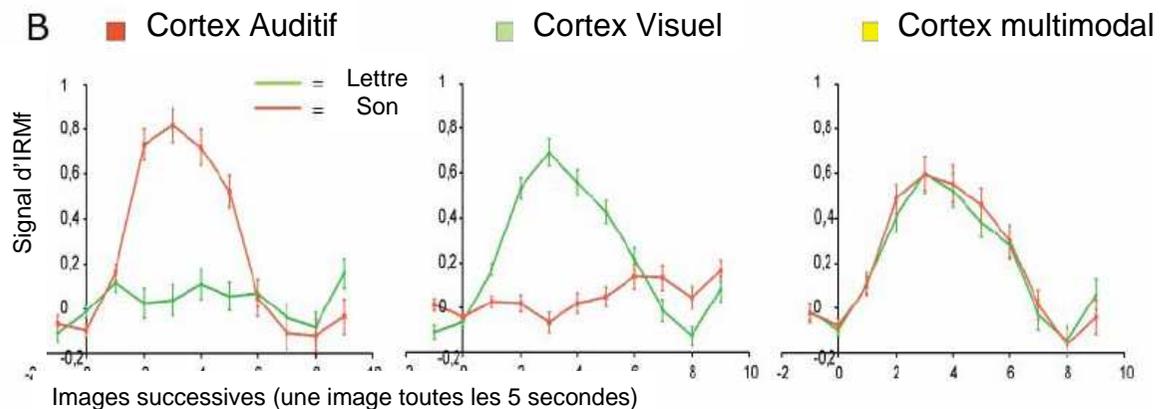
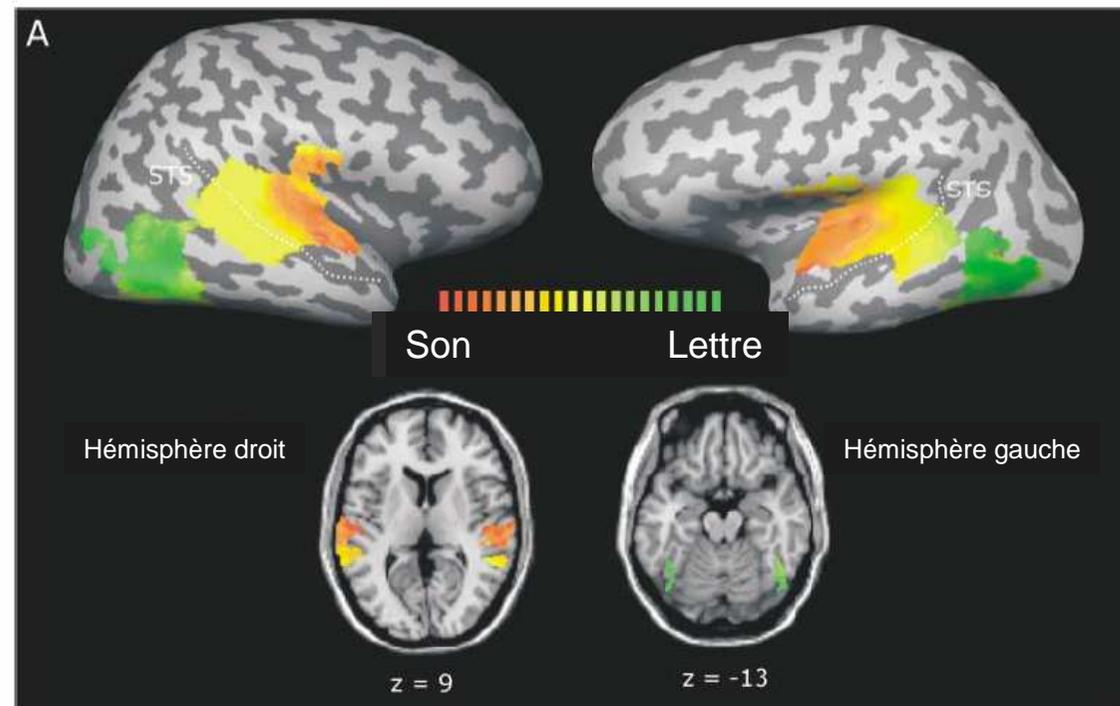
# La région temporale supérieure et la convergence des lettres et des sons

van Atteveldt, N., Formisano, E., Goebel, R., & Blomert, L. (2004).. *Neuron*, 43(2), 271-282.

- Présentation passive d'une seule lettre (V), d'un son du langage (A), ou des deux stimuli simultanément (A+V)
- Dans la condition simultanée (A+V), les lettres et les sons peuvent être congruents ou incongruents

Résultats:

1. Conditions A et V: Toute une partie du cortex temporal supérieur, représenté en jaune, est multimodal: il s'active autant par l'écrit que par l'oral.



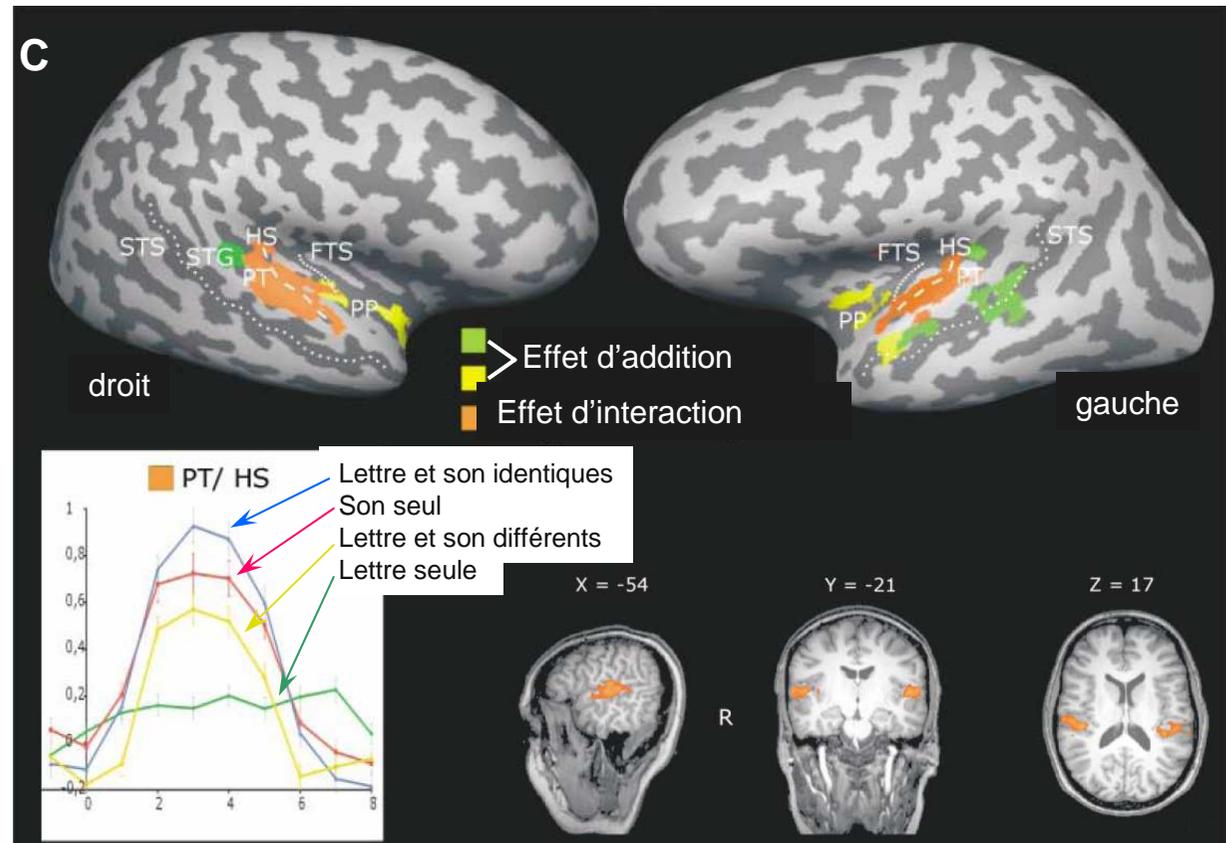
# La région temporale supérieure et la convergence des lettres et des sons

van Atteveldt, N., Formisano, E., Goebel, R., & Blomert, L. (2004).. *Neuron*, 43(2), 271-282.

## Résultats

### 2. Condition A+V:

- Certaines régions d'intégration montrent une addition des deux activations (visuelle et auditive)
- Les plus intéressantes, situées dans le *planum temporale* (en orange), montrent une interaction entre l'écrit et l'oral: la réponse auditive augmente lorsque la lettre correspond au son, et elle diminue si les deux stimuli diffèrent



# La région temporele moyenne gauche et l'accès au sens des mots

Vandenbulcke, M., Peeters, R., Dupont, P., Van Hecke, P., & Vandenberghe, R. (2007). *Cereb Cortex*, 17(3), 542-551.

Dessin expérimental factoriel:

-tâche: attention au **sens** (quelle image ressemble le plus à celle d'en haut sur le plan sémantique) ou à la **forme visuelle** (quelle image est la plus proche en taille de celle d'en haut)

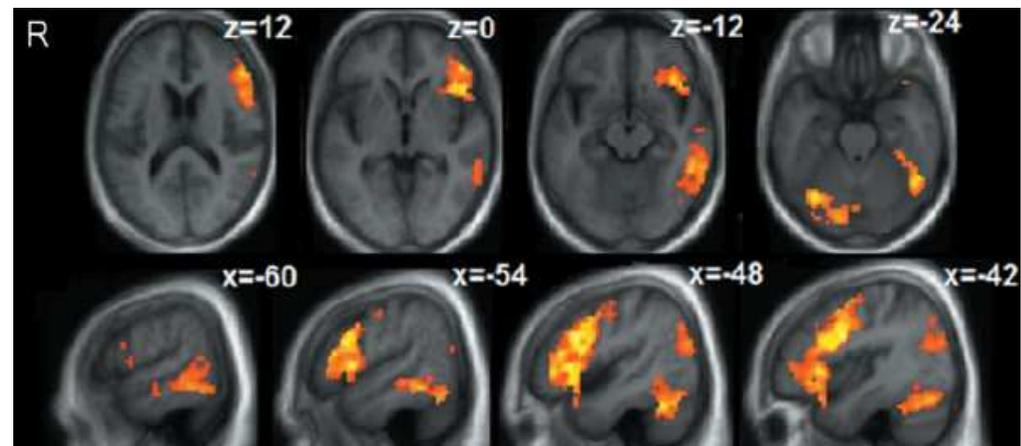
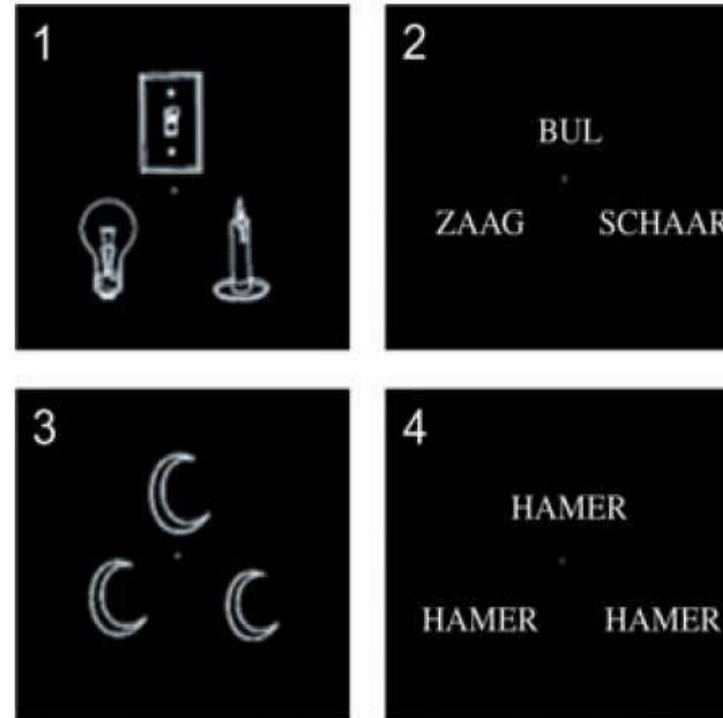
-stimuli: **images** ou **mots écrits**

-sujets: 13 patients atteints d'une forme débutante de la maladie d'Alzheimer (mild cognitive impairment ou MCI) et 13 sujets contrôles appariés en âge, sexe, niveau d'éducation, manualité et facteurs de risque vasculaire

Résultats:

- pas de différence entre les groupes dans les performances durant l'IRM fonctionnelle

- un vaste réseau distribué s'active plus dans la tâche sémantique que dans la tâche visuelle (cf Vandenberghe et al, 1996)



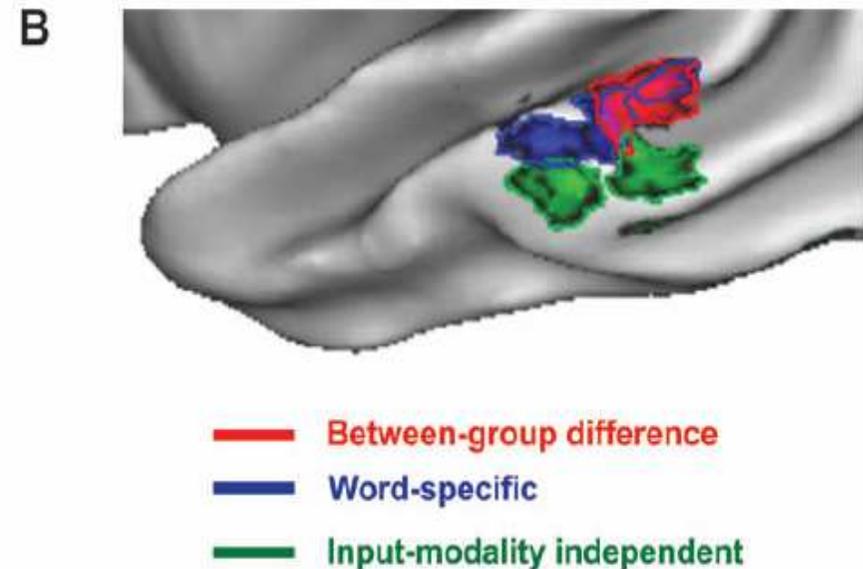
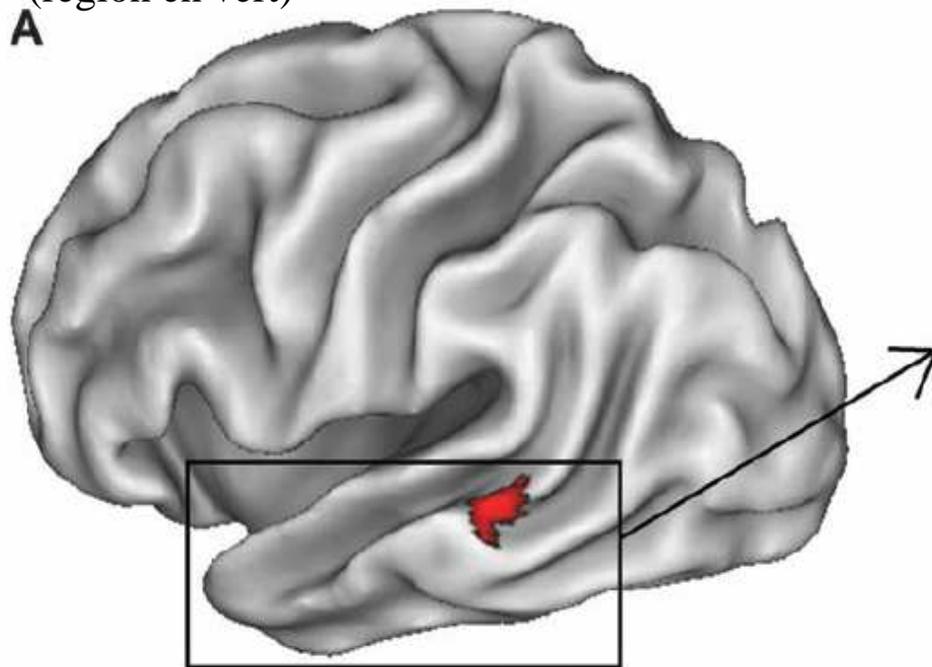
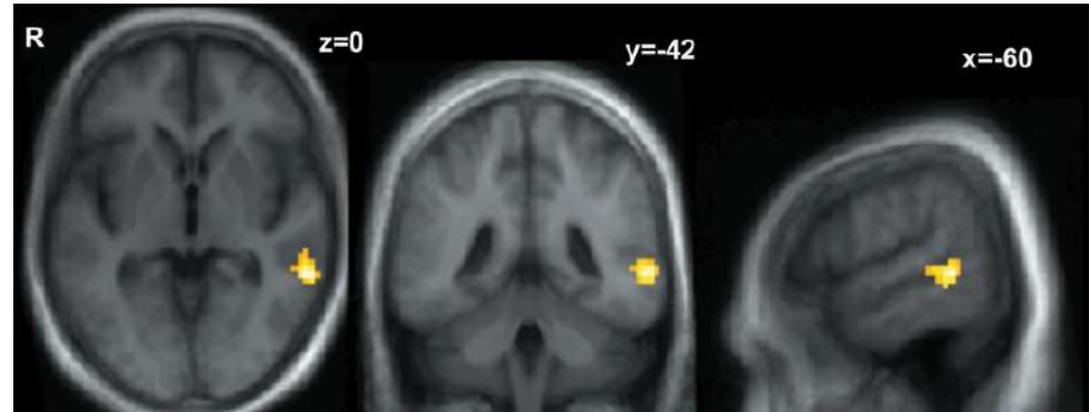
# La région temporelle moyenne gauche et l'accès au sens des mots

Vandenbulcke, M., Peeters, R., Dupont, P., Van Hecke, P., & Vandenberghe, R. (2007). *Cereb Cortex*, 17(3), 542-551.

-Une seule région plus activée chez les contrôles que chez les patients: la région temporelle moyenne gauche (région en rouge)

-Cette région s'active plus pour la tâche sémantique que visuelle, mais seulement pour les mots (région en bleu)

-Une région très proche s'active de façon conjointe pour le sens des mots et des images (région en vert)



## Résumé: Plusieurs routes de lecture

- La région occipito-temporale gauche semble servir de « voie d'entrée » visuelle de la lecture
- Trois autres grands réseaux semblent ensuite être impliqués:

