

Alternateur, régulateur, batterie

Pour répondre rapidement à des questions sur le régulateur Rotax, voici rapide résumé des tests effectués sur l'ensemble régulateur/alternateur Rotax.

Le problème

Le régulateur Rotax/Ducati fourni avec les moteurs Rotax 91x fait preuve d'un taux de pannes alarmant sur les avions de construction amateur.

Dans le but de tirer au clair ces problèmes de fiabilité avant d'en installer un sur notre projet de kit quadriplace Dyn'Aéro MCR 4S , je suis parvenu à obtenir un alternateur Rotax complet, au cas où...

Les pièces dormaient dans mon garage en attendant une hypothétique série de tests, jusqu'à ce que je rencontre Jérôme Delamarre, un jeune professeur et chercheur en électricité au LEG de l'Institut National Poytechnique de Grenoble.

Brief description

Jérôme est un admirateur des MCR, qui a très rapidement proposé son aide pour tester l'alternateur et son régulateur. Jérôme a usiné un adaptateur pour monter l'alternateur sur une machines d'essai dans l'un des labos de ses étudiants.

Nous avons passé plusieurs weekends à faire des mesures.

Le régulateur

Entre temps, Dyn'Aéro me faisait parvenir deux régulateurs en panne. Je les ai démontés en retirant la mousse pour identifier les composants.

Jérôme en a étudié les principes de fonctionnement.

À l'époque (hiver 2003), nous avons eu quelques difficultés à trouver les spécifications des thyristors TPE154E SCRs. Jérôme a dû les passer au banc dans son laboratoire.

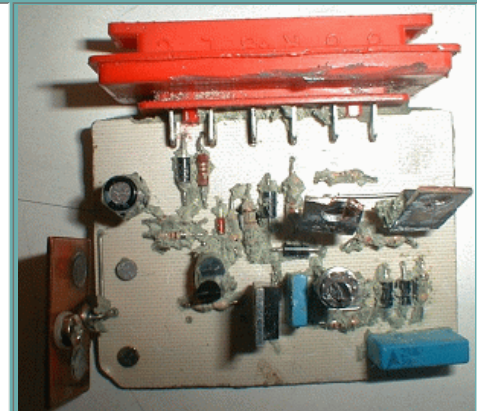
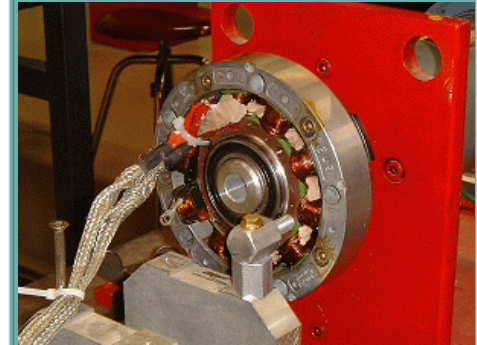
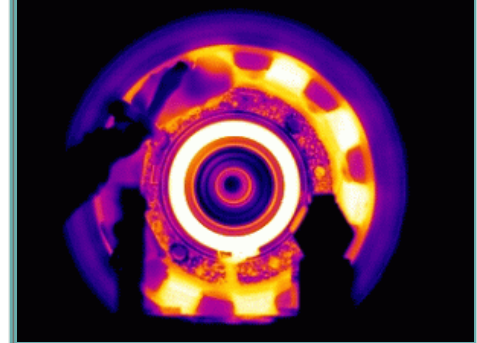
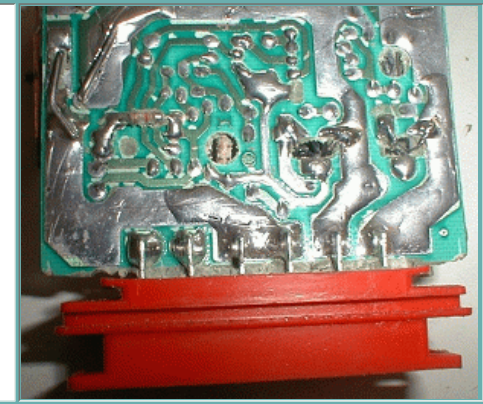


Schéma du régulateur

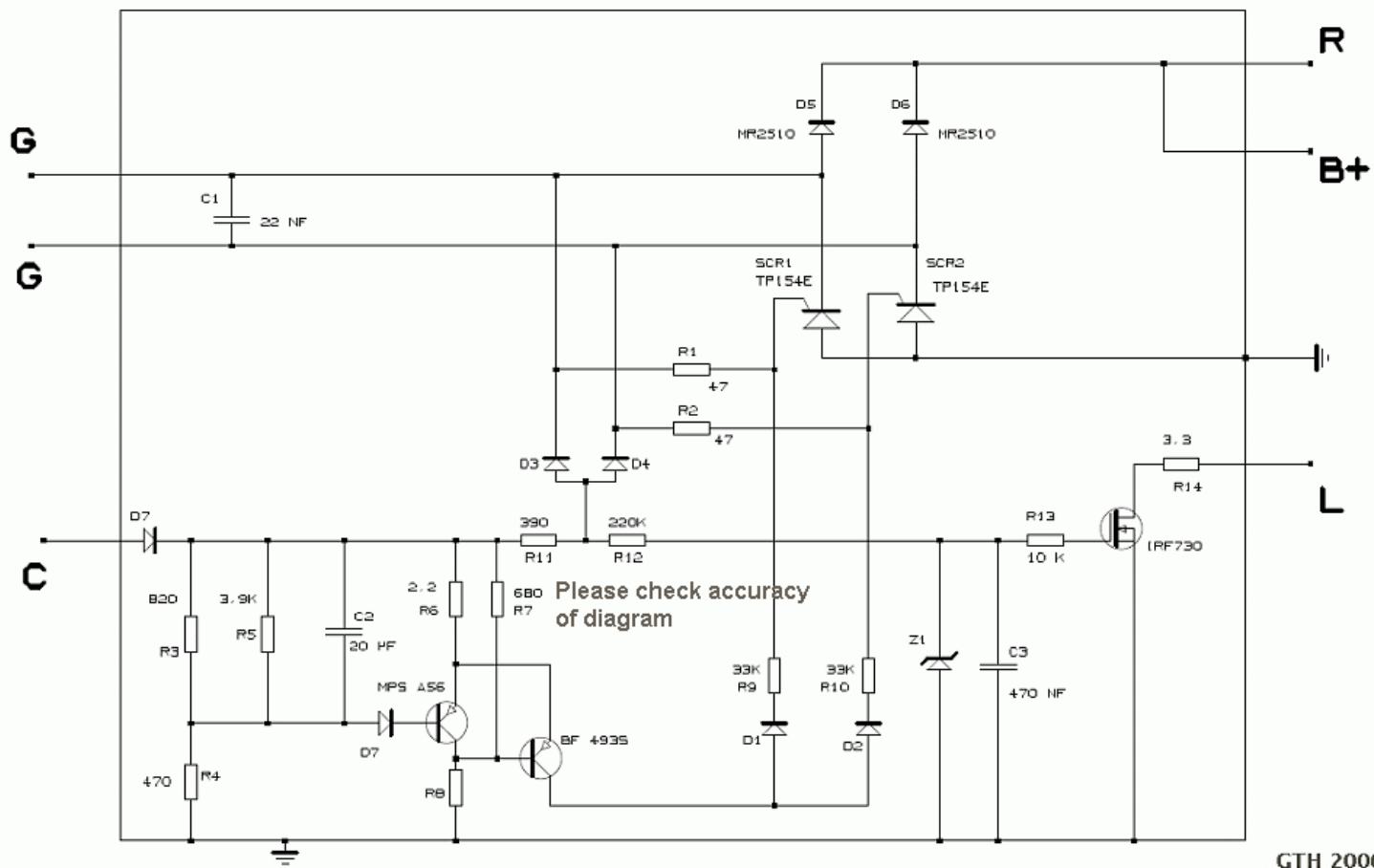
Voici le schéma du régulateur, redessiné d'après notre étude de 2003.

De nombreuses questions se sont élevées sur l'Internet, pour déterminer si le régulateur Rotax est du modèle shunt ou autre.

Le régulateur Rotax n'est pas du modèle shunt.

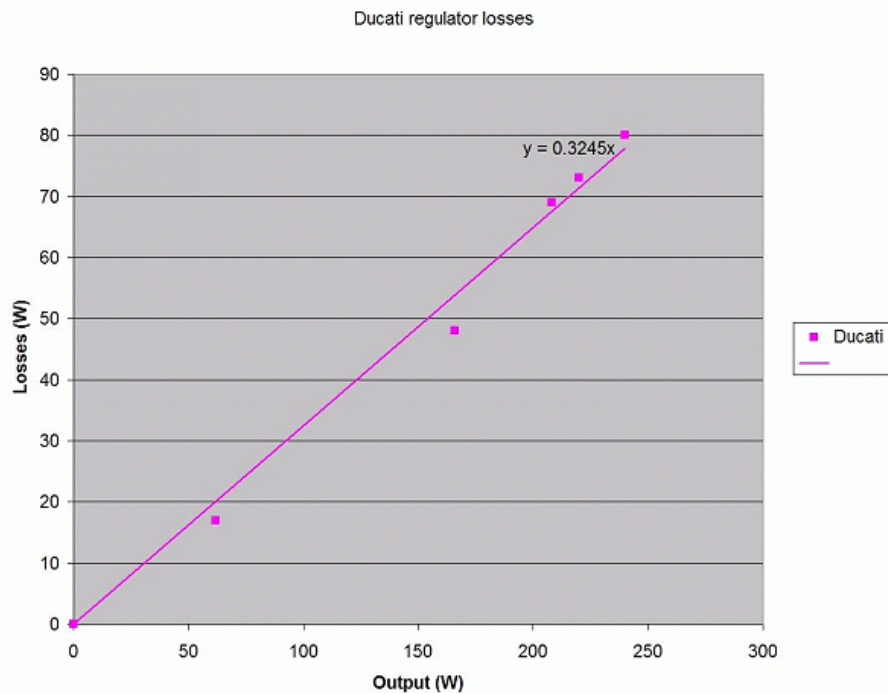


REGULATEUR ROTAX-DUCATI ENERGIA 12VDC



Pertes du régulateur

Les pertes du régulateur ont été mesurées, elles sont proportionnelles au débit, comme l'indique la courbe relevée par les étudiants de Jérôme



Mesures thermiques

Les étudiants ont poursuivi par une étude thermique.
Nous voyons ici la caméra thermique utilisée pour identifier les points chauds.

La documentation Rotax specifies an ambient temperature limit of 90°C. This seems doubtful.
At nominal output, ie at 240 W, the regulator dissipates 80 W (actually measured)

- La résistance thermique entre le radiateur du régulateur et l'atmosphère ambiante au niveau de la mer, est de 2°C/W.
- D'une façon simplifiée, on peut ajouter en série une résistance thermique de 0.3°C/W pour obtenir la température de jonction.
- La température de jonction ne doit pas dépasser 125°C.

Conclusion

Pour travailler à la puissance nominale, la température ambiante au niveau de la mer ne doit pas dépasser :

$$125 - 80 \times (2 + 0,3) = - 59^\circ\text{C}$$

L'utilisation à puissance nominale sans refroidissement supplémentaire ne semble pas réaliste.

Pourquoi zéro panne pour certains ?

Beaucoup de constructeurs amateurs peuvent n'avoir aucune panne

Il y a deux raisons :

- Beaucoup n'utilisent qu'à peine 10% de la puissance annoncée par Rotax.
- Il faut au régulateur 45 minutes pour atteindre sa température maximale (constante de temps de l'ordre de 15 minutes)

Refroidissement

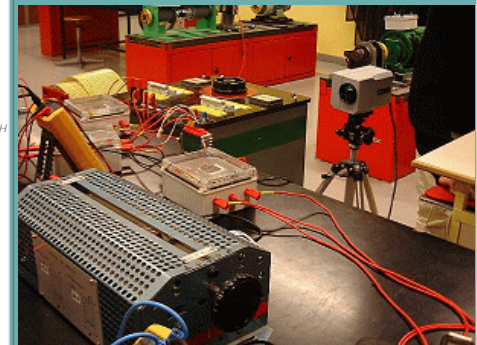


Photo GTH

Avec un ventilateur de PC, la résistance thermique du radiateur du régulateur tombe à 0,5°C/W. Au niveau de la mer et à la puissance nominale, la température ambiante doit rester au-dessous de :

$$125 - 80 \times (0,5 + 0,3) = + 61^{\circ}\text{C}$$

Beaucoup plus raisonnable.

Exemple des Rotax 912-914

A la lecture de plusieurs listes aéronautiques, certains semblent avoir quelques soucis avec leurs sources d'énergie de bord. On se rend compte qu'un grand nombre de régulateurs Ducati, montés sur des Rotax 912/914, sont partis en fumée sur nos avions.

Gilles participe à la construction d'un avion motorisé par un 914. Sur ce moteur, une panne électrique peut avoir des conséquences graves puisqu'il ne possède pas de pompe à essence mécanique. Disposant de moyens techniques adéquats, je lui ai donc proposé de regarder ce problème de régulateur de près.

J'ai rédigé ce texte afin que ce que nous avons compris puisse servir à d'autres constructeurs amateurs. Il servira aussi à mes élèves de Licence Professionnelle pour lequel ce système sera un prétexte à une étude thermique ainsi qu'à une étude bibliographique sur les alternateurs.

Les avions équipés d'un réseau de bord électrique possèdent deux sources d'énergie : la batterie et l'alternateur. Afin d'obtenir une tension constante après l'alternateur, on utilise un régulateur.

- **La batterie** : sert essentiellement au démarrage du moteur. La majeure partie du temps, elle est en charge. Sa qualité première ne réside pas dans sa capacité (Ampère*heure) mais dans le courant qu'elle est capable de fournir au démarrage. Temporairement, elle peut néanmoins prendre le relais de l'alternateur lorsque ce dernier ne peut pas fournir la puissance suffisante. Cela arrive à basse vitesse de rotation, en cas d'appel de courant transitoire important ou bien quand l'alternateur ou son régulateur a rendu l'âme. Dans ce cas, la durée de fonctionnement du réseau de bord dépendra à la fois de la consommation à bord et de la capacité de la batterie

- **La génératrice** : fournit toute l'énergie électrique de l'avion. Une partie de cette énergie est stockée dans la batterie (charge) tandis que la partie principale sert au réseau de bord. La génératrice doit donc être dimensionnée en fonction des besoins électriques. Lors d'une installation électrique dans un avion, la première tâche consiste donc à estimer la puissance électrique nécessaire à bord. Si la génératrice ne peut fournir la puissance nécessaire, la batterie prendra le relais... un moment. Une fois la batterie déchargée, vous ne serez plus en mesure d'assurer le fonctionnement normal de votre réseau de bord.
- **Le régulateur** : la génératrice tire son énergie du moteur de l'avion. Elle va donc fonctionner à des vitesses de rotation différentes et fournir une tension de sortie variable. Afin d'assurer une tension constante au réseau de bord, il est donc nécessaire de lui adjoindre un régulateur (ainsi qu'un redresseur dans la plupart des cas).

I Les génératrices

Elles sont de plusieurs types, avec chacune leurs avantages et leurs inconvénients :

- *Les génératrices à courant continu* :

Elles fournissent directement une tension continue. On ne les trouve plus sur les voitures depuis bien longtemps déjà...

- A courant d'excitation :
 - Inconvénient : nécessité de fournir un courant d'excitation.
 - Avantage : possibilité de régler la tension de sortie.
- A aimant :
 - Inconvénient : impossible de régler la tension de sortie.
 - Avantage : Pas besoin de courant d'excitation.
 - Performances supérieures.



Bien que très simples d'utilisation, ces machines sont un peu moins performantes que les alternateurs. Elles ne sont presque plus utilisées dans les conceptions actuelles à cause de leur système de balais/collecteur. Ce système qui les rend si simple d'utilisation, pose des problèmes d'usure.

- *Les alternateurs synchrones :*

Ces machines sont utilisées pour produire la quasi-totalité de l'énergie électrique que nous consommons, que cela soit pour le réseau EDF, celui de nos voitures ou celui des avions de ligne (les prochains très gros porteurs auront un réseau électrique avoisinant le Méga Watt). Comme pour les génératrices à courant continu, les alternateurs peuvent être à aimants ou à excitation avec les mêmes avantages et les mêmes inconvénients. Cependant, **lorsqu'il est à aimant, l'alternateur permet d'éviter tous les contacts tournants. Il est inusable !**

Par contre, contrairement à la génératrice à courant continu, sa tension de sortie est alternative. En plus d'être régulée, cette dernière doit aussi être redressée. Si l'alternateur est monophasé, il ne peut pas délivrer de puissance continue. Même s'il tourne à une vitesse constante, il génère une tension alternative. Cette tension évolue donc d'une tension positive à une tension négative en passant par une tension nulle. Quel que soit le courant, quand la tension est nulle, la puissance instantanée fournie est nulle aussi. On peut faire une analogie avec un vélo. La puissance maximum est fournie quand les pédales sont horizontales. Elle est nulle quand elles sont verticales (essayez de démarrer avec les pédales verticales ;-). Par la suite, le vélo avance à vitesse à peu près constante grâce au filtrage apporté par l'inertie. Dans le cas d'un alternateur monophasé, on utilise un condensateur ou une inductance pour lisser cette ondulation de puissance. Pour éviter ce problème de puissance fluctuante, le triphasé est utilisé sur la plupart des alternateurs. Il est ainsi possible de produire de l'électricité avec une puissance constante (cas des alternateurs de voiture actuels).

L'alternateur Ducati Energia pour Rotax 912/914

L'alternateur Ducati Energia monté sur les Rotax est un alternateur monophasé à aimants. Il faut donc à la fois **redresser sa tension alternative pour la transformer en tension continue, la **lisser** pour obtenir une tension constante, et la **réguler** autour de 14 Volts.**

Pour cela, avant toutes choses, il est nécessaire de connaître les caractéristiques de l'alternateur. La plupart de ces caractéristiques étant introuvables dans la documentation du constructeur, nous les avons mesurées.

Données du constructeur :

Puissance : 250W (258W/12,6V/20,5A en sortie de régulateur à 5800 tr/min)

Vitesse de rotation : 1000 à 6000 tr/min

Mesures :

Monophasé sans point milieu ni connexion à la masse

Poids : 2,3 kg (stator 700 g, rotor 1,6 kg)

Nombre de paires de pôles : 5

Résistance statorique : 0,12 Ohm (à 20°C)

Inductance : 750 μ H

Force électromotrice : 1/60 V/(tr/min) crête

1/120 V/(tr/min) efficace

Courant de court circuit max : 21 A efficaces à 150 H

- Fréquence de sortie : 83 Hz à 500 Hz
- Tension de sortie : 16 V à 100 V crête



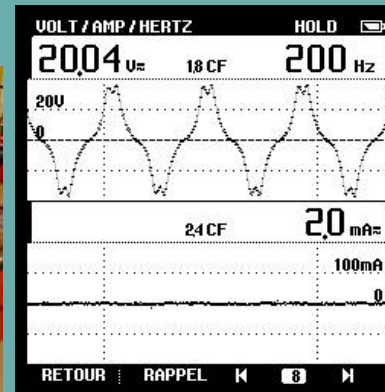
Banc de test :

L'alternateur est monté sur un banc qui permet la rotation du rotor (à l'extérieur) tout en immobilisant le stator (à l'intérieur). Une protection a été montée sur le banc pour se prémunir d'une éventuelle satellisation de l'alternateur. ;-)



Mesures :

Par la suite, l'alternateur est entraîné par un moteur à courant continu. On peut voir la tension de sortie à vide (sans débiter de courant) de l'alternateur sur l'image ci-dessous. Pas bien beau...



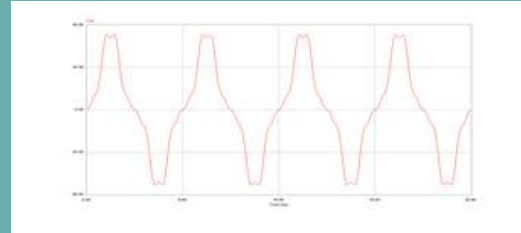
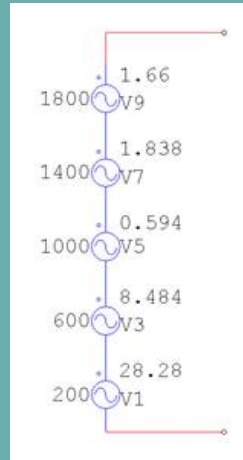
Tension à vide aux bornes de l'alternateur (2400 tr/min)

Afin de pouvoir simuler l'alternateur, une analyse spectrale nous a permis d'obtenir une décomposition harmonique de la tension à vide. Pour utiliser des termes un peu moins techniques, cela veut dire que l'on va pouvoir retracer cette courbe en superposant plusieurs sinusoïdes de fréquences différentes.

A 102 Hz, pour une tension efficace de 10,56 V, on obtient la décomposition harmonique en valeur efficace suivante :

Harmonique 1 :	10 V	100 Hz	0°
Harmonique 3 :	3V	300 Hz	180°
Harmonique 5 :	0,21 V	500 Hz	0°
Harmonique 7 :	0,65 V	700 Hz	0°

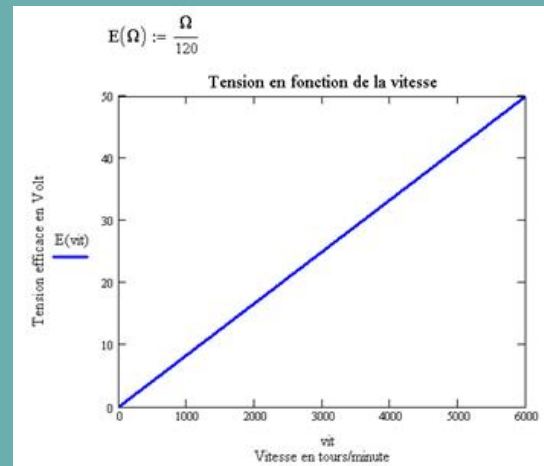
On considère ensuite que la tension à vide est proportionnelle à la fréquence. La simulation de la tension à vide à 200 Hz à partir des valeurs précédentes donne un résultat très proche de la réalité (comparer avec la courbe précédente) :



La tension à vide est modélisée par la mise en série de générateurs sinusoïdaux. A gauche de chaque générateur, la fréquence. A droite de chaque générateur, la valeur crête de la sinusoïde.

En fonctionnement normal, les composants du régulateur seront donc soumis par l'alternateur à une tension de 100 V à 6000 tr/min. Cette valeur doit non seulement servir à dimensionner les composants électroniques du régulateur mais permet de rappeler qu'une protection contre les surtensions est une sécurité pouvant être utile. En cas de défaillance du régulateur, cette tension pourrait engendrer quelques dégâts si elle se retrouvait sur le réseau de bord...

La tension efficace à vide en fonction de la fréquence peut alors être tracée aisément :



Mesures de l'impédance de l'alternateur :

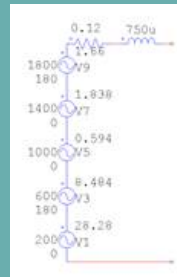
L'alternateur possède une impédance interne. Elle peut être modélisée par une résistance en série avec une inductance.

La résistance a été mesurée par une méthode voltampèremétrique en alimentant le stator sous une tension continue (réduite) : 0,12 Ohm à 20° C.

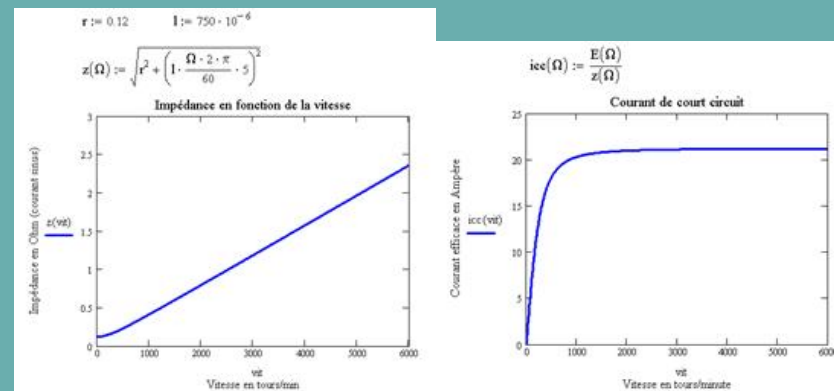
L'inductance a été mesurée par différentes méthodes :

- Au pont d'impédance : 200 μ H
- En alimentant le stator sous tension réduite : 400 μ H
- En mesurant le courant de court circuit : 750 μ H

La première mesure a été réalisée avec un courant de quelques mA, la seconde avec un courant de quelques ampères et la dernière avec un courant de 21 A. Ces différences d'inductances sont certainement dues à la saturation du circuit magnétique statorique par les aimants du rotor. Lorsque l'alternateur produit du courant, le champ créé par le bobinage statorique s'oppose au champ magnétique du rotor et réduit la saturation. Comme nous le verrons par la suite, le courant instantané débité par la génératrice est important. Nous retiendrons donc 750 μ H pour l'inductance. Le modèle électrique complet de l'alternateur est donc le suivant (donné à 200 Hz, soit 2400 tr/min) :



Il est alors possible de tracer ses caractéristiques d'impédance et de court circuit :

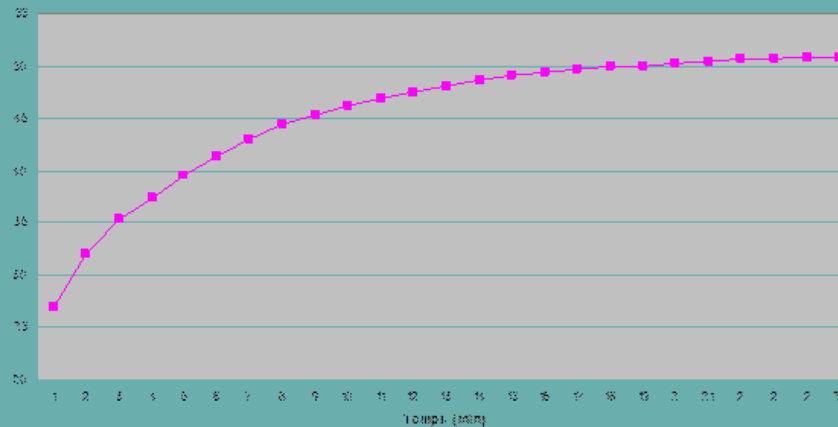


Comme le montrent ces courbes, l'influence de la résistance est négligeable au-dessus de 1000 tr/min. C'est donc l'inductance qui va limiter le courant de l'alternateur. L'inductance a une impédance qui est proportionnelle à la fréquence. La tension à vide de l'alternateur est elle aussi proportionnelle à la fréquence. Le courant de court-circuit est donc constant quel que soit la vitesse, dès que la résistance est négligeable devant l'inductance. Nous avons mesuré un **courant de court-circuit de 21 A**.

Protection de l'alternateur :

L'alternateur peut-il supporter ce courant ou doit-il être protégé contre les surintensités ? Pour répondre à cette question, nous l'avons fait fonctionner en court-circuit équipé d'une sonde de température. La sonde de température est placée à la surface du bobinage statorique. Elle permet non seulement de relever la température, mais aussi de s'assurer que nous restons dans un domaine de fonctionnement sans danger pour le bobinage.

Température pour 20 A csc



Lors de cet essai en court circuit, on note une élévation de température de 30° en surface du bobinage. Cette température se stabilise après 25 min de fonctionnement. Après l'arrêt du banc, la température en surface s'est élevée de 17° supplémentaire en 45 secondes. Cette élévation de température provient de la chaleur emmagasinée au centre du bobinage. A l'arrêt, le flux d'air provoqué par le rotor disparaît. La surface du bobinage n'est plus refroidie par convection forcée et la température extérieure du bobinage devient sensiblement égale à sa température intérieure. Dans nos conditions d'essai, il est donc possible d'estimer à 50°C, l'élévation de température du stator en court-circuit. En conditions réelles de fonctionnement, en supposant une température ambiante de 80°C et en gardant les mêmes hypothèses, le bobinage fonctionnerait alors autour de 130°C. Un isolant de bobinage bas de gamme supporte 150°C sans problème... Nous pouvons donc dormir tranquille sachant qu'à chaque fois, les hypothèses prises sont très défavorables. La chaleur sera mieux évacuée par conduction sur le carter du ROTAX que par le roulement de notre banc d'essai, l'air ambiant a certainement une température inférieure à 80°C (mais la chute de pression avec l'altitude a un effet défavorable sur le refroidissement), et l'isolant du bobinage n'est pas forcément de médiocre qualité.

L'alternateur est donc protégé naturellement par son courant de court-circuit et ses caractéristiques thermiques. La seule précaution à prendre est l'utilisation de câbles dimensionnés pour passer 20 A entre l'alternateur et le régulateur.

II La batterie

Le régulateur va charger la batterie pendant 99% du temps de fonctionnement de l'avion. Cette charge doit donc être étudiée avec un minimum d'attention. Une charge correcte permettra d'assurer le démarrage lors du prochain vol. Elle permettra aussi de ne pas trop écourter la vie de la batterie.

Nous avons utilisé une SBS 8 de Hawker Energy (12 V, 455 A en court-circuit, 7.4 A.h, 2.8 kg, www.hawker.co.uk).



Précautions d'utilisation :

En se référant à la documentation de Hawker, il faut retenir quelques points afin d'utiliser cette batterie dans les meilleures conditions :

- *La tension de charge :*

La SBS 8 peut être utilisée en fonctionnement continu ou intermittent. Sa charge doit être différente suivant les cas. Dans le cas d'une batterie maintenue en charge de manière continue (cas des onduleurs de secours), Hawker préconise une tension de 2,27 V par éléments. Pour une SBS 8 de 6 éléments, cela correspond à une tension de 13,6 V. C'est cette tension qu'il faut appliquer lorsque l'on souhaite garder sa batterie en charge grâce à une prise de park ou un panneau solaire. Il n'est peut être pas nécessaire d'aller si loin...

Le fonctionnement standard correspond donc au fonctionnement intermittent. Hawker préconise alors jusqu'à 14,4 V de tension de charge. Dans ce cas, la batterie chauffe un peu pour des fonctionnements supérieurs à 2 heures et son vieillissement est alors accéléré. Un compromis doit être envisagé entre une tension de charge faible qui ne permet pas de recharger la batterie pendant le vol et une tension plus élevée, qui assurera la recharge mais accélérera le vieillissement. Sachant qu'une batterie bien chargée :

- vieillit beaucoup mieux qu'une batterie déchargée. Une batterie déchargée se dégrade rapidement à cause de réactions internes favorisées par une tension de cellule faible. Une batterie qui aura été stockée déchargée a toutes les chances de finir à la benne (recyclable bien sur ;-)).
- facilite grandement les démarrages.
- ne nécessite pas d'être démontée pour cause de recharge.

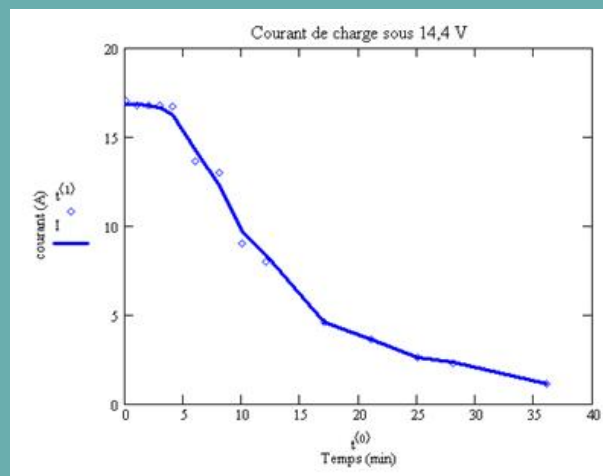
J'opterais pour une tension de charge du régulateur proche des 14,4 (14,2 ou 14,3 V).

- *L'ondulation de tension :*

Afin d'éviter un vieillissement prématuré, Hawker préconise une ondulation de tension RMS du chargeur inférieure à 1% (batterie non connectée). Cette recommandation est importante en cas de fonctionnement standard pour lequel cette batterie a une durée de vie de 15 ans. Dans notre cas, en fonctionnement intermittent, cette recommandation n'est pas à suivre à la lettre car quoi qu'il arrive, la batterie sera soumise à des contraintes plus importantes. Elle sera donc remplacée bien avant son 15^{ème} anniversaire ! Cependant, dans la mesure du possible, autant ne pas trop la brutaliser et s'arranger pour avoir une ondulation la plus faible possible.

Courant absorbé après une décharge partielle :

La batterie a été déchargée à 5 A pendant 45 min. Nous avons arrêté la décharge lorsque la tension a atteint 12 V. La batterie est alors dans un état de décharge partiel mais pas complet. Nous lui avons ensuite fait subir une charge sous une tension comprise entre 14,3 et 14,4 V. La courbe de charge suivante a été obtenue :



Pendant 5 minutes, notre batterie partiellement déchargée a absorbé un courant de 17 A. Ce fonctionnement est tout à fait normal.

Remarques :

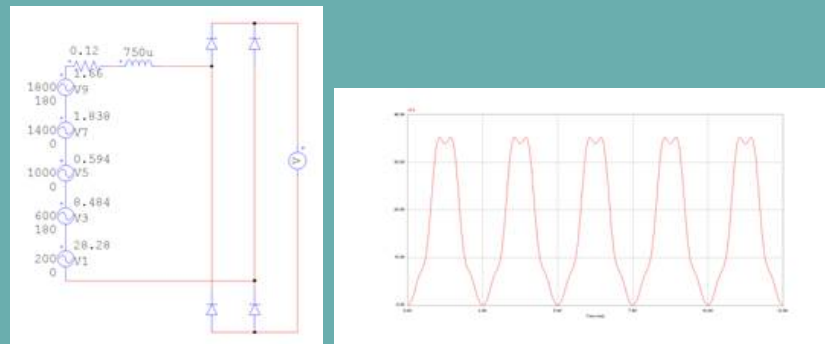
- La recharge de la batterie n'affectera pas le fonctionnement du réseau de bord. En effet, lorsque que le courant maximum sera atteint, la tension de l'alternateur chutera. Le courant absorbé par la batterie sera alors fortement réduit, permettant l'alimentation du reste du réseau de bord. Sachant que sous 12 V, le courant absorbé par notre batterie aurait été nul, nous sommes sûrs que le réseau aurait fonctionné entre une tension comprise entre 12 et 14,4 V quoi qu'il arrive.
- Le courant de charge dépend fortement de la tension appliquée à la batterie. Un régulateur un peu « faiblard » entraînera un courant de charge plus faible qu'un régulateur bien dimensionné.

III Le régulateur

Le principe :

Le terme de régulateur est impropre car une fonction triple doit être réalisée pour pouvoir utiliser l'énergie de l'alternateur Ducati Energia : redressement, filtrage et régulation.

- Le redressement peut être obtenu par un simple pont de diode :

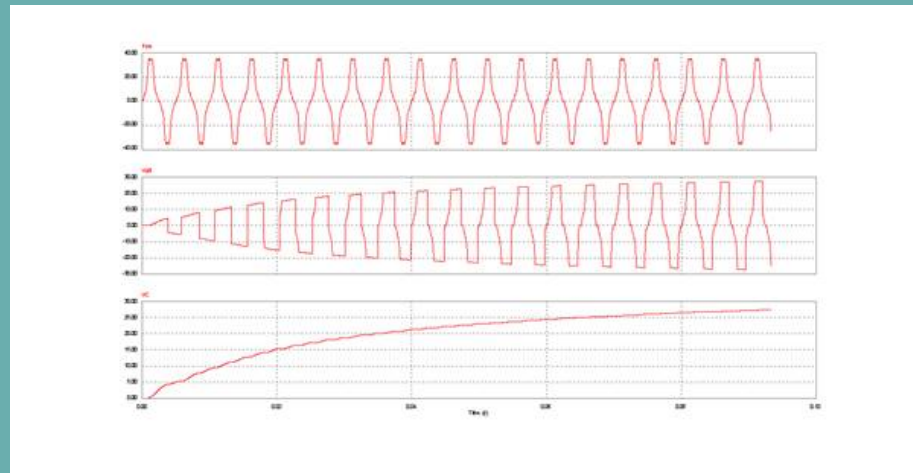
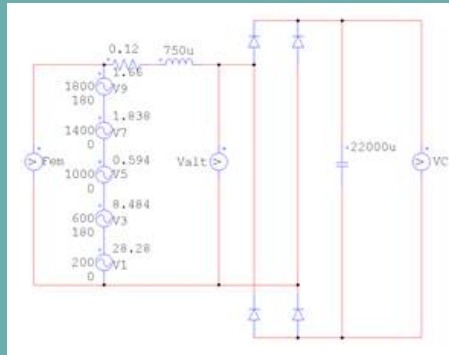


Tension à vide après redressement (2400 tr/min)

Inutile de dire qu'un peu de filtrage ne nuirait pas...

- Filtrage

Deux composants peuvent être utilisés pour filtrer : l'inductance et la capacité. Afin de respecter les règles de l'art, c'est une capacité qui doit être utilisée dans notre cas :

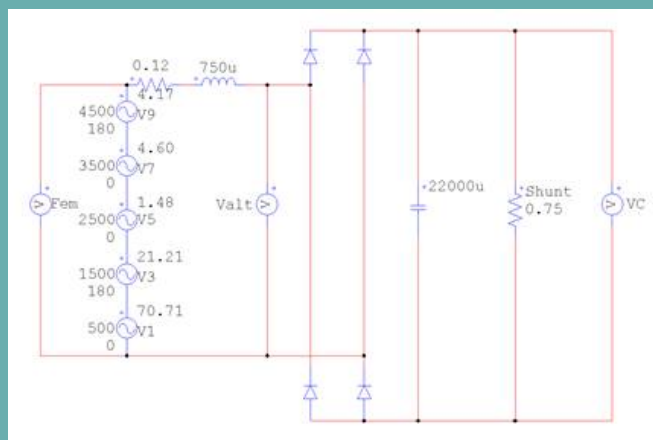


- La première courbe représente la tension que l'alternateur fournirait à vide.
- La seconde courbe représente la tension de sortie de l'alternateur. Quand les diodes conduisent, cette tension est égale à celle du condensateur de filtrage.
- La troisième courbe représente la tension de sortie après filtrage. On observe un régime transitoire qui correspond à la charge de la capacité. Sans charge, cette tension tend vers la tension crête de l'alternateur (un peu plus de 30 V dans ce cas et 100 V à la vitesse maximum).

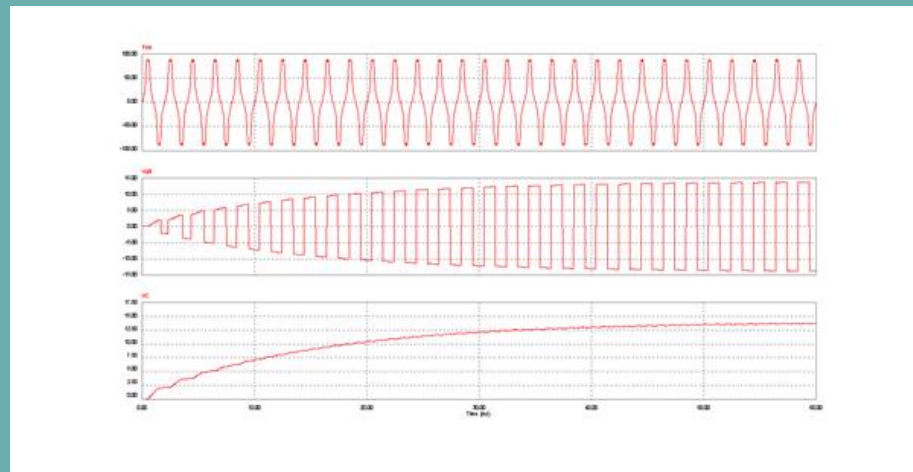
- Nécessité de réguler !
- Régulation

Dès que l'on parle régulation, il existe toujours une personne qui désire savoir s'il s'agit d'une régulation shunt ou série. Alors régulateur shunt ou série ???

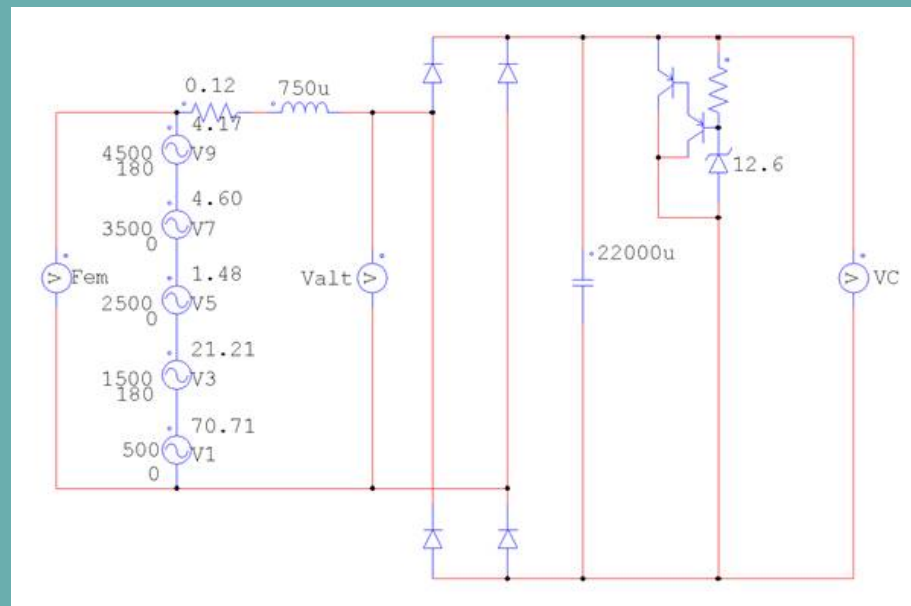
Tournons à 6000 tr/min et mettons un shunt !



Montage shunt



C'est simple et ça marche ! En choisissant le bon shunt, la tension est régulée à 14 V. Bien évidemment, en réalité, la résistance serait remplacée par un montage à transistor permettant d'assurer une tension constante lorsque la vitesse ou la charge varie :



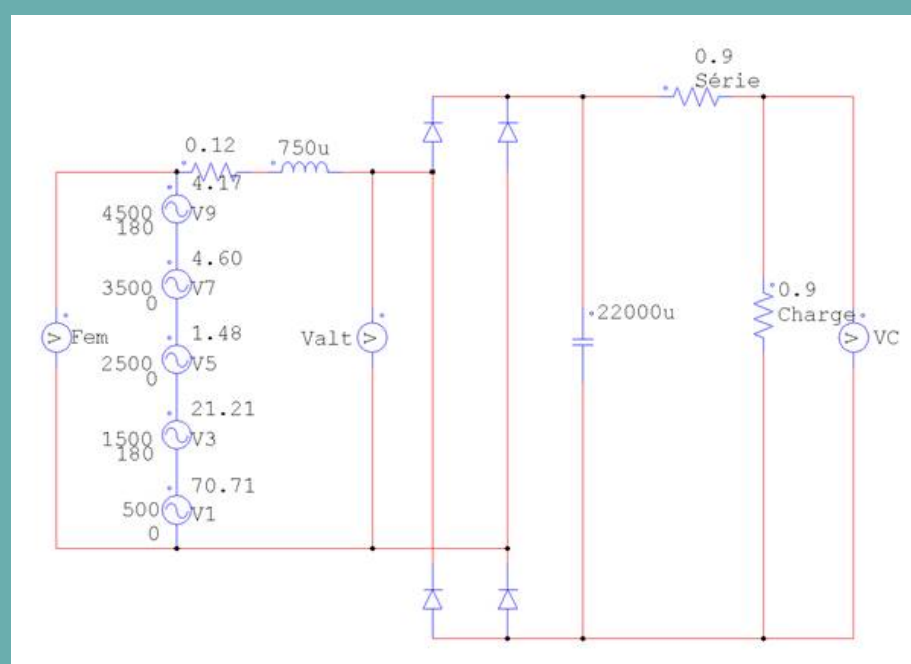
Montage de type shunt à transistor

Cela reste simple !

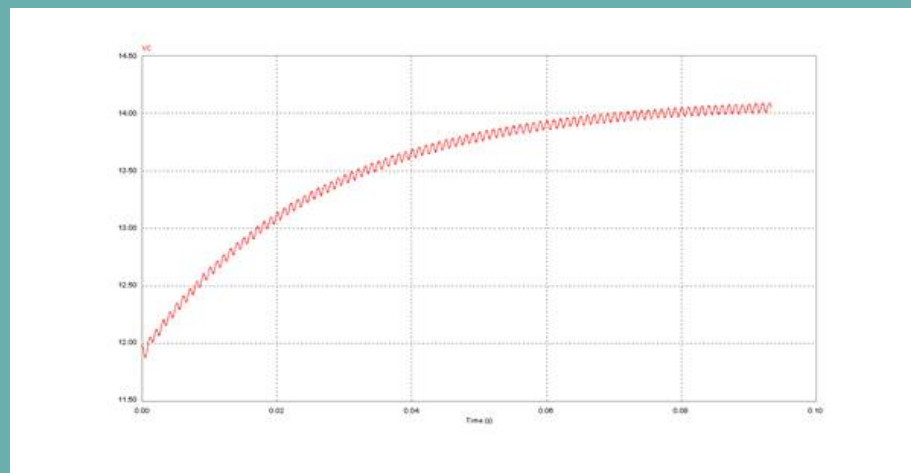
Oui mais... Calculons la puissance dissipée dans le shunt à vide : $14^2/0,75 = 260 \text{ W} !!!$

De quoi faire cuire un œuf rapidement !

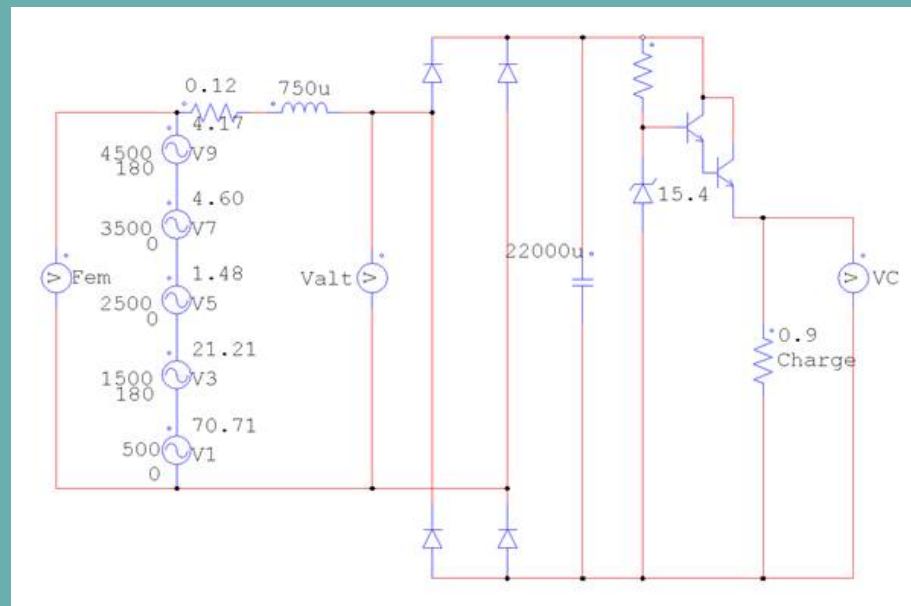
Alors essayons de mettre la résistance en série et chargeons le montage. Cette fois, la résistance série dissipe le plus de puissance quand elle est égale à la résistance équivalente à la charge. Le cas le plus défavorable est trouvé quand la résistance série est égale à 0,9 Ohm :



Régulation série



Là encore, la résistance peut être remplacée par un montage à transistor :



Montage type série à transistor

La **puissance dissipée dans le montage série** est égale dans ce cas à la puissance dans la charge : $14^2/0.9 = 220 \text{ W}$. Cela reste encore énorme. Pour vous en convaincre, allez dans une salle de gym, montez sur un vélo et affichez 220 W. Pas sûr que vous teniez 30 secondes !

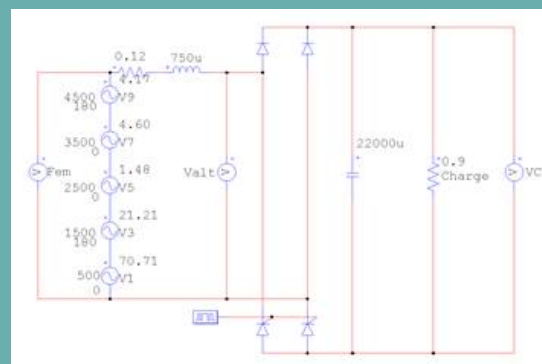
Les montages shunt et série sont hérités d'un temps ancien où l'électronique de puissance n'existait pas. De nos jours, sauf pour des besoins particuliers, **on évite d'utiliser des régulateurs shunt ou série pour gérer de la puissance !**

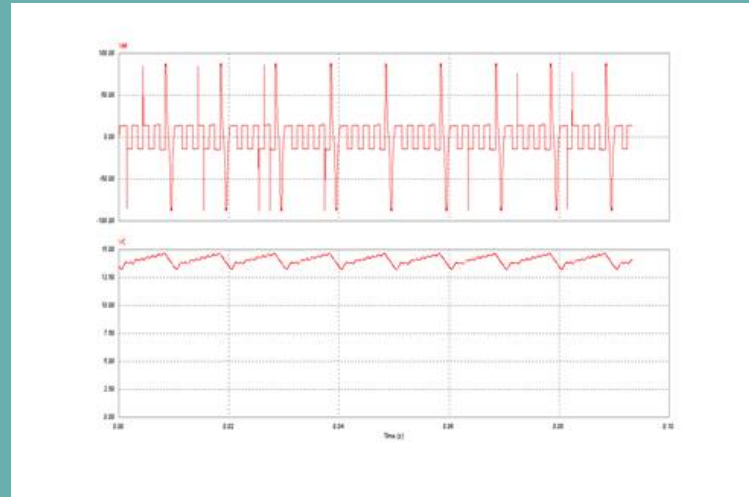
Redressement commandé :

Deux diodes des montages précédents sont remplacées par des thyristors. Pour faire simple, les thyristors sont des diodes dont la mise en conduction est déclenchée. Tout autre interrupteur électronique pourrait être utilisé (transistor bipolaire, mosfet, IGBT...) mais pour ce genre d'application, leur utilisation est délicate. En effet, l'impédance de l'alternateur est fortement inductive et l'ouverture commandée de l'un de ces interrupteurs lors de sa conduction engendrerait des surtensions néfastes (principe de la bobine d'allumage d'une bougie). Avec le thyristor, ce problème n'existe pas puisque seule sa fermeture peut être commandée. Son ouverture se fait naturellement lorsque le courant s'annule.

- Commande par train d'onde :

La méthode la plus simple consiste à ouvrir le robinet en grand puis à le fermer : les thyristors sont commandés à l'ouverture sur quelques périodes afin d'atteindre la tension voulue, puis ne sont plus commandés. La tension chute... et les thyristors sont commandés à nouveau. Pour poursuivre avec la métaphore du robinet, il se produit alors de jolis coups de bélier dans les canalisations !





Commande par train d'onde

Cette méthode est simple à mettre en œuvre mais peu recommandée. Le régulateur fonctionne par à coup. Ce fonctionnement n'a pas que des avantages :

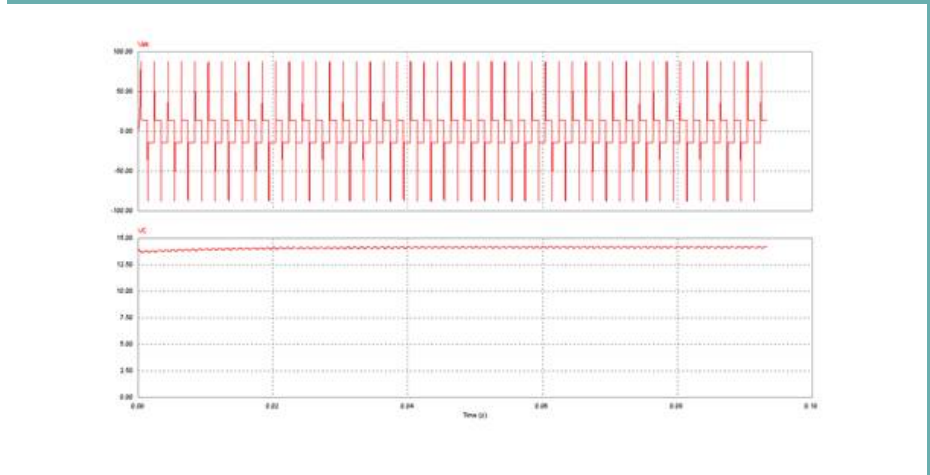
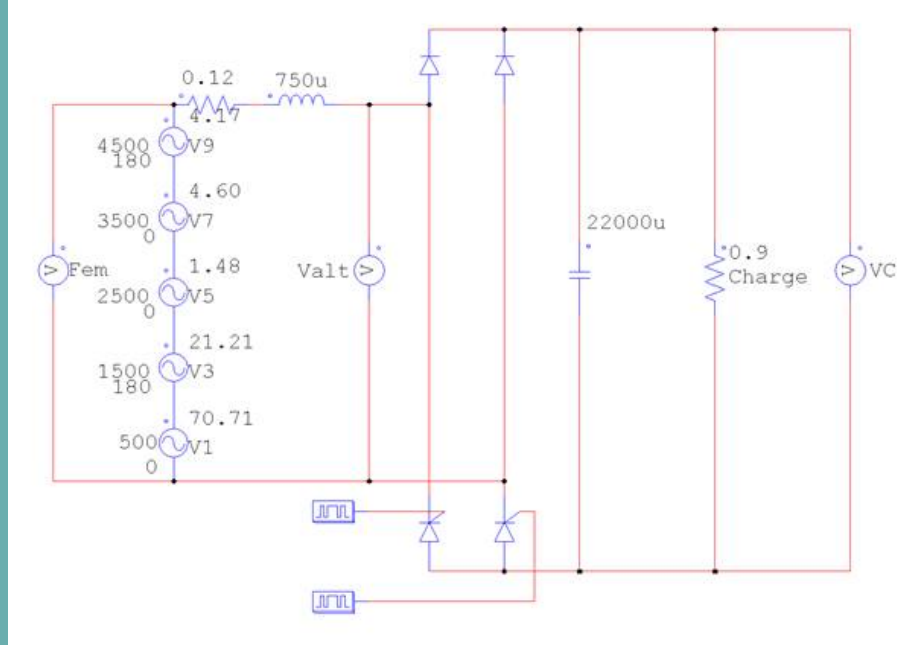
Plutôt que de fournir du courant régulièrement, l'alternateur le fournit par salve. Pour une même puissance moyenne fournie, il aura plus de pertes à dissiper ! Il est possible de comparer ce fonctionnement à la consommation d'une voiture roulant sur l'autoroute. Pour rouler à 130 de moyenne, il est possible de rouler à vitesse constante ou d'accélérer et décélérer en permanence. En utilisant la seconde méthode, la consommation s'en ressent...

De plus, ces à coups électriques se traduisent mécaniquement par des à coups mécaniques. Sur notre banc d'essai, l'entraînement, réalisé par un moteur électrique, est relativement silencieux et exempt de vibrations. La connexion d'un régulateur de ce type est impressionnante par les vibrations engendrées.

Coté charge, l'effet est encore plus gênant. La puissance étant transmise par salve, les ondulations de tension sont plus importantes. Cela peut avoir des répercussions sur tous les systèmes alimentés et les instruments mais c'est la batterie qui va souffrir le plus. Afin d'éviter un vieillissement prématuré, Hawker préconise une ondulation de tension RMS inférieure à 1% (batterie non connectée)...

- Commande par retard à l'amorçage :

Plutôt que d'ouvrir le robinet par à coups, il vaut mieux l'ouvrir partiellement. Pour cela, on retarde l'amorçage des thyristors par rapport à l'amorçage naturel qu'aurait eu une diode.



Commande par retard à l'amorçage

Seule la commande des thyristors a été modifiée depuis la version précédente. Le résultat obtenu sur l'ondulation de la tension de sortie se passe de commentaire.

Les contraintes :

Les contraintes sont de deux types :

- Les contraintes en tension :

Elles peuvent entraîner des dégâts par « claquage ». Nous avons vu que l'alternateur peut générer une tension maximum de 100 V. Cette tension pourrait être très supérieur en cas d'ouverture du circuit inductif de l'alternateur.

- Les contraintes en courant :

Le courant entraîne des pertes par effet Joule. Plus le courant est important et plus les pertes et la température sont importantes. A terme, une température élevée peut finir par détruire les composants. Cette destruction peut intervenir après un seul dépassement important de la température limite ou après avoir atteint plusieurs fois une température très élevée, mais non destructrice.

Commençons par faire le bilan électrique d'un avion bien équipé en systèmes électriques :

Servitude	VFR jour	Roulage	Déco/montée initiale	Approche	Transitoires	Nuit	Alt out
Contacteur Batt 1	0,14	0,14	0,14	0,14		0,14	X
Contacteur Batt 2	0,14	0,14	0,14	0,14		0,75	X
TCU	0,3	0,3	0,3	0,3		0,3	0,3
Main fuel pump	2,2	2,2	2,2	2,2		2,2	2,2
Aux fuel pump			2,2	2,2			
Feux de nav						1	
Strobe	3	3	3	3		3	X
GPS	0,5	0,5	0,5	0,5		0,5	0,5
VHF	0,1	0,1	0,1	0,1		0,1	0,1

XPDR	0,5	0,5	0,5	0,5		0,6	0,5
Horizon	0,75	0,75	0,75	0,75		0,75	0,8
TC	0,75	0,75	0,75	0,75		0,75	X
IB moteur	0,1	0,1	0,1	0,1			X
Fuel flow	0,2	0,2	0,2	0,2		0,2	X
Jauges	0,4	0,4	0,4	0,4		0,4	X
Montre	0,0023	0,0023	0,002	0,0023		0,0023	0,0023
ABMM	0,015	0,015	0,015	0,015		0,015	X
LVW	0,01	0,01	0,01	0,01		0,01	X
Voltmètre	0,1	0,1	0,1	0,1		0,1	X
Indicateur trim	0,1	0,1	0,1	0,1		0,1	X
Eclairage indiv IB	0	0	0	0		0,12	X
Phare 33 W			3	3			
Intercom	0,2	0,2	0,2	0,2		0,2	
Trim profondeur					3,3		
Trim allerons					1,1		
Volets					6		
TOTAL (ampères)	9,5	9,5	14,7	14,7	12,1	11,2	4,4

Estimation de consommation

La consommation du réseau de bord va donc évoluer de 10 A en continu à 15 A pendant quelques minutes. Dans ce cas, la puissance peut toujours être fournie par l'alternateur. De manière transitoire, cette consommation peut être encore plus élevée. Si de manière improbable, tous les transitoires étaient alimentés en même temps, le courant pourrait atteindre 28 A. Dans ce cas, pendant un instant, la batterie viendrait en aide à l'alternateur.

Sur un avion moins gourmand en électricité, on peut certainement compter sur une consommation de 5 A en continu et 10 A pendant le temps d'un tour de piste. Même en cas de réseau de bord peu gourmand, nous avons vu que la charge de la batterie peut entraîner un courant de 17 A. Associée au réseau de bord, la batterie peut pousser l'alternateur à sa limite (21 A). Même si le réseau de bord consomme peu, la recharge de la batterie peut imposer un fonctionnement de 21 A au régulateur pendant plusieurs minutes.

Cependant, un réseau de bord qui consomme peu sera moins contraignant pour le régulateur. En effet, dans ce cas, le régulateur aura une température plus faible en régime permanent. Lors d'un régime transitoire important, le temps pour atteindre la température maximum sera donc plus élevé.

Test du régulateur Ducati Energia :

Voici ce que l'on peut trouver sur le régulateur Ducati dans le manuel d'installation ROTAX du 912S (téléchargeable sur <http://www.kodiakbs.com/>).

17) Electric system

See fig. 29.

The engine is supplied with the wiring completed and ready to operate. Only the following connections to the aircraft have to be established.

- | | | |
|------------------------|---|--------------------------------|
| integrated generator ① | ▷ | external rectifier-regulator ④ |
| electronic module ② | ▷ | shorting button ③ (grounding) |
| electric starter ⑤ | ▷ | start relay ⑥ |

if required:

- | | | |
|--|---|------------------------|
| rev-counter pick-up ⑦ | ▷ | electric rev-counter ⑧ |
| auxiliary generator (optional extra) ⑨ | ▷ | consumer (battery) |

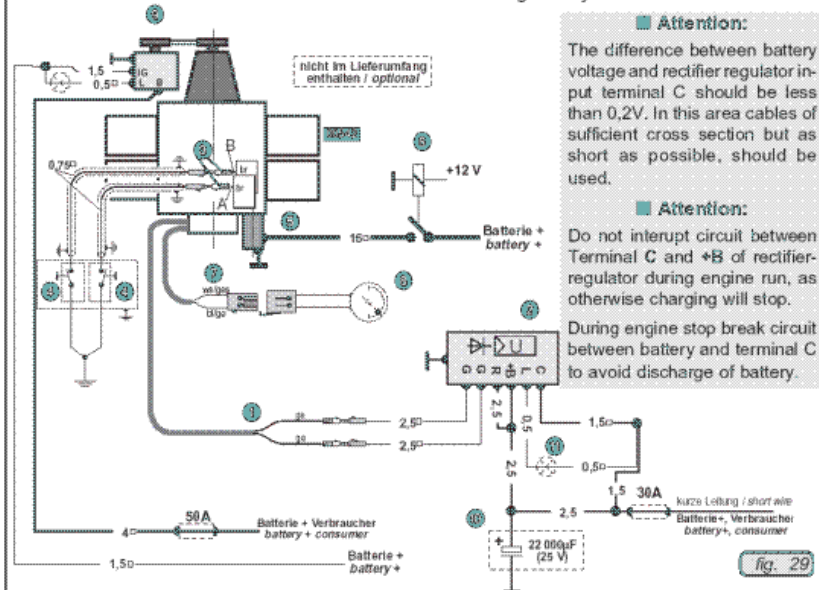
■ **ATTENTION:** The connections have to be completed by the aircraft builder in accordance to effective certification and wiring diagram.

The electromagnetic compatibility (EMC) and electromagnetic interference (EMI) is greatly affected by the wiring and has to be checked for each installation.

▲ **WARNING:** The supply to the various consumers (e.g. battery) has to be protected adequately by fuses (consult wiring diagram). When using a fuse too large damage to electric equipment may result.

Under no circumstances route consumers cables (e.g. battery) side by side with ignition cable. Induction could cause problems.

Colour code: ws ▷ white bl ▷ blue ge ▷ yellow br ▷ brown



■ Attention:

The difference between battery voltage and rectifier regulator input terminal C should be less than 0,2V. In this area cables of sufficient cross section but as short as possible, should be used.

■ Attention:

Do not interrupt circuit between Terminal C and +B of rectifier-regulator during engine run, as otherwise charging will stop.

During engine stop break circuit between battery and terminal C to avoid discharge of battery.

fig. 29

480174

Modification no.	Date	Preference	Install	Page
- 0 -	1998 09 01		912 S	17 - 1

17.1) Technical data and connection of the electric components

Integrated generator: see fig. 29 and 31

Feeding wires to rectifier-regulator on left side of ignition housing (see wiring diagram)

- 2 flexible cables, 1,5 mm² yellow (in shielding metal braid)
- length approx. 660 mm (26 in) starting from ignition housing
- with on each plug socket 6,3 x 0,8 to DIN 46247

◆ NOTE: 250W output at 5800 rpm.

Rectifier-regulator: see fig. 30

• type:electronic full-wave
rectifier regulator 

• effective voltage: 14 ± 0,3 V (from 1000 ± 250 rpm.)

• current limit:max. 28 A

• ambient temperature range:min. -25° C (- 13° F)
max. +90° C (194° F)

• weight0,3 kg (.66 lb.)

■ ATTENTION: Flawless operation of the rectifier-regulator needs a capacitor of 22000 µF / 25 V.

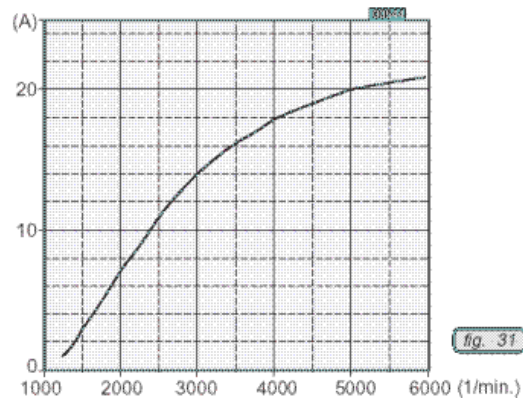
The rectifier-regulator  is protected by a slow blowing 30A fuse

■ ATTENTION: The graph current over engine speed has been determined and is valid only at the following conditions.

ambient temperature: 20 °C (68° F)

voltage: permanent 13,5 V

tolerance: max ± 5%



◆ NOTE: A charge-indicating lamp  3W/12V may be fitted.

Page 17 - 2	Install 912 S	Preference	Date 1998 09 01	Modification no. - 0 -
----------------	------------------	------------	--------------------	---------------------------

La lecture de cette documentation me laisse avec quelques interrogations :

- Quelle puissance maximum ?

250 W ou $14 \text{ V} \cdot 28 \text{ A} = 392 \text{ W}$?

- Quelle tension vais-je obtenir ?

13,5 V ou $14 + 0,3 = 14,3 \text{ V}$?

- Puis-je fonctionner à pleine puissance avec une température ambiante de 90°C ?

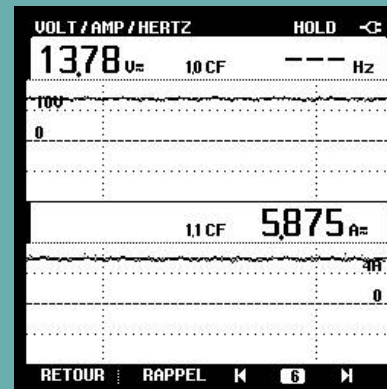
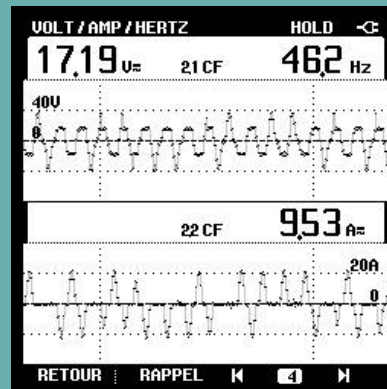
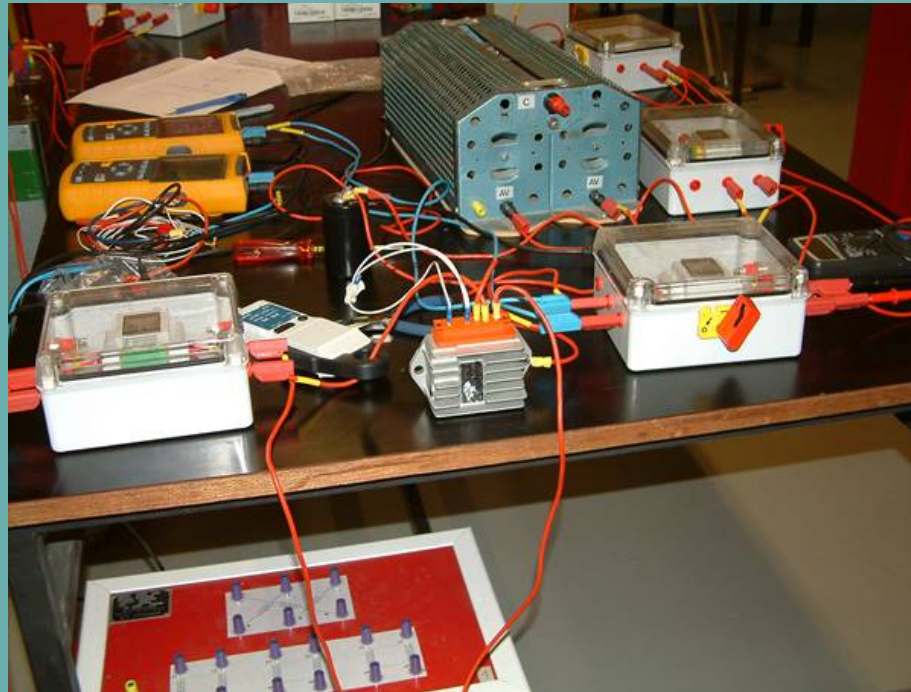
Ou bien la température du boîtier doit-elle rester inférieure à 90° C ?

- Dois-je réellement protéger le régulateur avec un fusible de 30 A ?

Dans le cas ou ce régulateur est alimenté par l'alternateur Ducati Energia, il est possible de répondre à deux de ces questions :

- B
- B

Pour le reste, il faut tester :



Fréquence affichée fausse due au fonctionnement erratique du régulateur (fréquence réelle : environ 200Hz)

- Il faut amorcer le fonctionnement en chargeant le condensateur au préalable !
- Brûlant à 10 A alors que pour le même courant le Schike est à peine tiède ! Cela s'explique par la méthode de régulation (pertes à mesurer) et par le semblant de radiateur de ce régulateur (les ailettes n'apportent quasiment pas de surface d'échange supplémentaire. Tout est fait pour tuer la convection : bossages au milieu des « ailettes ». Le rayonnement est fortement réduit par la couleur alu).
- Alternateur bruyant dès la connexion du régulateur.
- Ondulation de tension importante qui ne va pas améliorer le vieillissement de la batterie (d'autant plus triste que j'ai utilisé un condensateur de 47 000 μF au lieu des 22 000 μF préconisés !).

...Il semble que les interrupteurs s'ouvrent pendant leur conduction. Pas beau, à vérifier ! Surtensions ?

Mesure des pertes, de la chute de tension en conduction et thermiques



Le régulateur désossé par Gilles



Photos d'un autre régulateur

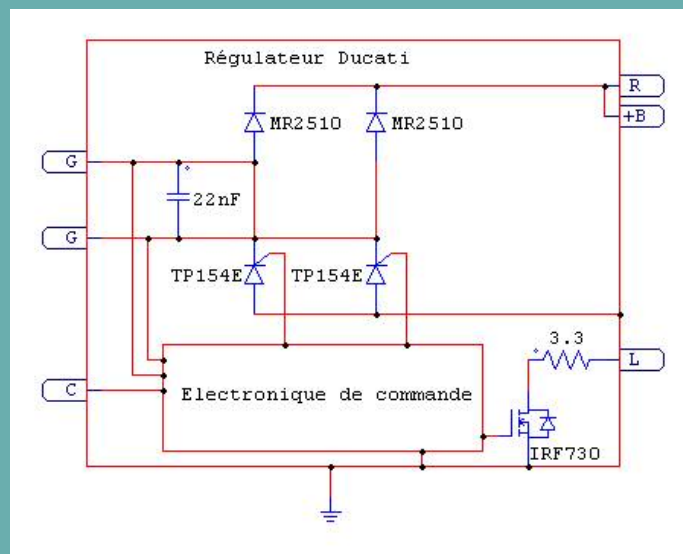
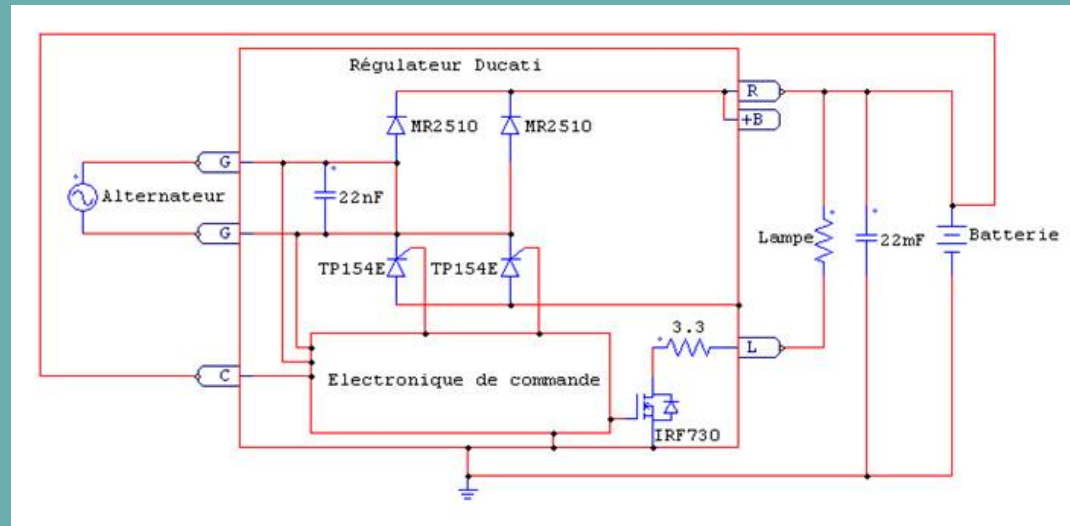
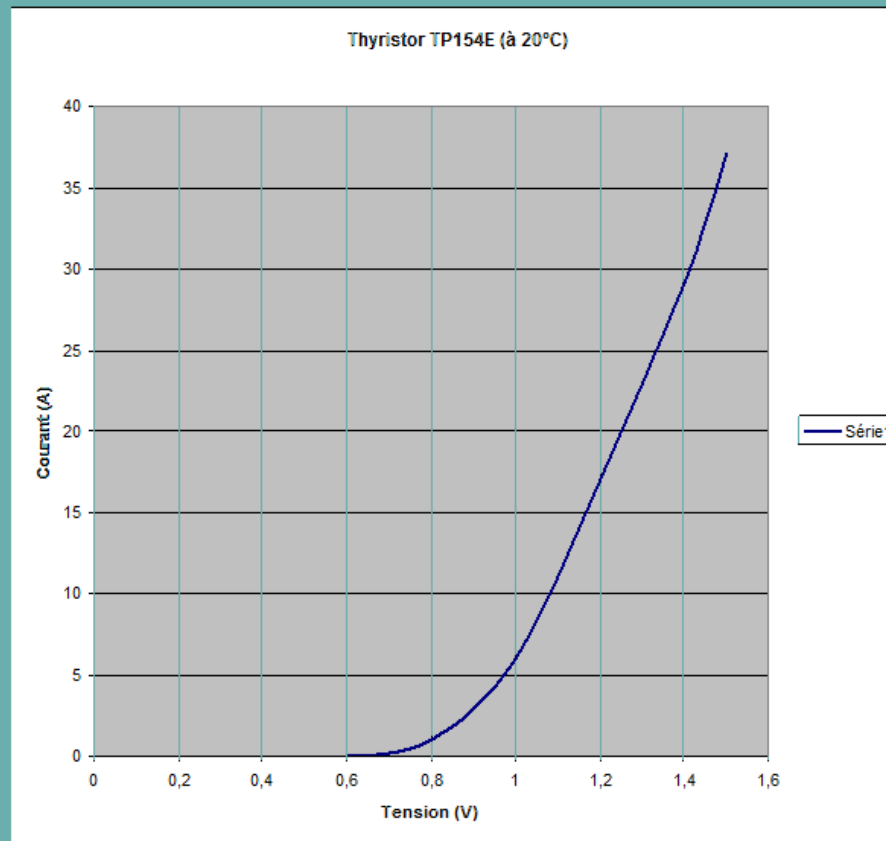


Schéma du régulateur Ducati Energia

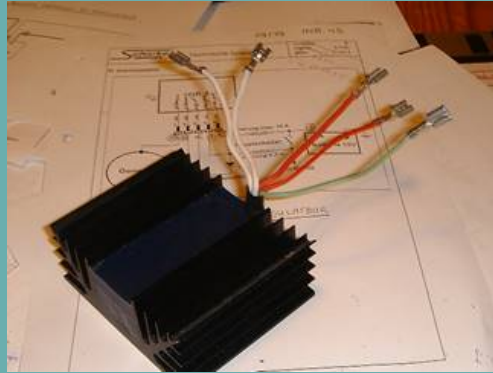


Principe du câblage du régulateur Ducati Energia



Test du régulateur de remplacement Schike :

En Allemagne, ce régulateur est monté en remplacement du Ducati sur différents types de machines. Nous avons donc décidé de le tester :



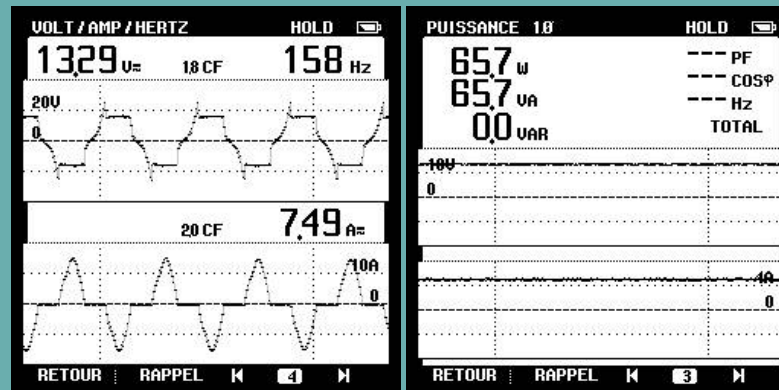
Régulateur Schike

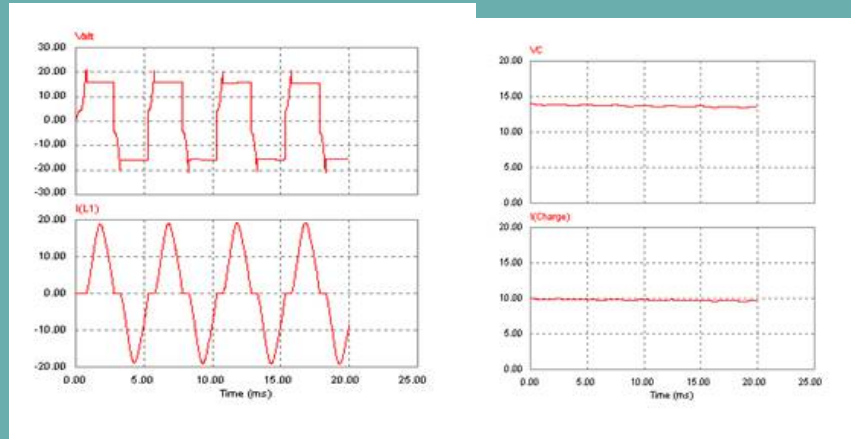
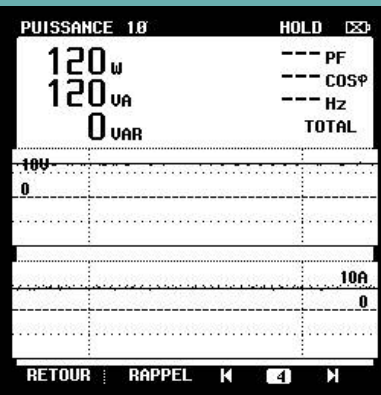
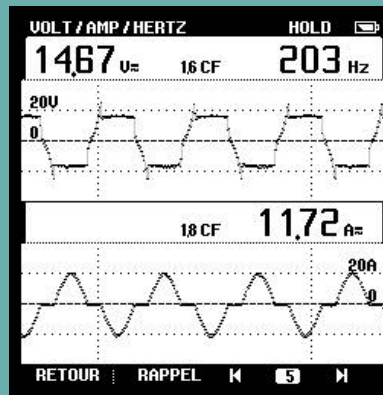
Attention :

Comme pour le régulateur Ducati, on notera la connexion de masse par le boîtier du régulateur. Il passe jusqu'à 20 ampères dans le fil bleu !

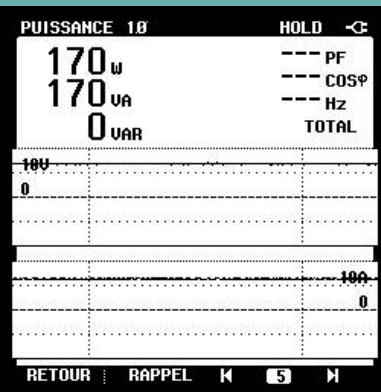
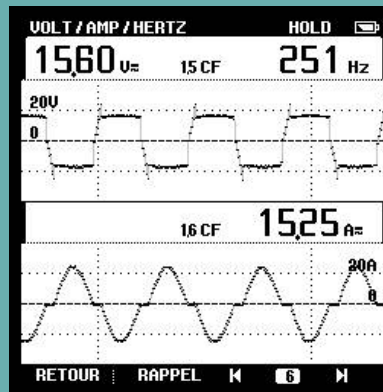
Le condensateur est important et doit être placé au plus près du régulateur. En plus de filtrer l'énergie, il permet d'assurer une tension constante, même si votre batterie ou une connexion venait à lâcher. Sans lui, votre électronique de bord pourrait se retrouver avec 100 Volt à ses bornes ! De plus, une protection contre les surtensions est un réflexe sain. N'hésitez donc pas à câbler votre réseau de bord selon les règles proposées par Bob Nukols (<http://www.aeroelectric.com/>). Le câblage du réseau de bord d'un rotax 912 correspond à l'annexe Z16

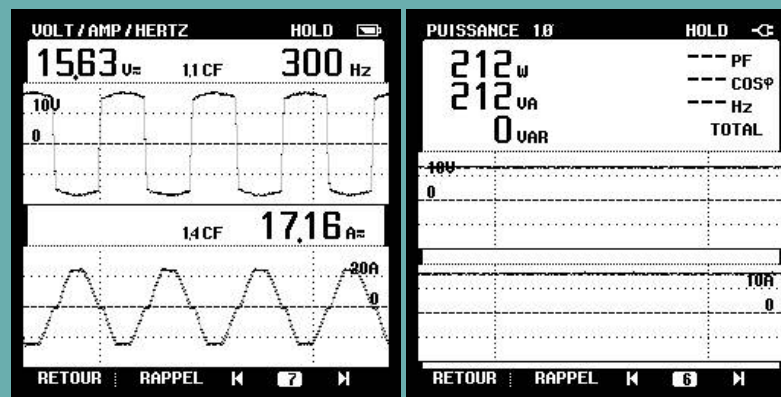
- Ce régulateur peut fonctionner de manière autonome. Il ne nécessite pas de charge préalable du condensateur.
- Il régule entre 14,2 et 14,3 V. Idéal pour bien recharger la batterie, même lors d'un vol court.
- La tension de sortie est moins ondulée qu'avec le Ducati (voir courbes).
- La comparaison avec la simulation d'un pont mixte à thyristor ne laisse aucun doute sur le mode de fonctionnement (voir ci-dessous). On note cependant parfois quelques ratés d'amorçage mais dans l'ensemble le fonctionnement est très propre.
- Sur le plan thermique, le comportement est exemplaire. Même en débitant 20 A, ce régulateur reste tiède. Cela est dû à la fois à une régulation réalisée dans les règles de l'art et à l'utilisation d'un vrai radiateur (voir photos). **Mesures Thermiques à réaliser et pertes et chute de tension à mesurer**





Mesures et simuls...





Comme dans les livres !

Scénario envisageable :

L'avion n'a pas volé depuis un moment.

Ou

Le régulateur fournit une tension un peu trop basse pour une bonne recharge (un nom ?)

Ou

Le démarrage a été difficile.

Ou

...

Bref la batterie est partiellement déchargée. L'avion démarre, le moteur tourne au ralenti... et l'alternateur ne produit pas suffisamment pour recharger la batterie. Peut être pas même pour alimenter le réseau de bord. La batterie alimente donc le réseau en attendant... et se décharge un peu plus.

Puis... pleins gaz. Youpi, l'alternateur peut enfin fournir de la puissance. Il alimente maintenant le réseau de bord et la batterie qui ne demande qu'à se recharger (17 A pour une SBS 8 partiellement déchargée).

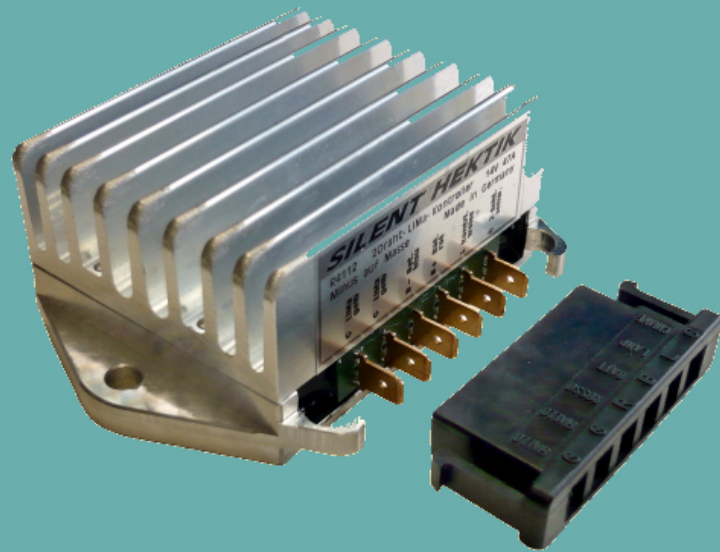
=> Si le régulateur est mal refroidi, il a des chances de partir en fumée dès le début du vol !

Remèdes :

- Ne pas monter le régulateur Ducati.

Ou :

- Suivre les conseils d'Henri Daudon et **monter un ventilateur.**
- Monter le régulateur sur une pièce ayant une bonne conduction thermique (pièce métallique par exemple), afin d'évacuer la chaleur par conduction. Dans ce cas, la graisse silicone est plus que conseillée car la surface du régulateur est granuleuse.
- Monter le régulateur coté moteur dans un flux d'air frais (comme le moteur ou les radiateurs). Cela ne règle ni le problème de la tension trop faible, ni celui du fonctionnement sans batterie ni celui de l'ondulation de tension importante. **Pb de surtension ?**
- Monter un régulateur Silent Hektik par exemple



- 1) Utiliser de préférence un régulateur Silent Hektik R4112 ou Schicke GR6 à la place de la Ducati Energia 362001, en raison de leur conception électronique et thermique améliorée.
- 2) Assurer un refroidissement forcé suffisant , certainement pour la Ducati, mais aussi pour le Schicke GR6 et le Silent Hektik R4112.



Jérôme en compagnie de Gilles



Contact

