

# Simulation de circuits électroniques avec SPICE

## I. Introduction à la simulation

- **La simulation est l'expérimentation sur un modèle** qui consiste à :
  - réaliser une reproduction artificielle (appelée modèle) plus ou moins fidèle du phénomène que l'on désire étudier ;
  - observer le comportement de cette reproduction lorsque l'on fait varier expérimentalement les actions que l'on peut exercer sur celle-ci ;
  - en induire ce qui se passerait dans la réalité sous l'influence d'actions analogues.

## I. Introduction à la simulation

- Le problème central d'une expérience de simulation est celui de la correspondance entre le modèle simulable et la réalité qu'il représente.

## I. Introduction à la simulation

- À partir d'une théorie d'un phénomène quelconque, il est généralement possible :
  - soit de construire un mécanisme physique ou une maquette dont le fonctionnement présente des analogies avec le déroulement du phénomène réel tel que la théorie le décrit : on parle alors de simulation analogique ;
  - soit d'élaborer un modèle abstrait programmable sur ordinateur : on parle alors de simulation numérique.

## I. Introduction à la simulation

- La première solution est la plus ancienne
  - expérimentation sur maquette (maquette d'avion en soufflerie ou d'une coque de navire en bassin)
- La seconde solution n'a pu apparaître qu'avec l'invention de l'ordinateur, au lendemain de la Seconde Guerre mondiale.
  - La plus aisée à mettre en œuvre, et la plus répandue dans tous les domaines.

## I. Introduction à la simulation

- La modélisation du système à étudier doit satisfaire à deux contraintes antinomiques :
  - être la plus précise possible pour obtenir un résultat reflétant au mieux la réalité,
  - être la plus simple possible pour minimiser le volume et le temps des calculs.
- La crédibilité des résultats dépend fortement de la qualité du modèle soumis au simulateur.

## I. Introduction à la simulation

- L'utilisateur doit donc posséder des connaissances approfondies du fonctionnement des systèmes qu'il simule pour pouvoir apprécier les limites d'exploitation des résultats qui lui sont délivrés par le calculateur.

## I. Introduction à la simulation

- Cela signifie que **lorsque vous utiliserez** le simulateur de circuits électroniques **SPICE**, **vous devrez** :
  - **avoir préalablement parfaitement formulé ce que vous allez demander** au système et **avoir une idée précise de ce que vous allez obtenir** (à l'aide de **calculs théoriques**) ;
  - **interpréter** ensuite de façon détaillée **les résultats obtenus** en simulation et **les comparer aux prévisions théoriques**, comme s'il s'agissait de résultats de mesures.

## **II. Ingénierie assistée par ordinateur (IAO)**

- Computer Aided Engineering (C.A.E)
- Conception Assistée par ordinateur (C.A.O) et Conception et Fabrication Assistées par Ordinateur (C.F.A.O)

## **II. Ingénierie assistée par ordinateur (IAO)**

- Un système d'I.A.O. comprend :
  - des matériels (ordinateurs, écrans...)
  - et des logiciels (programmes de calculs, de gestion de données, etc.).
- L'homme, avec son savoir-faire, ses capacités d'analyse et de synthèse, utilise au mieux les possibilités de la machine dans les domaines du calcul, de la manipulation d'information ou de la visualisation.

## II. Ingénierie assistée par ordinateur : historique

- Les débuts de l'IAO remontent aux années 60-70 dans les domaines de la mécanique et de l'**électronique** (conception de circuits intégrés)
- **domaines dans lesquels les essais coûtent cher** (maquettes, prototypes, masques de circuits intégrés).
- simulation de systèmes numériques à partir des années 60 ;
- • simulation de systèmes analogiques à partir des années 70 (SPICE).

## II. Ingénierie assistée par ordinateur : historique

- A cette époque (et jusqu'au début des années 80), ces logiciels de simulation ne fonctionnaient que sur de gros calculateurs (mini-ordinateurs)
- Années 80-85 :
  - développement de la microélectronique, des microprocesseurs ;
  - les micro-ordinateurs deviennent de plus en plus performants et leur puissance de calcul dépasse celle des anciens mini-ordinateurs, avec des possibilités graphiques importantes.

## II. Ingénierie assistée par ordinateur : historique

- Introduction de l'utilisation chez l'équipementier « moyen » d'outils de :
  - saisie de schéma ;
  - simulation électrique (analogique) ou logique ;
  - analyse de testabilité ;
  - placement et routage de composants standards sur une carte imprimée ou de cellules logiques dans un circuit spécifique (ASIC) ;
  - dessin des tracés d'interconnexions pour une carte ou pour un circuit spécifique ;
  - ...

## III. Le logiciel de simulation *SPICE*

- *SPICE* est un programme informatique conçu pour simuler des circuits électroniques analogiques. Son but originel était de fournir une aide au développement des circuits intégrés, d'où son nom de *Simulation Program for Integrated Circuit Emphasis*.

### III. Le logiciel de simulation *SPICE*

- Développement initié à la fin des années 60, par Ron ROHRER, un jeune enseignant de l'université de Berkeley en Californie
- Ancêtre du logiciel libre
- Améliorations successives : SPICE1, 2, 2G6 (standard de l'industrie pendant de nombreuses années), 3 (écrit en langage C)

### III. Le logiciel de simulation *SPICE*

- Améliorations intégrées dans de nombreuses versions commerciales, se distinguant par les applications ciblées et leurs interfaces graphiques
  - PSPICE (Microsim, Orcad, Cadence), standard industriel
  - Electronics Workbench (tourné vers le monde de l'éducation)
  - Proteus
  - Altium Designer



### III. Le logiciel de simulation *SPICE*

- Versions gratuites proposées par des fabricants de circuits intégrés
  - Tina SPICE (Texas Instruments)
  - **LTSPICE IV (Linear Technology)** que nous utiliserons
    - Performant, communauté active
    - Téléchargeable depuis <http://www.linear.com/designtools/software/#LTspice>
    - vous êtes invités à l'installer sur vos ordinateurs personnels

### IV. Principes de base de la programmation *SPICE*

- Les programmes que *SPICE* exécute sont de **simples fichiers** de type **texte** contenant :
  - une **description nœud par nœud** du circuit que l'on désire simuler ;
  - des **commandes correspondant au type d'analyse** que l'on désire faire effectuer (**temporelle, fréquentielle, ...**).

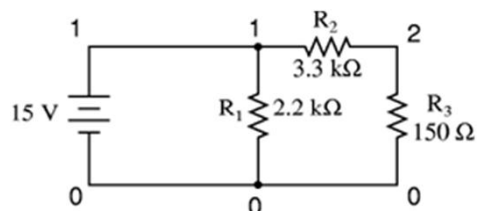
## IV. Principes de base de la programmation SPICE

- Ces fichiers texte « programme » doivent être écrits en respectant une certaine **syntaxe**.
- *SPICE* est un langage interprété
- Les fichiers programmes SPICE sont appelés "**netlists**" :
  - liste des nœuds ou des équipotentiels ou encore des interconnexions"

## IV. Principes de base de la programmation SPICE

### ■ Exemple de netlist

- Exemple Netlist
- v1 1 0 dc 15
- R1 1 0 2.2k
- R2 1 2 3.3k
- R3 2 0 150
- .OP
- .end



## V. Composants SPICE

- Un circuit *SPICE* est défini par un fichier qui décrit les composants constituant ce circuit et la façon dont ils sont interconnectés.
- On trouve essentiellement dans les circuits SPICE des composants des types suivants

## V. Composants SPICE

- des **résistances** dont le nom doit commencer par la lettre R ;
- des **capacités** (C) ;
- des **inductances** (L) ;
- des **sources de tension indépendantes** (V) ;
- des **sources de courant indépendantes** (I) ;

## V. Composants SPICE

- Des composants semiconducteurs
  - diode (D)
  - transistor bipolaire (Q)
  - transistor à effet de champ à jonction (J)
  - transistor à effet de champ MOS (M)
- L'utilisateur a la possibilité de rajouter ses propres modèles

## V. Composants SPICE

- Modèle comportemental
  - représentation de type externe ou "boîte noire" : le comportement du circuit modélisé est remplacé par sa fonction de transfert

## V. Composants SPICE

- Macro-modèle ou sous-circuit (subckt)
  - utilise les techniques de modélisation discrète et comportementale présentées précédemment.
  - Technique mise en œuvre notamment pour la **description des modèles des amplificateurs opérationnels** ; ceux-ci se présentent sous la forme d'un fichier au format texte, éditable avec n'importe quel éditeur de texte.

## V. Composants SPICE

- **SPICE ne fait pas la distinction entre les majuscules et les minuscules** (ainsi "le m" qui est le symbole standard pour "milli" et "le M" qui est le symbole standard pour "Mega" sont interprétés de façon identique)

## VI. Sources indépendantes

- La simulation est à mettre en parallèle avec le travail en laboratoire :
  - sauf dans le cas de montages purement passifs, un montage nécessite une alimentation afin de pouvoir polariser ses composants actifs (transistors, amplificateurs opérationnels, ...)
  - le montage doit être excité afin de pouvoir relever son comportement.
- Ces deux fonctions sont réalisées à l'aide de **sources indépendantes**. La définition de ces sources est donc nécessaire à la simulation.

## VI. Sources indépendantes

- Les sources indépendantes sont soit des sources de courant (I) soit des sources de tension (V) et peuvent être de type :
  - **continu** (identifié par le paramètre **DC**), utilisable pour **tous les types d'analyse**,
  - **sinusoïdal** (identifié par le paramètre **AC**) pour une **analyse dans le domaine des fréquences**, seule l'amplitude est alors spécifiée,
  - **périodique** (sinusoïdale, impulsionnelle, ...) pour une **analyse transitoire**.

## VI. Sources indépendantes

- Ces sources sont considérées comme parfaites. Une source de tension est ainsi capable de fournir un courant infini. De même, une source de courant délivrera son courant quelle que soit la tension à ses bornes.
- Lorsqu'un schéma est réalisé, il faut le tester pour au moins une des trois analyses classiques : en continu, transitoire ou harmonique.

## VI. Sources commandées

- Il s'agit de dipôles de nature complètement différente de celle des sources indépendantes. Ils sont utilisés pour la modélisation de composants complexes comme les transistors et les amplificateurs opérationnels (la fameuse relation  $I_C = b I_B$  qui régit le fonctionnement du transistor bipolaire est modélisée à l'aide d'une source de courant commandée par un courant).

## VI. Sources commandées

- Elles ne peuvent pas seuls fournir l'énergie nécessaire pour exciter un circuit électrique et y faire circuler des courants et créer des tensions : si on "éteint" les sources indépendantes d'un circuit actif (comme on le fait lorsque l'on cherche la résistance de Thévenin d'un dipôle actif), les dipôles commandés qu'il contient deviennent passifs

## VI. Sources commandées

- SPICE permet l'utilisation de 4 types de sources commandées linéairement, définies par des équations du type :
  - $i = g v$     $v_2 = e v_1$     $i_2 = f i_1$     $v = h i$
- Un AOP idéal peut être modélisé par une source de tension commandée en tension



## VII. Types d'analyses

- Ils sont spécifiés à l'aide de lignes de commandes incluses dans les fichiers "Netlist«
  - **.AC**                    Analyse fréquentielle
  - **.DC**                    Analyse en continu
  - **.DISTO** Analyse de distorsion harmonique
  - **.NOISE** Analyse de bruit
  - **.OP**                    Calcul du point de repos
  - **.PZ**                    Calcul des pôles et zéros
  - **.SENS**                Analyse de sensibilité
  - **.TF**                    Calcul de fonction de transfert
  - **.TRAN**                Analyse temporelle

## VII. Types d'analyses

### Analyses en continu (DC Analysis)

- **détermine les valeurs des grandeurs électriques pour un fonctionnement en continu** du circuit étudié ; les inductances sont donc court-circuitées et les condensateurs remplacés par des circuits ouverts. Seules sont prises en considération les sources continues.
  - **.OP**
  - **.DC (DC Sweep)**
    - fait varier (infiniment lentement) une source indépendante de courant ou de tension dans un intervalle défini par l'utilisateur

## VII. Types d'analyses

### Analyse temporelle (Transient Analysis)

- détermine la réponse temporelle du circuit sur un intervalle de temps spécifié par l'utilisateur
  - on spécifie l'intervalle de temps pendant lequel s'effectue la simulation, ainsi que le pas temporel maximum entre deux points de calcul
  - les excitations (sources indépendantes) du circuit sont définies par leur loi de variation temporelle : sinus, exponentielle, impulsion, ...; ces signaux sont causaux, ils "démarrrent" à l'instant du début de la simulation, on visualise donc un régime transitoire
  - il s'agit d'une analyse de type "forts signaux", c'est à dire qui tient compte des éventuelles non-linéarités du circuit.
  - On peut y inclure une analyse du spectre en fréquence des signaux (Fourier analysis)

## VII. Types d'analyses

### Analyse fréquentielle (AC Sweep ou balayage fréquentiel)

- calcule la **réponse en fréquence** du circuit soumis à une excitation sinusoïdale permanente (on parle de **régime harmonique**). Elle est utilisée notamment pour tracer les diagrammes de Bode.
  - Le programme calcule d'abord le point de fonctionnement en continu et détermine les modèles linéaires petits signaux de tous les composants non linéaires du circuit. Le circuit ainsi linéarisé est ensuite analysé sur l'intervalle de fréquence spécifié par l'utilisateur.
  - La sortie désirée d'une analyse fréquentielle est souvent une fonction de transfert (gain en tension, impédance de transfert ...etc.). Si le circuit a une seule source de balayage fréquentiel, il est pratique de lui donner une amplitude égale à l'unité et une phase nulle, de telle façon que les variables de sortie aient la même valeur que la fonction de transfert.