

TITRE : Détonateur électronique sans fil comportant un commutateur de mise sous tension piloté par un signal optique, système de détonation sans fil et procédé d'activation d'un tel détonateur.

- 5 La présente invention concerne un détonateur électronique sans fil.
- L'invention concerne également un système de détonation sans fil ainsi qu'un procédé d'activation du détonateur électronique.
- On entend ici par procédé d'activation une mise sous tension ou hors tension du détonateur électronique, indépendamment de sa mise à feu.
- 10 L'invention trouve son application dans le domaine de l'initiation pyrotechnique, dans tout secteur où un réseau d'un ou plusieurs détonateurs doit traditionnellement être mis en œuvre. Des exemples typiques d'utilisation concernent l'exploitation des mines, carrières, l'exploration sismique, ou le secteur du bâtiment et des travaux publics.
- 15 Lors de leur utilisation, les détonateurs électroniques sont mis en place respectivement dans des emplacements aménagés pour les recevoir et destinés à être chargés en explosif. Ces emplacements sont par exemple des trous forés dans le sol. La mise à feu des détonateurs électroniques est réalisée ensuite selon une séquence prédéterminée.
- 20 Pour parvenir à ce résultat, un retard de mise à feu est associé individuellement à chaque détonateur électronique, et un ordre de tir commun est diffusé au réseau des détonateurs électroniques à l'aide d'une console de commande.
- Cet ordre de tir commun permet de synchroniser le décompte du retard de mise à feu pour l'ensemble des détonateurs électroniques.
- 25 A partir de la réception de l'ordre de tir, chaque détonateur électronique gère le décompte du retard de mise à feu spécifique qui lui est associé, ainsi que sa propre mise à feu.
- On connaît des détonateurs sans fil, activés par une console de commande à distance configurée pour communiquer par ondes radio avec les détonateurs, par
- 30 exemple pour échanger avec eux des commandes ou messages relatifs à leur état, ou pour leur adresser un ordre de mise à feu. L'indépendance énergétique est alors une condition importante à la réalisation d'un détonateur sans fil.
- Le document WO 2019/073148 décrit un détonateur électronique sans fil comportant une source d'énergie et des modules fonctionnels, ainsi que des premiers
- 35 moyens de commutation disposés entre la source d'énergie et les modules

fonctionnels, permettant de relier ou de ne pas relier la source d'énergie aux modules fonctionnels, et un module de commande des premiers moyens de commutation comportant un module de récupération d'énergie radio configuré pour recevoir un signal radio provenant d'une console de commande, récupérer l'énergie électrique dans ledit signal radio reçu, générer un signal de récupération d'énergie représentatif du niveau d'énergie électrique récupérée, et générer en sortie un signal de commande en fonction de l'énergie récupérée, ledit signal de commande pilotant lesdits moyens de commutation.

Ainsi, un signal radio est envoyé par la console de commande au détonateur. Côté détonateur, le principe consiste à récupérer l'énergie présente dans le signal radio à l'aide d'un système de réception adapté, c'est-à-dire le module de récupération d'énergie radio, afin de piloter un mécanisme d'interrupteur de mise sous tension. Cette solution offre notamment les avantages suivants :

- l'activation ne présente pas d'éléments mécaniques à manipuler, ce qui permet de concevoir un boîtier totalement étanche pour le détonateur, robuste aux conditions environnementales et aux manipulations, et ainsi augmenter la fiabilité du système ;
- l'activation du détonateur ne peut être effectuée que par une personne possédant la console de commande adéquate, limitant ainsi la possibilité d'être activé par une personne quelconque ne possédant pas l'équipement requis ;
- le système est simple et rapide d'utilisation : il suffit d'approcher la console d'activation du détonateur pour télé-alimenter le système d'interrupteur et démarrer un automate de contrôle du détonateur sans fil.

Ce système présente cependant des inconvénients.

Notamment, la portée du système de détonation par radio est assez limitée. En pratique, elle ne dépasse pas quelques dizaines de centimètres en raison des limitations de puissance radio imposées par la réglementation, ce qui est un frein pour une utilisation aisée.

De plus, il n'est pas toujours possible de cibler sans ambiguïté un détonateur particulier, surtout lorsque plusieurs détonateurs sont proches les uns des autres. Cette discrimination est cependant impérative, au risque d'associer un mauvais détonateur au plan de tir, ou d'assigner un retard de mise à feu erroné à un détonateur. Il existe des techniques basées sur la proximité, la directivité des antennes, ou l'estimation de distance entre console d'activation et détonateur, par exemple proposées dans le document WO 2019/073148, mais leur mise en pratique est délicate.

Dans ce contexte, un objectif de la présente invention est de surmonter au moins en partie les inconvénients précités, en pouvant en outre mener à d'autres avantages.

L'objet de la présente invention vise notamment à proposer une technique d'activation à distance offrant une solution plus efficace aux problèmes mentionnés ci-dessus.

En particulier, l'objet de la présente invention porte sur un système de contrôle d'un interrupteur, c'est-à-dire sur le mécanisme permettant d'activer, ou non, le détonateur.

A cet effet, est proposé selon un premier aspect de l'invention, un détonateur électronique sans fil comportant une source d'énergie primaire et au moins un module fonctionnel, un commutateur de mise sous tension, disposé entre la source d'énergie primaire et le module fonctionnel, configuré pour connecter ou déconnecter le module fonctionnel et la source d'énergie primaire, et un module de commande du commutateur de mise sous tension, **caractérisé en ce que** le module de commande du commutateur de mise sous tension comporte un récepteur optique configuré pour détecter et démoduler un signal lumineux émis par une console de commande et générer en sortie un signal de commande en fonction du signal lumineux démodulé, le signal de commande étant configuré pour au moins piloter le commutateur de mise sous tension.

Ainsi, le détonateur est configuré pour recevoir et démoduler le signal lumineux reçu de la console de commande (aussi appelée console de télé-activation).

Lorsque le signal lumineux est démodulé correctement, le commutateur de mise sous tension est activé et le reste de l'électronique du détonateur est mis sous tension.

La source d'énergie primaire est configurée pour alimenter les différents autres éléments du détonateur par le biais du commutateur de mise sous tension.

Elle comporte par exemple une source d'énergie embarquée, ou un module de récupération d'énergie combiné à un stockage local d'énergie, ou un module d'apport d'énergie raccordé par câble.

La source d'énergie primaire est par exemple aussi configurée pour transférer de l'énergie à un élément de stockage d'énergie dédié à la mise à feu d'une amorce explosive du module fonctionnel.

Le commutateur de mise sous tension peut être similaire à l'un des modes de réalisation présenté dans le document WO 2019/073148.

Le commutateur de mise sous tension comporte par exemple un interrupteur.

Selon l'invention, le détonateur comporte un module de commande du commutateur de mise sous tension c'est-à-dire un module de commande configuré pour piloter le commutateur de mise sous tension.

Ainsi, le module de commande est par exemple configuré pour recevoir une
5 commande de mise à feu et commander une mise à feu de l'amorce explosive en fonction de ladite commande de mise à feu.

Pour cela, le module de commande comporte principalement le récepteur optique.

Dans un exemple de réalisation privilégié, le récepteur optique comporte un
10 détecteur optique configuré pour détecter le signal lumineux émis par la console de commande et convertir le signal lumineux en un signal électrique.

Par exemple, le détecteur optique comporte une photodiode, éventuellement adjointe d'une résistance de détection.

Dans un exemple de réalisation privilégié, le détonateur comporte en outre un
15 démodulateur configuré pour démoduler le signal électrique.

Selon un exemple de réalisation, le démodulateur comporte un conditionneur analogique configuré pour transformer le signal électrique issu du détecteur optique, qui est analogique, en un signal numérique.

Le conditionneur analogique comporte par exemple au moins un filtre passe-
20 haut, configuré pour supprimer une composante statique du faisceau lumineux, voire un filtre passe-bande.

Selon un exemple de réalisation, le démodulateur comporte un module de traitements numériques configuré pour démoduler le signal numérique, par exemple afin de détecter la séquence binaire émise par la console de commande, et générer un
25 signal de commande pour piloter le commutateur de mise sous tension, par exemple en fonction de la séquence binaire.

Le module de traitements numériques comporte par exemple au moins un calculateur, et éventuellement un élément mémoire.

Un élément mémoire désigne ici aussi bien une mémoire classique qu'un
30 registre.

Par exemple, le signal reçu est corrélé avec un signal de référence, par exemple enregistré dans l'élément mémoire, de manière à détecter une séquence d'activation.

En fonction d'un résultat de la corrélation, le module de traitements numériques est configuré pour générer un signal de commande du commutateur de mise sous
35 tension.

Dans tous les cas, le récepteur optique présenté ici nécessite d'être alimenté.

Hors, idéalement, le système de détonation doit consommer le moins d'énergie possible, pour éviter de réduire l'autonomie du détonateur avant son utilisation sur le terrain, et préserver autant que possible l'énergie de la source d'énergie primaire.

5 La consommation doit donc être la plus réduite possible.

Les consommations du détecteur optique et du module de traitements numériques sont celles à réduire de manière prioritaire, pour viser une consommation du système de l'ordre de quelques microampères, si possible.

10 Le détecteur optique présente généralement une consommation qui est directement proportionnelle à l'éclairement.

Selon un premier exemple, le détonateur comporte avantageusement au moins un filtre optique en amont du détecteur optique, afin de réduire l'intensité de l'éclairage ambiant, sans réduire les performances de détection.

15 Un but est de maximiser la puissance lumineuse reçue correspondant au signal optique, tout en réduisant le plus possible la puissance reçue correspondant à l'éclairage ambiant.

Ceci permet de réduire le courant consommé par le détecteur optique lié à l'intensité de l'éclairage ambiant.

20 Selon un deuxième exemple, le détecteur optique comporte avantageusement un élément photovoltaïque.

Le détecteur est alors ici utilisé en mode photovoltaïque.

Pour cela, par exemple, il n'est pas polarisé par une tension d'alimentation.

Un montage de ce type permet de s'affranchir, possiblement totalement, de la consommation du détecteur optique.

25 La consommation est ainsi très bien maîtrisée, et est plus indépendante des conditions d'éclairement environnantes.

30 Selon un troisième exemple, le détonateur comporte un mode basse consommation configuré pour couper l'alimentation d'au moins le module de traitements numériques, ce qui permet de limiter la consommation électrique du système.

Ainsi, par exemple, sous un éclairage naturel, l'intensité lumineuse varie lentement, il n'y a donc aucune variation en sortie du conditionneur analogique, en raison du filtrage passe-haut.

Dès qu'une variation brusque d'éclairage survient, une transition apparaît en sortie du conditionneur analogique, utilisée pour réveiller le module de traitements numériques.

Cette fonctionnalité peut typiquement être implémentée grâce à un mode basse
5 consommation d'un microcontrôleur.

La consommation peut ainsi être réduite à moins d'un microampère (1 μ A).

Selon un quatrième exemple, afin d'éviter toute consommation résiduelle pendant une période de stockage du détonateur par exemple (laquelle peut durer plusieurs mois avant son utilisation), une coupure de l'alimentation du récepteur
10 optique dépendant du niveau d'éclairement est utilisée (« mode obscurité »).

Le détonateur comporte alors par exemple un module de coupure générale configuré pour couper une alimentation du récepteur optique.

Le module de coupure générale comporte par exemple un phototransistor à fort gain (par exemple 40 μ A / 100 Lux), éventuellement couplé à une résistance de
15 détection configurée pour détecter un niveau d'éclairement très faible, typiquement inférieur à 100 Lux, voire 80 Lux, voire 60 Lux, voire 40 Lux, voire 20 Lux, voire même 1 Lux.

Le détonateur, voire par exemple le module de coupure générale, comporte par exemple aussi un transistor, servant d'interrupteur, et la résistance de détection est
20 configurée pour piloter le transistor.

De cette manière, lorsque le détonateur est dans l'obscurité, stocké dans un carton par exemple, l'alimentation du récepteur optique est totalement coupée. La consommation est donc quasi nulle (excepté les courants de fuite du transistor et du phototransistor, négligeables).

25 Lorsque le détonateur est sorti du carton pour être utilisé, le module de coupure générale met sous tension le récepteur optique, le détonateur est alors en attente d'une activation optique provenant de l'utilisateur (via la console de commande).

Le module fonctionnel comporte ici par exemple au moins une amorce explosive.

Selon un exemple de réalisation intéressant, le module fonctionnel comporte en
30 outre un élément de stockage d'énergie dédié à la mise à feu de l'amorce explosive.

Par sécurité, le module fonctionnel comporte aussi avantageusement un commutateur d'isolation de l'élément de stockage d'énergie configuré pour activer ou désactiver le transfert d'énergie de la source d'énergie primaire vers l'élément de stockage d'énergie.

Aussi par sécurité, le module fonctionnel peut aussi comporter un dispositif de décharge, configuré pour décharger lentement l'élément de stockage d'énergie afin de revenir dans un état de sécurité en cas de mise hors tension du détonateur par exemple.

- 5 Selon une option intéressante, le module fonctionnel peut alors aussi comporter un commutateur de mise à feu configuré pour permettre un transfert d'énergie entre l'élément de stockage d'énergie dédié à la mise à feu et l'amorce explosive.

Selon un exemple de réalisation, le module fonctionnel comporte en outre un calculateur configuré pour piloter le fonctionnement du détonateur.

- 10 Le calculateur est par exemple relié, ou déconnecté, de la source d'énergie primaire via le commutateur de mise sous tension.

Ainsi, le calculateur est par exemple configuré pour recevoir un signal et commander une mise à feu de l'amorce explosive du module fonctionnel en fonction dudit signal.

- 15 Selon une autre option intéressante, le détonateur est configuré pour émettre un signal de retour lorsque le récepteur optique du détonateur a au moins détecté le signal lumineux émis par la console de commande.

L'utilisateur peut par exemple être averti que le signal lumineux émis par la console de commande a été au moins détecté par au moins le détonateur visé.

- 20 Ainsi, la mise sous tension du détonateur est réalisée par activation optique.

Par exemple, le détonateur est configuré pour émettre un signal de retour directement perceptible par l'utilisateur, par exemple un signal visuel ou sonore.

- 25 Selon un autre exemple, le détonateur est configuré pour émettre un signal de retour configuré pour être capté en conséquence par la console de commande, par exemple un signal radio.

Un tel détonateur présente au moins les mêmes avantages que l'état de l'art présenté précédemment, notamment :

- 30 - en termes de fiabilité : il permet de réaliser un boîtier étanche et de se dispenser d'élément mécanique, les risques de faux contact sont limités voire évités, etc.
- en termes de sécurité : il est nécessaire de posséder la console de commande (qui comporte la source lumineuse) adéquate pour activer le détonateur,
- ou encore en termes de facilité et rapidité de mise en œuvre : il n'est pas nécessaire de raccorder une console de commande physiquement et électriquement
- 35 au détonateur pour l'activer et l'activation se fait sans contact.

Et un tel détonateur présente aussi au moins l'avantage de procurer un mode opératoire simplifié grâce à la portée de la télé-activation : par exemple il n'est pas nécessaire d'utiliser un accessoire pour activer un détonateur, par exemple une perche pour activer un détonateur au sol sans se baisser, ou une nacelle pour activer un

5 détonateur positionné en hauteur dans une galerie souterraine.

Est également proposé, selon un deuxième aspect de l'invention, un système de détonation sans fil comportant un détonateur électronique sans fil, comportant au moins une partie des caractéristiques susmentionnées, et une console de commande configurée pour émettre un signal lumineux à destination dudit détonateur électronique

10 sans fil.

En pratique, un utilisateur dirige alors le signal lumineux en direction du détonateur qu'il souhaite activer.

Le système de détonation sans fil présente des caractéristiques et avantages analogues à ceux décrits précédemment en relation avec le détonateur électronique

15 sans fil.

De plus, un tel détonateur associé à une console de commande correspondante présentent en outre au moins les avantages suivants :

- En termes de portée : la portée est augmentée, permettant en pratique d'activer le détonateur à plusieurs mètres de distance, selon la luminosité ambiante et la

20 puissance de la source lumineuse.

- En termes de réglementation : le système n'est pas soumis à une réglementation contraignante comme pour le système d'activation par radio présenté dans l'état de l'art, ce qui permet de développer un système plus performant.

- En termes de sûreté : la console de commande permet de cibler précisément le

25 détonateur souhaité, et le pointage du faisceau lumineux peut être parfaitement visible de l'utilisateur si le signal est émis dans le domaine visible, ce qui évite toute ambiguïté.

- En termes de flexibilité : le système peut s'adapter à des cas d'utilisations qui diffèrent du cas normal. Une activation simultanée d'un groupe de détonateurs est en

30 effet possible, en utilisant une focale plus large permettant d'éclairer plusieurs détonateurs. Cette technique peut être bénéfique dans un contexte souterrain, ou lorsque le plan de tir a déjà été établi et que l'objectif est de mettre très rapidement sous tension une pluralité de détonateurs.

Dans un exemple de réalisation particulièrement commode, la console de commande comporte une source de lumière, configurée pour émettre le signal lumineux.

La source de lumière est de préférence configurée pour émettre un signal
5 lumineux dans le domaine visible, c'est-à-dire un signal lumineux ayant une longueur d'onde comprise entre environ 400-800 nm.

Toutefois, le signal lumineux peut aussi être émis dans l'infrarouge (IR) ou l'ultraviolet (UV) selon les besoins de l'application.

Les techniques employées sont identiques.

10 Par rapport au domaine visible, un signal lumineux émis dans l'IR ou l'UV n'est pas perceptible (visible) de l'utilisateur, ce qui peut rendre l'utilisation du système de détonation moins aisée, notamment pour cibler un détonateur précis.

Pour surmonter cette difficulté, le système de détonation comporte alors avantageusement un système d'aide au pointage.

15 Cependant, un système d'aide au pointage peut aussi être utile lorsqu'un signal dans le domaine visible est utilisé.

Par exemple, selon la puissance du faisceau optique ou si la luminosité ambiante est importante, le signal lumineux peut éventuellement être moins facilement perceptible.

20 La visée d'un détonateur est alors plus délicate pour l'utilisateur.

Dans un exemple pratique, la console de commande comporte un détecteur configuré pour détecter le signal de retour émis par le détonateur.

Selon une option intéressante, la console de commande comporte en outre un avertisseur configuré pour émettre un signal d'avertissement, par exemple visuel ou
25 sonore, permettant d'avertir l'utilisateur que le signal lumineux émis par la source de lumière a été au moins détecté par au moins le détonateur visé, ou dire que le signal de retour a bien été détecté par la console de commande.

La console de commande comporte alors par exemple une LED ou un buzzer.

Une telle configuration du système de détonation forme alors un système d'aide
30 au pointage.

Le détonateur est alors par exemple configuré pour émettre un retour lorsqu'il est illuminé par le faisceau de la console de commande.

Ainsi, dans un exemple de réalisation intéressant, la console de commande est configurée pour émettre un signal lumineux en continu, soit pendant une durée
35 prédéterminée, soit à la demande de l'utilisateur.

L'utilisateur illumine la zone dans laquelle se situe le détonateur, voire plus particulièrement le récepteur optique du détonateur, avec un mouvement de balayage.

Lorsque la séquence lumineuse attendue est détectée par le détonateur, un simple retour visuel, par exemple grâce à une LED, ou sonore, par exemple grâce à un buzzer, est déclenché par le détonateur.

Selon encore une autre option intéressante, la console de commande comporte en outre une focale configurée pour focaliser le signal lumineux vers au moins un détonateur.

La focale désigne ici une focale optique, dite réglable ou variable.

L'utilisation d'une telle focale permet une plus grande flexibilité du système.

Par exemple, une activation simultanée d'un groupe de détonateurs est alors possible, en utilisant une focale plus large permettant d'éclairer plusieurs détonateurs.

Cette technique peut être bénéfique dans un contexte souterrain, ou lorsque le plan de tir a déjà été établi et que l'objectif est de mettre très rapidement sous tension plusieurs ou la totalité des détonateurs.

En termes de sûreté, la focale utilisée sur la console de commande permet de cibler précisément le ou les détonateurs souhaités.

Dans un autre exemple de réalisation, la console de commande comporte en outre un modulateur configuré pour moduler le signal lumineux selon au moins un motif de modulation.

Ainsi, le signal lumineux peut être modulé avec un motif de modulation permettant de le distinguer de l'éclairage naturel, ou artificiel, ambiant, afin d'éviter que le détonateur ne se mette sous tension de manière intempestive.

Ainsi, avantageusement, le signal lumineux modulé comporte au moins une séquence d'activation.

Un avantage du système de détonation utilisant une modulation optique est alors qu'il est possible d'utiliser le signal modulé pour envoyer des données numériques utiles au détonateur.

Il permet par exemple :

- De transférer directement le retard de mise à feu au détonateur lors de son activation par voie optique.
- De fournir l'identifiant de la console par laquelle le détonateur a été activé ou l'identifiant de la console de mise à feu qui sera utilisée, ce qui permet à plusieurs équipes de déployer simultanément des réseaux de détonateurs sur la même zone.

- De fournir un code de mise à feu spécifique au détonateur, permettant d'éviter toute mise à feu accidentelle de détonateurs ne possédant pas le code spécifié.

Ainsi, par exemple, le signal lumineux modulé comporte une séquence de données configurée pour envoyer des instructions au détonateur, par exemple une
5 valeur de retard, et/ou un identifiant, et/ou un code de mise à feu, ou autres.

La séquence de données est transmise après la séquence d'activation dans le signal lumineux.

De plus, dans le cas d'un faisceau lumineux émis dans le visible, le détonateur visé est visuellement identifié par l'utilisateur et les informations peuvent difficilement
10 être interceptées ou brouillées, rendant le système plus sûr.

Selon encore une autre option intéressante, le signal lumineux modulé comporte un signal d'arrêt.

Afin de remplir la même fonction qu'un interrupteur manuel, le système de détonation utilisant une modulation optique permet de préférence de mettre hors
15 tension un détonateur.

Ceci offre un niveau de sécurité supplémentaire, dans le cas par exemple où un abandon du tir serait décidé, ou simplement pour arrêter un détonateur mis sous tension par erreur.

En vue d'utiliser cette fonction arrêt, deux séquences différentes peuvent être
20 utilisées : une séquence pour la mise sous tension, une autre séquence pour la mise hors tension.

En conséquence, la console de commande comporte par exemple un module de sélection, configuré pour permettre à l'utilisateur de sélectionner une séquence ou l'autre (c'est-à-dire une séquence d'activation ou une séquence d'arrêt).

Enfin, est proposé, selon un troisième aspect, un procédé d'activation d'un
25 détonateur électronique sans fil comportant une source d'énergie primaire, au moins un module fonctionnel, un commutateur de mise sous tension, disposé entre la source d'énergie primaire et le module fonctionnel, configuré pour connecter ou déconnecter le module fonctionnel et la source d'énergie primaire, et un module de commande du
30 commutateur de mise sous tension.

Selon l'invention, le procédé comporte les étapes suivantes :

- Réception d'un signal lumineux ;
- Démodulation du signal lumineux reçu ;

- Génération d'un signal de commande, en fonction du signal lumineux démodulé, le signal de commande étant configuré pour au moins piloter le commutateur de mise sous tension.

5 Ainsi, le module fonctionnel du détonateur électronique est activé, ou mis sous tension, via le commutateur de mise sous tension, disposé entre la source d'énergie primaire et le module fonctionnel qui est commandé par un signal de commande généré lorsque le signal lumineux démodulé correspond à au moins des instructions d'activation du détonateur électronique.

10 Le procédé d'activation présente des caractéristiques et avantages analogues à ceux décrits précédemment en relation avec le détonateur électronique sans fil et le système de détonation sans fil.

Selon un mode de mise en œuvre intéressant, l'étape de réception d'un signal lumineux comporte une étape de détection d'un signal lumineux et une étape de conversion du signal lumineux en un signal électrique.

15 Selon un mode de mise en œuvre intéressant, l'étape de démodulation comporte une étape de transformation du signal électrique en un signal numérique et une étape d'identification d'au moins une séquence d'activation dans le signal numérique.

Si une séquence d'activation est identifiée, alors l'étape de génération d'un signal de commande comporte une étape d'activation du commutateur de mise sous tension.

20 Par exemple, si le signal numérique correspond à un signal de référence comportant au moins une séquence d'activation, le commutateur de mise sous tension est activé.

On entend ici par activation une mise sous tension ou hors tension du détonateur électronique, indépendamment de sa mise à feu, autrement dit son pilotage.

25 Selon une option intéressante, l'étape de démodulation comporte en outre une étape d'identification d'au moins une séquence de données dans le signal numérique.

Si une séquence de données est identifiée, alors l'étape de génération d'un signal de commande comporte une étape de génération d'instructions correspondant à la séquence de données.

30 Par exemple, une fois qu'un détonateur électronique est mis sous tension, un retard pour la mise à feu peut lui être associé.

Cette association peut être mise en œuvre immédiatement ou passé un temps après la mise sous tension.

Selon différents modes de réalisation, la mise sous tension et l'association du retard peuvent être réalisées avec la même console de commande ou avec des consoles de commande différentes.

5 Ainsi, le déploiement des détonateurs électroniques peut être réalisé de différentes façons.

En cas d'association de retard avec des consoles de commande différentes pour la mise sous tension et l'association de retard, la mise sous tension peut être réalisée au moment de l'installation, et l'association du retard peut être réalisée dans un second temps, une fois que l'ensemble des détonateurs a été mis sous tension.

10 En cas d'association différée du retard, l'ensemble des détonateurs électroniques est d'abord mis sous tension au moment de leur installation grâce à la console de commande. Ensuite, les détonateurs électroniques peuvent être mis en sommeil ou en état de veille avec une procédure de réveil périodique. Une fois l'ensemble des détonateurs électroniques installés et mis sous tension, des retards sont associés à
15 l'ensemble des détonateurs électroniques. Pour cela, les détonateurs électroniques peuvent être équipés d'un système de localisation quelconque (par exemple un GPS, un système mesurant des distances relatives ou des puissances reçues entre chaque détonateur électronique du réseau, nécessitant éventuellement une étape de post-traitement, ...). Les données brutes relatives à chaque détonateur électronique (par
20 exemple la position absolue, des distances relatives ou des puissances reçues, ...) sont collectées par exemple par radio avec la console de commande, afin de produire une cartographie du réseau de détonateurs électroniques avec leurs identifiants. Connaissant cette cartographie, il est alors possible d'associer un retard à chaque détonateur électronique.

25 Une incohérence observée entre un plan de tir prévu et la cartographie réelle des détonateurs électroniques peut être détectée, permettant la mise hors tension des détonateurs présentant cette incohérence.

Lorsque la mise sous tension et l'association du retard sont réalisées avec des consoles de commande différentes, ces deux opérations sont réalisées à des instants
30 éloignés dans le temps, allant de quelques minutes à plusieurs heures ou même plusieurs jours selon les cas. Des conditions de mise hors tension peuvent être considérées dans l'intervalle pour permettre au détonateur électronique de retourner dans un état hors tension. Par exemple, en cas de non sollicitation par signal lumineux au bout d'un certain délai, ou sans échange ou réception de messages avec la console

de commande lors d'opérations de réveil périodique du détonateur électronique, le module de traitements numériques peut mettre le détonateur électronique hors tension.

Au final, chacune de ces approches se termine par l'exécution d'une procédure de mise à feu classique.

5 L'invention, selon un exemple de réalisation, sera bien comprise et ses avantages apparaîtront mieux à la lecture de la description détaillée qui suit, donnée à titre indicatif et nullement limitatif, en référence aux dessins annexés dans lesquels :

[Fig. 1] la figure 1 schématise un système de détonation selon un exemple de réalisation de l'invention ;

10 [Fig. 2] la figure 2 représente un exemple de séquence pseudo aléatoire suivant un motif de modulation ;

[Fig. 3] la figure 3 représente un détonateur sans fil selon un exemple de réalisation de l'invention ;

[Fig. 4] la figure 4 schématise un exemple de réalisation d'un récepteur optique ;

15 [Fig. 5] la figure 5 illustre un premier exemple de réalisation d'un récepteur optique ;

[Fig. 6] la figure 6 représente de manière schématique un exemple de spectre d'émission d'une source lumineuse à base de LED en fonction de la longueur d'onde ;

20 [Fig. 7] la figure 7 représente de manière schématique la sensibilité spectrale d'une photodiode en fonction de la longueur d'onde ;

[Fig. 8] la figure 8 représente les caractéristiques spectrales d'un filtre résultant du spectre d'émission de la figure 6 et de la sensibilité de la photodiode de la figure 7 en fonction de la longueur d'onde ;

25 [Fig. 9] la figure 9 illustre un deuxième exemple de réalisation d'un récepteur optique ;

[Fig. 10] la figure 10 illustre un troisième exemple de réalisation d'un récepteur optique.

Les éléments identiques représentés sur les figures précitées sont identifiés par des références numériques identiques.

30 Selon un exemple de réalisation d'un aspect de l'invention schématisé figure 1, un système de détonation 10 comporte principalement :

- une console de commande 100 configurée pour émettre un signal lumineux modulé LU, et

35 - un détonateur 200, autonome en énergie, configuré pour détecter et démoduler le signal lumineux LU de la console de commande 100.

Selon un exemple de réalisation, la console de commande 100 comporte une source lumineuse modulée.

Comme schématisé sur la figure 1, la console de commande 100 comporte par exemple une source de lumière 110 configurée pour émettre un faisceau lumineux comportant un signal lumineux, et un modulateur 120 configuré pour moduler le signal lumineux selon au moins un motif de modulation.

La source de lumière 110 est de préférence configurée pour émettre un signal lumineux dans le domaine visible, c'est-à-dire un signal lumineux ayant une longueur d'onde comprise entre environ 400-800 nm.

Une source de lumière configurée pour émettre un signal dans l'infrarouge ou l'ultraviolet peut toutefois être utilisée, selon les besoins ou l'application visée.

Selon une option non représentée, la console de commande peut comporter en outre une focale variable, aussi dite réglable, configurée pour focaliser le signal lumineux vers un ou plusieurs détonateurs.

La console de commande peut alors activer un seul détonateur, par exemple si la focale est réglée pour transmettre un faisceau étroit, ou activer simultanément un groupe de détonateurs, si la focale est réglée pour transmettre un faisceau plus large permettant d'éclairer plusieurs détonateurs.

Selon une option intéressante, le détonateur est configuré pour émettre un signal de retour lorsqu'il est illuminé par le faisceau de la console de commande.

Le détonateur comporte par exemple un avertisseur visuel ou sonore.

Le détonateur peut aussi être configuré pour émettre un signal de retour configuré pour être capté en conséquence par la console de commande, par exemple un signal radio.

Selon au moins une autre option intéressante, la console de commande 100 peut aussi comporter un détecteur, configuré pour détecter un signal de retour émis par le détonateur, et un avertisseur, par exemple visuel ou sonore, configuré pour avertir l'utilisateur que le signal lumineux émis par la source de lumière 110 a été au moins détecté par au moins le détonateur visé, ou que le signal de retour a bien été détecté par la console de commande.

L'avertisseur, de la console de commande ou du détonateur, comporte par exemple une LED ou un buzzer.

Le système de détonation est alors doté d'un système d'aide au pointage.

La console de commande émet de préférence la séquence lumineuse en continu, soit pendant une durée prédéterminée, soit à la demande de l'utilisateur.

L'utilisateur illumine la zone dans laquelle se situe le détonateur 200, voire plus particulièrement un récepteur optique 220 du détonateur 200 (décrit ci-après), avec un mouvement de balayage.

Lorsque la séquence lumineuse attendue est détectée par le détonateur, un
5 simple retour visuel, par exemple grâce à une LED, ou sonore, par exemple grâce à un buzzer, est déclenché par le détonateur.

La figure 2 représente un exemple de motif de modulation M utilisé pour moduler le signal lumineux LU émis par la console de commande 100.

Il s'agit en particulier sur cette figure d'une séquence pseudo aléatoire modulée
10 OOK (On/Off Keying), mais d'autres types de modulations optiques peuvent être envisagés.

Une modulation de type OOK présente l'avantage d'être simple à mettre en œuvre, et peu complexe à démoduler, ce qui permet de limiter le coût du détonateur.

De préférence, une séquence pseudo-aléatoire connue du récepteur est utilisée
15 pour moduler le signal optique émis par la console, afin de pouvoir la distinguer avec un minimum d'erreur possible d'une lumière naturelle ou artificielle (certains éclairages artificiels présentent en effet un signal haché en forme de créneau).

La taille de la séquence pseudo-aléatoire doit être suffisamment longue, typiquement supérieure à 32 bits, afin d'éviter des fausses alarmes.

20 De préférence, une rapidité (fréquence) de modulation est typiquement comprise entre 100 Hz et 10 kHz.

Cette valeur est suffisante pour ne pas être trop sensible aux mouvements de l'utilisateur, et n'est pas trop élevée pour pouvoir limiter le coût du récepteur 220 en utilisant par exemple une photodiode 231 (schématisée figure 5) de performances
25 limitées.

Cet exemple n'est pas limitatif. D'autres type de modulation, d'autres type de séquences, d'autres rapidités de modulation pourraient être utilisés.

Un autre avantage du système par modulation optique est de pouvoir utiliser le signal lumineux modulé pour transmettre des informations, c'est-à-dire des données
30 numériques, utiles au détonateur, par la voie optique.

Pour cela, au niveau de la console de commande, le signal lumineux modulé LU comporte par exemple préférentiellement une séquence d'activation présentant de bonnes propriétés d'autocorrélation, typiquement une séquence de Kasami.

Ceci permet au récepteur, i.e. le détonateur, de se synchroniser convenablement
35 sur le signal reçu afin d'en extraire les données.

La séquence de données comporte par exemple des données binaires qui sont simplement concaténées à la suite de la séquence d'activation.

Le message envoyé par la console de commande comporte par exemple les séquences suivantes : [séquence d'activation] – [séquence de données].

- 5 La séquence de données est configurée pour envoyer par exemple une valeur de retard, et/ou un identifiant, et/ou un code de mise à feu, ou autres.

 Selon un exemple, un contrôle d'intégrité de type CRC (Cyclic Redundancy Check) peut optionnellement être ajouté au message, afin de pouvoir contrôler le résultat de la démodulation de la séquence de données au niveau du détonateur (i.e. du récepteur).

 Le message envoyé par la console de commande comporte alors par exemple les séquences suivantes : [séquence d'activation] – [séquence de données] – [séquence de contrôle].

 Selon un autre exemple, il serait aussi possible d'ajouter un code correcteur.

- 15 Le message envoyé par la console de commande comporte alors par exemple les séquences suivantes : [séquence d'activation] – [séquence de données] – [séquence de contrôle] – [séquence de correction].

 Ainsi, selon un exemple de mise en œuvre, il est possible d'utiliser un code en bloc de type « Hamming », qui comporte une séquence de données et une séquence de correction.

 Côté récepteur, i.e. côté détonateur, des techniques de démodulation numérique classiques peuvent être utilisées.

 La séquence d'activation permet de synchroniser le récepteur sur le début du message envoyé.

- 25 Un simple échantillonnage régulier, ou une détection de front, permet ensuite de démoduler le contenu du message.

 Selon encore une autre option intéressante, le signal lumineux modulé LU comporte un signal d'arrêt.

- 30 Afin de remplir la même fonction qu'un interrupteur manuel, le système de détonation utilisant une modulation optique permet de préférence de mettre hors tension un détonateur.

 Ceci offre un niveau de sécurité supplémentaire, dans le cas par exemple où un abandon du tir serait décidé, ou simplement pour arrêter un détonateur mis sous tension par erreur.

En vue d'utiliser cette fonction arrêt, deux séquences différentes peuvent être utilisées : une séquence pour la mise sous tension, une autre séquence pour la mise hors tension.

Les deux séquences sont de préférence quasi-orthogonales, afin de limiter les
5 risques de mauvaise détection de la séquence émise.

Par exemple, deux séquences de Kasami différentes permettent de remplir cette condition.

Une variante peut être d'utiliser le signe de la séquence : émise normalement la séquence conduit à un pic de corrélation positif pour la mise en route, mais émise de
10 façon inversée, elle donne alors un pic de corrélation négatif, par exemple pour l'arrêt.

Au final, un seul corrélateur est nécessaire, seul le signe du résultat faisant la différence.

Des séquences de Kasami sont toutefois privilégiées car elles donnent un résultat proche de 0 pour une intercorrélation, quel que soit le décalage entre les
15 séquences.

En conséquence, la console de commande doit permettre à l'utilisateur de sélectionner une séquence ou l'autre (c'est-à-dire une séquence d'activation ou une séquence d'arrêt).

Au niveau du récepteur, un module de traitements numériques du récepteur
20 optique du détonateur (décrit ci-après) est par exemple configuré pour détecter une séquence ou l'autre. Des traitements de corrélation sont par exemple dupliqués, en utilisant alternativement une séquence puis l'autre comme séquence de référence.

La figure 3 représente un exemple de réalisation d'un détonateur 200.

Le détonateur 200 selon l'invention, autonome en énergie, comporte
25 principalement ici un module de commande 210 qui inclut un récepteur optique 220 configuré pour activer le détonateur par voie optique.

Le récepteur optique 220 permet notamment de démoduler le faisceau lumineux LU envoyé par la console 100, et générer un signal de commande du commutateur de mise sous tension 240.

30 En outre, le détonateur 200 comporte par exemple ici les éléments suivants :

- Une source d'énergie primaire 230 (par exemple une source d'énergie embarquée, ou un module de récupération d'énergie combiné à un stockage local d'énergie, ou un module d'apport d'énergie raccordé par câble), permettant d'alimenter les différents autres éléments du détonateur par le biais d'un commutateur de mise

sous tension 240 et de transférer de l'énergie à un élément de stockage d'énergie 253 dédié à la mise à feu d'une amorce explosive 256.

- Le commutateur de mise sous tension 240, par exemple comportant un interrupteur K10, permettant de maîtriser la mise sous tension de différents éléments électroniques d'un module fonctionnel 250 à partir de la source d'énergie primaire 230. Ce commutateur de mise sous tension 240 peut être similaire à l'un des modes de réalisation présenté dans le document WO 2019/073148.

- Et le module fonctionnel 250.

Le module fonctionnel 250 comporte ici par exemple les éléments électroniques suivants :

- Un calculateur 251 permettant de piloter le fonctionnement du détonateur électronique. Le calculateur 251 est relié, ou déconnecté, de la source d'énergie primaire 230 via le commutateur 240 de mise sous tension.
- L'élément de stockage d'énergie 253 dédié à la mise à feu de l'amorce explosive 256.
- Un commutateur 252 d'isolation de l'élément de stockage d'énergie, comportant par exemple un interrupteur K20, permettant d'activer ou désactiver le transfert d'énergie de la source d'énergie primaire 230 vers l'élément de stockage d'énergie 253, indépendamment du transfert d'énergie de la source d'énergie primaire 230 vers le calculateur 251.
- Un dispositif de décharge 254, formant un mécanisme de sécurité permettant une décharge lente de l'élément de stockage d'énergie 253 dédié à la mise à feu, afin de revenir dans un état de sécurité en cas de mise hors tension.
- Un commutateur de mise à feu 255, comportant par exemple un interrupteur K30, permettant le transfert de l'énergie entre l'élément de stockage d'énergie 253 dédié à la mise à feu et l'amorce explosive 256.
- Et l'amorce explosive 256.

Le récepteur optique 220 selon un exemple de réalisation est schématisé figure 4.

- Le récepteur optique 220 de la figure 4 comporte principalement :
- un détecteur optique 221, configuré pour convertir le signal lumineux LU reçu en un signal électrique ; et
 - un démodulateur 222 configuré pour démoduler le signal lumineux reçu et générer un signal de commande du commutateur de mise sous tension 240.
- Ici ; le démodulateur 222 comporte par exemple :

- un conditionneur analogique 223, configuré pour transformer le signal électrique du détecteur optique 221, qui est analogique, en un signal numérique ; et

- un module de traitements numériques 224, configuré pour démoduler le signal numérique afin de détecter la séquence binaire émise par la console de commande 100 et générer un signal de commande pour au moins piloter le commutateur de mise sous tension 240 en fonction de la séquence binaire.

Ici, le module de traitements numériques 224 et/ou le calculateur 251 sont par exemple configurés pour :

- gérer le fonctionnement du détonateur électronique 200 ;
- analyser les messages reçus par le biais de la console de commande 100 ;
- agir en fonction de la signification des messages reçus ;
- activer le stockage d'énergie dans l'élément de stockage d'énergie 253 pour la mise à feu ;
- effectuer le décompte du retard de mise à feu associé au détonateur électronique 200 ;
- activer le transfert d'énergie de l'élément de stockage d'énergie 253 à l'amorce explosive 24 à l'issue du décompte, via le commutateur de mise à feu 255 ;
- activer le dispositif de décharge 254 ;
- piloter le commutateur de mise sous tension 240 ;
- piloter le commutateur d'isolation de l'élément de stockage d'énergie 252...

La figure 5 représente un exemple de réalisation du récepteur optique 220 schématisé figure 4.

Le détecteur optique 221 comporte ici une photodiode 231 qui convertit le signal lumineux LU en courant électrique.

- Le détecteur optique 221 comporte aussi ici une résistance de détection 232 qui permet de traiter une tension, exploitable par le conditionneur analogique 223.

- La résistance de détection 232 est dimensionnée de manière à ce que le signal ne soit pas saturé sous forte luminosité, ce qui rendrait le système inopérant. A l'inverse une valeur trop faible réduit la dynamique du signal électrique, impliquant une diminution de la portée du système de détonation.

En supposant un éclairement maximal possible de E_{max} (typiquement 130 000 Lux), et une sensibilité de la photodiode 231 de S A/Lux, et une tension d'alimentation V_{dd} , la résistance de détection 232, de résistance notée R , doit vérifier la relation $V_{dd} = R \times S \times E_{max}$, pour être en limite de saturation sous éclairement maximal.

Le dimensionnement du couple [photodiode 231 - résistance de détection 232] détermine donc en grande partie les performances du système en termes de portée.

Le conditionneur analogique 223 comporte ici au moins un filtre passe-haut, afin de supprimer la composante statique liée à l'éclairage naturel et aux mouvements de l'utilisateur.

Il peut comporter un filtre passe-bande (ce qui correspond alors à un filtre passe-haut adjoint d'un filtre passe-bas) pour supprimer également d'éventuels perturbateurs haute fréquence.

Dans l'exemple d'implémentation représenté figure 5, le conditionneur analogique 223 comporte un filtre passe-bande (un couple R_1C_1 (résistance-capacité) sur une patte « + » (plus) d'un comparateur 233 détermine la fréquence haute et un couple R_2C_2 sur une patte « - » (moins), la fréquence basse) permettant de supprimer la composante statique du signal, liée au niveau d'éclairage ambiant.

Les signaux filtrés sont injectés dans le comparateur 233 pour obtenir un signal binaire en sortie de comparateur 233, donc en sortie du conditionneur analogique 223.

Le conditionneur analogique 223 comporte par exemple un comparateur et/ou un amplificateur opérationnel.

Enfin, le module de traitements numériques 224, dans lequel le signal numérique est injecté, comporte par exemple au moins un calculateur (typiquement un microcontrôleur ou un circuit numérique dédié), et éventuellement un élément mémoire.

Le signal reçu est corrélé avec le signal de référence attendu, de manière à détecter la présence d'un signal d'activation.

Le signal de référence attendu est possiblement préenregistré dans le module de traitements numériques 224.

A ce niveau, toute technique connue de démodulation d'un signal numérique peut être utilisée.

Lorsque la séquence d'activation est détectée, le module de traitements numériques 224 génère un signal de commande configuré pour piloter le commutateur de mise sous tension 240 en position active, par exemple en position fermée s'il s'agit d'un interrupteur, de manière à mettre sous tension les autres éléments du détonateur.

Ces fonctionnalités peuvent toutefois être réalisées différemment du mode de réalisation schématisé figure 5.

Par exemple, afin de mutualiser les ressources matérielles, il est par exemple possible de réaliser les traitements numériques dans le calculateur 251 du module

fonctionnel 250. L'architecture générale doit alors être légèrement revue, de manière à monter le calculateur 251 en amont du commutateur de mise sous tension 240.

Autrement dit, le calculateur 251 du module fonctionnel 250 et le module de traitements numériques 224 peuvent alors être regroupés en une seule entité, de
5 préférence localisée en amont du commutateur de mise sous tension 240, par exemple dans le récepteur optique 220.

En outre, une partie du calculateur peut rester « inactive » (en mode basse consommation), tant que la séquence lumineuse n'a pas été reçue.

Il est aussi possible d'utiliser d'autres stratégies pour démoduler le signal
10 lumineux, qui conduisent à une architecture matérielle différente du récepteur optique 220. Par exemple, le conditionneur analogique 223 pourrait être remplacé par une numérisation à l'aide d'un CAN (Convertisseur Analogique Numérique) du signal brut issu du détecteur optique, qui peut ensuite être traité directement par le calculateur du module de traitements numériques 224.

15 Dans tous les cas, le récepteur optique présenté nécessite d'être alimenté.

Hors, idéalement, le système de détonation doit consommer le moins d'énergie possible, pour éviter de réduire l'autonomie du détonateur avant son utilisation sur le terrain.

La consommation doit donc être la plus réduite possible pour que le système ait
20 un intérêt pratique le meilleur possible.

Le détecteur optique 220 présente généralement une consommation qui est directement proportionnelle à l'éclairement.

Typiquement, pour une photodiode ayant une sensibilité de 40 nA / 100 Lux, la consommation est de 52 μ A sous un ensoleillement maximal de 130 000 Lux.

25 La consommation du conditionneur analogique 223 se situe typiquement entre 1 μ A et 30 μ A en fonction du comparateur ou de l'amplificateur opérationnel utilisé.

Le choix d'un comparateur 233 ayant un produit [gain x bande-passante] réduit permet de sélectionner des composants dont la consommation se situe autour du microampère (μ A).

30 Cela se fait au détriment de la rapidité de modulation permise, mais ce n'est pas un élément critique du système.

Enfin, le module de traitements numériques 224 consomme typiquement plusieurs milliampères lorsque les traitements sont effectués.

Les consommations du détecteur optique 221 et du module de traitements numériques 224 sont donc celles à réduire de manière prioritaire, pour viser une consommation de l'ordre de quelques microampères, si possible.

Une première approche consiste alors par exemple à ajouter un filtre optique
5 devant la photodiode 231 du détecteur optique 221, afin de réduire l'intensité de l'éclairage ambiant, sans réduire les performances de détection.

Un but est de maximiser la puissance lumineuse reçue correspondant au signal optique, tout en réduisant le plus possible la puissance reçue correspondant à l'éclairage ambiant.

10 Ceci permet de réduire le courant consommé par le détecteur optique lié à l'intensité de l'éclairage ambiant.

La source lumineuse de la console de commande 100 présente un spectre d'émission bien particulier (Fig. 6), et la photodiode 231 a une sensibilité spectrale caractéristique (Fig. 7).

15 Ces deux éléments se comportent donc comme des étages de filtrage de gain $G_{tx}(\lambda)$ et $G_{rx}(\lambda)$, dépendant de la longueur d'onde λ du signal lumineux émis par la console de commande 100.

La puissance optique P_{rx} convertie par la photodiode 231 en puissance électrique s'exprime donc en fonction de la puissance P_{tx} émise par la console, de
20 l'atténuation liée à la distance R , de l'angle solide éclairé Ω , et des gains respectifs G_{tx} et G_{rx} , selon la formule suivante :

$$P_{rx} = [(G_{rx}.G_{tx}) / \Omega R^2].P_{tx}$$

Pour une distance et une focale donnée, la puissance reçue est maximale lorsque le gain ($G_{tx}.G_{rx}$) est maximal, c'est-à-dire pour une longueur d'onde λ donnée
25 (Fig. 8).

L'ajout d'un filtre supplémentaire autour de cette longueur d'onde permet ainsi de maximiser la réception à cette longueur d'onde, et réduire la réception sur les autres longueurs d'onde, ce qui correspond au but recherché.

La largeur optimale du filtre optique est alors calculée en fonction de la réponse
30 du filtre par rapport à la lumière naturelle, que l'on cherche à réduire.

En pratique il est ainsi possible de réduire d'un facteur 3 la consommation du détecteur optique.

Une deuxième approche consiste par exemple à utiliser l'effet photovoltaïque d'un photodétecteur 234 pour le détecteur optique 221.

Le photodétecteur 234 est ici utilisé en mode photovoltaïque, comme dans le montage schématisé figure 9.

Pour cela, il n'est pas polarisé par une tension d'alimentation.

Une photodiode comme dans l'exemple précédent ne permet pas de générer un
5 courant suffisant pour être exploitable. Il est nécessaire d'augmenter la surface de l'élément photosensible, en utilisant un panneau photovoltaïque de dimensions réduites, ou plusieurs photodiodes en parallèle.

Ce montage permet de s'affranchir, possiblement totalement, de la consommation du détecteur optique.

10 La consommation est ainsi très bien maîtrisée, et est plus indépendante des conditions d'éclairement environnantes.

Selon une troisième approche, il est aussi possible de couper l'alimentation du module de traitements numériques afin de limiter la consommation.

Par exemple, le module de traitements numériques 224 comporte un mode
15 basse consommation qui permet de couper l'horloge et éventuellement l'alimentation de l'électronique numérique.

On utilise par exemple la présence d'un changement d'état sur le signal numérique en sortie du comparateur pour sortir le système du mode basse consommation.

20 Ainsi, sous un éclairage naturel, l'intensité lumineuse varie lentement, il n'y a donc aucune variation en sortie du conditionneur analogique, en raison du filtrage passe-bas.

Dès qu'une variation brusque d'éclairage survient, une transition apparaît en sortie du conditionneur analogique, utilisée pour réveiller le module de traitements
25 numériques.

Cette fonctionnalité peut typiquement être implémentée grâce à un mode basse consommation d'un microcontrôleur.

La consommation peut ainsi être réduite à moins d'un microampère (1 μ A).

Selon une quatrième approche, afin d'éviter toute consommation résiduelle
30 pendant une période de stockage du détonateur par exemple (laquelle peut durer plusieurs mois avant son utilisation), une coupure générale de l'alimentation dépendant du niveau d'éclairement est utilisée (« mode obscurité »).

Comme l'illustre la figure 10, on utilise un étage de détection supplémentaire du niveau d'éclairement, avec un réglage permettant de saturer volontairement le signal
35 de sortie dès l'apparition d'un niveau d'éclairement très faible.

Pour cela, l'étage de détection supplémentaire du niveau d'éclairement comporte par exemple un phototransistor à fort gain 235 (par exemple 40 μ A / 100 Lux) et une résistance de détection 237 dont une valeur de réglage permet une détection d'un niveau d'éclairement très faible, typiquement quelques dizaines de Lux.

- 5 La tension aux bornes de la résistance de détection 237 permet de piloter un transistor 236 servant d'interrupteur.

Ainsi, l'étage de détection optique 221 reste inchangé. Un étage supplémentaire en amont de ce dernier (mais basé sur le même principe) est ajouté, cet étage supplémentaire présentant un réglage différent de l'étage de détection optique.

- 10 De cette manière, lorsque le détonateur est dans l'obscurité, stocké dans un carton par exemple, l'alimentation est totalement coupée. La consommation est donc quasi nulle (excepté les courants de fuite du transistor 236 et du phototransistor 235, négligeables).

- 15 Lorsque le détonateur est sorti du carton pour être utilisé, l'étage de coupure générale met sous tension le récepteur optique 220, le détonateur est alors en attente d'une activation optique provenant de l'utilisateur (via la console de commande).