REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF M'SILA

Module : **Simulation des composants semiconducteurs**

MODELISATION ET SIMULATION DES CIRCUITS ANALOGIQUES ET MIXTES

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

Responsable du module: Dr. Moufdi HADJAB

Année universitaire: **2024/2025**

PLAN DE COURS

1. CONTEXTE ET DÉFINITIONS
(CRITÈRES DE QUALITÉ D'UN MODÈLE)

2. SIMULATION ÉLECTRONIQUE

3. CONCEPTION HIÉRARCHIQUE
(MODÈLE ET NIVEAU D'ABSTRACTION)

4. MÉTHODOLOGIE DE MODÉLISATION

5. SIMULATION DES SYSTÈMES MIXTES (ANALOGIQUE-DIGITALE)

4. METHODOLOGIE DE MODELISATION

- La modélisation comportementale signifie le processus partant de l'analyse du comportement d'un circuit et aboutissant à un système d'équations ou un algorithme descriptif.
- Ce processus diffère selon les phases de la conception d'un système :
  - en phase descendante **(Top-Down)** on parle de **raffinement des modèles**, dans le sens où ils vont vers des niveaux de précision croissants (grand nombre de variables d'état et de performances modélisées)
  - en phase montante **(Bottom-Up)** on parle à l'inverse de **simplification de modèles**.

- النمذجة السلوكية تعني العملية التي تبدأ من تحليل سلوك الدائرة وينتج عنها نظام من المعادلات أو خوارزمية وصفية.
- تختلف هذه العملية حسب مراحل تصميم النظام:
  - في المرحلة التنازلية (**من أعلى إلى أسفل**) نتحدث عن تحسين (صقل) النماذج، بمعنى أنها تتحرك نحو مستويات متزايدة من الدقة (عدد كبير من متغيرات الحالة والأداء النموذجي)
  - في مرحلة الصعود (**من الأسفل إلى الأعلى**) نتحدث بالعكس عن تبسيط النماذج.

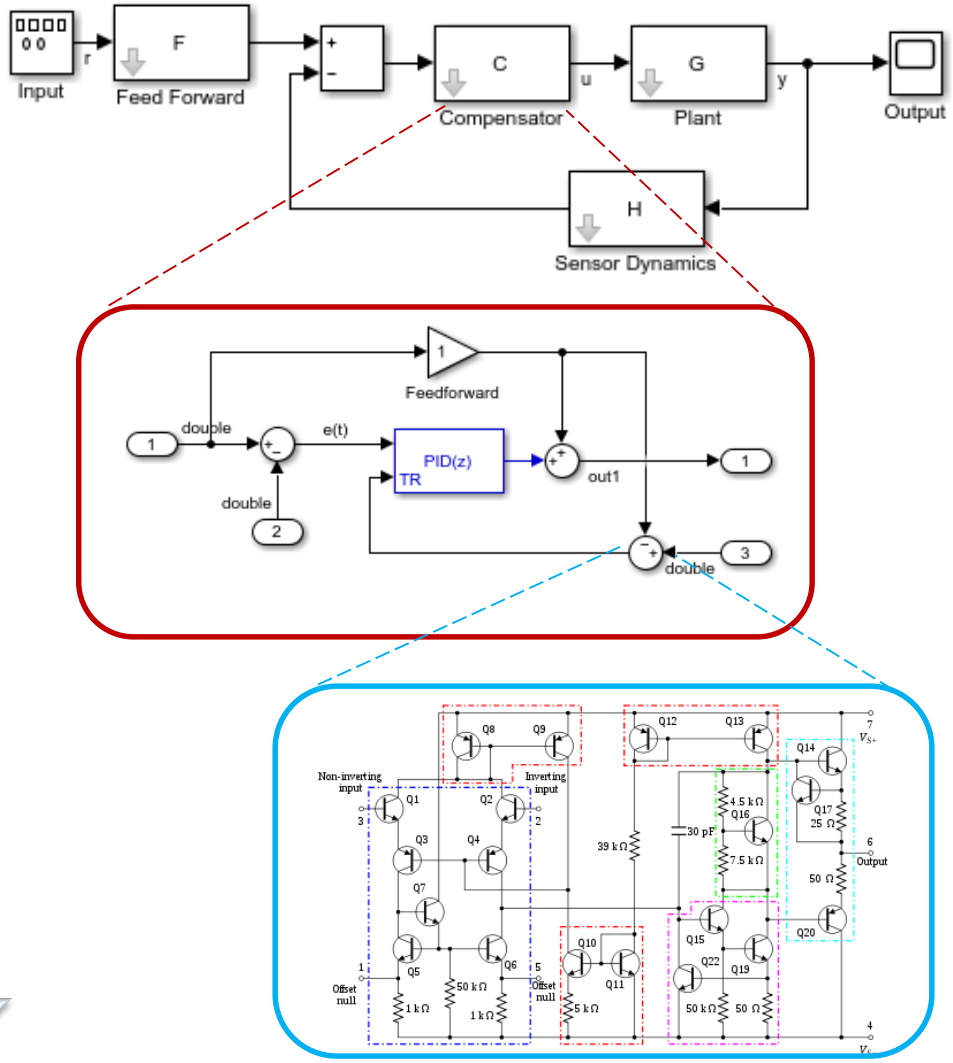
4. METHODOLOGIE DE MODELISATION

Niveau système

Niveau bloc

Niveau circuit

Raffinement



Simplification

Fig. 2. Processus de modélisation selon les niveaux hiérarchiques de la conception

4. METHODOLOGIE DE MODELISATION

4.1. Modélisation en phase Bottom-Up (ascendante)

- Dans la phase de conception ascendante (**Bottom-Up**), le point de départ est un circuit dimensionné ayant un objectif précis. Il s'agit d'en extraire un modèle comportemental, nécessairement plus abstrait que la description au niveau transistor, mais capable de propager les performances du circuit réalisé vers les haut niveaux hiérarchiques.
- Dans ce cas deux types de modèles sont possibles : **modèle basé sur la connaissance** et **modèle basé sur l'identification**.

- في مرحلة التصميم من الأسفل إلى الأعلى، تكون نقطة البداية عبارة عن دائرة ذات حجم محدد لها هدف محدد. يتضمن ذلك استخلاص نموذج سلوكي، بالضرورة أكثر تجريدًا من الوصف على مستوى الترانزستور، ولكنه قادر على نشر أداء الدائرة المنتجة نحو مستويات هرمية عالية.
- في هذه الحالة، هناك نوعان ممكنان من النماذج: **نموذج يعتمد على المعرفة** و**نموذج يعتمد على التحديد**.

4. METHODOLOGIE DE MODELISATION

4.1.1. Modèle basé sur la connaissance

- cette approche est **basée sur la connaissance de la structure interne** du circuit (topologie) et de lois électriques simples (lois de Kirchoff, modèles du premier ordre des transistors : Ebers-Moll ou MOS niveau 1) et Il s'agit d'effectuer un calcul symbolique et d'exprimer les performances du circuit à partir des paramètres clés de ses composants. On aboutit à un système d'équations qui pourra éventuellement être simplifié.
- Le principal avantage est que le modèle ainsi développé garde un sens physique et peut même être prédictif, si le domaine de validité du système est clairement connu.

- هذه الطريقة تعتمد على معرفة البنية الداخلية للدائرة (التوبولوجيا) وعلى قوانين كهربائية بسيطة (قوانين كيرشوف، نماذج الدرجة الأولى للترانزستورات: إيبرس-مول أو MOSالمستوى الأول). والهدف منها هو إجراء حساب رمزي والتعبير عن أداء الدائرة استنادًا إلى المعاملات المفتاحية لمكوناتها. نصل إلى نظام من المعادلات التي قد تكون مبسطة في النهاية.
- الفائدة الرئيسية هي أن النموذج المطور بذلك الشكل يحافظ على المعنى الفيزيائي ويمكن أن يكون تنبؤيًا، إذا كان مجال صلاحية النظام معروفًا بوضوح

4. METHODOLOGIE DE MODELISATION

4.1.1. Modèle basé sur la connaissance

- cette approche est **basée sur la connaissance de la structure interne** du circuit (topologie) et de lois électriques simples (lois de Kirchoff, modèles du premier ordre des transistors : Ebers-Moll ou MOS niveau 1) et Il s'agit d'effectuer un calcul symbolique et d'exprimer les performances du circuit à partir des paramètres clés de ses composants. On aboutit à un système d'équations qui pourra éventuellement être simplifié.

4.1.2. Modèle basé sur l'identification

- Il s'appuie sur l'acquisition des caractéristiques externes du circuit, sans tenir compte de sa structure interne. Les données de caractérisation se présentent donc sous forme tabulaire et il s'agit de trouver une expression mathématique reproduisant le bon comportement, par une méthode d'interpolation.

4. METHODOLOGIE DE MODELISATION

4.1.1. Modèle basé sur la connaissance

- هذه الطريقة تعتمد على معرفة البنية الداخلية للدائرة (التوبولوجيا) وعلى قوانين كهربائية بسيطة (قوانين كيرشوف، نماذج الدرجة الأولى للترانزستورات: إيبرس-مول أو MOSالمستوى الأول). والهدف منها هو إجراء حساب رمزي والتعبير عن أداء الدائرة استنادًا إلى المعاملات المفتاحية لمكوناتها. نصل إلى نظام من المعادلات التي قد تكون مبسطة في النهاية.

4.1.2. Modèle basé sur l'identification

- هو يعتمد على اقتناء الخصائص الخارجية للدائرة، دون الأخذ في الاعتبار هيكلها الداخلي. تتمثل بيانات التوصيف إذاً في شكل جداول، والهدف هو البحث عن تعبير رياضي يعكس السلوك المناسب، من خلال طريقة التكامل.

4. METHODOLOGIE DE MODELISATION

4.1. Modélisation en phase Top-Down (descendante)

- Dans cette phase de conception, **le schéma électrique étant inconnu** et le point de départ est une liste de spécifications. L'objectif est alors de construire un modèle décrivant **la fonction du bloc** considéré ajustable par des paramètres de performances.
- Le modèle en phase descendante est souvent utilisé en amont de la tâche de conception pour poser les bases de l'architecture du système et la valider par une première série de simulations. Par conséquence, les spécifications du système sont distribuées sur chaque bloc.
- Les modèles extraits en phase **Top-Down** sont des modèles fonctionnels caractérisés par une précision moindre que celle des modèles comportementaux extraits en phase Bottom-Up. Tandis que la rapidité est prédominante dans cette phase

4. METHODOLOGIE DE MODELISATION

4.1. Modélisation en phase Top-Down (descendante)

- في هذه المرحلة من التصميم، المخطط الكهربائي غير معروف ونقطة البداية هي قائمة المواصفات. الهدف هو بناء نموذج يصف وظيفة الكتلة المعنية ويمكن ضبطه بواسطة معاملات الأداء.
- يتم استخدام النموذج في المرحلة النازلة عادةً في مقدمة مهمة التصميم لوضع أسس هيكلية للنظام والتحقق منها من خلال سلسلة أولية من المحاكاة. ونتيجة لذلك، يتم توزيع مواصفات النظام على كل كتلة.
- النماذج المستخلصة في المرحلة النازلة (Top-Down) هي نماذج وظيفية تتميز بدقة أقل من نماذج السلوك المستخلصة في المرحلة الصاعدة (Bottom-Up)
- بينما تسود السرعة في هذه المرحلة.

5. SIMULATION DES SYSTÈMES MIXTES (ANALOGIQUE-DIGITALE)

- La "simulation des systèmes mixtes (analogique-digitale)" concerne l'étude et la modélisation de systèmes électroniques qui combinent à la fois des éléments analogiques et numériques.

5.1. Simulation analogique :

- Elle concerne les systèmes où les variables évoluent de façon continue dans le temps.
- Elle est utilisée pour les circuits qui traitent des signaux analogiques, comme les amplificateurs, les filtres, etc.
- Les logiciels de simulation analogique permettent d'analyser la réponse en fréquence, les transitoires, le gain, la distorsion, etc. de circuits analogiques.
- Exemples de logiciels populaires pour la simulation analogique : SPICE, LTspice.

"محاكاة الأنظمة المختلطة (التناظرية الرقمية)" تتعلق بدراسة ونمذجة الأنظمة الإلكترونية التي تجمع بين العناصر التناظرية والرقمية. المحاكاة التناظرية:يتعلق الأمر بالأنظمة التي تتطور فيها المتغيرات بشكل مستمر مع مرور الوقت.يتم استخدامه للدوائر التي تعالج الإشارات التناظرية، مثل مكبرات الصوت والمرشحات وما إلى ذلك.يسمح لك برنامج المحاكاة التناظرية بتحليل استجابة التردد، والعابرين، والكسب، والتشويه، وما إلى ذلك. من الدوائر التناظرية.أمثلة على البرامج الشائعة للمحاكاة التناظرية: SPICE، LTspice.

5.2. Simulation numérique :

- Elle traite des systèmes où les variables sont discrètes, généralement sous forme binaire (0 ou 1).
- Elle est utilisée pour les circuits qui traitent des signaux numériques, comme les microcontrôleurs, les processeurs, les circuits logiques, etc.
- Les simulations numériques permettent de vérifier la logique d'un circuit, de déterminer les délais, d'analyser la consommation d'énergie, etc.
- Exemples de logiciels populaires pour la simulation numérique : ModelSim, Vivado.

محاكاة رقمية :فيه يتم التعامل مع الأنظمة التي تكون فيها المتغيرات منفصلة، بشكل عام في شكل ثنائي (0 أو 1).يتم استخدامه للدوائر التي تعالج الإشارات الرقمية، مثل وحدات التحكم الدقيقة والمعالجات والدوائر المنطقية وما إلى ذلك. تسمح لك عمليات المحاكاة الرقمية بالتحقق من منطق الدائرة، وتحديد التأخيرات، وتحليل استهلاك الطاقة، وما إلى ذلك.

أمثلة على البرامج المشهورة للمحاكاة العددية: ModelSim، Vivado، SILVACO، AMPS-1D، SCAPS، إلخ...

5.3. Simulation mixte :

- En plus de ces deux types, il y a également ce qu'on appelle la **simulation mixte**, qui combine les deux types de simulation.
- Dans un monde où les circuits contiennent souvent à la fois des éléments analogiques et numériques, cette forme de simulation est devenue de plus en plus importante.
- Elle permet aux concepteurs de vérifier l'interaction entre les parties analogiques et numériques d'un système.

Les outils modernes de conception de circuits intègrent souvent ces différents types de simulations pour offrir aux concepteurs une plateforme complète pour tester et vérifier leurs conceptions.

5.3. المحاكاة المختلطة:

فبالإضافة إلى هذين النوعين، هناك أيضًا ما يسمى بالمحاكاة المختلطة، والتي تجمع بين كلا النوعين من المحاكاة.في عالم تحتوي فيه الدوائر غالبًا على عناصر تناظرية ورقمية، أصبح هذا النوع من المحاكاة ذا أهمية متزايدة.يسمح للمصممين بالتحقق من التفاعل بين الأجزاء التناظرية والرقمية للنظام.غالبًا ما تدمج أدوات تصميم الدوائر الحديثة هذه الأنواع المختلفة من عمليات المحاكاة لتزويد المصممين بمنصة شاملة لاختبار تصميماتهم والتحقق منها.

5. SIMULATION DES SYSTÈMES MIXTES (ANALOGIQUE-DIGITALE)

Une simulation mixte peut être décomposée en trois différentes phases:

1. Phase d'élaboration :

Elle correspond à la décomposition du circuit mixte en blocs distincts analogiques et digitaux, chaque partie étant traitée par les algorithmes concernés. Aux interfaces entre les deux parties, doivent être placés des modèles plus ou moins élaborés de convertisseurs A/D et D/A, qui assurent la correspondance des données entre les algorithmes analogiques et digitaux.

2. Phase d'initialisation

Il s'agit de déterminer le point de fonctionnement du système, c'est à dire l'état initial de toutes les grandeurs mises en jeu (tensions, courants, états logiques). Cette recherche est indispensable au simulateur analogique et correspond à une analyse DC. Pour la partie digitale, cette notion dépend du simulateur: cela peut correspondre soit à une initialisation (solution au temps 0), soit à une certaine durée, appelée temps de setup, au bout de laquelle un état stable est trouvé.

5. SIMULATION DES SYSTÈMES MIXTES (ANALOGIQUE-DIGITALE)

3. Phase de simulation

Elle doit résoudre les problèmes de synchronisation des algorithmes électriques et digitaux, qui ont des gestions différentes du pas de temps.

يمكن تقسيم المحاكاة المختلطة إلى ثلاثةمراحل مختلفة:1

. مرحلة التطوير:و هو يتوافق مع تركيب الدائرة المختلطة إلى كتل تناظرية ورقمية متميزة، حيث تتم معالجة كل جزء بواسطة الخوارزميات المعنية. عند الواجهات بين الجزأين، يجب وضع نماذج أكثر أو أقل تفصيلاً لمحولات A/D وD/A، والتي تضمن توافق البيانات بين الخوارزميات التناظرية والرقمية.

2. مرحلة التهيئة : يتضمن ذلك تحديد نقطة تشغيل النظام، أي الحالة الأولية لجميع الكميات المعنية (الفولتية، والتيارات، والحالات المنطقية). يعد هذا البحث ضروريًا للمحاكاة التناظرية ويتوافق مع تحليل التيار المستمر. بالنسبة للجزء الرقمي، تعتمد هذه الفكرة على جهاز المحاكاة: يمكن أن يتوافق هذا إما مع التهيئة (الحل في الوقت 0)، أو لمدة معينة، تسمى وقت الإعداد، وفي نهايتها يتمتم العثور على حالة مستقرة.3

. مرحلة المحاكاة: يجب أن يحل مشاكل المزامنة للخوارزميات الكهربائية والرقمية، والتي لها إدارة مختلفة للخطوة الزمنية.

Y a-t-il des questions !