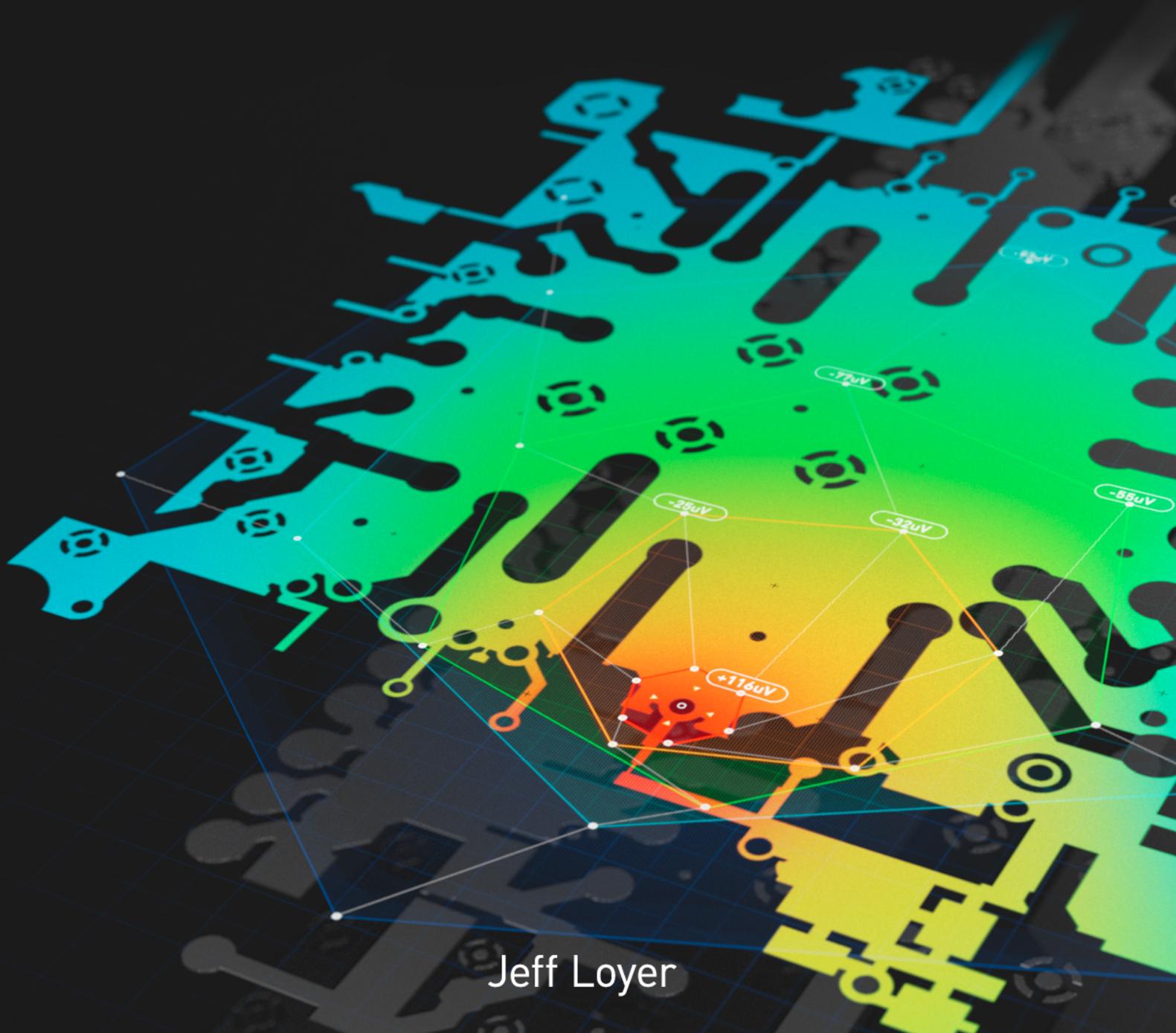


**Altium**<sup>®</sup>

**ANALYSE DE COURANT CONTINU D'UN PDN :  
UN SAVOIR-FAIRE ESSENTIEL  
DU CONCEPTEUR NUMÉRIQUE**



Jeff Loyer

# ANALYSE DE COURANT CONTINU D'UN PDN : UN SAVOIR-FAIRE ESSENTIEL DU CONCEPTEUR NUMÉRIQUE

---

## INTRODUCTION

L'analyse de courant continu d'un réseau de distribution d'alimentation (« PDN »), que l'on appelle communément « chute de tension », « intégrité du courant continu » ou « PI-DC », répond à quelques questions fondamentales que chaque concepteur (analogique ou numérique) devrait se poser et auxquelles chaque concepteur devrait aussi pouvoir répondre :

- Ai-je mis suffisamment de métal entre mes sources et mes charges de façon à fournir une tension adéquate à chaque charge ?
  - Les formes d'alimentation et de masse sont-elles suffisamment étendues ?
  - Les vias sont-ils suffisamment nombreux et suffisamment grands ?
- Puis-je optimiser intelligemment mes formes PDN ?
- Quelle partie de ma conception est susceptible de chauffer le plus ?
- Mes formes de masse sont-elles inhabituelles ?

Beaucoup de concepteurs numériques sont conscients de la nécessité d'une analyse précise de l'intégrité des signaux, ou à quel point il est essentiel de comprendre les aspects AC (Courant Alternatif) de leur PDN (« De combien de condensateurs de découplage ai-je besoin ? », par exemple), mais ils se soucient peu de l'analyse de courant continu de leur PDN (« PI-DC »). L'analyse PI-DC est également essentielle, vu qu'elle fournit des informations clés qui permettront d'augmenter la qualité de la conception et d'économiser une surface occupée et des couches précieuses, permettant ainsi même de réaliser la conception numérique la plus économique possible. Cela permet aussi de répondre à la question fondamentale : « Ai-je mis suffisamment de métal (dans notre cas, presque exclusivement de cuivre) entre mes sources et mes charges de façon à fournir une tension adéquate à chaque charge ? » A notre époque de circuits intégrés minuscules, le fait de répondre précisément à cette question peut faire la différence entre la réussite et l'échec.

Il y a peu de temps encore, la conception numérique était dominée par des gros produits, comme les ordinateurs personnels de bureau et les gros serveurs. Dans ces conceptions, des couches métalliques entières pouvaient être dédiées à l'alimentation en courant, ce qui permettait de réduire au minimum la chute de tension entre la source et les charges. Des règles empiriques conservatrices pouvaient servir à estimer la quantité de métal nécessaire tout en entraînant peu de conséquences, si l'espace dédié à l'alimentation de courant était plus que suffisant. Un concepteur numérique s'assurait seulement que le courant continu était « adéquat », sans se soucier d'optimiser les formes de l'alimentation en courant afin de minimiser la taille et le nombre de couches nécessaires.

Cette époque est révolue – même les conceptions de cartes pour serveurs sont désormais incroyablement denses et la surface occupée est si précieuse qu'elle ne peut être gaspillée en utilisant des méthodes de conception conservatrice trop prudente. Désormais, tout le métal dédié à la distribution de courant doit être « nécessaire », nous ne pouvons plus nous permettre des couches supplémentaires ou une carte surdimensionnée. L'analyse PI-DC fournit un moyen sophistiqué de s'assurer que le métal utilisé pour distribuer le courant est non seulement suffisant mais nécessaire.

## LES INFORMATIONS FOURNIES PAR L'OUTIL PI-DC

La première information que l'outil PI-DC fournit, c'est la chute de tension entre la source et les charges qui résulte de la résistivité des interconnexions d'alimentation. Nous ne pouvons plus supposer qu'elle est nulle en raison d'un « plan » d'alimentation en courant très grand. Plus nous diminuons la taille des conceptions, plus la notion de « plans » d'alimentation devient inadéquate. Même si nous pouvons toujours avoir une couche dédiée principalement à l'alimentation, cette couche sera probablement divisée en plusieurs sections (réseaux) fournissant chacune des tensions distinctes à des points différents de la carte. Une analyse PI-DC donne la chute de tension induite dans chaque réseau, ce qui permet de définir la surface appropriée à chaque réseau de tension. La **figure 1** illustre un tracé classique de tension en 3-D d'une forme d'alimentation de 1,8 v depuis sa source (U4, un MRT) jusqu'à la charge (U1, un FPGA) le long de son chemin à 2 couches (les vias sont cachés dans cette vue). Un examen minutieux du tracé de l'alimentation montre :

# ANALYSE DE COURANT CONTINU D'UN PDN : UN SAVOIR-FAIRE ESSENTIEL DU CONCEPTEUR NUMÉRIQUE

- Il n'y a qu'une chute de 10 mV entre U4 (1,7 V, réduite de 5 % par rapport à sa valeur nominale de 1,8 V) et U1 (1,69 V).
- La piste unique entre U4 et l'anneau de tension du FPGA est la plus grande source de chute de tension.
- Il y a une chute de tension provenant de certains vias – la couleur d'une interconnexion au-dessus de certains vias est différente de celle au bas.
- Il n'y a aucune chute de tension CC entre la source et le condensateur de découplage C3, comme prévu. Les condensateurs sont considérés comme « ouverts » durant l'analyse en courant continu.

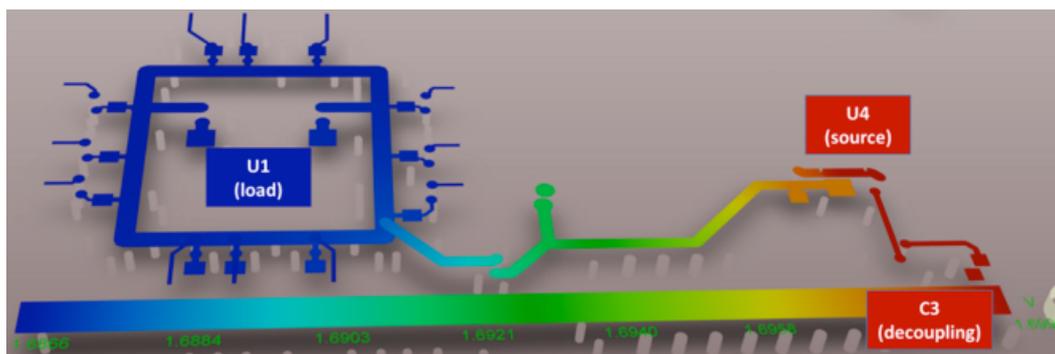


Figure 1 : Tracé de tension de la source d'alimentation (U4) à la charge unique (U1, un FPGA)

Un outil PI-DC signalera aussi les densités de courant (« J ») dans les zones présentant un intérêt, ce qui permet au concepteur de mettre l'accent sur la correction de celles présentant la plus forte densité de courant (« points de pincement » avec  $J_{max}$ ), si nécessaire. Notez que ce tracé confirme ce que nous avons conclu à partir du tracé de tension, tout en illustrant encore mieux certains points particuliers. Malheureusement, il n'y a généralement aucune valeur seuil permettant de définir une densité de courant limite, par conséquent, seules les valeurs relatives sont habituellement utilisées. La performance thermique sera dépendante non seulement de la densité de courant mais de la dissipation thermique du système et même de la section transversale de la forme, tel que démontré par Doug Brooks et Johannes Adam dans leur livre « Trace Currents and Temperature Revisited (Revue des courants et des températures dans les traces) » (Doug Brooks, n.d.).

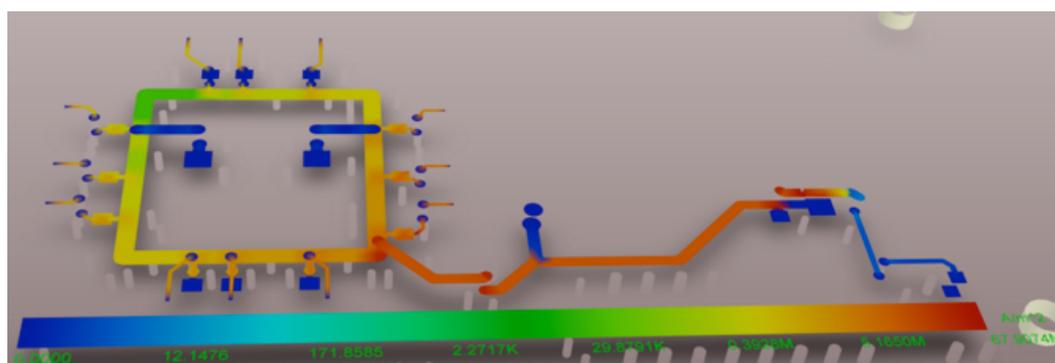


Figure 1 : Tracé de la densité du courant d'un PDN entre la source d'alimentation (U4) et la charge unique (U1, un FPGA)

Sans outil PI-DC, le concepteur utilisera probablement des règles conventionnelles afin de choisir une largeur particulière, basées sur le courant transporté par la forme d'alimentation. Cette approche présente au moins deux problèmes :

- 1) l'utilisation de la même largeur minimale indépendamment de la distance entre la source et la charge n'a aucun sens – vous n'utilisez pas un fil de même diamètre pour fabriquer des rallonges de 1,5 m ou de 30 m, par exemple ;
- 2) lorsque vous utiliser cette même largeur sur toute la longueur de la forme, vous gaspillez non seulement l'espace occupé sur la carte, mais aussi la conception de la forme d'alimentation n'est pas la plus efficace.

# ANALYSE DE COURANT CONTINU D'UN PDN : UN SAVOIR-FAIRE ESSENTIEL DU CONCEPTEUR NUMÉRIQUE

---

Les résultats qu'offre un outil PI-DC permettent au concepteur de dimensionner correctement sa forme d'alimentation en fonction de la longueur, d'affiner la forme d'alimentation dans le cas de distances courtes, quand cela est nécessaire, et de compenser ces rétrécissements en élargissant la forme aux endroits où il y a de l'espace libre sur la carte. Un outil PI-DC est essentiel pour trouver la forme optimale d'un PDN.

De plus, de nos jours, les formes de masse ne peuvent plus être supposées infinies. Les conceptions d'aujourd'hui limitent généralement la quantité de surface qui peut leur être dédiée. Ces restrictions de la surface de la masse peuvent provoquer des tensions significatives dans la « masse » que nous ne pouvons plus supposer être nulles. Et le problème de la tension dans la masse est plus complexe que celui des réseaux d'alimentation – la tension réelle de n'importe quel point de la masse sera une superposition des tensions induites par les courants des différents réseaux d'alimentation. Par exemple, une conception peut fournir à la fois 1,8 V et 3,3 V à un composant. Même si les tensions des deux réseaux d'alimentation sont théoriquement indépendantes, le composant aura une tension sur ses broches de masse qui est l'addition des tensions induites des courants de 1,8 V et de 3,3 V. Il est essentiel de comprendre et de modéliser cette relation avec précision. La bonne nouvelle est que, dans le cas du courant continu, la superposition est assez simple, et l'addition (ou la soustraction, si des sources sont de polarités opposées) est suffisante. Mais un concepteur doit être conscient que la taille de la forme de masse à tout moment doit être adaptée aux courants provenant de sources multiples, alors que la taille des formes d'alimentation est plus simple à déterminer.

Un outil PI-DC devrait être capable de fournir la tension d'un composant en utilisant comme référence la tension de masse de ce composant. La tension par rapport à un point arbitraire de « masse » (comme la source de tension) ne signifie souvent rien. Les courants dans la forme de masse peuvent induire une tension importante sur la masse du réseau, ce qu'il faut comprendre lorsque l'analyse du courant continu du PDN est faite.

Un outil PI-DC apporte également des informations précieuses sur le nombre de vias nécessaires et leur taille, pour la distribution du courant. Bien que cela semble être un exercice trivial, les vias d'alimentation consomment généralement une partie précieuse de la surface occupée sur toutes les couches, empêchant le routage sur les couches au-dessus et au-dessous de leurs couches d'alimentation assignées, et l'utilisation de vias trop nombreux ou trop volumineux est un luxe que les concepteurs d'aujourd'hui ne peuvent se permettre. Ce qui est particulièrement ironique lorsque l'on est trop conservateur dans la distribution du courant en attribuant trop de vias, c'est que ceux-ci peuvent perforer un autre plan d'alimentation ou de masse, ce qui provoque plus de problèmes pour la conception que ça n'en résout.

## COMPRENDRE LES EFFETS DE LA TEMPÉRATURE

Souvent, les outils PI-DC ne présentent pas directement les effets thermiques de votre courant – de combien de degrés ceux-ci réchauffent-ils le métal ? Ce point peut être critique, vu la formule  $I^2R$  qui existe entre le courant et la puissance, donc même une petite résistance peut dissiper de grandes quantités d'énergie si le courant est élevé, et entraîner des points chauds localisés et des défaillances connexes des matériaux diélectriques ou des conducteurs. Heureusement, les outils PI-DC fournissent des informations sur la densité du courant dans les formes d'alimentation et de masse, les concepteurs peuvent ainsi optimiser leur carte afin d'avoir une densité de courant faible et donc une faible dissipation de puissance.

La norme IPC-2152 (antérieurement IPC-2221) donne des conseils pour éviter certains problèmes en fournissant les largeurs minimales de trace qui permettent de tolérer des augmentations de température acceptables. Souvent, les concepteurs de circuits imprimés ne s'en servent pas correctement, en saisissant des accroissements de température très conservateurs (1 °C, par exemple), puis en utilisant la plus grande largeur de trace correspondante comme largeur minimale de toute leur forme PDN, de la source à toutes les charges. Le fait d'appliquer la norme de cette façon oblige les concepteurs à allouer plus d'espace que nécessaire à l'alimentation en courant, ce qui augmente la surface occupée si précieuse ou ajoute des couches à la conception. Afin de créer une conception offrant la meilleure alimentation en courant qui soit, la norme IPC-2152 devrait être bien comprise afin de ne pas être appliquée aveuglément. Le concepteur qui applique la norme intelligemment, en exploitant les informations offertes par un outil PI-DC, peut réduire la surface de PDN tout en garantissant la sécurité de sa conception.

# ANALYSE DE COURANT CONTINU D'UN PDN : UN SAVOIR-FAIRE ESSENTIEL DU CONCEPTEUR NUMÉRIQUE

Au lieu d'utiliser une augmentation autorisée de la température arbitrairement basse lors de l'application de la norme IPC-2152, le concepteur numérique devrait utiliser une augmentation de la température que le matériau diélectrique et le métal peuvent supporter sans risque de dommage ou de défaillance. Par exemple, la **figure 3** montre qu'en permettant une augmentation de la température de 45° C au lieu de 1° C seulement, le concepteur peut réduire la largeur minimale de la trace de 0,3" (rouge) à seulement 0,02" (bleu) pour un courant de 2 A à travers 1 oz de cuivre. Un outil PI-DC peut alors être utilisé pour s'assurer que les exigences de tension de toutes les charges sont respectées lorsque cette largeur minimale est utilisée.

Malheureusement, le problème thermique est très compliqué et même un outil de simulation thermique ne peut offrir qu'une vue limitée en raison de la complexité du problème<sup>7</sup>. Une réponse précise exige des modèles précis pour la multitude de composants qui contribuent à la performance thermique du système tels que le matériau du circuit imprimé, le nombre de couches, la densité du cuivre, la production de chaleur et la dissipation des divers composants, le flux d'air autour de la conception, les conditions ambiantes, etc. Un concepteur numérique devra généralement être conservateur, mais il devrait tenir compte de certains aspects critiques lorsqu'il examine les effets thermiques :

- Toutes les conceptions ne sont pas identiques du point de vue thermique. Une conception qui peut résider dans un endroit frais avec des composants de faible puissance devrait exiger moins de précaution au niveau des effets thermiques qu'une consommant beaucoup de puissance dans un boîtier très chaud, par exemple.
- Toutes les zones d'une conception ne sont pas identiques du point de vue thermique. Des précautions particulières devraient être prises là où la dissipation thermique est très faible – sur les couches supérieures et sous ou à proximité de composants très chauds, par exemple. Les zones éloignées des composants chauds seront généralement moins sujettes à des effets thermiques car la puissance est bien mieux dissipée. Alimenter un composant consommant une grande puissance électrique avec des connexions étroites est le meilleur moyen de courir au désastre.
- Quelle est l'augmentation de la densité du courant ? La chaleur dégagée est fonction de la puissance consommée par la forme, et proportionnelle à  $IR^2$ . Il faudrait faire particulièrement attention aux tracés de densité de courant et il faudrait ajouter du cuivre là où la densité de courant est maximale. Comme mentionné précédemment, il n'est probablement pas possible d'imposer une limite de « densité de courant maximale » étant donné que les effets thermiques dépendent de nombreux autres facteurs, mais une analyse PI-DC permet au concepteur de mettre en évidence les zones problématiques très probables et d'évaluer la relative « criticité » des zones de conception.
- Est-ce que la forme est sur les couches extérieures et intérieures ? Les données de la norme IPC-2152 indiquent que les couches intérieures (stripline) dissipent la chaleur plus facilement que les couches de microrubans (microstrip) (bien que cela puisse dépendre de la quantité de flux d'air sur la trace, qui augmentera le refroidissement par convection, il se peut que des microstrips dissipent bien la chaleur).
- Les exigences thermiques dépendront fortement des matériaux utilisés. Les conceptions souples (en particulier celles qui sont fortement flexibles) seront généralement moins tolérantes à des températures élevées que les circuits imprimés rigides, par exemple.
- Est-ce qu'il a du cuivre relativement froid à proximité qui dissipera la chaleur mieux que les matériaux diélectriques ?

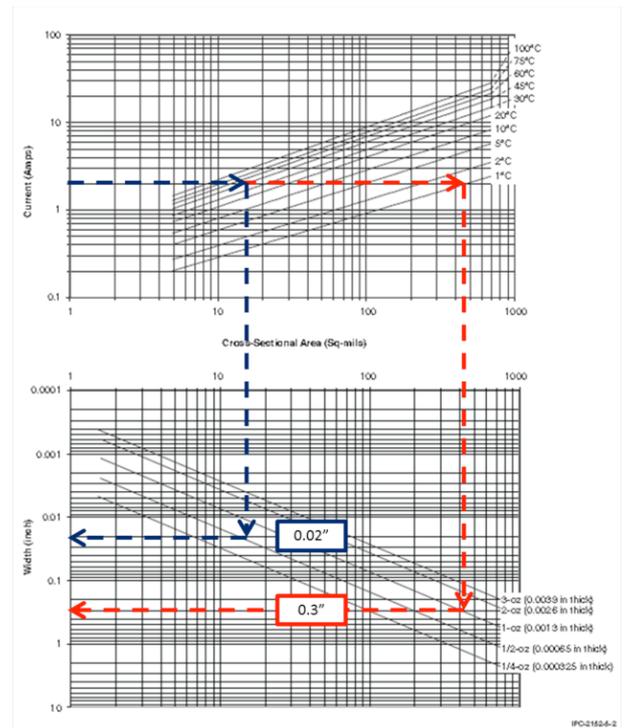


Figure 3 : Réduction de la largeur de la trace de 0,3" à 0,02" à l'aide de la norme IPC-2152

# ANALYSE DE COURANT CONTINU D'UN PDN : UN SAVOIR-FAIRE ESSENTIEL DU CONCEPTEUR NUMÉRIQUE

---

## COMMENT ÉVITER LES RÉSULTATS ERRONÉS D'UN OUTIL PI-DC QUI UTILISE DES DONNÉES INEXACTES

Bien sûr, pour être utile, l'outil PI-DC doit fournir des résultats corrects. La précision de l'outil ne dépend pas seulement des 2 moteurs de modélisation 3D sophistiqués utilisés, mais également des hypothèses introduites dans la simulation. Il est impératif que tous ceux qui utilisent ces outils soient très familiers avec les hypothèses critiques et les paramètres qui ont été fournis à l'outil.

Le premier paramètre à « bien choisir » est la conductivité du métal utilisé dans la conception. Cela semble simple, mais c'est beaucoup plus complexe que la plupart des gens ne l'imaginent. La plupart des outils de puissance et d'intégrité du signal, par exemple, supposent que les cartes de circuits imprimés utilisent du « cuivre » comme métal, avec une conductivité de 5,88e7S/m. Les données de l'industrie<sup>2,3</sup> indiquent, cependant, que le « cuivre » électro-déposé utilisé dans les circuits imprimés est nettement moins conducteur que le cuivre pur, avec une conductivité réduite à 4,7e7S/m à 25 °C. Si les résultats de simulation et de validation diffèrent, il est absolument nécessaire de vérifier la conductivité du métal.

Cette conductivité doit également être ajustée en fonction de la température de fonctionnement réelle de la conception. La conductivité du cuivre, par exemple, chute de 0,4 % pour chaque augmentation d'un degré. Le cuivre d'une conception fonctionnant à 125 °C est 40 % moins conducteur qu'à 25 °C. Il faut comprendre cette différence durant la simulation, car cela ne sert à rien d'avoir un moteur de simulation hautement sophistiqué si celui-ci opère à partir d'hypothèses erronées. (Remarque : Dans le cas de conceptions fonctionnant à des températures extrêmement basses ou élevées, même la linéarité du coefficient de température, 0,4 %/°C, doit être examinée pour les plages de température attendues).

Une autre valeur fondamentale que l'on peut facilement « mal choisir » est la taille des vias. De nombreux outils de conception de circuits imprimés n'utilisent qu'une seule valeur pour représenter la taille d'un via particulier, de plus, ce que ce nombre représente exactement est ambigu. Les vias sont généralement considérés comme des colonnes pleines, ce qui n'est souvent pas le cas. En effet, ils peuvent en fait être entièrement remplis et n'être que des colonnes creuses, avec des diamètres intérieurs et extérieurs ( $\emptyset$  int. et ext., respectivement). La section transversale réelle du via dépend de ces deux dimensions – un cylindre large mais très creux peut avoir une section transversale plus petite qu'un cylindre plus petit et rempli. Dans le cas des vias qui sont généralement utilisés pour alimenter les composants, la plupart des concepteurs supposent que s'ils n'ont qu'une valeur pour un via donné, cette valeur représente la taille du foret de perçage (diamètre extérieur). Le via est supposé être complètement rempli, ou au mieux, représenté par une colonne pleine. Cette hypothèse peut ne pas être valide, et produira des résultats erronés.

Pour bien comprendre comment modéliser correctement les vias, l'utilisateur doit savoir comment les dimensions des vias sont spécifiées et à quoi va ressembler la mise en œuvre effective de ces spécifications (quelle sera la section transversale du via ?). La plupart des outils ne permettent pas à l'utilisateur de fournir à la fois un diamètre intérieur et un diamètre extérieur et ne permettent que des vias pleins. Si tel est le cas et que les vias utilisés sont effectivement creux, le diamètre extérieur du via doit être ajusté pour représenter la section transversale adéquate. Heureusement, trouver le bon diamètre pour une colonne pleine qui a la même coupe transversale qu'une colonne creuse avec un  $\emptyset$  ext. et un  $\emptyset$  int. est un exercice mathématique trivial, vu qu'il suffit de faire la différence entre les deux valeurs,  $\emptyset$  ext. –  $\emptyset$  int. Le défi consiste à utiliser les dimensions de vias correctes lorsque vous faites la simulation sans créer des conséquences inattendues sur la conception physique.

Si les couches extérieures du circuit imprimé sont utilisées pour acheminer le courant, celles-ci représentent un élément particulièrement difficile à modéliser. L'épaisseur du cuivre sur les couches extérieures du circuit imprimé est fonction de l'épaisseur du placage, qui peut varier sensiblement d'un bout à l'autre de la carte. N'oubliez pas de mesurer l'épaisseur des couches extérieures si elles sont utilisées pour alimenter des composants et que les résultats de simulation ne correspondent pas aux mesures de laboratoire.

---

<sup>1</sup>Doug Brooks, Johannes Adam. Articles sur le courant/la température/la puissance/la résistance des traces. De UltraCAD : [http://ultracad.com/article\\_temperature.htm](http://ultracad.com/article_temperature.htm)<sup>2</sup>Loyer, Kunze, Burkhardt. Perte d'insertion précise et modélisation de l'impédance dans les traces de circuits imprimés. DesignCon 2013. San Jose, CA. <sup>3</sup>Loyer, Kunze. Les effets de l'humidité et de la température sur la perte d'insertion dans un circuit imprimé. DesignCon 2013. San Jose, CA.

# ANALYSE DE COURANT CONTINU D'UN PDN : UN SAVOIR-FAIRE ESSENTIEL DU CONCEPTEUR NUMÉRIQUE

---

Finalement, représenter correctement les charges semble simple au premier abord, même ce n'est pas le cas. Un concepteur peut supposer que, pour une charge passive comme une résistance ou une diode, la meilleure modélisation de la charge est une résistance, et que les composants actifs tels que les FPGA doivent être modélisés comme des puits de courant. Quand il modélise les composants actifs comme des puits de courant, il est probablement tenté de prendre pour appel de courant le courant maximal ( $I_{max}$ ). Lorsque vous effectuez des simulations PI-DC pour mesurer la chute de tension du PDN, cette hypothèse est difficile à justifier et peut conduire à des résultats trop pessimistes. Probablement que l'appel de courant maximal ne se produira que lorsque la tension maximale ( $V_{max}$ ) sera appliquée. Nous faisons généralement des simulations à la limite inférieure de la plage de tension et l'appel de courant devrait refléter ces valeurs afin d'obtenir des résultats de simulation précis. Un modèle plus raisonnable de la charge active lorsque la chute de tension est simulée pourrait être plutôt une résistance dont la valeur est fonction de la tension et de l'intensité nominales du composant,  $V_{nom}/I_{nom}$ . D'autre part, certains concepteurs peuvent chercher à éviter certaines valeurs maximales de densité de courant pour des considérations thermiques (au lieu de niveaux de tension minimale pour des considérations électriques). Dans le cas de simulations de densité de courant maximale à l'aide d'une analyse PI-DC (pour des considérations thermiques),  $V_{max}$  devrait probablement être utilisé pour les sources,  $R_{min}$  pour les charges passives et  $I_{max}$  pour les charges actives. Cela vous donnera une représentation plus exacte des courants maximaux possibles.

Lorsque vous utilisez un outil PI-DC, il est essentiel de comprendre toutes les hypothèses inhérentes à la simulation et de s'assurer que ces hypothèses sont valides, sinon les résultats peuvent être totalement erronés.

## VALIDATION DES RÉSULTATS

Il est essentiel de valider correctement toutes les conceptions pour s'assurer de la précision de la simulation et des paramètres utilisés à cette fin. Heureusement, un outil PI-DC permet de le faire simplement. La tension à chaque charge peut d'habitude être facilement mesurée, tout en utilisant une masse locale comme référence. Probablement que les aspects les plus difficiles consistent à : 1) trouver un moyen de s'assurer que toutes les charges consomment leur puissance maximale lorsque les mesures sont effectuées, si la tension sur la forme de masse peut être un facteur significatif ; et 2) comprendre correctement les effets thermiques sur la résistivité. Il peut être nécessaire de faire des superpositions s'il n'est pas pratique d'exercer toutes les charges maximales simultanément. Dans ce cas, le défi sera de mesurer la tension à la « masse » à chaque charge, par rapport à la même référence utilisée durant la simulation. Quant à l'aspect thermique, il sera nécessaire d'avoir une idée de la température réelle des formes d'alimentation afin de calculer la conductivité correcte du métal, qui varie en fonction de la température. Cela nécessitera des instruments que l'on ne trouve habituellement pas dans la plupart des laboratoires de validation, comme les thermocouples, les thermomètres infrarouges ou les capteurs de température IR.

Si les tensions mesurées ne correspondent pas aux simulations, chacune des hypothèses des simulations et des résultats doit être vérifiée. Nous avons essayé de fournir suffisamment d'informations sur la façon de faire des hypothèses appropriées, mais comment faire pour vérifier les résultats ? La donnée la plus fondamentale qu'un outil PI-DC doit être capable de mesurer correctement, c'est la résistance entre la source et les charges, une donnée qui n'est généralement pas fournie directement. Cependant, il est assez facile de fabriquer un circuit de test qui fournira une valeur que vous pourrez comparer à une mesure faite à l'aide d'un ohmmètre d'une carte vierge. Si la source est modélisée comme une batterie de 0 V et que la charge est modélisée comme un puits de courant de 1 A, la tension à la charge représente directement la résistance entre la source et la charge (ignorez le signe de la tension). Par exemple, la **figure 4** ci-dessous illustre comment déterminer la résistance entre la source (broche 2 pour l'alimentation de U4, broches 2 et 3 de J1 pour la masse) et la charge (U1) en utilisant un simulateur PI-DC.

# ANALYSE DE COURANT CONTINU D'UN PDN : UN SAVOIR-FAIRE ESSENTIEL DU CONCEPTEUR NUMÉRIQUE



Figure 4 : Installation de PI-DC pour mesurer la résistance ( $1\text{ V} = 1\ \Omega$ )

Les résultats indiquent qu'il y a une résistance de  $30\text{ m}\Omega$  dans le PDN au niveau de U1 (notez le  $30\text{ mV}$  de U1 à la **figure 4**, illustré comme «**-0,03**»). Pour confirmer cette valeur en laboratoire, placez un « court-circuit » de  $0\ \Omega$  entre la broche 2 de U4 et les broches 2 et 3 de J1 (en utilisant un gros morceau de métal, par exemple), et mesurez la résistance entre les broches d'alimentation et de masse de U1. Si vous obtenez une valeur autre que  $30\text{ m}\Omega$ , la simulation est incorrecte (vous devrez peut-être utiliser des techniques spéciales telles que 4 bornes de détection pour mesurer ces faibles résistances).

S'il est nécessaire de faire une distinction entre la résistance des plans de l'alimentation et de masse, cela peut être fait en analysant la tension sur chaque plan dans ce circuit de test. Notez sur la **figure 5** qu'il y a  $27\text{ m}\Omega$  sur la forme d'alimentation (bleu foncé représente  $27\text{ mV}$ , =  $27\text{ m}\Omega$ ) et que sur la **figure 6**, il y a  $3\text{ m}\Omega$  sur la forme de masse (représentée en rouge).

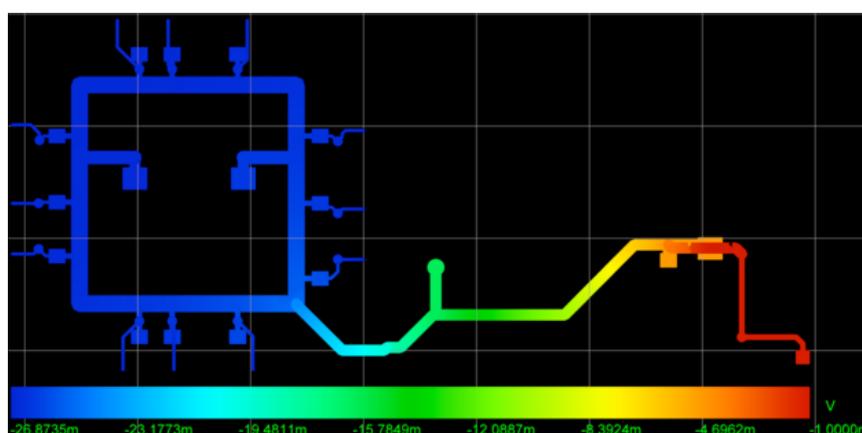


Figure 5 : Résultats du suivi de la tension dans une forme d'alimentation en mesurant la résistance ( $1\text{ V} = 1\ \Omega$ )

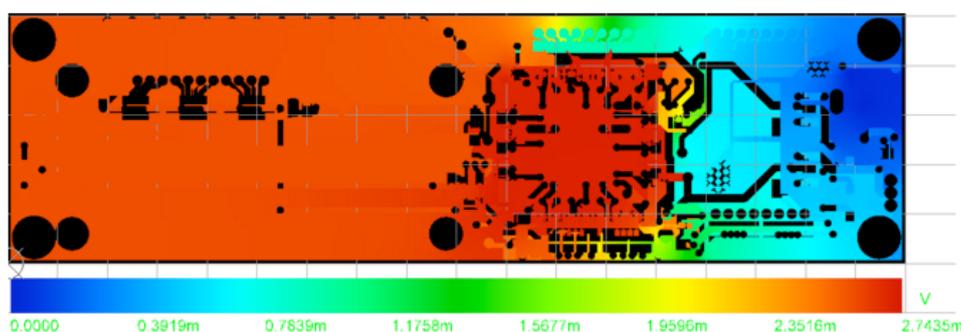


Figure 6 : Résultats du suivi de la tension dans une forme de masse en mesurant la résistance ( $1\text{ V} = 1\ \Omega$ )

# ANALYSE DE COURANT CONTINU D'UN PDN : UN SAVOIR-FAIRE ESSENTIEL DU CONCEPTEUR NUMÉRIQUE

Un facteur essentiel à prendre en considération lors de la validation est la différence de résistivité causée par la température. La résistivité du cuivre, par exemple, augmente d'environ 0,4 % par degré centigrade. La résistance d'un PDN peut augmenter de 20 % lorsque la conception fonctionne à 75° C, par rapport à celle à la température ambiante de 25° C. Cela peut aussi être un avantage – si la tension d'un système répond aux attentes lorsqu'il tourne à chaud et à pleine charge, le concepteur a l'assurance que le cuivre ne sera pas beaucoup plus chaud que prévu, ce qui réduit les risques de défaillances catastrophiques en raison des températures inattendues dans cette forme.

## AUTRES RÉSULTATS DES OUTILS PI-DC

L'exécution d'un outil PI-DC sur les conceptions peut également révéler beaucoup d'imperfections qui ne seraient pas visibles autrement. Le traçage de la densité du courant sur les formes d'alimentation et de masse, par exemple, permet de faire apparaître les « péninsules » et les « îles » de ces formes. La **figure 7** illustre le tracé de la densité de courant d'une conception à 2 couches après l'exécution d'un outil PI-DC. Remarquez la « péninsule » en bleu foncé sur la couche supérieure et l'« île » sur la couche inférieure. Cette vue unique de PI-DC met en évidence des aspects de la conception qui ne seraient autrement pas apparents. Notez qu'il faut être prudent en supposant qu'une forme qui n'est pas utilisée pour faire le PI-DC d'une tension particulière n'est pas nécessaire, vu que cette forme peut être utilisée pour une autre tension, ou pour l'alimentation en courant alternatif (quand elle est connectée à des condensateurs). Mettre des petites résistances à la place de condensateurs au cours d'une simulation de PI-DC et vérifier la distribution de courant correspondante permet à un concepteur de voir si une île ou une péninsule dans une forme d'alimentation est utilisée pour la distribution de courant alternatif (à noter que les résultats de courant continu ne seront pas valides dans le cadre de cette simulation). Les « îles » et les « péninsules » de courant sont particulièrement gênantes car elles auront des fréquences de résonance, et qu'elles causeront peut-être des défaillances uniquement en présence de certaines conditions. Ces défaillances sont souvent aléatoires et donc extrêmement difficiles à dépanner – la recette idéale pour des retards de validation.

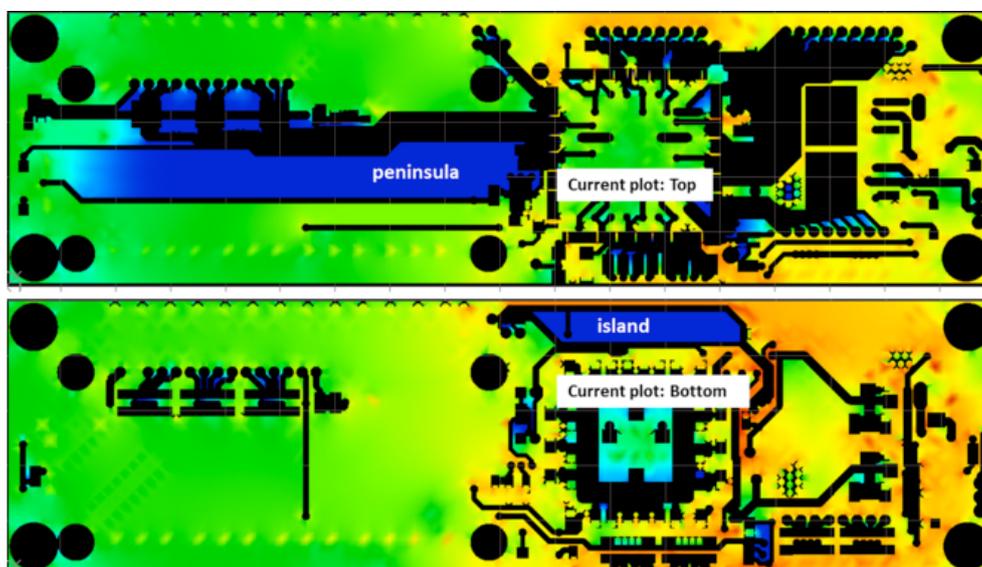


Figure 7 : Tracé de la densité de courant dans une forme de masse montrant les « péninsules » et les « îles »

Les tracés de densité de courant et de tension dans les formes d'alimentation et de masse peuvent également révéler des problèmes au niveau de la capacité de la conception à canaliser le courant entre la source d'alimentation et les charges. Le tracé de la tension de la forme de masse supérieure à la **figure 8** montre très clairement l'inefficacité des chemins entre les sources (les régulateurs de tension ou RT) et la charge (FPGA). Même s'il y a de bonnes raisons de ne pas avoir un chemin simple entre le RT et le FPGA, l'outil PI-DC mettra en évidence les inefficacités afin de les résoudre quand cela est possible. Entre parenthèses, notez aussi que cette forme est problématique du point de vue de l'alimentation en courant alternatif, car elle peut créer une inductance excessive dans le chemin de masse et le « rebond de masse » correspondant (l'inductance augmente avec la taille de la boucle).

## ANALYSE DE COURANT CONTINU D'UN PDN : UN SAVOIR-FAIRE ESSENTIEL DU CONCEPTEUR NUMÉRIQUE

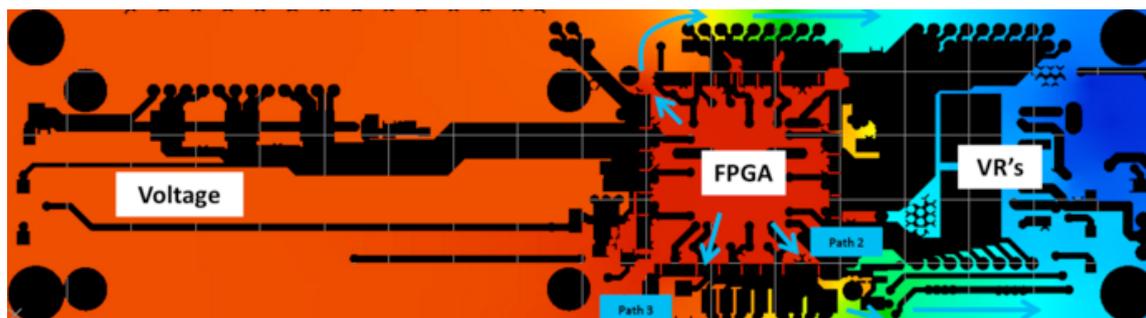


Figure 8 : Tracé de la tension dans une forme de masse montrant les chemins de retour du courant

Bien sûr, le concepteur doit aussi prendre soin de visualiser ses formes de masse en fonction de leur utilisation comme chemin de retour pour les signaux haute vitesse, qui peut ne pas chevaucher leur fonction de chemin de retour de courant continu. Des formes de masse (et certaines formes d'alimentation) qui semblent ne remplir aucune fonction d'alimentation en courant continu peuvent être critiques au niveau de l'intégrité du signal. Mais même dans ce contexte, les « îles » et les « péninsules » devraient être évitées et conçues uniquement en l'absence de toute autre solution. Une analyse PI-DC met souvent en évidence ces formes indésirables lorsqu'elles existent.

Un autre exemple où un tracé de densité de courant de PI-DC peut être particulièrement révélateur est illustré à la **figure 9**. Dans cet exemple, une petite rupture du plan de masse est très évidente, la couleur de la densité de courant passe brusquement du vert au bleu au niveau de la rupture. Celle-ci change considérablement l'efficacité de cette forme d'alimentation, le problème n'aurait pas été décelé sans utiliser cette vue de l'analyse PI-DC.

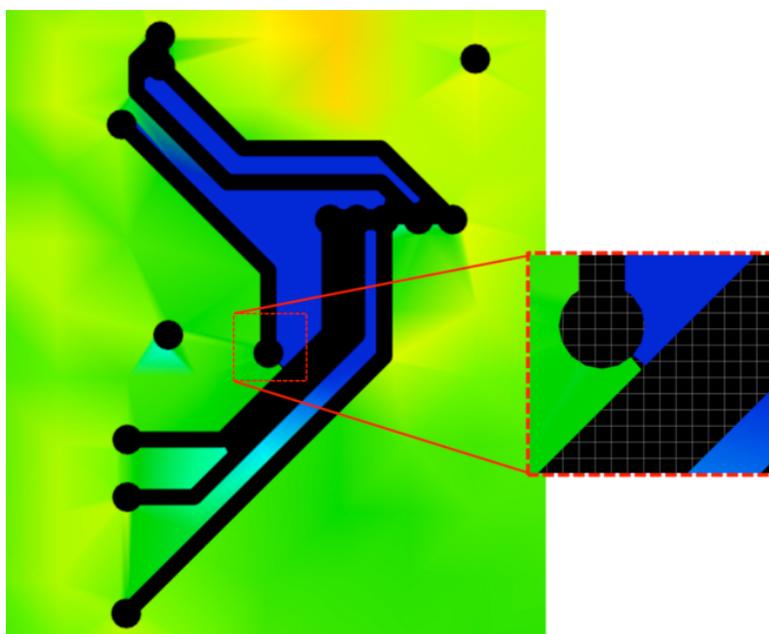


Figure 9 : Petite rupture du plan de masse mise en évidence par le tracé de densité de courant de l'outil PI-DC

Il existe certains aspects non intuitifs d'une analyse PI-DC qui méritent d'être mentionnés. La résistance DC (courant continu) d'un chemin dépend non seulement de la largeur mais aussi de la longueur du chemin. Un chemin DC peut être étroit, s'il n'est pas trop long sans affecter de façon significative l'alimentation en courant. Par exemple, les chemins (b) et (d) à la **figure 10** ont la même résistance. Pour comprendre la résistance DC des formes, la notion de « carrés » est précieuse, comme illustré à la **figure 10**. Le concepteur disposera ainsi de plus de flexibilité – il pourra choisir un chemin DC étroit si la distance est courte, et élargir le chemin autant que possible dans les grands espaces vides afin de compenser les restrictions qu'il a dû faire. L'utilisation de la même largeur sur toute la longueur d'un PDN est inefficace, la distribution de courant n'est pas idéale et les formes d'alimentation sont sur-dimensionnées.

# ANALYSE DE COURANT CONTINU D'UN PDN : UN SAVOIR-FAIRE ESSENTIEL DU CONCEPTEUR NUMÉRIQUE

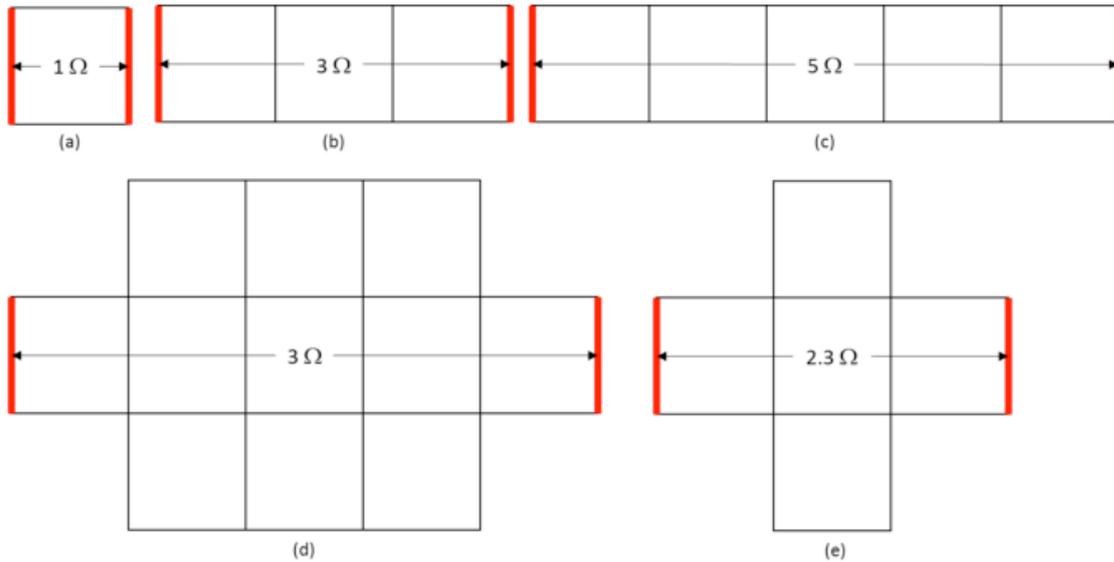


Figure 10 : Résistance de formes d'alimentation en « carrés »

La figure 11 illustre 4 formes d'alimentation très différentes, toutes ayant la même résistance globale. L'outil PI-DC offre aux concepteurs des solutions pour modifier leurs formes PDN afin de répondre aux exigences d'alimentation de la façon la plus efficace possible.

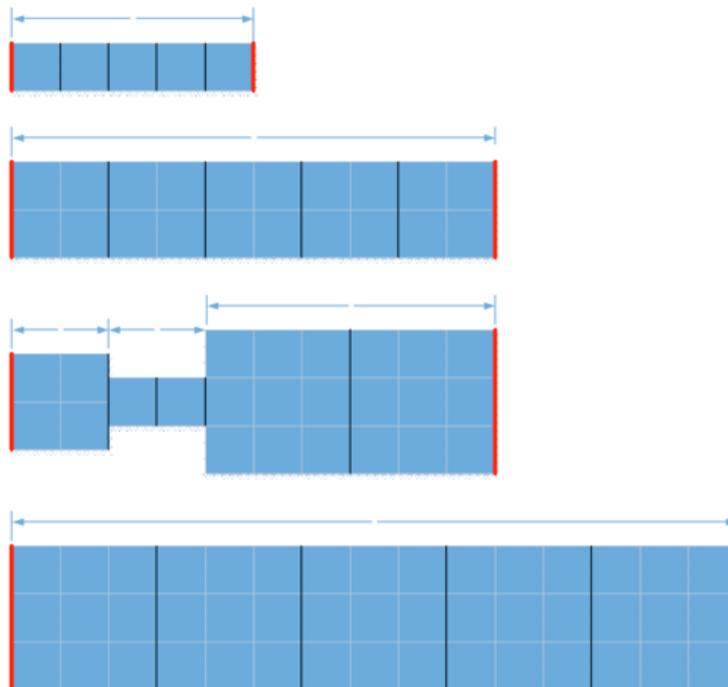


Figure 11 : Différentes formes d'alimentation ayant la même résistance

## POURQUOI LES CONCEPTIONS IMPARFAITES FONCTIONNENT-ELLES ?

Vous allez constater inévitablement lorsque vous exécutez l'outil PI-DC sur des conceptions existantes qu'il existe de nombreuses « erreurs » dans ces conceptions. Des concepteurs ont remarqué qu'ils trouvaient des erreurs dans pratiquement chaque conception qu'ils analysaient avec l'outil PI-DC – « Comment est-ce que cela peut marcher avec tant de problèmes ? » Il y a 2 principaux facteurs qui permettent aux conceptions défectueuses de fonctionner, même quand leur structure PI-DC présente des défauts :

# ANALYSE DE COURANT CONTINU D'UN PDN : UN SAVOIR-FAIRE ESSENTIEL DU CONCEPTEUR NUMÉRIQUE

---

1) L'alimentation en courant continu a toujours été conservatrice. Pour déterminer la largeur correcte d'un conducteur pour un courant donné, la norme IPC donne la largeur en fonction de la hausse de température admissible. Les concepteurs numériques ne disposent généralement pas de données fiables au sujet d'une hausse de température appropriée, par conséquent, ils utilisent des valeurs conservatrices, probablement basées sur leur expérience passée, ou encore, ils mettent autant de cuivre que « possible ». S'ils ont des doutes quant à savoir si c'est suffisant, ils comptent sur la vérification des tensions durant la validation. Si la conception est conforme aux exigences, ils ajoutent cette conception à leur expérience qui leur servira de ligne directrice pour concevoir de nouvelles puces. Si leurs conceptions ne sont pas défaillantes, ils n'ont aucun moyen de savoir s'ils peuvent réduire la quantité de cuivre consacrée à l'alimentation des composants, donc ils deviennent de plus en plus conservateurs. La marge dans les conceptions est souvent suffisante pour permettre des défauts, parfois considérables.

2) Les « péninsules » ou les « îles » n'affectent pas négativement l'alimentation en **courant continu**, mais elles peuvent affecter l'alimentation en **courant alternatif** et/ou **l'intégrité du signal** de manière aléatoire. Elles indiquent qu'une conception peut être améliorée, mais elles n'entraîneront pas la défaillance de la conception au niveau de l'alimentation en courant continu. Mais elles sont particulièrement problématiques dans le cas de l'alimentation en courant alternatif et de l'intégrité des signaux car ceux-ci peuvent « résonner » à des fréquences particulières. Si ces fréquences sont excitées dans la forme, un bruit excessif du courant alternatif peut être induit dans le PDN ou, s'il y a des signaux adjacents à la forme, celle-ci peut introduire un bruit important sur ces signaux à sa ou ses fréquences de résonance, causant des défaillances logiques. Dans les deux cas, les défaillances dépendront de l'existence de fréquences de résonance particulières et peuvent survenir aléatoirement ou ne se produire que dans des circonstances très particulières, ce qui les rend extrêmement difficiles à reproduire, à dépanner et à corriger. Il est beaucoup plus sage de prendre des mesures tendant à réduire préventivement ces questions particulièrement vicieuses.

Peut-être que les expressions « imperfections », « domaines d'amélioration », ou « situations non idéales » seraient plus appropriées que de parler d'« erreurs », mais... En ces jours où l'accent est mis sur l'autonomie de la batterie et la réduction des coûts, être trop conservateur ou laisser des défauts, tels que des péninsules, dans une forme d'alimentation, sont des comportements qui peuvent faire la différence entre un produit réussi ou non, et qu'il n'est plus possible d'ignorer. Un outil PI-DC donne non seulement des informations permettant de savoir si un PDN est adéquat, mais il peut également dire si des formes d'alimentation sont nécessaires ou non.

## ASSUREZ-VOUS DE LIMITER LE COURANT D'UNE FAÇON OU D'UNE AUTRE

Porter une attention particulière à la conception d'un PDN c'est se prémunir contre des situations imprévues. Le concepteur doit être conscient que, dans le cas d'une augmentation catastrophique de courant (un court-circuit avec la masse, par exemple), une forme d'alimentation optimisée peut ne pas être capable d'absorber le courant supplémentaire et provoquer une défaillance de la conception. Il est nécessaire de prévoir certains moyens de limiter le flux de courant dans le cas d'erreurs catastrophiques si celles-ci peuvent se produire (comme le fait d'alimenter n'importe quel connecteur qui peut être mis en court-circuit lors de l'installation, par exemple).

## DÉTERMINER LA TAILLE ET LE NOMBRE DE VIAS

Une règle couramment utilisée pour alimenter les différents composants revient à disposer de suffisamment de vias de sorte que la somme de leurs sections transversales soit égale, ou supérieure à la surface des formes d'alimentation qu'ils connectent. Par expérience, cela est suffisant, mais un outil PI-DC peut vous dire si tant de vias sont nécessaires. Trop de vias ou des vias trop volumineux entraînent des restrictions au niveau du routage dans toutes les couches au-dessus et au-dessous de celle de transition, une chose à ne pas utiliser à la légère dans la plupart des conceptions d'aujourd'hui. Des vias inutiles dans une forme d'alimentation peuvent affecter d'autre forme d'alimentation dans d'autres couches. Une analyse PI-DC permet de mesurer l'effet des vias sur le PDN. La **figure 12** montre 7 vias (cerclés et étiquetés de « a » à « g ») dans une conception d'alimentation. Un examen approfondi révèle qu'il y a un changement de couleur significatif au niveau des 3 vias, « a », « b »

# ANALYSE DE COURANT CONTINU D'UN PDN : UN SAVOIR-FAIRE ESSENTIEL DU CONCEPTEUR NUMÉRIQUE

et « d », ce qui indique une chute de tension correspondante au niveau de chacun des trois vias. En déterminant la tension exacte en haut et en bas de ces vias (ce que peuvent faire la plupart des outils PI-DC), le concepteur peut déterminer si la taille et le nombre de vias sont appropriés et nécessaires. Comme nous l'avons expliqué précédemment, il y a une ambiguïté dans le dimensionnement exact des vias dans les simulations, donc il faut prendre des précautions pour tenir compte des effets de l'épaisseur du placage, par exemple. Notez aussi que les vias sont généralement représentés comme des « éléments groupés », qu'une résistance leur est assignée en fonction de leur diamètre et de leur longueur, et qu'ils sont généralement non « résolus » sous forme de colonnes complexes dans le solveur, ce qui rend les simulations bien plus rapides sans pour autant sacrifier le niveau de précision.

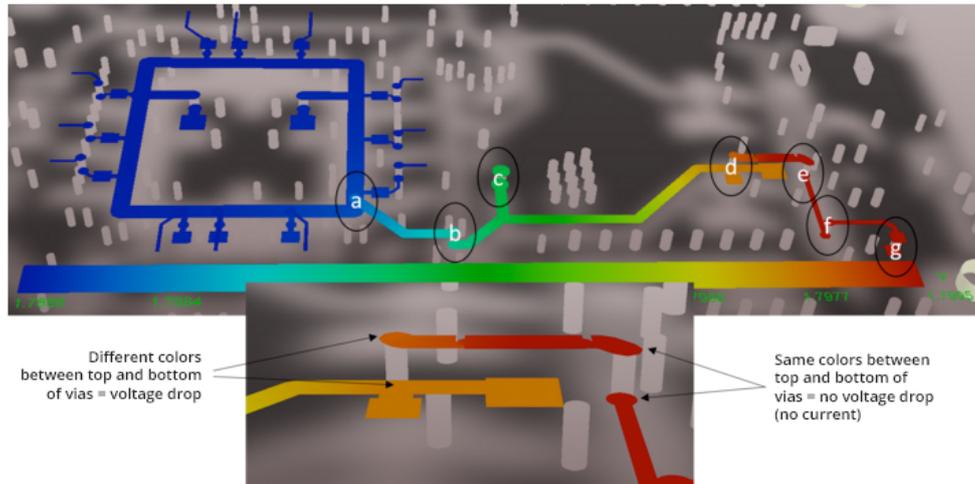


Figure 12 : Tracé de tension, montrant la chute de tension dans les vias et la forme

## CONCLUSION

Un outil PI-DC est un composant essentiel de la boîte à outils de tout concepteur numérique, qui fournit des informations approfondies sur la façon de réduire la complexité et la taille d'une conception tout en améliorant ses performances. L'optimisation de PDN peut permettre d'économiser une surface occupée et des couches très précieuses, afin de diminuer les coûts de fabrication tout en augmentant les performances et la fiabilité. Il est donc essentiel que chaque concepteur (analogique et numérique) soit capable de faire des simulations PI-DC.