



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF M'SILA



Module : Simulation des composants semiconducteurs

SIMULATION ANALOGIQUES DES CIRCUITS ÉLECTRONIQUES

**En vue d'un enseignement hybride au profit des étudiants
de 2^{ème} année Master, Spécialité : Microélectronique**

Responsable du module: Dr. Moufdi HADJAB

Année universitaire: 2024/2025

PLAN DE COURS



1. INTRODUCTION



2. NOTIONS SUR LA SIMULATION ANALOGIQUE



3. PROCÉDURE INTERNE D'UN SIMULATEUR ÉLECTRIQUE



4. ALGORITHMES DE MODÉLISATION DES CIRCUITS ANALOGIQUES

1. INTRODUCTION

- ❑ La **simulation électrique** est une méthode largement employée dans l'industrie **électronique** et **microélectronique** en particulier. En effet, la complexité des calculs manuels caractérisant la prise en compte de divers phénomènes physiques régissant le fonctionnement des dispositifs rend le recours à la simulation électrique très nécessaire.
- ❑ Nous présentons dans ce **chapitre la procédure générale de la simulation analogique des circuits électronique** ainsi que **divers types d'algorithmes de modélisation des systèmes composés des circuits analogiques**.

- ❑ المحاكاة الكهربائية هي طريقة مستخدمة على نطاق واسع في الصناعة الإلكترونية والإلكترونية الدقيقة على وجه الخصوص. في الواقع، فإن تعقيد الحسابات اليدوية التي تميز السعر في حساب مختلف الظواهر الفيزيائية المتوافقة مع وظيفة الأجهزة يجعل اللجوء إلى المحاكاة الكهربائية أمراً ضرورياً للغاية.
- ❑ نقدم في هذا الفصل الإجراءات العام للمحاكاة التناظرية للدوائر الإلكترونية بالإضافة إلى أنواع مختلفة من الخوارزميات لنمذجة الأنظمة المكونة من دوائر تناظرية.

2. NOTIONS SUR LA SIMULATION ANALOGIQUE

□ **La simulation analogique** est une méthode de modélisation qui vise à représenter le comportement d'un système physique continu par le biais de modèles mathématiques. Contrairement à la simulation numérique qui manipule des valeurs discrètes, la simulation analogique s'appuie sur des modèles continus pour étudier des phénomènes tels que les circuits électroniques, les systèmes dynamiques, et d'autres systèmes physiques.

المحاكاة التناظرية هي طريقة نمذجة تهدف إلى تمثيل سلوك النظام الفيزيائي المستمر من خلال النماذج الرياضية. على عكس المحاكاة الرقمية التي تعالج أو المتقطعة، تعتمد المحاكاة التناظرية على نماذج مستمرة القيم المنفصلة لدراسة ظواهر مثل الدوائر الإلكترونية، الأنظمة الديناميكية وكذا الأنظمة الفيزيائية الأخرى.

2. NOTIONS SUR LA SIMULATION ANALOGIQUE

- ❑ La simulation analogique est une méthode de modélisation qui reproduit le comportement continu d'un système physique à l'aide de modèles mathématiques. Voici quelques notions clés sur la simulation analogique :
- ❑ **Représentation Continue** : La simulation analogique travaille avec des grandeurs continues, modélisées par des équations différentielles, en contrastant avec la simulation numérique qui manipule des valeurs discrètes.
- ❑ **Applications en Électronique** : Elle est largement utilisée pour simuler des circuits électroniques, aidant à comprendre le comportement des composants tels que résistances, condensateurs, et transistors.
- ❑ **Équations Différentielles** : Les équations différentielles sont couramment utilisées pour décrire l'évolution temporelle des grandeurs physiques dans un système continu.
- ❑ **Méthode des Éléments Finis** : Elle peut utiliser la méthode des éléments finis pour diviser un système en petits éléments afin de résoudre localement les équations du système.

مفاهيم حول المحاكاة التناظرية

- ☐ المحاكاة التناظرية هي طريقة نمذجة تعمل على إعادة إنتاج السلوك المستمر لنظام فيزيائي باستخدام النماذج الرياضية. إليك بعض الأفكار البسيطة حول المحاكاة التناظرية:
- ☐ التمثيل المستمر: تعمل المحاكاة التناظرية بأحجام مستمرة تم تصميمها بواسطة المعادلات التفاضلية، على النقيض من المحاكاة الرقمية التي تعالج القيم المنفصلة.
- ☐ تطبيقات في الإلكترونيات: يستخدم على نطاق واسع لمحاكاة الدوائر الإلكترونية، مما يساعد على فهم سلوك المكونات مثل المقاومات والمكثفات والترانزستورات.
- ☐ المعادلات التفاضلية: تستخدم المعادلات التفاضلية بشكل شائع لوصف التطور الزمني للكميات الفيزيائية في نظام مستمر.
- ☐ طريقة العناصر المحدودة: يمكن استخدام طريقة العناصر المحدودة لتقسيم النظام إلى عناصر صغيرة من أجل حل معادلات النظام محلياً.

2. NOTIONS SUR LA SIMULATION ANALOGIQUE

- ❑ **Analyse Fréquentielle** : La simulation analogique permet l'analyse en fréquence pour étudier la réponse d'un système à des signaux de différentes fréquences.
- ❑ **Stabilité Numérique** : La stabilité numérique est cruciale pour éviter des erreurs dans les résultats de simulation, nécessitant une sélection judicieuse du pas de temps dans les simulations temporelles.
- ❑ **Couplage de Domaines** : La simulation analogique peut être étendue pour modéliser des systèmes complexes impliquant le couplage de domaines multiples, tels que l'électrique, le thermique et le mécanique.
- ❑ **Applications Diverses** : Outre l'électronique, la simulation analogique est utilisée dans des domaines variés tels que la mécanique des fluides, la thermodynamique et les systèmes de contrôle.
- ❑ **Simulateurs Analogiques** : Des logiciels tels que SPICE (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis) sont utilisés comme simulateurs analogiques pour modéliser et analyser des circuits électroniques.
- ❑ En résumé, la **simulation analogique** offre une méthode puissante pour comprendre le comportement des systèmes continus, notamment dans le domaine de l'électronique, en utilisant des modèles mathématiques et des techniques d'analyse.

مفاهيم حول المحاكاة التناظرية

- ❑ تحليل التردد: تتيح المحاكاة التناظرية تحليل التردد لدراسة استجابة النظام للإشارات ذات الترددات المختلفة.
- ❑ الاستقرار العددي: الاستقرار العددي أمر بالغ الأهمية لتجنب الأخطاء في نتائج المحاكاة، مما يستلزم اختيار حكيم للخطوات الزمنية في عمليات المحاكاة الزمنية.
- ❑ اقتران المجالات: يمكن توسيع نطاق المحاكاة التناظرية لتشمل أنظمة معقدة تتضمن اقتران مجالات متعددة، مثل المجالات الكهربائية والحرارية والميكانيكية.
- ❑ تطبيقات مختلفة: بخلاف الإلكترونيات، تُستخدم المحاكاة التناظرية في مجالات مختلفة مثل ميكانيكا الموائع والديناميكا الحرارية وأنظمة التحكم.
- ❑ أجهزة المحاكاة التناظرية: تُستخدم برامج مثل: SPICE برنامج المحاكاة مع التركيز على الدوائر المتكاملة) كمحاكاة تناظرية لنمذجة وتحليل الدوائر الإلكترونية.
- ❑ باختصار، توفر المحاكاة التناظرية طريقة قوية لفهم سلوك الأنظمة المستمرة، لا سيما في مجال الإلكترونيات، باستخدام النماذج الرياضية وتقنيات التحليل.

- LE SIMULATEUR SPICE

- ❑ **SPICE (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis)** est un logiciel de simulation analogique largement utilisé dans le domaine de l'électronique.
- ❑ Il a été développé à l'Université de Californie à Berkeley dans les années 1970 et est devenu un standard de facto dans l'industrie électronique.
- ❑ SPICE permet de modéliser et d'analyser le comportement des circuits électroniques en simulant une variété de composants tels que résistances, condensateurs, transistors, etc.
- ❑ Les circuits sont décrits à l'aide d'un langage de description spécifique, et SPICE prend en charge différents types de simulations, notamment temporelles et fréquentielles.
- ❑ Il est largement utilisé pour la conception, la validation et l'optimisation de circuits électroniques avant leur mise en production.
- ❑ Des variantes de SPICE existent, dont LTspice, une version gratuite et populaire, et le logiciel continue d'évoluer pour répondre aux besoins de la conception électronique moderne.

برنامج المحاكاة SPICE

- ❑ SPICE هو برنامج المحاكاة مع التركيز على الدوائر المتكاملة: هو برنامج محاكاة تناظري يستخدم على نطاق واسع في مجال الإلكترونيات.
- ❑ تم تطويره في جامعة كاليفورنيا، بيركلي في السبعينيات وأصبح معيارًا فعليًا في صناعة الإلكترونيات.
- ❑ يتيح SPICE نمذجة وتحليل سلوك الدوائر الإلكترونية من خلال محاكاة مجموعة متنوعة من المكونات مثل المقاومات والمكثفات والترانزستورات وما إلى ذلك.
- ❑ يتم وصف الدوائر باستخدام لغة وصف محددة، ويدعم SPICE أنواعًا مختلفة من عمليات المحاكاة، بما في ذلك الوقت والتردد.
- ❑ يتم استخدامه على نطاق واسع لتصميم الدوائر الإلكترونية والتحقق من صحتها وتحسينها قبل وضعها في الإنتاج.
- ❑ توجد أنواع مختلفة من SPICE، بما في ذلك LTspice، وهو إصدار مجاني شائع، ويستمر البرنامج في التطور لتلبية احتياجات تصميم الإلكترونيات الحديثة.

- LE SIMULATEUR SPICE

- ❑ Une **bibliothèque de composants** qui sont modélisés dans le code même du logiciel de simulation est fournie comportant des éléments passifs (résistances, capacités, inductances, inductances mutuelles), des composants semi-conducteurs (diodes, transistors bipolaires, à effet de champ JFET et MOSFET), des sources idéales indépendantes de tension et de courant et enfin des sources idéales contrôlées.
- ❑ Grâce à un logiciel de simulation électrique, on peut vérifier la conformité des résultats expérimentaux sans passer par la phase d'élaboration du prototype, surtout pour les circuits de grande complexité comportant un grand nombre d'éléments non linéaires.

❑ تتضمن مكتبة المكونات التي تم تصميمها في الكود نفسه لبرنامج المحاكاة عناصر سلبية (المقاومات، السعات، المحاثات، المحاثات المتبادلة (مكونات أشباه الموصلات) الثنائيات، الترانزستورات ثنائية القطب، JFETs ذات التأثير الميداني و MOSFETs)، والمصادر المثالية مستقلون عن التوتر والجهد ويحددون المصادر المثالية التي يمكن التحكم فيها.

❑ بفضل برامج المحاكاة الكهربائية، يمكن التحقق من مطابقة النتائج التجريبية دون المرور بمرحلة تطوير النموذج الأولي، خاصة بالنسبة للدوائر ذات التعقيد الكبير التي تتضمن عددًا كبيرًا من العناصر غير الخطية.

PROCÉDURE INTERNE D'UN SIMULATEUR ÉLECTRIQUE

a. Principe de base d'un simulateur

- ❑ En général, les langages de simulation analogique se servent de modèles d'équations représentant le comportement physique de différents composants. La précision de ces modèles dépend de la complexité des équations et aussi des nombre de paramètres.
- ❑ Les simulateurs analogiques sont consacrés à analyser le contenu fréquentiel et temporel des circuits. De ce fait, ils disposent des algorithmes de résolution numériques des équations différentielles.

الإجراء الداخلي للمحاكاة الكهربائية - المبدأ الأساسي لبرنامج المحاكاة

- ❑ بشكل عام، تستخدم لغات المحاكاة التناظرية نماذج معادلات تمثل السلوك الفيزيائي للمكونات المختلفة. تعتمد دقة هذه النماذج على مدى تعقيد المعادلات وكذلك على عدد المعلومات.
- ❑ برامج المحاكاة التناظرية مخصصة لتحليل محتوى التردد والوقت للدوائر. ونتيجة لذلك، أصبح لديهم خوارزميات رقمية لحل المعادلات التفاضلية.

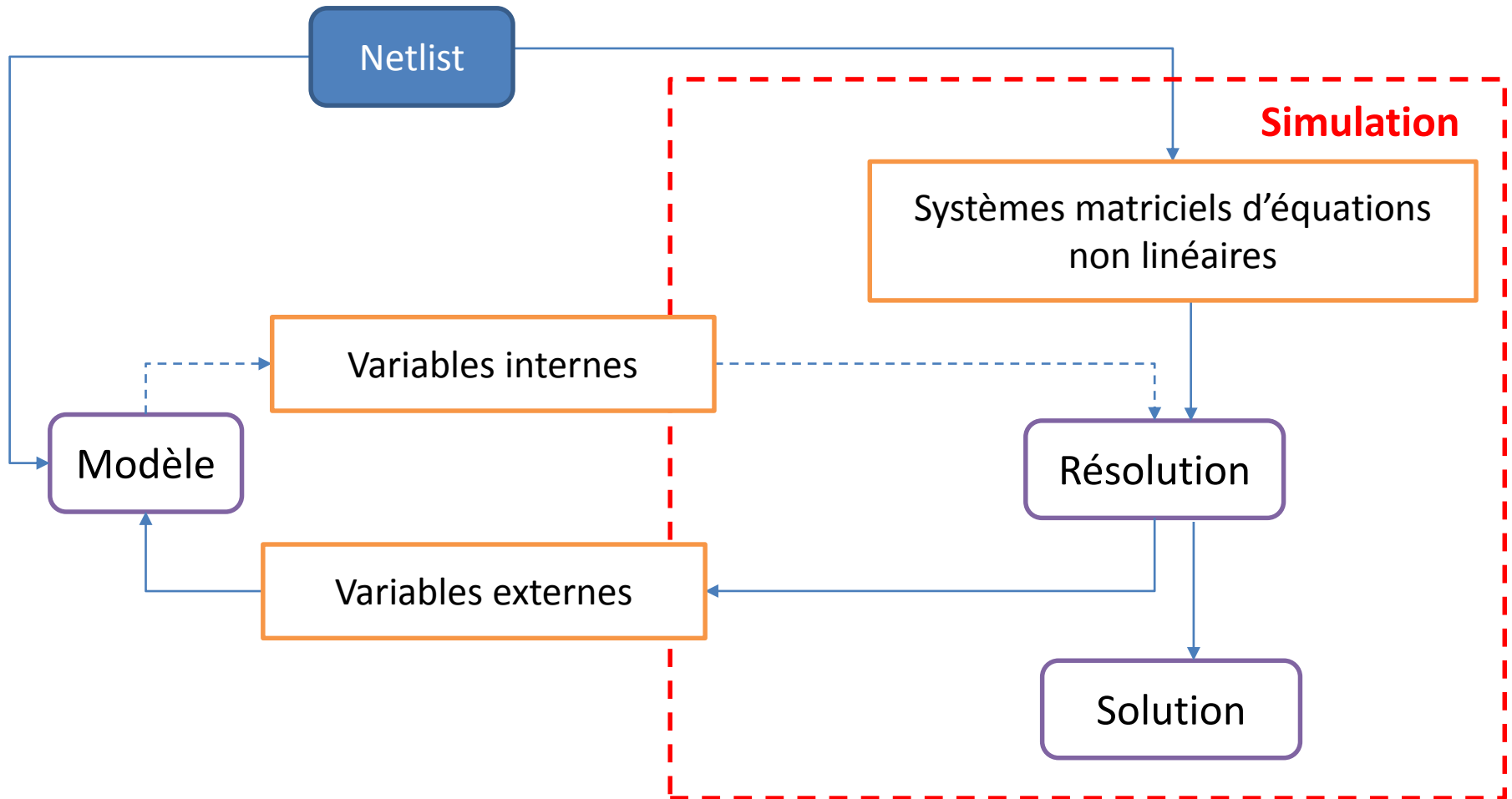
a. Principe de base d'un simulateur

- D'autre façon; Le principe général d'un simulateur électrique consiste à **modéliser le comportement d'un système électrique** à l'aide de **modèles mathématiques**, puis à **analyser son fonctionnement** dans des conditions spécifiques. L'utilisateur définit le **circuit électrique** en spécifiant les composants et leurs connexions, attribue des **modèles mathématiques à chaque composant**, et fixe les **conditions initiales**. Ensuite, le simulateur **résout numériquement les équations** du circuit pour différentes simulations, telles que des analyses transitoires ou fréquentielles. Les résultats obtenus permettent à l'utilisateur **d'analyser le comportement** du circuit, d'ajuster des paramètres si nécessaire, et **d'optimiser la conception** avant la réalisation physique. Les simulateurs électriques, comme SPICE, sont des outils cruciaux pour la conception et l'analyse des systèmes électriques.

- بطريقة أخرى؛ المبدأ العام للمحاكي الكهربائي هو نمذجة سلوك النظام الكهربائي باستخدام نماذج رياضية ثم تحليل عمله في ظل ظروف محددة. يقوم المستخدم بتعريف الدائرة الكهربائية من خلال تحديد المكونات وتوصيلاتها، وتعيين نماذج رياضية لكل مكون، وتحديد الشروط الأولية. بعد ذلك، يقوم جهاز المحاكاة بحل معادلات الدائرة عددياً لعمليات محاكاة مختلفة، مثل التحليلات العابرة أو الترددية. تسمح النتائج التي تم الحصول عليها للمستخدم بتحليل سلوك الدائرة، وضبط المعلمات إذا لزم الأمر، وتحسين التصميم قبل التنفيذ المادي. تعد أجهزة المحاكاة الكهربائية، مثل SPICE، أدوات حاسمة لتصميم وتحليل الأنظمة الكهربائية.

SIMULATION ANALOGIQUES DES CIRCUITS ÉLECTRONIQUES

a. Principe de base d'un simulateur



Principe général d'un simulateur électrique.

a. Principe de base d'un simulateur

- ❑ Cette figure montre que les circuits sont décrits par une liste des interconnexions, appelée *Netlist*, indiquant comment sont connectés les composants.
- ❑ A chaque modèle, un système d'équations décrivant les lois aux différents nœuds (tension et courant) est associé. Le simulateur résout ces systèmes d'équations non linéaires par des méthodes d'intégration numérique, des techniques itératives et des méthodes de résolution matricielles.

❑ يوضح هذا الشكل أن الدوائر موصوفة بقائمة من الوصلات البينية، تسمى *Netlist*، تشير إلى كيفية توصيل المكونات.

❑ يرتبط كل نموذج بنظام معادلات يصف القوانين عند العقد المختلفة (الجهد والتيار). يقوم جهاز المحاكاة بحل أنظمة المعادلات غير الخطية هذه باستخدام طرق التكامل العددي والتقنيات التكرارية وطرق حل المصفوفات..

b. La mise en équation des circuits électriques

- Un circuit électrique constitué d'un ensemble de branches, peut être décrit par un système d'équations satisfaisant aux équations de Kirchhoff des courants et des tensions, ainsi qu'aux équations des composants.
- Chaque composant, considéré comme une interconnexion de branches, exprime les relations des tensions ou courants de ses branches, en fonction des inconnues du circuit.

□ يمكن وصف الدائرة الكهربائية المكونة من مجموعة من الفروع من خلال نظام من المعادلات التي تحقق معادلات كيرشوف للتيارات والجهود، بالإضافة إلى معادلات المكونات. كل مكون، يعتبر بمثابة ترابط بين الفروع، يعبر عن علاقات جهود أو تيارات فروعه، حسب مجاهيل الدائرة.



Y a-t-il des questions !
