

La vérification des programmes d'Ariane

Une gestion d'ensemble de la fiabilité des programmes utilisés sur le lanceur Ariane 5.

En 1996, l'échec du premier vol d'Ariane 5, dû à une erreur de logiciel, plonge l'industrie spatiale européenne dans le désarroi. L'Aérospatiale est alors dotée d'une mission d'architecte logiciel : les ingénieurs doivent gérer l'ensemble des logiciels des équipements du lanceur, alors qu'auparavant, ces logiciels étaient gérés indépendamment.

À l'Institut national de recherche en informatique et automatique (INRIA), nous avons mis au point de nouvelles méthodes de vérification de programmes. Durant la préparation au tir Ariane 502, nous avons appliqué ces méthodes aux programmes du calculateur de bord ainsi qu'à ceux de la centrale à inertie.

Le calculateur de bord traite les données de la navigation, de guidage, de pilotage, du séquentiel de vol (la succession des phases de vol), ainsi que la gestion des étages et des redondances d'équipements. La centrale à inertie calcule, à partir des mesures des gyromètres et des accéléromètres, la position et la vitesse du lanceur. Les programmes qui gèrent l'ensemble de ces tâches sont composés de près de 100 000 lignes.

Le travail principal de l'architecte logiciel est d'assurer la compatibilité entre les différents logiciels dans tous les modes de fonctionnement, y compris en présence de panne, et d'apporter la preuve du bon fonctionnement. Cette preuve

consiste à montrer que le logiciel premièrement ne provoque pas d'erreur d'exécution, par exemple, de dépassement de la capacité de calcul sur des nombres réels ou un conflit d'accès à une variable ; deuxièmement produit les résultats en temps voulu, en particulier, ne boucle pas indéfiniment ; troisièmement donne des résultats conformes à sa spécification lorsque l'exécution du logiciel se déroule sans erreur et sans boucle infinie.

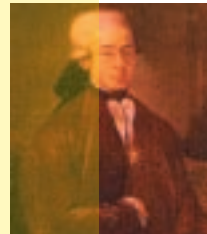
La vérification d'un programme commence par des tests. On réalise des tests unitaires, où chaque sous-programme du logiciel est testé indépendamment, des tests d'intégration qui examinent le bon fonctionnement de l'ensemble du logiciel et, enfin, des tests de validation fonctionnelle, où l'on vérifie le bon fonctionnement en situation réelle, lorsque les capteurs, les vérins qui commandent les tuyères et les logiciels sont interconnectés. Malheureusement ces tests ne permettent pas d'affirmer qu'un logiciel est correct, car on ne teste qu'un sous-ensemble fini des exécutions possibles.

Pour les programmes d'Ariane 5, nous avons utilisé l'analyse statique : nous avons construit un logiciel qui calcule automatiquement des propriétés du programme à vérifier, par exemple, les valeurs possibles des variables du programme lors de son exécution. Si i est une variable entière du programme, une propriété ainsi calculée est, par exemple, que i est un entier premier, impair, compris entre un et dix. Formellement, toutes les propriétés du programme sont solutions d'un système d'équations dont la résolution demande un temps de calcul infini. Aussi, remplace-t-on ce système par un système approché qui ne donne qu'une partie des propriétés du programme, telle que celle mentionnée précédemment. Pour cette

BRÈVES

Le concerto qui n'existait pas

Peut-on ressusciter le génie de Mozart en composant une fausse symphonie? David Cope, de l'Université de Santa Cruz, et son ordinateur ont réalisé ce prodige. D. Cope sépare un ensemble de partitions en une série de fragments. Le programme détermine ensuite comment ces fragments peuvent se combiner. Avec cette grammaire musicale, le programme compose des morceaux dont le style ressemble à celui de Mozart. À s'y tromper...



L'origine du blé

L'épeautre, céréale sauvage dont le blé est issu, a été domestiqué il y a environ 10 000 ans dans la zone du Croissant fertile au Proche-Orient. Où exactement? Manfred Heun, de l'Université agricole de Norvège, a déterminé les différences génétiques entre 260 variétés actuelles d'épeautre. Une dizaine d'entre elles se distinguent, et sont très proches des variétés domestiques. Elles sont originaires du Karacadag, massif montagneux au Sud-Est de la Turquie : là serait le foyer d'origine de l'agriculture européenne.

Mammographie sans risque

Des chercheurs de l'Institut de technologie du Massachusetts ont conçu une méthode de détection du cancer du sein plus sûre que la mammographie classique à rayons X. Le rayonnement infrarouge utilisé traverse les tissus humains sans provoquer de dommage, mais les images produites sont peu contrastées. Pour y remédier, les médecins injectent un colorant dans le sein et utilisent un programme informatique qui augmente le contraste, de sorte que l'on distingue les tumeurs malignes des tissus sains.

L'irradiation de la viande

Les autorités américaines ont autorisé la mise sur le marché de viandes rouges irradiées. Cette technique, qui utilise le rayonnement gamma, stérilise les viandes en détruisant toute contamination par des bactéries, notamment par *Escherichia coli*. Les délais légaux de publication et la mise en place d'unités de traitement adaptées font que les premières viandes rouges irradiées ne seront pas sur le marché, aux États-Unis, avant l'été 1998.

Suite page 22



Aérospatiale

Outre les tests où l'on vérifie, en situation réelle, le bon fonctionnement de l'ensemble des logiciels (à gauche, la tuyère du moteur d'Ariane 5), l'analyse statique permet une vérification automatique des programmes.

Néandertal cannibale?

Les ossements d'hommes ayant vécu il y a 130 000 ans découverts au début du siècle dans la grotte de Krapina, en Croatie, sont-ils les reliefs d'un repas de Néandertaliens anthropophages? Marylène Patou-Mathis, de l'Institut de paléontologie humaine, a réexaminé ces restes, qui appartenaient à environ 80 individus: ils portent des marques de décharnement analogues à celles que l'on trouve habituellement sur le gibier, et des os longs ont été fracturés, comme pour en extraire la moelle. En outre, cette population est anormalement jeune: les individus jeunes étaient-ils plus faciles à capturer?

Autoréplication

La vie passe par la reproduction. Takanori Shibata, de l'Université de Tokyo, a observé la reproduction, non de cellules, mais de molécules: des molécules de la classe des 1,2-amino-alcools participent à des réactions où elles sont dupliquées. Ces réactions conservent la «chiralité» des molécules. Est chirale une molécule qui n'est pas superposable à son image dans un miroir, comme un gant gauche n'est pas superposable à un gant droit. La chiralité est une importante caractéristique de la vie: pourquoi tous les acides aminés, par exemple, sont-ils chiraux? Les réactions observées à Tokyo nous éclairent sur l'apparition de la vie et confèrent aux chimistes un nouveau moyen de synthétiser des molécules chirales, importantes en pharmacie.

Pas d'oscillations des neutrinos

Selon les résultats de l'expérience menée à la centrale nucléaire de Chooz, dans les Ardennes, les neutrinos électroniques n'«oscillent» pas. Les neutrinos existent en trois «saveurs»: électronique, muonique et tauique. Si les neutrinos ont une masse, ils peuvent se changer les uns en les autres, autrement dit «osciller». Pour le vérifier, les physiciens ont enregistré le flux de neutrinos à un kilomètre du réacteur de la centrale, une puissante source de neutrinos électroniques. Le flux mesuré fut celui qui était attendu: aucun neutrino électronique ne s'était perdu en route, en changeant sa saveur. Toutefois, il est possible que les neutrinos muoniques oscillent, ce qui expliquerait que l'on observe moins de neutrinos solaires muoniques qu'attendu.

propriété énoncée, une propriété «approchée» extraite de l'analyse serait que i est un entier impair, compris entre un et dix (on a abandonné la contrainte que i est premier).

Le système résolu, on utilise ces propriétés du programme pour vérifier l'absence d'erreurs. Aux points du programme où ces propriétés approchées sont vérifiées, il n'y aura pas d'erreur. Par exemple, l'analyse permet d'affirmer qu'il n'y aura pas d'erreur lorsque le programme utilise i comme indice d'un tableau à neuf éléments, car, dans ce cas, l'ensemble des valeurs que peut prendre i , {1, 3, 5, 7, 9}, est inclus dans l'ensemble des indices licites du tableau {1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9}. En revanche, si i est utilisé en un point du programme comme indice d'un tableau à huit éléments, l'erreur en ce point est possible, car l'ensemble {1,

3, 5, 7, 9} n'est pas inclus dans l'ensemble des valeurs licites {1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8}. L'existence d'une incorrection aux points du programme où les propriétés ne sont pas vérifiées sert de signal d'alarme: il faut vérifier les passages du programme incriminés. Ces analyses limitent le travail de vérification «manuelle» à quelques pour cent du programme.

Contrairement aux tests qui vérifient un programme dans un nombre fini de cas, cette analyse dite statique vérifie le bon fonctionnement d'un programme pour un nombre de cas non borné. Cette étude constitue une première, car elle est appliquée à des programmes industriels de grande taille: elle a contribué à l'amélioration de la sûreté de fonctionnement des logiciels d'Ariane 5.

M. TURIN, *Aéropatiale*, Les Mureaux
A. DEUTSCH, G. GONTHIER, INRIA, Paris.

Toxines de serpent

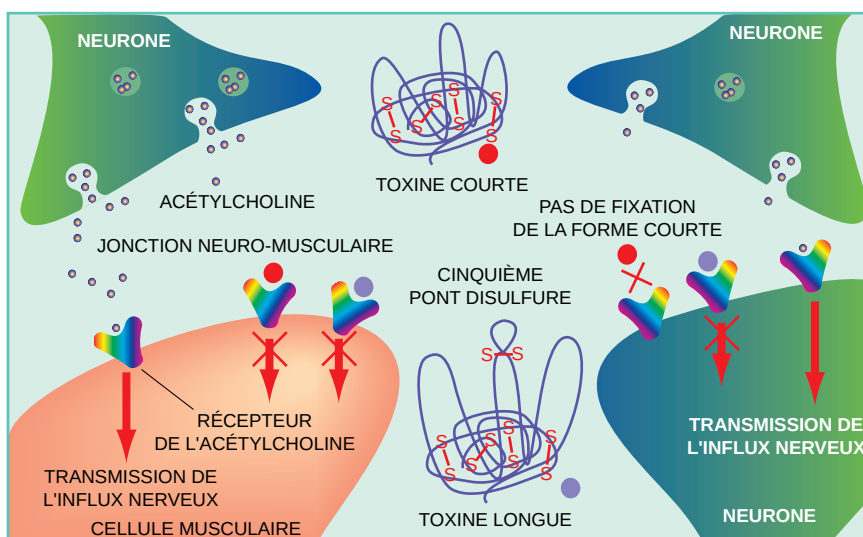
L'identification des cibles des toxines permettra de mieux prévenir leurs effets.

Les serpents capturent leurs proies et les immobilisent grâce aux toxines de leur venin. Certaines toxines endommagent les capillaires, nécrosent les tissus ou déclenchent des hémorragies; d'autres bloquent le fonctionnement des systèmes nerveux et cardiovasculaire ou encore des muscles. Certains serpents produisent deux types de toxines

qui semblaient avoir la même fonction, redondance qui laissait les biologistes perplexes. En collaboration avec une équipe suisse, André Ménez et ses collègues du CEA ont montré qu'une des classes de toxines a une propriété dont l'autre classe est dépourvue.

L'acétylcholine est un neuromédiateur qui assure la transmission de l'influx nerveux entre les neurones, et entre les neurones et les cellules des fibres musculaires. L'acétylcholine transmet l'influx nerveux aux récepteurs des muscles et déclenche leur contraction.

Les venins des serpents hydrophiidés (des serpents des mers chaudes) et éla-



L'acétylcholine est un neuromédiateur qui assure la transmission de l'influx nerveux vers les cellules musculaires (à gauche). Quand les toxines (sphères rouges pour les courtes et sphères bleues pour les longues) se fixent sur les récepteurs de l'acétylcholine, le neuromédiateur n'agit plus, les contractions musculaires sont bloquées, notamment les contractions spontanées du diaphragme, qui assurent la respiration. Les toxines longues agissent sur les récepteurs des muscles et des neurones, les toxines courtes uniquement sur les récepteurs des muscles.

Suite page 24