

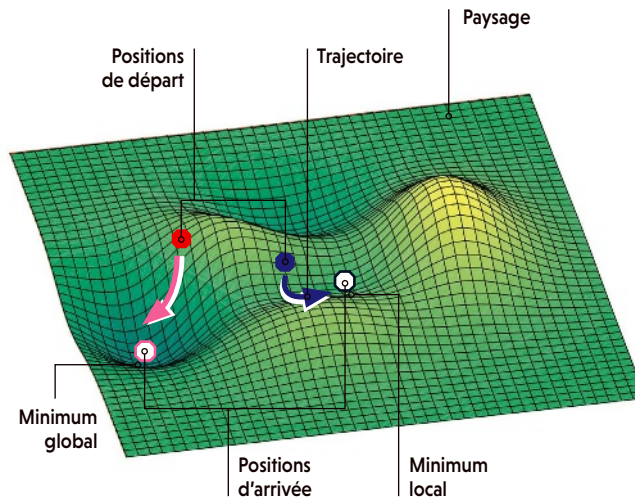
ALGORITHMES D'OPTIMISATION

Pour illustrer les méthodes d'optimisation, considérons un système dépendant de deux paramètres et définissons une fonction de coût, la grandeur à optimiser. Nous pouvons alors visualiser ce problème comme un « paysage » dont les deux variables sont les coordonnées et la fonction de coût est l'altitude.

Un point sur ce paysage correspond à une configuration du système et plus sa hauteur est faible, plus le système est optimisé. Le problème revient à trouver le minimum dans un paysage, qui n'est évidemment pas connu *a priori*. Différentes approches d'optimisation ont été développées au cours des dernières décennies.

DESCENTE DE GRADIENT

Cet algorithme est le plus simple et le plus utilisé. Il consiste à calculer les variations de la fonction de coût autour du point de départ quand on varie les paramètres. Cela revient à suivre la pente descendante la plus forte dans le paysage. Une « vallée » – un minimum – finit toujours par être atteinte. Mais ce minimum « local » n'est peut-être pas le plus profond de tout le paysage (à l'image de la trajectoire bleue ci-contre).

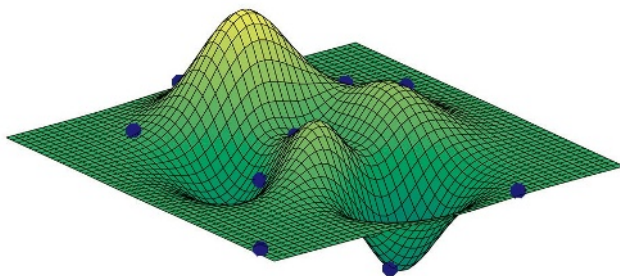


ALGORITHME GÉNÉTIQUE

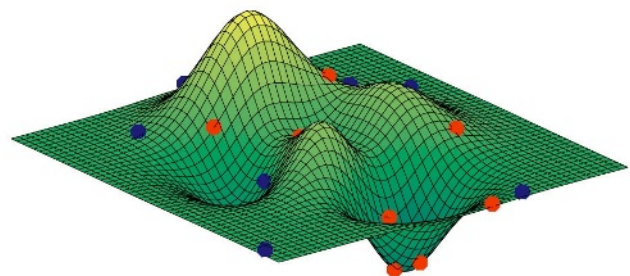
L'idée s'inspire de la biologie. On commence par une population dont on encode en binaire (une suite de 0 et de 1) les paramètres pour en faire une sorte d'ADN. Le matériel « génétique » de cette population est combiné de façon à créer de nouveaux individus, dont on ne garde que ceux qui améliorent la fonction de coût. La démarche, assez arbitraire dans le mélange des caractéristiques, conduit à un algorithme peu efficace.

ALGORITHME ÉVOLUTIONNAIRE

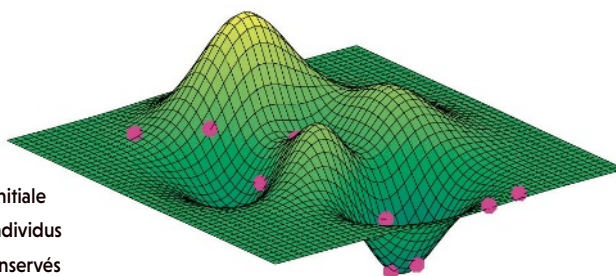
1 INITIALISATION DE LA POPULATION



2 GÉNÉRATION DE NOUVEAUX INDIVIDUS



3 SÉLECTION DE LA NOUVELLE GÉNÉRATION



- Population initiale
- Nouveaux individus
- Individus conservés avec une meilleure fonction de coût

Une population d'individus parents est aléatoirement répartie sur le paysage 1. Des individus « mutants » sont créés par le déplacement d'un parent d'un pas dans la direction vers le meilleur individu et d'un pas dans une direction inspirée par deux individus choisis au hasard 2. Ce dernier élément permet d'explorer un peu le paysage en intégrant un aspect aléatoire à la démarche tout en tendant vers une solution déjà plus efficace. Si le nouvel individu, « l'enfant », est meilleur que le parent, il le remplace dans la population 3. Le processus est itéré sur la nouvelle population jusqu'à obtenir une solution optimale. En partageant de l'information entre individus, cette approche reproduit certaines caractéristiques de l'évolution sexuée.

> un miroir de Bragg dont les indices de réfraction sont situés dans les limites de ce que nous avions prescrit et avec la couche la plus externe présentant l'indice optique le plus élevé.

Lors de cette étude, nous avons augmenté progressivement le nombre de couches de la structure à optimiser. Jusqu'à 20 couches, le résultat était parfait. Au-delà, on a vu émerger un certain désordre, signe que le problème devenait difficile à traiter pour les algorithmes, puisqu'il s'agissait alors de trouver un optimum dans un espace à 40 dimensions (2 paramètres pour chaque couche, l'épaisseur et l'indice).

Quand nous avons imposé aux algorithmes de réaliser un miroir qui réfléchit une longueur d'onde donnée mais qui commence par l'indice optique le plus bas, nous avons observé un résultat étonnant. Nous obtenions des miroirs de Bragg, mais avec une première couche deux fois plus épaisse. Cette solution se comprend bien, car, en général, une couche ayant un indice intermédiaire entre l'air et le milieu d'indice haut constitue un antireflet, exactement comme celui que l'on trouve sur des verres de lunettes. Un tel antireflet sur un miroir de Bragg agirait de façon contraire à l'objectif... Cependant, la double épaisseur de la première couche (correspondant à la longueur d'onde divisée par deux) fait presque oublier sa présence d'un point de vue optique. Et l'on retrouve effectivement cette structure chez certains scarabées bijoux

exactement comme sur la casside dorée. Cette structure est intéressante parce qu'elle est typiquement modulaire: les différentes longueurs d'onde qui composent la lumière blanche sont réfléchies à des endroits distincts de la structure (voir l'encadré page 56). Chaque partie du système a un rôle spécifique, même si elle n'est pas strictement indépendante du dispositif global.

Nous nous sommes ensuite penchés sur le cas du morpho. Des outils numériques assez simples sont capables de calculer numériquement comment la lumière se réfléchit sur des structures périodiques – les réseaux de diffraction – telles celles en forme de sapins présentes sur les ailes des morphos. Ces structures sont comparables à des empilements de blocs de chitine d'épaisseur et de largeur différentes entourés d'air. À partir de ces algorithmes, nous avons cherché comment disposer des blocs suivant un motif périodique de façon à réfléchir le bleu et à le diffracter au maximum, tout en conservant une réflexion spéculaire le plus réduite possible, et sans ajouter d'autres contraintes.

Les calculs ont produit une structure qui juxtapose des empilements réguliers de blocs de chitine. On parle de «disposition interdigitée» (comme l'entrelacement des doigts quand on joint les deux mains). La ressemblance avec les sapins caractéristiques des morphos est assez lointaine. Cette configuration est responsable de l'annulation importante de la réflexion spéculaire. À la longueur d'onde de 450 nanomètres, la structure est capable de réfléchir 98% de la lumière, mais exclusivement suivant des modes de diffraction, et une quantité négligeable en réflexion spéculaire, d'habitude dominante. D'un point de vue optique, cette architecture est bien meilleure que celle du papillon. Peut-on néanmoins retrouver celle du papillon?

Pour ce faire, nous avons diminué l'importance des contraintes optiques pour inclure d'autres critères, comme la légèreté de la structure et des contraintes de fabrication (il faut bien que les blocs soient situés l'un au-dessus de l'autre pour tenir ensemble). En imposant un compromis entre propriétés optiques et mécaniques, nous avons retrouvé des structures qui ressemblent à celles du morpho (voir l'encadré page 57). Par ailleurs, ce résultat montre que l'optimisation numérique est aussi un outil pour mieux comprendre les structures naturelles: si nous obtenons une structure existante, c'est que nous avons probablement compris les contraintes qui l'ont fait naître, alors que sans cette approche, nous en serions en général réduits à émettre des hypothèses sans vraiment pouvoir les vérifier.

Ayant ainsi constaté que les algorithmes évolutionnaires modernes retrouvent effectivement les structures naturelles, nous avons voulu les tester sur un problème tel qu'on pourrait en >

L'optimisation numérique est aussi un outil pour mieux comprendre les structures naturelles

(*Chrysochroa fulgidissima*, aux reflets rouges et verts). Sans doute pour des raisons biologiques, l'insecte a comme contrainte de commencer par le milieu d'indice faible, et cette contrainte conduit à l'émergence d'une première couche caractéristique d'épaisseur double.

Nous avons alors compliqué le problème en cherchant un système multicouche qui réfléchit un spectre plus large que celui d'un miroir de Bragg, toujours avec le même intervalle d'indices de réfraction. Là encore, les algorithmes ont retrouvé la solution du miroir à gradient,