

CORPS, OISEAU, AVION ET ARBRE

Marcel Lacroix

Université de Sherbrooke

(juillet 1997)

On ne peut demeurer indifférent face aux multiples designs de la nature. Les formes qui nous fascinent, voire qui nous séduisent, dans les arbres, les fleurs, les oiseaux, les animaux et le corps humain sont en réalité le résultat de designs pratiques et hautement efficaces dessinés par des millions d'années d'évolution.

Regardons par exemple la jambe. Sa masse, comme c'est le cas chez tous les animaux, est concentrée à l'extrémité près du corps de sorte à réduire l'effort nécessaire pour vaincre son inertie. Cette caractéristique du design est d'autant plus remarquable (et importante) chez les sprinters ou les animaux rapides (cheval, jaguar). Leurs jambes sont massives et musclées au niveau de la cuisse et se terminent par un pied (ou une patte) léger presque fragile. Afin de minimiser l'inertie et de maximiser la portée du pied, la hanche possède trois degrés de liberté alors que le genou n'en possède qu'un seul. Il en va de même pour le système épaule-coude-main. Ces concepts d'inertie, de portée et d'économie de degrés de liberté dictent la structure des os et des articulations. En y ajoutant les muscles pour assurer le mouvement, un réseau sanguin pour alimenter les muscles et enfin la peau pour envelopper et protéger le tout, on obtient le membre. Décortiquée ainsi, la beauté que nous percevons dans une jambe galbée n'est autre qu'un design optimal.

Le design dans la nature est assujéti aux critères les plus sévères et contraignants qui soient. Et, sans aucun doute, les plus exigeantes sont les méthodes de reproduction et de croissance qui limitent le type de matériau utilisé, les mécanismes possibles et les structures résultantes. Par contre, la nature ne craint pas la complexité du design. Contrairement à l'ingénieur, la nature dispose de beaucoup de temps pour améliorer graduellement un design. L'ingénieur doit de plus trouver un équilibre entre les coûts de production et de maintenance et la performance de sorte que les composantes qu'il conçoit ont en général des formes faciles à produire plutôt que la forme idéale. Par exemple, une articulation artificielle est toujours plus simple et symétrique que l'articulation organique à remplacer parce que cela facilite sa production et peut-être aussi parce que l'on ne comprend pas parfaitement bien son fonctionnement.

Je ne saurais énumérer ici les plus grandes inventions de la nature mais je me risque tout de même à en souligner quelques-unes. Comme je le mentionne plus loin dans la section portant sur la deuxième loi de la thermodynamique, la matière a tendance à s'organiser en systèmes hiérarchisés. N'échappant pas à cette loi, la nature a développé, il y a plus de trois milliards d'années, des organismes multicellulaires à partir d'organismes unicellulaires. Cette formidable invention a permis à la vie de s'éclater et d'atteindre le niveau de complexité que nous connaissons aujourd'hui.

La nature a aussi inventé la chlorophylle permettant aux plantes de transformer l'énergie solaire en énergie chimique pour s'alimenter et croître. Afin d'assurer leur reproduction, les fleurs ont appris à se maquiller de couleurs vives et à produire de la nourriture. Elles attirent ainsi des insectes qui, butinant d'une fleur à l'autre, les fécondent probablement à leur insu.

Chère aux insectes et aux crustacés, la carapace protectrice est économique en termes de poids et de matières vivantes. Elle a toutefois un inconvénient majeur : elle ne permet pas aux organismes qu'elle abrite de grandir. De là, certaines espèces de poissons se sont développées avec à la fois un squelette interne et une carapace externe. Petit à petit, cette carapace devint plus encombrante que protectrice et elle finit par disparaître (la lourde armure des preux chevaliers médiévaux connut le même sort). Cette évolution a favorisé l'émergence des vertébrés (poissons, amphibiens, reptiles, oiseaux et mammifères). Notre cage thoracique est le dernier modèle de carapace mis au point par l'évolution naturelle. De même, les écailles et les nageoires chez le poisson se transformèrent en plumes et en ailes chez l'oiseau. Ces ailes se muèrent à leur tour en membres chez le mammifère.

Mais selon moi une des inventions les plus surprenantes et les plus belles (déjà on n'échappe pas à ce qualificatif) de la nature fut celle de l'oiseau il y a environ 100 millions d'années. Je ne me lasse jamais de les observer en plein vol. Ils sont imbus de grâce, d'agilité et de liberté. Je les envie. Je peux nager comme un poisson, marcher comme un bipède mais je ne peux pas voler comme un oiseau. Voler est une extravagance de la nature.

L'OISEAU ET L'AVION

En plein vol, le poids de l'oiseau ou de l'avion est compensé par la portance des ailes alors que la traînée est surmontée par la poussée. La poussée est assurée, chez l'oiseau, par le battement des ailes et dans l'avion par les moteurs. Le défi principal de la nature ou de l'ingénieur en aérodynamique est alors de concevoir une machine volante dont le rapport de la portance à la traînée est maximal. Pour un avion, ce rapport varie de 10 à 40. Chez l'oiseau, il prend des valeurs entre 6 et 24. Ce résultat peut sembler surprenant à prime abord mais il faut dire que des critères beaucoup plus contraignants ont dicté la conception, ou plutôt l'évolution, de l'oiseau. Par exemple, l'oiseau doit être en mesure de voler entre les branches, de se poser en douceur dans un arbre, de construire un nid et de pondre des œufs. J'imagine la tête que ferait un ingénieur à qui on imposerait de respecter ces critères dans la conception d'un engin volant... Comparons tout de même les besoins énergétiques d'un oiseau et d'un avion dont le rapport portance/traînée est le même soit 15. Ce rapport est typique chez les gros transporteurs aériens.

L'oiseau a une masse de 300 g soit un poids d'environ 3 N. Puisque la portance compense le poids, on en déduit que la traînée sera de $3/15 = 0.2$ N. Si l'oiseau se déplace à 15 m/s, la puissance requise sera de $0.2 \text{ N} \times 15 \text{ m/s} = 3 \text{ W}$. Supposons maintenant que cet oiseau migre dans le sud et entreprenne un vol de 3 000 km sans refaire le plein (sans manger). L'énergie dépensée pour vaincre la traînée est donnée par le produit de la force de traînée et de la distance parcourue soit $0.2 \text{ N} \times 3.0 \times 10^6 \text{ m} = 0.6 \text{ MJ}$. Cette énergie est emmagasinée sous forme de gras. En pratique, les matières grasses fournissent 40 MJ par kilogramme mais environ 7.5 % de l'énergie chimique est convertie en énergie mécanique (2^e loi de la thermodynamique). Le reste est dissipé en chaleur. Trois (3) MJ par kilogramme de gras sont donc convertis en énergie utile et la masse de gras requise pour couvrir 3 000 km sera $0.6 \text{ MJ}/3 \text{ MJ/kg}$ soit 200 g. Dans ces calculs, très approximatifs, j'ai supposé que la masse de l'oiseau demeurerait constante. En réalité, l'oiseau subira une perte de masse relativement importante. Si au départ sa masse est disons 400 g, à l'arrivée elle ne sera plus que 200 g de sorte que sa masse «moyenne» sera environ 300 g.

Puisque la traînée ne dépend que du poids et du concept aérodynamique de l'oiseau, et puisque le travail est le produit de la force et de la distance, la vitesse affecte peu la consommation de carburant pour couvrir une distance donnée. Elle influence toutefois la puissance débitée.

On sait d'autre part qu'il faut 1 kg de masse musculaire chez l'oiseau pour développer 50 W. Pour débiter 3 W, comme c'est le cas ici, il faut donc $3W/50W/kg = 0.06$ kg de muscle. Cela représente 30 % de la masse totale de l'oiseau (0.06 kg/0.2 kg). 70 % de la masse restante comprend les autres muscles, les matières grasses, la tête, les systèmes respiratoire, de circulation et de digestion, les pattes et les plumes.

Cet exemple démontre à quel point voler est difficile presque qu'une anomalie dans le monde vivant. Concevoir une machine vivante volante est à la limite du possible.

À cause des effets d'échelle de grandeur, il est moins difficile pour des petits organismes de voler. La nature a conçu les oiseaux principalement pour voler. Le vol sur place consomme davantage d'énergie. En fait, il nécessite environ deux fois plus d'énergie que le vol en déplacement. Il n'est pas surprenant alors que les organismes vivants réussissant cet exploit pèsent moins de 20 g (oiseau-mouche, insecte).

Examinons maintenant le cas de l'avion. Un inconvénient majeur du gros transporteur vis-à-vis l'oiseau est sa grande masse. En revanche, sa conception est assujettie à des contraintes beaucoup plus simples. On ne demande pas à l'avion de se poser en douceur sur une branche ou de pondre un œuf. De plus, le rapport puissance débitée/masse des moteurs est beaucoup plus élevé que celui des muscles et l'efficacité de la conversion de l'énergie chimique en énergie mécanique est supérieure.

Supposons que la masse de l'avion soit 150 tonnes. Le rapport portance/traînée est, rappelons-le, 15. Le poids est alors 1.5×10^6 N et la traînée sera le quinzième du poids soit 100 000 N. Pour parcourir 3 000 km, il faudra dépenser $100\,000\text{ N} \times 3 \times 10^6\text{ m} = 300\,000\text{ MJ}$. Les turbines à gaz convertissent environ 33 % de l'énergie chimique en énergie utile soit $1/3 \times 40\text{ MJ}$

par kilogramme de combustible. La masse de combustible requise sera alors $300\,000 \text{ MJ} / 1/3 \times 40 \text{ MJ/kg} = 22.5$ tonnes soit 15 % de la masse totale de l'avion. Si l'avion se déplace à 250 m/s, la puissance requise sera $100\,000 \text{ N} \times 250 \text{ m/s} = 25 \text{ MW}$. En régime de croisière, le rapport puissance/masse des turbines à gaz est d'environ 6 kW/kg. La masse des moteurs représente alors ici 4 tonnes, soit 3 % de la masse totale de l'avion.

PUISSANCE DE CRÊTE

Afin de s'arracher du sol, l'oiseau comme l'avion doit disposer, au moment du décollage, d'une puissance de crête égale à plusieurs fois la puissance de croisière. Pour ce faire, l'oiseau compte sur des fibres musculaires rouges et blanches. Les tissus musculaires rouges doivent leur couleur foncée à la présence d'une protéine appelée myoglobine. Cette protéine participe au procédé chimique dans lequel les matières grasses combinées à l'oxygène libèrent de l'énergie. Environ 20 % de cette énergie est convertie en énergie utile alors que 80 % est dissipée en chaleur. Les fibres musculaires rouges qui nécessitent un apport constant d'oxygène via les systèmes respiratoire et de circulation sont donc sollicitées lors d'un effort constant et prolongé. Les fibres musculaires blanches utilisent, d'autre part, de l'énergie moins concentrée stockée dans le glycogène. Les réactions chimiques se produisent sans la présence d'oxygène de sorte que les fibres blanches peuvent développer une grande puissance pendant une courte période de temps. Ce sont les fibres blanches qui sont sollicitées au moment du décollage et les fibres rouges en régime de croisière.

Les poulets sont les descendants d'une espèce d'oiseaux qui volaient occasionnellement, se déplaçant le plus souvent sur leurs pattes. C'est la raison pour laquelle la chair de leur poitrine est blanche alors que celle des cuisses est foncée. La chair du lapin est blanche car cet animal compte sur sa vitesse explosive pour échapper à ses prédateurs alors que la chair du lièvre est foncée puisque ce dernier réussit à semer ses prédateurs en courant de longues distances.

Un athlète peut déployer, pendant quelques dizaines de secondes, une puissance de 1 kW. Après une minute, le combustible anaérobie (sans oxygène) est épuisé et la puissance chute à 700 W. Au bout de deux minutes environ l'athlète peut poursuivre son activité mais en débitant seulement 400 W grâce à la consommation aérobie (avec oxygène). Il ne pourra fournir un

nouvel effort court et violent que lorsque sa réserve de combustible anaérobie (glycogène) se sera renouvelée.

Le sprinter olympique (courses de 100 m et 200 m) compte sur le procédé anaérobie pour réaliser ses performances alors que le coureur de fond (courses de 1 500 m et plus) s'appuie sur le procédé aérobie. Il n'est pas surprenant alors que le gabarit de ces athlètes soit si différent. Mais le coureur de 800 m, qui couvre cette distance en moins de 2 minutes, dépend à la fois de la combustion anaérobie et de la combustion aérobie. Il doit être à la fois sprinter et coureur de fond. C'est la raison pour laquelle la course de 800 m est, selon les athlètes, la course la plus difficile.

À titre d'information et de comparaison, je présente, dans le tableau suivant, l'énergie spécifique et la puissance spécifique de différents combustibles et systèmes de stockage.

ÉNERGIE SPÉCIFIQUE (kJ/kg)

Marée motrice	0.04
Ressort d'une montre bracelet	0.04
Ancienne catapulte	0.1
Saut d'une puce	1.5
Catapulte moderne	10.0
Roue d'inertie (250 m/s)	25.0
Eau dans une bouilloire (100°C)	39.0
Accumulateur électrique	80.0
Eau dans une bouilloire (230°C)	230.0
Poudre à canon	2.8×10^3
Combustible à fusée	9.0×10^3
Hydrocarbures (gaz, huile, etc.)	40.0×10^3
Réaction de fusion nucléaire	24.0×10^9

PUISSANCE SPÉCIFIQUE (kW/kg)

Muscle	0.05
Batterie plomb/acide	0.18
Moteur électrique	0.25
Moteur à piston	1.5
Turbine à gaz	6.0

Même si sa puissance spécifique ne représente que le sixième de celle de l'oiseau, l'homme a néanmoins réussi à voler à bord d'appareils à propulsion humaine. Il a même traversé la Manche ainsi. Son handicap musculaire était compensé par une voilure considérablement accrue (faible vitesse) et une meilleure efficacité de propulsion (engrenages).

L'ARBRE ET LE GÉNIE MÉCANIQUE

Si l'arbre était l'œuvre de l'homme, il aurait probablement été imaginé et conçu par un ingénieur mécanicien. En effet, en étudiant cette plante, on retrouve les principaux éléments qui constituent le bagage technique de l'ingénieur mécanicien : structures, mécanique des fluides, transfert de chaleur et de masse, matériaux, thermodynamique et contrôle de systèmes.

L'arbre est une structure complexe dont la fonction principale est de supporter un réseau de feuilles afin de capter le maximum de rayonnement solaire tout en minimisant le coût des matériaux vivants. Cette fonction est davantage compliquée par la position changeante du soleil dans le ciel et la compétition féroce entre les plantes pour une place au soleil. Le coût de la structure par unité de surface des feuilles est minimal si la plante est compacte. Toutefois, à certains moments de la journée, une grande partie de la surface totale des feuilles sera cachée du soleil par son propre feuillage. À l'opposé, une ramure épanouie permet une exposition solaire soutenue mais le coût est plus grand. Une structure élevée coûte très cher, mais elle peut être l'avantage décisif dans la course au soleil. Pour pousser dans la forêt, une espèce de plante doit être un grand arbre, une plante grimpante qui utilise la structure des autres ou une plante aérienne. Les autres plantes plus petites, qui poussent au sol, doivent s'adapter, soit en utilisant la faible lumière qui les éclaire ou encore en s'alimentant de matières vivantes ou mortes photosynthétisées par d'autres plantes.

Non seulement la surface des feuilles permet-elle de capter la lumière solaire mais en plus elle favorise l'absorption de gaz carbonique. On saisit davantage la nécessité pour la plante d'offrir la plus grande surface de feuilles quand on considère que la concentration de gaz carbonique dans l'atmosphère est relativement faible (environ 0.03 % soit 500 fois plus faible que celle de l'oxygène). En utilisant la vapeur d'eau et le gaz carbonique ainsi que la lumière solaire, la plante produit des hydrates de carbone qui assurent son alimentation et sa croissance.

L'absorption de gaz carbonique s'effectue grâce à des millions de pores appelés stomates qui tapissent la surface de la feuille. Sans un système sophistiqué qui contrôle l'ouverture de ces pores, la plante perdrait très rapidement son eau et ses matières nutritives et succomberait inexorablement par temps sec et chaud. Dans de telles conditions, l'ouverture des milliards de stomates est continuellement ajustée afin de régler l'évaporation de l'eau qui assure le refroidissement et l'alimentation de la plante sans provoquer toutefois une déshydratation fatale.

Un des aspects le plus intrigant et incompris chez l'arbre relève de la mécanique des fluides. Certains arbres (le séquoia de l'ouest américain par exemple) atteignent une hauteur vertigineuse de 120 mètres. Face au problème de pomper de l'eau à une telle hauteur, l'ingénieur mécanicien suggérerait sans doute une des deux solutions suivantes : La première, consisterait à installer une pompe dans les racines pour pousser l'eau jusqu'à la cime. La seconde proposerait de placer, à tous les 10 mètres de hauteur environ, une pompe à suction. L'arbre, toutefois, ne retient aucune de ces solutions. Il semble que l'eau soit plutôt déplacée vers le haut le long des fibres un peu comme si un fil de coton était tiré à travers un tube. Dans ces conditions, la longueur du fil d'eau en tension peut atteindre 300 mètres !

D'un point de vue thermodynamique, l'arbre est un système fort efficace. C'est sans doute la machine dont le rendement est le plus élevé pour convertir l'énergie solaire et alimenter les réactions chimiques complexes qui produisent les hydrates de carbone nécessaires à sa croissance. Par comparaison, les meilleurs capteurs solaires font piètre figure. À la surface du soleil, la température est environ $7\,000^{\circ}\text{C}$ (énergie de grande qualité) alors que dans le capteur solaire elle n'est, au plus, 80°C (énergie de faible qualité). De surcroît, seulement 20 % de l'énergie thermique captée peut être convertie en énergie utile.

L'arbre est aussi un exemple remarquable de matériau composite. Les fibres de bois, faite de cellulose, ressemblent à de petits tubes au sein desquels circulent la sève. Ces fibres sont soudées ensemble avec une substance appelée lignine. Afin de mieux résister aux efforts de tension, les fibres se déploient hélicoïdalement le long de l'axe. Ces caractéristiques uniques

permettent aux arbres, mêmes ceux dont la ramure est épaisse et épanouie, de résister aux formidables efforts de tension et de compression subis lors de vents violents.