

Fractales en génie chimique : de biologie en technologie chimique et énergétique



Marc-Olivier Coppens

*Professor and Associate Director
of the Multiscale Science and Engineering Center
Rensselaer Polytechnic Institute, Troy, NY, États-Unis*

La géométrie fractale : une nouvelle géométrie pour décrire la nature

Le scientifique franco-américain Benoît Mandelbrot nous a présenté un langage mathématique qui permet de décrire des formes qui semblent irrégulières, rugueuses ou arborescentes, comme celles des montagnes, des arbres ou des poumons. Ces formes, omniprésentes dans la nature, sont difficiles à décrire par la géométrie euclidienne, qui, elle, se base sur les cercles, les plans, et les lignes droites. Pourtant, même dans cette géométrie fractale à première vue compliquée, se cache une symétrie qui simplifie leur description : en agrandissant une partie détaillée d'une côte ou d'un arbre, elle ressemble à une partie à plus grande échelle, et cela indépendamment de l'échelle. La structure d'un arbre ou d'une côte est *auto-similaire*. Elle fait partie d'une classe d'objets que Mandelbrot a appelés *fractales*.

Cette observation même d'une symétrie nouvelle cachée dans de nombreux objets naturels est surprenante. Mais que signifie cette symétrie ? A-t-elle une fonction ? Nous ne pouvons pas répondre à cette question d'une façon générale. Mais, du point de vue de l'ingénieur qui a pour but de résoudre des problèmes d'efficacité énergétique et de production chimique sélective, la géométrie fractale de la nature nous met sur une voie alternative et très intéressante. La géométrie des arbres et des poumons est en effet une vraie *architecture fractale*. Leurs systèmes naturels sont des réseaux qui lient le monde microscopique des cellules – où s'opère par exemple la photosynthèse pour l'arbre, l'échange entre oxygène et CO₂ pour le poumon – au monde macroscopique de l'organe complet.

Le fait que ce réseau est fractal permet de distribuer ou de collecter des molécules, d'un endroit (le tronc ou la trachée) à un grand nombre d'endroits (les tiges feuillées ou les alvéoles) sur une très grande superficie.

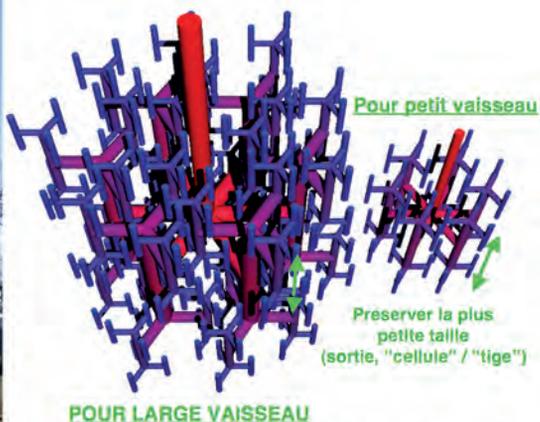
Plus spectaculaire encore, d'un point de vue technologique : cette distribution ou collection moléculaire est uniforme grâce à une distance

presque constante du tronc aux tiges, et la structure organique croît d'une façon autosimilaire. De la sorte, ces structures arborescentes préservent la fonction cellulaire pendant leur croissance. La taille des cellules ne change pas. C'est le nombre de générations dans la division arborescente qui change. En comparant un vieil arbre avec un jeune arbre de la même espèce, la taille des tiges et la fonction des feuilles ne change pas. Le tronc devient plus épais et le nombre de divisions ou de générations d'un niveau de branches au prochain niveau change. On peut dire la même chose à propos des poumons et du système vasculaire qui, depuis le cœur, sert toutes les cellules dans le corps.

En plus, on peut montrer que ces structures sont très efficaces d'un point de vue énergétique ou thermodynamique. L'architecture fractale du poumon est telle qu'il y a un minimum de perte d'énergie utile consacrée à la respiration.

La géométrie fractale au service de la technologie chimique et énergétique

Toutes ces fonctions – la facilité de changement d'échelle, la distribution ou collection uniforme de fluides ou de molécules, et l'efficacité énergétique – sont extrêmement importantes pour la technologie chimique et énergétique. Par exemple, en production chimique, il n'est pas facile de passer de l'échelle de laboratoire à l'échelle supérieure, de quantités mesurées en grammes à des productions mesurées en tonnes. *L'injecteur fractal*, déve-



M.-O. Coppens, U.S. Patent 6,333,019 (2001)
M.-O. Coppens, 2005, *Ind. & Engng Chem. Res.* **44**, 5011-5019.

Illustration 1 : L'injecteur fractal, qui s'est inspiré de la géométrie des arbres et des poumons, distribue un fluide d'une façon uniforme dans un vaisseau facilitant la mise à échelle, et augmentant l'efficacité de l'usage des ressources matérielles et énergétiques.

loppé dans notre laboratoire, s'est inspiré de la géométrie des arbres et des poumons pour distribuer un fluide d'une façon uniforme dans un vaisseau ou réacteur chimique (*illustration 1*).

Cet injecteur ressemble à un arbre inversé. Le fluide (gaz ou liquide) passant par le tronc de l'injecteur sort par les tiges qui sont distribuées dans le volume du réacteur (*illustration 2*). Puisque la distance depuis l'entrée jusqu'à chaque sortie est la même, la vitesse du fluide sortant est la même partout. On peut ainsi mélanger ce fluide avec les contenus du réacteur sans même employer de système mécanique (tournant) qui consommerait de l'électricité. La seule perte d'énergie utile provient de la faible diminution de pression dans l'injecteur même.

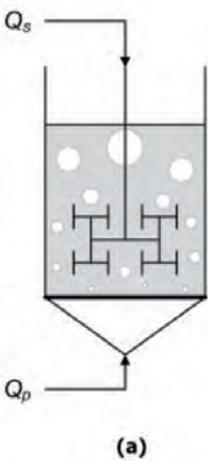


Illustration 2 : (a) Schéma d'un injecteur fractal immergé dans un réacteur gaz/solide ou gaz/liquide. Un flux Q_s est introduit par l'injecteur fractal ; un flux additionnel Q_p est introduit par un distributeur au fond.

(b) et (c) Photos de prototypes d'injecteur fractal à dimension fractale $D = 2,6$.

Entre le fluide sortant de chaque issue et les particules ou le liquide dans le réacteur, le contact est excellent, ce qui permet d'obtenir une très haute efficacité de réactions, de séchage ou d'autre procédé que l'on veut

faire parvenir dans le vaisseau. Par exemple, si l'injecteur est immergé dans un vaisseau rempli de particules solides fluidisées par un flux distribué par un distributeur au fond du vaisseau, le flux additionnel injecté par la structure fractale permet de mieux contrôler les procédés dans le vaisseau, d'une façon locale et uniforme (*illustration 2*).

Ces particules solides peuvent être un produit granulaire à sécher, un catalyseur de réactions en phase gazeuse ou liquide, ou encore du charbon ou de la bio-masse à convertir. En effet, ces lits fluidisés sont très communs en technologie chimique et énergétique.

Finalement, on note que la dimension fractale de cet injecteur, D , est supérieure à 2 (plus qu'une surface euclidienne) mais inférieure à 3 (moins qu'un volume classique). Dans les illustrations 1 et 2, à chaque génération, les branches ont une longueur qui est la moitié ($1/2$) de la branche précédente, alors qu'il y en a six fois plus.

Ainsi, la dimension est $D = \log(6)/\log(2) \simeq 2.6$. De ce fait, l'injecteur occupe beaucoup moins d'espace qu'un volume tridimensionnel.

L'autosimilarité de l'injecteur permet de l'employer pour distribuer un fluide d'une façon similaire dans des vaisseaux ou réacteurs de tailles différentes. Très différent de la façon traditionnelle à changer d'échelle, on changera le nombre de générations dans la structure arborescente de l'injecteur, en gardant la taille des tiges terminales qui contiennent les issues (*illustration 1*). Ainsi, on préserve l'hydrodynamique autour des issues, ce qui permet d'obtenir une meilleure conversion et sélectivité de réactions chimiques dans le vaisseau.

La pile à combustible et la géométrie fractale

Un nouvel exemple où la géométrie fractale peut apporter une application est la pile à combustible, où la combustion électrochimique d'un carburant convertit l'énergie chimique en électricité.

Une pile à combustible se comporte de plusieurs cellules "sandwich", contenant une cathode catalytique, une membrane, et une anode catalytique. Dans un type de piles à combustible très étudié, le carburant est l'hydrogène. L'hydrogène est introduit à l'anode, où il est décomposé en protons et en électrons à l'aide d'un catalyseur poreux ($H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$). Les protons passent de l'anode à la cathode par une membrane composée de polymères chargée et hydratée. À la cathode, de nouveau à l'aide d'un catalyseur poreux, ces protons réagissent avec l'oxygène qui y est introduit, soit pur, soit comme composant de l'air, et des électrons. Cette réaction électrocatalytique ne produit que de l'eau ($2H^+ + 2e^- + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow H_2O$).

Ainsi, cette pile est potentiellement très propre, si l'hydrogène est produit de sources renouvelables. Les électrons circulants par l'extérieur de la cellule produisent un courant électrique que l'on peut employer comme source électrique.

L'efficacité thermodynamique d'une pile à combustible est beaucoup plus élevée que celle d'un moteur à combustion interne, parce que les réactions sont électrochimiques. Pourtant, les catalyseurs utilisés à la cathode et à l'anode contiennent typiquement des métaux précieux, comme le platine, et sont donc chers. Aussi, particulièrement du côté de la cathode, les molécules d'oxygène et d'eau ont des difficultés à diffuser rapidement dans les pores du catalyseur, ce qui réduit l'efficacité des réactions d'une façon considérable.

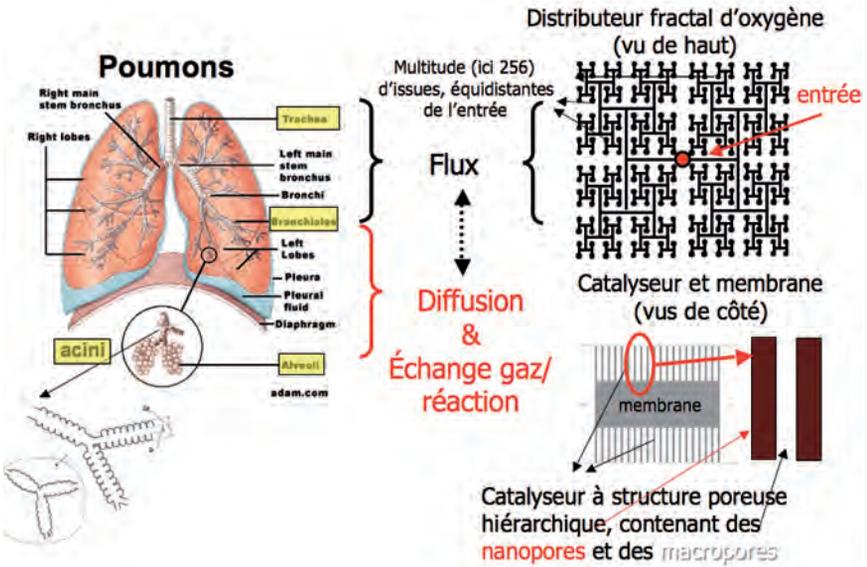
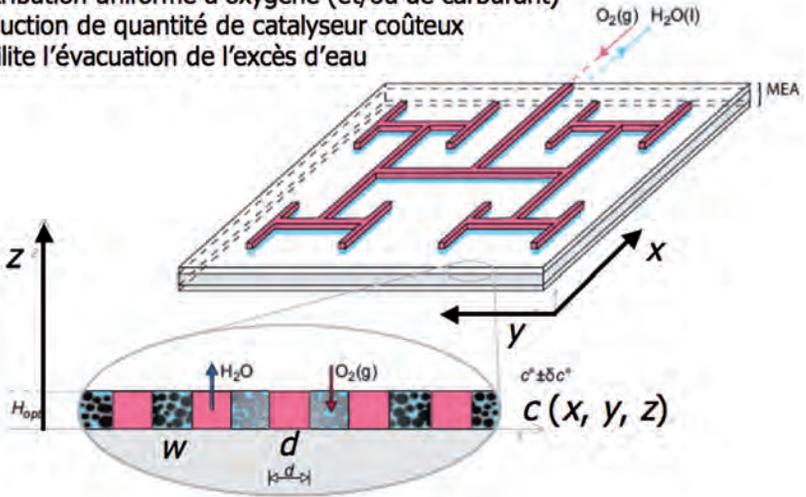


Illustration 3 : Pile à combustible inspirée par la structure fractale du poumon.

Nous avons proposé une pile à combustible qui s'inspire de l'architecture du poumon (illustration 3). Dans le poumon, l'air est distribué très facilement vers une très grande surface, par la voie d'une structure fractale arborescente. En employant un distributeur fractal quasi-bidimensionnel ($D = 2$) pour distribuer l'air ou l'oxygène, on parvient à la distribuer d'une façon uniforme à la surface de la cathode. Dans la cathode, la structure poreuse du catalyseur, où les réactions chimiques convertissant l'oxygène et les protons en eau s'effectuent, peut être optimisée pour faciliter le transport des molécules (illustration 4). Semblable à la structure hiérarchique de l'acinus pulmonaire qui contient les alvéoles, ou à celle d'une feuille à structure vénale, on peut ainsi minimaliser la résistance et maximaliser l'utilisation du catalyseur. Cela permet d'utiliser beaucoup moins de catalyseur coûteux et d'augmenter l'efficacité énergétique de la pile à combustible.

Avantages:

- distribution uniforme d'oxygène (et/ou de carburant)
- réduction de quantité de catalyseur coûteux
- facilite l'évacuation de l'excès d'eau



S Kjelstrup, MO Coppens, JG Pharoah, P Pfeifer, *Energy & Fuels* **24**, 5097-5108 (2010).

Illustration 4 : Schéma de pile à combustible, contenant un distributeur fractal pour la distribution d'oxygène à la cathode ; une structure fractale pourrait également être utilisée pour enlever l'eau produite. L'image montre aussi la structure hiérarchique optimisée du catalyseur poreux.

Pour nous résumer

Les réseaux fractals, comme les arbres botaniques, les poumons ou le cerveau, représentent un moyen très ingénieux de lier les échelles microscopiques et macroscopiques, d'une manière qui permet également l'adaptation en taille d'unités chimiques, ainsi qu'une distribution et un rassemblement uniforme et robuste. Les matériaux à surface fractale permettent de contenir de très grandes surfaces dans un petit volume. En certains cas mêmes, ces structures fractales sont la solution qui permet d'atteindre le plus haut rendement thermodynamique.

Nous pouvons donc mettre en pratique cette géométrie fractale biologique dans la conception et la construction de réacteurs chimiques, de cellules à combustible plus efficaces, et de nouveaux matériaux fonctionnels.

Benoît Mandelbrot nous a appris à observer la nature par d'autres yeux. Il a développé un langage mathématique qui permet de décrire sa rugosité, ses cascades et ses réseaux arborescents. Aux yeux d'un ingénieur chimiste, qui fait face aux problèmes de durabilité (efficacité énergétique, ressources décroissantes, selectivité de conversions chimiques, santé et environnement), cette géométrie fractale de la nature apparaît non seulement belle, mais également très utile comme source d'idées pour la conception de solutions innovantes en technologies chimiques et énergétiques.

M.-O. C.

Pour en savoir (un peu) plus

B. Mandelbrot, *The Fractal Geometry of Nature*

W.H. Freeman, San Francisco 1983.

Site Web du groupe de recherche *Nature Inspired Chemical Engineering*

(Coppens Research Group)

<http://nice.che.rpi.edu>

M.-O. Coppens, *Scaling-up and -down in a nature-inspired way*,

Ind. & Engng Chem. Res. 44, 5011-5019 (2005).

S. Kjelstrup, M.-O. Coppens, J.G. Pharoah, and P. Pfeifer, *Nature-inspired energy- and material-efficient design of a polymer electrolyte membrane fuel cell*,

Energy & Fuels 24, 5097-5108 (2010).