

# Mesure du courant que fournit une alimentation

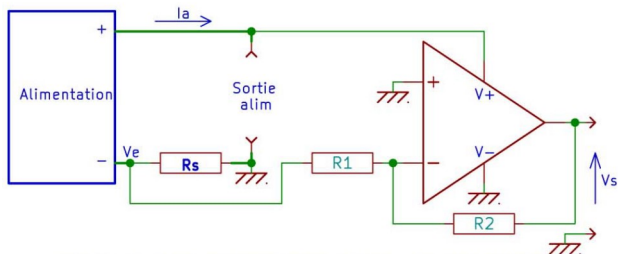
Jean-Paul Gendner F5BU - [f5bu@orange.fr](mailto:f5bu@orange.fr) - [f5bu.fr](http://f5bu.fr)

Il y a quelques temps, Phil, F4ILW, m'a demandé si je pourrais lui faire un montage permettant, par commutation, d'afficher sur un galvanomètre, la tension ou le courant que délivre une de ses alimentations 9-16 V 40 A. Alimentation équipée d'une résistance shunt sur la sortie positive de l'alimentation.

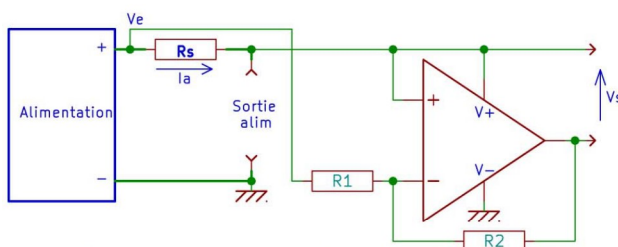
La mesure de la tension ne posant aucun problème, je ne parlerai que de la mesure du courant.

En me penchant sur le problème, j'ai vite réalisé que cela pouvait être très intéressant. Surtout si le montage était suffisamment polyvalent pour effectuer non seulement des mesures statiques du courant, mais aussi pour permettre des visions dynamiques de la consommation de montages lors d'essais. En fait, cela me rajeunissait d'une bonne trentaine d'années en me ramenant à l'époque où je développais des systèmes d'acquisitions de données à très, très faible consommation. Il fallait chasser toute consommation inutile de fractions de  $\mu\text{A}$ , car la consommation moyenne en utilisation normale n'était que de quelques  $\mu\text{A}$ .

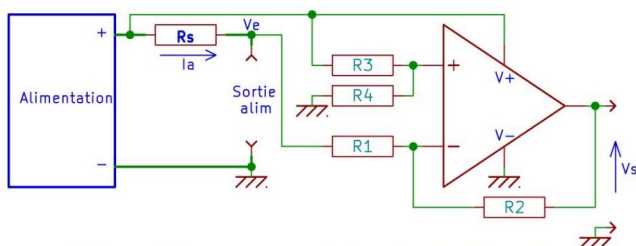
$$V_e = R_s \cdot I_a \quad G = R_2 / R_1 \quad K = R_4 / R_3$$



a) Principe d'un montage avec  $R_s$  dans le - de l'alimentation



b) Principe 1 d'un montage avec  $R_s$  dans le + de l'alimentation



c) Principe 2 d'un montage avec  $R_s$  dans le + de l'alimentation

Fig. 1 - Différents principes de montages

Le principe pour mesurer le courant fourni par une alimentation est très simple : on mesure la tension  $V_d$  aux bornes d'une résistance shunt  $R_s$ , de très faible valeur, placée en série à la sortie de l'alimentation. Le courant  $I$  est égal à  $V_d / R_s$ .  $V_d$  devant être aussi faible que possible pour une bonne utilisation de l'alimentation, il faut généralement amplifier cette tension pour la mesurer.

La plupart des solutions trouvées sur le Net utilisent une résistance insérée dans le moins de l'alimentation, (voir Fig.1a) car dans ce cas, la tension de mode commun (TMC [1]) est nulle pour l'amplificateur. L'amplificateur doit toutefois : fonctionner avec une TMC incluant la tension  $V^-$ , avoir une tension de déchet quasi nulle côté  $V^-$  (c'est à dire que la tension de sortie doit pouvoir être quasiment égale à  $V^-$ , ce qui n'existait pas du temps de ma jeunesse), et avoir une faible tension d'offset (TO), vu les faibles tensions à mesurer. En posant  $G = R_2 / R_1$ , la tension de sortie vaut théoriquement :  $V_s = V_e \cdot G$ .

En utilisant le même principe pour une résistance insérée dans le plus de l'alimentation [2], la tension de mode commun est alors égale à la tension de sortie de l'alimentation, qui est aussi celle d'alimentation de l'amplificateur opérationnel (AOP). Un montage selon le principe de la Fig.1b est possible avec un AOP incluant la tension  $V^+$  comme TMC, ayant une tension de déchet quasi nulle côté  $V^+$ , et une faible TO. Toutefois, la sortie se ferait par rapport à  $V^+$  et le signal serait inversé. En effet, dans ce cas :  $V_s = V^+ - V_e \cdot G$ . Ceci ne serait pas vraiment gênant pour une utilisation avec un galvanomètre ou un voltmètre, mais vraiment pas pratique pour des mesures avec un oscilloscope.

Aussi, j'ai réalisé un montage basé sur l'utilisation d'un AOP monté en amplificateur différentiel référencé à  $V^-$  (Voir Fig.1c). En posant aussi  $K = R_4 / R_3$ , la tension de sortie théorique vaut :

$$V_s = V^+ \cdot \frac{K \cdot (1 + G)}{(1 + K)} - V_e \cdot G$$

On voit facilement que : si  $K = G$ ,  $V_s = G \cdot (V^+ - V_e)$ . Et lorsqu'il n'y a pas de courant  $V_e = V^+$  et  $V_s = 0$ . Si  $K < G$ ,  $V_s$  devrait théoriquement devenir négatif, ce qui est physiquement impossible, la tension de sortie de l'AOP ne pouvant descendre en dessous de  $V^-$ . Concernant l'égalité  $K = G$ , l'expérience montre qu'un ajustement de l'ordre de 1 pour 10 000 donne en général de bons résultats.

## Mesure du courant (et de la tension) que fournit une alimentation

(F5BU 2024-07)

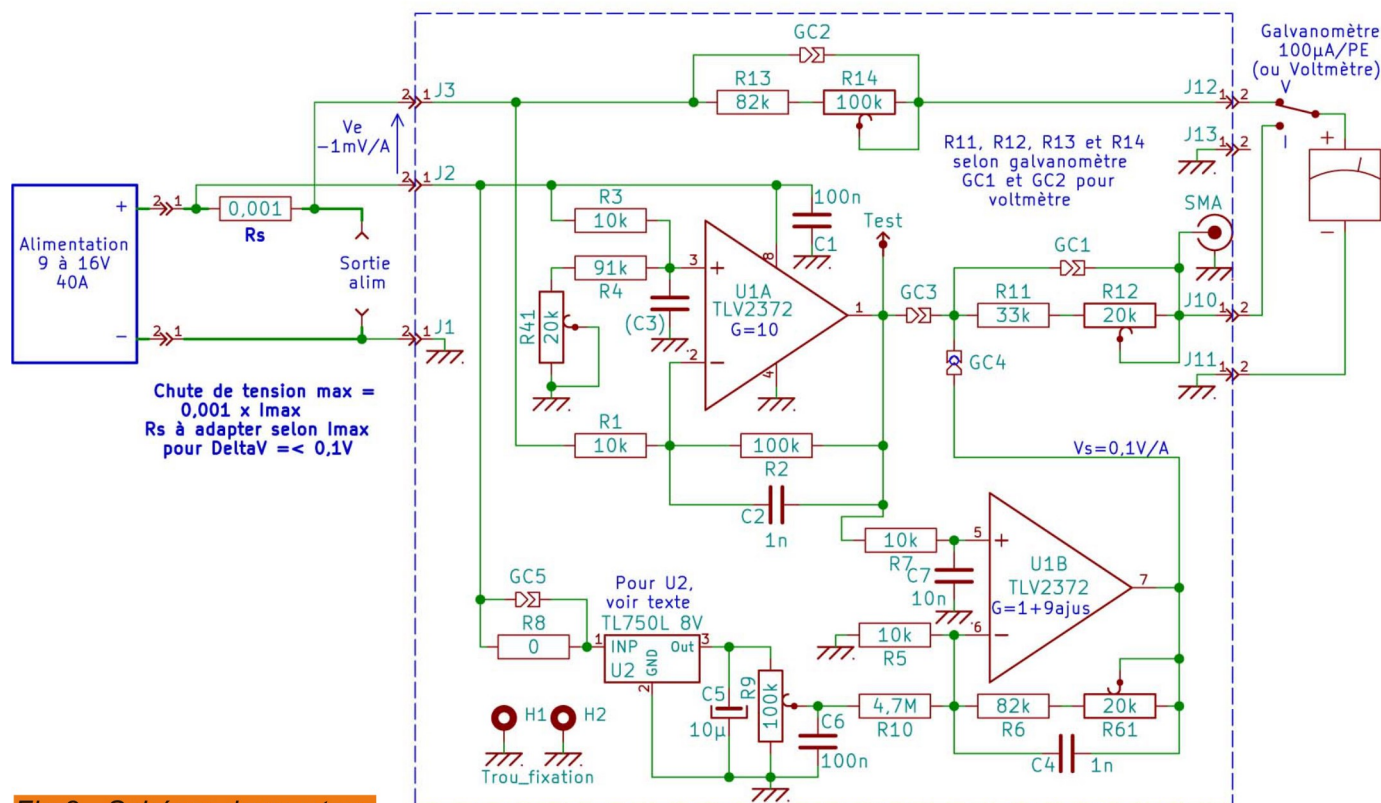


Fig.2 - Schéma du montage

Mon choix a été une tension  $V_d$  max comprise entre 20 et 100 mV. Selon la valeur de la résistance de shunt, un gain entre 50 et 200 permet alors d'avoir une tension de sortie égale à une puissance de 10 fois le courant. C'est à dire qu'il suffit de déplacer la virgule pour lire la bonne valeur de courant. Par exemple : 5 V pour 50 A, 4 V pour 400 mA, etc. Il y a un très grand nombre de combinaisons possibles. Connaissant  $I_{max}$  et  $V_d$  max souhaités,  $R_s = (V_d \text{ max}) / (I_{max})$  et la puissance qu'elle doit pouvoir dissiper vaut  $P = (V_d \text{ max}) \cdot (I_{max})$ . Ensuite, le gain nécessaire se calcule en fonction de la tension pleine échelle (TPE) souhaitée par  $\text{Gain} = \text{TPE} / (V_d \text{ max})$ . Attention, la TPE de sortie ne peut évidemment pas être supérieure à celle de l'alimentation ! Personnellement, j'ai privilégié  $V_d \text{ max} = 100 \text{ mV}$  et  $\text{Gain} = 100$ .

### Premier montage réalisé

La Fig.2 donne le schéma du montage pratique qui met en œuvre deux AOP mis en cascade. Les valeurs des composants sont données pour une résistance de shunt de 0,001  $\Omega$ , une alimentation de 9 à 16 V 40 A et pour fournir une TPE de 4 V.

L'AOP U1A est monté en amplificateur différentiel avec un gain  $G$  fixe de 10, conformément au schéma de la Fig.1c. R41 permet de régler finement le rapport  $K$  pour avoir une bonne

réjection de la TMC, toutefois, ce réglage a aussi un effet de compensation de la TO (imparfait, car la compensation varie avec le signal d'entrée  $V_d$ ). U1B est monté en amplificateur non inverseur, et son gain, environ égal à  $1 + \frac{R_6 + R_{61}}{R_5}$ , est réglable

de 5 à 20 selon le choix des résistances. En fait, le gain est légèrement supérieur (moins de 0,22%) à celui indiqué ci-avant, à cause de la combinaison de R10 et R9 qui se retrouve en parallèle de R5.

U2, un régulateur de tension de 8 V [3], et les composants associés, permettent de décaler la tension de sortie du 2<sup>e</sup> AOP, de manière à avoir une tension proche de 0 V lorsqu'il n'y a pas de courant dans la résistance de shunt. Si des dizaines de mV de décalage du 0 V en sortie ne posent pas de problème, ces composants (U2, R8, R9, R10, C5 et C6) peuvent être omis.

C2, C4 et C7 sont prévus pour limiter la bande passante des amplificateurs. Leurs valeurs sont à adapter à l'utilisation prévue. Pour des mesures à l'oscilloscope, ils peuvent être omis, la constante de temps de réponse mesurée est alors de 80  $\mu\text{s}$  pour des courants de l'ordre de la  $PE/50$  et de 5  $\mu\text{s}$  pour des courants proches de la  $PE$ . Voir les courbes bleues de la Fig.5 qui montrent les réponses en fonction du temps à des impulsions de 29, 124 et 940 mA. Pour une sortie voltmètre



ou galvanomètre, le filtrage peut être nettement plus important, en augmentant notamment la valeur de C2.

R11 et R12 sont prévues pour ajuster la pleine échelle d'un galvanomètre pour la mesure du courant, R13 et R14 pour la mesure de la tension. Les valeurs des composants sont à adapter au galvanomètre. Pour créer un cadran avec des graduations ad-hoc pour le galvanomètre, ne pas hésiter à utiliser mon programme *Galva*, disponible sur mon site [f5bu.fr](http://f5bu.fr).

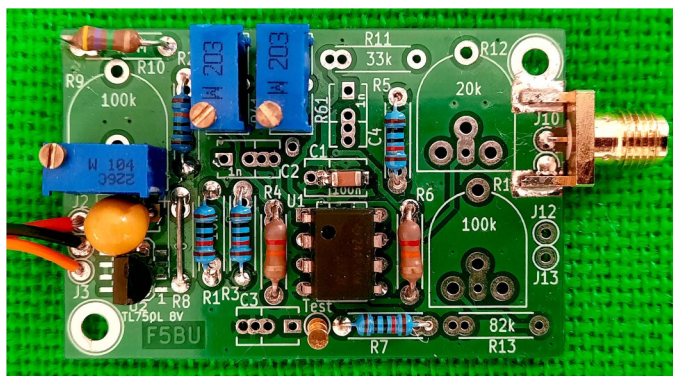


Fig.3 - Circuit imprimé (V3) monté pour oscilloscope

### Réglages

S'assurer qu'aucune charge n'est branchée sur l'alimentation, donc qu'aucun courant ne traverse la résistance de shunt (en dehors de celui allant vers R1, qui est inférieur à 0,16 mA) :

- Régler R9 au minimum (0 V sur le curseur du potentiomètre).
- Régler le gain global : brancher une charge proche de la charge maximale sur l'alimentation avec un ampèremètre en série, puis ajuster R61 pour avoir une augmentation de la tension de sortie de U1B correspondant à la valeur souhaitée. À noter, que pour une utilisation uniquement avec un galvanomètre, le réglage de R61 n'est pas obligatoire et l'ajustable peut être remplacé par une résistance fixe (ou un strap en donnant la bonne valeur à R6).
- Régler  $K$  avec  $(RMC + TO)$  : rechercher le début de la zone de réglage de R41 provoquant le minimum de tension de sortie. Puis, par petites retouches successives, trouver le réglage pour

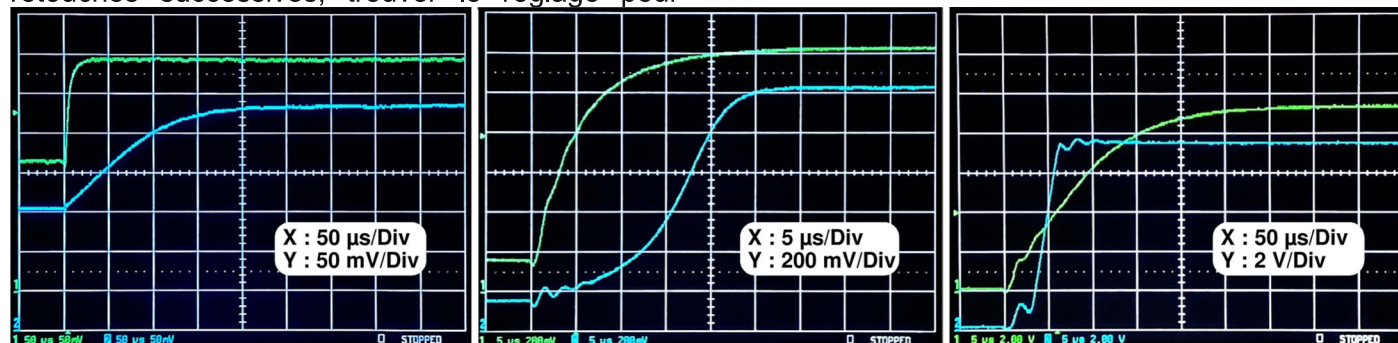


Fig.5 - Temps de réponses pour trois valeurs de courants. Bleu : TLV2372; vert : INA214

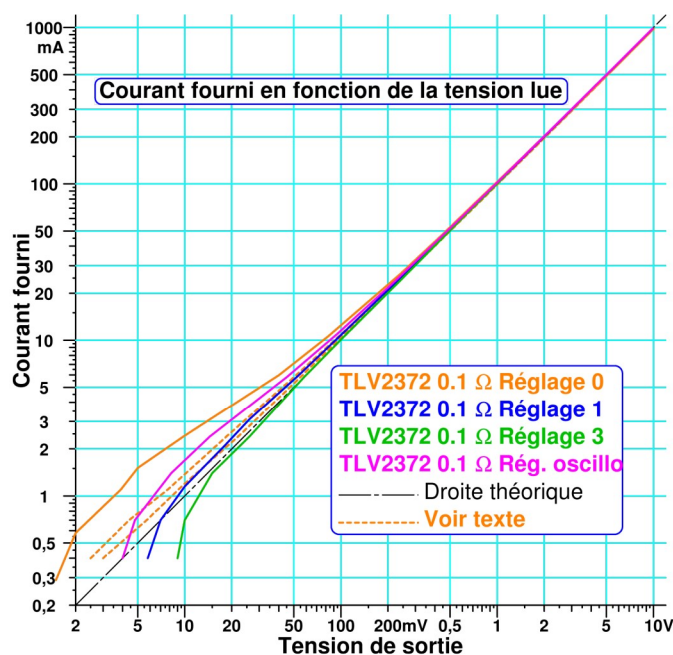


Fig4. - Courbes de réponses du montage selon réglages

lequel un courant de l'ordre PE/100 augmente la tension de sortie de la valeur souhaitée.

- Compenser l'offset en sortie : à l'équilibre thermique, régler R9 afin que la tension de sortie soit comprise entre 0,5 et 2 mV. Éviter la valeur 0, car comme elle ne peut pas être négative, une valeur nulle peut être signe d'une dérive en température qui empêche les mesures de très faibles courants.

- Pour l'utilisation d'un galvanomètre les réglages précédents sont moins critiques. Régler R12 et R14 pour lire les bonnes valeurs.

### Résultats

La Fig.3 montre la photo d'un circuit monté. La Fig.4 présente des courbes de réponse : 1) en traits pleins, obtenues pour différents réglages successifs selon un premier protocole de réglage. Pour les courbes en vert et en bleu, les réglages étaient un peu délicats à effectuer. La courbe en magenta correspond au réglage avec lequel ont été effectuées les mesures à l'oscilloscope. 2) les courbes en pointillés ont été obtenues avec un 2<sup>e</sup> montage [3] et selon le protocole de réglage décrit précédemment.

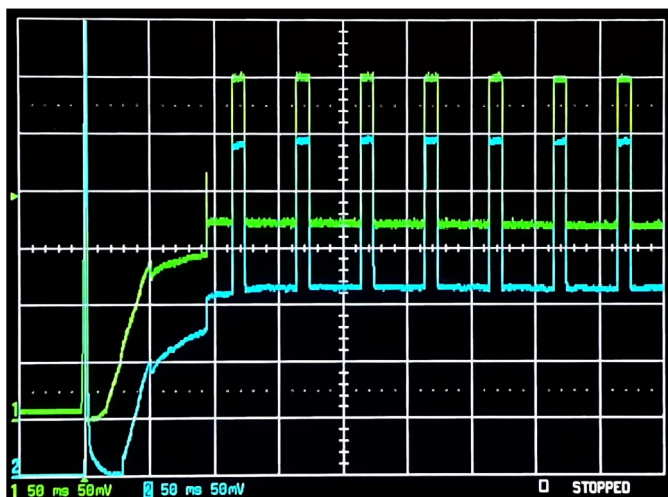


Fig.6 - Mise sous tension montage  $\mu C$ . Bleu : TLV2372; vert : INA214

On voit que pour des courants inférieurs à 2% du courant  $PE$  les courbes s'écartent de la droite idéale, pour laquelle le rapport Courant / Tension-lue est constant. Il faut noter que plus les courants à mesurer sont faibles, plus les courbes dépendent de la tension d'alimentation et de la température. Cela ne pose pas de problème pour une utilisation avec un galvanomètre, ni pour observer des variations de courant à l'oscilloscope. Toutefois, pour effectuer des mesures précises (à l'oscilloscope et surtout avec un voltmètre numérique) de courants inférieurs à 2% de la  $PE$ , il faut tenir compte de la courbe de réponse relevée.

Cela était un peu prévisible, puisque les  $TO$  des AOP, sont de l'ordre du millivolt et varient avec la température et la  $TMC$ . De ce fait, leur influence n'est pas négligeable dès que l'on mesure des tensions de seulement quelques millivolts.

Pour un montage avec une résistance shunt de  $0,1 \Omega$  et un gain total de 100, soit un courant  $PE$  de 1 A, la courbe bleue de la Fig.6 montre la mise sous tension d'un montage à microcontrôleur. Au départ, il y a une courte pointe de courant d'une quarantaine de milliampères. Puis, durant une centaine de millisecondes, c'est le démarrage du microcontrôleur. Une fois le régime stationnaire établi, la tension mesurée entre les impulsions est d'environ 165 mV, ce qui correspond à un courant de 16,5 mA sans tenir compte de la courbe de calibration. En fait le courant est de 17 mA ( $PE/58$ ). Durant les impulsions, on lit 280 mV et le courant est de 29 mA.

La courbe bleue de la Fig.7 montre des impulsions de 124 mA ( $PE/10$ ). Pour ces valeurs de courants, seule la précision de lecture sur l'oscilloscope est à prendre en compte.

### Circuit shunt

Afin de compléter ce montage de mesure du courant, j'ai également réalisé un circuit imprimé

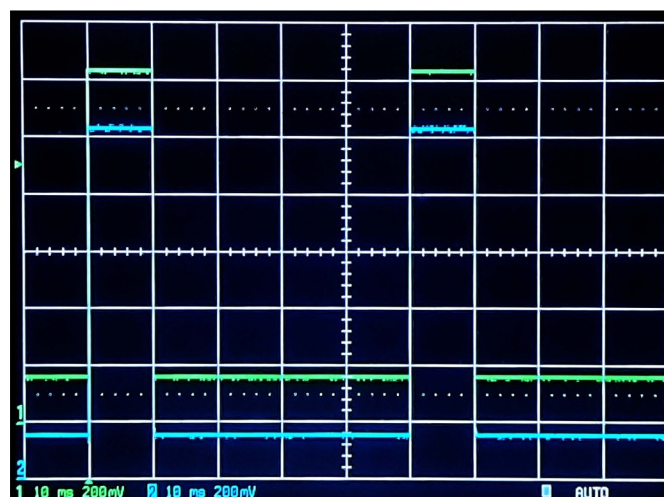


Fig.7 - Impulsions de 124 mA ( $PE/5$ ). Bleu : TLV2372; vert : INA214

pour la partie résistance de shunt (Fig.8). Le schéma, très simple, se devine facilement sur celui de la mesure de courant (Fig.2). Il est possible de monter des fiches et douilles bananes avec un espacement relativement standard de 19 mm ou des fils avec des connecteurs selon besoins.

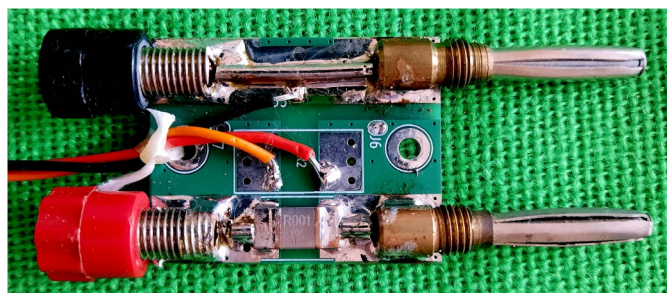


Fig.8 - Exemple de circuit pour la résistance de shunt

### Bonne surprise

Cherchant à voir s'il n'est pas possible d'améliorer la qualité des mesures, je me suis mis en quête de trouver un circuit intégré avec deux AOP ayant des tensions d'offset plus faibles. Et là, quelle n'a pas été ma grande surprise de trouver des circuits spécifiques pour la mesure du courant, utilisant une résistance de shunt [4] ! Il y en a un grand nombre, aussi, il a fallu en trouver un qui corresponde à mon attente, qui soit disponible pour l'approvisionnement, et qui ait un boîtier pouvant être soudé manuellement. Mon choix s'est ainsi porté sur la série INA21x de Texas Instruments. La configuration du circuit est un amplificateur différentiel, exactement comme mon montage. Mais là, la tension d'offset est quelque 70 fois inférieure. Selon le troisième chiffre de la référence du circuit, le gain est de 50, 75, 100, 200, 500 ou 1000 V/V. Seul inconvénient : il s'agit d'un boîtier CMS SC70 à 6 pattes espacées de 0,65 mm, car je n'ai pas trouvé mieux (électronique moderne oblige).



En ce qui me concerne, avec mon fer à souder habituel, en utilisant du fil de soudure de 0,46 mm, et en suivant la procédure décrite dans mon article « Interface simple PC-TX » paru au mois de

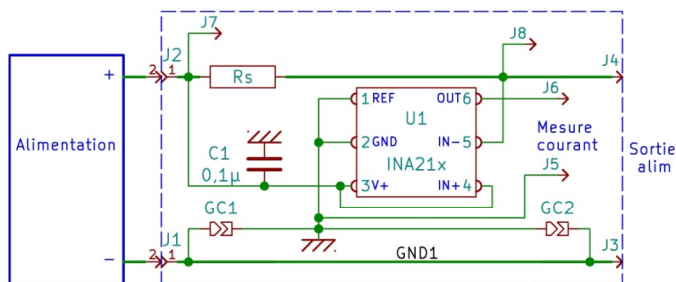


Fig.9 Schéma d'un montage utilisant un INA214x

novembre 2024, j'arrive, sans trop de difficulté, à souder ces circuits. Lorsqu'une boule de soudure se forme à l'extrémité du fil de soudure, il faut la couper tout de suite, et lorsqu'il arrive que de la soudure fasse un court-circuit entre des connexions, il faut utiliser de la fine tresse à dessouder pour retirer l'excédent de soudure.

Du coup, j'ai refait un circuit imprimé shunt intégrant directement un tel circuit. Le schéma est donné par la Fig.9 et des réalisations sont présentées par les Fig.10 et 11.

Remarques :

- Pour celui avec une résistance de 1 mΩ, la PE théorique est de 100 A, toutefois, la résistance de shunt utilisée ne pouvant dissiper que 5 W, il faut

se limiter à 70 A, car  $I = \sqrt{\frac{P}{R}}$ .

- A l'utilisation, les « queues de cochons » (une spire), visibles sur la Fig.11, misent en place pour l'entrée du courant se révèlent bien pratiques pour la connexion à diverses alimentations.

### Résultats

La Fig.12 [5] montre, de manière comparative, les courbes de réponse de trois montages [6] pour des mesures PE de 1 A et une sortie PE de 10 V. On voit surtout que pour le montage avec un INA214 (Gain de 100 avec une tension Vd max de

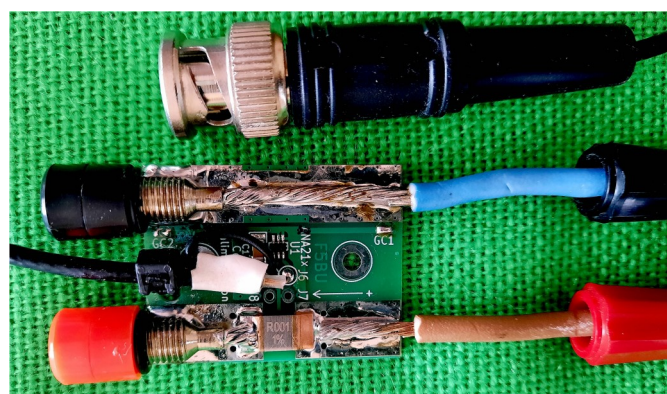


Fig.10 - Montage avec Rs=1 mΩ et un INA214 (PE=70A)

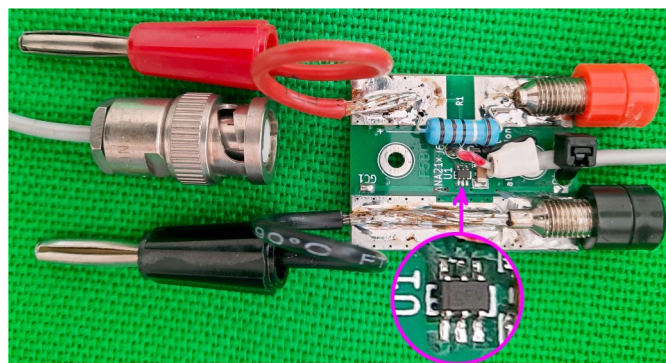


Fig.11 - Montage avec Rs= 0,1 Ω et INA214 (PE=1A)

100 mV), la courbe est très proche de la droite idéale sur plus de trois décades (il faut bien sûr que la tension de l'alimentation soit égale ou supérieure à 10 V pour pouvoir avoir 10 V en sortie). C'est à dire qu'il est, par exemple, possible

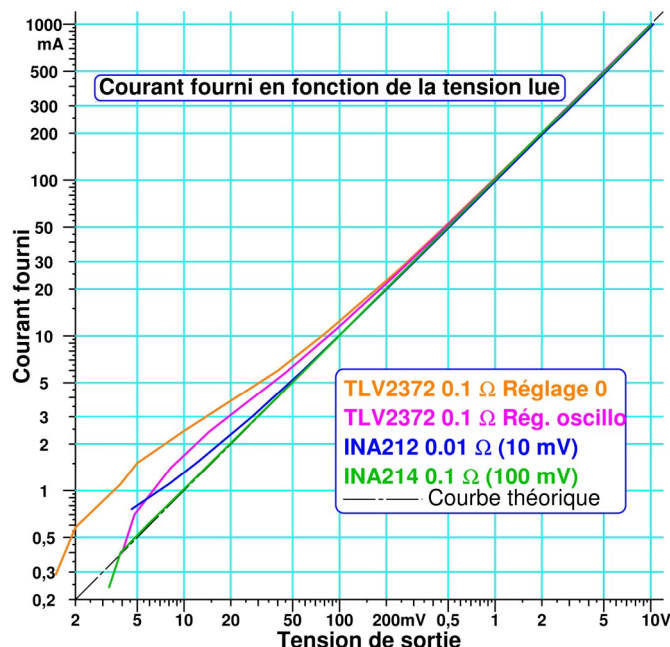


Fig.12 - Courant de sortie en fonction de la tension mesurée

d'effectuer directement des mesures entre 1 A et 1 mA avec une très bonne précision. Pour le montage avec un INA212 (gain de 1000) la courbe est raisonnablement proche de la droite idéale sur plus de 2 décades et ne demande qu'un Vd max de 10 mV. Qui dit mieux ?

Les courbes vertes sur les Fig.5 à 7 correspondent aux mesures avec un INA214.

La Fig.13 montre un exemple d'utilisation, et la Fig.14 la simplicité de mise en œuvre.

La Fig.15 donne le schéma d'un circuit imprimé pour une résistance de shunt extérieure au circuit, mais incluant les ponts diviseurs pour un galvanomètre.

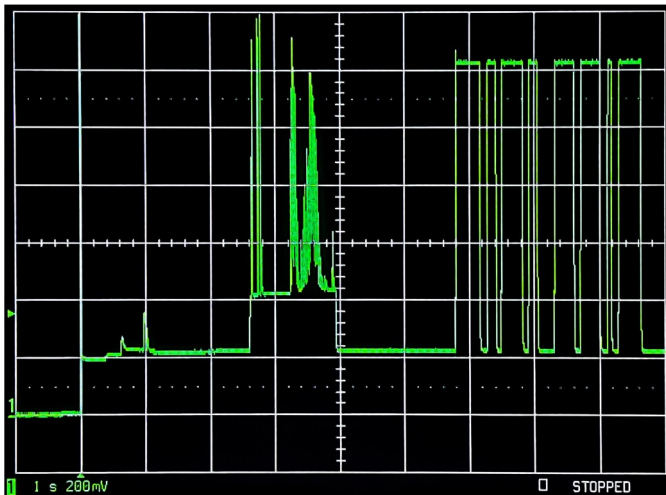


Fig. 13 - TS-2000 : mise sous tension, mot "essai" en SSB puis "CQ" en CW,  $P=50\text{ W}$  X : 1s/div, Y : 2A/div (mesure avec INA214,  $R_s=1\text{ m}\Omega$ )

### Conclusions

Moyennant un  $V_d$  max de 100 mV, les circuits INA214 permettent des mesures sur 3 décades avec une précision théorique de  $\pm 2\%$  (avec une résistance  $R_s$  à 1%) et en tout cas meilleure que  $\pm 5\%$  d'après mes mesures de calibration, elles mêmes entachées d'erreurs !

Toujours pour un  $V_d$  max de 100 mV, les montages avec des TLV2372 sont moins précis pour des courants faibles par rapport à la PE, mais tout à fait utilisables comme le montrent les mesures comparatives à l'oscilloscope, à condition de ne pas modifier la tension d'alimentation et d'être à une température relativement constante.

Enfin, pour des  $V_d$  max de seulement 10 mV, les circuits INA212 permettent des mesures meilleures que  $\pm 5\%$  sur plus de 2 décades d'après mes mesures.

### Remarques

- Pour des questions d'approvisionnement, seuls des INA212 et INA214 ont été testés pour des  $V_d$  max de 100 et 10 mV, mais une foule d'autres possibilités existe ...

- Après avoir testé des circuits INA21x, j'ai tout de même essayé de tester un montage avec un AOP à faible TO. Aussi, j'ai fait l'acquisition de quelques OPA2192, dont la TO typique est de  $\pm 5\ \mu\text{V}$ . Étonnamment, le remplacement du TLV2372 ne donne pas de bons résultats. Par contre l'utilisation d'un seul AOP avec un gain de 100 donne un résultat proche de celui du réglage 1, toutefois avec un petit peu moins de dynamique à cause d'une tension de sortie résiduelle d'une dizaine de mV.

### Avantages des INA21x

- Ils nécessitent juste un circuit, une résistance  $R_s$  et un condensateur.
- Aucun réglage n'est à effectuer, la précision des mesures dépend surtout de celle de  $R_s$ .

- Leur gain est précis à  $\pm 1\%$  ( $\pm 0,5\%$  selon le circuit).
- La tension d'offset est de  $\pm 35\ \mu\text{V}$ .
- Réjection de mode commun  $> 100\text{ dB}$ .
- Ils sont utilisables de 2,7 à 26 V.
- Ils présentent une très faible dérive en température.
- Leur consommation est de 0,1 mA.

### Inconvénients des INA21x

- Leur boîtier CMS SC70-6 avec contacts au pas de 0,65 mm.
- 6 circuits avec gains fixes non ajustables (50, 75, 100, 200, 500, 1000).
- En pratique, il faut trouver les bonnes valeurs pour les résistances  $R_s$  et bien les monter, car le gain n'est pas ajustable. Toutefois, on trouve relativement facilement des résistances de shunt d'une précision de 1%. Cela permet, théoriquement, de faire des mesures à  $\pm 2\%$  près avec les INA21x.

### Remarque

Surtout intéressé par les visualisations et mesures avec oscilloscope, et vu les avantages des montages avec des circuits spécifiques, j'ai choisi de me servir de trois montages couvrant une large gamme de courants :

- un montage avec un INA214 et une  $R_s$  de 1 m $\Omega$ , 5 W, générant une chute de tension max de 70 mV pour un courant max de 70 A, et cela avec une résolution meilleure que 100 mA ;

- un montage avec un INA214 et une  $R_s$  de 100 m $\Omega$ , générant une chute de tension max de 100 mV et permettant des mesures jusqu'à 1 A [7] avec une résolution meilleure que 1 mA ;

- un montage avec un INA214 et une  $R_s$  de 1  $\Omega$ , générant une chute de tension max de 100 mV et permettant des mesures jusqu'à 100 mA avec une résolution meilleure que 100  $\mu\text{A}$ .



Fig. 14 - Utilisation du montage montage INA214,  $R_s=1\text{ m}\Omega$  pour les mesures avec le TS-2000

### Composants

- TLV2372 PDIP : RS particulier, Farnell, Mouser, ...
- TL750L08 : à remplacer par une diode Zener (5,1 V) et une résistance R8 associée (47 k $\Omega$ ) ou mieux par une référence de tension (5 V),
- Résistance shunt : Farnell, Mouser, RS particulier, ...



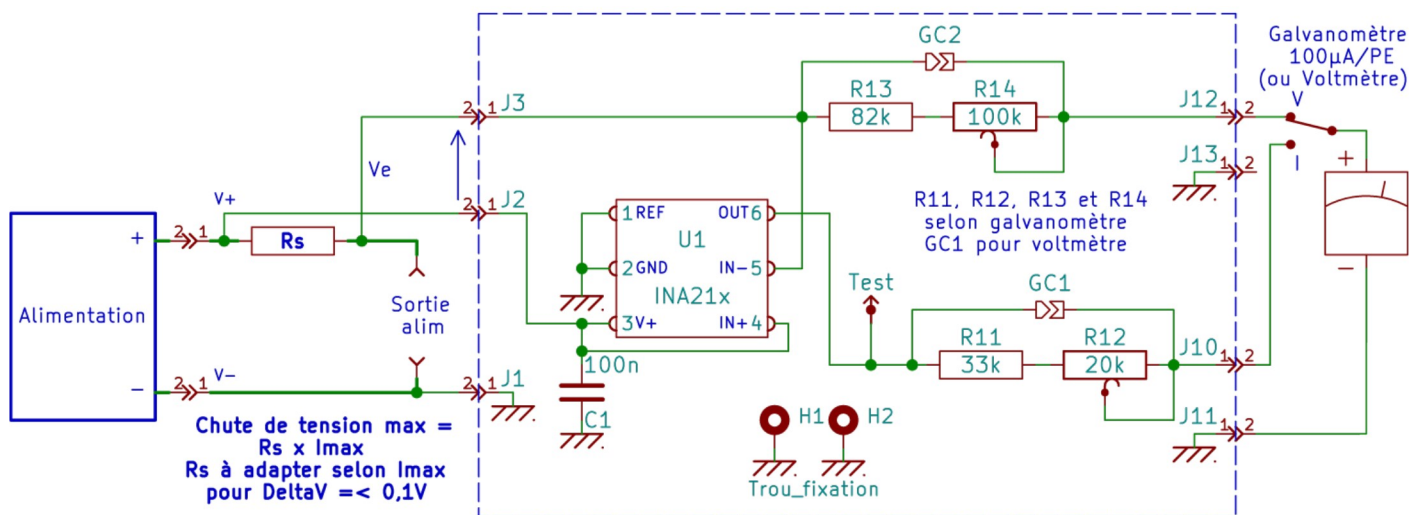


Fig.15 - Circuit pour INA21x avec  $R_s$  extérieur

- INA21x : Farnell, RS particulier, Mouser, DigiKey, ...

Pour ceux qui seraient intéressés par la réalisation d'un de ces montages, il me reste des circuits imprimés, et il est possible d'en faire refaire facilement si besoin ... Il me reste également quelques TLV2372, INA212, INA214, 1, 10 et 100 m $\Omega$ . Demandez par courriel pour plus de précisions.

### Remarques

- Le circuit imprimé pour TLV2372 est également utilisable pour des montages avec la résistance de shunt dans le moins de l'alimentation. Pour cela, il suffit de ne pas monter la résistance R3, de mettre une résistance de 10 k pour R4 et de court-circuiter R41 (on est ramené au montage de la Fig.1a). Les circuits intégrés U1 et U2 peuvent être soit des composants traversants PDIP et TO-92, soit des CMS SOIC. C6 et C7 sont prévues en CMS, mais des composants traversants de petite taille sont utilisables.

- Astuce : pour des utilisations avec oscilloscope, il est pratique d'effectuer la sortie du signal par un câble coaxial fin muni d'une BNC. Toutefois, comme les connecteurs BNC pour câble fin ne se trouvent plus facilement, il est possible d'utiliser un câble muni d'un connecteur RCA/Cinch et d'utiliser un adaptateur BNC-RCA/Cinch.

### Notes

[1] Abréviations utilisées

- AOP : Amplificateur OPérationnel
- CMS : Circuit Monté en Surface
- PE : Pleine Échelle
- TMC : Tension de mode commun = tension moyenne sur les entrées
- TO : Tension d'Offset
- TPE : Tension Pleine Échelle
- Vd : Tension aux bornes de  $R_s$

[2] Il est préférable d'insérer la résistance de shunt dans le plus de l'alimentation, pour qu'il n'y ait pas d'ambiguïté sur le potentiel de la masse. En effet, le moins des alimentations est souvent directement connecté à la masse et d'autres appareils peuvent être connectés à l'alimentation sans passer par la résistance de shunt.

[3] Pour diminuer la dérive en température, bien que le circuit imprimé n'est pas prévu pour, un deuxième montage a été réalisé en remplaçant : le régulateur de tension U2 par une référence de tension LT1236 5V ; C6 par 10  $\mu$ F pol. et R10 par 3,9 M $\Omega$ .

[4] Je connaissais seulement l'existence de circuits avec capteurs à effet Hall, utilisables uniquement pour des courants de dizaines d'ampères.

[5] Les mesures de courant ont été effectuées avec un multimètre ANENG AN870 sur le calibre A (résolution : 0,1 mA), les mesures de tensions de sortie avec un voltmètre AOIP MNK 191 sur le calibre 20 V (résolution : 0,1 mV).

[6] Pour les deux montages avec des INA21x, un petit ajustement des  $R_s$  a été effectué pour obtenir les réponses présentées. Pour l'INA214, la sensibilité au voisinage de 1 A était un peu faible. Le remplacement de  $R_s$  a amélioré le résultat. Pour l'INA212, la sensibilité était un peu grande, une résistance de 0,22  $\Omega$  a été mise en parallèle de  $R_s$ .

[7] En fait, le courant maximum mesurable dépend de la tension max de sortie possible qui est proche de celle de l'alimentation. Par exemple, si la tension d'alimentation est de 5 V, les courants max seront ceux donnés divisés par deux, si la tension est de 15 V, ce seront ceux donnés multipliés par 1,5.