

Caractérisation par simulation des AOP mode tension

Documents associés

- Les amplificateurs opérationnels : généralités
- Le simulateur électrique standard SPICE
- Les amplificateurs différentiels et les circuits de correction du mode commun associés

Table des matières

1	Caractérisation des AOP mode tension par OCEANE	1
1.1	Polarisation et paramètres petits signaux des transistors	2
1.2	Mesure de la tension de décalage	2
1.3	Mesure du gain différentiel	2
1.4	Mesure du gain de mode commun	3
1.5	Mesure du gain de conversion mode commun/mode différentiel	4
1.6	Mesure du gain de conversion mode différentiel /mode commun	4
1.7	Mesure des gains d'alimentation	5
1.7.1	Principe	5
1.7.2	Sortie non différentielle	5
1.7.3	Sortie différentielle	5
1.8	Mesure des impédances de sortie	6
1.9	Mesure des capacités d'entrée	6
1.10	Mesure du bruit	8
1.11	Réponses indicielles	8
1.12	Caractéristiques de transfert	9
2	Prise en compte des dispersions technologiques	11
2.1	Principes	11
2.2	Conditions de simulation	11
2.3	Pertinence des indices de performances statistiques mesurés	12
3	Problèmes de simulation rencontrés	12

1 Caractérisation des AOP mode tension par OCEANE

La vérification par simulation des performances de tous les amplificateurs opérationnels mode tension synthétisés par COMDIAC est réalisée par une même interface utilisant l'environnement graphique d'OCEANE. On notera que lorsque des résistances sont utilisées, sauf indication contraire, elles ont une très grande valeur $10^{15}\Omega$ afin de ne pas perturber le gain statique des dispositifs à sortie haute impédance. Les tensions VEMC et VSMC sont deux sources statiques fixant respectivement la tension d'entrée

de mode commun et la tension de sortie de mode commun des dispositifs en simulation, généralement ces deux tensions sont fixées à la moitié de la tension d'alimentation. D'autre part, sauf indication contraire, toutes les mesures s'effectuent à tension de décalage corrigée, celle-ci est donc préhalablement et automatiquement mesurée.

1.1 Polarisation et paramètres petits signaux des transistors

Cette mesure consiste à vérifier les points de fonctionnement de tous les transistors du dispositif par une analyse statique (.OP). Pour ce faire, en sortie simple on utilise le montage gauche de la *figure 1* et en sortie différentielle on utilise le montage droit, dans les deux cas le circuit a un gain unitaire (respectivement positif et négatif).

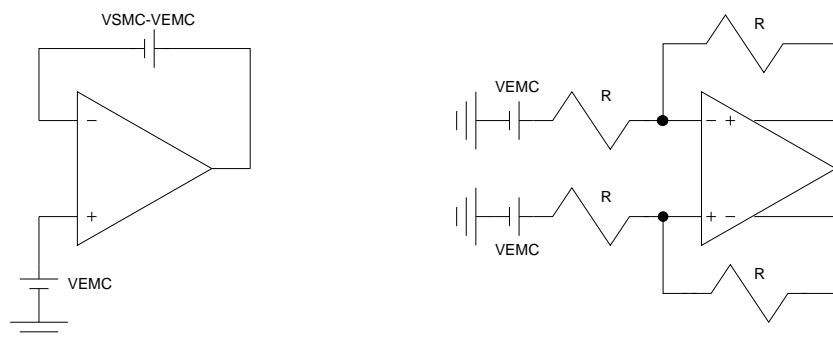


FIGURE 1 –

*Détermination des points de fonctionnement
et des paramètres petits signaux des transistors*

1.2 Mesure de la tension de décalage

Pour permettre la mesure directe des tensions de décalage, comme pour la détermination des points de polarisation, l'amplificateur opérationnel est monté en configuration de gain unitaire (positif pour l'AOP à sortie simple et négatif pour l'AOP à sortie différentielle). Une analyse statique monopoint permet la mesure de la tension de décalage ED_0 en sortie simple et de ED_{0md} (tension de décalage pour le mode différentiel) et ED_{0mc} (tension de décalage pour le mode commun) en sortie différentielle. Par convention, en sortie différentielle, la tension de décalage est la tension à placer entre le nœud A et l'entrée plus (+) pour obtenir une tension résiduelle de sortie différentielle nulle.

1.3 Mesure du gain différentiel

Pour cette mesure, réalisée par le montage de la *figure 3*, la tension de décalage ED_0 (ED_{0md}) préhalablement mesurée est corrigée, alors que la tension de décalage ED_{0mc} de mode commun ne l'est pas. La charge du dispositif est celle imposée par les spécifications pour le dimensionnement du dispositif, elle peut être capacitive et/ou résistive. La mesure du gain en boucle ouverte permet la détermination directe du gain statique Ad_0 , de la fréquence de coupure F_c , de la fréquence de transition F_T et de la marge de phase MP correspondante. S'il y a lieu une mesure de la marge de gain MG est également effectuée.

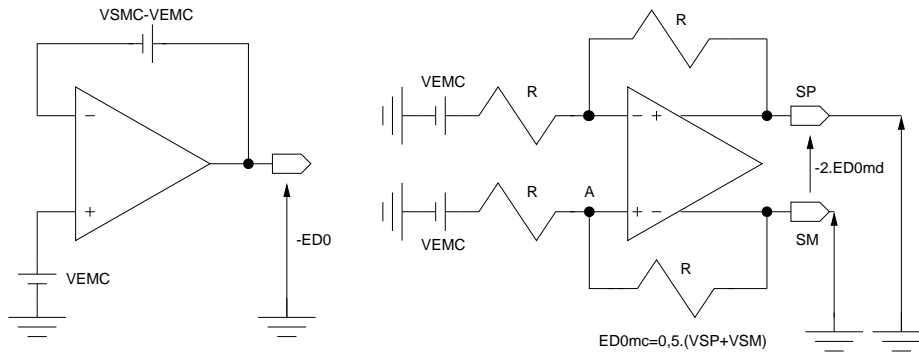


FIGURE 2 –

Mesure des tensions de décalage

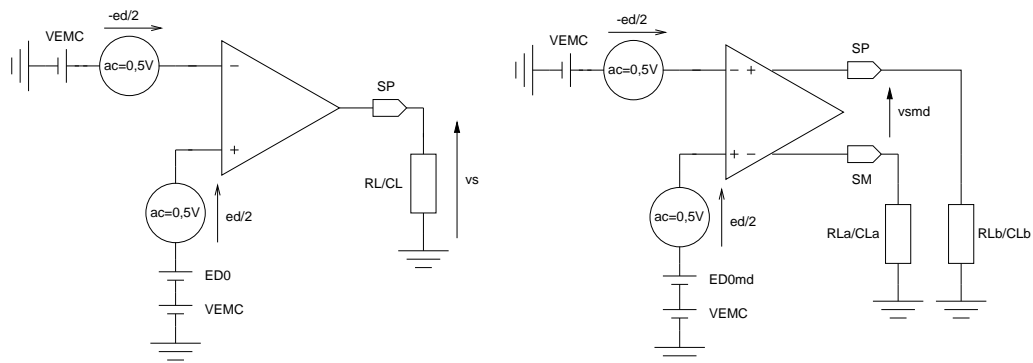


FIGURE 3 –

Mesure du gain en boucle ouverte

1.4 Mesure du gain de mode commun

Les deux sources de tension commandées en tension en série de la *figure 4* permettent une mesure directe du gain de mode commun.

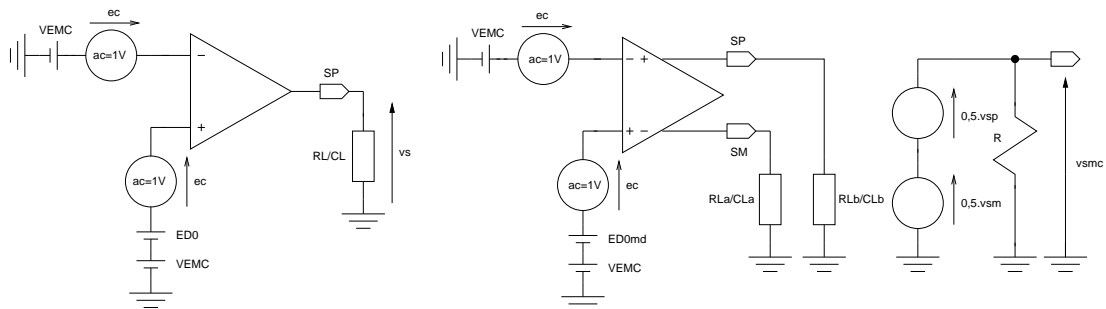


FIGURE 4 –

Mesure du gain de mode commun

1.5 Mesure du gain de conversion mode commun / mode différentiel

Cette mesure réalisée par le circuit de la *figure 5* n'a un sens que pour un amplificateur à sortie différentielle et que lorsque une erreur d'appariement affecte les deux voies d'amplification.

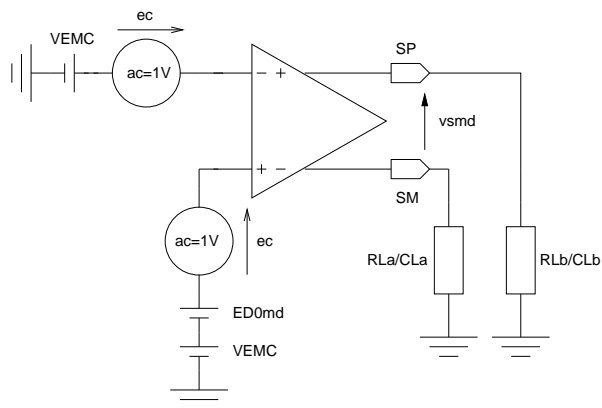


FIGURE 5 -

Mesure du gain de conversion mode commun / mode différentiel

1.6 Mesure du gain de conversion mode différentiel / mode commun

Cette mesure, réalisée par le circuit de la *figure 5*, n'a également un sens que pour un amplificateur à sortie différentielle et que lorsque une erreur d'appariement affecte les deux voies d'amplification.

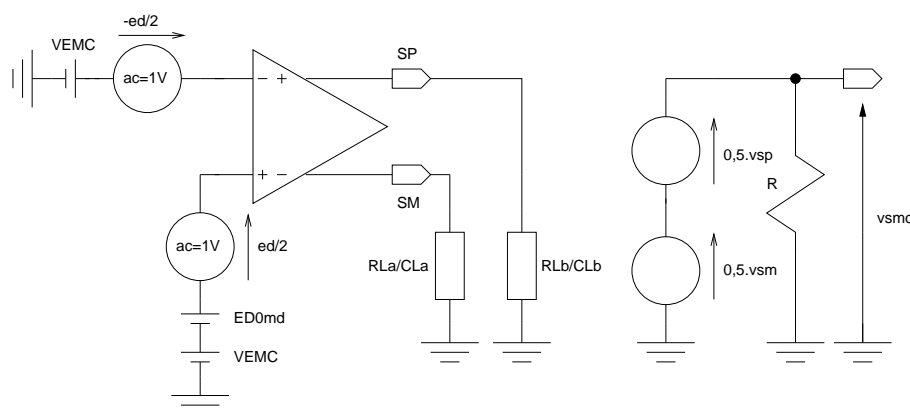


FIGURE 6 -

Mesure du gain de conversion mode différentiel / mode commun

1.7 Mesure des gains d'alimentation

1.7.1 Principe

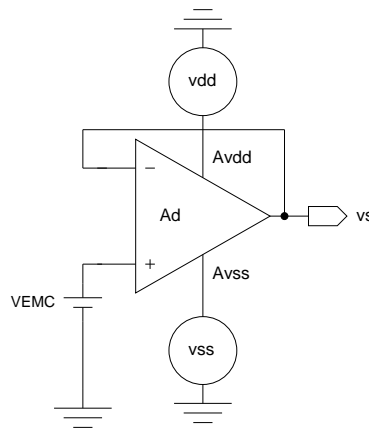


FIGURE 7 –

Principe de la mesure des gains d'alimentation

Par convention, la mesure des gains d'alimentation est réalisée avec l'amplificateur opérationnel monté en gain unitaire. Ce faisant, en considérant le schéma de principe de la *figure 7*, avec

$$vs = Ad(0 - vs) + A_{vdd}vdd + A_{vss}vss$$

soit

$$vs = \frac{A_{vdd}}{1 + Ad} vdd + \frac{A_{vss}}{1 + Ad} vss$$

la mesure réalisée peut être objectivement interprété comme la quantité de signal parasite vdd et/ou vss présente sur la sortie de l'amplificateur opérationnel en gain unitaire. D'autre part, en terme d'indice de performance, pratiquement, on mesure directement l'inverse des rapports de réjection des alimentation $RRAL^+$ et $RRAL^-$

1.7.2 Sortie non différentielle

Pour une sortie non différentielle la mesure du gain d'alimentation VSS est effectuée par le circuit de la *figure 8*. Pour la mesure du gain d'alimentation VDD, on utilise le même montage avec la source alternative en série avec VDD.

1.7.3 Sortie différentielle

Pour une sortie différentielle on doit considérer les gain d'alimentation pour la sortie en mode différentiel ($vsmd$) et pour la sortie en mode commun ($vsmc$) comme indiqué sur la *figure 9*. L'amplificateur est monté en gain unitaire, on notera que la première mesure n'a un sens lorsque une erreur d'appariement affecte les deux voies d'amplification.

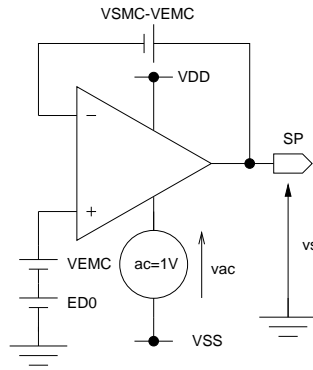


FIGURE 8 –

Mesure du gain d'alimentation VSS pour une sortie simple

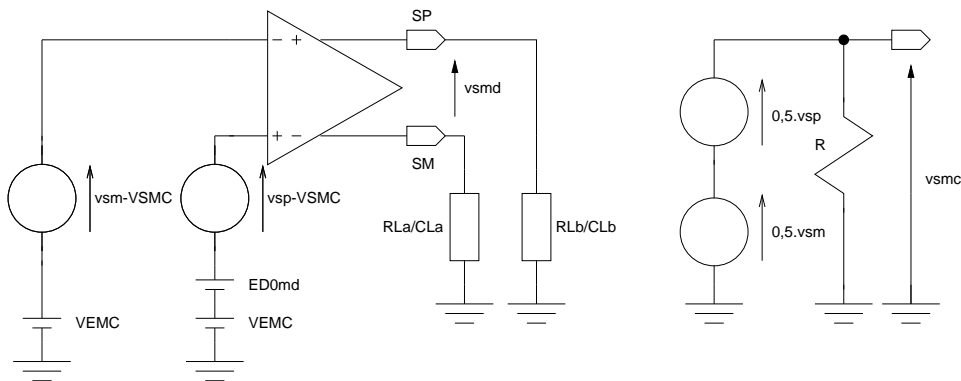


FIGURE 9 –

Mesures des gains d'alimentation VSS pour une sortie différentielle

1.8 Mesure des impédances de sortie

Pour une sortie non différentielle, la mesure de l'impédance de sortie est réalisée à partir du montage de la *figure 10*. La tension alternative ayant une amplitude de 1V, la valeur de la conductance de sortie est directement prélevée par le courant i_s circulant dans la sonde de tension de valeur statique nulle. On notera que le simulateur électrique SPICE n'autorisant pas les sondes "alternatives", cette dernière est remplacée par une source de courant commandée directement par le courant de sonde.

Pour une sortie différentielle la technique de mesure est la même (*figure 11*), les impédances sur les sorties positives et négatives sont directement mesurées sur un sonde de courant puis moyennées par les deux sources de courant commandées en courant.

1.9 Mesure des capacités d'entrée

Cette mesure est effectuée en boucle ouverte à partir d'une mesure de l'impédance d'entrée de l'amplificateur opérationnel comme indiqué sur la *figure 12*. Pour l'amplificateur opérationnel à sortie simple on détermine la valeur de la capacité cep à la fréquence f sur l'entrée positive par la formule

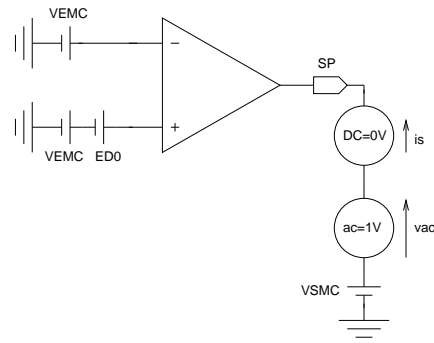


FIGURE 10 –

Mesure de l'impédance de sortie pour une sortie simple

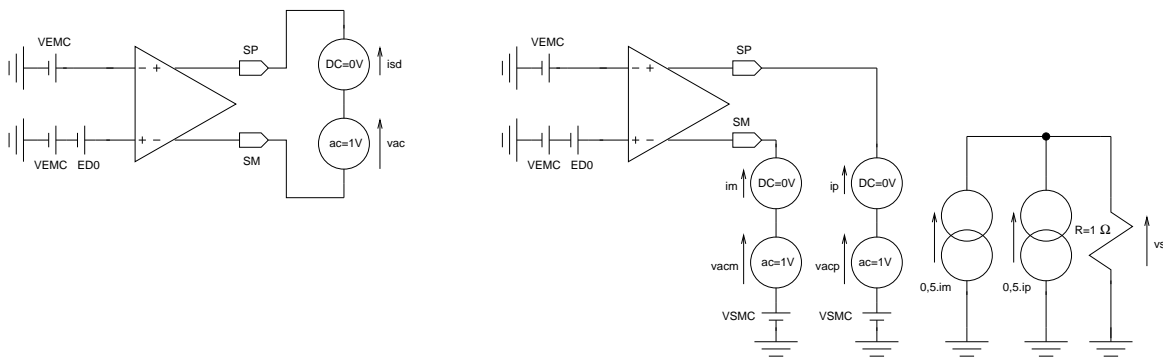


FIGURE 11 –

Mesure de l'impédance de sortie pour le mode différentiel et pour le mode commun

$$cep = \frac{1}{2\pi \cdot f} \frac{ie}{ve}$$

La capacité d'entrée cem sur l'entrée moins et la capacité d'entrée ced pour une sortie différentielle sont déterminées en utilisant la même technique.

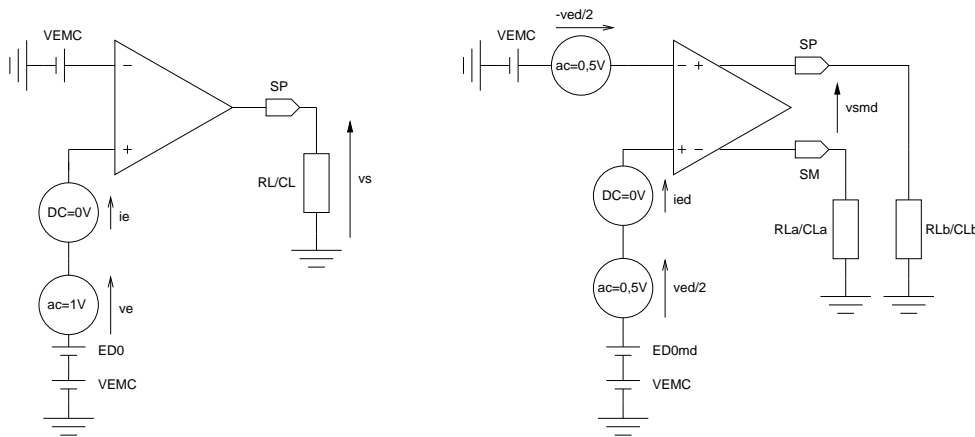


FIGURE 12 –

Mesure des capacités d'entrée

1.10 Mesure du bruit

Le bruit pour un AOP à sortie simple et pour un AOP à sortie différentielle est mesuré en boucle ouverte comme le gain, par les montages de la *figure 13*. Une détermination de la tension efficace est réalisée par intégration de la densité spectrale sur la bande de fréquence observée.

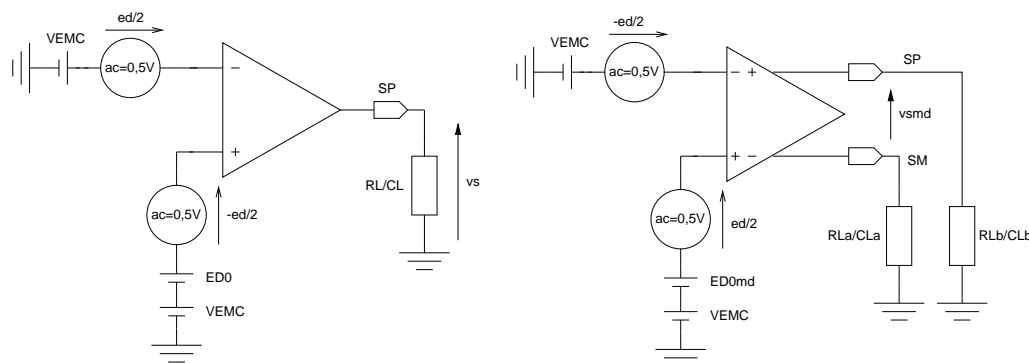


FIGURE 13 –

Mesure du bruit

1.11 Réponses indicielles

Pour une sortie non différentielle la réponse indicielle en boucle fermée (gain unitaire) et en boucle ouverte est mesurée à partir des circuits de la *figure 14*. La réponse en boucle fermée permet une mesure du temps d'établissement et la réponse en boucle ouverte permet une mesure du slew-rate.

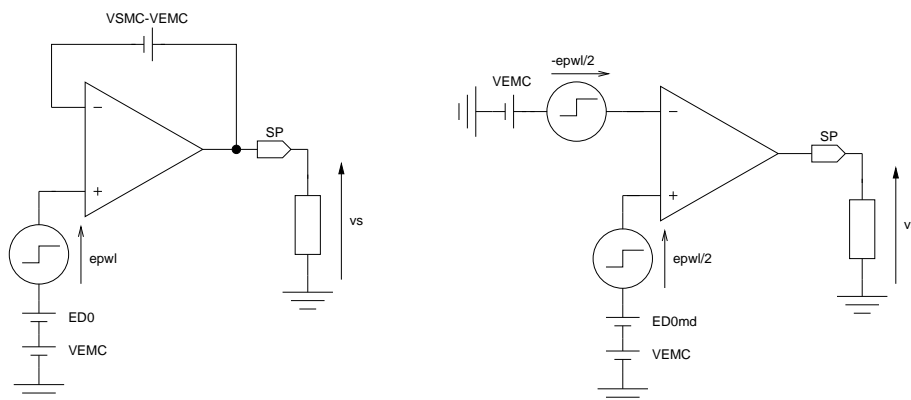


FIGURE 14 –

*Réponse indicielle en boucle fermée et en boucle ouverte
pour un AOP à sortie simple*

Pour une sortie différentielle et en mode différentiel, la réponse indicielle en boucle fermée et en boucle ouverte est mesurable par les circuits de la *figure 15*. En utilisant le principe du demi-circuit, pour le circuit de gauche, on vérifie facilement que le gain différentiel est unitaire. Quant au mode commun, les deux réponses indicielles sont mesurées par les circuits de la *figure 16*.

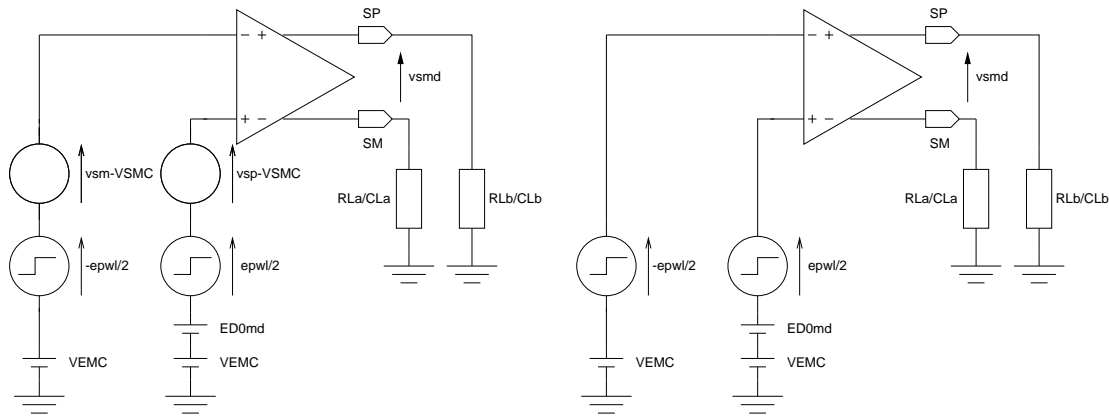


FIGURE 15 –

*Réponse indicielle du mode différentielle
en boucle fermée et en boucle ouverte*

Pour le mode commun, les deux réponses indicielles sont mesurées par les circuits de la *figure 16*.

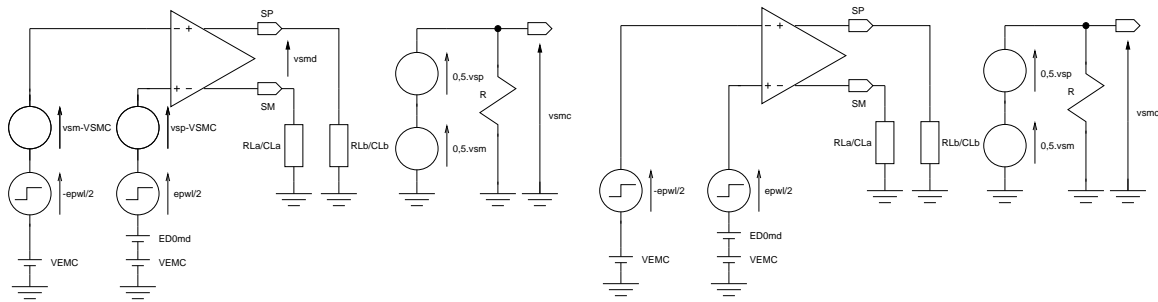


FIGURE 16 –

*Réponse indicielle du mode commun
en boucle fermée et en boucle ouverte*

1.12 Caractéristiques de transfert

Pour une sortie non différentielle les caractéristiques de transfert pour une entrée différentielle (V_{smd} vs V_{emd}) et pour une entrée en mode commun (V_{smc} vs V_{emc}) sont mesurées par les circuits de la *figure 17*.

Pour une sortie différentielle, les caractéristiques de transfert (V_{smd} vs V_{emd}) pour une entrée différentielle et pour une entrée en mode commun (V_{smc} vs V_{emc}) sont mesurées par les circuits de la *figure 18*. La caractéristique de gain statique en fonction de la tension de sortie est déterminée à partir du calcul de la dérivée avec

$$A_d = \frac{dV_{smd}}{dV_{emd}}$$

Quant aux deux caractéristiques de transfert V_{sp} vs V_{emd} et V_{sm} vs V_{emd} , elles sont mesurées par le circuit de la *figure 19*

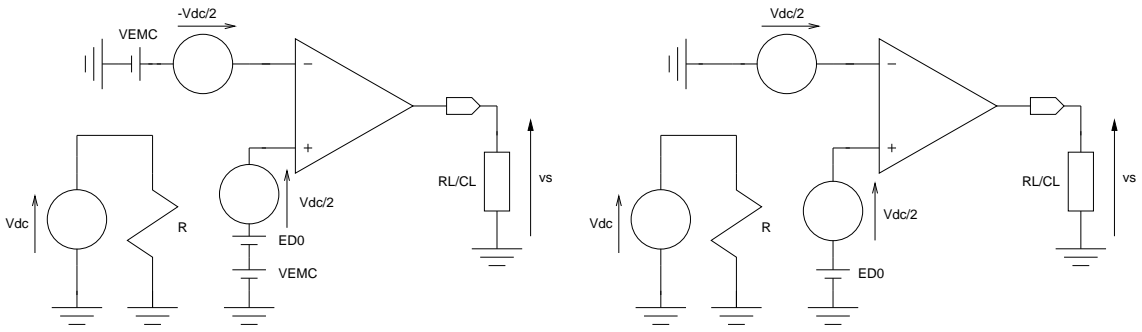


FIGURE 17 –

Mesure des caractéristiques de transfert pour un AOP à sortie différentielle pour une entrée en mode différentiel et en mode commun

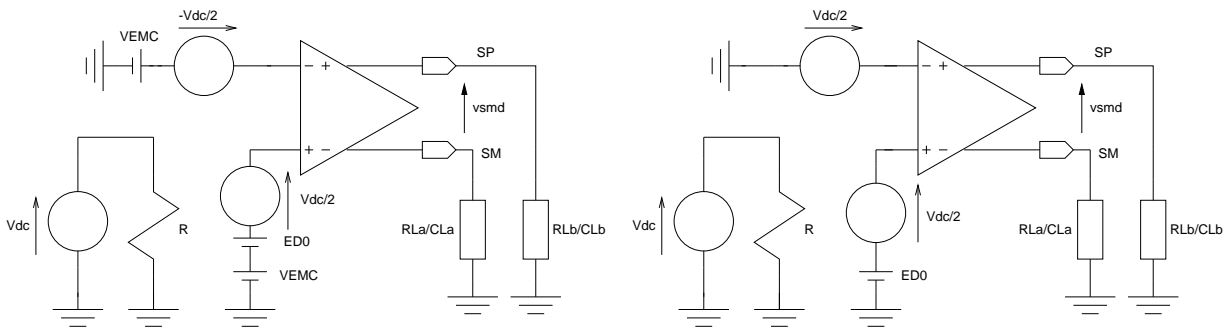


FIGURE 18 –

Mesure des caractéristiques de transfert pour un AOP à sortie différentielle pour une entrée en mode différentiel et en mode commun

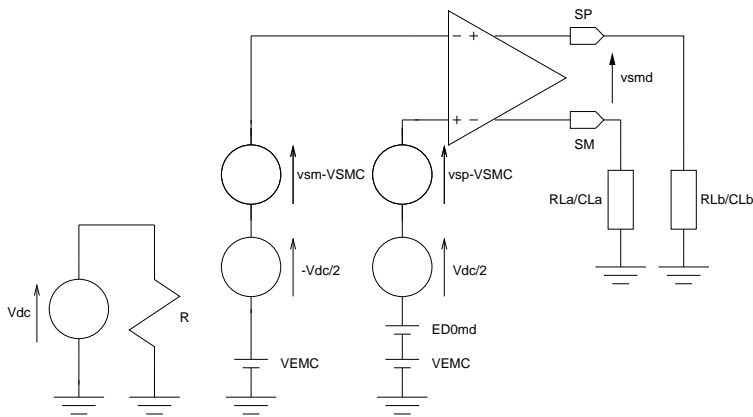


FIGURE 19 –

Mesure des caractéristiques de transfert V_{sp} et V_{sm} pour une entrée en mode différentiel

2 Prise en compte des dispersions technologiques

2.1 Principes

Comme pour tous les dispositifs synthétisés par OCEANE, la prise en compte des dispersions technologiques peut être effectuée en terme d'erreur globale, en choisissant pour chaque composant élémentaire une dispersion maximum ou minimum, et/ou en terme d'erreur locale par une analyse statistique (monte-carlo). Pour cette dernière, les différents composants sont affectés aléatoirement de leur [erreur d'appariement](#)

(tolérance locale) et deux types d'analyses sont offertes. La première consiste à déterminer les courbes enveloppes (nominale $+3\sigma$ et nominale -3σ) de la caractéristique mesurée, et la seconde consiste à déterminer un histogramme des principaux indices de performances. La mesure des indices de performance d'un amplificateurs opérationnels nécessitant une mesure préalable de la tension de décalage afin de la corriger, la simulation statistique de ces indices est toujours effectuée en boucle, indépendamment du fait que certains simulateurs électriques sont capables de réaliser directement des analyses de monte-carlo (ELDO,HSPICE,...). Ainsi, afin de limiter les temps de calcul, on notera que statistiquement une trentaine d'itérations est souvent suffisante pour avoir une bonne idée du comportement statistique du dispositif (statistiquement 99% de chance pour que 80% des valeurs possibles aient été tirées).

2.2 Conditions de simulation

Lorsque les amplificateurs opérationnels sont dimensionnés par COMDIAC, ils sont affectés d'un circuit de polarisation formel constitué de sources de tension indépendantes idéales et éventuellement, ils sont également affectés d'un circuit de contre réaction de mode commun formel constitué de composants idéaux. Bien entendu, pour que la prise en compte des dispersions technologiques soit effective, il est impératif que ces circuits soient considérés en terme de macromodèle ou de dispositif physique prenant en compte également leur nature statistique conformément au schéma de simulation de la *figure 20*.

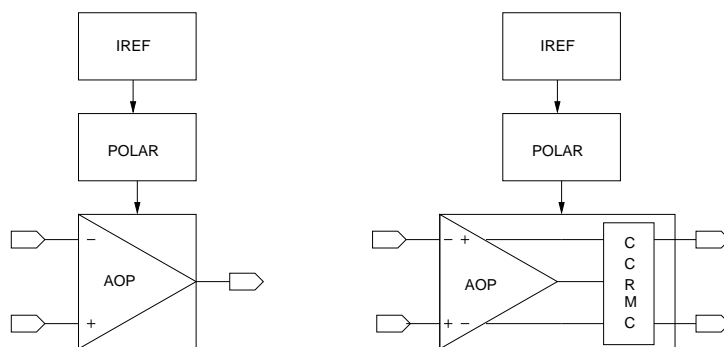


FIGURE 20 –

Conditions de simulation pour la prise en compte des dispersions technologiques

2.3 Pertinence des indices de performances statistiques mesurés

En terme d'erreur globale, en croisant les différents modèles de dispersion, on peut déterminer un pire cas correspondant à une détermination d'indices de performance pouvant être considérés comme pessimistes, puisque par définition hautement "improbables" (coins de la technologie). En terme d'erreur locale la situation est différente, d'une part le modèle statistique d'erreur d'appariement utilisé pour les [transistors MOS](#) est assez rudimentaire, et d'autre part au moment de la simulation on considère que tous les dispositifs répondent parfaitement aux règles d'appariement quelque soit leur nature et leur position relative. On peut ainsi admettre que les spécifications électriques purement fondés sur l'erreur d'appariement comme la composante aléatoire de la tension de décalage ou du gain statique de mode commun ou comme les gains de conversion des AOP à sortie différentielle, constituent un jeu d'indices de performances absolues relativement fiables et pertinents, alors que les autres spécifications telles que le gain, la fréquence de transition, la marge de phase, ... , ne constituent qu'un jeu d'indices de performance relatifs permettant "d'apprécier" leur tenue aux tolérances locales et éventuellement de comparer différentes architectures d'amplificateurs opérationnels.

3 Problèmes de simulation rencontrés

Sur les simulateurs commerciaux implantés sur OCEANE, aucun problème rhédibitoire de simulation n'a été rencontré, les paramètres d'option contrôlant les algorithmes de simulation fournis par défaut ont généralement une valeur correcte ne nécessitant pas de modification majeur. On notera toutefois un problème de précision (généralement quelque %) pouvant survenir lors de la mesure du slew-rate et lié uniquement à la technique de mesure basée sur la vitesse maximum d'évolution du signal de sortie. Par contre, le simulateur électrique SPICE3F5 pose des problèmes de précision en analyse transitoire, et les valeurs de temps d'établissement et de slew rate fournies sont ainsi souvent erronées.