

AGREGATION INTERNE DE GENIE ELECTRIQUE

Option A




ELECTRONIQUE ET INFORMATIQUE INDUSTRIELLE

Étude d'un système industriel (durée 8 heures)

PILOTAGE D'UN FOUR ELECTRIQUE A ARC

DOSSIER TECHNIQUE

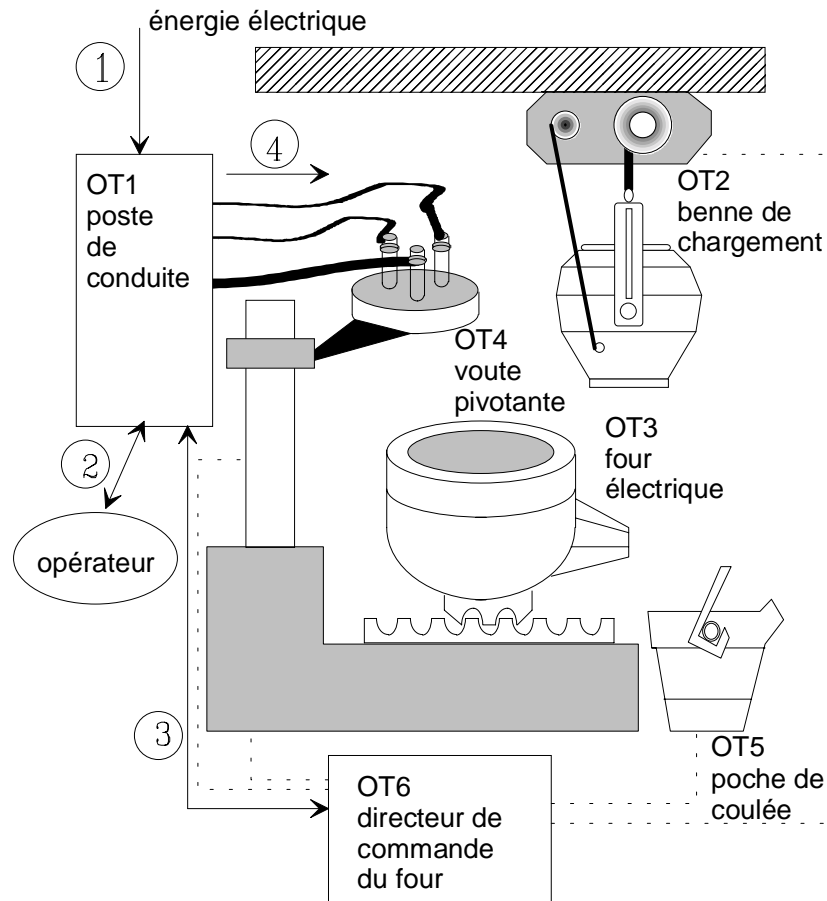
Ce document présente le système technique étudié, il comporte :

-  **La présentation du four électrique à arc**
-  **L'analyse fonctionnelle du système**
-  **Les schémas étudiés.**

Présentation du système étudié : pilotage d'un four électrique à arc

Dans l'enceinte du four chargé des matériaux à faire fondre, on insuffle de l'oxygène, qui brûle presque totalement les éléments indésirables. Les oxydes restants sont fixés par des additifs pour être ensuite évacués.

La fusion est obtenue au moyen de puissants arcs électriques qui jaillissent entre des électrodes (3 en général) et la charge à fondre.



Le diagramme sagittal montre les différents objets techniques constituant le système. On remarque:

OT1 : Le poste de conduite assure:

- ⇒ L'alimentation en énergie des électrodes.
- ⇒ Le contrôle par un opérateur de la fusion dans le four.
- ⇒ La régulation de la position des électrodes fixées sur un mât mobile.
- ⇒ L'acquisition des grandeurs électriques caractérisant les arcs électriques.

OT2 : La benne de chargement qui, au moyen d'un pont roulant, permet de déverser la ferraille et les différents additifs dans le four électrique.

OT3 : Le four électrique, constitué de parois en matériaux réfractaires. La température du four atteint 1600 °C lors de la fusion.

OT4 : La voûte pivotante qui vient coiffer le four quand celui-ci est chargé. La voûte pivotante porte également les électrodes qui permettent de générer l'arc électrique. Les électrodes peuvent se déplacer verticalement afin de faire varier les caractéristiques de l'arc électrique.

OT5 : La poche de coulée qui permet de récupérer l'acier préparé dans le four.

OT6 : Le directeur de commande qui permet :

- ⇒ De commander la vidange du four en fin de fusion. Le four pivote autour d'un axe horizontal ce qui lui permet de se déverser dans la poche de coulée.
- ⇒ D'assurer le remplissage du four en commandant les mouvements de la benne de chargement.
- ⇒ De commander la position du mât supportant les électrodes.

Le diagramme sagittal montre également les informations échangées entre les différents objets techniques constituant le système. Les traits pointillés indiquent les échanges entre le directeur de commande et la partie opérative. On remarque :

- ❶ L'alimentation en énergie de l'ensemble. On dispose de tensions triphasées de 20 kV.
- ❷ Le dialogue depuis une console informatique qui permet à l'opérateur :
 - ⇒ De fixer les consignes de fonctionnement du four.
 - ⇒ De piloter le chargement et le déchargement du four.
 - ⇒ De recevoir les informations de suivi de fusion et l'indication de moussage (voir plus loin).
 - ⇒ De recevoir les informations de suivi de chargement et de déchargement.
- ❸ L'échange d'informations avec le directeur de commande qui agit sur les parties opératives du système.
- ❹ Le transfert d'énergie vers les électrodes afin de produire les arcs électriques.

Le four à arc est encore appelé four à arc « sur charge » car l'arc jaillit entre les électrodes et la charge du four. On utilise une source d'énergie triphasée ce qui conduit à utiliser 3 électrodes.

La conduite du four à arc s'appuie sur la mesure des paramètres électriques caractérisant l'arc. On peut citer :

- ⇒ L'intensité i et sa dérivée pour chacune des phases.
- ⇒ Les tensions du réseau d'alimentation.

Le paramètre choisi pour le pilotage par régulation est la puissance active instantanée $p(t)$ totale. On régulera la puissance moyenne P autour d'une valeur de consigne en agissant sur le positionnement vertical du mât supportant les électrodes. On pourra en déduire la puissance électrique consommée.

L'achèvement de la fusion est mis en évidence en analysant les harmoniques du courant d'arc. Plus l'arc devient stable, ce qui est le cas en fin de fusion, plus les formes d'ondes du courant se rapprochent de la sinusoïde parfaite (on parle en fin de fusion du phénomène de moussage).

Le moussage correspond à une augmentation rapide du volume du mélange en fusion dans le four qui est due à la formation de bulles d'oxyde de carbone (CO). Lors de ce phénomène, les électrodes travaillent en immersion totale ce qui modifie les caractéristiques de l'arc électrique.

Une maîtrise de ce phénomène passe par la maîtrise des modes de production de CO, c'est à dire essentiellement l'injection d'oxygène. D'où la nécessité d'un indicateur de moussage fiable pour éventuellement piloter ces injections.

Étude du poste de conduite du four OT1

Le rôle dévolu au poste de conduite est de maintenir le point de fonctionnement du four souhaité. Celui-ci est défini par l'opérateur qui fixe les consignes de puissance à générer au niveau des arcs électriques. Le poste de conduite pilote la position du mât d'électrodes afin de réguler la puissance fournie. La détection du phénomène de moussage indique à l'opérateur que le processus d'élaboration de l'acier est en voie d'achèvement.

L'environnement du four est des plus hostiles.

Les courants d'arc de l'ordre de 50 000 ampères génèrent de fortes perturbations électromagnétiques. De plus, les courants comportent des harmoniques.

La chaleur (intérieur du four à 1600 °C) rend délicate toute mesure à proximité du four.

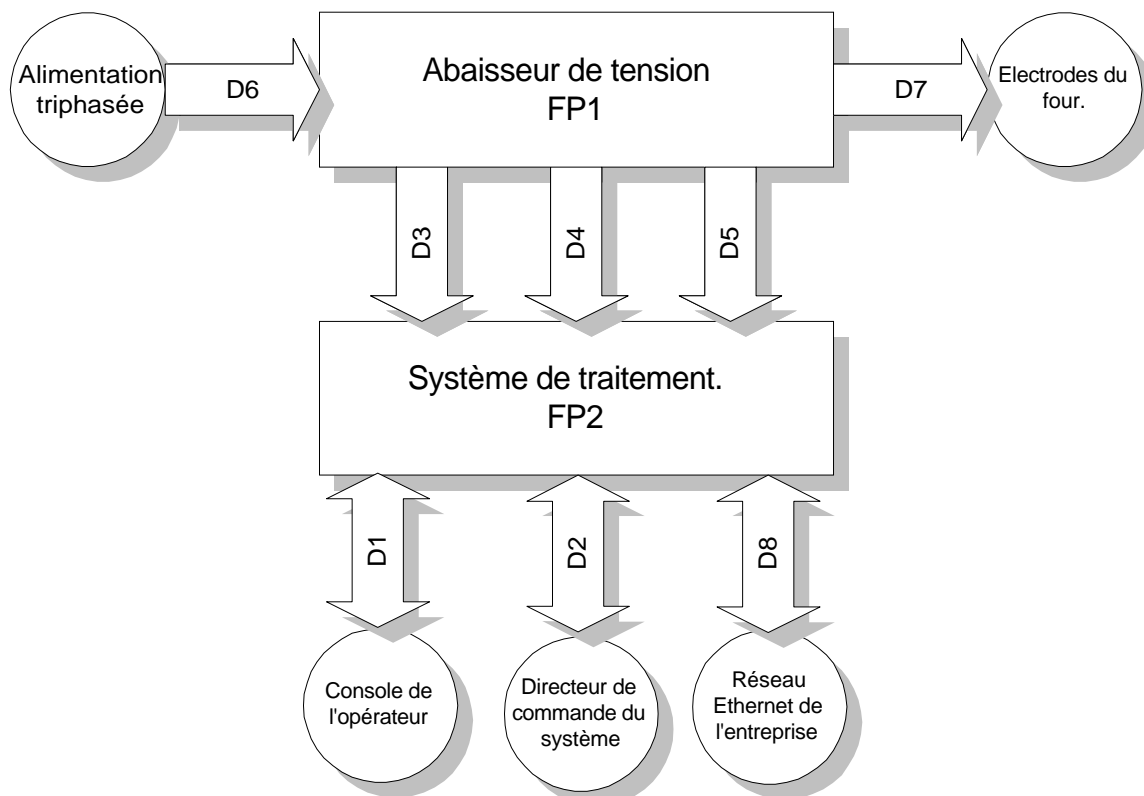
L'énergie électrique est fournie par le réseau triphasé.

Les courants d'arc sont obtenus en imposant entre chacune des trois électrodes et la masse à fondre dans le four une tension.

Le pilotage de la partie opérative s'effectue par l'intermédiaire du directeur de commande auquel on précise (entre autre) la grandeur qui représente la consigne de position du mât d'électrodes.

Une console informatique permet de fixer la consigne de puissance d'arc, de commander les processus d'enfournement, de décharger le four et de visualiser le fonctionnement de l'ensemble.

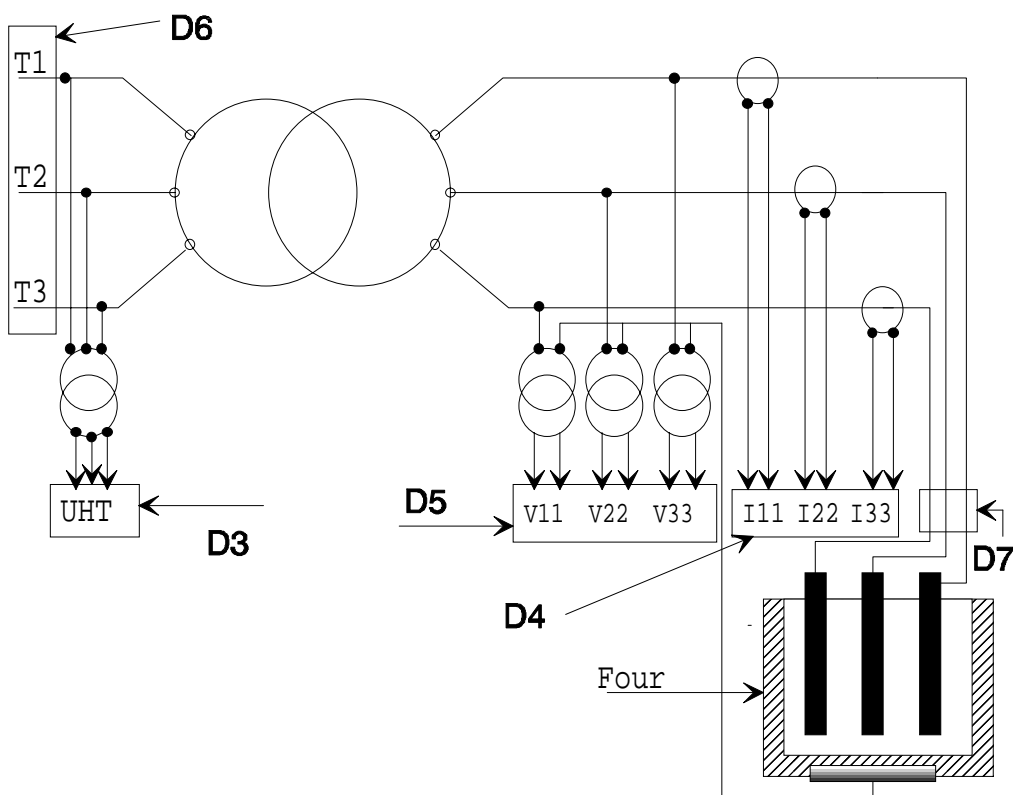
On donne le schéma fonctionnel de degré 2 et on y distingue :



- La fonction FP1 qui abaisse la tension du réseau triphasé afin d'alimenter les trois électrodes. FP1 permet d'isoler du réseau d'alimentation en énergie l'ensemble de l'installation. Elle délivre également des tensions images des courants et de leurs dérivées ainsi que des tensions d'alimentation. On peut noter les informations d'entrées/sorties suivantes :
 - ⇒ **D3** : On dispose ici de 3 tensions alternatives de 100 volts efficaces. Ces tensions sont l'image de la haute tension repérée par D6.
 - ⇒ **D4** : On dispose ici de 3 tensions alternatives variant entre 0 et +2 volts efficaces. Chacune de ces tensions est l'image d'un des courants traversant l'une des trois électrodes.
 - ⇒ **D5** : On dispose ici de 3 tensions alternatives de 100 volts efficaces. Chacune de ces tensions est l'image de la tension appliquée entre l'une des trois électrodes et la matière placée dans le four.
 - ⇒ **D6** : Tensions d'alimentation triphasées de 20 kV (50 Hz).
 - ⇒ **D7** : Tensions d'alimentations triphasées des électrodes. Chaque électrode est alimentée par une phase différente sous une tension de l'ordre de 500 volts (entre phases).
- La fonction FP2 qui assure le traitement des informations analogiques issues de FP1. Pour cela, le système de traitement dialogue avec l'opérateur (signaux D1) et échange des informations avec le directeur de commande de l'installation (signaux D2). On peut noter les informations d'entrées/sorties suivantes :
 - ⇒ **D1** : On dispose ici d'une liaison numérique à boucle de courant qui permet d'afficher sur l'écran d'une console les paramètres électriques et les consignes de pilotage du four. Un clavier permet de saisir les paramètres nécessaires.
 - ⇒ **D8** : Liaison au réseau Ethernet de l'entreprise.
 - ⇒ **D2** : On dispose de deux types d'informations :
 - Des informations de type TOR (tout ou rien) qui permettent de prendre en compte des informations issues de l'installation (capteurs) et de fournir des informations de commande au directeur de commande OT6 (remontée d'urgence des électrodes, dépassement des seuils de régulation).
 - Des informations qui serviront de consigne au directeur de commande pour le positionnement des électrodes.

Étude de la fonction FP1 de OT1 : abaisseur de tensions

On donne le schéma structurel de la fonction FP1.



Remarque importante : Etant donné que toutes les informations sont traduites en tensions, le constructeur a noté I_i les tensions images des courants. Il conviendra de prendre garde à éviter toute confusion.

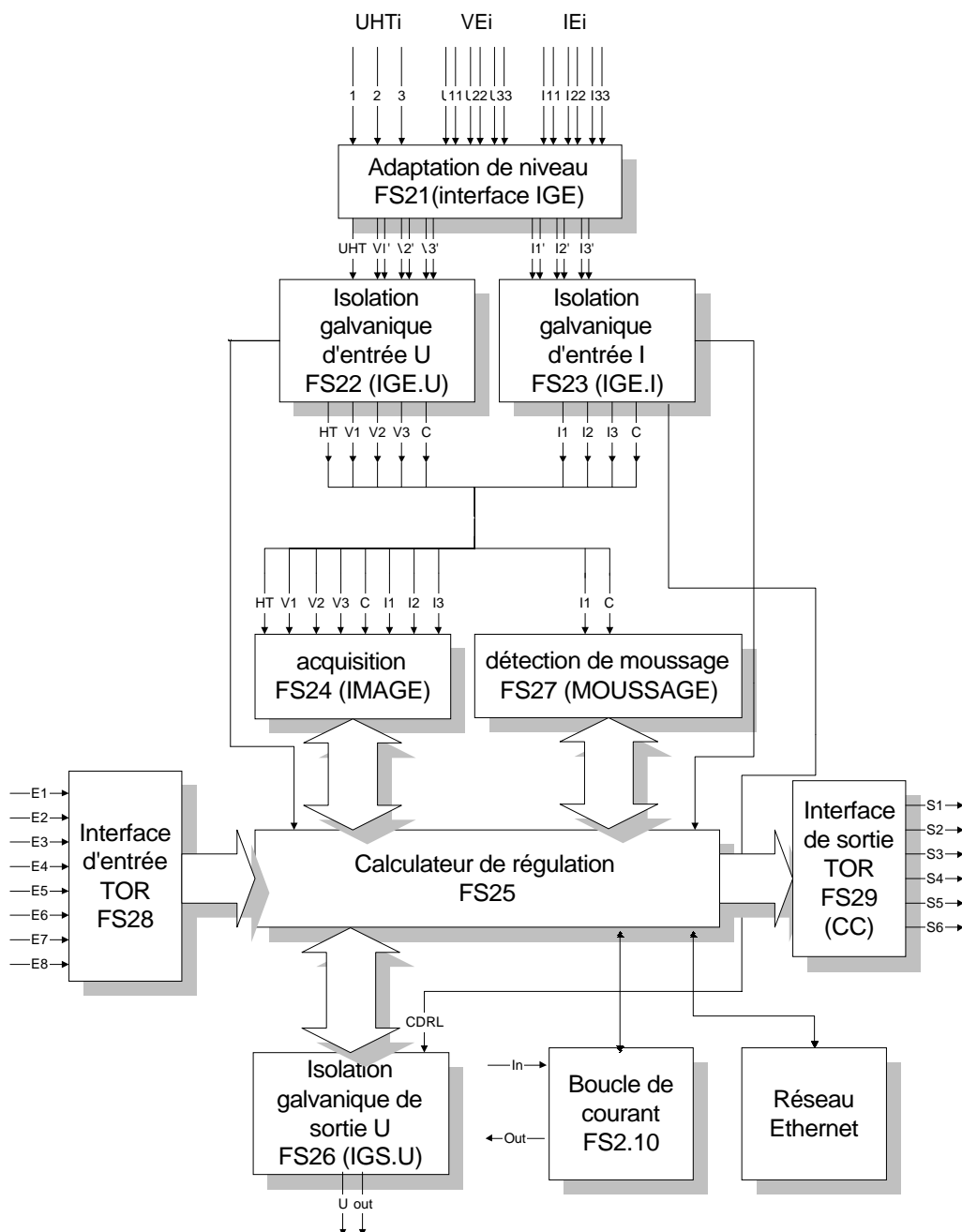
On remarque les différentes grandeurs suivantes :

- ⇒ Les trois phases T1, T2 et T3 constituent la source d'énergie. On dispose d'un réseau triphasé de 20 kV de fréquence 50 Hz.
- ⇒ Les tensions alternatives triphasées UHT de 100 volts efficaces sont images de la haute tension.
- ⇒ Les tensions alternatives V11, V22 et V33 de 100 volts efficaces sont images des tensions appliquées aux électrodes.
- ⇒ Les tensions alternatives I11, I22 et I33 d'amplitude maximale $+2 \cdot \sqrt{2}$ volts sont images des courants traversant les électrodes. Ces tensions sont obtenues par des capteurs à tore de Rogowski.

Les tensions appliquées aux électrodes ont une amplitude de l'ordre de 500 volts entre phases. Le courant traversant les électrodes est, quant à lui, de l'ordre de 50 000 ampères.

Étude de la fonction FP2 de OT1 : système de traitement

La fonction FP2 assure le traitement des informations analogiques issues de FP1. Pour cela, le système de traitement dialogue avec l'opérateur (boucle de courant), envoie une tension au directeur de commande (sortie de IGS.U) et échange des informations avec le réseau Ethernet de l'entreprise.



Sur le schéma fonctionnel de FP2 et on distingue les fonctions secondaires suivantes :

FS21 : Adaptation de niveau (interface IGE). Localisée sur la carte interface IGE U et I.

Traitements réalisés : Cette fonction permet d'adapter les niveaux des signaux issus de la fonction FP1 afin de les traiter par FP2. Les tensions UHT (1, 2 et 3) sont redressées afin de fournir une tension continue (HT) image de la haute tension disponible au primaire du transformateur de FP1. Les autres tensions sont en général abaissées

En entrée, on dispose de :

- UHT (1, 2 et 3) un système de tensions triphasées de l'ordre de 100 V efficaces.
- U1, U2, U3 : des tensions sinusoïdales de 100 V efficaces.
- I11, I22 et I33 : des tensions sinusoïdales de 2 volts efficaces max.

En sortie, on fournit :

- HT : une tension continue d'amplitude 4 V environ.
- U1', U2', U3', I1', I2' et I3' : des tensions sinusoïdales d'amplitude 3 V max.

FS22 : Isolation galvanique d'entrée U (interface IGE.U). Localisée sur la carte IGE.U.

Traitements réalisés : Cette fonction réalise une isolation galvanique et fournit des tensions de sortie référencées par rapport à la masse (C).

En entrée, on dispose de :

- HT : une tension continue d'amplitude 4 V environ.
- U1', U2' et U3' : des tensions sinusoïdales d'amplitude max. de 3 V.

En sortie, on fournit :

- HT' : une tension continue d'amplitude 10 V environ référencées par rapport à la masse (C).
- V1, V2 et V3 : des tensions sinusoïdales d'amplitude 10 V référencées par rapport à la masse (C).

FS23 : Isolation galvanique d'entrée I (interface IGE.I). Localisée sur la carte IGE.I.

Traitements réalisés : Cette fonction réalise une isolation galvanique et fournit des tensions de sortie référencées par rapport à la masse (C). Elle fournit une information (contact de relais : CDRL) à la carte IGS.U ce qui permet une descente rapide ou lente des barres.

En entrée, on dispose de :

- I1', I2' et I3' : des tensions sinusoïdales d'amplitude maximale 3 volts.

En sortie, on fournit :

- I1, I2 et I3 : des tensions sinusoïdales d'amplitude 10 V référencée par rapport à la masse (C).
- Une information (CDRL) à la fonction IGS.U qui permet une descente rapide ou lente des barres.

FS24 : Acquisition. Localisée sur la carte IMAGE.

Traitements réalisés : Cette fonction réalise une conversion analogique numérique des entrées images des courants et tensions. Les résultats sont placés en mémoire et rendus accessibles au calculateur FS25 par un bus parallèle de 16 bits.

En entrée, on dispose de :

- HT' : une tension continue d'amplitude 10 V environ référencée par rapport à la masse (C).
- V1, V2 et V3 : des tensions sinusoïdales d'amplitude 10 V référencée par rapport à la masse (C).
- I1, I2 et I3 : des tensions sinusoïdales d'amplitude 10 V référencée par rapport à la masse (C).
- De signaux servant au dialogue avec le calculateur FS25.

En sortie, on fournit :

- Un bus parallèle de 16 bits.
- Des signaux servant au dialogue avec le calculateur FS25.

FS25 : Calculateur de régulation.

Traitements réalisés : Le calculateur de régulation est un mini-ordinateur de type VAX qui réalise l'ensemble des traitements numériques nécessaires à la conduite du four. Il prend en compte les informations concernant les grandeurs électriques (I, U et HT), les informations de moussage et d'autres informations issues du *process*. Il élabore les commandes de régulation du positionnement des mâts d'électrodes. Il dialogue avec l'opérateur à travers une console alphanumérique.

En entrée, on dispose :

- D'un bus parallèle de 16 bits qui présente les informations U et I.
- D'un bus parallèle de 9 bits qui présente l'information de moussage.
- Des entrées tout ou rien qui viennent du directeur de commande et qui permettent de prendre en compte l'état du système.
- D'une entrée boucle de courant issue de la console de dialogue.
- D'une connexion au réseau Ethernet de l'entreprise.

En sortie, on fournit :

- Une sortie boucle de courant allant vers la console de dialogue.
- Des sorties tout ou rien aboutissant au directeur de commande et permettant de piloter le système.
- Une liaison parallèle permettant de piloter la fonction FS26 qui fournira les informations analogiques (tension U) de positionnement du mât d'électrodes.
- D'une connexion au réseau Ethernet de l'entreprise.

FS26 : Isolation galvanique de sortie U (interface IGS.U). Localisée sur la carte IGS.U. On dispose en fait de 3 cartes identiques, chacune étant chargée de fixer la consigne du mât d'une des électrodes. Nous donnons, ci après, les caractéristiques d'une des cartes.

Traitements réalisés : Cette fonction réalise une isolation galvanique avec le calculateur FS25 et fournit une tension de sortie référencée par rapport à la masse (C). Cette tension permet la commande du dispositif de régulation de la position des électrodes. Elle reçoit l'information CDRL pour piloter la descente rapide ou lente des électrodes.

En entrée, on dispose :

- D'un bus parallèle de 10 bits qui présente la consigne de hauteur à convertir en tension.
- D'un signal de contrôle du bus de 10 bits.
- Des entrées de commande de relais issues du calculateur FS25.
- De l'information CDRL.

En sortie, on fournit :

- Une sortie qui donnera l'information analogique (Uout) de positionnement du mât d'électrodes.

FS27 : Détection de moussage. Localisée sur la carte MOUSSAGE.

Traitements réalisés : Cette fonction assure le traitement nécessaire à la détection de l'information de moussage. Les résultats sont disponibles sous forme numérique BCD sur un bus parallèle de 9 bits et sous forme analogique. Ils permettent de quantifier la présence d'harmoniques de courant et par conséquent d'indiquer le phénomène de moussage

En entrée, on dispose de :

- I1 : tension sinusoïdale d'amplitude 10 V référencée par rapport à la masse (C). Cette tension est l'image du courant d'une des phases qui alimente l'une des électrodes.
- D'un signal servant au dialogue avec le calculateur FS25.

En sortie, on fournit :

- Un bus parallèle de 9 bits.
- Une tension référencée par rapport à la masse (C). Cette tension permet de quantifier la présence d'harmoniques de courant et par conséquent d'indiquer le phénomène de moussage. Non utilisée pour la régulation, cette tension permet de visualiser sur un oscilloscope les signaux caractérisant le moussage.

FS28 : Interface d'entrée tout ou rien (TOR).

Traitements réalisés : Cette fonction permet de réaliser une isolation galvanique entre des entrées provenant du directeur de commande et des sorties allant vers le calculateur. Ces entrées renseignent le calculateur sur l'état du système à piloter.

En entrée, on dispose :

- Des entrées tout ou rien qui viennent du directeur de commande et qui permettent de prendre en compte l'état du système.

En sortie, on fournit :

- Des sorties binaires qui aboutissent au calculateur FS25.

FS29 : Interface de sortie tout ou rien (TOR).

Traitements réalisés : Cette fonction permet de réaliser une isolation galvanique entre des entrées provenant du calculateur et des sorties allant vers le directeur de commande. Ces entrées permettent de piloter le système.

En entrée, on dispose :

- D'entrées binaires issues du calculateur FS25.

En sortie, on fournit :

- Des sorties tout ou rien qui sont matérialisées par des contacts de relais.

FS2.10 : Boucle de courant. Localisée sur la carte boucle de courant.

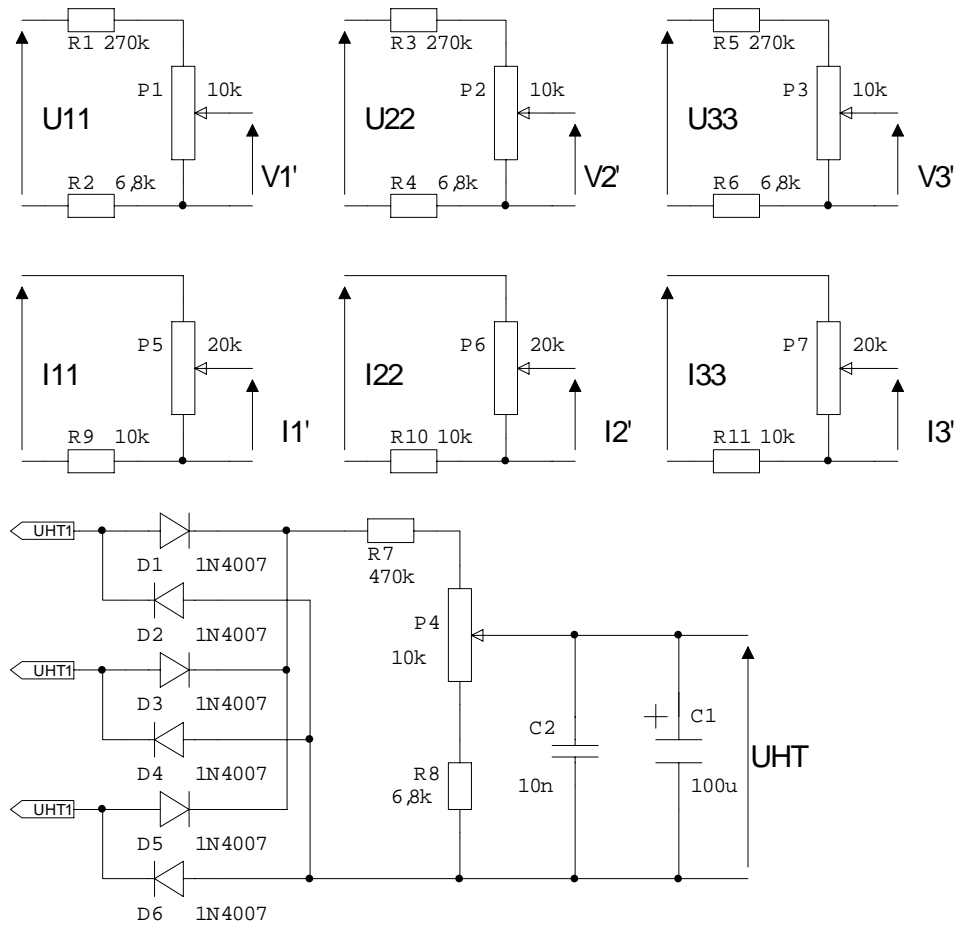
Traitements réalisés : Cette fonction réalise une isolation galvanique et une conversion boucle de courant entre le calculateur FS25 et la console alphanumérique. Le calculateur est muni de 2 liaisons séries de type RS232. L'une d'elle est utilisée pour assurer l'échange d'informations avec la console.

En entrée, on dispose :

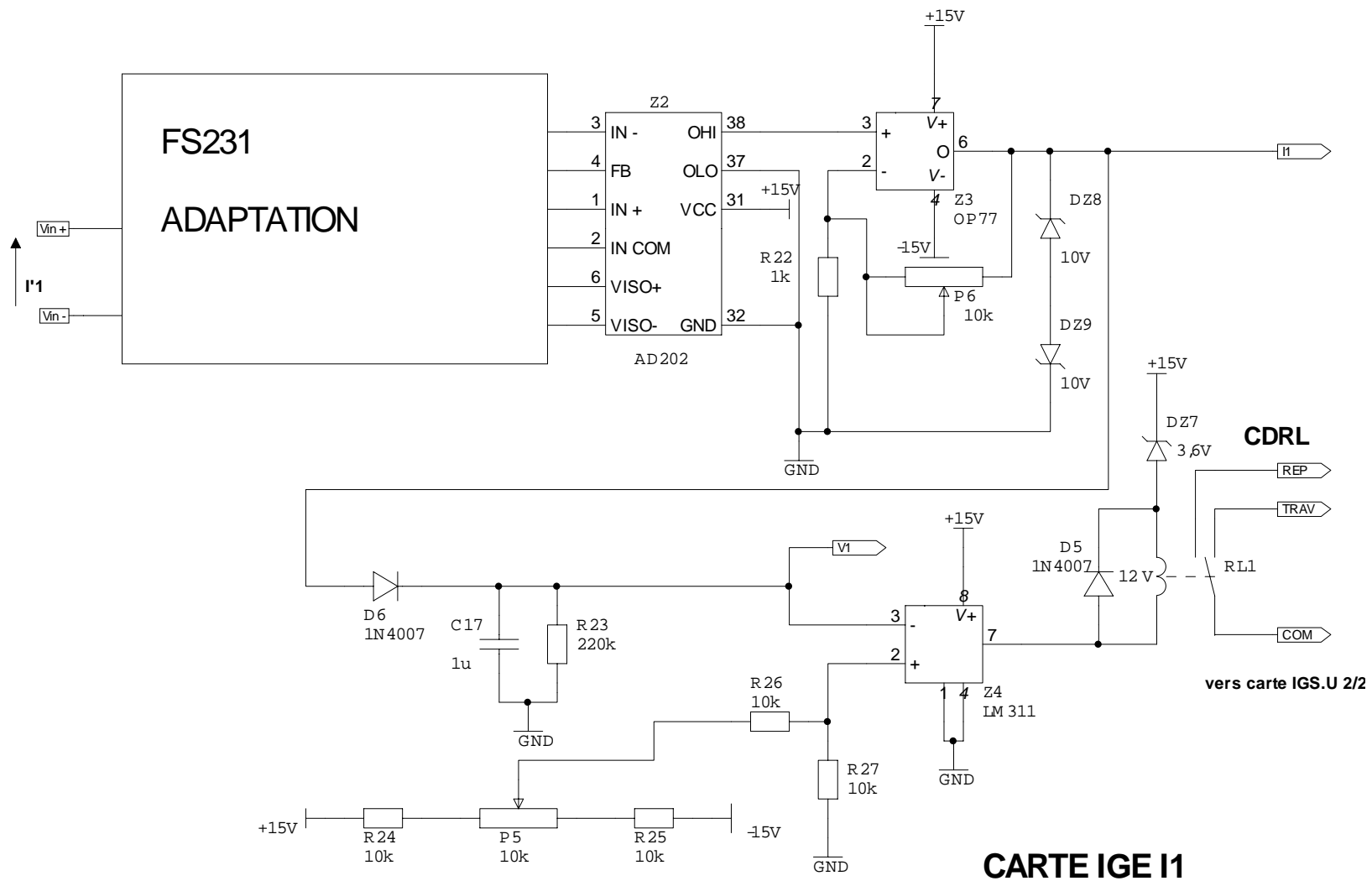
- De deux signaux binaires codés NRZ (+12V, -12V) qui seront convertis en courant. Les signaux sont ceux d'une liaison RS232.

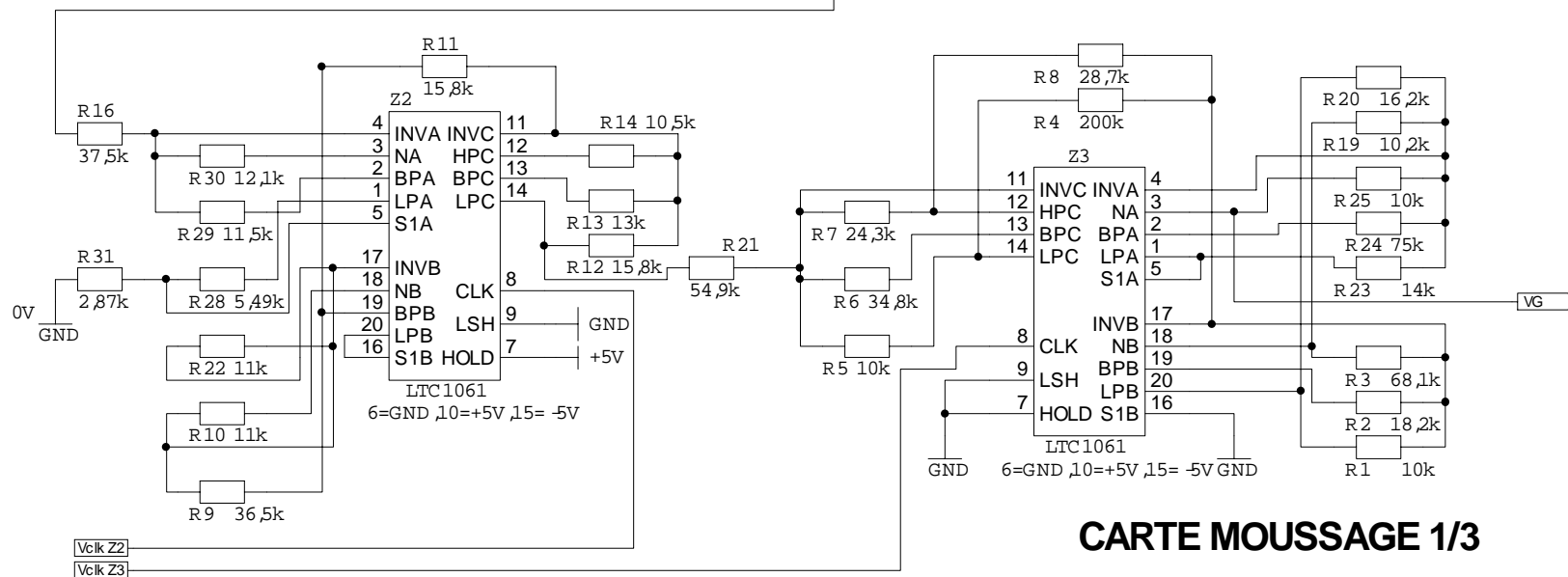
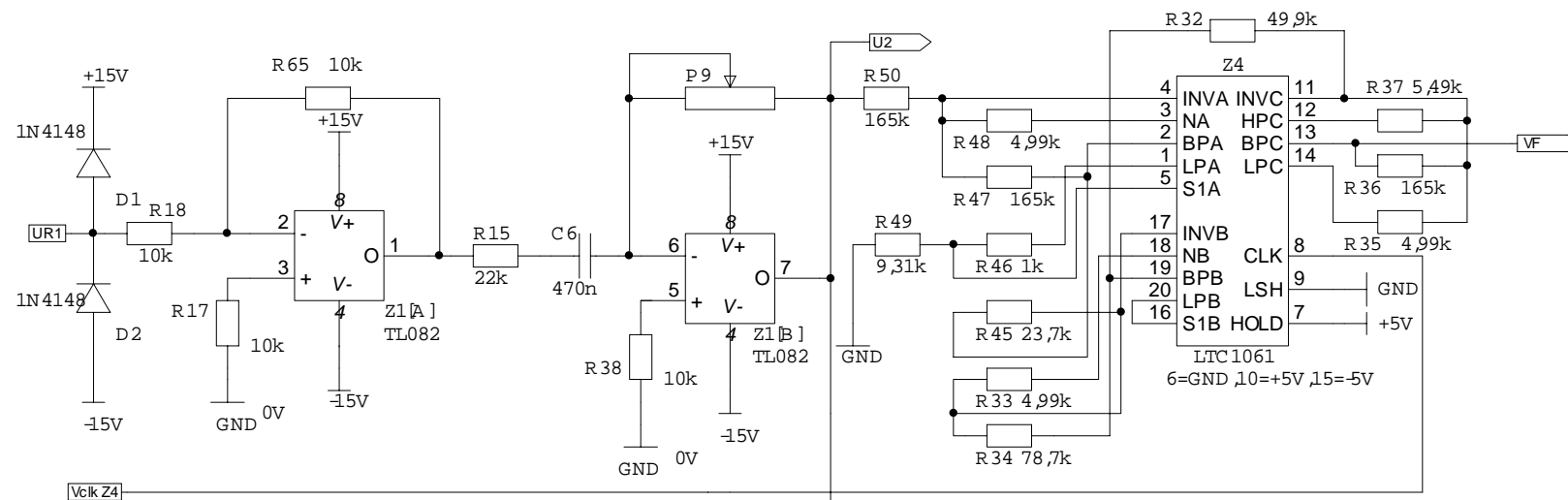
En sortie, on fournit :

- Deux signaux binaires sous forme de courants. Ils seront convertis en tensions pour servir de support à une liaison RS232.

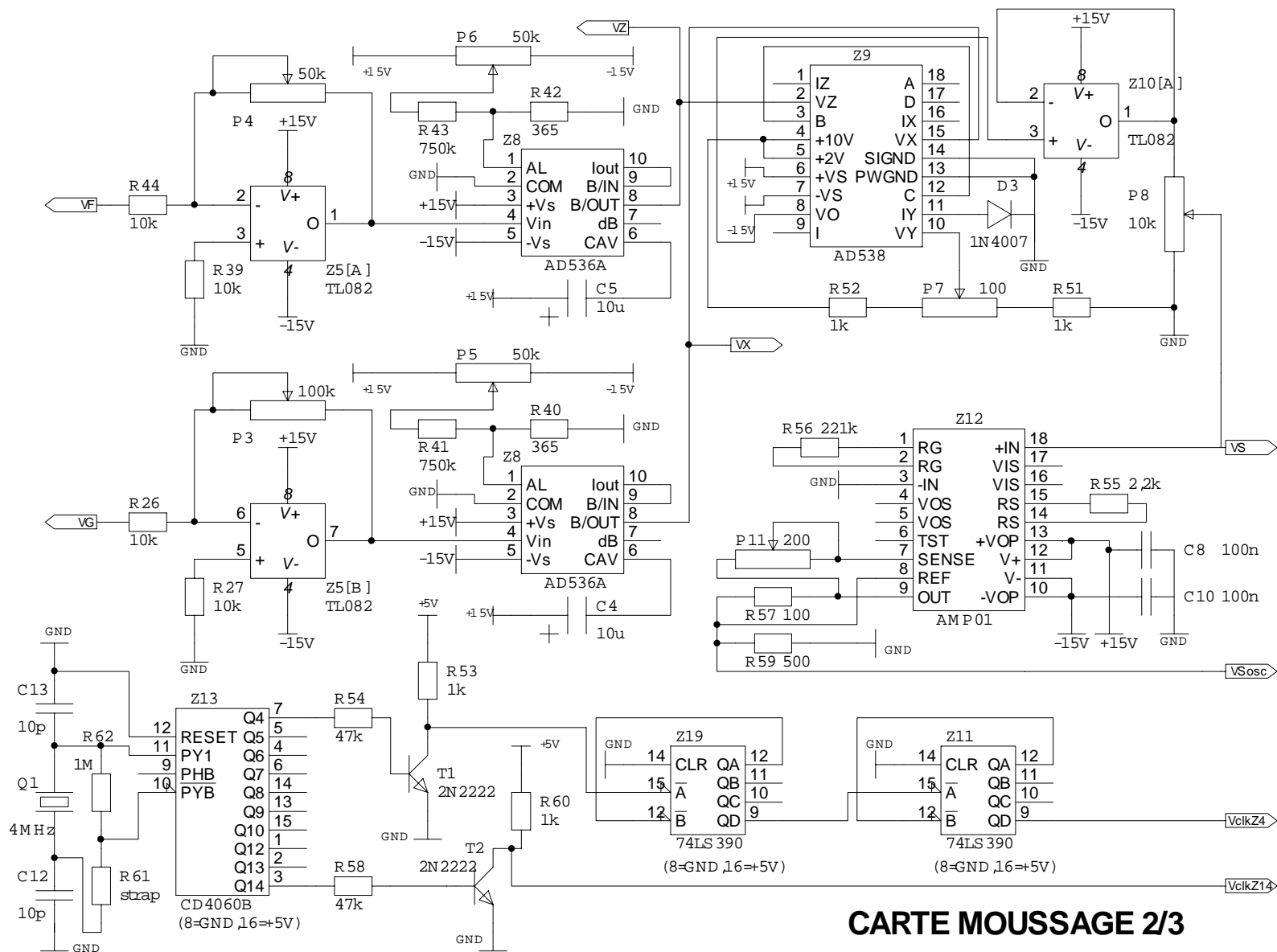


CARTE INTERFACE IGE I, U et HT

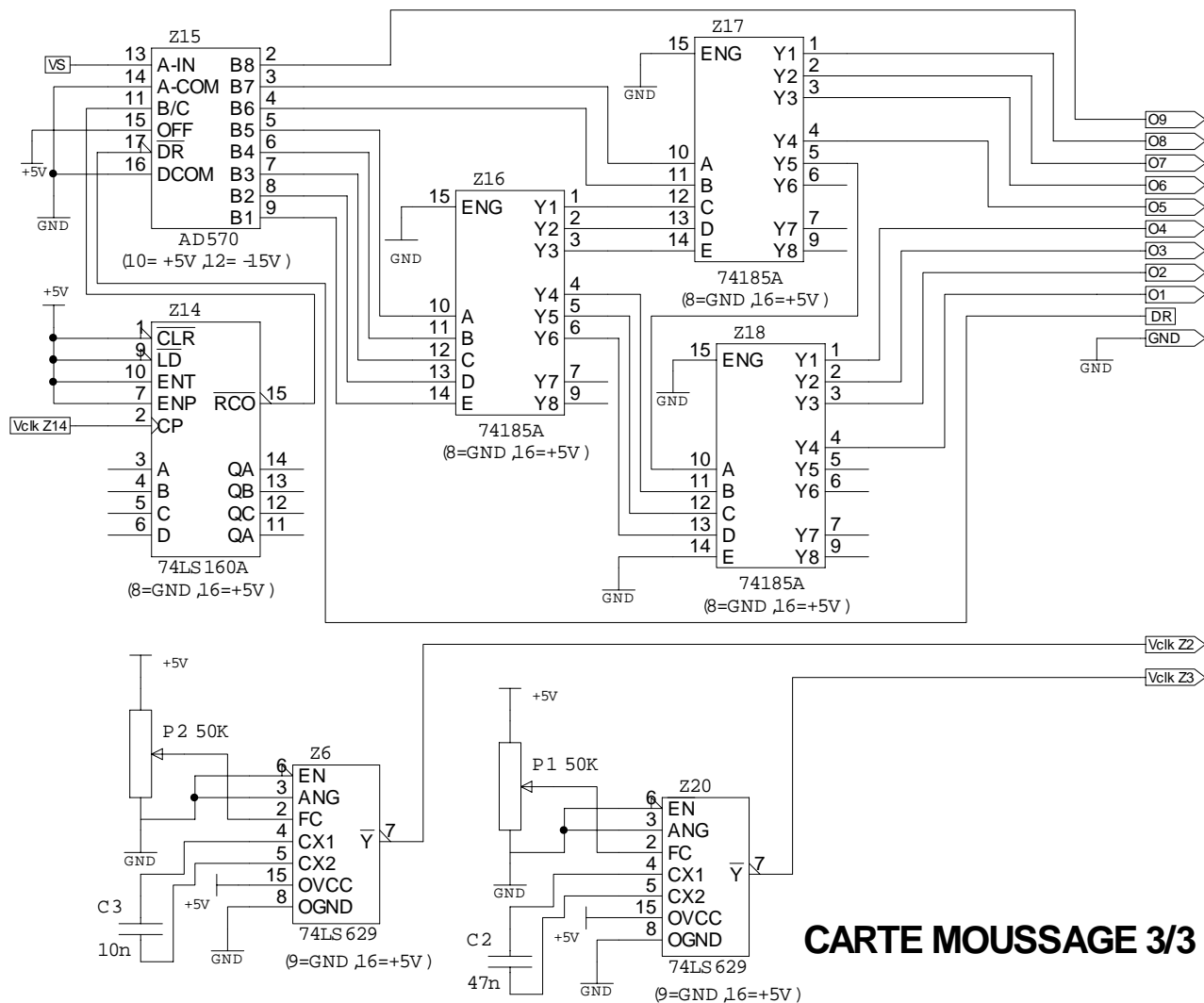




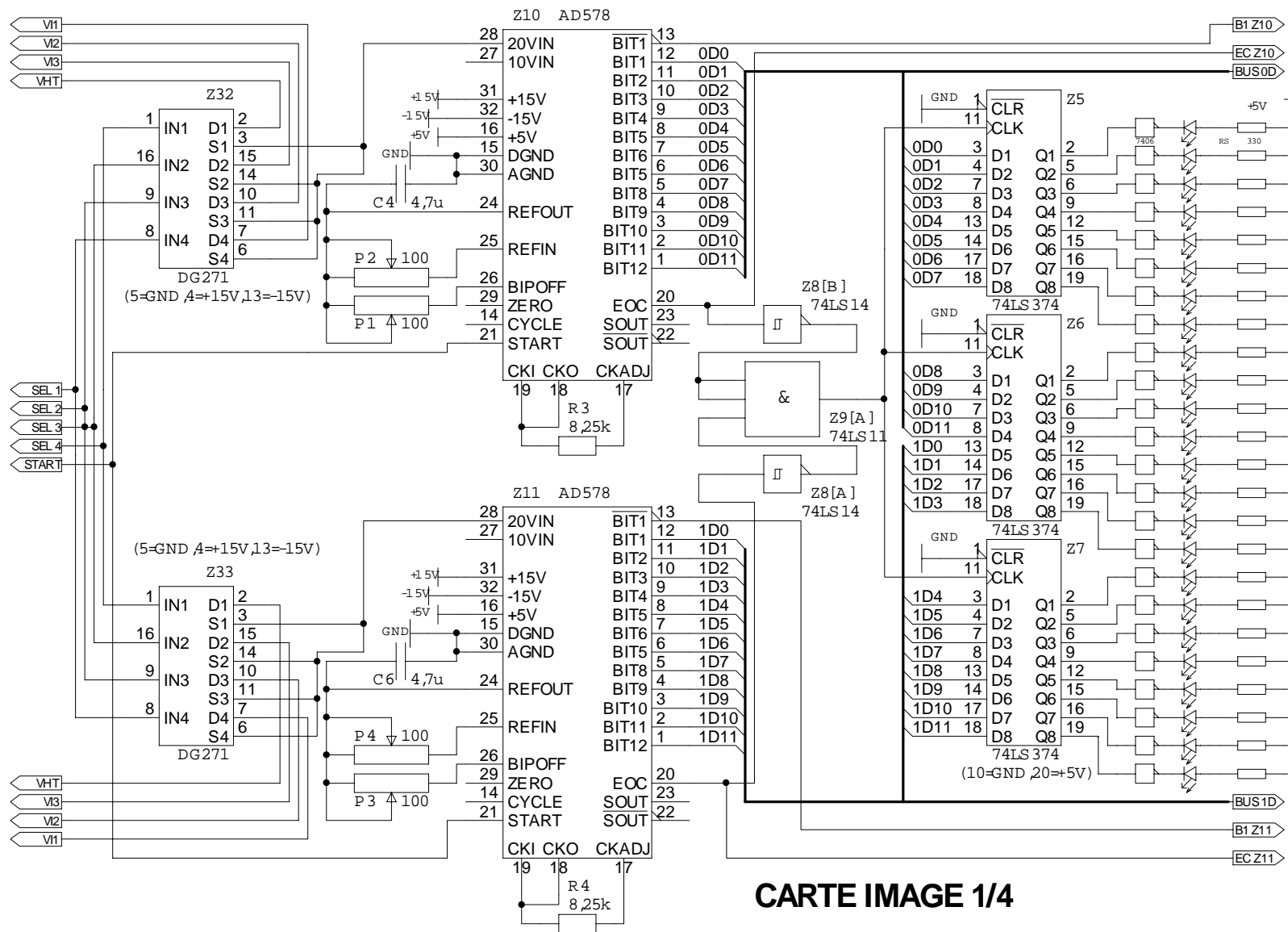
CARTE MOUSSAGE 1/3



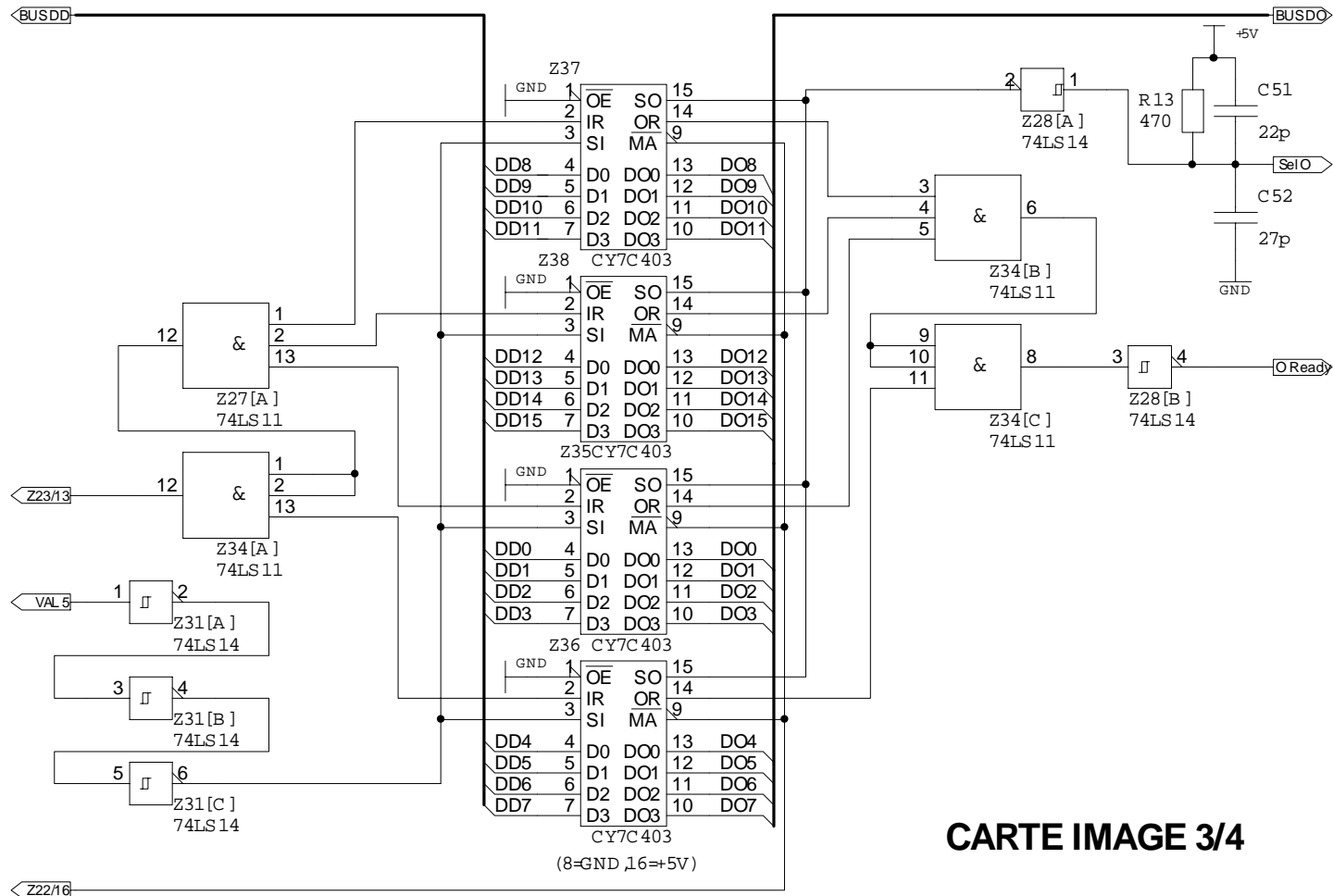
CARTE MOUSSAGE 2/3



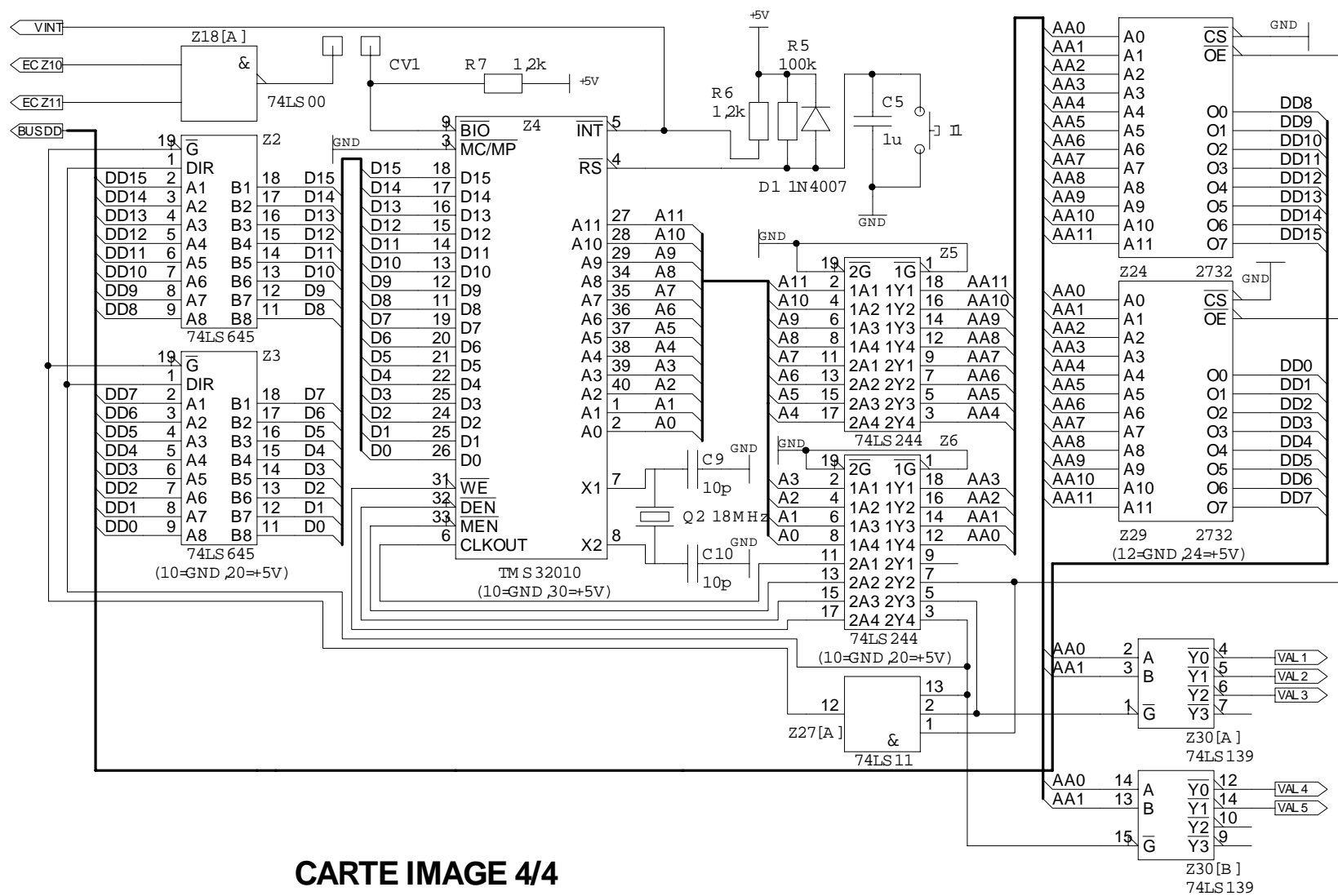
CARTE MOUSSAGE 3/3



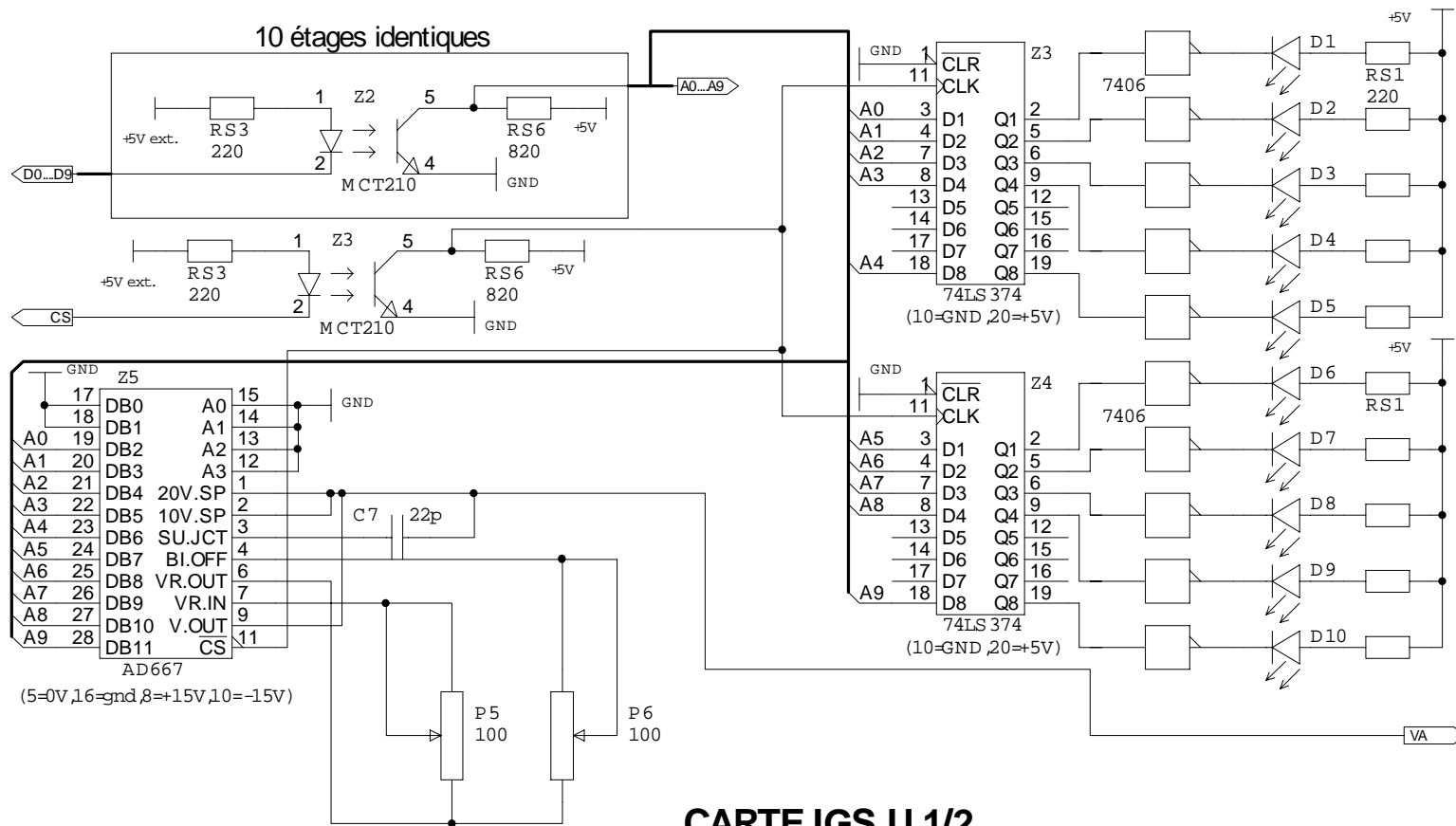
CARTE IMAGE 1/4



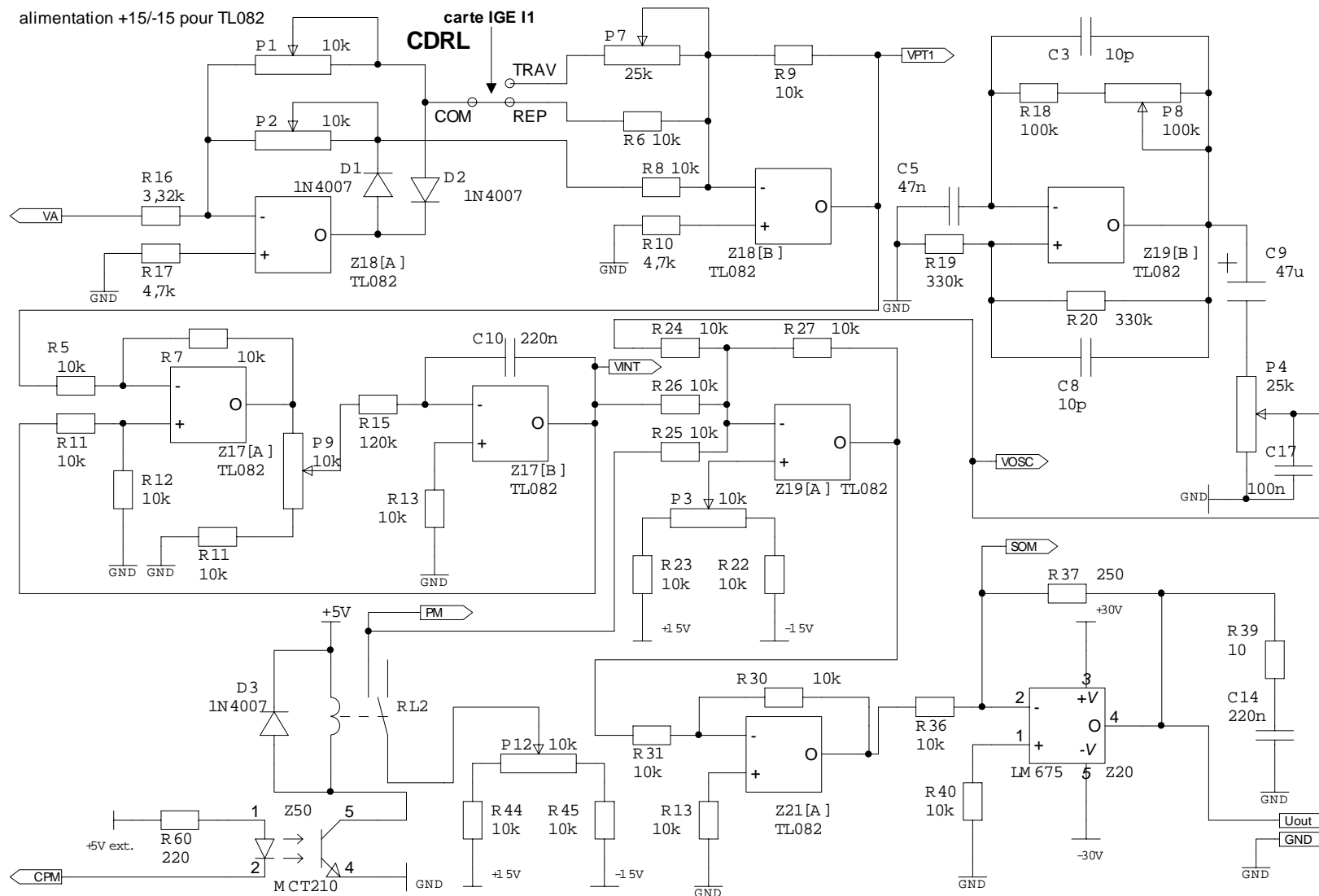
CARTE IMAGE 3/4



CARTE IMAGE 4/4



CARTE IGS U 1/2



CARTE IGS U 2/2