

dans le cortex. Cette correspondance signifie peut-être que les comportements modèlent l'organisation du cortex. Cependant, selon une autre hypothèse, les mécanismes intrinsèques du développement adapteraient la taille des cartes corticales à leur importance comportementale. C'est l'éternelle question de l'inné et l'acquis.

L'étude du développement de l'étoile chez les embryons de taupe peut nous aider à trancher. Puisque l'étoile se développe avant que sa représentation dans le cortex n'existe, les afférences sensorielles en provenance de l'étoile influent sur la formation des cartes corticales durant certaines périodes cruciales du développement.

La plupart des embryons ont une apparence originale, mais ceux des taupes au nez étoilé sont particulièrement singuliers, car ils ont des «mains» géantes et un nez unique en son genre (voir la figure 5). Au début du développement de l'embryon, les appendices de la onzième paire sont les plus grands, alors qu'ils sont réduits chez l'adulte. D'autre part, les organes d'Eimer de l'étoile, ainsi que les structures neuronales de chacun d'eux parviennent à maturité d'abord sur la onzième paire d'appendices. Tout se passe comme si cet appendice prenait le départ avec une longueur d'avance sur tous les autres qui, par la suite, le dépassent en taille et en nombre d'organes d'Eimer. Or, dans le système visuel des mammifères, la fovea rétinienne se développe précocement.

Une étoile est née

Nous avons observé que l'activité métabolique apparaît en premier dans la représentation corticale de la onzième paire d'appendices. Le développement précoce de la fovea tactile s'accompagnerait d'une augmentation de l'activité dans la représentation corticale de cette zone à mesure de son élaboration : en conséquence, les neurones correspondants s'approprieraient une vaste zone de la carte corticale. L'étude du développement du système visuel des primates montre que les afférences

sensorielles les plus actives s'adjugent les régions les plus étendues du cortex. Cependant, les modèles de comportement précoce chez les jeunes taupes au nez étoilé, qui utilisent la onzième paire d'appendices pour têter, contribuent peut-être eux aussi à une expansion de la fovea dans les cartes corticales. L'objectif de nos travaux est de reconnaître les contributions relatives de ces différents mécanismes.

La clef réside vraisemblablement dans le développement de la taupe au nez étoilé. La formation des appendices de l'étoile n'est comparable à celle d'aucun autre appendice d'animal connu. Plutôt que de croître directement vers l'extérieur du corps, les appendices de l'étoile forment d'abord des cylindres orientés vers l'arrière et inclus dans les parois du museau. Puis ils émergent lentement du museau, se détachent de la peau, et, environ deux semaines après la naissance, se courbent vers l'avant pour constituer l'étoile observée chez l'adulte. On postule que l'ontogénie (le développement embryonnaire) récapitule la phylogénie (l'évolution des espèces), ce qui nous laisse supposer que les ancêtres des taupes au nez étoilé auraient été dotés de bandes d'organes sensoriels plaquées de chaque côté du museau et qui, au fil des générations, se seraient relevées jusqu'à former l'étoile.

Sans preuve (par exemple des fossiles), cette hypothèse reste à démontrer. Cependant, chez deux espèces de taupes, *Scapanus orarius* et *Scapanus townsendii*, des bandes courtes d'organes sensoriels sont situées à plat le long de la partie supérieure du nez, et le nez des adultes ressemble beaucoup à l'étoile embryonnaire des taupes au nez étoilé. Ainsi, ces structures intermédiaires confirment l'hypothèse d'un ancêtre qui aurait donné naissance à l'étoile bien formée que nous observons aujourd'hui. Toutefois, quelle que soit leur histoire évolutive, ces nez étonnants nous aideront peut-être à comprendre l'influence des mécanismes innés de développement et des comportements sur l'organisation du cortex. À nous d'avoir du flair !

Kenneth CATANIA est professeur de biologie à l'Université Vanderbilt.

Martyn GORMAN et David STONE, *The natural history of moles*, Cornell university press, 1990.

Howard HUGUES, *Sensory exotica : a world*

beyond human experience, MIT press, 1999.

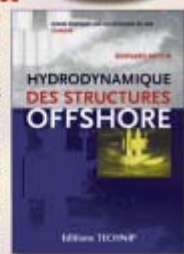
Kenneth CATANIA, *A nose that looks like a hand and acts like an eye : the unusual mechanosensory system of the star-nosed mole*, in *Journal of comparative physiology*, vol. 185, pp. 367-372, 1999.

Editions TECHNIP
27, rue Ginoux, 75737 PARIS Cedex 15
Tél. 01 45 78 33 80 • Fax 01 45 75 37 11
E-mail : info@editionstechnip.com
www.editionstechnip.com

NOUVEAUTÉ

HYDRODYNAMIQUE DES STRUCTURES OFFSHORE.

Une synthèse rigoureuse et pédagogique des connaissances les plus récentes en matière de comportement hydrodynamique des ouvrages en mer, indispensable à l'ingénierie offshore. Claron, B. Molin. Broché, 440 p. €95



LE MANUEL DU SYSTÈME INTERNATIONAL D'UNITÉS. Lexique et conversions. Conversions, règles d'écriture, origine, étymologie ; grâce à cet ouvrage, l'utilisateur pourra aisément aborder les manipulations d'unités. M. Dubesset. Broché, 192 p. €21

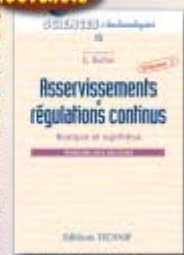
LE LANGAGE JAVA™. Programmer par l'exemple. Une approche résolument pédagogique, pratique et progressive pour découvrir ou redécouvrir le langage Java. Recommandé par Sun Microsystems, le développeur du langage. T. Leduc, D. Leduc. Broché, 288 p. €28

ASSERVISSEMENTS ET RÉGULATIONS CONTINUS. Analyse et synthèse. Problèmes avec solutions. VOL. 1. F. Boillot. Broché, 216 p. €32

NOUVEAUTÉ

ASSERVISSEMENTS ET RÉGULATIONS CONTINUS. VOL. 2

Analyse et synthèse. Problèmes avec solutions. Le second volume d'un ouvrage à succès. Dix nouveaux problèmes d'automatique abordant des systèmes réels rencontrés dans l'industrie, avec leurs corrigés complets. E. Boillot. Broché, 240 p. €34



MANUEL D'ÉVALUATION ÉCONOMIQUE DES PROCÉDÉS.

Présente, avec des exemples détaillés, l'ensemble des étapes indispensables à l'évaluation économique d'un projet. A. Chauvel, G. Fournier, C. Raimbault. Nouvelle édition revue et augmentée. Relié, 512 p. €125



NOUVEAUTÉ

ACYCLISME ET VIBRATIONS

Applications aux moteurs thermiques et aux transmissions. 1. Notions de base. 2. Analyses avancées et expérimentales. Cet ouvrage, unique en son domaine, analyse les phénomènes et mécanismes mis en jeu dans la rotation non uniforme du vilebrequin afin d'en limiter efficacement les effets. J.-L. Ligier, E. Baron. Relié, 864 p. €129

Vocalises chaotiques

LORENZO MATASSINI

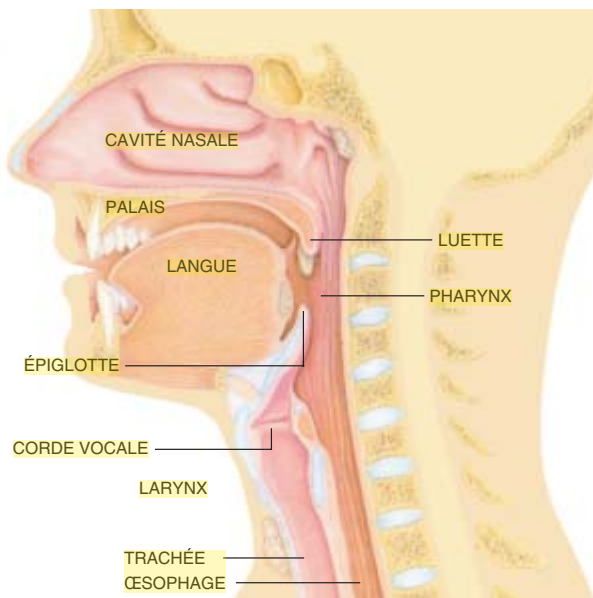
La théorie du chaos fournit des techniques adaptées au traitement du signal vocal. Un nouvel algorithme élimine le bruit parasite des enregistrements et devrait améliorer les dispositifs de reconnaissance vocale.

«Un papillon qui bat des ailes aujourd'hui à Pékin peut déclencher une tempête demain à New York.» Cette allégation, attribuée au météorologue américain Edward Lorenz et formulée il y a une vingtaine d'années, symbolise l'un des résultats les plus importants de la recherche sur le chaos : la sensibilité des équations aux conditions initiales. La turbulence atmosphérique, le mouvement des ondes dans une mer déchaînée, les fluctuations de la population d'une espèce animale, les panaches de fumée et tous les phénomènes caractérisés par un comportement désordonné ont longtemps constitué de vrais casse-tête. Peu à peu, des mathématiciens et des physiciens ont abandonné la tendance excessive au réductionnisme pour s'attaquer à la description des systèmes dans leur globalité. Ils ont ainsi édifié la théorie du chaos.

La théorie du chaos a bouleversé la conception de la science. De nombreux scientifiques la considèrent comme la troisième révolution scientifique du XX^e siècle, après celles de la théorie de la relativité et de la mécanique quantique : la théorie de la relativité a dissipé l'illusion d'un espace-temps absolu ; la mécanique quantique a brisé le rêve newtonien de mesures exactes ; et le chaos a anéanti l'idée laplacienne du déterminisme prévisible. Un système est chaotique quand son comportement semble erratique. Il n'en est pas moins soumis à un déterminisme, dit imprévisible : même connaissant les équations qui régissent son mouvement, ainsi que les conditions initiales, le calcul de son évolution débouche sur des résultats imprévisibles. La raison vient de l'extrême sensibilité du système aux conditions initiales.

Prenons l'exemple des prévisions climatiques et supposons que nous ayons un modèle météorologique parfait (les équations qui décriraient la dynamique de l'atmosphère seraient connues et exactes). Le système climatique étant chaotique, lorsqu'on résout les équations du modèle, les solutions, issues de deux conditions initiales imperceptiblement différentes, divergent rapidement. Par conséquent,

1. LA PAROLE est un signal acoustique dont la forme (ici, l'amplitude en fonction du temps) est complexe. Des signaux liés à un environnement sonore ou à un micro de mauvaise qualité, par exemple, s'y mêlent, et détériorent le signal vocal. La théorie du chaos fournit des outils qui identifient et suppriment ces signaux parasites.



2. LES ORGANES DE LA PRODUCTION VOCALE sont nombreux. La voix est produite par l'air en provenance des poumons qui traverse des résonateurs (le pharynx ; la cavité buccale ; la cavité labiale ; les fosses nasales). L'air entre en vibration au contact des articulateurs rencontrés sur son parcours : d'abord le larynx, armature de cartilage qui abrite les cordes vocales (des ligaments recouverts d'une muqueuse qui fait vibrer l'air) ; puis l'air rencontre le pharynx, le voile du palais, la langue, les lèvres... Les positions des articulateurs modifient la forme du conduit vocal et le timbre du son produit.

une erreur de prévision croît aussi rapidement : la sensibilité aux conditions initiales réduit drastiquement la durée sur laquelle les prévisions sont fiables. Finalement, la détermination du comportement à long terme d'un système chaotique est aussi complexe que celui d'un système aléatoire.

De nombreux outils mathématiques ont été développés pour traiter des phénomènes chaotiques, ou non linéaires en général, et ils trouvent de nombreuses applications, dans le traitement du signal de la voix par exemple. Lorsqu'un signal vocal est enregistré, il est inévitablement pollué par du bruit, qui provient de l'environnement sonore ou d'une mauvaise réception. Ce signal parasite se mêle au signal vocal et le perturbe, jusqu'à le rendre méconnaissable parfois. Les physiciens développent des filtres pour éliminer les bruits parasites et améliorer les performances des dispositifs de reconnaissance vocale ou celles des amplificateurs, par exemple : la réduction du bruit dans le traitement de la parole présente un intérêt considérable dans les télécommunications et dans les interfaces vocales homme/machine.

Les filtres utilisent des techniques de traitement du signal très variées, plus ou moins efficaces pour faire la distinction entre le bruit et le signal lié à la parole dans les signaux enregistrés. Nous avons mis au point un filtre qui exploite des outils issus de la théorie du chaos et qui repère, puis sépare le bruit du signal vocal. L'astuce consiste à différencier le bruit – composé de signaux d'origine aléatoire – des signaux vocaux qui, bien que complexes, ont des caractéristiques déterministes. En pratique, le signal sonore est enregistré par un microphone, puis transformé en une série de grandeurs scalaires, lesquelles sont transformées en vecteurs, puis traitées à l'aide des techniques de la théorie du chaos, afin d'en extraire le signal exempt de bruit parasite.

Les phénomènes responsables de la production vocale sont non linéaires. La voix est produite par le passage de l'air dans le conduit vocal. Les organes impliqués sont nombreux : le larynx (où se trouvent les cordes vocales), les fosses nasales, le pharynx, l'épiglotte, la langue, le palais, les lèvres et même les dents (voir la figure 2). Quand l'air passe des poumons vers la bouche, la position des organes change afin de produire différents sons. Par exemple, quand l'air circule librement dans la glotte, l'espace entre les cordes vocales, on prononce une voyelle ; en revanche, quand le passage de l'air est obstrué, entièrement ou en partie, on émet une consonne. La mise au point d'un modèle de la production vocale humaine est aujourd'hui irréaliste.

Une alternative consiste à analyser les propriétés du système vocal : la parole émise est une onde, dont le signal est représenté par son amplitude en fonction du temps. Le signal d'une phrase ou même d'un mot, enregistré par un micro, est complexe et variable (voir la figure 1). Il varie peu par endroits, et beaucoup à d'autres, où son amplitude est supérieure. Pourtant, en y regardant de plus près, on peut repérer des structures approximativement stationnaires (leurs propriétés sont invariables dans le temps) et moins complexes : ce sont les phonèmes (que l'on classe en consonnes, en voyelles et en semi-voyelles, par exemple *ou*, *on*...). Le nombre de phonèmes varie en fonction de la langue (des dialectes africains en comptent jusqu'à 60). À l'intérieur de chaque phonème, le signal est presque périodique (voir la figure 3). Le phonème est caractérisé par la répétition de sous-structures, dites sous-phonèmes. Toutefois, deux phonèmes consécutifs sont très différents, si bien qu'on ne peut prévoir l'état futur du signal.

La trajectoire dans une hypersurface

Dans un système purement déterministe, quand l'état présent du système est connu, les états futurs sont déterminés. Dans ce cas, l'identification des grandeurs physiques qui décrivent le système, c'est-à-dire des variables indépendantes, est cruciale. Considérées dans leur ensemble, elles prennent le nom de « vecteurs d'état » du système ; chaque vecteur d'état – ce qui revient à dire chaque état du système – est représenté de façon univoque par un point dans un espace dit vectoriel, aussi nommé espace des phases ou espace d'états. Il existe une équivalence entre l'état du système et un point de cet espace vectoriel. Cet espace mathématique comporte autant de dimensions qu'il y a de variables indépendantes dans le système dynamique (ses axes de coordonnées correspondent à ces variables indépendantes). Par exemple, il en comporte six pour un ballon (trois coordonnées spatiales et trois coordonnées de vitesse). L'espace des phases sert à représenter l'évolution des systèmes dynamiques : on détermine la dynamique du système réel en étudiant la structure de la trajectoire représentative de l'évolution du système dans l'espace des phases (voir l'encadré de la page 82).

En général, un système déterministe dynamique est défini par un ensemble d'équations différentielles, pour lesquelles une solution unique existe à partir de conditions initiales données. Cela se traduit par l'existence et l'unicité d'une trajectoire, c'est-à-dire une succession de points (ou encore de vecteurs d'état) dans l'espace des phases correspondant, où chacun est déterminé de façon univoque par le précédent. Le déterminisme inhérent au système contraint cette trajectoire à se trouver dans une