
CEM des Circuits Intégrés

Bureau d'étude – Banc
d'essai BCI virtuel et
prédiction de l'immunité
d'un bus CAN

Alexandre Boyer, Etienne Sicard

ENSEEIHT

**Département Electronique et Génie Electrique par la voie de
l'Apprentissage**

Octobre 2016

I. Énoncé général du BE

La méthode Bulk Current Injection (BCI) est couramment utilisée pour qualifier l'immunité d'équipements et de composants électroniques aux perturbations électromagnétiques radiofréquences. Cette méthode est proposée par différents standards, tels que :

- ISO11452-4 pour le test d'équipements électroniques pour l'automobile
- DO-160G section 20 pour le test d'équipements électroniques pour l'aéronautique
- IEC62132-3 pour le test de circuits intégrés d'interface

La méthode consiste en une injection conduite de courant sur câble, reproduisant de manière simple l'effet du couplage sur le câble d'un rayonnement. L'injection utilise une pince d'injection blindée (Fig. 1), formant avec le câble sous test un transformateur. Le couplage avec le câble est de nature inductive, le blindage supprimant tout couplage capacitif.

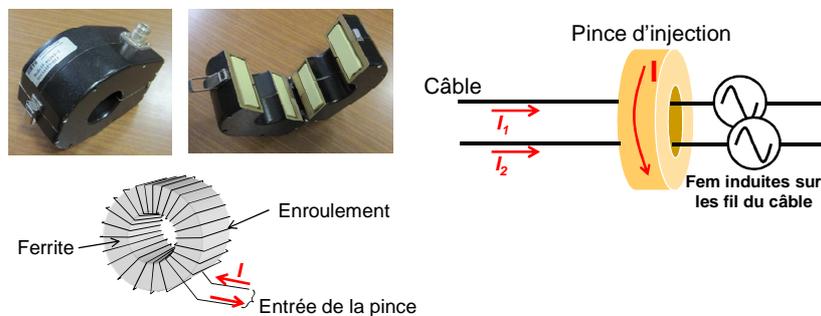


Fig. 1 - Pince d'injection BCI et principe de l'injection

La figure Fig. 2 présente un banc d'injection BCI typique. Une perturbation harmonique, de fréquence comprise entre 1 et 400 MHz, est produite par un synthétiseur de signal puis amplifiée à l'aide d'un amplificateur de puissance de 50 W. La puissance incidente (forward power) est mesurée à l'aide d'un coupleur directionnel et d'un wattmètre. La pince d'injection est placée autour du câble, lui-même routée à 5 cm au-dessus d'un plan de masse de référence. Durant le test d'immunité, le fonctionnement de l'équipement ou du composant sous test est suivi afin de détecter une défaillance. Le but du test est de déterminer à chaque fréquence de la perturbation le courant induit nécessaire pour induire un défaut de fonctionnement du dispositif sous test.

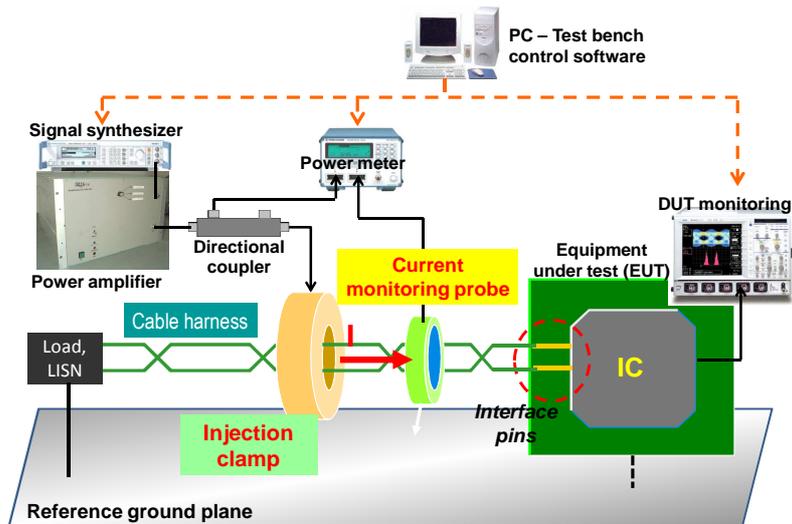


Fig. 2 - Banc d'injection BCI

Le standard BCI prévoit deux modes de test :

- Configuration boucle ouverte : le courant induit sur le câble n'est pas directement mesuré. Il est déduit à partir de la mesure de la puissance incidente et d'une calibration préalable de la pince d'injection
- Configuration boucle fermée : une sonde de courant est placée sur le câble pour mesurer en temps réel le courant réellement induit sur le câble.

Selon le standard utilisé, les niveaux de courant maximum que doivent supporter les dispositifs sous test varient. Le tableau ci-dessous donne les valeurs de courant maximales définies par le standard IEC62132-3 pour des circuits d'interface.

Test severity level	Current limit
I	50 mA
II	100 mA
III	200 mA
IV	300 mA
V	Specific value agreed between the users of this standard

Le but de ce bureau d'étude est de construire un modèle électrique équivalent d'un banc BCI en configuration boucle ouverte afin de prédire la conformité d'un composant sous test vis-à-vis des limites d'immunité prévue par le standard BCI. Ce banc de test virtuel sera ensuite utilisé pour évaluer l'immunité de plusieurs composants d'interface d'un bus CAN, appelés transceiver CAN, et sélectionner le plus robuste. Ces composants doivent supporter le niveau de sévérité IV. Les modèles seront construits à l'aide du logiciel IC-EMC et simulés à l'aide de WinSPICE.

Le bureau d'étude est décomposé en trois parties, avec différentes questions qui vous aideront à bâtir les modèles et interpréter correctement les résultats de simulation. A l'issue du bureau d'étude, on vous demande de fournir un rapport répondant à l'ensemble de ces questions.

II. Partie 1 - Calibration du banc d'injection BCI en boucle ouverte

Le but de cette première partie est de bâtir le modèle du banc d'injection BCI et de déterminer les consignes de puissance à injecter pour induire une valeur de courant donné sur un câble sous test.

Le banc d'injection BCI utilisé fonctionne en mode boucle ouverte. Une calibration est nécessaire pour relier la puissance incidente délivrée par l'amplificateur de puissance et le courant induit sur le câble sous test. Cette calibration fait appel à un dispositif appelé jig de calibration, présenté sur la Fig. 3. Il s'agit d'une ligne de transmission courte adaptée 50 Ω autour de laquelle la pince d'injection est fermée. La pince est excitée par un signal harmonique dont on mesure la puissance. Le jig est terminé à une extrémité par une charge 50 Ω, et par un récepteur de mesure à l'autre extrémité. Celui-ci mesure le courant induit sur le jig. Ainsi, on peut relier l'amplitude en tension de la source d'injection, la puissance qu'elle a délivrée, et le courant induit sur une ligne de transmission passant dans la pince. On suppose que le couplage entre la pince et n'importe quel câble est identique à celui existant entre la pince et le jig de calibration.

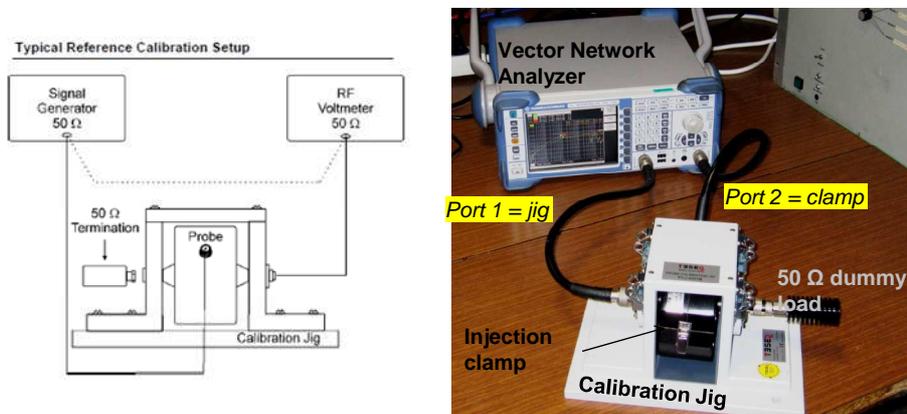
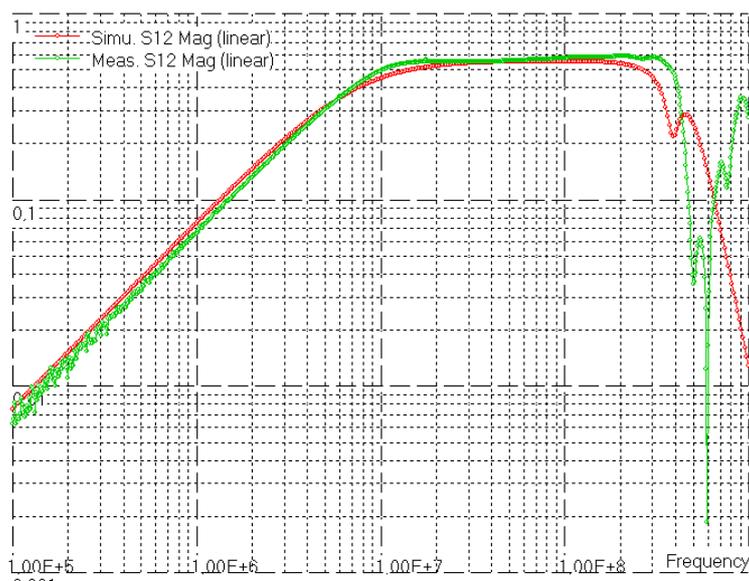
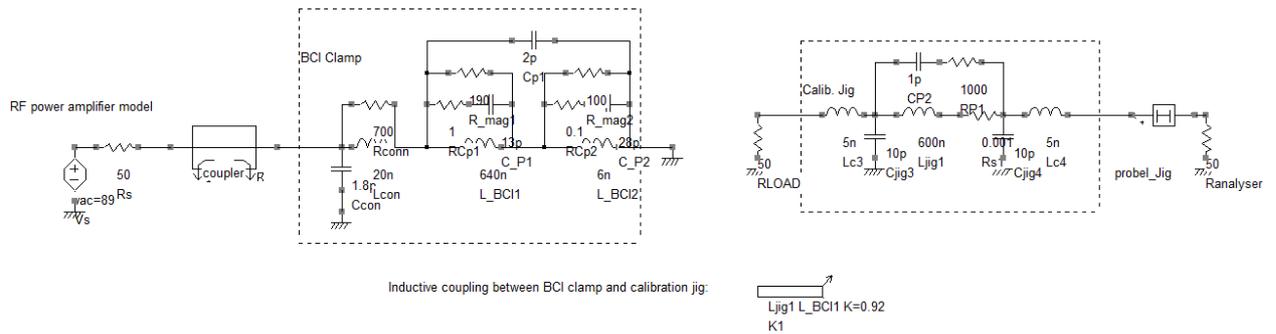


Fig. 3 - Jig de calibration et calibration de la pince d'injection BCI

La figure ci-dessous présente un modèle électrique simulant le couplage entre la pince d'injection du banc et le jig de calibration. Le couplage inductif est modélisé par un coefficient de couplage mutuel noté K . Le coefficient de couplage mutuel existant entre deux inductances L_1 et L_2 présentant une inductance mutuelle M_{12} est compris entre 0 et 1 et est défini par :

$$K = \frac{M_{12}}{\sqrt{L_1 \times L_2}}$$

Ce modèle est disponible dans le fichier `Clamp_coupling_calib_jig.sch`. La comparaison entre la mesure et la simulation du coefficient de transmission pince-jig est présenté ci-dessous.



1. Construisez un modèle électrique permettant la calibration du banc BCI en boucle ouverte. Placez un coupleur (symbole ) pour extraire la puissance incidente et une sonde de courant (symbole ) pour extraire le courant induit sur le jig.
2. A l'aide de ce modèle, déterminez l'amplitude en tension du générateur de perturbation ainsi que la puissance incidente nécessaire pour induire 300 mA sur le jig de calibration. Complétez le tableau ci-dessous. Vous pouvez utiliser l'outil d'analyse de la susceptibilité du logiciel IC-EMC (voir annexe en fin de document).

Fréquence	Tension générateur RF (V)	Puissance incidente requise pour induire 300 mA (dBm)	Puissance incidente max. pendant le test BCI (dBm)
1 MHz			
3 MHz			
10 MHz			
30 MHz			
100 MHz			
400 MHz			

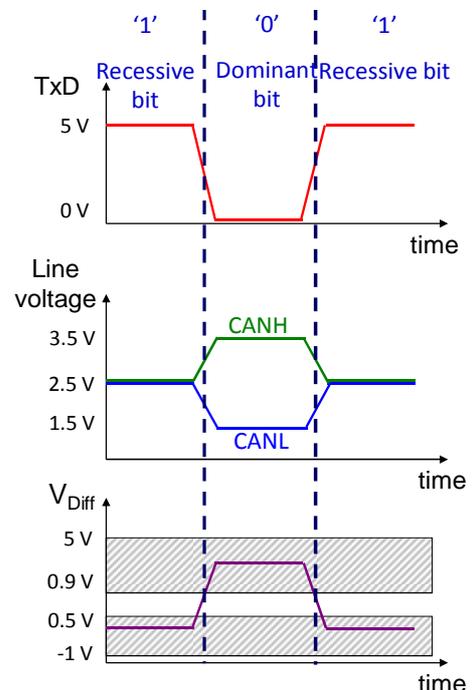
III. Partie 2 - Simulation de l'immunité d'un bus CAN générique

Le but de cette deuxième partie est de bâtir un premier modèle de bus CAN et de l'injection BCI sur celui-ci. Dans un premier temps, nous ne considérerons pas de composants spécifiques. Dans la troisième partie, on intégrera au modèle un modèle réaliste de transceiver CAN.

Le bus Controller Area Network (CAN) est un bus digital série largement utilisé dans l'automobile. Il est dédié aux communications entre les différents calculateurs d'un véhicule. Le bus a été initialement proposé par Bosch comme protocole de communication temps réel pour systèmes distribués. Il supporte un débit maximum de 1 Mbits/s et satisfait à de nombreuses exigences de robustesse et de tolérance aux fautes. Il a été standardisé en 1991 sous le nom IEC11898. La figure Fig. 4 illustre l'architecture matérielle de ce bus, composé de trois parties :

- le contrôleur CAN qui gère l'accès au support de transmission, la construction des trames, la détection des erreurs. Il est généralement embarqué dans un microcontrôleur. Il possède deux broches appelées TxD et RxD assurant la transmission et la réception des messages.
- le transceiver CAN qui assure l'interface physique avec le support de transmission
- le support de transmission, en général une paire torsadée $120 \Omega \pm 10 \Omega$ (twisted-wire pair TWP). Les deux lignes formant le support sont appelées CANH et CANL. Elles forment une paire différentielle. L'état logique transmis par le bus dépend de la tension différentielle $V_{Diff} = V_{CANH} - V_{CANL}$.

Afin d'éviter toute collision de données lorsque deux nœuds cherchent à transmettre simultanément, l'accès au bus est basé sur le principe de Carrier Sense Multiple Access/Bitwise Arbitration (CSMA/BA). Un niveau de priorité est assigné à chaque message pendant une phase d'arbitrage. La priorité est basée sur la différence entre les poids des états binaires : l'état '0' est l'état dominant (il force l'état électrique du bus) alors que l'état '1' est l'état récessif (il ne force que faiblement l'état électrique du bus). Il s'agit de l'état par défaut ou l'état de repos du bus. Pendant la phase d'arbitrage, un nœud ne peut pas transmettre s'il détecte un état dominant sur le bus. La sortie de son transceiver CAN est alors à l'état récessif et reste en mode de réception. A l'état récessif, V_{Diff} est inférieure à 0.5 V. A l'état dominant, V_{Diff} est supérieure à 2 V. En général, V_{Diff} est égale à 2 V à l'état dominant et 0 V à l'état récessif. En outre, la tension de mode commun du bus doit rester compris entre -12 V et +12 V.



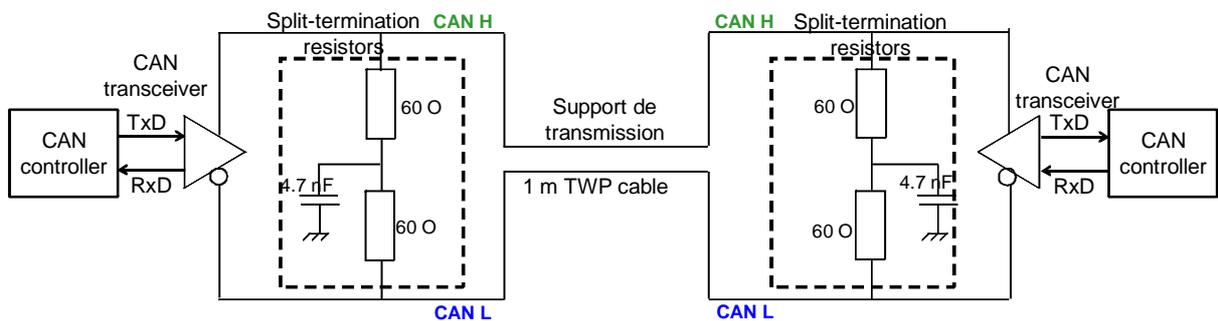


Fig. 4 - Architecture matérielle du bus CAN

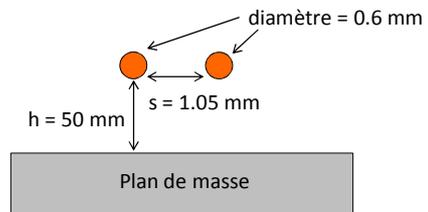
Dans la suite, on considère que le support de transmission est un câble TWP de 1 m de long, placé à 5 cm au-dessus d'un plan de masse de référence.

3. Pendant le test BCI, quel est le sens de circulation du courant induit sur les deux fil du câble TWP ? Quelle est la nature du courant induit ?

4. Quel est le rôle des deux résistances de 60 Ω du dispositif appelé "split-termination resistors" ? Pourquoi est-il conseillé d'y ajouter un condensateur ? Pourquoi 4.7 nF est-elle une valeur adéquate ?

5. Que se passe-t-il si l'amplitude des tensions induites à chaque extrémité des lignes CANH et CANL dépasse 12 V ? Même question si l'amplitude de la tension différentielle V_{Diff} dépasse 0.4 V. Le bus est-il sensible aux tensions de mode commun ? Aux tension de mode différentiel ?

6. La figure ci-contre présente la section du câble TWP. A l'aide de l'outil 'Tools/Cable modeling', vérifiez que ce câble convient pour un bus CAN. Construire un modèle électrique équivalent valide jusqu'à 400 MHz.



7. Construire le modèle électrique équivalent de l'injection BCI sur le bus CAN. Le transceiver CAN est supposé idéal, c'est-à-dire que les impédances des broches CANH et CANL sont considérées comme infinies. On suppose que la pince d'injection est placée au milieu du câble TWP.

8. Simulez les tensions de mode commun () et de mode différentiel () induite sur une des extrémités du bus pour le niveau d'injection maximum. Remplir le tableau ci-dessous. Quels défauts sont à craindre ? Pourquoi ?

Fréquence	Amplitude tension de mode commun (V)	Amplitude tension de mode différentiel (V)
1 MHz		
3 MHz		
10 MHz		
30 MHz		

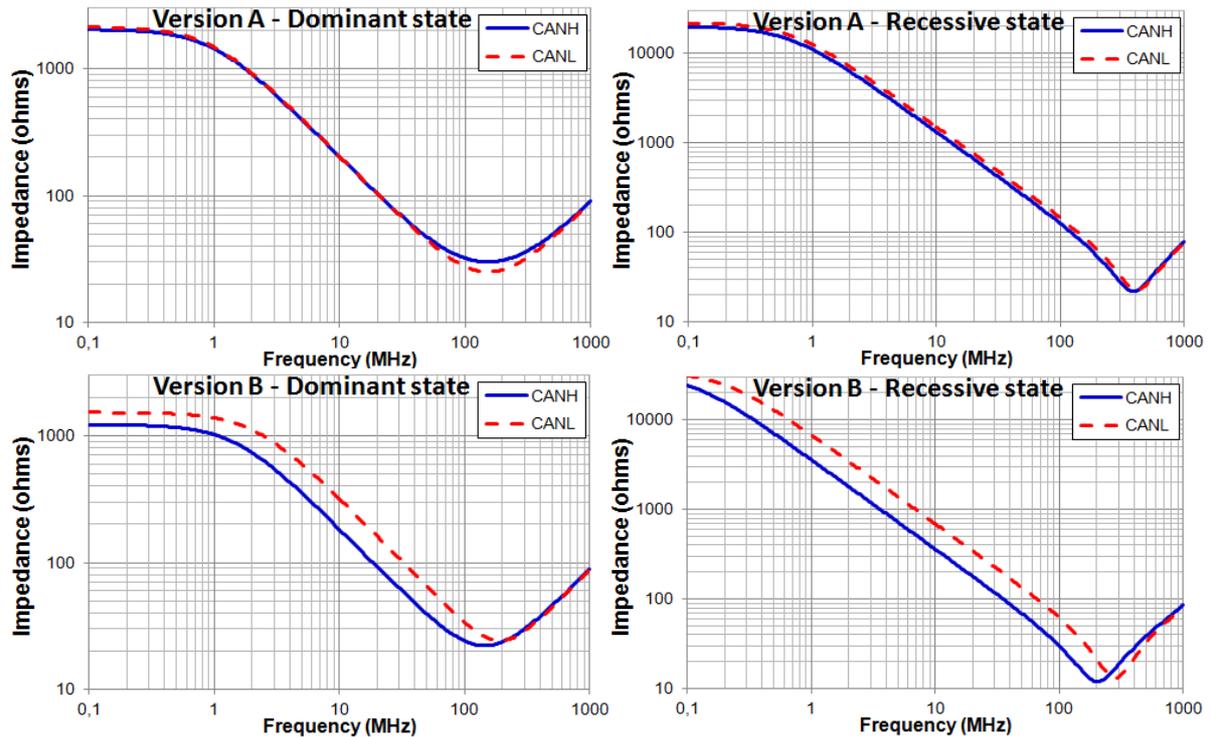
100 MHz		
400 MHz		

9. Les résistances de terminaison sont données à +/- 5 Ω . En se plaçant dans la situation pire cas, reprendre la question précédente.

10. Proposez une règle générale pour la conception d'un bus CAN robuste aux perturbations électromagnétiques.

IV. Partie 3 - Sélection d'un transceiver CAN

La troisième partie du bureau d'étude reprend la partie précédente, mais considère cette fois-ci un modèle pour le transceiver CAN. Le but est de prédire l'immunité de deux versions différentes de transceivers CAN, notées versions A et B. Les impédances d'entrées de leurs broches CANH et CANL ont été mesurées, à l'état dominant et à l'état récessif.



11. Est-il possible pour deux transceivers d'avoir leurs sorties dans le même état logique ?
12. A partir des mesures d'impédance ci-dessous, construire des modèles électriques équivalents des broches CANH et CANL dans les états récessifs et dominants, pour les deux versions A et B.
13. Ajoutez le modèle des transceivers au modèle d'injection BCI sur le bus CAN construit dans la partie II. On considèrera des résistances de terminaisons parfaitement équilibrées et la transmission d'un état récessif.
14. On cherche à détecter en simulation un défaut de type erreur de réception pendant l'injection de BCI. Proposez une méthode pour détecter ce type d'erreur en simulation.
15. Simulez le niveau de susceptibilité de chaque version de transceivers pour ce type de défaut. Le risque d'erreurs de réception dues aux perturbations électromagnétiques est-il négligeable pour le transceiver CAN version A ? Pour le transceiver CAN version B ?

16. Expliquer la différence de susceptibilité entre les deux versions de transceivers CAN. Quelle recommandation pourriez-vous donner aux concepteurs de transceivers CAN pour les rendre robustes aux perturbations électromagnétiques ?

V. Annexe – Outil d'analyse de la susceptibilité

Le logiciel IC-EMC intègre un outil d'analyse de la susceptibilité, dédié à la prédiction du niveau de susceptibilité d'un composant à des perturbations harmoniques. Cet outil est disponible dans le menu 'EMC > Susceptibility analysis' ou à l'aide de l'icône . Cet outil a une double fonction : construire un modèle SPICE intégrant l'ensemble des paramètres pour la simulation de susceptibilité, et outil de post-traitement des résultats de simulation. Le flot de simulation est basé sur une simulation SPICE transitoire.

La figure ci-dessous présente le flot de simulation de cet outil. Le modèle électrique du composant sous test est construit au préalable. Il intègre une source de perturbation harmonique particulière, appelée source RFI , dont l'amplitude augmente linéairement en fonction du temps. Il intègre aussi un coupleur  permettant d'extraire la puissance incidente délivrée par la source RFI. L'outil d'analyse de la susceptibilité est d'abord utilisé pour régler les paramètres de balayage de la fréquence et de l'amplitude de la source RFI. Le modèle ou netlist SPICE est ensuite construit puis simulé par WinSPICE. A l'issue de la simulation SPICE, l'outil d'analyse de la susceptibilité analyse le fichier de sortie, détecte la présence éventuelle d'une défaillance à chaque fréquence de test et extrait la puissance incidente nécessaire pour déclencher la défaillance.

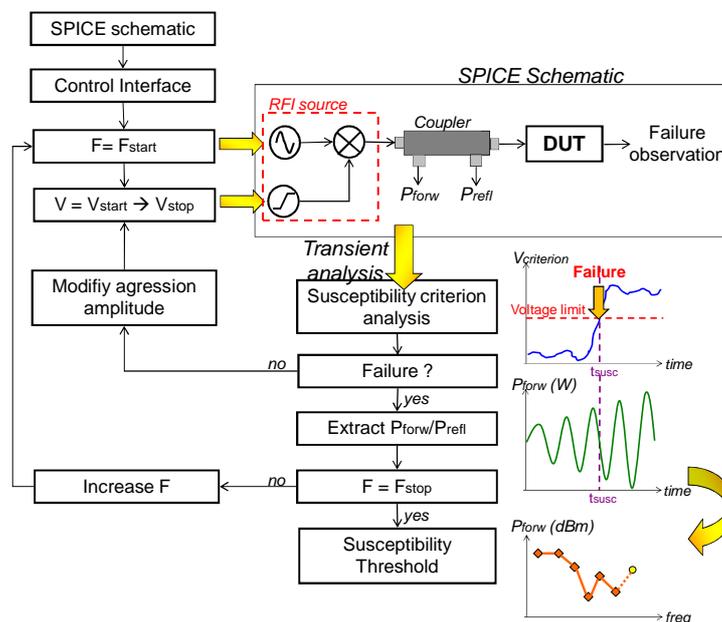


Fig. 5 - Flot de simulation de l'outil d'analyse de la susceptibilité d'IC-EMC

La Fig. 6 présente l'interface de l'outil. Celui-ci propose trois modes de simulation :

- mode manuel : l'utilisateur ne configure la simulation que pour une fréquence de perturbation. Seule l'amplitude de la source RFI est balayée pendant la simulation pour déterminer le seuil de susceptibilité à cette fréquence. Ce mode est conseillé pour une première prise en main de l'outil

- mode automatique : l'utilisateur configure plusieurs simulations transitoires faites à différentes fréquences de perturbations. Le balayage en fréquence est linéaire ou logarithmique. Pour chaque fréquence, l'amplitude de la source RFI est balayée pendant la simulation pour déterminer le seuil de susceptibilité à chacune de ces fréquences.
- mode liste : même principe que le mode manuel, mais les balayages en fréquence et en amplitude sont définis dans un fichier texte.

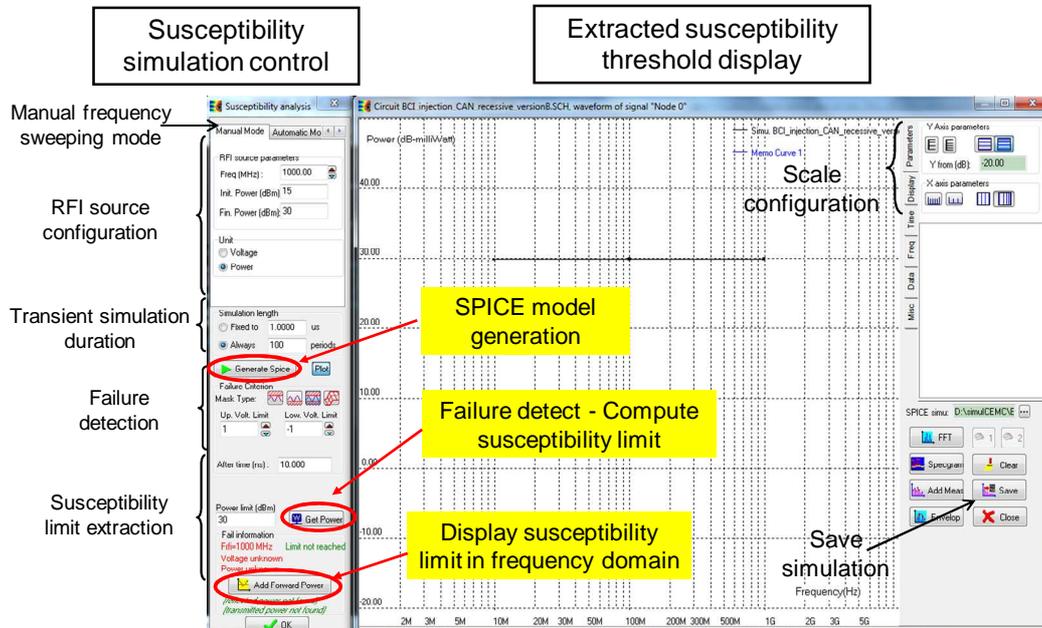


Fig. 6 - Interface de l'outil d'analyse de la susceptibilité d'IC-EMC (mode manuel)

En mode manuel, l'utilisateur commence par définir la fréquence de la perturbation générée par la source RFI, son balayage en amplitude (en tension (V) ou en puissance (dBm)), et la durée de la simulation (exprimée en μs ou en nombre de périodes de la perturbation harmonique). Les paramètres de la source RFI sont présentés à la Fig. 7. Cliquez ensuite sur le bouton 'Generate SPICE' pour lancer la simulation transitoire. WinSPICE doit avoir été ouvert au préalable. A l'issue de la simulation SPICE, définissez le critère de défaillance (Failure Criterion) puis cliquez sur le bouton 'Get Power' pour détecter un éventuel défaut à la fréquence de perturbation et extraire la puissance incidente. Pour sauvegarder ce point, cliquez sur le bouton 'Add Forward Power'.

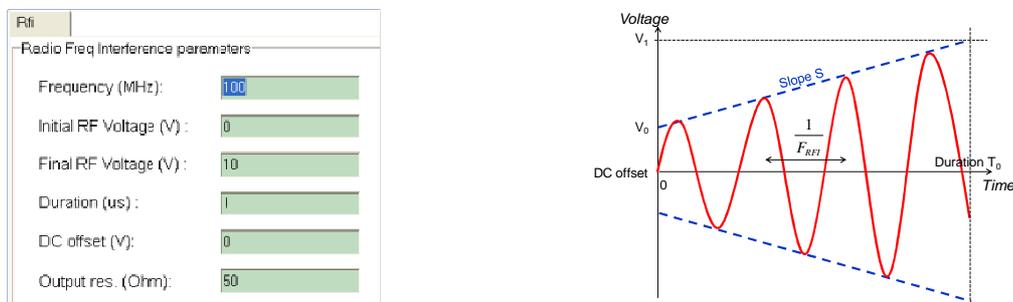


Fig. 7 - Paramètres de la source RFI

Les défaillances ne sont pas détectées directement pendant la simulation SPICE, mais pendant la phase de post-traitement des résultats de simulation. Ce qu'on appelle défaillance dépend de la définition du critère d'immunité. La méthode de détection consiste à analyser un signal électrique

simulé (tension ou courant) et détecter à quel instant il dépasse une limite prédéfinie. Le plus simple consiste à vérifier que le signal ne dépasse pas une marge d'amplitude, comme décrit par la Fig. 8. Par exemple, la figure illustre la perturbation d'une référence d'alimentation égale à 2.5 V. On définit le critère d'immunité suivant : durant le test de susceptibilité, la tension d'alimentation ne doit pas varier de plus de 20 % de sa tension nominale. La fluctuation maximale de la tension d'alimentation est donc de 500 mV. Sous IC-EMC, on définit le critère d'immunité de la manière suivante : sur le modèle SPICE, on monitore la tension d'alimentation. On définit des limites basses et hautes pour cette tension en cliquant sur le bouton , et en indiquant les valeurs 3 et 2 dans les champs 'Up Volt. Limit' et 'Low Volt. Limit'. Si la tension d'alimentation passe au-dessus de la limite 'Up Volt. Limit' ou en dessous de la limite 'Low Volt. Limit', une défaillance est détectée et l'outil 'Susceptibility analysis' calcule la puissance incidente de la perturbation conduisant à cette défaillance.

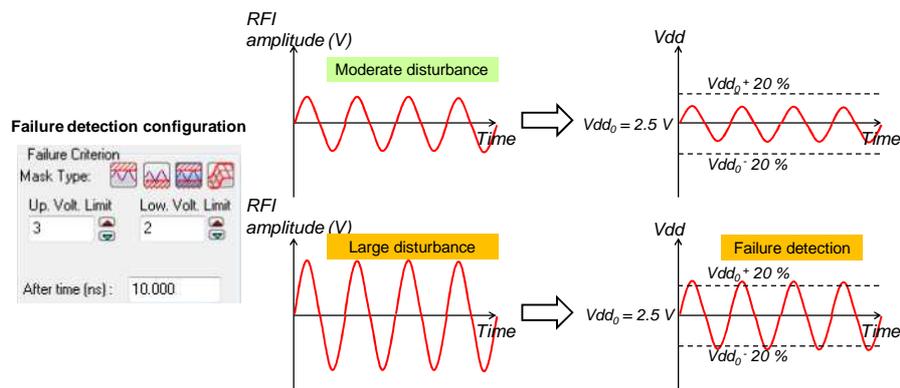


Fig. 8 - Définition du critère de défaillance