

Histoire de l'informatique

Partie 2 Les applications et l'impact sociétal

Sacha Krakowiak

Université de Grenoble

Les premières applications (1)

❖ Le calcul scientifique

L'objectif : trouver des solutions numériques à des problèmes de nature mathématique

Les bases : calcul numérique, puis analyse numérique

Une discipline en très fort développement

Les domaines d'application

Recherche : physique, chimie, mécanique, astrophysique, ...

Médecine et biologie peu impliquées au début

Sciences de l'ingénieur : électronique, électrotechnique, génie civil, nucléaire, spatial ...

Premier outil graphique : Sketchpad (Ivan Sutherland, 1961)

❖ La commande de procédés industriels

L'objectif : piloter un processus évolutif pour atteindre un but fixé

Les bases : l'automatique

Les applications : processus de fabrication, transports

Les premières applications (2)

❖ Les applications de gestion

Objectif : automatiser les opérations de comptabilité, gestion des stocks, gestion de personnel, ...

Bases :

analyse fonctionnelle (le «quoi ?» : besoins et contraintes)

analyse organique (le «comment ?» : modèle de réalisation)

Limites

méthodes encore peu évoluées, difficulté sous-estimée

pas de notion globale de «système d'information»

❖ La recherche opérationnelle

Objectif : aide à la décision, notamment en environnement incertain

Bases : mathématiques «discrètes» (combinatoire, ...)

Applications : initialement militaires, puis approvisionnement, implantation, logistique, ...

❖ Une tentative prématurée : la traduction automatique

Les bases de données : modèles

❖ Gérer et exploiter de grandes quantités de données

❖ Question 1 : assurer la conservation et l'accès rapide

Stockage et organisation des données sur les disques

❖ Question 2 : pouvoir répondre à des questions complexes

Modèle de données : entités et relations

Premières tentatives (années 1960) : hiérarchique, réseau

Une grande avancée : le modèle relationnel (Edgar Codd, 1970)

Nom	Prénom	Lieu	Service	...
Martin	Jeanne	5	Études	
Duval	Jacques	3	Après vente	
Bernard	Pierre	4	Commercial	
Lefèvre	Paule	1	Après vente	
...	...			

Lieu	Ville	Adresse	...
1	Bordeaux	...	
3	Paris	Centre	
4	Paris	Défense	
5	Grenoble	...	

Les bases de données : transactions

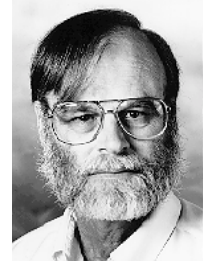
❖ Les aléas potentiels du traitement ...

Incohérence des données

Panne matérielle ou logicielle

Interférence entre traitements indépendants simultanés

Perte de résultats



❖ Une solution : les transactions (Jim Gray, 1981)

Atomicité : une transaction s'exécute complètement ou pas du tout

Cohérence : une transaction qui part d'un état cohérent aboutit à un état cohérent

Isolation : des transactions indépendantes n'interfèrent pas entre elles

Durabilité : une fois validés, les résultats seront préservés

Les nouvelles applications (1)

❖ Les systèmes d'information

Dans une entreprise ou une organisation : définition des différents processus (suite d'opérations réalisant une tâche) et des stocks et flux d'information associés

Couvre la gestion de la logistique, des stocks, du personnel, des relations clients, de la comptabilité, etc.

Outils nécessaires : modélisation, bases de données, traitement de la sécurité, applications spécifiques, ...

L'informatique n'est qu'un aspect des systèmes d'information

❖ La bureautique et le travail coopératif

Le rêve du «bureau sans papier»

Une transformation des conditions (et relations) de travail

Encore peu d'applications grand public

(mais Visicalc, premier tableur, en 1979 ; premier Word en 1983 ; outils Mac en 1984)

Les nouvelles applications (2)

❖ Simulation numérique

Le gain de puissance des ordinateurs et les progrès en analyse numérique permettent des applications raffinées

Calcul de structures, mécanique des fluides, simulateurs de conduite, etc.

❖ Conception et fabrication assistées par ordinateur (CFAO)

CAO : l'informatique au bureau d'études

FAO : l'informatique à l'atelier et à l'usine

Conduite des procédés industriels : sûreté de fonctionnement et tolérances aux fautes, problèmes encore mal résolus

❖ Jeux sur ordinateur

Suivent les développements des outils graphiques

Premier jeu commercial en 1971

Les machines peuvent-elles penser ?

❖ Qu'est-ce que l'intelligence ?

Capacité de *raisonnement* (déduire, décider, agir en utilisant des *connaissances*)

Capacité d'*apprentissage*

Capacité d'*adaptation*

...

❖ Le test de Turing (1950)



?



L'intelligence artificielle : espoirs, déceptions

❖ Les débuts de l'IA (1960-72)

Les jeux : dames, échecs

Représentation de la connaissance, formalisation du raisonnement

Eliza, ou comment masquer son ignorance

Un problème «dur» : la reconnaissance des formes

❖ Espoirs déçus (1973-80)

Une douche froide : le rapport Lighthill (1973)

De la poudre aux yeux : le programme japonais 5ème génération (1980)

Controverses philosophiques

❖ Renaissance (1980-87)

Les systèmes experts, ou comment exploiter des connaissances

❖ Nouvelles déceptions, nouveau rebond (1987-93)

L'intelligence artificielle : une vue plus réaliste

❖ Champ et méthodes de l'IA

Représentation des connaissances
pour le raisonnement

Planification

Apprentissage

Raisonnement dans l'incertain

❖ Applications de l'IA

Robotique et vision par ordinateur

Fouille de données

Traitement des langues naturelles

Parole

Vie artificielle

...

Quelques outils

Logique(s)

Règles de production

Réseaux de neurones

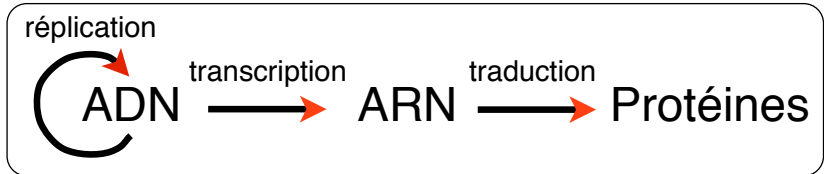
Algorithmes génétiques

Réseaux bayésiens

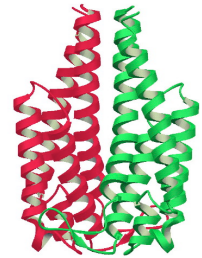
Systèmes multi-agents

La bio-informatique

- ❖ Schéma de base de la biologie moléculaire



- ❖ Analyse de l'information génétique
Séquencement du génome humain (2004)
3,2 milliards de paires de bases, environ 30 000 gènes
- ❖ Analyse de la structure des protéines
Repliement des protéines, analyse en 3 dimensions
- ❖ Dynamique de la transcription
- ❖ Bio-informatique des populations
- ❖ Qu'apporte l'informatique ?
Algorithmique, analyse d'images, fouille de données, analyse statistique, ...



Une discipline en développement rapide

L'informatique médicale

- ❖ Imagerie médicale
une révolution : scanner, IRM
- ❖ Chirurgie assistée par ordinateur
assistance aux gestes diagnostique ou thérapeutique
objectif : réduire l'invasivité, augmenter la précision
s'appuie sur les techniques d'imagerie et de modélisation
- ❖ Traitement et stockage de l'information médicale
informatisation des dossiers médicaux
systèmes d'information hospitaliers
- ❖ Aide à la décision
aide au diagnostic
aide à la prescription
- ❖ Assistance en temps réel
monitoring
télésurveillance

Naissance du World Wide Web

❖ Un besoin d'utilisateurs ...

Des physiciens du CERN (Centre Européen de Recherche Nucléaire) souhaitent partager des données réparties dans le monde (sur des machines hétérogènes)

En 1990, Tim Berners-Lee (avec Robert Cailliau) propose un outil à base de liens hypertexte, le World Wide Web

En 1991, le système est ouvert à tous sur l'Internet, mais ses principaux utilisateurs restent des physiciens



❖ Le début de l'essor

1993 : Le premier navigateur graphique, Mosaic, est créé à l'université d'Illinois par Marc Andreessen et Eric Bina

1994 : Mosaic est à la base de la création de  Netscape®

Première conférence internationale sur le Web

Création du World Wide Web Consortium 

C'est quoi, au juste, le Web ?

❖ La notion de base, le lien hypertexte

Idée ancienne : Vannevar Bush, *As We May Think*, 1945

Forme courante, l'URL (*Uniform Resource Locator*) [aussi l'URN]

http:// ... pour une «page» sur un site de l'Internet

file:/// ... pour un fichier sur une machine, mailto:// pour une adresse mail, ...

❖ Un langage de description de documents : HTML

Utilise des marqueurs (annotations dans le texte)

Permet d'insérer des liens dans le texte des pages Web

❖ Un protocole de communication : HTTP

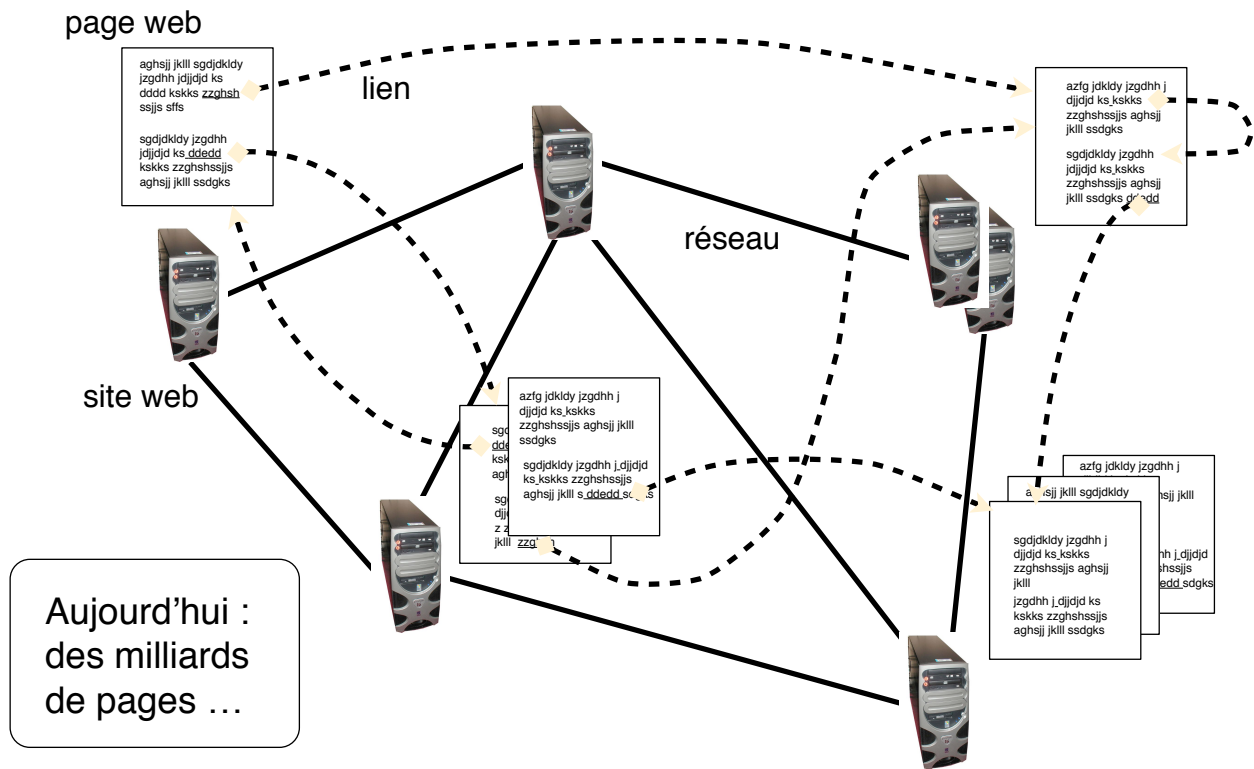
❖ Il faut aussi des outils ...

Le navigateur : pour se déplacer en suivant les liens

Le moteur de recherche : pour chercher l'information

L'éditeur : pour fabriquer des pages Web

Organisation du Web



Brève histoire du développement du Web

❖ Les outils de base

Navigateurs :

Netscape (1994), Internet Explorer (1995), Mozilla (1998) et Firefox (2005),
Chrome (2008), ...

Moteurs de recherche et annuaires:

AltaVista (1995), Yahoo! (1995), Google (1998), Exalead (2006), Bing (2009)

Construction de sites : des centaines, beaucoup de libres, PHP-MySQL, ...

Un langage : Java (Sun, 1995) - dépasse beaucoup le cadre du Web

❖ Les applications

Commerce électronique

Services : Transports, voyages, banque, météo, ...

Administration : Impôts, information, inscriptions, ...

Diffusion de contenu : Presse, agences, radio, vidéo, publication scientifique,
bibliothèques, ...

Réseaux sociaux : TheGlobe, Geocities (1994), ... Facebook (2005)

2001 : la bulle
des «dot-com»

Les réseaux sociaux

❖ Un phénomène de société

Bien avant Facebook ...

Avant le web : les forums (*newsgroups*) sur l'Internet (1978)

Sur le web : Geocities (1994) ; TheGlobe.com (1995) , etc.

❖ Un enjeu commercial

Un vecteur puissant pour la publicité

Un outil pour les entreprises (image, recrutement, ...)

Être branché ...
... ou ne pas être

❖ Un enjeu politique

Un espace de communication non contrôlé

❖ Quelques effets néfastes ...

Consommation de ressources et de temps humain

Risque de désinformation

Menaces pour la vie privée ?

Les systèmes embarqués

❖ Quelques définitions

Système embarqué : système informatique associé à un objet physique

Interaction dans les deux sens : mesure (capteurs), commande (actionneurs)

Système en temps réel : système soumis à des contraintes de temps

Système critique : système dont la défaillance peut entraîner des conséquences catastrophiques (pertes de vie humaines, ...)

Beaucoup de systèmes embarqués sont aussi temps réel et critiques

❖ Brève histoire

Années 60 : systèmes de guidage de missiles (militaires)

Années 70 : routeurs, guidage de fusées (Apollo), fabrication automatisée, chimie

Années 80 et 90 : large extension (transports, énergie, télécommunications, satellites, carte à puce, terminaux de paiement, etc.)

Années 2000 : croissance explosive (téléphones, électro-ménager, puces radio (RFID), réseaux de capteurs, voitures, trains, avions, équipements médicaux, ...)

Les systèmes embarqués

❖ Des problèmes ...

Les s.e. sont soumis à des contraintes : coût (d'où limites sur mémoire, processeurs), consommation d'énergie, environnement
S'y ajoutent les aspects «temps réel» : respect des échéances
Pour les systèmes critiques, la sûreté de fonctionnement est cruciale

❖ ... et quelques voies d'approche

Conception conjointe matériel-logiciel

«Durcissement» du matériel (pour environnement hostile)

Programmes optimisés (taille, élimination des fonctions inutiles)

Modèles d'exécution spécifiques (langages synchrones)

Vérification rigoureuse (*model checking*)

Noyaux de systèmes spécialisés et certifiés

Tolérance aux fautes

Confiance *justifiée* dans le bon fonctionnement

Tolérance aux fautes

❖ Les systèmes informatiques, comme tout système, sont sujets à des défaillances ...

Défaillance : le système ne remplit pas sa fonction

il ne fonctionne pas du tout (et ne fait rien)

il fonctionne, mais donne des résultats incorrects, ou pas à temps

il fait «n'importe quoi» ...

❖ À l'origine d'une défaillance, il y a toujours une «faute»

Usure du matériel, circonstances extérieures (météo, etc.)

Erreur humaine (conception, programmation, ...) ou malveillance

❖ Il n'est pas possible d'éliminer toutes les fautes

Il faut donc vivre avec !

La tolérance aux fautes repose sur la redondance

Données et traitements en double, triple, ...

Solutions techniquement complexes, progrès dans les années 1990

Les *bugs* (bogues)

- ❖ Il n'y a pas de *bugs* informatiques, il n'y a que des erreurs humaines

“Les programmeurs parlent de *bugs* pour préserver leur santé mentale. Reconnaître un pareil nombre d'erreurs serait psychologiquement insupportable.”

Martin Hopkins, 1968

- ❖ Quelques *bugs* (tristement) célèbres

Les accidents d'irradiation de Therac 25 (1985-87)

Le ver de Morris (exploitation malveillante d'un *bug* d'Unix, 1988)

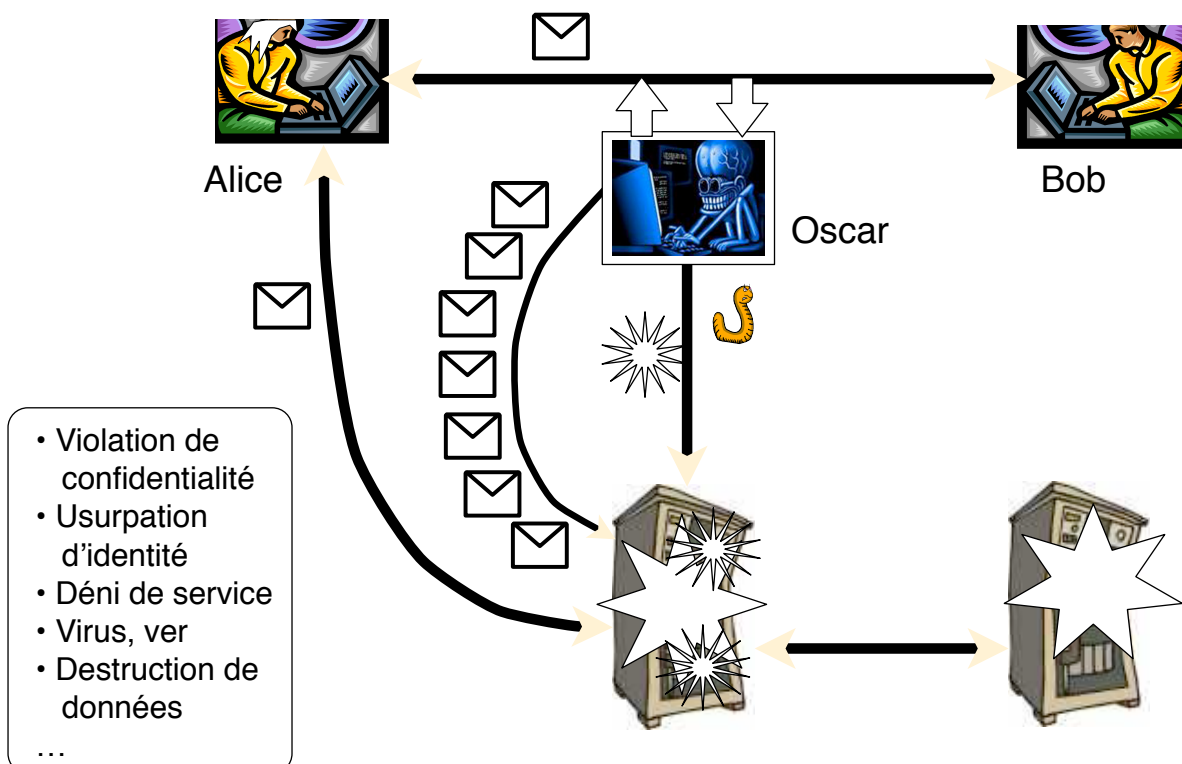
La panne du réseau téléphonique ATT (1990)

La perte d'Ariane 5 lors de son premier vol (1996)

La perte de la sonde Mars Climate Orbiter (1999)

La panne d'électricité au Nord-Est des États-Unis (2003)

Problèmes de sécurité informatique



Quelques instruments de la sécurité

- ❖ Dissimuler une information

La rendre indéchiffrable même si elle est captée (cryptographie)

La cacher dans une autre information d'apparence anodine
(stéganographie)

- ❖ Authentifier une personne ou une organisation

Fournir une preuve certifiée de son identité

- ❖ Authentifier un document

Signature électronique

- ❖ Protéger l'accès à une ressource

- ❖ Détecter une intrusion

Au besoin, la provoquer pour piéger l'adversaire ...

- ❖ Détecter et détruire un virus

La sécurité reste un
problème encore
mal maîtrisé ...

Une avancée importante pour la sécurité

- ❖ La cryptographie à clé publique

Diffie, Hellman, Merkle (1976) ; Rivest, Shamir, Adleman (1978)

La cryptographie «classique» repose sur le *partage*
d'une clé secrète

Mais un secret partagé risque de ne pas rester secret

- ❖ Deux clés pour chacun ...

Une clé publique, connue de tous

Elle sert à chiffrer les messages envoyés

Une clé privée, *connue de son détenteur seul*

Elle sert à déchiffrer les messages reçus

Il est (bien sûr) *très difficile* de trouver la clé privée ...

- ❖ Une propriété remarquable

Le même principe permet aussi l'authentification (preuve d'identité)



RSA : un protocole
très utilisé dans
le commerce
électronique, la
banque, etc.
(le petit cadenas
sur les pages web)



Aspects de la sécurité informatique

❖ Aspects scientifiques et techniques

Les outils techniques existent ...

... mais des progrès à faire sur les aspects fondamentaux

Une base logique pour la sécurité ?

❖ Aspects légaux et réglementaires

Infrastructure à clés publiques

Signature électronique, certificats

Tiers de confiance

❖ Aspects sociétaux

Des progrès à faire sur la diffusion de la culture de sécurité ...

Appréciation des risques, comportements dangereux

Utilisation des outils

... et sur l'équilibre entre sécurité et respect de la vie privée

Confidentialité et vie privée (1)

❖ L'évolution de l'Internet

de 1980 au milieu des années 90 :

une communauté restreinte (informaticiens, scientifiques, ...)

depuis 1995 (et surtout les années 2000)

un lieu de partage et d'échange largement ouvert

un grand marché

un enjeu politique

un territoire à risques ...

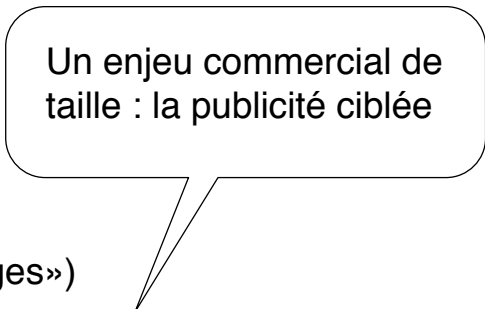
❖ Menaces sur la vie privée ?

les *cookies*

la géolocalisation

la sous-traitance des traitements («nuages»)

le discours de Google, Facebook : «Il n'y a plus de vie privée»



Un enjeu commercial de taille : la publicité ciblée

Confidentialité et vie privée (2)

- ❖ La collecte continue des données personnelles

Pas toujours justifiée ...

- ❖ La criminalité sur l'Internet

Violation de la confidentialité (espionnage)

Vol de données

Usurpation d'identité

Escroquerie

- ❖ Réponses institutionnelles

La loi «Informatique et libertés»

pas toujours respectée, des évolutions sont nécessaires

La directive européenne sur la protection des données à caractère personnel

première version en 1995, révision prévue en 2011

Le respect de la vie privée doit être pris en compte *dès la conception* des applications

Vote électronique

- ❖ Pourquoi le vote électronique ?

Machines à voter : gain de temps, économie de papier (?)

Par l'Internet : évite les déplacements pour les personnes peu mobiles

- ❖ Le cahier des charges

Tout vote remplissant les conditions légales doit être validé

Le résultat du vote doit refléter le choix de chaque électeur

Le vote est anonyme (il est impossible de faire le lien entre un électeur et un vote)

Le vote est vérifiable (par chaque électeur, par une autorité)

- ❖ Une histoire mouvementée ...


Les *bugs* des machines à voter ...

- ❖ Peut-on se fier au vote électronique ?


L'Internet, nouveau médium

❖ L'Internet a transformé le paysage de la communication :

Presse électronique
Publications scientifiques
Radio et vidéo sur l'Internet
Livres électroniques
Blogs et autres espaces d'échange
Le phénomène Wikipedia
...
Cette révolution n'en est qu'à ses débuts
Les usages doivent s'adapter



Changement de
statut de l'écrit ?



Libre échange et
création collective

❖ Des mutations en cours

Propriété intellectuelle
Conservation et archivage
L'information conservée sera-t-elle lisible dans 100 ans ?

Droit et informatique

❖ Un dialogue nécessaire

Le droit et l'informatique évoluent ...
... mais selon des rythmes et des modalités différents

❖ Aujourd'hui, beaucoup d'incertitudes ...

Concilier droits nationaux et globalisation
Revoir les notions d'identité, de vie privée, de propriété intellectuelle
Définir le partage des responsabilités (fournisseur d'accès, éditeur de logiciel, etc.)
Redéfinir la notion de preuve (signature électronique, etc.)
Définir les droits des individus face aux nouvelles technologies

...

Voir : Daniel Le Métayer et Antoinette Rouvroy, STIC et droits : défis, conflits et complémentarités, *Interstices*. <http://interstices.info/stic-droit>

Partage et propriété intellectuelle

- ❖ La propriété intellectuelle : des aspects très divers
 - Besoin de reconnaissance
 - Protection de droits d'invention et d'exploitation : brevets, licences, propriété industrielle
 - Protection de droits d'auteur : privilège, *copyright*
- ❖ Ce qu'ont changé l'informatique et l'Internet
 - Création collective
 - Facilité de modification et d'extension
 - Reproduction et diffusion à coût quasi nul
 - Une culture du libre partage
- ❖ Des dangers ...
 - Extension du domaine des brevets : le vivant, le logiciel, ...
- ❖ De nouvelles pratiques
 - Le *copyleft*, les licences *Creative Commons*, ...

Partage et propriété intellectuelle : un cas type

- ❖ Un problème : le téléchargement illégal
 - Musique, films, etc., protégés par des droits
- ❖ Une réponse controversée : la loi Hadopi
 - Censée protéger les droits des artistes, elle protège surtout les intérêts des grands distributeurs
 - Elle est, de plus, techniquement difficile à appliquer, et sera contournée
 - Un droit global de licence aurait mieux favorisé les créateurs !

“Totalitarian governments aren't the only ones violating the network rights of their citizens. In France a law created in 2009, named Hadopi, allowed a new agency by the same name to disconnect a household from the Internet for a year if someone in the household was *alleged* by a media company to have ripped off music or video.”

Tim Berners-Lee, *Scientific American*, Dec. 2010

Le logiciel libre

❖ Définitions

Logiciel libre : qui peut être librement utilisé, étudié, modifié, redistribué (avec ou sans modifications)

Le logiciel libre est aussi *open source* (il est disponible sous forme de code source)

Il existe différentes licences pour le logiciel libre

BSD («permissif»), GPL («viral»), LGPL, ...

❖ Pourquoi le logiciel libre ?

Un facteur de progrès et de diffusion de la connaissance

Un facteur de qualité

Une aide à la formation

❖ Controverses ...

Quel modèle commercial ?

Logiciel libre contre monopoles ?

Quelles limites ?

Le défi de la puissance à bon marché : des grappes aux nuages

❖ Les grappes (*clusters*)

Groupe de machines sur un réseau local (dizaines, centaines)

Puissance et disponibilité pour la réalisation de services

❖ Les grilles (*grids*)

Calcul parallèle à grande échelle (milliers, dizaine de milliers)

Grappes réparties sur l'Internet, gestion globale des ressources

Concurrentes des supercalculateurs pour grandes applications scientifiques

❖ Les nuages (*clouds*)

Virtualisation des ressources de calcul

Cloud Computing : l'informatique dans les nuages

❖ La virtualisation des ressources

Dissociation entre l'interface offerte et les ressources physiques

❖ On peut virtualiser ...

... le matériel : *Infrastructure as a Service* (Amazon EC2)

... l'environnement d'exécution : *Platform as a Service* (Microsoft Azure)

... le support d'applications : *Software as a Service* (Google Docs)

❖ Avantages et risques

+ «Élasticité» : le client paie ce qu'il consomme, facturation à grain fin

+ Réactivité aux variations de la demande

+ Investissement remplacé par fonctionnement

– Perte de contrôle sur les données

? Garantie de qualité de service, responsabilité

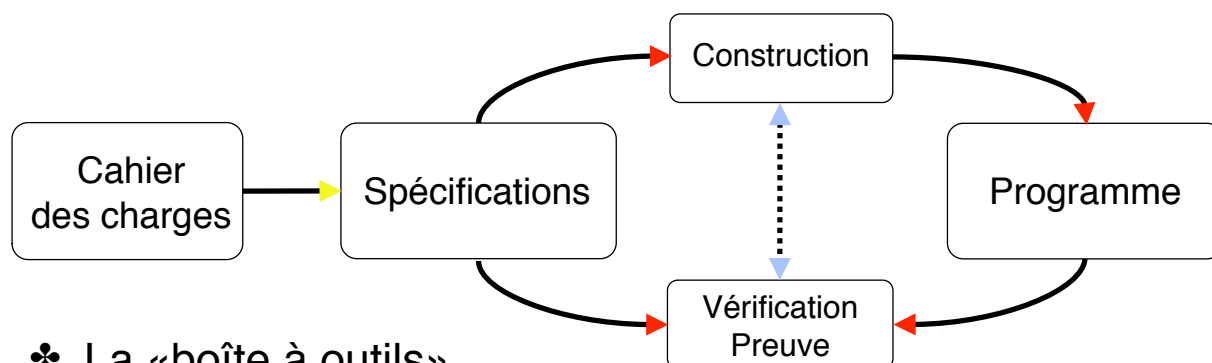
Quel bilan
énergétique ?

Vers des programmes sans *bugs* ? (1)

❖ Qu'est-ce qu'un programme correct ?

Un programme conforme à sa spécification

il fait ce qu'on veut qu'il fasse (et seulement cela)



❖ La «boîte à outils»

Une base formelle (logique)

Un langage d'expression

Des outils d'aide à la construction

Des outils d'aide à la preuve

Vers des programmes sans *bugs* ? (2)

❖ Analyse statique

Vérifier des propriétés de l'exécution *sans exécuter le programme*

Repose sur une modélisation abstraite du programme

Model checking (Ed Clarke, Ralph Emerson, Joseph Sifakis)

Interprétation abstraite (Patrick Cousot)

❖ Construction raisonnée : la méthode B (Jean-Raymond Abrial)

Construire une suite de modèles de plus en plus raffinés

Prouver la validité à chaque étape

❖ Construction = preuve !

Exemple : Coq (Gérard Huet, Christine Paulin-Mohring)

Départ : une spécification dans une logique appropriée

Un «assistant de preuve» aide à prouver la validité ...

... et le programme est construit en même temps

Les systèmes de calcul du futur

Deux pistes pour un futur encore lointain ...

❖ Informatique biologique

Utiliser l'ADN comme moyen de calcul et de stockage d'information ?

calculer en parallèle avec une faible consommation d'énergie

Couplage entre calculateur biologique et calculateur électronique ?

❖ Informatique quantique

Des résultats théoriques ...

Une vitesse de calcul inaccessible aux machines «classiques»

Des lois différentes ...

Phénomènes probabilistes

L'observation interfère avec l'objet observé

Un thème de recherche pour des décennies

Remarques finales (1)

- ❖ Des avancées significatives appuyées par la théorie ...

 - Vers des systèmes certifiés

 - Vers une prévision fine des performances

 - Vers une gestion contrôlée des ressources

 - Vers une administration sûre des grands systèmes

- ❖ ... mais il reste une place pour l'art de l'architecte

- ❖ Défis anciens et nouveaux

 - Théorie du parallélisme

 - Sécurité

 - Complexité algorithmique

 - Du discret au continu

 - Sémantique des données

 - Maîtrise des très grands systèmes

 - Spécification et preuve

 - Construction et composition

 - ...

 - ...

Remarques finales (2)

- ❖ L'informatique parmi les sciences

 - L'informatique a acquis un statut de science ...

 - ... mais ce n'est pas encore évident pour tout le monde
et notamment en France

 - Les autres sciences intègrent la démarche informatique
ce qui ouvre de nombreuses voies de recherche

- ❖ L'informatique dans la société

 - L'informatique est présente partout ...

 - ... mais elle reste au fond mal connue et mal comprise
notamment du monde politique

 - Il faut promouvoir une vraie culture informatique ...

 - pas seulement apprendre à utiliser un traitement de textes ou l'Internet

 - ... donc un enseignement de l'informatique comme science
dès le lycée

 - L'évolution du droit et des usages est un défi majeur

Pour en savoir plus (1)

- ❖ Un site de diffusion de la culture informatique
Interstices (INRIA, CNRS, universités) : <http://interstices.info/>
- ❖ Un cours en ligne : Gérard Berry, Collège de France
http://www.college-de-france.fr/default/EN/all/inn_tec2007/
- ❖ Une biographie
Andrew Hodges. *Alan Turing, ou l'énigme de l'intelligence*, Payot, 1988
- ❖ Un livre d'histoire
Pierre-Éric Mounier-Kuhn. *L'informatique en France de la seconde guerre mondiale au Plan Calcul*, Presses de l'université Paris-Sorbonne, 2010
- ❖ L'association Aconit (<http://www.aconit.org/>)

Pour en savoir plus (2)

- ❖ Sur l'Internet
Christian Huitema, *Et Dieu créa l'Internet*, Eyrolles, 1995
A Brief History of the Internet
<http://www.isoc.org/internet/history/brief.shtml>
- ❖ Sur les ordinateurs personnels
Michel Volle, *Histoire du micro-ordinateur*
<http://www.volle.com/ulb/021122/textes/histoiremico.htm>
- ❖ Sur l'épistémologie de l'informatique
Gilles Dowek, *Les métamorphoses du calcul*, Éditions du Pommier, 2007

Page web personnelle :
<http://sardes.inrialpes.fr/~krakowia/fr-index.html>