

d'un entier et le problème du voyageur de commerce, qui consiste à déterminer le plus court chemin reliant plusieurs villes données, sont des problèmes de classe non- P (bien que cela n'ait pas encore été démontré).

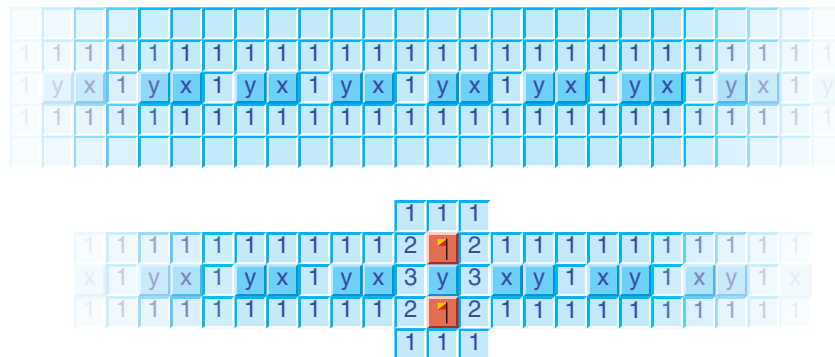
Pourquoi prouver qu'un problème est de classe non- P est-il si difficile ? Parce qu'il faut traiter tous les algorithmes possibles – et non pas un seul – et montrer qu'aucun ne résout le problème en un temps polynomial. Aujourd'hui, on sait qu'une vaste catégorie de problèmes candidats à la classe non- P sont sur un pied d'égalité : si l'un d'eux peut être résolu en un temps polynomial, alors tous peuvent l'être. Ces problèmes ont un comportement polynomial non déterministe, c'est-à-dire qu'avec de la chance – l'algorithme inclut une étape aléatoire –, on peut les résoudre en un temps polynomial ; ils sont de la classe NP .

NON-P, NP ET NP-COMPLET

Les classes non- P et NP sont différentes : un problème est NP dès qu'une solution proposée est bien en temps polynomial. Il est plus facile de vérifier qu'une solution proposée est bien en temps polynomial que de trouver la solution elle-même. Mon exemple favori qui illustre cette différence est le puzzle : en venir à bout peut être difficile, mais vérifier une solution proposée ne requiert souvent que quelques secondes ; le temps d'examiner que chaque pièce s'ajuste aux pièces voisines. Ce temps, environ proportionnel au nombre de pièces, est polynomial. En revanche, on ne peut effectuer un puzzle en un temps polynomial : le nombre de solutions croît plus vite que toute puissance donnée du nombre de pièces.

Beaucoup de problèmes NP ont des temps de traitement équivalents. Un problème NP est dit NP -complet quand l'existence d'une solution en un temps polynomial déterministe, c'est-à-dire sans processus aléatoire, entraîne que tout problème NP a une solution en un temps polynomial. Ainsi, si on peut résoudre un problème NP -complet en un temps polynomial, on peut résoudre tous les problèmes NP en un temps polynomial. Et la question « $P = NP$?» ? Bien que les apparences soient contraires, on peut s'interroger sur l'égalité des classes P et NP . La réponse attendue est négative, cependant, au cas où tous les problèmes NP -complets ont une solution en temps polynomial, alors les deux classes P et NP sont égales.

Nombre de problèmes sont NP -complets : un des plus simples est le problème SAT, qui inclut des circuits booléens.



2. L'électronique du démineur convertit des circuits booléens en position de jeu. Un seul type de carrés (x ou y) cache des mines. Des connexions propagent un signal (y suivi de x) le long de la grille (en haut). Un opérateur *non* inverse l'ordre des x et des y (en bas).

Ces circuits sont construits avec des opérateurs logiques, tel «*et*», «*ou*» et «*non*», qui s'appliquent à des valeurs soit vraies (V), soit fausses (F). Chaque opérateur fournit à partir de valeurs d'entrée une valeur de sortie : par exemple, l'opérateur *non* transforme la valeur V en la valeur F . Le problème SAT s'intéresse à l'existence pour un circuit booléen donné de valeurs d'entrée tel que la valeur de sortie soit V . Pour des circuits simples, le problème est un jeu d'enfants ; il devient ardu lorsque le circuit a un grand nombre d'opérateurs et d'entrées.

LA CONSISTANCE DU DÉMINEUR

Le lien avec le démineur apparaît quand on s'intéresse à la consistance du jeu, c'est-à-dire à la vraisemblance d'une position du jeu. Par exemple, la figure 1 montre une position inconsistante : aucune répartition des mines ne peut mener aux nombres affichés dans les carrés de la grille.

R. Kaye a montré que le problème SAT pour un circuit booléen donné peut-être transformé en un problème de consistance pour une certaine grille du jeu du démineur. En outre, il montre que la conversion des circuits booléens en positions du démineur s'exécute en un temps polynomial. Dans cette conversion, les entrées et les sorties du circuit deviennent une répartition des mines sur la grille : à un carré miné correspond une valeur V , et à un carré sans mine, une valeur F . Les connexions des opérateurs du circuit sont représentées sur la figure 2 : les carrés marqués y ont des valeurs opposées de celles des carrés marqués x . Notons que les chiffres des autres carrés sont corrects que x soit V ou F . Tels des «câbles électroniques», les connexions propagent chaque valeur (V ou F) sur la longueur de la grille.

On représente les opérateurs logiques par le même type de procédé. Par

exemple, la position du démineur de la figure 2 illustre l'opérateur *non* : le bloc du milieu échange les positions de x et de y ; x suit y avant le bloc et précède y après le bloc. Les valeurs des carrés sont inversées, que x soit V ou F , comme après un opérateur *non* dans un circuit booléen.

L'électronique du démineur est plus complexe : elle requiert par exemple de plier ou de scinder des «fils». R. Kaye franchit tous ces obstacles et conclut que quiconque prouve la consistance d'une position donnée du démineur en un temps polynomial, résout aussi le problème SAT du circuit équivalent en un temps polynomial. En d'autres termes, le démineur est un problème NP -complet : une solution en un temps polynomial à la consistance du démineur entraîne que tous les problèmes NP -complets ont des solutions en un temps polynomial : les classes P et NP sont égales. À l'inverse, si l'on montre qu'il n'existe pas de telle solution au problème du démineur, alors les classes P et NP sont différentes. Dans les deux cas, la question serait résolue.

Avant de vous lancer sur votre ordinateur, rappelez-vous que le problème de la consistance du démineur n'est pas une mince affaire : déterminer si une position de jeu est consistante devient vite difficile quand la taille de la grille augmente et la plupart des mathématiciens et des informaticiens pensent qu'il n'y a pas de solution générale traitable en un temps polynomial. De surcroît, l'Institut Clay a imposé des règles strictes au concours : avant d'accepter une solution, elle doit être publiée dans un journal important et être «généralement acceptée» par la communauté mathématique dans les deux années de sa publication.

Richard Kaye, *Minesweeper is NP-Complete*, in *Mathematical Intelligencer*, vol. 22, n° 2, 2000.



Chaleur en perte

ROLAND LEHOUCQ • JEAN-MICHEL COURTY

La chaleur quitte la maison par 1 000 chemins, mais 5 sont plus fréquents.

Avant tout, les murs d'une habitation sont faits pour être solides. Toutefois, quiconque paie des factures de chauffage sait qu'ils doivent être aussi isolants, et déplore que cela ne suffise pas à garder la chaleur dans la maison. Un peu de bon sens physique explique pourquoi, et identifie les cinq déperditions thermiques fréquentes dans une maison.

«Ferme la porte : Il fait froid dehors!» Mille fois entendue, cette exclamation démontre que tout le monde connaît la plus banale des pertes thermiques de la maison : le remplacement de l'air chaud intérieur par de l'air extérieur froid. Un calfeutrage soigneux règle-t-il le problème ? Oui, mais il en crée un autre. Pour que l'habitation soit saine, l'air intérieur chargé en dioxyde de carbone doit souvent être remplacé par de l'air extérieur, riche en oxygène. Selon les normes actuelles pour les habitations, le volume d'air des pièces principales doit être renouvelé une fois par heure. Ainsi 10 kilowattheures par jour sont nécessaires pour réchauffer de 15 °C l'air d'un appartement de 50 mètres carrés si l'on renouvelle l'air une fois par heure.

C'est pour restreindre cette perte, que les bureaux et autres grands ensembles sont souvent équipés d'une ventilation mécanique assortie d'un échangeur de chaleur. Avant d'être intro-

duit dans les pièces, l'air entrant est réchauffé par l'air chaud qui circule dans des tuyaux. Dans certains échangeurs, l'air chaud est évacué par un tuyau qui chemine à l'intérieur du circuit par lequel est introduit l'air froid. De telles «géométries à contre-courant» sont si efficaces que l'air entrant y atteint presque la température de l'air intérieur.

Une fois les portes closes, et les enfants assez disciplinés pour les fermer dès qu'elles sont ouvertes, c'est par les parois que fuit la chaleur. La conduction thermique à travers les murs, le toit, les portes, les fenêtres ou encore le sol, est la deuxième des principales formes de déperdition de chaleur. Expression macroscopique de l'agitation microscopique désordonnée des atomes et des molécules qui constituent la matière, la chaleur se propage de proche en proche par l'intermédiaire des particules qui s'entrechoquent.

Ainsi, quand un milieu plus ou moins conducteur relie deux corps, il transmet la chaleur du corps le plus chaud vers le corps le plus froid. Les températures des deux corps ainsi reliés s'uniformisent en un temps inversement proportionnel à la conductivité thermique du milieu de transmission. Notons toutefois que la géométrie du milieu de transmission influe aussi sur la durée d'uniformisation thermique : quand son épaisseur double ou que sa surface de contact avec l'un des deux corps est réduite de moitié, cette durée double.

La conductivité thermique d'un matériau dépend de sa densité, car plus les particules par unité de volume sont nombreuses, plus les chocs sont fréquents.

De fait, les métaux sont de bien meilleurs conducteurs thermiques que le béton, qui lui-même conduit mieux que le bois. L'acier transmet 52 watts par mètre et par degré, le béton 1,75 et le bois, un bon isolant, seulement 0,06. Les gaz arrêtent aussi très bien la chaleur. L'air, par exemple, a une conductivité de 0,025 watt par mètre et par degré. Toutefois le meilleur de tous les isolants est tout simplement le vide. La raison en est simple : dans une région sans matière, il ne peut pas y avoir de chocs entre particules. C'est pourquoi les bouteilles *Ther-*



Les parois en contact avec l'extérieur, notamment les vitrages, sont une source importante de déperdition de chaleur.

mos, où l'on fait le vide entre les doubles parois, retiennent si bien la chaleur. En fait, le vide serait un isolant parfait, s'il ne laissait pas passer une autre forme d'énergie thermique : le rayonnement infrarouge qu'émet tout corps chaud.

LIMITER LES PERTES PAR CONDUCTION

Que faire pour limiter les pertes par conduction ? Isoler ! Le mieux n'est-il pas de construire sa maison en matériaux isolants ? C'est difficile, car les matériaux isolants sont rarement assez solides pour cela, sauf à prévoir une épaisseur de mur digne d'un château fort. Seul le bois est un isolant à la fois léger et solide, raison pour laquelle il est très utilisé dans les pays nordiques, où abondent les forêts. Très employé, le béton conduit malheureusement bien la chaleur. S'il est massivement utilisé dans une maison, les couches d'isolants sont indispensables. Les isolants courants sont tous à base d'air, le meilleur isolant après le vide.

Ainsi même si le verre est un bon conducteur thermique, la laine de verre est un meilleur isolant, car elle contient 99 pour cent d'air ! Autre exemple, le polystyrène expansé, lui aussi une excellente barrière thermique, renferme une



L'intrusion d'air froid dans les habitations est le principal facteur de déperdition thermique.

multitude de micro-bulles d'air. C'est aussi le cas de la neige gelée dont les Esquimaux construisent leurs igloos.

Malgré sa très faible conductivité thermique, l'air est la troisième cause importante de déperdition thermique dans une maison. Comment est-ce possible, alors que ce gaz est un si bon isolant ? Les apparences sont trompeuses : l'air n'isole que s'il est strictement immobile. Nous savons tous que la sensation de froid est moins forte par un matin calme à -10°C que par un matin venteux où il fait 0°C . En effet, l'air en mouvement transporte la chaleur avec une redoutable efficacité, un phénomène désigné par le terme de convection.

À l'intérieur d'une maison, la convection est soit précieuse, soit gênante. Elle est précieuse quand elle aide à homogénéiser la température des pièces habitées. Ainsi, elle peut être forcée à l'aide d'un ventilateur placé devant une source d'air chaud. D'emploi fréquent dans les hôtels, les ventilo-convecteurs sont bâtis sur ce principe ; la convection qu'ils créent uniformise vite la température, ce qui augmente la sensation de confort. En revanche, dans les convecteurs sans ventilateurs, la convection est naturelle : l'air chaud produit au contact de résistances électriques quitte le radiateur par le haut (ce qui crée un mouvement d'aspiration de l'air froid situé en dessous), s'élève et crée une circulation d'air dans la pièce. À mesure qu'il s'élève, il échange de la chaleur avec l'air ambiant plus froid et se refroidit. Sa densité augmente et il finit par redescendre. En revanche, la convection est gênante quand elle se crée dans les combles. Le phénomène a souvent une ampleur insoupçonnée. Pour le minimiser, il faut limiter les mouvements de l'air, par exemple en déposant une couche épaisse de laine de verre sous le toit.



En l'absence de laine de verre, l'air circule sous les toits et se refroidit. La laine de verre évite les déperditions de chaleur par le toit et limite les pertes par le plafond.

Une fois les murs et le toit isolés, restent les ouvertures. Elles représentent la quatrième grande cause de déperdition thermique. Ainsi, la perte d'énergie à travers une seule fenêtre de 2 mètres carrés est la même que à travers une façade de 100 mètres carrés. Les fenêtres créent de grandes fuites thermiques à cause de leurs carreaux en verre. À épaisseur égale, le verre conduit à peu près aussi bien la chaleur que le béton. Or, les carreaux de verre sont au moins 50 fois moins épais que les murs de béton. Une fois de plus, l'une des meilleures protections est à base d'air : les doubles vitrages. L'intervalle entre les carreaux y est si étroit que l'air se trouve immobilisé ; sa conductivité thermique 100 fois plus faible que celle du verre joue alors à plein son rôle d'isolant. Pour augmenter encore les économies d'énergie, on peut aussi utiliser des vitrages particuliers, dont l'une des parois a été revêtue d'une couche d'oxyde métallique qui bloque le rayonnement thermique.

EFFETS D'AILETTES

Non moins sournoise, la cinquième grande forme de déperdition thermique est la conduction à travers les structures du bâti. Outre son enveloppe, une maison comprend aussi des dalles et des murs porteurs, éventuellement prolongés dans le sol par des fondations ou vers l'extérieur par des balcons. Tous ces éléments structurels sont à la fois en contact avec l'air chaud intérieur et avec l'extérieur. Quand une bonne partie de leur surface est exposée à l'extérieur, ils se comportent comme de véritables ailettes de radiateur.

Ces structures sont des lames métalliques ajoutées sur un radiateur pour augmenter la surface de contact entre le corps chaud et l'air froid. Les ailettes contournées des radiateurs de microprocesseurs illustrent bien le phénomène ; leur surface de contact avec l'air est si grande que leur taille excède celle de la puce qu'elles refroidissent ! Or, un mur de soutènement perpendiculaire à la façade ou à la dalle qui soutient un balcon a le même effet qu'une ailette. Pour le constater, placez-vous à l'intérieur d'une pièce et passez votre main sur un tel mur en la rapprochant de la façade ; vous constaterez qu'à environ 70 centimètres de la façade, la température du mur diminue. C'est là que commence la portion du mur qui diffuse au maximum. Le mur se comporte comme une « ailette » de la maison.

Dans une maison, les pertes dues à la conduction à travers les structures reliant l'intérieur à l'extérieur représentent souvent jusqu'à cinq pour cent des pertes totales. Comment les réduire ? Le mieux est de recourir à une isolation



Les structures, tels les balcons qui sont en contact à la fois avec l'air chaud intérieur et l'air froid extérieur se comportent comme des ailettes de radiateur : elles favorisent les échanges de chaleur et, par conséquent, les pertes thermiques.

extérieure de la façade. Ainsi, les habitants des pays du Nord habillent de bois, d'ardoises, de plaques goudronnées les murs de pierre ou de béton de leurs maisons, et introduisent de la paille dans les interstices.

Suivant la configuration de la maison, certains mécanismes de déperdition de chaleur prédomineront. Les mesures prises pour les réduire devront être adaptées à ces mécanismes particuliers. Une fois les fuites d'air et les pertes de chaleur par conduction maîtrisées, il importe de contrecarrer les effets sournois de la convection. Faire poser des doubles vitrages sera peu utile si des échanges d'air excessifs avec l'extérieur subsistent. La recherche d'un bon équilibre thermique est affaire de compromis.

Roland LEHOUQ est astrophysicien au Service d'astrophysique du CEA. **Jean-Michel COURT** est chargé de recherche au CNRS et travaille au Laboratoire Kastler-Brossel (CNRS, ENS, IPMC)

J. TAINE et **J.-P. PETIT**, *Transferts thermiques*, Dunod.

<http://www.ac-amiens.fr/academie/pedagogie/Seconddegrepofessionnel/sti/Batiment/Confort-thermique/THERMO.html>

http://www.ideesmaison.com/construction/ame/ame_isol1.htm

