

Mémoire de fin d'études
Pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'État en Informatique
Option : Systèmes Informatiques

Création d'un corpus de l'aphasie de Broca et
développement d'un système Speech-to-speech de
réhabilitation de la parole

Réalisé par :
BELGOUMRI Mohammed
Djameleddine
im_belgoumri@esi.dz

Encadré par :
Pr. SMAILI Kamel
smaili@loria.fr
Dr. LANGLOIS David
david.langlois@loria.fr
Dr. ZAKARIA Chahnez
c_zakaria@esi.dz

Table des matières

Page de garde	i
Table des matières	ii
Table des figures	iii
Liste des algorithmes	iv
Sigles et abréviations	v
1 Notions générales	1
1.1 Aphasie de Broca	1
1.1.1 Histoire et anatomie de l'aphasie	1
1.1.2 Classification des syndromes aphasique	4
1.1.3 Causes, prévalence et incidence de l'aphasie	5
1.1.4 Effet de l'aphasie de Broca sur la qualité de vie	5
1.1.5 Traitement de l'aphasie de Broca	6
1.2 Traduction automatique	6
1.2.1 Généralités	7
1.2.2 Classification	7
1.3 Reconnaissance automatique de la parole	8
1.4 Conclusion	9

Table des figures

1.1	Cerveau de Victor Louis Leborgne avec la lésion encadrée.	2
1.2	Encéphale humain.	3
1.3	Division morphologique et fonctionnelle du cerveau.	3
1.4	Classification des syndromes aphasiques classiques.	4
1.5	Comparaison de la qualité de vie de communication chez les individus sains et ceux qui souffrent de l'aphasie de Broca.	6
1.6	Taxonomie des méthodes de traduction automatique.	7
1.7	Triangle de Vauquois.	8
1.8	Taxonomie des techniques d' reconnaissance automatique de la parole (ASR, de l'anglais : automatic speech recognition).	9

Liste des algorithmes

Sigles et abréviations

ASR	reconnaissance automatique de la parole
AVC	accident vasculaire cérébral
DL	apprentissage profond
IL	interlingue
LC	langage cible
LS	langue source
MT	traduction automatique
NLP	traitement automatique du langage
NMT	traduction automatique neuronale
RMBT	traduction automatique à base de règle
SMT	traduction automatique statistique

Chapitre 1

Notions générales

Dans ce chapitre, nous traçons les grandes lignes de notre étude. Nous commençons par introduire les détails du problème principal que nous abordons à savoir l’aphasie de Broca. Ensuite, nous présentons deux avenues de recherche qui nous semblent pertinentes pour résoudre ce problème. Il s’agit respectivement de la traduction automatique (MT, de l’anglais : machine translation) et de la ASR. Dans les deux chapitres suivants, nous développons en plus de détails ces deux approches en explorant la littérature scientifique là-dessus.

1.1 Aphasie de Broca

L’aphasie ; emprunté au Grec ancien ἀφασία qui veut dire “mutisme”, est un trouble de communication d’origine neurologique (LAROUSSE, s. d.). Elle affecte la capacité à comprendre le langage, s’y exprimer ou les deux. L’aphasie n’est pas causée par un trouble moteur, sensoriel, psychique ou intellectuel (CHAPEY, 2008). Sa cause principale est un accident vasculaire cérébrale (AVC), mais elle peut également être le résultat d’une infection ou tumeur cérébrale, un traumatisme crânien, un trouble métabolique comme le diabète ou une maladie neurodégénérative comme l’Alzheimer (HALLOWELL, 2017).

1.1.1 Histoire et anatomie de l’aphasie

Louis Victor Leborgne, né en 1809 à Moret-sur-Loing commence à perdre la capacité de parler à l’âge de 30 ans. Il est admis à l’hôpital de Bicêtre où il passerait 21 ans pendant lesquelles, il ne communique qu’en produisant le son “tan”, typiquement répété deux fois, si bien qu’on lui a donné le surnom “monsieur Tan tan” (MOHAMMED et al., 2018).

Le 11 avril 1861, monsieur Leborgne est examiné par Dr. Pierre Paul Broca pour une gangrène dans son pied droit. Dr. Broca s’intéresse au trouble linguistique dont souffre son patient (LORCH, 2011). Il fait l’observation que les facultés intellectuelles et motrices de monsieur Leborgne sont intactes, il en conclut qu’elles ne peuvent être à l’origine de son handicap. Dr. Broca donne le nom “aphémie” à ce type de situation (BROCA, 1861),

il en écrit :

“Cette abolition de la parole, chez des individus qui ne sont ni paralysés ni idiots, constitue un symptôme assez singulier pour qu’il me paraisse utile de la désigner sous un nom spécial. Je lui donnerai donc le nom d’aphémie (α privatif; $\varphi\eta\mu$, je parle, je prononce); car ce qui manque à ces malades, c’est seulement la faculté d’articuler les mots.”

— BROCA, 1861.

Dr. Broca prend ce constat comme confirmation de ce qu’il appelait “le principe de localisations cérébrales”. Il s’agit de l’idée que le cerveau fonctionne comme système à plusieurs composants plutôt qu’un monolithe et que les fonctions cognitives sont spatialement localisées (FODOR, 1983).

Quand monsieur Leborgne est décédé le 17 avril, Dr. Broca lui fait l’autopsie. En ouvrant le crâne, il observe une lésion dans le cortex inférieur gauche du lobe frontale (voir Figure 1.1). Il en déduit que (1) cette lésion était à l’origine de l’aphémie de monsieur Leborgne et que (2) la partie affectée du cerveau est responsable d’articuler des expressions dans le langage (BROCA, 1861 ; LORCH, 2011 ; MOHAMMED et al., 2018).

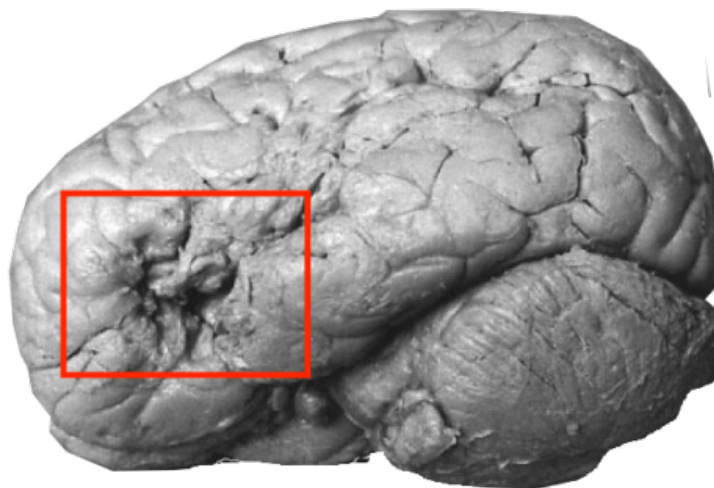


FIGURE 1.1 – Cerveau de Victor Louis Leborgne avec la lésion encadrée (LOPES, 2019).

Le trouble que Dr. Broca appelle “aphémie” est aujourd’hui connu sous le nom d’aphasie de Broca. Le cas de monsieur Leborgne est largement reconnu comme le premier cas enregistré d’aphasie en général et d’aphasie de Broca en particulier (MOHAMMED et al., 2018).

La quête de comprendre l’aphasie en général et celle de Broca en particulier, commence avec le cerveau. Celui des humains est le système le plus complexe connu (SCIENCES et al., 1992). Avec le cervelet et le tronc cérébral, il forme l’encéphale (voir Figure 1.2). Le cerveau se charge du traitement des flux nerveux sensoriels et moteurs. Il est aussi le siège des hautes fonctions cognitives comme l’inférence logique, l’émotion et — crucialement pour notre étude — le traitement du langage (FODOR, 1983).

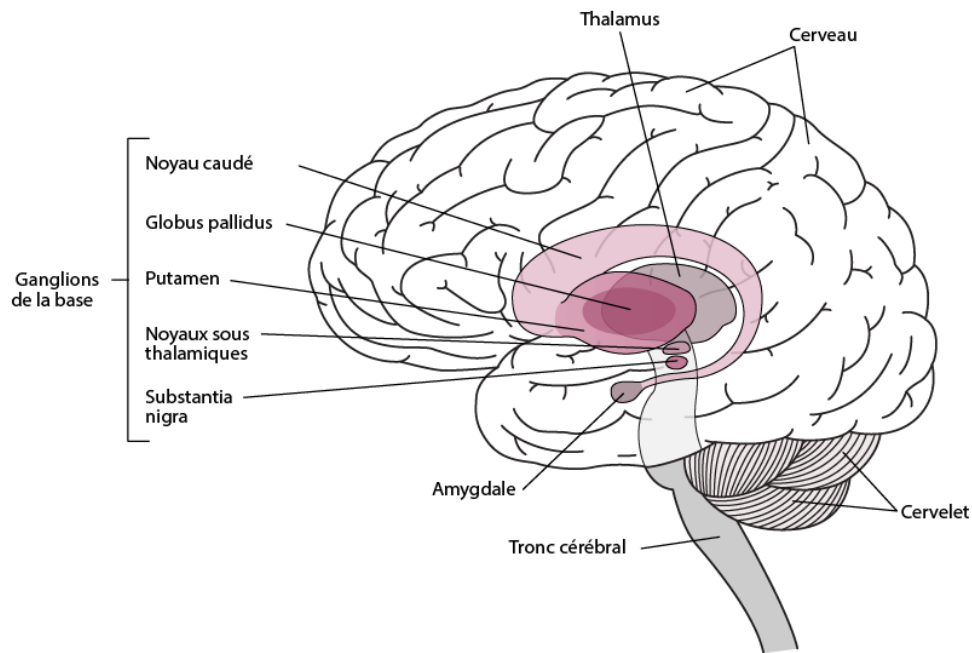
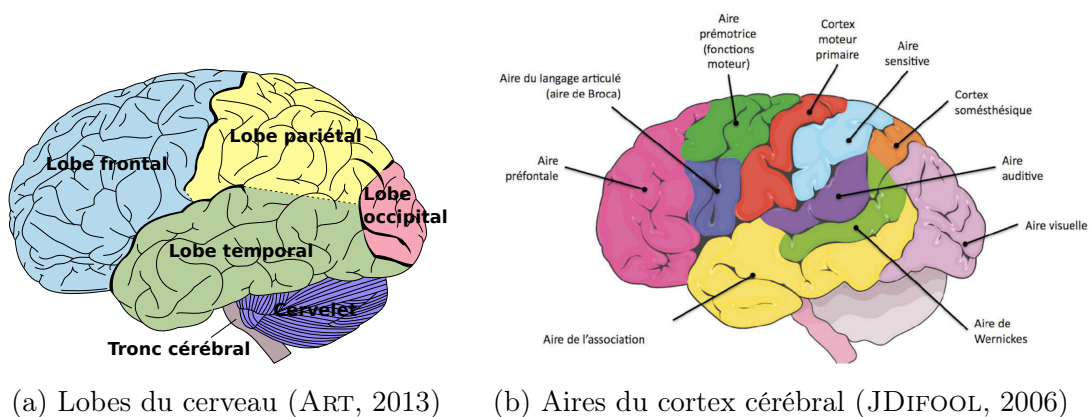


FIGURE 1.2 – Encéphale humain (« Noyaux gris centraux », s. d.).

Le cerveau est composé de deux hémisphères ; chacun desquels se divise en lobes : frontal, temporal, pariétal et occipital (voir Figure 1.3a). La surface du cerveau s'appelle le "cortex cérébral". Il présente plusieurs circonvolutions qui augmentent considérablement sa surface. Le cortex cérébral est divisé en régions fonctionnelles que nous appelons "aires" (voir Figure 1.3b). Le travail de Dr. Broca sur le cas de M. Leborgne sont largement reconnus comme l'origine de cette division (FODOR, 1983).



(a) Lobes du cerveau (ART, 2013) (b) Aires du cortex cérébral (JDIFOOL, 2006)

FIGURE 1.3 – Division morphologique et fonctionnelle du cerveau.

En particulier, la région du cerveau de M. Leborgne où Dr. Broca observe la lésion, correspond à l'aire qui porte son nom (aire de Broca). Ce dernier et celui de Wernicke jouent un rôle pivot pour l'aphasie (HALLOWELL, 2017).

1.1.2 Classification des syndromes aphasique

La définition que nous avons donnée de l'aphasie s'applique à une multitude de troubles (ou *syndromes*) dissimilaires en cause (région touchée du cerveau) et effet (conséquences pour la communication) (HALLOWELL, 2017). La table 1.1 et la figure 1.4 présentent une classification des syndromes aphasiques classiques. En particulier, notre sujet d'intérêt,

Syndrome Aphasique	Expressive / Réceptive	Localisation de la Lésion	Effet sur la Compréhension	Effet sur l'Expression
Aphasie de Wernicke	Réceptive	Aire de Wernicke (Brodmann 22 ¹)	Modéré à sévère	Modéré à sévère
Aphasie de Broca	Expressive	Aire de Broca (Brodmann 44, 45)	Léger à modéré	Modéré à sévère
Aphasie de Conduction	Les deux	Brodmann 40	Léger à modéré	Léger à modéré
Aphasie Globale	Expressive	Large, touche à plusieurs régions	Sévère	Sévère
Aphasie Transcorticale Sensorielle	Réceptive	Brodmann 37, 39	Modéré à sévère	Modéré à sévère
Aphasie Transcorticale Motrice	Expressive	Brodmann 6, 8-10, 46	Léger à modéré	Léger à modéré
Aphasie Transcorticale Mixte	Expressive	Lobe Frontal inférieur	Léger à modéré	Léger à modéré

TABLE 1.1 – Classification des syndromes aphasiques classiques (HALLOWELL, 2017)

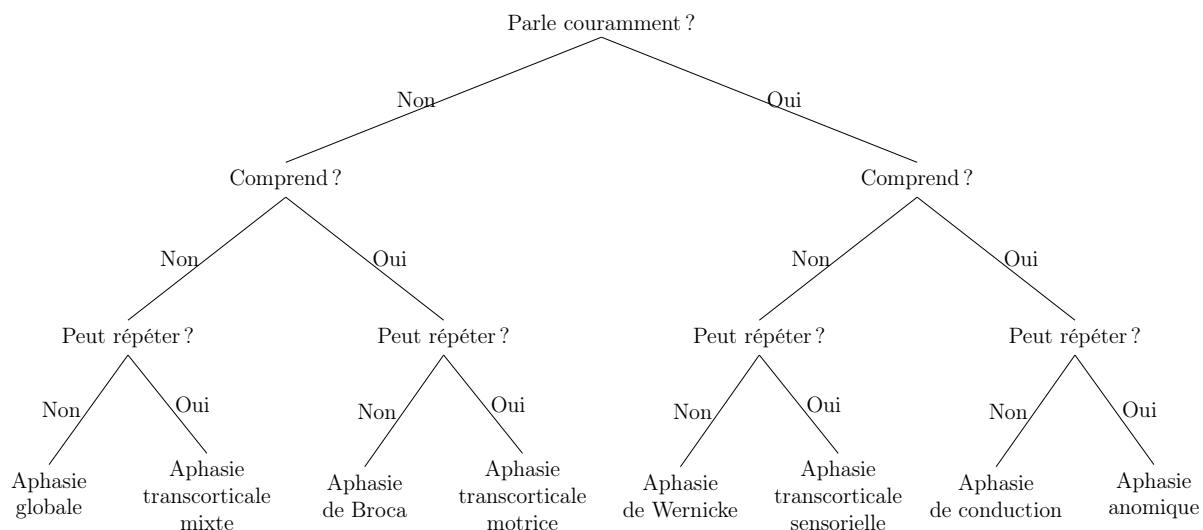


FIGURE 1.4 – Classification des syndromes aphasiques classiques (SREEDHARAN, 2018).

l'aphasie de Broca, est une aphasie expressive. Elle affecte surtout la production du langage. Sa compréhension est généralement préservée. De ce fait, les personnes atteintes de l'aphasie de Broca sont conscientes de leur handicap (CHAPEY, 2008).

1. BRODMANN, 2007.

1.1.3 Causes, prévalence et incidence de l'aphasie

Les AVC sont la première cause d'aphasie (HALLOWELL, 2017). En effet, 30% des individus atteints d'un AVC développent une aphasie (FLOWERS et al., 2016). Parmi ces individus, 43% ont une aphasie de Broca (CNSA, 2015). Étant donné que 13 millions de personnes sont touchées par un AVC chaque année (SMAÏLI et al., 2022), cela représente environ 3.9 millions de cas d'aphasie par an (une incidence d'un peu moins de 0.05%). Inversement, 75% des cas d'aphasie sont causés par un AVC (CNSA, 2015).

Il est difficile d'estimer l'incidence et la prévalence globales de l'aphasie. Ceci est due au manque de données dans la majorité des pays du monde. Cependant, le peu de données disponibles donnent des valeurs consistantes avec le 0.05% estimé ci-dessus. Selon l'association nationale de l'aphasie (« National Aphasia Association », s. d.), 2 millions Américains en souffrent, une prévalence de 0.6%. En France, ce chiffre est de l'ordre de 300000 cas, 30000 desquels sont nouveaux (CNSA, 2015). Ceci donne une prévalence de 0.44% et un taux d'incidence 0.044%.

L'âge est un facteur de risque très important pour les AVC, il l'est donc également pour l'aphasie. En effet, l'âge moyen des individus Français atteints de l'aphasie est 73 ans. 75% parmi eux sont âgés de plus de 65 ans dont 25% dépassent les 80 ans (CNSA, 2015).

1.1.4 Effet de l'aphasie de Broca sur la qualité de vie

Il n'est pas surprenant que l'aphasie ait un impact négatif sur la qualité de vie des individus qui en souffrent. En effet, les individus atteints de l'aphasie ont une moins bonne qualité de vie que les individus en bonne santé selon les critères WHOQOL-BERF² et WPI³ (voir Table 1.2).

<i>Measure</i>	<i>Mean</i>	<i>Range</i>	<i>SD</i>	<i>Mean difference</i>	<i>95% C. I.^a of difference</i>	<i>t(34)</i>
<i>WHOQOL-BREF Transformed total</i>						
NBI participants	108.44	94.00–125.00	10.02			
Aphasic participants	96.11	68.00–124.00	14.05	12.23	4.07–20.60	3.03**
<i>WHOQOL-BREF overall QOL and general health rating</i>						
NBI participants	8.44	6.00–10.00	1.58			
Aphasic participants	7.22	4.00–10.00	1.52	1.22	0.17–2.27	2.37*
<i>PWI total</i>						
NBI participants	36.33	28.00–42.00	3.40			
Aphasic participants	31.72	22.00–41.00	5.90	4.61	1.35–2.87	2.87**

TABLE 1.2 – Comparaison de la qualité de vie chez les individus sains et ceux qui souffrent d'une aphasie (ROSS & WERTZ, 2010).

En particulier, l'aphasie de Broca diminue mesurablement la qualité de vie des individus qu'elle affecte dans toute tâche qui nécessite la communication (PALLAVI et al., 2018). La Table 1.5 le montre bien pour les trois exemples d'activités sociales, confiances en soi et capacité à réaliser ses responsabilités quotidiennes.

2. <https://www.who.int/publications-detail-redirect/WHO-HIS-HSI-Rev.2012.03>

3. <https://www.acqol.com.au/instruments>

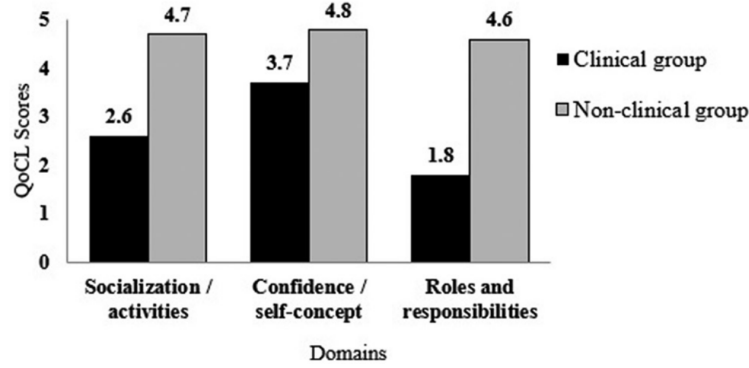


FIGURE 1.5 – Comparaison de la qualité de vie de communication chez les individus sains et ceux qui souffrent de l’aphasie de Broca (PALLAVI et al., 2018).

L’aphasie de Broca est également associée à une augmentation du risque d’hospitalisation et de décès (FLOWERS et al., 2016). Elle est aussi corrélée à un risque accru de maladies mentales, dépression et même tentative de suicide (COSTANZA et al., 2021 ; MORRISON, 2016). Ce dernier point est particulièrement grave en raison du fait que les personnes atteintes de l’aphasie de Broca sont généralement (1) âgées, (2) socialement isolées à cause de leur sentiment d’infériorité et (3) ont du mal à communiquer leur intention de suicide à cause de leur handicap. Il est donc urgent d’intervenir pour mitiger ces risques ainsi que la sévérité des effets qu’a l’aphasie.

1.1.5 Traitement de l’aphasie de Broca

Il n’existe pas de traitement général de l’aphasie de Broca. L’intervention thérapeutique est donc adaptée à chaque patient (ACHARYA & WROTEN, 2022). Un point commun à la plupart des thérapies, est l’utilisation d’exercices orthophoniques pour la rééducation de la parole. Des exemples de tels exercices sont la répétition de phrases, la description d’images et la narration de récits (da FONTOURA et al., 2012). En dépit d’être la méthode la plus efficace dont on dispose, cette approche est très chronophage étant donné que la majorité des patients ne bénéficient que de 1–3 séances par semaine (da FONTOURA et al., 2012). Elle est également coûteuse, avec un coût moyen dans les milliers de dollars par patient (JACOBS & ELLIS, 2021 ; LIU et al., 2021), ce qui la rend très inaccessible. Ces lacunes sont inacceptables dans le contexte des effets dévastateurs de l’aphasie de Broca que nous avons décrits précédemment.

1.2 Traduction automatique

Nous avons établi que les difficultés d’accès aux traitements pour l’aphasie de Broca constituent un risque inadmissible en vue de ses effets potentiellement catastrophiques. Il est donc urgent de trouver des solutions pour y remédier. Une solution automatique à base de MT semble être une piste intéressante à explorer.

1.2.1 Généralités

La MT est une branche du traitement automatique du langage (NLP, de l'anglais : natural language processing). Elle étudie l'utilisation des systèmes informatiques pour traduire le texte ou la parole d'une langue (appelée source) vers une autre (appelée cible) (CHAN, 2015). Dans cette section, nous introduisons la MT du texte pour donner un point de référence aux discussions des chapitres suivants.

1.2.2 Classification

Plusieurs méthodes de MT sont présentées dans la littérature. Ces méthodes peuvent être classées selon les outils mathématiques qu'elles utilisent. On distingue ainsi trois grandes familles de méthodes de MT (YANG et al., 2020) :

1. Des méthodes basées sur des connaissances linguistiques (règles de traduction).
2. Des méthodes basées sur les statistiques.
3. Des méthodes basées sur les réseaux de neurones.

On les appelle respectivement traduction automatique à base de règle (RMBT, de l'anglais : rule-based machine translation), traduction automatique statistique (SMT, de l'anglais : statistical machine translation), traduction automatique neuronale (NMT, de l'anglais : neural machine translation).

À l'intérieur de ces familles, les méthodes peuvent être distinguées en sous-familles. Ceci donne lieu à la hiérarchie représentée par la Figure 1.6

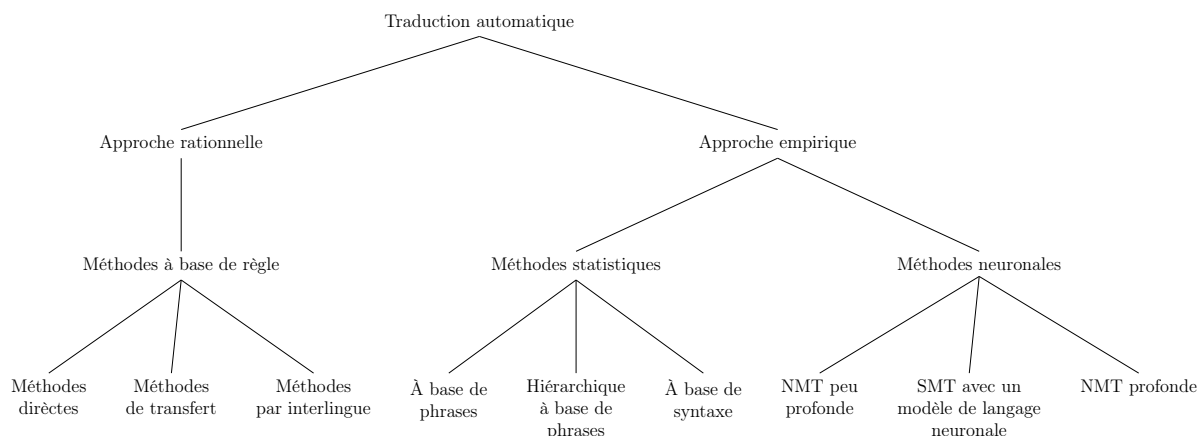


FIGURE 1.6 – Taxonomie des méthodes de traduction automatique (COSTA-JUSSÀ et al., 2016 ; YANG et al., 2020).

Une autre classification récurrente dans la littérature est celle du triangle de Vauquois (voir Figure 1.7). Elle se base sur l'utilisation ou non de représentations intermédiaires des langues. Si la phrase traduite est construite directement à partir de la phrase à traduire, il s'agit de traduction *directe*. Ce paradigme présente deux majeurs inconvénients. Le premier — et le plus évident — est la difficulté de passer directement d'une langue à une

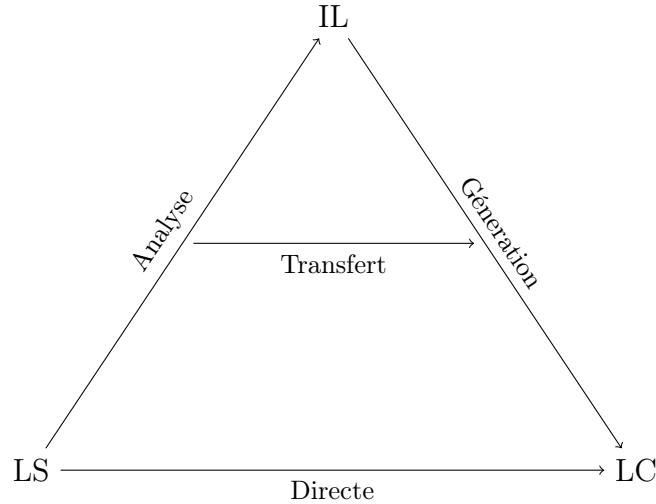


FIGURE 1.7 – Triangle de Vauquois (COSTA-JUSSÀ et al., 2016).

autre. Le deuxième est la scalabilité : pour maintenir la traduction entre n langues, $\frac{n(n-1)}{2}$ couples de fonctions de traduction sont nécessaires (CHAN, 2015).

Les méthodes indirectes se distinguent en méthodes “par transfert”, qui utilisent une représentation intermédiaire dépendant de la langue (par exemple, arbre de syntaxe) et en méthodes “par interlingue”, qui utilisent la même représentation intermédiaire pour toutes les langues. Ce dernier paradigme résout le problème de scalabilité (seulement n couples de traductions sont nécessaires) au coût de construire une interlingue assez riche à représenter toute phrase dans toute langue (CHAN, 2015).

Dans ce travail, nous nous intéressons principalement aux sous arbre droit de la Figure 1.6. En effet, la majorité de notre investigation porte sur son dernier élément (la NMT profonde). Ceci est motivé par l’énorme succès dont le apprentissage profond (DL, de l’anglais : deep learning) a fait preuve dans la dernière décennie (SEBASTIAN & MIRJALILI, 2017).

1.3 Reconnaissance automatique de la parole

L’ASR est une autre branche du NLP. Son but est d’extraire automatiquement d’un signal audio qui représente une parole la représentation textuelle de cette parole (HUANG et al., 2021).

Les méthodes d’ASR peuvent être divisées en méthodes basées sur l’acoustique, méthodes basées sur la reconnaissance de motifs et méthodes basées sur l’intelligence artificielle (voir Figure 1.8).

Comme pour la MT, notre intérêt porte principalement sur les méthodes à base d’intelligence artificielle. Plus spécifiquement sur les méthodes qui utilisent le DL.

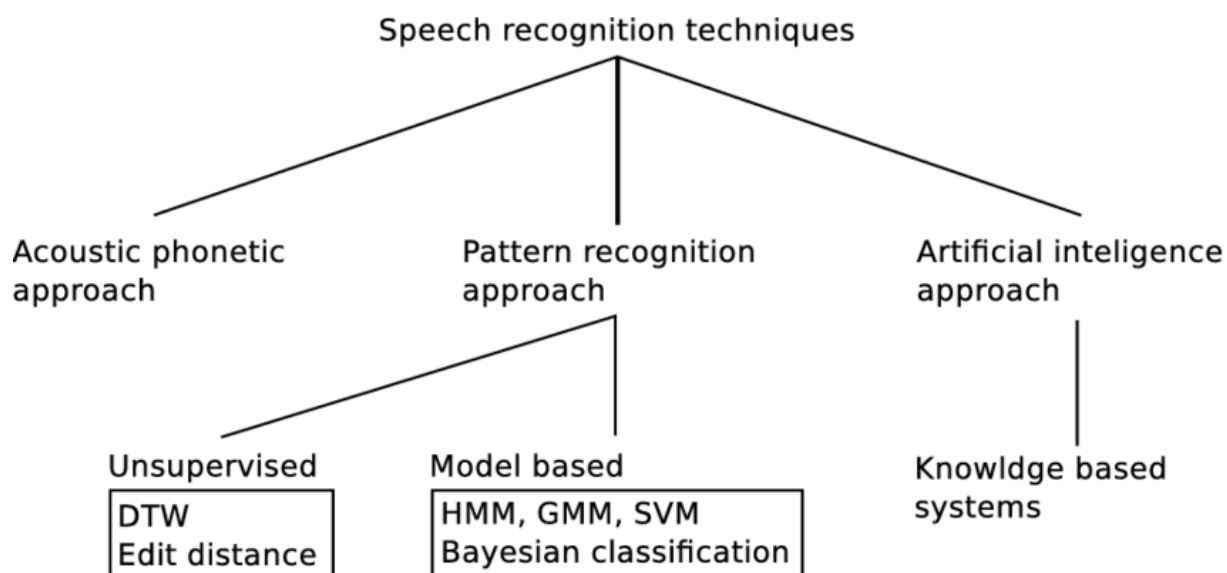


FIGURE 1.8 – Taxonomie des techniques d’ASR (VOLNY et al., 2012).

1.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons introduit l’aphasie en général et l’aphasie de Broca en particulier comme troubles de langage. Nous les avons mis dans le contexte historique et scientifique en présentant leurs causes, portée et conséquences pour les patients qui en souffrent.

Après cela, nous avons discuté les traitements typiquement déployés contre l’aphasie de Broca. En particulier, nous avons discuté le manque d’inaccessibilité et de scalabilité du traitement orthophonique. Un problème que nous avons jugé très grave à cause des conséquences dévastatrices de l’aphasie de Broca.

Pour y remédier, nous avons proposé la création d’une solution informatique. Nous avons décrit son fonctionnement et proposé une architecture possibles pour sa mise en œuvre. Dans les chapitres suivants, nous allons explorer les méthodes possibles pour implémenter notre solution.

Bibliographie

- (s. d.). <https://www.who.int/publications-detail-redirect/WHO-HIS-HSI-Rev.2012.03>
- (s. d.). <https://www.acqol.com.au/instruments>
- ACHARYA, A. B., & WROTEN, M. (2022). Broca Aphasia. In *StatPearls*. StatPearls Publishing. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK436010/>
- ART, S. M. (2013). *English : Functional areas of the brain*. <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Cerveau.jpg>
- BROCA, M. P. (1861). REMARQUES SUR LE SIÈGE DE LA FACULTÉ DU LANGAGE ARTICULÉ, SUIVIES D'UNE OBSERVATION D'APHÉMIE (PERTE DE LA PAROLE), 18.
- BRODMANN, K. (2007). *Brodmann's : Localisation in the Cerebral Cortex*. Springer Science & Business Media.
- CHAN, S.-w. (2015). *Routledge Encyclopedia of Translation Technology*. Routledge, Taylor & amp; Francis Group.
- CHAPEY, R. (2008). *Language Intervention Strategies in Aphasia and Related Neurogenic Communication Disorders*. Wolters Kluwer Health/Lippincott Williams & Wilkins.
- CNSA, C. n. d. s. p. l. (2015). session de sensibilisation. https://www.cnsa.fr/documentation/dossierpressefno_021015_bd.pdf
- COSTA-JUSSÀ, M. R., RAPP, R., LAMBERT, P., EBERLE, K., BANCHS, R. E., & BABYCH, B. (Éd.). (2016). *Hybrid Approaches to Machine Translation*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-21311-8>
- COSTANZA, A., AMERIO, A., AGUGLIA, A., MAGNANI, L., SERAFINI, G., AMORE, M., MERLI, R., AMBROSETTI, J., BONDOLFI, G., MARZANO, L., & BERARDELLI, I. (2021). “Hard to Say, Hard to Understand, Hard to Live” : Possible Associations between Neurologic Language Impairments and Suicide Risk. *Brain Sciences*, 11(12), 1594. <https://doi.org/10.3390/brainsci11121594>
- da FONTOURA, D. R., RODRIGUES, J. d. C., CARNEIRO, L. B. d. S., MONÇÃO, A. M., & de SALLES, J. F. (2012). Rehabilitation of language in expressive aphasias : a literature review. *Dementia & Neuropsychologia*, 6(4), 223-235. <https://doi.org/10.1590/S1980-57642012DN06040006>
- FLOWERS, H., SKORETZ, S., SILVER, F., ROCHON, E., FANG, J., FLAMAND-ROZE, C., & MARTINO, R. (2016). Poststroke Aphasia Frequency, Recovery, and Outcomes : A Systematic Review and Meta-Analysis. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 97, 2188-2201. <https://doi.org/10.1016/j.apmr.2016.03.006>
- FODOR, J. A. (1983). *The Modularity of Mind* [Google-Books-ID : 0vg0AwAAQBAJ]. MIT Press.
- HALLOWELL, B. (2017). *Aphasia and Other Acquired Neurogenic Language Disorders : A Guide for Clinical Excellence*. Plural Publishing.

- HUANG, W.-C., HAYASHI, T., WU, Y.-C., KAMEOKA, H., & TODA, T. (2021). Pretraining Techniques for Sequence-to-Sequence Voice Conversion. *IEEE/ACM Transactions on Audio, Speech, and Language Processing*, 29, 745-755. <https://doi.org/10.1109/TASLP.2021.3049336>
- JACOBS, M., & ELLIS, C. (2021). Estimating the cost and value of functional changes in communication ability following telepractice treatment for aphasia. *PLOS ONE*, 16(9), e0257462. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0257462>
- JDIFOOL, t. p., Mysid. (2006). *Français : Les principaux lobes du cerveau, vue latérale gauche. Inspiré de la figure 728 de Gray's Anatomy*. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Brain%5C_diagram%5C_fr.svg
- LAROUSSE. (s. d.). <https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/aphasie/4448>
- LIU, Z., HUANG, J., XU, Y., WU, J., TAO, J., & CHEN, L. (2021). Cost-effectiveness of speech and language therapy plus scalp acupuncture versus speech and language therapy alone for community-based patients with Broca's aphasia after stroke : a post hoc analysis of data from a randomised controlled trial. *BMJ Open*, 11(9), e046609. <https://doi.org/10.1136/bmjopen-2020-046609>
- LOPES, M. (2019). O paciente "Tan". <https://www.astropt.org/2019/05/02/o-paciente-tan/>
- LORCH, M. (2011). Re-examining Paul Broca's initial presentation of M. Leborgne : Understanding the impetus for brain and language research. *Cortex*, 47(10), 1228-1235. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2011.06.022>
- MOHAMMED, N., NARAYAN, V., PATRA, D. P., & NANDA, A. (2018). Louis Victor Leborgne ("Tan"). *World Neurosurgery*, 114, 121-125. <https://doi.org/10.1016/j.wneu.2018.02.021>
- MORRISON, M. (2016). I would tell you if I could : Language loss, depression, and the challenge of treating patients with aphasia. 8(1). *National Aphasia Association*. (s. d.). <https://www.aphasia.org/>
- Noyaux gris centraux. (s. d.). <https://www.msdmanuals.com/fr/professional/multimedia/figure/noyaux-gris-centraux>
- PALLAVI, J., PERUMAL, R. C., & KRUPA, M. (2018). Quality of Communication Life in Individuals with Broca's Aphasia and Normal Individuals : A Comparative Study. *Annals of Indian Academy of Neurology*, 21(4), 285-289. https://doi.org/10.4103/aian.AIAN_489_17
- ROSS, K., & WERTZ, R. (2010). Quality of life with and without aphasia. *Aphasiology*. <https://doi.org/10.1080/02687030244000716>
- SCIENCES, N. A. o., MEDICINE, I. o., & ACKERMAN, S. (1992). *Discovering the Brain* [Google-Books-ID : 3ypUq9nuncQC]. National Academies Press.
- SEBASTIAN, R., & MIRJALILI, V. (2017). *Python Machine Learning : Machine Learning and Deep Learning with Python, scikit-learn, and TensorFlow* (2^e éd., T. 1). Packt Publishing.
- SMAÏLI, K., LANGLOIS, D., & PRIBIL, P. (2022). Language rehabilitation of people with BROCA aphasia using deep neural machine translation. *Fifth International Conference Computational Linguistics in Bulgaria*, 162.
- SREEDHARAN, S. (2018). *REAL-TIME FMRI BASED NEUROFEEDBACK FOR REHABILITATION OF POST-STROKE PATIENTS WITH APHASIA* (thèse de doct.). <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.10868.37760/1>
- VOLNY, P., NOVAK, D., & ZEZULA, P. (2012). Employing Subsequence Matching in Audio Data Processing.

YANG, S., WANG, Y., & CHU, X. (2020). A survey of deep learning techniques for neural machine translation. *arXiv preprint arXiv :2002.07526*.