

---

## Le calcul propositionnel

---

## Logique Propositionnelle

---

- Syntaxe
- Sémantique
- Définissabilité
- Systèmes de preuves
  - Systèmes de preuves sémantiques (tables de vérité)
  - Systèmes de preuves syntaxiques

## Syntaxe de la logique propositionnelle

---

Soit  $\mathcal{R}$  un ensemble dénombrable de lettres dites propositionnelles.

**Définition :** L'ensemble de formules de la logique propositionnelle est le plus petit ensemble contenant  $\mathcal{R}$  et fermé par les opérations binaires  $\vee$ ,  $\wedge$ ,  $\rightarrow$  et l'opération unaire  $\neg$ .

**Exemple :**  $\neg(p)$      $\vee(p, p)$      $\rightarrow (\wedge(p, q), \neg(r))$

**Autre notation :**  $\neg p$      $p \vee p$      $(p \wedge q) \rightarrow \neg r$

**Notation :** On écrira  $\#$  pour  $\vee$ ,  $\wedge$  ou  $\rightarrow$ .

**Remarque :** C'est un ensemble inductif, donc on pourra appliquer le principe d'induction.

## $\mathcal{SF}(A)$ : sous-formules d'une formule $A$

---

- Si  $A$  est une lettre  $p$ ,  $\mathcal{SF}(A) = \{p\}$ .
- Si  $A$  est  $\neg(B)$ ,  $\mathcal{SF}(A) = \{\neg B\} \cup \mathcal{SF}(B)$ .
- Si  $A$  est  $\#(B, C)$ ,  $\mathcal{SF}(A) = \{\#(B, C)\} \cup \mathcal{SF}(B) \cup \mathcal{SF}(C)$ .

## Sémantique de la logique propositionnelle

---

Étant donnée une valeur de l'ensemble  $\mathbf{BOOL} = \{\mathbf{V}, \mathbf{F}\}$  pour chaque lettre propositionnelle, on veut établir la valeur d'une formule propositionnelle  $A$ .

- Fixer une **interprétation** qui donne  $\mathbf{V}$  ou  $\mathbf{F}$  à chaque lettre propositionnelle.
- Définir la **fonction booléenne unaire**  $\mathcal{FB}_{\neg} : \mathbf{BOOL} \rightarrow \mathbf{BOOL}$  et les **fonctions booléennes binaires**  $\mathcal{FB}_{\vee}, \mathcal{FB}_{\wedge}, \mathcal{FB}_{\rightarrow} : \mathbf{BOOL}^2 \rightarrow \mathbf{BOOL}$ .
- Construire la **valeur de vérité** de la formule  $A$ .

## La fonction booléenne unaire

---

$$\mathcal{FB}_{\neg}(\mathbf{V}) = \mathbf{F}$$

$$\mathcal{FB}_{\neg}(\mathbf{F}) = \mathbf{V}$$

## Les fonctions booléennes binaires

---

$$\mathcal{FB}_\vee(\mathbf{V}, \mathbf{V}) = \mathbf{V}$$

$$\mathcal{FB}_\vee(\mathbf{V}, \mathbf{F}) = \mathbf{V}$$

$$\mathcal{FB}_\vee(\mathbf{F}, \mathbf{V}) = \mathbf{V}$$

$$\mathcal{FB}_\vee(\mathbf{F}, \mathbf{F}) = \mathbf{F}$$

$$\mathcal{FB}_\wedge(\mathbf{V}, \mathbf{V}) = \mathbf{V}$$

$$\mathcal{FB}_\wedge(\mathbf{V}, \mathbf{F}) = \mathbf{F}$$

$$\mathcal{FB}_\wedge(\mathbf{F}, \mathbf{V}) = \mathbf{F}$$

$$\mathcal{FB}_\wedge(\mathbf{F}, \mathbf{F}) = \mathbf{F}$$

$$\mathcal{FB}_\neg(\mathbf{V}, \mathbf{V}) = \mathbf{V}$$

$$\mathcal{FB}_\neg(\mathbf{V}, \mathbf{F}) = \mathbf{F}$$

$$\mathcal{FB}_\neg(\mathbf{F}, \mathbf{V}) = \mathbf{V}$$

$$\mathcal{FB}_\neg(\mathbf{F}, \mathbf{F}) = \mathbf{V}$$

## Valeur de vérité d'une formule $A$ par rapport à une interprétation $I$

---

- Si  $A$  est une lettre  $p$ ,  $[A]_I = I(p)$ .
- Si  $A$  est  $\neg(B)$ ,  $[A]_I = \mathcal{FB}_\neg([B]_I)$ .
- Si  $A$  est  $\#(B, C)$ ,  $[A]_I = \mathcal{FB}_\#([B]_I, [C]_I)$ .

**Exercice :** Soit  $I$  l'interprétation  $I(p) = \mathbf{V}$ ,  $I(q) = \mathbf{F}$ . Calculer la valeur de vérité de la formule  $(p \vee q) \rightarrow \neg(q \wedge q)$  par rapport à  $I$ .

## Tables de vérité

---

**À quoi sert ?** Méthode pour raisonner sur les modèles de formules propositionnelles.

**Comment ça marche ?** Soit  $A$  une formule ayant comme lettres propositionnelles l'ensemble  $\{p_1, \dots, p_n\}$  et dont l'ensemble de sous-formules est  $\{A_1, \dots, A_k\}$ .

1. Construire une table où chaque colonne est étiquetée par une lettre  $p_i$  ou bien par une sous-formule  $A_j$ .
2. Pour chaque ligne  $m$  de la table :
  - (a) Donner une interprétation  $I_m$  aux lettres  $p_1, \dots, p_n$ .
  - (b) Calculer les valeurs  $[A_1]_{I_m}, \dots, [A_k]_{I_m}$ .

## Satisfaire et falsifier une formule

---

Soit  $I$  une interprétation,  $A$  une formule et  $\Delta$  un ensemble de formules.

**Définition :**

$I$  **satisfait** une **formule**  $A$  si  $[A]_I = \mathbf{V}$

$I$  **falsifie** une **formule**  $A$  si  $[A]_I = \mathbf{F}$ .

$I$  **satisfait** un **ensemble de formules**  $\Delta$  si  $I$  satisfait toute formule de  $\Delta$ .

$I$  **falsifie** un **ensemble de formules**  $\Delta$  ssi il existe au moins une formule  $A$  dans  $\Delta$  telle que  $[A]_I = \mathbf{F}$ .

## Formules satisfaisables, contradictoires, valides

---

**Définition :** Une formule  $A$  est **satisfaisable** s'il existe au moins une interprétation  $I$  qui satisfait  $A$ . Un **ensemble de formules**  $\Delta$  est **satisfaisable** s'il existe au moins une interprétation  $I$  telle que  $I$  satisfait  $\Delta$ , c'est à dire s'il existe au moins une interprétation  $I$  telle que  $I$  satisfait toutes les formules de  $\Delta$  en même temps.

**Définition :** Une formule  $A$  est **contradictoire** si elle n'est pas satisfaisable, c'est à dire s'il n'existe pas d'interprétation  $I$  qui satisfait  $A$  (si toute interprétation falsifie  $A$ ). Un **ensemble de formules**  $\Delta$  est **contradictoire** si il n'est pas satisfaisable (s'il n'existe pas d'interprétation qui satisfait toutes les formules de  $\Delta$  en même temps).

## Conséquence logique et validité

---

**Définition :** Une formule  $A$  est **valide** si toute interprétation satisfait  $A$ . Un **ensemble** de formules  $\Delta$  est **valide** si toute formule de  $\Delta$  est valide.

**Définition :** Une formule  $A$  est **conséquence logique** d'un **ensemble de formules**  $\Delta$ , noté  $\Delta \models A$ , si toute interprétation qui satisfait  $\Delta$  satisfait aussi  $A$ .

### Comment lire une table de vérité?

---

- Si la colonne étiquetée par la formule  $A$  (qui est une sous-formule de  $A$ ) ne contient que de  $\mathbf{V}$ , alors  $A$  est **valide**.
- Si la colonne de la formule  $A$  ne contient que de  $\mathbf{F}$ , alors  $A$  est **contradictoire**.
- Sinon, l'interprétation qui rends  $\mathbf{V}$  la colonne de la formule  $A$  **satisfait**  $A$  et l'interprétation qui rends  $\mathbf{F}$  la colonne de la formule  $A$  **falsifie**  $A$ .

### Équivalence logique

---

**Définition :** Deux formules  $A$  et  $B$  sont **équivalentes**, noté  $A \equiv B$ , ssi  $\{A\} \models B$  et  $\{B\} \models A$ .

**Remarque :**  $A \equiv B$  ssi  $(A \rightarrow B) \wedge (B \rightarrow A)$  est valide.

### Encore quelques exemples

---

$$\text{(Associativité)} \quad (A \vee B) \vee C \equiv A \vee (B \vee C)$$

$$(A \wedge B) \wedge C \equiv A \wedge (B \wedge C)$$

---

$$\text{(Commutativité)} \quad A \vee B \equiv B \vee A$$

$$A \wedge B \equiv B \wedge A$$

---

$$\text{(Idempotence)} \quad A \vee A \equiv A$$

$$A \wedge A \equiv A$$

---

$$\text{(Lois de De Morgan)} \quad \neg(A \wedge B) \equiv \neg A \vee \neg B$$

$$\neg(A \vee B) \equiv \neg A \wedge \neg B$$

---

$$\text{(Distributivité)} \quad A \vee (B \wedge C) \equiv (A \vee B) \wedge (A \vee C)$$

$$A \wedge (B \vee C) \equiv (A \wedge B) \vee (A \wedge C)$$

---

$$\text{(Loi de la double négation)} \quad \neg\neg A \equiv A$$

---

$$\text{(Définissabilité de } \rightarrow \text{)} \quad A \rightarrow B \equiv \neg A \vee B$$



## Remarques

---

1.  $\{E_1, \dots, E_n\} \models A$  ssi la formule  $E_1 \wedge \dots \wedge E_n \rightarrow A$  est valide.
2. Si  $\Delta$  est satisfaisable et  $\Gamma \subseteq \Delta$ , alors  $\Gamma$  est satisfaisable.
3. L'ensemble vide est satisfaisable.
4. L'ensemble de toutes les formules est contradictoire.
5. Si  $\Delta$  est satisfaisable, alors  $\Delta$  est finiment satisfaisable.
6. Si  $\Gamma$  est contradictoire et  $\Gamma \subseteq \Delta$ , alors  $\Delta$  est contradictoire.
7. Toute formule est conséquence logique d'un ensemble insatisfaisable de formules.
8. Toute formule valide est conséquence logique d'un ensemble quelconque de formules, en particulier de l'ensemble vide.
9.  $A$  est valide ssi  $\neg A$  est insatisfaisable.
10.  $\Delta \models A$  ssi  $\Delta \cup \{\neg A\}$  est insatisfaisable.

### Théorème de compacité

---

**Théorème :** Un ensemble de formules  $\Delta$  est **satisfaisable** ssi tout **sous-ensemble fini** de  $\Delta$  est **satisfaisable**.

### Définissabilité

---

**Définition :** Soit  $A$  une formule avec  $n$  lettres propositionnelles  $p_1, \dots, p_n$  ( $n \geq 0$ ). La **fonction** booléenne  $n$ -aire qui **réalise** la **formule**  $A$  est une fonction  $\mathcal{FB}_A : \mathbf{BOOL}^n \rightarrow \mathbf{BOOL}$  telle que

$$\mathcal{FB}_A(v_1, \dots, v_n) = [A]_I \text{ si } I(p_i) = v_i$$

pour toute interprétation  $I$  de  $p_1, \dots, p_n$ .

### Ensemble de connecteurs complet

---

**Définition :** Un ensemble  $\mathcal{C}$  de connecteurs est **complet** ssi pour toute fonction booléenne  $f$  il existe une formule  $A$  contenant uniquement des connecteurs de  $\mathcal{C}$  telle que  $f$  réalise  $A$ .

**Théorème :** L'ensemble  $\{\neg, \wedge, \vee\}$  est complet.

### Intuition de la preuve

---

$v_1$	$v_2$	$v_3$	$f(v_1, v_2, v_3)$	
<b>V</b>	<b>V</b>	<b>V</b>	<b>V</b>	$(p_1 \wedge p_2 \wedge p_3) \vee$
<b>V</b>	<b>V</b>	<b>F</b>	<b>F</b>	
<b>V</b>	<b>F</b>	<b>V</b>	<b>F</b>	
<b>V</b>	<b>F</b>	<b>F</b>	<b>V</b>	$(p_1 \wedge \neg p_2 \wedge \neg p_3) \vee$
<b>F</b>	<b>V</b>	<b>V</b>	<b>V</b>	$(\neg p_1 \wedge p_2 \wedge p_3) \vee$
<b>F</b>	<b>V</b>	<b>F</b>	<b>V</b>	$(\neg p_1 \wedge p_2 \wedge \neg p_3) \vee$
<b>F</b>	<b>F</b>	<b>V</b>	<b>F</b>	
<b>F</b>	<b>F</b>	<b>F</b>	<b>V</b>	$(\neg p_1 \wedge \neg p_2 \wedge \neg p_3)$