

Quel programme de recherche en mathématique et phonologie ?

Gabriel Bergounioux, Maïtine Bergounioux, Noël Nguyen, Sophie Wauquier

▶ **To cite this version:**

Gabriel Bergounioux, Maïtine Bergounioux, Noël Nguyen, Sophie Wauquier. Quel programme de recherche en mathématique et phonologie ?. Mathématiques et Sciences Humaines, 2007, pp.9-26. hal-01019989

HAL Id: hal-01019989

https://univ-paris8.hal.science/hal-01019989

Submitted on 7 Nov 2016

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Math. Sci. hum ~ Mathematics and Social Sciences (45e année, n° 180, *2007*(4), p. 9-26)

QUEL PROGRAMME DE RECHERCHE EN MATHÉMATIQUE ET PHONOLOGIE ?

Gabriel BERGOUNIOUX[1], Maïtine BERGOUNIOUX[2],
Noël NGUYEN[3], Sophie WAUQUIER[4]

RÉSUMÉ – *Nous proposons un état des lieux, à la fois dans les interrogations actuelles que soulève la rencontre des deux disciplines et dans l'histoire de leurs relations, depuis les propositions fondatrices de Troubetzkoy jusqu'à aujourd'hui. Il se conclut par une réflexion sur le défi que constitue pour la mathématique la confrontation à un objet qui lui est peu familier et sur les clivages qui mettent à l'épreuve les capacités d'analyse et de modélisation (langage vs. langues, forme mentale vs. forme symbolique, signal vs. écriture galiléenne).*

MOTS-CLÉS – Algèbre , Cognitivisme, I-language, Mathématiques, Phonologie, Topologie

ABSTRACT – What kind of research project for mathematics with phonology?
We provide a discussion of the state of the art of current inquiries both in Linguistics and in Mathematics and describe the relation that has existed between these disciplines since Troubetzkoy's proposal. In particular, we emphasize the challenge it has been for Mathematics to include Phonology as one of its objects.

KEYWORDS – Algebra , Cognitivism, I-language, Mathematics, Phonology, Topology

INTRODUCTION

Le point de départ de notre réflexion pourrait se ramener à cette question : les mathématiques et la phonologie présentent-elles, dans leur développement séparé, une compatibilité de leurs méthodes qui pourrait s'avérer, à terme, aussi heuristique que l'ont été, depuis plusieurs siècles les mathématiques pour la physique, par exemple ? Peut-on imaginer une révision des concepts de la phonologie par un emprunt aux mathématiques de nouvelles formes d'écriture et de traitements ?

[1] Centre Orléanais de Recherche en Anthropologie et Linguistique (CORAL), UFR LLSH, Université d'Orléans, 10 rue de Tours, BP 46527, 45065 Orléans cedex 2, gabriel.bergounioux@univ-orleans.fr
[2] Mathématiques et Applications, Physique Mathématique d'Orléans (MAPMO), UMR 6628 CNRS, Fédération Poisson, Université d'Orléans, BP 6759, 45067 Orléans cedex 2,
maitine.bergounioux@wanadoo.fr
[3] Laboratoire Parole et Langage (LPL), UMR 6057 CNRS, Université de Provence, 29 av. R. Schuman, 13621 Aix-en-Provence cedex 1, noel.nguyen@lpl.univ-aix.fr
[4] Structures Formelles du Langage, UMR 7023 CNRS, Université Paris 8, 2 rue de la Liberté 93526 Saint-Denis cedex 02, sophie.wauquier@univ-paris8.fr

Réciproquement, on se demandera à quelle épreuve se trouveraient soumises les mathématiques s'il leur fallait inclure, au nombre des objets et des opérations sur lesquels elles ont fait la preuve de leur efficience, ceux conçus par les phonologues ? Il n'est pas sûr que, d'un côté ou de l'autre, le défi à relever soit moindre. Il est concevable que chaque communauté éprouve les mêmes réticences, ou les mêmes appréhensions à se lancer dans l'aventure, encore que l'obstacle principal au rapprochement se trouve probablement dans la disparité des thèmes et des approches, dans la séparation des cursus universitaires aussi.

Pourtant, phonologie et mathématiques sont deux types d'écritures formalisées et c'est à ce niveau qu'on pourrait chercher dans les mathématiques une réponse à la question des représentations, voire une modélisation des processus phonologiques par le recours éventuel à la notion « d'opération ».

1. SITUATION DE LA PHONOLOGIE

1.1 UNE DÉFINITION PAR LA NÉGATIVE

La phonologie correspond à des pratiques et des théories si différentes que la seule caractérisation qui en peut être faite serait négative. Disant ce qu'elle n'est pas, on dessinerait les limites au-delà de quoi elle cesse d'être elle-même.

D'une part, la phonologie ne se ramène pas à une sophistication (ou à une mise en forme) des études de biomécanique ou d'interprétation du signal. La phonologie de laboratoire, qui entend déduire des raffinements de l'instrumentation, de la croissance des capacités de calcul et de la multiplication des expériences la structure sonore abstraite des langues s'inscrit dans la suite d'une défiance à l'encontre de la phonologie « symbolique » dont les prémisses ont accompagné l'émergence de la phonologie (cf. le débat Stetson vs. Bühler au Congrès des sciences phonétiques à Londres en 1935[5]). La phonologie postule une discontinuité entre ce qui se calcule ou se transcrit à partir des signaux – *a fortiori* à partir des figurations articulatoires –, et le registre de ses notations, qu'il s'agisse des relations, des combinaisons ou des transformations. À l'opposé d'une « phonétique phonologique » ancrée dans la substance, qui rend la restitution des processus solidaire des déterminants physiques ou physiologiques, on postule le caractère transcendant de relations qui demeurent inaccessibles à une observation de surface, si affûtée qu'elle soit. À ce titre, la phonologie ne relève pas d'une démarche strictement inférentielle.

D'autre part, la phonologie présente un mode d'existence spécifique dans les faits psychiques. La discipline (la phonologie comme science relevant de la linguistique) et l'organisation mentale du signifiant (l'existence d'une phonologie du locuteur-auditeur) sont des homonymes. De la communauté de dénomination ne se déduit pas leur équivalence. La phonologie au sens 2, qui est à compter au nombre des processus mentaux, est-elle identique à celle que le phonologue représente, décrit ou symbolise, comme analyse de processus linguistiques et construction de système ? La question émerge à partir du moment où une conception synchronique (la linguistique structurale) renouvelle les interrogations de la grammaire historique, la compétence du linguiste et celle du locuteur étant identiques. Comme la pierre de touche de la grammaire chomskienne s'est instituée à partir du jugement de grammaticalité qui, d'être réflexif, porte à la conscience de celui qui le prononce les principes de ses énoncés, devrait-on

[5] Troubetzkoy, 2006, lettre 149.

conjecturer un jugement de « phonologicité », élaboré dans les mêmes conditions et avec les mêmes objectifs ? L'importance des variations admises dans les réalisations ne se prête pas à des jugements si catégoriques.

Quoi qu'il en soit, la phonologie au sens 2 est irréductible à tout autre phénomène cognitif. Si l'on peut trouver, dans les actes de reconnaissance ou de classement, des conduites apparentées à ce que produisent les opérations linguistiques, le degré d'abstraction et d'organisation de la phonologie ne semble avoir aucun équivalent dans la constitution symbolique d'un palier de traitement (d'un *module*, selon certaines écoles). Elle ne saurait constituer une des réalisations, tardivement spécifiée, d'une cognition indifférenciée qui, à son tour, trouverait son explication dans des mécanismes biologiques, suivant une démarche radicalement axiomatique.

2. MATHÉMATIQUES ET PHONOLOGIES : QUELQUES RENCONTRES

2.1 DISSYMÉTRIE

Les phonologues s'inscrivent dans une démarche formalisante. Les raisonnements sont fondés sur des règles (qu'une tradition antérieure désignait comme des « lois ») ou des contraintes. La terminologie ne recule pas devant l'emprunt de ses entrées aux mathématiques (qu'on pense aux « matrices » de traits). Il y a, dans le matériel traité, du quantifiable : le ratio des voyelles et des consonnes dans la chaîne, la sur-représentation et la sous-représentation de certaines structures de distribution phonologiques en typologie des langues… L'hypothèse qu'il y aurait du numérisable s'en déduit.

C'est la raison pour laquelle des phonologues ont pu considérer avec intérêt les apports potentiels des mathématiques sans qu'on note dans ce domaine un dialogue équivalent à celui qui a pu être noué, de façon heuristique, avec la lexicométrie, la morphologie, la syntaxe… Ces disciplines étaient concernées au premier chef par le développement de l'informatique, l'écriture de langages algorithmiques et les applications de l'intelligence artificielle au langage. Elles avaient en partage de traiter des chaînes de caractères et de délaisser le versant sonore des langues.

De leur côté, les mathématiciens, accoutumés à collaborer avec de nombreuses disciplines des sciences, n'ont guère apporté aux phonologues qui manquaient de compétences pour faire leur propre marché. Pour autant, on ne peut ignorer ce qui est advenu dans cette direction. Sans prétention à l'exhaustivité, on rappellera quelques tentatives et leur issue, à titre de premier inventaire de ces « reconnaissances » opérées sur la frontière entre les deux domaines.

2.2 ZIPF ET LA PSYCHOBIOLOGIE : LES STATISTIQUES

George Kingsley Zipf (1902-1950) a suivi une formation de linguistique comparée. Son Ph D, soutenu en 1930, a pour titre « La fréquence d'emploi considérée en tant que facteur déterminant des changements phonétiques dans l'évolution du langage ». Pour situer sa perspective, on citera quelques lignes de la préface, rédigée en 1934, de *La psychobiologie du langage – Une introduction à la philologie dynamique* paru en 1935 :

> *On peut démontrer, par exemple, que la longueur d'un mot, loin d'être un effet du hasard, est étroitement liée à la fréquence de son usage : plus grande est la fréquence, plus petit est le mot. On peut également montrer, à partir de sons, de racines et d'affixes, de mots ou de phrases, que plus un élément du langage est phonétiquement complexe, moins il apparaît fréquemment. Pour*

> *illustrer la remarquable régularité avec laquelle les forces linguistiques opèrent la distribution de fréquence des mots en anglais peut être valablement citée.* [Zipf, 1974 (1935), p. 13]

On aura reconnu la loi de Zipf. En dépit de l'influence de cet ouvrage dans le champ de la lexicométrie, son application est surtout à chercher du côté du son : la moitié de l'ouvrage est consacrée en réalité aux phonèmes, en particulier les occlusives, au changement phonétique et à l'accent. Ce travail se donne pour pré-requis la capacité à identifier les propriétés des unités phonologiques d'une langue donnée :

> *Notre principal problème dans l'étude de la dynamique des formes et du comportement des phonèmes est de trouver un système permettant de comparer quantitativement les phonèmes*. (*Ibid*., p. 57)

Reprenant sur ce point les propositions de Bloomfield, Zipf propose la définition suivante :

> *Chaque phonème peut être considéré comme un ensemble ou une configuration de sous-gestes articulés dans un arrangement séquentiel.* (*Ibid.,* p. 58)

Le phonème est donc pour Zipf une combinaison d'éléments simples qui se suivent dans le temps (l'exemple de l'occlusive s'impose de lui-même pour la netteté de sa successivité). Au terme d'une étude conduite sur le chinois (pékinois et cantonais), le danois et le birman, Zipf avance cette conclusion :

> *Jusqu'à preuve du contraire, il semble plausible de supposer que le degré de complexité d'un phonème est une relation inverse (mais pas obligatoirement proportionnelle) de sa fréquence relative d'occurrence, évidence fondée toutefois sur les seuls résultats de deux types de phonèmes, les occlusives aspirées et non aspirées sonores.* (*Ibid.*, p. 67)

La même démonstration est reconduite qui déduit que les sourdes, moins complexes (elles comportent un geste sonore de moins), sont plus fréquentes que les sonores. Le raisonnement, appliqué à la loi de Grassmann[6] et généralisé à l'ensemble des changements phonétiques, aboutit à une représentation qui correspond à une courbe de Gauss (*Ibid*., 84n).

Une tentative de donner une définition algébrique des phénomènes apparaît dans le paragraphe consacré à l'équilibre des systèmes accentuels :

> *Dans cet état d'équilibre, il semble que l'on puisse isoler quatre facteurs déterminants :*
> *(1) la fréquence relative (**F**),*
> *(2) le degré d'intensité de l'accent (**A**),*
> *(3) le degré de cristallisation de la configuration (**C**) < = le degré de figement de la composition morphologique > et*
> *(4) le degré de précision de la signification (**M**) < = possibilité de fournir une paraphrase univoque du morphème >.*
>
> *Le rapport entre ces quatre facteurs semble être le suivant : **A** (l'accent) et **M** (la signification) sont en relation inverse de **F** (la fréquence) et **C** (la cristallisation). On peut représenter le phénomène par la formule **FACM** = **K** (constant) (...).* (*Ibid.*, p. 129)

[6] La loi de Grassmann concerne l'haplologie, essentiellement en sanskrit et en grec. Elle décrit la réduction, en cas de consécution de deux aspirées, de l'une (la première en grec) à sa forme non aspirée correspondante (cf. dans les formes à redoublement : *tithêmi*).

Les démonstrations de Zipf représentent une double intersection entre théorie phonologique (marquée par la tradition de la grammaire historique et le behaviorisme bloomfieldien) et mathématiques : d'une part, du côté des statistiques, de l'autre, du côté d'une algébrisation des résultats. « Tâchez de lire le livre extrêmement intéressant de Zipf *Psychobiology of Language* (en anglais) », c'est le conseil que donne Troubetzkoy à la fin de sa lettre du 25 mai 1936 à Jakobson[7].

2.3. CRYPTOGRAPHIE ET CHIFFREMENT : SCHMIDT, TURING ET LA THÉORIE DE L'INFORMATION[8]

Il n'est pas si évident d'établir une relation entre la phonologie et la cryptographie. Dans son ouvrage pionnier, *La langue et les mathématiques*, écrit en 1933 mais publié seulement en 1987, Hermann Schmidt esquive à deux reprises une interrogation sur la phonologie. Une première fois, quand il déclare écarter de ses études les strates inférieures au mot parce qu'il requiert, pour manipuler les éléments, une part de signification[9]. Une deuxième fois, quand il entend préserver la dimension « sensible », « appréhendée par les sens », de la langue :

> *La tâche consiste davantage à représenter mathématiquement l'ordre du sensible, l'ordre des éléments appréhendés par les sens, c'est-à-dire les mots, le découpage des suites de mots en phrases, groupes de phrases, paragraphes et unités supérieures, sans qu'ainsi l'on ne vide de sens le sensible, l'on ne mécanise l'organique et l'on ne tue le vivant.*

Entre le signal et la représentation sémantique, la dimension strictement phonologique se trouvait résorbée.

Pour autant, ce qui est validé au niveau du lexique a son correspondant dans les chaînes de caractères d'une langue alphabétisée. Entre l'orthographe (qui constitue une notation conventionnelle et imparfaite de la réalisation phonique) et la phonologie interne d'une langue, il existe une relation qui, pour complexe qu'elle soit, n'empêche pas que quelque chose de la phonologie se trouve saisi. Le déploiement des systèmes vocalique et consonantique, la fréquence relative des unités, les concaténations possibles et impossibles, la longueur des chaînes intéressent également, pour des raisons différentes, la cryptographie et la phonologie.

C'est par la cryptographie qu'A. Turing (1912-1954) a pu compter, même si c'est de façon lointaine, dans le domaine. Il a suivi des études de logique et de mathématiques et le point de départ de ses réflexions concerne la question de la calculabilité à quoi il a consacré sa thèse soutenue en 1938 auprès d'Alan Church : *Sur les nombres calculables, application à l'Entscheidungsproblem*. Le lien entre longueur et complexité des calculs n'est pas sans homologie avec les conclusions de Zipf. Turing a rejoint l'Angleterre dès la déclaration de guerre pour participer à l'effort de défense nationale et il a été intégré au Government Code & Cypher School. Si le rapprochement entre les mathématiques et la cryptanalyse est constamment cité pour le rôle qu'aurait

---

[7] Troubetzkoy, *op. cit.* Cf. aussi ce commentaire joint à une bibliographie raisonnée (lettre du 19 janvier 1938) : « De nombreuses idées stimulantes sur la statistique phonématique ; même si les théories de l'auteur sont la plupart du temps hâtives et fausses, le livre du jeune et talentueux auteur est un travail méritoire ».

[8] Ce paragraphe doit beaucoup à Segal, J. [2003] *Le Zéro et le Un*, Syllepse. Les citations de Schmidt sont extraites de ce livre.

[9] Cf. aussi Mandelbrot (cité in Segal : 415n) : « Le mot constitue un morceau naturel d'information adapté au codage arithmétique ».

joué Turing dans l'émergence de l'intelligence artificielle et la conception des machines informatiques, ses recherches ont eu aussi quelques répercussions en phonologie[10].

Si le symbolisme phonologique ne se réduit pas à la manipulation des « chiffres » à laquelle le codage a affaire, il se produit sur deux plans distincts, mais probablement homologues, une appréhension comparable d'unités de type alphabétique qui se prêtent à un certain nombre d'opérations dont les règles et la validité dépendent strictement des propriétés qu'on attribue aux éléments définis comme pertinents dans le système reconstruit.

2.4. GRAMMAIRE SYMBOLIQUE ET CALCUL MENTAL : L'APPORT CENTRAL DE LA GRAMMAIRE GÉNÉRATIVE

2.4.1. *L'axiomatisation des structures mentales*

La Grammaire générative s'inscrit au sein de la « Révolution cognitive », directement dans la mouvance de la théorie de l'information et d'une métaphore informatique de l'esprit humain conçu comme une boîte noire (i.e. un disque dur interne) dont le linguiste a la charge de découvrir à la fois l'organisation structurelle interne et les principes opératoires qui permettent de générer des énoncés bien formés. Elle a, par conséquent, fait de l'horizon mathématique un objet de spéculation centrale et ce, dès ses débuts.

À cela s'ajoute un défi intellectuel supplémentaire lié à la dimension psychologique revendiquée de la grammaire. La formulation spécifique du réalisme cognitif telle qu'elle a été proposée par Chomsky [Carr, 2000 ; Laks, 2005], en instaurant une isomorphie totale entre grammaire du locuteur et grammaire du linguiste, installe en effet une définition de la grammaire – et ce faisant de la phonologie – floutant systématiquement la distinction que nous avons installée (cf. *supra* 1.1) entre phonologie symbolique et phonologie psychologique.

Alors qu'avant Chomsky, avaient été proposées explicitement des formulations cognitives de la grammaire [Hockett, 1948], du signe linguistique [Saussure, 1966] et du phonème en particulier [Sapir, 1933], reposant sur une axiomatisation des contenus phonologiques ramenés à un nombre fini de formes minimales, dans tous les cas aucune isomorphie de principe (à l'exception peut-être de Sapir) n'avait été posée qui ramenait la grammaire du locuteur à celle du linguiste en les traitant au même niveau de réalité. Avec la grammaire générative et dès *Aspects*, le terme de « grammaire » devient de fait systématiquement et délibérément polysémique et « ambigu », désignant tout à la fois l'objet construit par le linguiste analysant la structure d'une langue et l'objet mental appris par l'enfant et manipulé par le locuteur-auditeur :

> *Nous employons le terme « grammaire » pour désigner à la fois le système de règles représenté dans le cerveau du locuteur-auditeur, système acquis normalement dans la petite enfance et utilisé dans la production et l'interprétation des énoncés, et la théorie que le linguiste construit en tant qu'hypothèse concernant la grammaire intériorisée réelle du locuteur-auditeur.* [Chomsky, Halle, 1968, p. 26]

Ceci donne, en principe, un statut directement cognitif et neurologique à tout formalisme linguistique établi sur la base de l'observation des données produites et des comportements d'un locuteur. Ceci suppose donc, plus ou moins implicitement, que les

[10] Cf. aussi les interrogations de Shannon sur l'influence du nombre de symboles sur la longueur du programme d'un calcul donné (1956).

objets phonologiques définis par la théorie (par exemple des phonèmes, des syllabes, des éléments) sont simultanément des objets linguistiques *et* psychologiques.

Cette posture épistémologique contraint bien évidemment la conception de la formalisation possible de la composante phonologique du langage ainsi que la conception des relations entre mathématiques et phonologie qui en découle. La théorie doit, en effet, ultimement pouvoir rendre compte d'un fonctionnement mental conçu comme une manipulation syntactico-logique, calculatoire et algorithmiquement réglée de représentations symboliques hautement structurées.

Pour toutes les propositions théoriques qui ont, depuis les années soixante, tenté de mettre en œuvre ces principes (*SPE*, phonologie naturelle, phonologie multilinéaire, phonologie lexicale, phonologie du gouvernement, TCRS, théorie de l'optimalité) au sein du paradigme génératif, les mathématiques vont donc constituer un double horizon théorique en ce qu'elles apportent à la fois une théorisation possible

1. des symboles phonologiques (un horizon formel pour la théorisation des représentations), démarche déjà entreprise par le structuralisme est-européen,
2. du calcul s'appliquant à ces symboles en vue de la génération des suites bien formées. Cet aspect étant ce qui distingue principalement la phonologie générative de ses devancières.

Selon les périodes et les modèles, les débats se sont centrés davantage sur le premier aspect (la phonologie comme une théorie des représentations, comme c'est le cas par exemple de la phonologie plurilinéaire, ou de la géométrie des traits) ou sur le second (la phonologie comme une théorie des calculs ou procédures algorithmiques s'appliquant aux représentations, comme c'est le cas par exemple de *SPE* ou de la théorie de l'optimalité (pour une synthèse, cf . [Anderson, 1985, 1])). Mais, dans tous les cas, cependant, on a voulu attribuer à la formalisation un rôle *heuristique*[11].

2.4.2 *Une théorie du symbole*

Quel que soit le cadre théorique considéré, les modélisations phonologiques proposées dans le paradigme génératif se trouvent dans l'obligation non plus de décrire seulement la structure des énoncés observables, mais de proposer, à partir des données produites, un modèle de « la grammaire » interne (*I-language* : *internal*, *individual*, *intensional*), c'est-à-dire un modèle des représentations mentales qu'utilise un locuteur-auditeur.

Il est impossible ici de résumer la somme de débats qu'ont suscités les questions liées à la forme exacte et nécessaire des représentations, à leur adéquation théorique, à leur degré d'abstraction, à la nature des objets principiels à partir desquels elles s'élaborent (pour une synthèse, cf. [Scheer, 2004] ; pour une revue historique de la question, cf. [Anderson, 1985]). Mais, de manière générale, les modélisations retenues se fondent toutes sur l'idée centrale d'un « hardware » mental, une structure cognitive « sous-jacente » constituée de primitives

1. de diverses natures (traits, éléments, segments, syllabes, positions syllabiques, squelette),
2. universelles ou formulables en termes d'universaux,
3. invariantes et stables, insensibles à leur contexte de réalisation et indépendantes de leurs modes de production / perception,

[11] Ainsi de la théorie de la spécification contrastive qui, dans l'hypothèse d'un système de traits binaires, était censée répondre à la question de la marque structurale (pourquoi tel phonème est-il plus ou moins « compliqué » qu'un autre ?) ; ainsi, dans le domaine du calcul, de la conjecture de Kiparsky [1982] sur la tendance de la grammaire / du locuteur à réduire le degré d'opacité des dérivations.

4. réduites autant que possible à leur expression la plus simple et élégante et, de ce fait, réductibles, quand elles sont complexes, à la somme des primitives dont elles sont composées.

À ce titre, on retrouve dans la définition de ces objets des caractéristiques qui peuvent être ramenées à la définition du symbole comme élément constitutif d'une théorie mathématisée (par exemple : *x*, *y*, +, α). On peut ainsi considérer qu'une position syllabique telle que « noyau » ou une classe naturelle telle que « liquide » vont se définir effectivement dans ce type d'approche à partir des caractéristiques listées ci-dessus (universalité, invariance, simplicité) de façon largement indépendante des contenus phonétiques substantiels qui leur correspondent dans les observables linguistiques, et d'abord et essentiellement par leur rôle structurel et fonctionnel, ainsi que par les algorithmes, calculs et opérations auxquels ils peuvent être soumis. La nécessité de poser un noyau vide est souvent dictée bien plus par les caractéristiques et le comportement de son environnement que par l'observation expérimentale d'un quelconque vocoïde par le phonéticien ; s'il existe une classe de « liquides », cela tient au moins autant à la solidarité comportementale de ses membres qu'à des caractéristiques phonétiques communes au caractère passablement vague (le « *r* » du français est aujourd'hui le plus souvent… une fricative, parfois dévoisée ; il n'en reste pas moins, aujourd'hui, la liquide qu'il était déjà alors qu'on le prononçait comme une vibrante apico-alvéolaire à l'époque de Molière).

2.4.3 *Une théorie procédurale*

S'inscrivant explicitement dans une tradition rationaliste directement héritée de Platon, Leibniz, Kant et très explicitement de Descartes [Chomsky, 1966], le paradigme génératif instaure en linguistique et par conséquent en phonologie un dualisme forme / substance opposant la grammaire interne (*I-language* symbolique, forme sous-jacente) à ses réalisations physiques (formes de surface en tant qu'objet produit ou objet perçu) et supposant qu'ils sont de nature intrinsèquement différente.

À côté de la théorie des représentations doit alors s'élaborer une théorie des règles, processus, procédures qui permettent de relier deux niveaux de représentations différents d'un même objet dont l'un engendre l'autre. Cela signifie que la représentation de surface observable se déduit et résulte d'un certain nombre de calculs, opérations (règles de réécriture des modèles sériels ou effets de principes généraux dans les modèles configurationnels), procédures (d'évaluation des « candidats » dans la théorie de l'optimalité) s'appliquant de manière logique aux formes sous-jacentes dans le premier cas (*input-based models*), à un ensemble de formes de surface virtuelles dans le second (*ouput-based models*).

Il n'est pas plus possible que précédemment de résumer tous les débats internes et externes à la grammaire générative concernant la nature des opérations permettant, étant donnée une forme sous-jacente, de dériver la représentation de surface ; l'opposition entre règles ordonnées et « no-rule approaches », entre règles et contraintes ; ni la place respective qu'il faut, dans la théorie, attribuer à la dimension représentationnelle ou procédurale du modèle.

Pour ce qui nous occupe, le point important est que, dans tous les cas, les modèles qui se sont attachés à formaliser explicitement la composante procédurale de la grammaire trouvent dans les mathématiques, là encore, des outils conceptuels. Ces procédures, qu'elles soient formulées en termes de règles ou de compétitions de contraintes, manifestent une organisation sérielle (ordre des règles, ranking des contraintes), un principe calculatoire visant à éviter la surgénération et fondé sur:

- un ordonnancement de type dérivationnel manifestant une logique calculatoire déclinée en étapes successives et respectant un principe d'économie (les règles les plus générales possibles) et de calcul (les règles doivent être exactement ordonnées et rendre compte de l'ordre dérivationnel le plus logique),
- une compétition de candidats manifestant l'optimalisation du mapping entre forme sous-jacente et forme de surface et respectant également un principe d'économie (le moins de violations de contraintes possibles).

On peut donc considérer, pour conclure que la grammaire générative concevant la phonologie d'abord comme une I-phonologie, calculée mentalement en temps réel par le sujet parlant, donne une conception sinon axiomatique et mathématique de la phonologie, du moins axiomatisable et mathématisable. Ce faisant, elle tente, depuis cinquante ans et de manière parfois assez réussie de capturer ce qui dans les phénomènes empiriques observés manifeste ce qu'on pourrait considérer comme une *double systématicité des systèmes phonologiques humains* : une économie structurale des représentations et une régularité assez remarquable des processus. Et ce même si, au-delà de l'emploi sporadique de quelques symboles directement empruntés aux mathématiques (la variable α dans *SPE* par exemple), les mathématiques semblent être utilisées, dans la plupart des théories, comme projection métaphorique plutôt que comme un langage dans lequel s'énoncent directement les formalismes.

2.5 DU CONTINU AU DISCRET : APPORTS DE LA THÉORIE DES SYSTÈMES DYNAMIQUES

Les travaux dont nous allons donner à présent un aperçu très succinct s'inscrivent dans une perspective un peu différente de celle que nous avons adoptée dans les sections précédentes. L'un de ces points de divergence concerne la place attribuée en phonologie à ce que Pierrehumbert, Beckman et Ladd [Pierrehumbert, Beckman, Ladd, 2000] appellent les *mathématiques du continu* (*continuous mathematics*). Dans cet article majeur sur les fondements de la phonologie de laboratoire, Pierrehumbert, Beckman et Ladd font remarquer que si la formalisation en linguistique, et à l'intérieur de celle-ci, en phonologie, s'est longtemps appuyée sur des mathématiques discrètes, sous l'impulsion de Chomsky et avant lui de Zellig Harris. Cette approche consistant à poser une sorte de relation intrinsèque et exclusive entre phonologie et mathématiques discrètes est remise en question par différents auteurs à l'orée du XXI^{e} siècle:

> *The relevance of continuous mathematics tools for the classical question of phonology ('What is a possible language sound system') is shown by work on phonetic grounding of phonology, by work on the role of statistical knowledge in adult phonological competence, and by work on the development of phonology in the child. There are thus both continuous and discrete aspects to the problems presented by language sound structure, even at the level of phonotactics and morphophonological alternations. We do not understand why most work in generative phonology declines to employ the tools of continuous mathematics.* [Pierrehumbert *et al.*, 2000, p. 278].

[Pierrehumbert, 2004 ; Goldsmith, 2007, et présent numéro], ou encore Peperkamp et ses collaborateurs [Le Calvez *et al.*, présent numéro ; Peperkamp, 2006], font ainsi partie de ceux qui en phonologie exploitent aujourd'hui les outils offerts par les « mathématiques du continu », en cherchant à caractériser dans un cadre probabiliste la structure des systèmes phonologiques et la façon dont s'opère l'acquisition de la phonologie chez l'enfant.

Dans un ouvrage profondément novateur, Petitot [Petitot, 1985] déjà prenait ses distances vis-à-vis de la perspective algébriste en phonologie pour lui opposer une approche topologique fondée sur la théorie des catastrophes. Si les questions qu'elle se pose sur le passage entre flux acoustique de parole et catégories phonologiques confèrent à la phonologie une position clé à l'interface entre les sciences exactes et les sciences humaines, les formalisations d'abord proposées en phonologie ont selon Petitot répondu à ces questions de manière inadéquate, en instituant une sorte de séparation ontologique – et non interrogeable – entre « substance » phonétique et forme phonologique : « On 'emprisonne' », écrivait-il, « le discret dans une formalité logique étrangère par essence à toute notion génétique et dynamique » (*op. cit.*, 88). Mais « le 'relationnel' au sens structural est d'essence géométrico-topologique (positionnel). *Il est régi par des lois propres qui ne sont pas celles de la logique formelle des relations* » (*ibid.*, 106-107). Et Petitot entendait ainsi restituer à la notion structurale d'identité de position sa signification véritable en montrant qu'elle était « d'essence géométrico-topologique et non d'essence logico-combinatoire ». Dans cette entreprise visant à comprendre comment « le discontinu peut émerger hors du continu » (*ibid.*, 22), Petitot attribuait une importance cruciale à ce phénomène découvert en phonétique expérimentale dans les années 1950 et désigné sous le terme de perception catégorielle[12]. C'était selon lui par le biais de la perception catégorielle que l'auditeur « peut spontanément discrétiser le flux audio-acoustique » (*ibid.*, 22). Ainsi entrevoyait-on les contours d'une phonologie *ancrée dans le continu*, et dans laquelle les catégories phonologiques possèdent par définition une *réalité perceptive et cognitive*, dans la mesure où c'est dans la perception que sont situés les mécanismes présidant à leur formation et à leur stabilisation. Dans une démarche largement descendante, hypothético-déductive, ne devant que le minimum à l'empirie (hormis quelques données de base sur le fonctionnement du système auditif périphérique, et plus précisément sur les effets d'intégration spectrale à bande large), Petitot a notamment démontré que la structure d'un système phonologique est assujettie à un ensemble de frontières naturelles dans un espace de spectres, liées à la notion de type qualitatif et à celle de stabilité structurelle. L'idée selon laquelle les voyelles se ramènent à un petit nombre de types qualitatifs sur le plan spectral est présente dans certaines théories phonologiques récentes [Harris, Lindsey, 2000].

Les thèses de Petitot ont été accueillies avec beaucoup d'intérêt par Jean-Luc Schwartz et ses collaborateurs à l'Institut de la Communication Parlée à Grenoble, qui les ont reprises dans leurs travaux sur la structure des systèmes vocaliques [Schwartz, 1987 ; Schwartz *et al.*, 1997]. Quelques années plus tard et de manière indépendante, Betty Tuller, Scott Kelso et leurs collaborateurs au sein du Centre pour les Systèmes complexes à Boca Raton en Floride, ont à leur tour découvert l'ouvrage de Petitot, dont les liens avec la théorie qu'ils avaient eux-mêmes développée sur la production et la perception de la parole (cf. pour une synthèse [Kelso, 1995]) se sont très vite imposés à eux. Kelso et Tuller s'étaient d'abord intéressés au contrôle moteur dans la production de la parole, dans une série de travaux aboutissant à la mise en place des modèles *task-dynamics* associés à la phonologie articulatoire [Goldstein, Fowler, 2003]. Au début des années 1990, leur attention s'est centrée sur les relations pouvant être établies entre production et perception, et cela les a conduits à proposer un modèle nouveau [Tuller *et al.*, 1994 ; Tuller, 2004, et présent numéro] assimilant le système perceptif à un système dynamique non-linéaire, dont le comportement dépend à la fois de son état à l'instant

[12] La perception catégorielle renvoie au fait qu'il est plus facile à un auditeur de percevoir la différence entre sons à cheval entre deux catégories phonémiques plutôt qu'à l'intérieur d'une même catégorie. Ce phénomène s'observe d'abord dans la perception des consonnes occlusives.

antérieur et d'un ensemble de paramètres de contrôle. Selon ce modèle, le système se caractérise par un ensemble d'états stables ou attracteurs associés à des catégories perceptives, et il présente un ensemble de propriétés dynamiques (hystérésis, contraste, transitions de phase, bifurcations) que Tuller et Kelso se sont employés à identifier, en montrant notamment que la topologie des attracteurs dans l'espace perceptif était pour une part conditionnée par l'histoire du système de traitement.

Bien évidemment, ces thèses faisaient fortement écho à celles qui étaient défendues depuis quelque temps déjà dans le cadre de l'approche connexionniste, dans la mesure où les réseaux de neurones artificiels appartiennent pour une partie d'entre eux à la famille des systèmes dynamiques non-linéaires. Sans doute est-il inutile de rappeler ici le formidable impact des modèles connexionnistes pour les sciences cognitives mais aussi pour la linguistique, et en particulier pour la phonologie (cf. notamment [Laks, 1996, 2005]).

Dans un récent projet[13] M. Bergounioux, N. Nguyen, et S. Wauquier, en collaboration avec Betty Tuller, ont entrepris d'étendre le modèle de Tuller et Kelso au français et de manière plus générale, de contribuer à montrer qu'il est possible de modéliser le passage entre flux de parole continu et catégories phonologiques par l'intermédiaire d'une fonction de potentiel elle-même continue. Le lecteur est renvoyé à [Nguyen, Lancia, Bergounioux, Wauquier-Gravelines, Tuller, 2005] et à [Nguyen, Wauquier, Tuller, 2007] pour un traitement détaillé de ces questions.

3. QUE PEUVENT LES MATHÉMATIQUES POUR LA PHONOLOGIE ?

Les rapports (apports ?) des mathématiques à la phonologie peuvent se concevoir à deux niveaux : un niveau « abstrait » (« pur ») où LA mathématique, en tant que langage/science formelle, peut proposer une structure et un formalisme à la phonologie du point de vue purement qualitatif, relationnel, et un niveau « concret » (« appliqué ») où les mathématiques fournissent outils et modèles pour la compréhension (voire la reproduction) des phénomènes phonologiques. Le point de vue est alors plutôt quantitatif. C'est, grosso modo, la différenciation « philosophique » à l'intérieur des mathématiques elles-mêmes, entre mathématiques dites pures et mathématiques appliquées.

La modélisation relève de l'aspect « appliqué » des mathématiques puisqu'il s'agit de mettre en place des outils (modèles) permettant de rendre compte des phénomènes observés pour les comprendre, les expliquer et si possible les reproduire et/ou les prévoir (les simuler donc). Traditionnellement, les champs d'application classiques (comme la physique, la mécanique etc.) ou plus récemment la médecine, proposent des objets d'étude « quantitatifs ». Pour modéliser, on a recours à la notion de variable qu'on fait l'objet de mesures (l'erreur de mesure est partie prenante du travail d'analyse mathématique, que ce soit en analyse numérique ou en statistiques). C'est le cas par exemple en sciences humaines (économie, démographie) via les statistiques ou en phonétique via les techniques d'analyse du signal.

Dans le cas des phénomènes phonologiques, l'information est essentiellement qualitative et la première difficulté est de définir les bonnes variables : celles qui sont pertinentes et mesurables. Il faut ensuite décrire les lois de comportement de ces variables, tout cela d'un point de vue quantitatif. En biologie ou en climatologie par exemple, on peut modéliser l'évolution d'une population ou du climat à partir

[13] www.lpl.univ-aix.fr/~nguyen/sys_comp.html

d'observations quantifiées (mesures) et de lois de comportement issues de l'observation des phénomènes. En phonologie, il faut donc réfléchir à la définition des variables d'une part et des lois de comportement. Le caractère « humain » du phénomène implique nécessairement une approche stochastique faute d'observations suffisamment nombreuses pour faire une étude déterministe macroscopique. Il y a là un important travail de modélisation à faire tout à fait inédit puisqu'il faut appréhender une réalité peu quantifiable. Une telle tentative de modélisation a été proposée par B. Tuller et ses collaborateurs. Toutefois, le modèle proposé l'est uniquement par analogie avec un phénomène physique (on propose un modèle dont les résultats sont les mêmes *qualitativement* que ceux d'une expérience physique connue). Une approche effectuée par N. Nguyen, S. Wauquier et M. Bergounioux consiste à quantifier les données expérimentales avec une variable aléatoire dont on va décrire la loi. Là encore, la difficulté consiste, d'une part, à interpréter cette variable, d'autre part, à déduire une loi de comportement dépendant de paramètres environnementaux encore à préciser. En termes techniques, il y a clairement nécessité d'études statistiques à partir d'échantillons représentatifs (ce qui se fait déjà). Toutefois, dès lors qu'on décrit des systèmes dynamiques (c'est-à-dire au sens premier du terme des systèmes en évolution), un passage par des techniques de différentiation (mathématique) semble inévitable.

La modélisation mathématique nécessitant des variables numériques (données quantitatives), une alternative à l'utilisation de statistiques et/ou de modèles aléatoires est une approche de type « dynamique des populations ». En biologie, certaines populations sont caractérisées par des « traits », eux-mêmes régis par des lois mais ce ne sont en général pas des variables quantitatives. Ainsi un trait peut être assimilé, identifié à la population qui le « porte ». On peut alors modéliser l'évolution de ces populations de manière tout à fait standard grâce à des règles d'évolution et des lois biologiques classiques (mort, naissance, prédateurs, proies etc.).

Ces modèles conduisent (suivant leur degré de complexité) à des systèmes dynamiques, souvent couplés, gouvernés par des équations différentielles ou des équations aux dérivées partielles parfois hautement non linéaires, parfois de type réaction-diffusion, transition de phase ou Hamilton-Jacobi. Ces méthodes semblent transposables à des problèmes de phonologie, le « trait » biologique pouvant modéliser par exemple une variable de perception et les lois se transposant de manière similaire.

Ces quelques pistes montrent que la phonologie constitue un vrai défi pour les mathématiques par le biais de la modélisation des phénomènes qui est pour l'instant balbutiante faute de repères « traditionnels ».

4. TROIS PROBLÈMES, POUR COMMENCER

Pas plus qu'il n'existe une seule mathématique, il n'y a unité de la phonologie. Les diverses écoles ont des propensions différentes à élaborer une mathématisation de leur objet et tous les objets de la phonologie ne se prêtent pas aussi commodément à une mathématisation. Les éléments statistiques sont probablement les plus accessibles. Il pourrait en aller de même concernant la combinabilité des unités, à quelque niveau qu'on en conçoive la définition et l'agencement. Le biais par lequel les phonologues seraient les plus réceptifs aux mathématiques, sans réduire leur intérêt à l'emprunt d'un outil, concerne la formalisation. Au-delà d'une notation sténographique ou implémentable, l'écriture symbolique serait le moyen de composer des algorithmes, de formuler des opérations, d'introduire de la calculabilité. Une telle visée interroge les conditions de possibilité d'une phonologie purement axiomatique.

4.1 PROBLÈME 1 : PHONOLOGIE DES LANGUES ET PHONOLOGIE DU LANGAGE

La phonologie fonde ses analyses sur un inventaire des relations, aussi dites oppositions (y compris diachroniques, morphonologiques, dialectales ou sociales) attestées dans des états de langue ou dans des dialectes particuliers. Elle fait science en construisant un ensemble de représentations et de règles (qui, dans l'observation, correspondent à autant de régularités) dont elle détermine le degré d'extension jusqu'à unifier des phénomènes différents – et réciproquement en singularisant par exemple des systèmes qui, en description de surface, paraissaient identiques. Elle réunit ponctuellement, à partir de telle ou telle caractéristique, des langues que tout semblait séparer mais distingue, à l'intérieur des langues, les variétés de leurs réalisations. La différenciation dialectale, qui attend sa confirmation de la morphologie, de la syntaxe ou du lexique, est avant tout entérinée par des différences de traitements phonologiques.

Ainsi, la phonologie, dont le champ d'application est universel, procède d'abord par une accumulation de monographies. Le passage d'une langue à toutes les langues s'effectue par un double processus d'abstraction/généralisation qui, au-delà des multiples descriptions, signe la construction d'une science. Chaque relation actualisée dans une langue, chaque changement, chaque répercussion sur la morphologie doit être justiciable d'une analyse qui ne soit jamais vernaculaire et s'applique à d'autres systèmes, d'autres situations. Tout fait de langue doit relever d'une interprétation qui opère à partir d'une sélection non aléatoire de caractérisants tel que l'ensemble de ce que contient une description phonologique soit repris dans les catégories élaborées par la théorie générale. Chaque système s'y concrétise comme une combinaison de possibles, la réalisation idiomatique (c'est-à-dire partielle) d'une matrice de propriétés dont les produits couvrent tous les cas de figure, selon le principe d'exhaustivité suivant lequel « l'analyse phonologique est sans reste » (Troubetzkoy).

Jusqu'à présent, la démarche privilégiée a été ascendante, des langues vers le langage. Elle est le fait de phonologues qui, à partir de l'observation de plusieurs langues, ont cherché à élaborer un schéma universel. Dans un premier temps, la recension s'est contenue à des langues entre lesquelles des relations historiques sont conjecturées. C'est la démarche de Saussure dans son *Mémoire* [1879] quand il conçoit un « système » à partir de la distribution des produits vocaliques dans les langues indo-européennes considérées au moment de leur première transcription. Cinquante ans plus tard, il se produit un élargissement qui soumet aux mêmes traitements les langues déjà étudiées par la tradition européenne[14] et celles auxquelles la linguistique se trouvait confrontée par l'inventaire ethnographique des régions investies par l'expansion impérialiste : c'est Troubetzkoy et les langues du Caucase, Sapir et les langues amérindiennes. On passait de langues mortes, accessibles seulement par leur transmission scripturale, à des langues vivantes qu'on se donnait pour tâche de transcrire avant qu'elles ne soient mortes. Cet intérêt s'accompagnait d'une réflexion anthropologique, sur la culture et les contacts, l'émergence du changement et sa diffusion. Ultérieurement, avec Jakobson, Haudricourt ou Greenberg, la réflexion a été prolongée, d'une phonologie générale à des phonologies acquisitionniste, panchronique ou typologique, inséparables d'une réflexion qui se continue sur le changement diachronique.

Une démarche descendante ferait au contraire porter l'accent sur l'application d'un cadre d'analyse théorique à la phonologie. Jusqu'au début du XIX^{e} siècle, la

[14] Outre les langues vivantes européennes, le latin et le grec, les langues indo-européennes, les langues bibliques et les langues orientales « classiques » (arabe, turc puis le chinois, le japonais, le malais) et quelques langues « coloniales ».

tradition philosophique issue de l'aristotélisme, dont la *Grammaire générale et raisonnée de Port-Royal* demeure la référence emblématique, a dominé le champ des idées linguistiques, en faisant abstraction de la dimension sonore qui apparaissait comme une réalisation tardive, une concrétisation a posteriori de la pensée[15]. Le reflux de ce modèle, dont le déploiement s'achève avec les Idéologues à l'époque où apparaît la grammaire comparée et qui se prolonge dans le cadre du logicisme, autorise de nouvelles propositions de formalisation. L'aboutissement d'un cadre universel pour la phonologie n'est pas séparable de sa capacité à convertir ses analyses sur les langues particulières en une axiomatique pour laquelle les mathématiques fournissent un modèle évident, sinon exclusif. Une part du clivage entre OT et CVCV serait liée à cette orientation, *bottom-up* vs *top-down*, des formalismes, reconduisant le schéma empirisme vs rationalisme, celui-ci centré sur les représentations mentales des phénomènes, celui-là sur les informations enchâssées dans le signal.

4.2 PROBLÈME 2 : FORME MENTALE ET FORME SYMBOLIQUE

La phonologie est accessible seulement par une analyse des réalisations/appréhensions de locuteurs qui n'ont pas la connaissance réflexive des principes de leurs propres productions/ perceptions, en sorte qu'il est nécessaire, au moins sur ce plan, d'opérer une distinction entre la « phonologie du locuteur-auditeur » (mentale) et la « phonologie de la langue » (objectivée). La question de l'apprentissage (et de la défaisance) de la langue se trouve engagée dans cette interrogation puisque les processus qui ont abouti à l'implémentation d'une langue se trouvent partiellement effacés au cours de l'acquisition et qu'il n'en est plus conservé que le résultat, l'exercice d'une compétence.

La disjonction entre les phénomènes (phonétiques) et les lois ou les représentations formelles (phonologiques) constitue une rupture avec l'empirie, l'introduction des calculs et des notations symboliques se substituant à la recension systématique des objets du monde. Elles se distribuent de part et d'autre de la partition fondamentale entre sciences de l'homme et sciences de la matière. Les formes d'objectivation sont-elles similaires dans les deux ordres de la connaissance ? Tandis que l'analyse du signal relève de plein droit de la physique, le statut exact de la phonologie dans les sciences humaines et sociales n'est pas clairement établi, si ce n'est par la transition de la linguistique. En effet, le système phonologique ne correspond pas à une « conduite humaine » (*behavior*), que Bloomfield situe en aval, dans la communication, l'échange de messages. Le précepte durkheimien, « traiter les faits sociaux comme des choses », ne s'y applique pas non plus : les règles, les relations ou la phonotaxe ne sont pas directement justiciables d'une corrélation avec des propriétés extrinsèques, qu'elles définissent les locuteurs ou leur parole. La conceptualisation de la phonologie ne se déduit pas principalement de méthodes dont l'application vaut pour l'histoire (la critique des sources), la sociologie (l'enquête) ou la psychologie (les tests) par exemple.

La phonologie est *cosa mentale*. Aucun élément sensible n'y correspond, sinon à titre d'exemple, d'illustration contingente. La forme des langues est abstraite, « algébrique » dans la terminologie de Saussure, « idéelle » dans celle de Troubetzkoy. La connaissance d'un système phonologique revient à transposer son architecture (sa structure) en un ensemble de symboles dont l'alphabet et l'écriture linéaire ont donné une première image si recevable qu'elle a contribué à rendre superflue l'analyse

[15] La démarche descendante domine dans la conception cognitiviste, laquelle n'est pas sans affinité avec une vision aristotélicienne, ou cartésienne, et s'en revendique quelquefois.

scientifique du matériel sonore et à en différer la notation exacte[16]. L'un des obstacles auxquels se heurte constamment la phonologie est la régression vers une façon de procéder qui renouvelle le processus d'alphabétisation des langues et qui réifie les voyelles en leur assignant une valeur en timbres, les consonnes en les ramenant à une disposition normée des organes. Ainsi en va-t-il de l'A.P.I. censé noter des phonèmes, dans une confusion constante avec leur réalisation articulatoire ou acoustique[17].

L'une des premières tâches qui incombe au phonologue est de définir le type d'écriture symbolique qui lui est nécessaire. Il lui faut reconnaître ce qu'il peut emprunter à la méthode des sciences formalisées, déterminer quelles sont les opérations effectuables au moyen de ces symboles… Dans la correspondance entre la forme mentale (intériorisée) et la forme symbolique (extériorisée) de la phonologie, se situe l'une des questions les plus controversées, qui se conclut par une divergence épistémologique de principe entre des conceptions :

- réaliste, qui postule une homologie de structure (variante forte : une identité) entre la phonologie des locuteurs/auditeurs et la notation qu'en donne le linguiste dans une démarche ascendante (des productions aux représentations), que cette homologie se situe sur des paliers neuronaux ou cognitifs, qu'elle soit émergente ou constructionnelle ;
- symboliste, qui conjecture l'existence de deux systèmes dont les fonctionnements s'avèrent compatibles (les notations utilisées pour décrire les phénomènes correspondent à des faits de langue dont l'organisation dans l'esprit peut être de nature radicalement différente),
- algébrique, seule la maniabilité des symboles importe en sorte que les manipulations opérées à ce niveau seront prescriptives, faisant apparaître des propriétés des unités, dans leur structure et leur organisation, telles qu'éventuellement aucune observation n'aurait pu les faire émerger, indépendamment de toute propriété substantielle.

Pour en donner une illustration approximative :

- l'A.P.I. et la Phonologie de Laboratoire ancreraient leur heuristique dans un postulat *réaliste*, *bottom-up*,
- les propositions du second Jakobson (à partir de l'installation aux Etats-Unis) et de Chomsky seraient plutôt d'ordre *symboliste*,
- l'amorce d'une phonologie *algébrique*, *top-down*, se lit dans plusieurs propositions de Saussure et de Troubetzkoy, mais aussi dans certaines des recherches exposées *supra*.

La dernière option se trouve en butte à la tradition logiciste, devenue puissante après qu'elle a centré l'étude des langues sur la syntaxe et des représentations algorithmiques, ne concevant de formalisation de la langue qu'à la condition d'en exclure d'abord le son : c'est la conception défendue depuis G. Frege par les écoles d'analyse.

[16] Il faut que soit mise au contact la philologie européenne et la tradition indienne pour qu'émerge une linguistique scientifique, avec Bopp, qui phonétise l'analyse des textes. La rupture est accomplie dans les années 1870 avec les *Junggrammatiker* d'un côté, Verner et Hubschmidt de l'autre, avant que le *Mémoire* de Saussure n'en offre la forme la plus achevée.

[17] Cf. l'inventaire des phonèmes d'une langue qui, faisant abstraction du système, est, dans l'en-tête des dictionnaires de langue par exemple, une liste des symboles de l'A.P.I. requis par la transcription.

4.3 PROBLÈME 3 : LA PHONOLOGIE COMME ALGÈBRE

Donc Saussure appelait de ses vœux une algébrisation. Dans la notation littérale qu'il propose au moment de composer le *Mémoire*, il abandonne explicitement la référence sonore (acoustique ou phonatoire) en faveur d'une notation arbitraire où par exemple a_2, qui note un son proche de /o/, intervient seulement pour la valeur apophonique qu'il sténographie :

> *La véritable définition de a_2 est, ce me semble : la voyelle qui, dans les langues européennes, alterne régulièrement avec e au sein d'une même syllabe radicale ou suffixale. Ainsi, pour parler d'un a_2 proethnique, il faut absolument placer aussi le germe de l'e européen dans la période d'unité première.* [Saussure, 1879, p. 66]

S'il y a dans le premier structuralisme une propension au développement d'une écriture opérationnelle, Troubetzkoy manifeste quelque réticence devant les interprétations les plus formalistes de ses travaux[18]. Entre fascination et méfiance, l'autonomisation de la discipline n'est plus attendue de la constitution d'une écriture conventionnelle et segmentale, une étape franchie au moment de la fondation de la discipline[19]. La contribution attendue des mathématiques concerne plutôt la fin du grand partage opéré au début de la phonologisation (alphabétique) de l'écriture, au début du premier millénaire avant notre ère, quand a été soustraite, de la conversion en images sonores, la notation des nombres.

L'écriture a converti le savoir (et la mémoire) dans des textes qui consignaient la connaissance de l'univers dans les formes du discours, c'est-à-dire dans une langue entre autres, qui conservait la singularité de sa forme sonore – de ses *signifiants* –, soumise aux aléas de l'idiomaticité et de la traduction. Les chiffres, qui inscrivaient mesure (la géométrie) et calculs (l'astronomie), demeuraient tributaires des tracés vernaculaires jusqu'à ce que le raisonnement sur les nombres ait pu s'inscrire dans des opérations et des algorithmes dont la graphie s'émancipait des différentes langues pour accéder à une forme universelle de représentation.

Au fur et à mesure des progrès de la formalisation des sciences, des notations conventionnelles, des sténographies symboliques qui avaient leur correspondance dans des phénomènes observables, reproductibles par l'expérimentation, fondées sur des propriétés des chiffres (en premier lieu leur fonction pasigraphique) se sont substituées aux verbalisations idiolectales. Le rapport sur les manipulations de laboratoire a fait abstraction de l'agent et des constructions littéraires du discours, adoptant pour format des énoncés la prescription galiléenne : « mathématiser ce qui est mathématisable et rendre mathématisable ce qui ne l'est pas ». Cette recommandation, après s'être imposée dans le champ des sciences physiques, de la chimie, puis dans les sciences de la nature et de la vie, en est venue à constituer l'objectif de secteurs entiers de la recherche dans les sciences sociales, et pourquoi pas de la phonologie ? D'autant qu'au-delà d'une notation des relations, la phonologie comprend une multiplicité d'entités (mètres, syllabe…), une syntaxe, des opérations et des règles. Plus qu'une écriture spécifique des entités qu'elle définit, elle entend composer sous forme de théorèmes, de lemmes ou d'axiomes les différentes propriétés des unités et leur interaction, elle fonde sur ces notations des démonstrations rigoureuses et en contrôle les résultats. Déjà, parce

[18] Troubetzkoy, dans une lettre à Jakobson, déclare : « (…) <A. Schmitt> finit sa lettre en disant être effrayé par la transformation de la linguistique en algèbre. Cela dit, en lisant le travail de Hjelmslev sur la phonologie lituanienne, j'ai éprouvé moi-même un fort sentiment de révolte contre le caractère de plus en plus algébrique de la linguistique », *op. cit.*, lettre 185.

[19] Troubetzkoy, *op. cit.*, « Lettre à Forchhammer ».

qu'elle définit des éléments dont l'existence se déduit de ses représentations (position vide, élément nul, schwa…), la phonologie anticipe certaines caractéristiques attribuées aux écritures mathématiques.

5. CONCLUSION

Cette contribution se présente comme un état des lieux et l'expression d'un horizon de recherche prospectif : c'est à la fois sa limite et son potentiel. Elle reflète aussi les divergences et les différences de formation et de culture entre les auteurs. Au-delà de la recension de quelques interférences passées avec les mathématiques, de quelques rencontres, on devine quelles perspectives offre le postulat que la phonologie est une représentation symbolique distincte de la cognition et du signal. Rien de moins que la possibilité de construire, dans les sciences humaines, un formalisme comparable à celui des mathématiques mais qui se situerait à son opposé. Alors que les mathématiques, comme théorie des nombres, ont pris leur essor à l'intérieur de l'écriture sur l'incrustation de symboles pasigraphiques dans des notations phonétisantes, c'est-à-dire sur des conventions de calcul indifférentes à l'interprétation sonore, la phonologie recueillant à son tour ce reste d'une forme phonétique se propose de recommencer le geste épistémologique d'une abstraction scientifique dans un domaine qui s'en était trouvé soustrait et le pari est pris qu'il se pourrait que ce soit dans une certaine identité des procédés mathématiques que l'opération se révèle heuristique.

Ainsi, l'algébrisation, quelles qu'en soient les conditions d'émergence, annoncerait la résorption de la première séparation opérée dans l'ordre de la connaissance cumulative entre ce qui est traité par les lettres (qui sont phonétisantes par définition) et par les chiffres (qui ont pour première propriété de ne l'être pas). On n'attaque pas impunément un partage effectué depuis quelques millénaires et qui a probablement ses raisons pour résister à un tel effacement.

BIBLIOGRAPHIE

ANDERSON S., *Phonology in the Twentieth century*, Chicago, University of Chicago Press, 1985.

CARR P., "Scientific realism, sociophonetic variation, and innate endowments", N. Burton-Roberts, P. Carr, G. Docherty (eds), *Phonological Knowledge: Conceptual and Empirical Issues*, Oxford, OUP, 2000, p. 67-104.

CHOMSKY N., *Cartesian Linguistics*, New York, Harper & Row, 1966. [*La Linguistique cartésienne*, Paris, Seuil, 1969].

CHOMSKY N., *Sound Pattern of Language*, Cambridge-Mass., MIT Press, 1968. [*Principes de phonologie générative*, Paris, Seuil, 1973].

GOLDSMITH J., "Towards a new empiricism", [à paraître].

GOLDSTEIN L., FOWLER C., "Articulatory phonology: a phonology for public language use", A. Meyer, N. Schiller (eds), *Phonetics and Phonology in Language Comprehension and Production: Differences and Similarities*, Berlin, Mouton de Gruyter, 2003, p. 159-207.

HAGEGE C., HAUDRICOURT G.-A., *La phonologie panchronique*, Paris, Presses Universitaires de France, 1978.

HARRIS J., LINDSEY G., "Vowel patterns in mind and sound", N. Burton-Roberts, P. Carr, G. Docherty (eds), *Phonological Knowledge: Conceptual and Empirical Issues*, Oxford, OUP, 2000, p. 185-205.

HOCKETT C., "A note on 'Structure'", *International Journal of American Linguistics* 14, 1948, p. 132-134.

KELSO J., *Dynamic patterns: The self-organization of brain and behavior*, Cambridge (Mass), MIT Press, 1995.

KIPARSKY P., "From cyclic phonology to lexical phonology", H. V. D. Hulst, N. Smith (eds), *The Structure of phonological representations*, Dordrecht, Foris, 1982.

LAKS B., *Langage et cognition : l'approche connexionniste*, Paris, Hermès, 1996.

LAKS B., « Approches cognitives de la phonologie », N. Nguyen, S. Wauquier-Gravelines, J. Durand (eds), *Phonologie et phonétique : forme et substance*, Paris, Hermès, 2005, p. 291-322.

NGUYEN N., LANCIA L., BERGOUNIOUX M., WAUQUIER-GRAVELINES S., TULLER B., "Role of training and short-term context effects in the identification of /s/ and /st/ in French", V. Hazan, P. Iverson (eds), Londres, *ISCA Workshop on Plasticity in Speech Perception (PSP2005)*, A38-39, 2005.

NGUYEN N., WAUQUIER-GRAVELINES S., TULLER B., "The dynamical approach to speech perception: from fine phonetic detail to abstract phonological categories", I. Chitoran, C. Coupé, E. Marsico, F. Pellegrino (eds), *Approaches to Phonological Complexity*, Berlin, Mouton de Gruyter, 2007.

PEPERKAMP S., LE CALVEZ R., NADAL J.-P., DUPOUX E., "The acquisition of allophonic rules: Statistical learning with linguistic constraints", *Cognition* 101, B31-B41, 2006.

PETITOT J., *Les catastrophes de la parole : de Roman Jakobson à René Thom*, Paris, Maloine, 1985.

PIERREHUMBERT J., « Fréquence et structure », [communication aux] *6e Journées internationales du réseau français de phonologie*, Université d'Orléans, 2004.

PIERREHUMBERT J., BECKMAN M., LADD D., "Conceptual foundations of phonology as a laboratory science", N. Burton-Roberts, P. Carr, G. Docherty (eds), *Phonological knowledge: conceptual and empirical issues*, Oxford, OUP, 2000, p. 273-303.

SAPIR E., « La réalité psychologique des phonèmes », *Journal de psychologie normale et pathologique* 30, 1933, p. 247-265, [Texte publié originellement en français].

SAUSSURE (de) F., *Mémoire sur le système primitif des voyelles dans les langues indo-européennes*, Leipzig, Teubner, 1879 [http://www.revue-texto.net/Saussure/Saussure.html].

SAUSSURE (de) F., *Cours de linguistique générale*, Paris, Payot, 1966.

SAUSSURE (de) F., *Ecrits de linguistique générale*, Paris, Gallimard, 2002.

SCHEER T., *A Lateral Theory of Phonology*, Berlin, De Gruyter, 2004.

SCHWARTZ J.-L., « À propos des notions de forme et de stabilité dans la perception des voyelles », *Bulletin du Laboratoire de la Communication Parlée* 1A, 1987, p. 159-190.

SCHWARTZ J.-L., BOE L.-J., VALLEE N., ABRY C., "The Dispersion-Focalization theory of vowel systems", *Journal of Phonetics* 25, 1997, p. 255-286.

SEGAL J., *Le zéro et le un*, Rouen, Syllepse, 2003.

TROUBETZKOY N. S., *Principes de phonologie*, Paris, Klincksieck, 1949.

TROUBETZKOY N. S., *Correspondance avec Roman Jakobson et autres écrits*, Lausanne, Payot, 2006.

TULLER B., "Categorization and learning in speech perception as dynamical processes", M. A. Riley, G.C. Van Orden (eds), *Tutorials in Contemporary Non-linear Methods for the Behavioral Sciences*, National Science Foundation, URL www.nsf.gov/sbe/bcs/pac/nmbs/nmbs.jsp, 2004.

TULLER B., CASE P., DING M., KELSO J., "The nonlinear dynamics of speech categorization", *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 20, 1994, p. 3-16.

ZIPF G. K., *La psychobiologie du langage*, Paris, Retz, 1974.