

IA02 : Résolution de problèmes et Programmation Logique

Logique propositionnelle :
de la théorie à la résolution de problèmes

Sylvain Lagrue

sylvain.lagrue@hds.utc.fr

Information	Valeur
Auteur	Sylvain Lagrue (sylvain.lagrue@utc.fr)
Licence	Creative Common CC BY-SA 3.0
Version document	1.4.0

Sources/bibliographie

- **Artificial Intelligence: A Modern Approach** : Stuart Russell and Peter Norvig, I.S.B.N 0136042597, 2009
- **Intelligence Artificielle et Informatique Théorique (2^e édition)** : Jean-Marc Alliot, Pascal Brisset, Frederick Garcia, Thomas Schiex, I.S.B.N. 2854285786, 2002

Des coquilles ?

sylvain.lagrue@utc.fr ou sur le [forum du cours moodle](#)

I. Introduction

But de la logique

Formaliser *mathématiquement* le raisonnement humain pour :

Période classique (Aristote, Platon et les péripatéticiens...)

- Analyser des raisonnements et de l'argumentation (dialectique vs. rhétorique)
- 2 types de raisonnement fallacieux : le paralogisme et le sophisme
- Objectif : la recherche de la Vérité

Période moderne

- Donner un sens aux Mathématiques
- Établir leurs non-contradictions (2^e problème de Hilbert)
- Axiomatiser leurs diverses branches
- Mécaniser le raisonnement
- Formaliser certains concepts pour l'informatique théorique (décidabilité, finitude, complexité, etc.) et l'IA

I. Introduction

Les trois formes de raisonnement¹

“

Les mêmes causes produisent les mêmes effets.

$$A \rightarrow B$$

- **Déduction** : à partir de la cause et de la règle, trouver les conséquences
- **Abduction** : à partir de la règle et des conséquences, trouver les causes
- **Induction** : à partir des causes et des conséquences, trouver la règle Seule la déduction est **valide** : si les causes et les règles générales sont justes, les conséquences sont certaines

¹ Mais aussi *raisonnement par cas, raisonnement plausible, raisonnement par analogie, etc.*

I. Introduction

Quelques exemples...

Les Ferrari sont des voitures rouges.

$$F \rightarrow R$$

Les voitures qui ne sont pas rouges ne sont pas des Ferrari ?

$$\neg R \rightarrow \neg F$$

Est-ce que toutes les voitures rouges sont des Ferrari ?

$$R \rightarrow F$$

Les voitures qui ne sont pas des Ferrari ne sont pas des voitures rouges ?

$$\neg F \rightarrow \neg R$$

I. Introduction

Trouver un argument fallacieux...

$$\text{ISF} \rightarrow \text{EF}$$

Donc, pour ne plus avoir d'EF, il suffit de supprimer l'ISF...

$$\neg \text{ISF} \rightarrow \neg \text{EF}$$

L'ISF provoque de l'EF. Les PF provoquent de l'EF. **Donc** l'ISF est la cause des PF. Il faut supprimer l'ISF !

$$\text{ISF} \rightarrow \text{EF}$$

$$\text{PF} \rightarrow \text{EF}$$

$$\text{ISF} \rightarrow \text{PF}$$

I. Introduction

Applications

- Conception et vérification de circuits
- Preuve de programmes
- Langage de programmation
- Base de données (déductive)
- Web sémantique
- Diagnostic/panne
- Aide à la décision
- Robotique
- Analyse de documents/traitement du langage naturel
- Démonstration automatique
- etc.

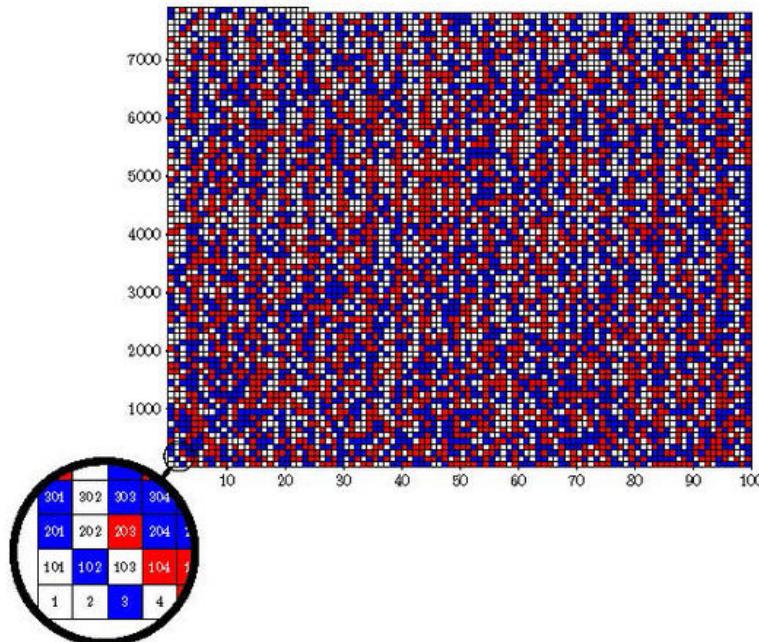
I. Introduction

Exemple de preuve : bicoloration des triplets de Pythagore

“

Est-il possible de colorier chaque entier positif en bleu ou en rouge de telle manière qu'aucun triplet d'entiers a, b et c qui satisfait la fameuse équation de Pythagore $a^2 + b^2 = c^2$ ne soient pas tous de la même couleur ? Par exemple, pour le triplet 3, 4 et 5, si 3 et 5 sont coloriés en bleu, alors 4 doit être rouge.

- Problème ouvert depuis les années 1980 (possible jusqu'à 7824)
- Résolu informatiquement en 2016



I. Introduction

La logique propositionnelle

- Fragment le plus simple de la logique mathématique
- Issue des travaux de Georges Boole (1815-1864) et d'Auguste de Morgan (1806-1871)
- Liens évidents avec l'électronique, la téléphonie et l'informatique...

II. Le langage

- $V_S = \{a, b, \dots, p, q, \dots\}$ est un ensemble fini de variables propositionnelles
- $V_C = \{\neg, \wedge, \vee, \rightarrow, \leftrightarrow, \top, \perp\}$ est un ensemble de connecteurs
(resp. d'arité 1, 2, 2, 2, 2, 0, 0) *Remarque* : les connecteurs \neg et \vee forment un système complet (tous les autres peuvent être définis à partir de ceux-ci)
Définition : formules propositionnelles (bien formées)

1. Tout élément de V_S est une formule ;
2. Si F est une formule, alors $(\neg F)$ est une formule ;
3. Si F et G sont des formules alors $(F \wedge G)$, $(F \vee G)$, $(F \rightarrow G)$ et $(F \leftrightarrow G)$ sont des formules ;
4. \top et \perp sont des formules ;
5. Toute formule s'obtient en appliquant un nombre fini de ces règles. On notera F_{V_S} l'ensemble des formules bien formées basées sur V_S .

II. Le langage

Priorité des opérateurs

Pour limiter les parenthèses, on peut utiliser les règles de priorité suivantes :

$\neg > \wedge > \vee > \rightarrow, \leftrightarrow$

Exemples :

- $\neg a \vee b \rightarrow c$ est équivalent à $((\neg a) \vee b) \rightarrow c$
- $\neg a \leftrightarrow b \rightarrow c$ n'est pas une formule bien formée (pas de priorité droite/gauche)

II. Le langage

Littéral

- C'est une variable propositionnelle ou sa négation
- p et $\neg p$ sont 2 littéraux
- si $|V_S| = n$, alors il y a $2n$ littéraux

II. Le langage

Représentation sous forme de graphes

On peut représenter toute formule sous forme d'arbre (ordonné) :

- chaque feuille de l'arbre correspond à une variable propositionnelle ;
- les autres nœuds correspondent à des connecteurs.

Exemple :

- $\neg a \vee b \rightarrow c$ On peut représenter une formule sous forme de DAG (graphe dirigé acyclique) pour représenter une formule de façon plus concise/compacte...

Exemple :

- $a \vee b \rightarrow c \wedge (a \vee b)$

III. Sémantique

Objectif : donner des valeurs de vérité aux formules

Pour cela, on va considérer deux valeurs (principe du **tiers exclu**) :

- {vrai, faux}
- {0, 1}
- {true, false}
- {T, F}
- {T, ⊥}
- {blanc, noir}
- {vert, rouge}
- {V, F}
- ...

III. Sémantique

Interprétation

Définition : une interprétation ω est une application de V_S dans $\{V, F\}$ qui associe à chaque proposition la valeur V ou F . On notera Ω l'ensemble des interprétations possibles définies sur le langage.

(si $n = |V_S|$, on a $|\Omega| = 2^n$)

Exemple :

- $V_S = \{a, b, c\}$
- $\omega_0(a) = F$
- $\omega_0(b) = F$
- $\omega_0(c) = F$

III. Sémantique

Valuation

Définition : Soit φ une formule bien formée et $\omega \in \Omega$, la valuation de φ pour ω (notée $Val(\varphi, \omega)$) est telle que :

- si φ est une variable propositionnelle, alors $Val(\varphi, \omega) = \omega(\varphi)$;
- $Val(\top, \omega) = V$ et $Val(\perp, \omega) = F$;
- si φ est de la forme $\neg A$ (resp. $A \wedge B, A \vee B, A \rightarrow B, A \leftrightarrow B$), alors appliquer récursivement la table de vérité suivante.

A	B	$\neg A$	$A \wedge B$	$A \vee B$	$A \rightarrow B$	$A \leftrightarrow B$
F	F	V	F	F	V	V
F	V	V	F	V	V	F
V	F	F	F	V	F	F
V	V	F	V	V	V	V

Remarque : on est sûr que la valuation se termine car à chaque étape un connecteur est résolu.

III. Sémantique

Exemple

- $\omega = \{a, b, \neg c\}$
- $\varphi = \neg(a \vee (b \rightarrow \neg c))$
- $Val(\varphi, \omega) = F$

III. Sémantique

D'autres définitions...

- ω **satisfait** φ , noté $\omega \models \varphi$ ssi $Val(\varphi, \omega) = V$. On dit alors que ω est un **modèle** de φ .
- L'ensemble des modèles de φ est noté $Mod(\varphi)$, i. :

$$Mod(\varphi) = \{\omega \in \Omega : \omega \models \varphi\}$$

- ω **falsifie** φ , noté $\omega \not\models \varphi$ ssi $Val(\varphi, \omega) = F$. On dit alors que ω est un **contre-modèle** de φ .

III. Sémantique

Une formule propositionnelle φ est dite :

- **valide** (noté $\models \varphi$)ssi pour toute interprétation $\omega \in \Omega$ on a $\omega \models \varphi$. Dans ce cas φ est également appelé **tautologie** ;
- **contradictoire**ssi pour toute interprétation $\omega \in \Omega$ on a $\omega \not\models \varphi$;
- **satisfiable**ssi elle n'est pas contradictoire ;
- **contingente**ssi il existe $\omega \in \Omega$ tel que $\omega \models \varphi$ et il existe $\omega' \in \Omega$ tel que $\omega' \not\models \varphi$.

III. Sémantique

Calculer la validité d'une formule

3 méthodes :

1. en passant par des tables de vérité
2. par arbre sémantique/algorithme de Quine
3. par l'absurde

Exemples :

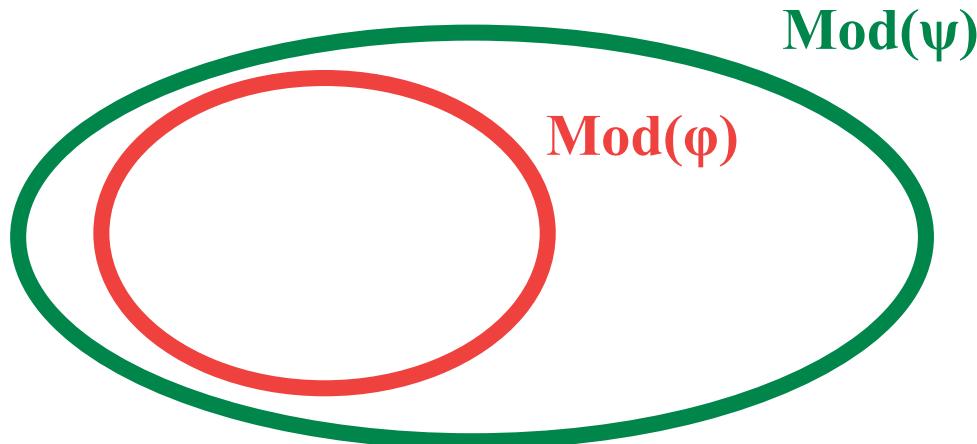
- $\varphi_1 = \neg(a \vee b) \leftrightarrow \neg a \wedge \neg b$ (règle de Morgan)
- $\varphi_2 = \neg q \wedge (p \rightarrow r) \rightarrow (\neg q \vee r)$

III. Sémantique

Conséquence logique

Définition : une formule ψ est dite **conséquence logique** de φ (noté $\varphi \models \psi$) ssi quelque soit $\omega \in \Omega$, $\omega \models \varphi$ implique $\omega \models \psi$

En d'autres termes : $Mod(\varphi) \subseteq Mod(\psi)$



III. Sémantique

Par extension : $\varphi_1, \dots, \varphi_n \models \psi$ ssi pour tout $\omega \in \Omega$ tel que quel que soit φ_i , $\omega \models \varphi_i$, on a $\omega \models \psi$

Exemples :

- $a \models a \vee b$
- $a, a \rightarrow b \models b$
- $\perp \models a \rightarrow b \vee c$

III. Sémantique

Remarques

- Équivalence logique $\varphi_1 \equiv \varphi_2$ ssi $\varphi_1 \models \varphi_2$ et $\varphi_2 \models \varphi_1$
- $\models \varphi$ est une écriture raccourcie de $\top \models \varphi$
- On peut tout déduire de la contradiction...

“

Principe d'explosion : ex falso quodlibet.

⚠️ Avant de chercher à déduire quoi que se soit d'un ensemble de formules, il faut toujours vérifier préalablement leur cohérence (c.-à-d. prouver l'existence d'au moins un modèle) !

III. Sémantique

Théorème et corollaires...

Théorème de la déduction :

$$\varphi_1, \dots, \varphi_n \models \psi \text{ ssi } \varphi_1, \dots, \varphi_{n-1} \models \varphi_n \rightarrow \psi$$

Corollaire 1 :

$$\varphi \models \psi \text{ ssi } \models \varphi \rightarrow \psi$$

L'implication matérielle et la conséquence logique coïncident !

III. Sémantique

Corollaire 2 :

$$\varphi_1, \dots, \varphi_n \models \psi \text{ ssi } \varphi_1 \wedge \dots \wedge \varphi_n \models \psi$$

En particulier si les φ_i sont des littéraux...

Corollaire 3 :

$$\varphi_1, \dots, \varphi_n \models \psi \text{ ssi } \varphi_1, \dots, \varphi_n, \neg\psi \models \perp$$

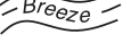
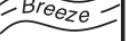
C'est le raisonnement par l'absurde : la conséquence logique peut se ramener à un simple test de satisfiabilité !

Complexité...

- Tester si une formule est satisfiable est NP-complet.
- Tester si une formule est une conséquence logique d'une autre est CoNP-complet.

III. Sémantique

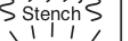
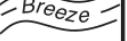
Illustration avec le Wumpus...

4	 Stench		 Breeze	PIT
3		 Breeze  Stench  Gold	PIT	 Breeze
2	 Stench		 Breeze	
1	 START	 Breeze	PIT	 Breeze
	1	2	3	4

- Règle 1 : Il n'y a pas de puits en 1,1
- Règle 2 : Autour de chaque puits, il y a de la brise
- Règle 3 : Autour du Wumpus il y a une odeur fétide

III. Sémantique

Application au Wumpus...

4	 Stench		 Breeze	PIT
3		 Breeze  Stench  Gold	PIT	 Breeze
2	 Stench		 Breeze	
1	 START	 Breeze	PIT	 Breeze
	1	2	3	4

Base de connaissance propositionnelle (concernant les puits)

$$R_1 : \neg P_{1,1}$$

$$R_2 : B_{1,1} \leftrightarrow P_{1,2} \vee P_{2,1}$$

$$R_3 : B_{2,1} \leftrightarrow P_{1,1} \vee P_{2,2} \vee P_{3,1}$$

...

Faits

Le héros est en (1,1) et il ne perçoit rien

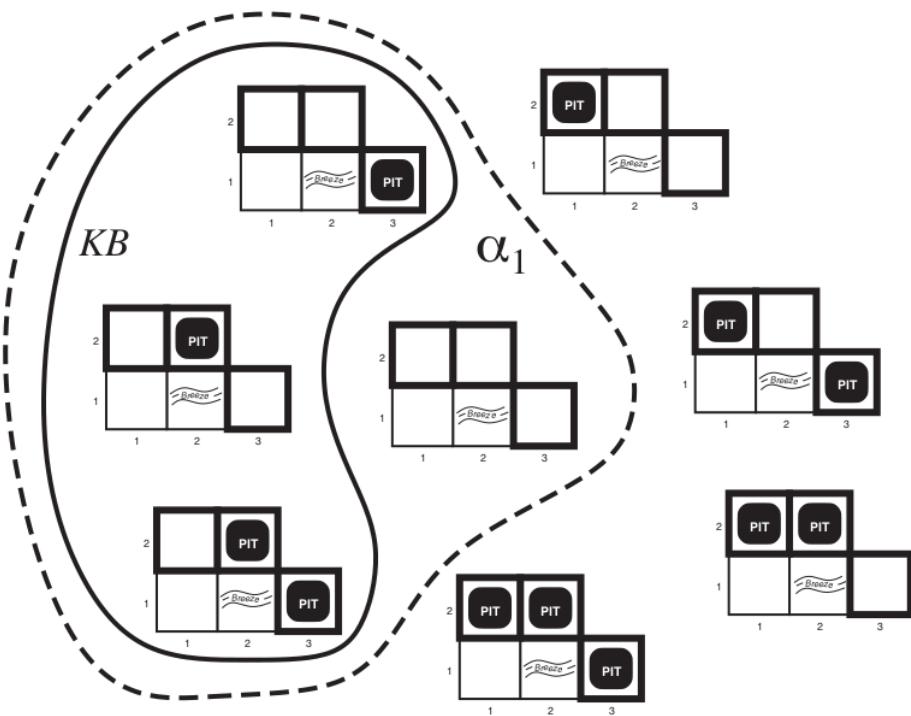
$$R_4 : \neg B_{1,1}$$

Le héros décide d'aller en (2,1) et il perçoit une brise

$$R_5 : B_{2,1}$$

III. Sémantique

Peut-on déduire qu'il n'y a pas de puits en (1,2) ?



(a)

$$KB = \{R_1, R_2, R_3, R_4, R_5\}$$

$$\alpha_1 = \neg P_{1,2}$$

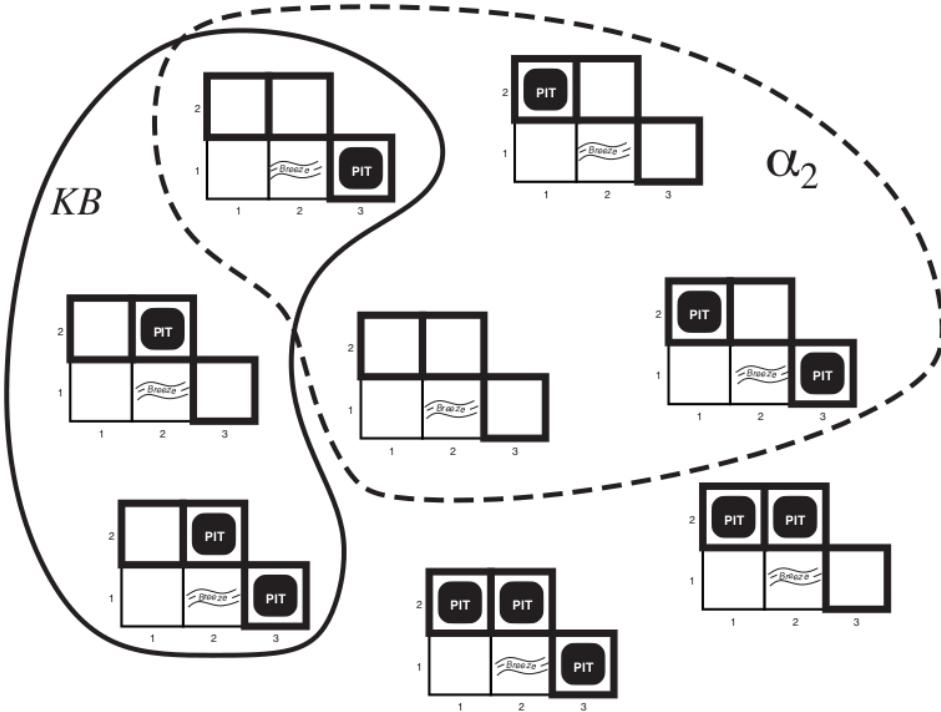
$$KB \models \alpha_1 ?$$

III. Sémantique

Peut-on déduire qu'il n'y a pas de puits en (2,2) ?

$$\alpha_2 : \neg P_{2,2}$$

$$KB \models \alpha_2 ?$$



(b)

IV. Axiomatique et théorie de la démonstration

Objectif : apporter des axiomes et une règle d'inférence permettant de modéliser le raisonnement en se basant uniquement sur la syntaxe

On introduit pour cela un nouveau symbole de déduction syntaxique : \vdash

Définition : la *déduction* (ou preuve, ou démonstration) d'une formule A à partir d'hypothèses H_1, \dots, H_m (notée $H_1, \dots, H_m \vdash A$) est une liste finie de formules (A_1, \dots, A_n) tel que :

- $A_n = A$
- pour $i = 1, \dots, n$ la formule A_i est :
 - soit un axiome (avec éventuelles substitutions)
 - soit égale à une des hypothèses H_j
 - soit obtenue par application d'une règle d'inférence à des prémisses précédant A_i dans la liste

Un *théorème* est une formule toujours vraie (notée $\vdash A$), c.-à.-d. une formule déductible sans hypothèse.

IV. Axiomatique et théorie de la démonstration

Un système hilbertien

De David Hilbert (1862-1943), mathématicien allemand et auteur de ses célèbres 23 problèmes.

Schéma d'axiomes

- $A1 : \vdash A \rightarrow (B \rightarrow A)$
- $A2 : \vdash (A \rightarrow (B \rightarrow C)) \rightarrow ((A \rightarrow B) \rightarrow (A \rightarrow C))$
- $A3 : \vdash (\neg B \rightarrow \neg A) \rightarrow (A \rightarrow B)$

Règle d'inférence

- *Modus Ponens:*

$$\frac{\vdash A, \quad \vdash A \rightarrow B}{\vdash B}$$

Règle de substitution

- Les A , B et C peuvent être remplacés par n'importe quelle formule bien formée

Remarque : il s'agit du plus petit schéma d'axiomes connu à ce jour...

Exemple

Montrons : $\vdash A \rightarrow A$

Étape 1 : $\vdash (A \rightarrow (B \rightarrow C)) \rightarrow ((A \rightarrow B) \rightarrow (A \rightarrow C))$ (Axiome 2)

Étape 2 : en substituant $A \rightarrow A$ à B et $A \rightarrow A$ à C on obtient

$$\vdash (A \rightarrow ((A \rightarrow A) \rightarrow A)) \rightarrow ((A \rightarrow (A \rightarrow A)) \rightarrow (A \rightarrow A))$$

Étape 3 : $\vdash A \rightarrow (B \rightarrow A)$ (Axiome 1)

Étape 4 : en substituant $A \rightarrow A$ à B dans 3 on obtient

$$\vdash A \rightarrow ((A \rightarrow A) \rightarrow A)$$

Étape 5 : *modus ponens* entre 4 et 2 permet d'obtenir

$$\vdash (A \rightarrow (A \rightarrow A)) \rightarrow (A \rightarrow A)$$

Étape 6 : en substituant A à B dans l'axiome 1 on obtient :

$$\vdash A \rightarrow (A \rightarrow A)$$

Étape 7 : *modus ponens* entre 5 et 6

$$\vdash A \rightarrow A$$

Autre schéma d'axiomes hilbertien

- $A \rightarrow (B \rightarrow A)$
- $(A \rightarrow B) \rightarrow ((A \rightarrow (B \rightarrow C)) \rightarrow (A \rightarrow C))$
- $A \rightarrow (B \rightarrow A \wedge B)$
- $(A \wedge B) \rightarrow A$
- $(A \wedge B) \rightarrow B$
- $A \rightarrow A \vee B$
- $B \rightarrow A \vee B$
- $(A \rightarrow C) \rightarrow ((B \rightarrow C) \rightarrow (A \vee B \rightarrow C))$
- $(A \rightarrow B) \rightarrow ((A \rightarrow \neg B) \rightarrow \neg A)$
- $\neg \neg A \rightarrow A$
- $\neg \perp$

IV. Axiomatique et théorie de la démonstration

Propriétés fondamentales

Propriété 1. (de complétude) Le calcul propositionnel est fortement complet, c'est-à-dire :

si $E \models A$ alors $E \vdash A$

Corollaire. Le calcul propositionnel est faiblement complet :

si $\models A$ alors $\vdash A$

Proposition 2. (d'adéquation) Le calcul propositionnel est adéquat :

si $\vdash A$ alors $\models A$

IV. Axiomatique et théorie de la démonstration

Propriétés fondamentales

Proposition 3. (de consistance) Le calcul propositionnel est consistant :

il n'existe pas de formule A telle que $\vdash A$ et $\vdash \neg A$

C'est une absence de paradoxe.

“

Paradoxe de Russell : l'ensemble des ensembles n'appartenant pas à eux-mêmes appartient-il à lui-même ?

IV. Axiomatique et théorie de la démonstration

Propriétés fondamentales

Proposition 4. (de décidabilité) Le calcul des propositions est décidable, c'est-à-dire qu'il existe une procédure mécanique permettant d'établir en un temps **fini** si une formule est un théorème ou n'est pas un théorème.

Exemple : tables de vérité...

Proposition 5. Le calcul des propositions n'est pas syntaxiquement complet, c'est-à-dire qu'il peut exister des formules φ tel qu'on ait ni $\vdash \varphi$, ni $\vdash \neg\varphi$.

Règles de déductions à partir de faits

Un système incomplet mais utilisable

- Modus Ponens :
$$\frac{A \rightarrow B, A}{B}$$
- Élimination de la conjonction :
$$\frac{A \wedge B}{A}$$
- Élimination de l'équivalence :
$$\frac{A \leftrightarrow B}{(A \rightarrow B) \wedge (B \rightarrow A)}$$
- Apparition de l'équivalence :
$$\frac{(A \rightarrow B) \wedge (B \rightarrow A)}{A \leftrightarrow B}$$
- Contraposée :
$$\frac{A \rightarrow B}{\neg B \rightarrow \neg A}$$
- Règles de Morgan :
$$\frac{\neg(A \vee B)}{\neg A \wedge \neg B}$$
- Règles de Morgan :
$$\frac{\neg(A \wedge B)}{\neg A \vee \neg B}$$
- Double négation :
$$\frac{\neg(\neg A)}{A}$$

On supposera acquise l'associativité du \wedge et du \vee

Wumpus II: le retour

- $R_1 : \neg P_{1,1}$
- $R_2 : B_{1,1} \leftrightarrow P_{1,2} \vee P_{2,1}$
- $R_3 : B_{2,1} \leftrightarrow P_{1,1} \vee P_{2,2} \vee P_{3,1}$
- $R_4 : \neg B_{1,1}$
- $R_5 : B_{2,1}$

Soit $KB = \{R_1, R_2, R_3, R_4, R_5\}$, montrons que $KB \vdash \neg P_{1,2}$

- $R_2 +$ élimination de l'équivalence donne
 $R_6 : (B_{1,1} \rightarrow P_{1,2} \vee P_{2,1}) \wedge (P_{1,2} \vee P_{2,1} \rightarrow B_{1,1})$
- $R_6 +$ élimination de la conjonction donne $R_7 : P_{1,2} \vee P_{2,1} \rightarrow B_{1,1}$
- $R_7 +$ contraposée donne $R_8 : \neg B_{1,1} \rightarrow \neg(P_{1,2} \vee P_{2,1})$
- $R_4 + R_8 +$ Modus Ponens donne $R_9 : \neg(P_{1,2} \vee P_{2,1})$
- $R_9 +$ de Morgan donne $R_{10} : \neg P_{1,2} \wedge \neg P_{2,1}$
- $R_{10} +$ élimination de la conjonction donne $R_{11} : \neg P_{1,2}$

V. Clauses et calcul propositionnel

Formes normales disjonctives

Définition : un **cube** est une conjonction de littéraux

Exemple : $a \wedge b \wedge \neg c$

Définition : une **forme normale disjonctive** (DNF) est une disjonction de cubes.

Exemples :

$(a \wedge b) \vee (\neg a \wedge \neg a) \vee (a \wedge b \wedge \neg c)$ est une forme disjonctive (mais pas normale, elle contient des cubes non purs)

$(a \wedge b) \vee (\neg a \wedge b) \vee (a \wedge b \wedge \neg c)$ est une DNF

Remarque 1 : pour vérifier si une DNF est valide, il suffit de vérifier un à un ses cubes.

Remarque 2 : une DNF peut être de taille exponentielle, par exemple \top .

Remarque 3 : les cubes sont dits purs si une variable n'apparaît qu'une seule fois.

V. Clauses et calcul propositionnel

Formes normales conjonctives

Définition : une **clause** est une disjonction de littéraux. Une clause est pure si chaque variable n'apparaît au plus qu'une seule fois.

Exemple : $a \vee b \vee \neg c$

Définition : une **forme normale conjonctive** (CNF) est une conjonction de clauses pures.

Exemple : $(a \vee b) \wedge (\neg a \vee b) \wedge (a \vee b \vee \neg c)$ est une CNF.

Remarque 1 : la taille d'une CNF peut également être exponentielle

Remarque 2 : cette forme est souvent plus utile pour représenter des connaissances

Remarque 3 : ... mais la recherche de validité n'est plus immédiate.

V. Clauses et calcul propositionnel

Autres écritures

Écriture implicative

- $\neg a \vee b$ peut s'écrire $a \rightarrow b$
- $\neg a \vee \neg b \vee c$ peut s'écrire $a \wedge b \rightarrow c$, voire $a, b \rightarrow c$
- $\neg a \vee b \vee c$ peut s'écrire $a \rightarrow b \vee c$, voire $a \rightarrow b, c$
- $\neg a \vee \neg b \vee c \vee d$ peut s'écrire $a \wedge b \rightarrow c \vee d$, voire $a, b \rightarrow c, d$
- a peut s'écrire $\top \rightarrow a$ ou $\rightarrow a$
- $\neg a$ peut s'écrire $a \rightarrow \perp$ ou $a \rightarrow$

V. Clauses et calcul propositionnel

Écriture ensembliste

$C_1 \wedge C_2 \wedge \dots \wedge C_n$ peut s'écrire sous forme ensembliste :

$N = \{C_1, C_2, \dots, C_n\}$ voire sous forme d'ensembles d'ensembles.

Exemple : $(a \vee b) \wedge (\neg a \vee b) \wedge (a \vee b \vee \neg c)$ peut s'écrire :

$$\{\{a, b\}, \{\neg a, b\}, \{a, b, \neg c\}\}$$

Le problème d'existence de modèle (problème de satisfiabilité) devient :

“

Il existe $\omega \in \Omega$ tel que quel que soit $C \in N$, il existe $l \in C$ tel que $\omega \models l$

V. Clauses et calcul propositionnel

Théorème de normalisation

Théorème. Toute formule peut se mettre sous forme CNF (resp. DNF).

Pour cela, on utilise les règles suivantes :

1. tous les $A \leftrightarrow B$ se réécrivent en $(A \rightarrow B) \wedge (B \rightarrow A)$
2. tous les $A \rightarrow B$ se réécrivent en $\neg A \vee B$
3. on utilise les règles de Morgan :
 - $\neg(A \vee B)$ se réécrit $\neg A \wedge \neg B$
 - $\neg(A \wedge B)$ se réécrit $\neg A \vee \neg B$
4. $\neg\neg A$ se réécrit A
5. on utilise la distributivité du \wedge et du \vee :
 - $A \vee (B \wedge C)$ se réécrit $(A \vee B) \wedge (A \vee C)$
 - $A \wedge (B \vee C)$ se réécrit $(A \wedge B) \vee (A \wedge C)$

Remarque : La conjonction de 2 CNF est une CNF \Rightarrow application récursive des règles de transformation quand on a une conjonction entre 2 formules quelconques

V. Clauses et calcul propositionnel

Exemple

Mettre sous forme CNF la formule $(p \rightarrow (q \rightarrow r)) \rightarrow (p \wedge s \rightarrow r)$

- Suppression des implications : $\neg(\neg p \vee (\neg q \vee r)) \vee (\neg(p \wedge s) \vee r)$
- Règle de Morgan : $\neg(\neg p \vee \neg q \vee r) \vee ((\neg p \vee \neg s) \vee r)$
- Règle de Morgan : $(p \wedge q \wedge \neg r) \vee (\neg p \vee \neg s \vee r)$
- Distribution :
 $(p \vee \neg p \vee \neg s \vee r) \wedge (q \vee \neg p \vee \neg s \vee r) \wedge (\neg r \vee \neg p \vee \neg s \vee r)$
- Associativité du \vee :
 $(p \vee \neg p \vee \neg s \vee r) \wedge (q \vee \neg p \vee \neg s \vee r) \wedge (\neg r \vee r \vee \neg p \vee \neg s)$
- Tautologies... : $(\top \vee \neg s \vee r) \wedge (q \vee \neg p \vee \neg s \vee r) \wedge (\top \vee \neg p \vee \neg s)$
- Tautologies et \vee : $\top \wedge (q \vee \neg p \vee \neg s \vee r) \wedge \top$
- Tautologies et \wedge : $q \vee \neg p \vee \neg s \vee r$

V. Clauses et calcul propositionnel

Wumpus III le retour

Mettre les règles du Wumpus sous forme de clauses...

- $R_1 : \neg P_{1,1}$
- $R_2 : B_{1,1} \leftrightarrow P_{1,2} \vee P_{2,1}$
- $R_3 : B_{2,1} \leftrightarrow P_{1,1} \vee P_{2,2} \vee P_{3,1}$
- $R_4 : \neg B_{1,1}$
- $R_5 : B_{2,1}$

OK pour R_1 , R_4 et R_5

Pour R_2 ...

V. Clauses et calcul propositionnel

- $R_2 : B_{1,1} \leftrightarrow P_{1,2} \vee P_{2,1}$

1. Suppression des équivalences :

$$(B_{1,1} \rightarrow P_{1,2} \vee P_{2,1}) \wedge (P_{1,2} \vee P_{2,1} \rightarrow B_{1,1})$$

2. Suppression des implications :

$$(\neg B_{1,1} \vee P_{1,2} \vee P_{2,1}) \wedge (\neg(P_{1,2} \vee P_{2,1}) \vee B_{1,1})$$

3. De Morgan : $(\neg B_{1,1} \vee P_{1,2} \vee P_{2,1}) \wedge ((\neg P_{1,2} \wedge \neg P_{2,1}) \vee B_{1,1})$

4. Distributivité du \vee :

$$(\neg B_{1,1} \vee P_{1,2} \vee P_{2,1}) \wedge (\neg P_{1,2} \vee B_{1,1}) \wedge (\neg P_{2,1} \vee B_{1,1})$$

En exercice : $R_3\dots$

V. Clauses et calcul propositionnel

Principe de résolution

Théorème. Soit N une forme normale conjonctive et C_1 et C_2 deux clauses de N .

Soit p un atome tel que $p \in C_1$ et $\neg p \in C_2$. Soit la clause

$R = C_1 \setminus \{p\} \cup C_2 \setminus \{\neg p\}$ alors les CNF N et $N \cup R$ sont équivalentes.

Ou encore sous forme de règle de réécriture :

$$\frac{A \vee B, \neg B \vee C}{A \vee C}$$

Preuve : il suffit de montrer que $A \vee B, \neg B \vee C \models A \vee C$

V. Clauses et calcul propositionnel

- Pour montrer qu'un ensemble de clauses est incohérent, on montre que l'on peut déduire la clause vide (autrement dit \perp)

Exemple

$$(\neg p \vee r) \wedge (\neg q \vee r) \wedge (p \vee q) \wedge \neg r$$

Version ensembliste :

$$\{\{\neg p, r\}, \{\neg q, r\}, \{p, q\}, \{\neg r\}\}$$

$$\{\{\neg p, r\}, \{\neg \mathbf{q}, \mathbf{r}\}, \{p, q\}, \{\neg \mathbf{r}\}\}$$

$$\{\{\neg \mathbf{p}, \mathbf{r}\}, \{\neg q, r\}, \{p, q\}, \{\neg \mathbf{r}\}, \{\neg q\}\}$$

$$\{\{\neg p, r\}, \{\neg q, r\}, \{\mathbf{p}, \mathbf{q}\}, \{\neg r\}, \{\neg q\}, \{\neg \mathbf{p}\}\}$$

$$\{\{\neg p, r\}, \{\neg q, r\}, \{p, q\}, \{\neg r\}, \{\neg \mathbf{q}\}, \{\neg p\}, \{\mathbf{q}\}\}$$

$$\{\{\neg p, r\}, \{\neg q, r\}, \{p, q\}, \{\neg r\}, \{\neg q\}, \{\neg p\}, \{q\}, \emptyset\}$$

V. Clauses et calcul propositionnel

Procédure automatique : Davis et Putnam (1960)

Entrée: une CNF N

1. Si $N = \emptyset$ alors N est cohérente
2. Si $\emptyset \in N$ alors N est incohérente sinon
3. Choisir un atome p
4. $N_p = \{\text{clauses contenant } p\}$
5. $N_{\neg p} = \{\text{clauses contenant } \neg p\}$
6. $N_c = N \setminus (N_p \cup N_{\neg p})$
7. Calculer $N'_p = \{N_p, \text{ sans } p\}$ /* cas où p est faux */
8. Calculer $N'_{\neg p} = \{N_{\neg p}, \text{ sans } \neg p\}$ /* cas où p est vrai */
9. N est incohérent si $N'_p \cup N_c$ et $N'_{\neg p} \cup N_c$ le sont également

V. Clauses et calcul propositionnel

Remarques

- L'algorithme termine toujours et est complet (on balaie l'ensemble des littéraux possibles)
- **Améliorations possibles :**
 - commencer par les clauses unitaires, puis les propager
 - élimination des littéraux purs (tous positifs ou tous négatifs) (algorithme DPLL)
 - trouver des symétries
 - etc.
- Dans le pire des cas, l'algorithme est exponentiel...

V. Clauses et calcul propositionnel

En théorie

Théorème de Cook-Levin (1961)

“

Sous l'hypothèse que $P \neq NP$, le problème de satisfiabilité d'une formule booléenne est NP-complet.

NB : un problème est dans NP si il est décidable par une machine de Turing non déterministe en un temps polynomial. Un problème est dans la classe P s'il est décidable en temps polynomial.

V. Clauses et calcul propositionnel

En pratique

Les formulations issues de vrais problèmes sont solubles très rapidement. Les *solvers* modernes peuvent gérer des millions de clauses et des dizaines de milliers de variables.

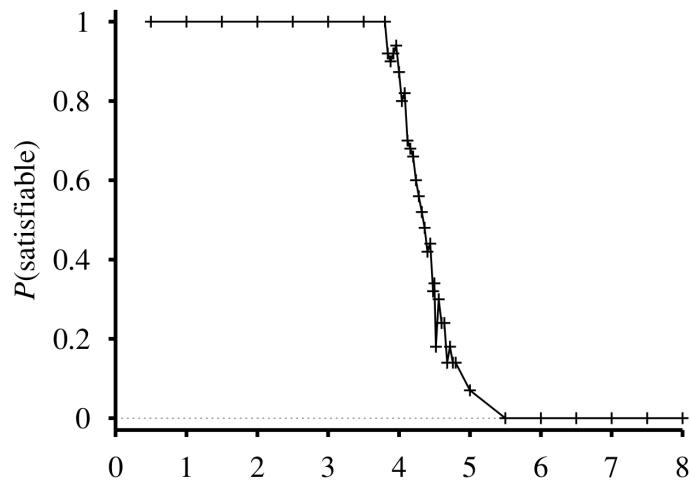
Quelques solver opensources :

- Glucose <http://www.labri.fr/perso/lsimon/glucose/>, issu de minisat <http://minisat/> en C++
- SAT4J <http://www.sat4j.org/> en Java
- gophersat <https://github.com/crillab/gophersat> en Go
- pysat <https://github.com/pysathq/pysat> en Python

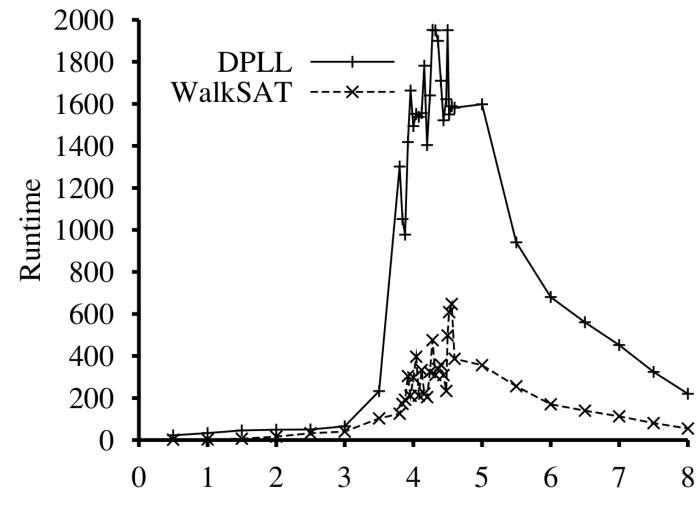
V. Clauses et calcul propositionnel

Transition de phase

Les problèmes les plus difficiles sont générés aléatoirement et ont un rapport #clauses/#variables d'environ 4.3...



(a)



(b)

V. Clauses et calcul propositionnel

Les clauses de Horn

Idée : puisqu'il ne semble pas exister d'algorithme toujours efficace, on peut se concentrer sur des fragments de la logique propositionnelle pour résoudre le problème SAT.

Exemples : 2-SAT (mais pas 3-SAT !), Horn, Horn renommable, etc.

Définition. Une clause de Horn est une clause où apparaît au plus un littéral positif

Exemples :

- clause de Horn stricte : $a \vee \neg b \vee \neg c \vee \neg d \vee \neg e$
- clause de Horn négative : $\neg a \vee \neg b \vee \neg c$
- clause de Horn positive : a

Question : et sous forme implicative ?

V. Clauses et calcul propositionnel

Les clauses de Horn

Définition. Une clause sous-sommée (subsumée) est une clause pouvant être déduite par une autre clause de la base de clauses

Exemple : $a \vee \neg b \vee \neg c$ est sous-sommée par $a \vee \neg b$

Remarque : Lors de la recherche de modèles, on peut supprimer toutes les clauses sous-sommées.

V. Clauses et calcul propositionnel

Les clauses de Horn

Application aux clauses de Horn :

Une clause positive p permet :

- d'enlever toutes les clauses qui contiennent p
- de réduire les clauses qui contiennent $\neg p$ (propagation unitaire)

Exemple

- $\{a \vee \neg b \vee \neg c, \neg a \vee b, a\}$
- $\{\neg a \vee b, a\}$
- $\{b, a\}$

Une clause unitaire négative $\neg p$ permet :

- d'enlever toutes les clauses qui contiennent $\neg p$
- de réduire les clauses qui contiennent p (propagation unitaire)

V. Clauses et calcul propositionnel

Les clauses de Horn

Algorithme

1. On applique toutes les propagations unitaires
2. On supprime toutes les clauses sous-sommées
3. Si on obtient la clause vide, l'ensemble est inconsistante
4. Sinon, on peut exhiber un modèle

Exercice :

$$1. \{\neg a \vee \neg b, \neg c \vee d, a, \neg a \vee \neg d\}$$

$$2. \{\neg p \vee r, \neg r \vee s, p, \neg r\}$$

VI. Modéliser et résoudre des problèmes en logique propositionnelle

Objectif

- Utiliser la logique propositionnelle pour modéliser un problème et utiliser un solveur SAT pour le résoudre

Méthode/démarche systématique

- **Étape 1** : Choix du vocabulaire
- **Étape 2** : Modélisation du problème/de la base de connaissance KB en logique propositionnelle
- **Étape 3** : Mise sous forme clausale
- **Étape 4** : Vérifier la cohérence de KB (via SAT)
- **Étape 5** : Encoder une requête en se ramenant à un problème SAT

VI. Modéliser et résoudre des problèmes en logique propositionnelle

Étape 1 : Choix du vocabulaire

- Il peut être utile de détecter que deux variables sont synonymes/équivalentes (*petit_lutin_bleu* \leftrightarrow *Schtroumpf*) ou antonymes/contraires (*sorcier_competent* \leftrightarrow \neg *gargamel*)
- Problème des variables qui comprennent plus de 2 valeurs (exemple des couleurs)
- Il pourra être nécessaire de renommer certains atomes afin de mettre des clauses sous forme de Horn

Étape 2 : Modélisation du problème/de la base de connaissance KB en logique propositionnelle

- Problème d'ambiguïté du langage...
- C'est l'étape faisant le plus intervenir de savoir-faire et d'intelligence humaine...

VI. Modéliser et résoudre des problèmes en logique propositionnelle

Étape 3 : Mise sous forme clausale

- On reprend la méthode mécanique présentée précédemment...
- On peut avoir besoin d'un programme pour générer entièrement le problème...

Étape 4 : Vérifier la cohérence de KB (via SAT)

- ÉTAPE ABSOLUMENT NÉCESSAIRE
- En cas d'incohérence, on pourra tout déduire et son contraire

Étape 5 : Encoder une requête en se ramenant à un problème SAT

- Test de satisfiabilité (SAT)
- Trouver une conséquence
- Trouver une conséquence conditionnelle
- Compter les modèles
- ...

VI. Modéliser et résoudre des problèmes en logique propositionnelle

Différentes requêtes possibles

Satisfiabilité

- découverte d'au moins 1 modèle, c.-à-d. une assignation solution du problème modélisé
- absolument nécessaire avant de lancer des requêtes depuis KB
- difficilement faisable à la main sur un problème réel... On utilisera des solveurs SAT dédiés

VI. Modéliser et résoudre des problèmes en logique propositionnelle

Trouver une conséquence logique

- $KB \models C ?$
- $KB \cup \{\neg C\} \models \perp$
- $KB \cup \{\neg C\} \vdash \perp$
- *remarque 1* : $\neg C$ doit être mise sous forme clausale
- *remarque 2* : on peut inférer (déduire) C , $\neg C$ ou ni l'un ni l'autre
- *remarque 3* : on peut toujours ajouter une conséquence à la base de départ, cela peut aider le solveur (surtout dans le cas de clauses unitaires)

VI. Modéliser et résoudre des problèmes en logique propositionnelle

Trouver une conséquence conditionnelle

- Si H est vrai, puis-je déduire C ?
- $KB \models H \rightarrow C$?
- $KB \cup \{\neg(H \rightarrow C)\} \vdash \perp$
- $KB \cup \{\neg(\neg H \vee C)\} \vdash \perp$
- $KB \cup \{(H \wedge \neg C)\} \vdash \perp$
- $KB \cup \{H, \neg C\} \vdash \perp$
- Ce qui revient à $KB \cup \{H\} \vdash C$!

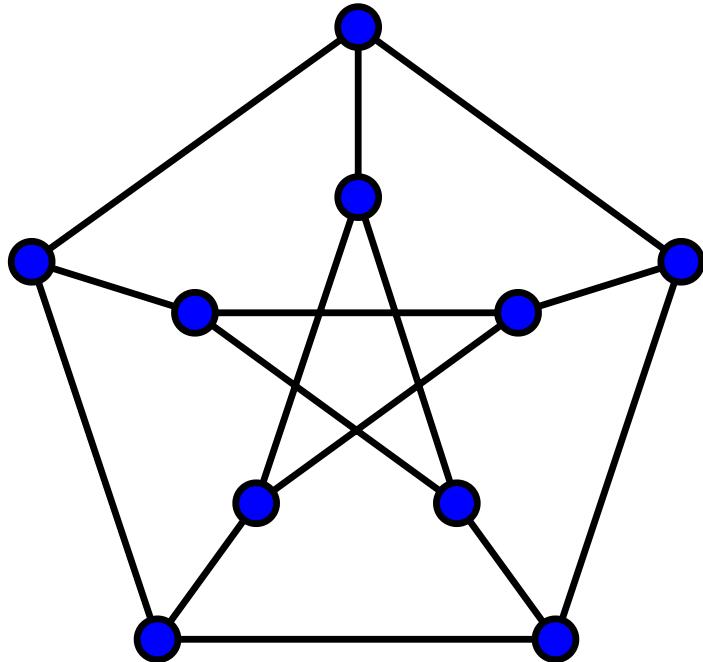
VI. Modéliser et résoudre des problèmes en logique propositionnelle

Compter les modèles/avoir l'ensemble des modèles

- Si KB est cohérente (satisfiable), le solveur renvoie une interprétation
- Un modèle peut être vu comme une conjonction de littéraux, ex. : $a \wedge \neg b \wedge c$
- Pour avoir l'ensemble des modèles on ajoute la négation de la conjonction à KB, ex. :
 - $\neg(a \wedge \neg b \wedge c)$
 - $\neg a \vee b \vee \neg c$ (c'est une clause !)
- On recommence jusqu'à tomber sur l'incohérence...

Exemple : coloration d'un graphe avec 3 couleurs

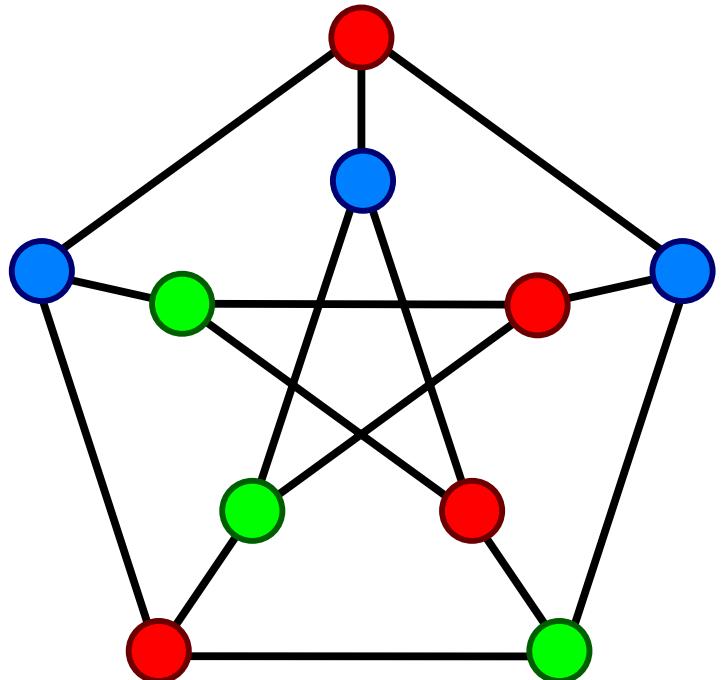
- Un **graphe** est un ensemble de nœuds/sommets et d'arêtes/arcs.



- Réprésentation informatique : matrice d'adjacence ou liste de sommets adjacents...

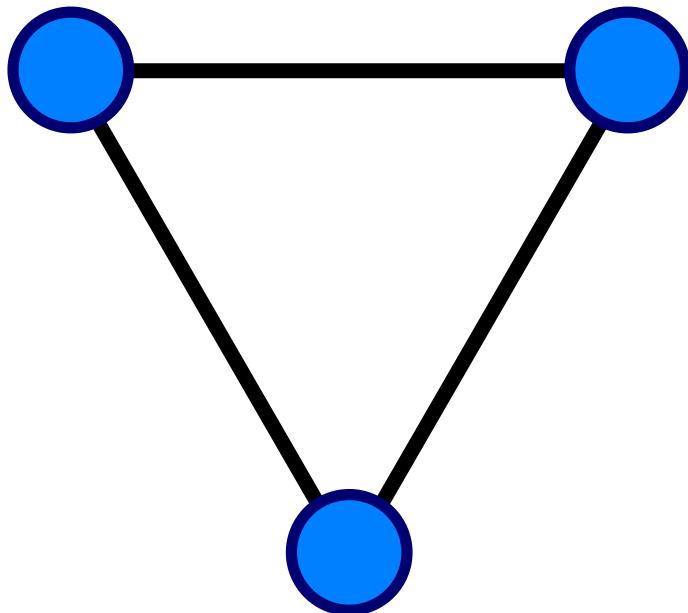
Exemple : coloration d'un graphe avec 3 couleurs

- **Problème de coloration d'un graphe :** 2 sommets adjacents (reliés par un arc) ne peuvent pas avoir la même couleur.
- Dualemment, on peut colorier les arcs...



Exemple : coloration d'un graphe avec 3 couleurs

- **Question** : comment encoder le problème de coloration à 3 couleurs du graphe suivant ?



Exemple : coloration d'un graphe avec 3 couleurs

Étape 1 : choix des variables

- On considère 3 couleurs (R, G, B).
- Problème : les variables booléennes ne peuvent prendre que 2 valeurs...
- Couleurs du sommet 1 : $S1R, S1G, S1B$
- Couleurs du sommet 2 : $S2R, S2G, S2B$
- Couleurs du sommet 3 : $S3R, S3G, S3B$

Exemple : coloration d'un graphe avec 3 couleurs

Étape 2 : modélisation du problème

- Chaque sommet doit être colorié par une couleur :

$$S1R \vee S1G \vee S1B$$

$$S2R \vee S2G \vee S2B$$

$$S3R \vee S3G \vee S3B$$

- Chaque sommet ne peut être colorié qu'avec une seule couleur :

$$S1R \leftrightarrow \neg S1G \wedge \neg S1B$$

$$S1G \leftrightarrow \neg S1R \wedge \neg S1B$$

$$S1B \leftrightarrow \neg S1R \wedge \neg S1G$$

...

$$S3B \leftrightarrow \neg S3R \wedge \neg S3G$$

Exemple : coloration d'un graphe avec 3 couleurs

- Chaque sommet a une couleur différente des sommets adjacents :

$$S1R \rightarrow \neg S2R \wedge \neg S3R$$

$$S1G \rightarrow \neg S2G \wedge \neg S3G$$

$$S1B \rightarrow \neg S2B \wedge \neg S3B$$

...

$$S3B \rightarrow \neg S1B \wedge \neg S2B$$

Exemple : coloration d'un graphe avec 3 couleurs

Étape 3 : Mise sous forme clausale

$$S1R \vee S1G \vee S1B$$

$$S1R \leftrightarrow \neg S1G \wedge \neg S1B$$

$$(S1R \rightarrow \neg S1G \wedge \neg S1B) \wedge (\neg S1G \wedge \neg S1B \rightarrow S1R)$$

$$(\neg S1R \vee (\neg S1G \wedge \neg S1B)) \wedge (\neg(\neg S1G \wedge \neg S1B) \vee S1R)$$

$$(\neg S1R \vee \neg S1G) \wedge (\neg S1R \vee \neg S1B) \wedge (S1G \vee S1B \vee S1R)$$

Exemple : coloration d'un graphe avec 3 couleurs

$$S1R \vee S1G \vee S1B$$
$$\neg S1R \vee \neg S1G$$
$$\neg S1R \vee \neg S1B$$
$$\neg S1G \vee \neg S1B$$
$$S2R \vee S2G \vee S2B$$
$$\neg S2R \vee \neg S2B$$
$$\neg S2G \vee \neg S2B$$
$$\neg S2G \vee \neg S2R$$
$$S3R \vee S3G \vee S3B$$
$$\neg S3R \vee \neg S3B$$
$$\neg S3G \vee \neg S3B$$
$$\neg S3G \vee \neg S3R$$

Exemple : coloration d'un graphe avec 3 couleurs

$$S1R \rightarrow \neg S2R \wedge \neg S3R$$

$$\neg S1R \vee (\neg S2R \wedge \neg S3R)$$

$$(\neg S1R \vee \neg S2R) \wedge (\neg S1R \vee \neg S3R)$$

Exemple : coloration d'un graphe avec 3 couleurs

$$\neg S1R \vee \neg S2R$$

$$\neg S1R \vee \neg S3R$$

$$\neg S2R \vee \neg S3R$$

$$\neg S1G \vee \neg S2G$$

$$\neg S1G \vee \neg S3G$$

$$\neg S2G \vee \neg S3G$$

$$\neg S1B \vee \neg S2B$$

$$\neg S1B \vee \neg S3B$$

$$\neg S2B \vee \neg S3B$$

La base de clause entière

$S1R \vee S1G \vee S1B$

$\neg S1R \vee \neg S2R$

$\neg S1R \vee \neg S1B$

$\neg S1R \vee \neg S3R$

$\neg S1G \vee \neg S1B$

$\neg S2R \vee \neg S3R$

$\neg S1G \vee \neg S1R$

$\neg S1G \vee \neg S2G$

$S2R \vee S2G \vee S2B$

$\neg S1G \vee \neg S3G$

$\neg S2R \vee \neg S2B$

$\neg S2G \vee \neg S3G$

$\neg S2G \vee \neg S2B$

$\neg S1B \vee \neg S2B$

$\neg S2G \vee \neg S2R$

$\neg S1B \vee \neg S3B$

$S3R \vee S3G \vee S3B$

$\neg S2B \vee \neg S3B$

$\neg S3R \vee \neg S3B$

$\neg S3G \vee \neg S3B$

$\neg S3G \vee \neg S3R$

Les requêtes possibles

- Existe-t-il une solution ?
- Existe-t-il une solution en coloriant le sommet 1 en bleu ?
- Combien existe-t-il de colorations différentes ?
- Donner toutes les solutions possibles

Exercice conclusif

Encoder entièrement le problème du Wumpus.

4	 Stench		 Breeze	PIT
3		 Breeze  Stench  Gold	PIT	 Breeze
2	 Stench		 Breeze	
1	 START	 Breeze	PIT	 Breeze
	1	2	3	4

VII. Conclusion/synthèse

Définition de la logique propositionnelle

- Définition formelle du langage propositionnel
- Définition de l'ensemble des formules valides à partir des modèles/interprétations et des tables de vérité $\models \varphi$
- Définition de l'ensemble des théorèmes à partir d'axiomes et du *Modus Ponens*
 $\vdash \varphi$
- Équivalence des 2 approches, complétude et adéquation de la logique propositionnelle

Définition de la conséquence logique à partir d'un ensemble de faits/d'hypothèses

- Définition d'une conséquence logique sémantique basée sur les interprétations $H_1, H_2, \dots, H_n \models C$
- Définition d'une conséquence logique syntaxique basée sur des règles de réécriture $H_1, H_2, \dots, H_n \vdash C$
- Équivalence des 2 approches

VII. Conclusion/synthèse

Calcul clausal et modélisation de problème

- Toute formule peut s'écrire sous la forme d'une CNF
- À partir de cette forme, seuls le principe de résolution et la sous-sommation sont utiles
- Les clauses de Horn permettent de résoudre le problème en temps polynomial
- On peut utiliser des solveurs SAT pour résoudre le problème de satisfiabilité ainsi que pour répondre à d'autres requêtes

Quelques limites

- Explosion du nombre de clauses, de variables et problème de lisibilité...
- On ne peut pas encoder des règles du type :

“

Tous les humains sont mortels. Socrate est un humain. Donc Socrate est mortel.

To be continued

