

La Radiologia Medica - Radiol Med 105: 1-10, 2004
Edizioni Minerva Medica - Torino

Cardio-RM con tecnologia SENSE

Studio della funzionalità ventricolare e valvolare in 30 pazienti

Giulio SODANI¹ - Francesco SCIUTO¹ - Mauro DI ROMA¹
Andrea ROMAGNOLI¹ - Giampaolo NOVELLI¹
Ettore SQUILLACI¹ - Giovanni B. FORLEO²
Francesco ROMEO² - Orazio SCHILLACI¹
Giovanni SIMONETTI¹

Scopo. Ultima innovazione a disposizione per l'imaging RM è la tecnologia SENSE (SENSitivity Encoding). Essa prevede una importante soluzione del problema del tempo necessario alla codifica del segnale, sfruttando bobine con multipli elementi. In particolare l'efficacia della tecnologia SENSE permette di ridurre il numero delle codifiche di fase di un fattore (detto fattore R o fattore di Riduzione) e rilevare lo stesso spazio K mediante poche linee di lettura migliorando la risoluzione spaziale e riducendo i tempi di acquisizione.

Materiale e metodi. Un gruppo eterogeneo di 30 pazienti affetti da patologie precedentemente diagnosticate e clinicamente inquadrate, è stato sottoposto ad esame Cardio - RM utilizzando la tecnologia SENSE per valutarne l'efficacia diagnostica. In particolare sono state utilizzate delle Gradient-Echo ultraveloci di tipo "Balanced" (B-FFE) caratterizzate da un segnale iperintenso del sangue sia con pacchetto volumetrico multislice multiphase sia con acquisizioni unislice multiphase per la valutazione della dinamica valvolare.

Risultati. La tecnologia SENSE si è rivelata molto efficace nel migliorare la risoluzione spaziale rimanendo nei tempi di scansione consueti. Inoltre è stato possibile ottenere una elevata risoluzione temporale (40 frames/ciclo cardiaco) con ottimale valutazione della dinamica dei lembi valvolari e della cinesi parietale. Inoltre la combinazione della tecnologia SENSE con le sequenze B-FFE ha permesso di effettuare una consensuale valutazione qualitativa dei flussi transvalvolari patologici.

Conclusioni. Il notevole risparmio di tempo consentito dall'uso della tecnologia SENSE e il netto miglioramento della qualità delle immagini rappresentano un ulteriore importante avanzamento della RM nello studio del cuore. Sempre più realistica diviene l'ipotesi di poter effettuare in un'unica seduta RM una valutazione morfologica, dinamica, perfusionale e spettroscopica con tempi di esame accettabili e con una buona qualità delle immagini.

PAROLE CHIAVE: Cardio RM - SENSE - Funzionalità ventricolare - Funzionalità valvolare.

Cardiac MRI with SENSE technology: study of ventricular and valvular functionality in 30 patients

Purpose. The latest innovation in MR imaging is SENSE (SENSitivity Encoding), a technology providing an important solution for the time necessary for signal encoding. In the SENSitivity Encoding (SENSE) approach, an array of multiple, simultaneously operated receiver coils is used for signal acquisition. In particular, the efficacy of SENSE technology is able to reduce the number of phase encodings by a factor (named R factor or Reduction factor) and to evaluate the same k space with fewer readout lines obtaining higher spatial and temporal resolution.

Materials and methods. An heterogeneous group of 30 patients with a variety of clinically proven diagnoses underwent Cardiac MR with SENSE technology to evaluate the technique's diagnostic efficacy. The sequences used were "Balanced" Ultrafast Gradient Echo (B-FFE) characterised by a hyperintense blood signal with multislice multiphase and single slice multiphase acquisitions.

Results. In addition to reducing scan times, SENSE technology improved spatial and temporal resolution (40 frames/cardiac cycle) providing optimal dynamic evaluation of valve structures and wall kinesis. Furthermore, the use of the SENSE technique with B-FFE sequences (sB-FFE) enabled the qualitative evaluation of abnormal blood movements and transvalvular flows.

Conclusions. The considerable time savings allowed by SENSE technology and the clear improvement in image quality constitute a step forward in cardiac MR imaging. The possibility of executing morphologic, dynamic, perfusional and spectroscopic studies in the same MR examination session with short acquisition times and good image quality are becoming more feasible.

KEY WORDS: Cardiac MRI - SENSE - Ventricular functionality - Valvular functionality.

Introduzione

Negli ultimi anni, abbiamo assistito a importanti innovazioni nel campo della Risonanza Magnetica: sequenze con eco di Gradiente (Fast-Gradient Echo), sequenze Black-Blood (BB), la Cine-RM, e successivamente sequenze ultraveloci Echo-Planar-Imaging (EPI) che hanno consentito di ridurre notevolmente i tempi di acquisizione senza sostanziale perdita della risoluzione spaziale e di contrasto [1].

L'ultima innovazione oggi a disposizione in RM è una

Introduction

Over the past few years, the field of Magnetic Resonance imaging has undergone major developments: Gradient Echo sequences (Fast-Gradient Echo), Black-Blood sequences (BB), Cine-MRI, followed by ultrafast Echo-Planar-Imaging (EPI) sequences have considerably shortened acquisition times without substantially affecting spatial and contrast resolution [1].

The latest development in MR imaging is represented by

¹Dipartimento di Diagnostica per Immagini e Radiologia Interventistica; ²Cattedra di Cardiologia.

Pervenuto alla Redazione il 9.12.2002; revisionato il 27.1.2003; restituito corretto il 27.2.2003; accettato per la pubblicazione il 4.4.2003.

Indirizzo per la richiesta di estratti: Prof. E. Squillaci - PTV - Policlinico Tor Vergata - Viale Oxford, 81 - 00133 Roma RM - Tel. 06/20902401 - Fax 06/20902404 - E-mail: ettoresquillaci@tiscali.it

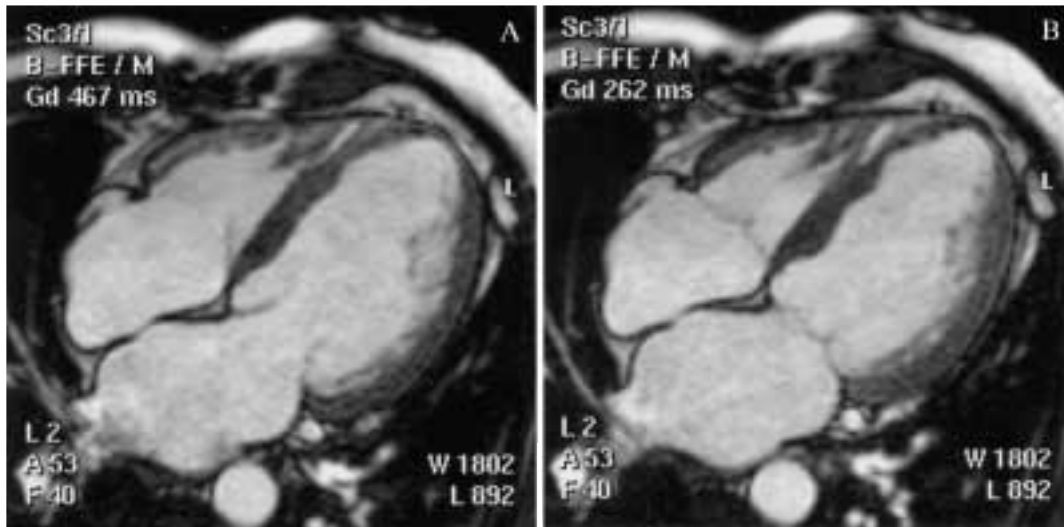


Fig. 1. — Cine cardio-RM: asse lungo 4 camere. Sequenze B-FFE (TA 20 s). Il vantaggio apportato dalla tecnologia SENSE è stato utilizzato, in questo caso, per ottenere immagini ad alta risoluzione spaziale e temporale (40 frames/s) rinunciando alla riduzione del TA: ottimale visualizzazione dell'apertura e chiusura dei lembi valvolari atrio-ventricolari.

Cine cardiac MRI: long axis 4 rooms. B-FFE sequences (TA 20"). SENSE advantage was used, in this case, to obtain spatial and temporal (40 frames/sec) high resolution images, without decreasing TA: excellent visualization of atrio-ventricular valvular lemls.

nuova tecnica di codifica del segnale, chiamata SENSE (SENSitivity Encoding). Essa prevede una importante soluzione del problema del tempo necessario alla codifica del segnale, sfruttando bobine con multipli elementi.

Scopo del presente lavoro è quello di valutare nelle applicazioni cliniche della Cardio-RM, l'efficacia della tecnologia SENSE per quanto riguarda l'aumento della risoluzione spaziale e la riduzione dei tempi di acquisizione con particolare attenzione ai possibili vantaggi nello studio della cinesi parietale e dinamica dei flussi [2].

Materiale e metodi

Tecnologia SENSE

La velocità dell'acquisizione dei dati in RM dipende dalla velocità di codifica che a sua volta è legata alla forza e ai tempi di risalita dei gradienti. Tuttavia i gradienti di ultima generazione sono talmente potenti da influenzare l'elettrofisiologia del paziente ai limiti della stimolazione nervosa ed un ulteriore potenziamento comporterebbe delle stimolazioni neurali non più accettabili.

La ricerca, sempre intenta ad ottenere un aumento della velocità di acquisizione, si è rivolta non più a migliorare la componente hardware, quanto piuttosto a studiare i meccanismi di codifica del segnale, aumentandone la velocità.

In tale direzione va inquadrata la novità tecnologica rappresentata dal SENSE che prevede l'utilizzo di una bobina costituita da multiple antenne di superficie riceventi il segnale contemporaneamente da più parti della superficie corporea.

La maggior parte delle tecniche di imaging RM di interesse clinico utilizza uno schema standard di eccitazione dei gradienti e di numerosi momenti di codifica di fase.

a new signal-encoding technique, named SENSE (SENSitivity Encoding), a technique that solves the problem of the time needed for signal encoding by employing multiple coil arrays.

The aim of this study was to evaluate the efficacy of SENSE technology in increasing spatial resolution and reducing acquisition time in cardiac MR imaging paying special attention to the possible advantages for the study of wall kinesis and flow dynamics [2].

Materials and methods

SENSE technology

The speed at which MR data are acquired depends on the speed of encoding which, in turn, depends on gradient amplitude and rise time. However, the latest gradients are so powerful as to affect the patient's electrophysiology and further enhancement could entail a risk of neural stimulation beyond acceptable levels.

As a result, research, which is always working to accelerate acquisition times, has shifted the focus from attempting to improve the hardware component to studying and increasing the speed of the signal-encoding mechanisms. One example of this new research direction is SENSE technology, which uses information from an array of simultaneously operated surface coils that receive signals from different parts of the body surface.

The majority of clinical MR imaging techniques employs a standard pattern of excitations and several phase-encoding steps. The SENSE technique reduces the number of phase-encoding steps by a factor (called factor R or Reduction factor) enabling evaluation of the same k space with fewer read-out lines.

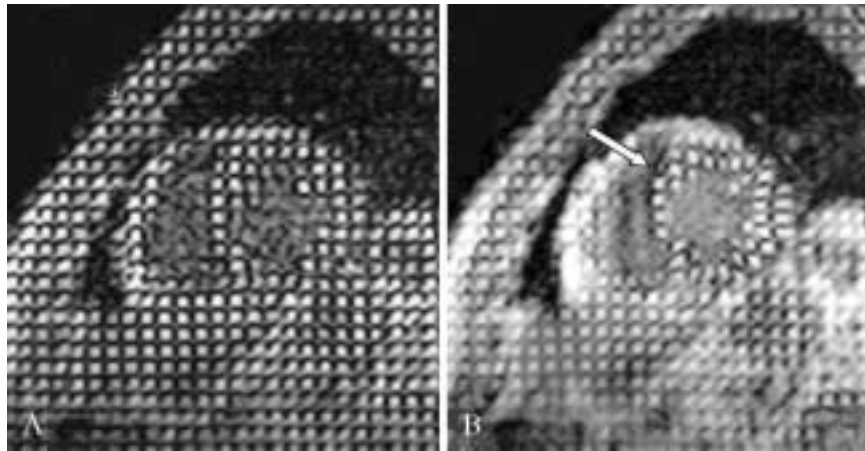


Fig. 2. — Cine Cardio-RM asse corto biventriolare. Sequenza EPI Miocardial Tagging. Assente deformazione della griglia nella zona settale, espressione di acinesia postinfartuale.

Cine Cardiac MRI: biventricular short axis. EPI sequence-Miocardial Tagging. Absence of grid deformation of the septum due to a regional post-ischemic akinesia.

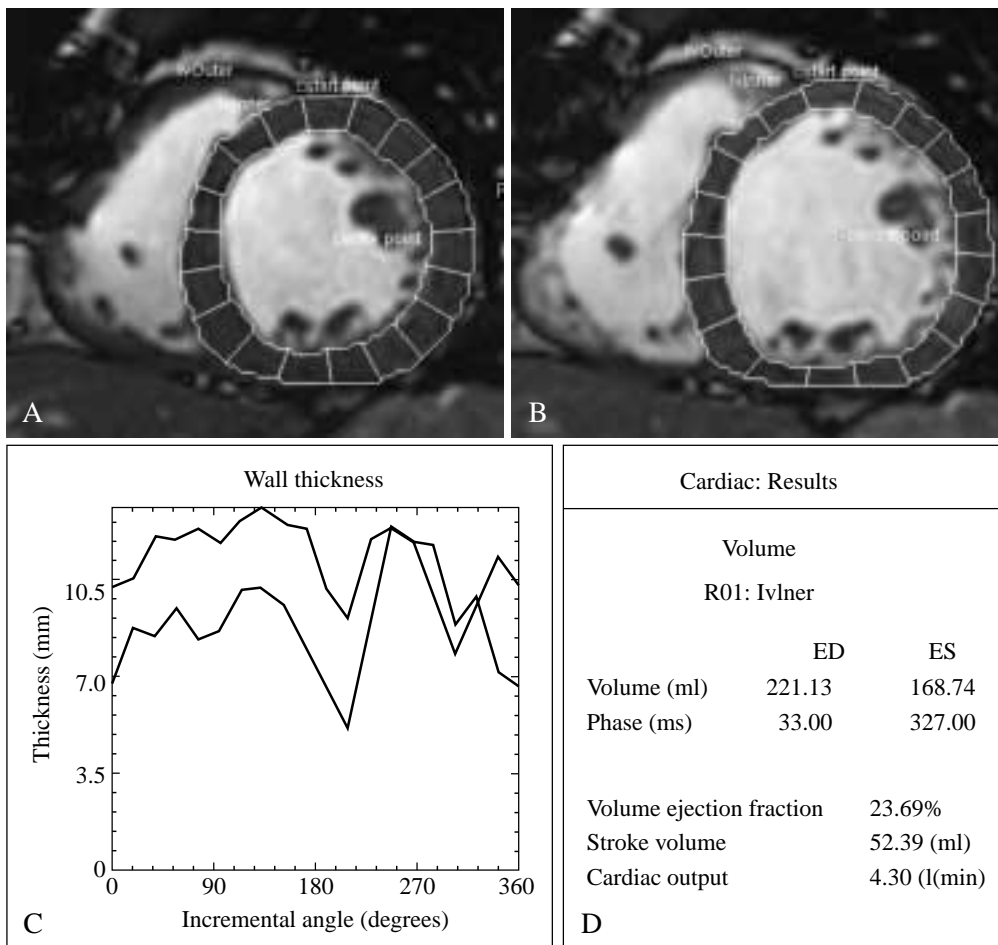


Fig. 3. — Stesso caso figura 2. La linea telesistolica (linea superiore) ricavata dall'immagine A presenta dei punti di contatto con la linea telediastolica (linea inferiore) ricavata dall'immagine B. Tale reperto è espressione di acinesia del segmento cardiaco 250°-320°, corrispondente al setto interventricolare (C). Si noti il valore notevolmente ridotto della Frazione di Eiezione (D).

Same case of figure 2. Telesystolic line (superior line) from image A has different points of contact with telediastolic line (inferior line) from image B as 250°+320° systolic segment akinesia, corresponding to interventricular septum (C). Note the lower value of Volume Ejection Fraction.

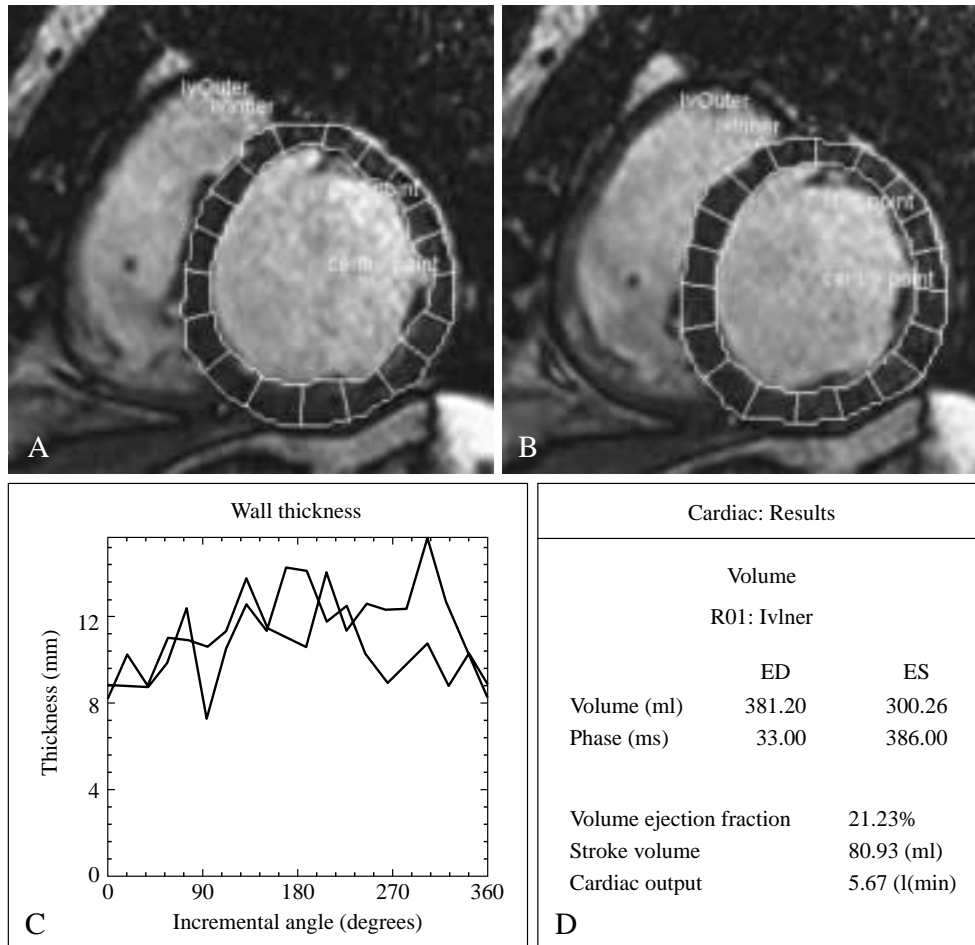


Fig. 4. — Paziente con cardiomiopatia dilatativa primitiva: Asse corto biventricolare (A, B) con il calcolo dello spessore parietale in telediastole ed in telesistole: costante sovrapposizione delle due linee (C) (telesistolica e telediastolica) a causa della ridotta contrattilità globale del miocardio (FE 21%). Si noti l'enorme aumento dei volumi ventricolari (D).

Patient with primitive dilative myocardial disease. Biventricular short axis (A, B) with wall thickness values in telesystolic and telediastolic phases. Constant overlapping of two lines due to the low myocardial contraction (VEF 21%). Note the enormous increase of ventricular volumes (D).

La tecnica SENSE permette di ridurre il numero delle codifiche di fase di un fattore (detto fattore R o fattore di Riduzione) e rilevare lo stesso spazio K mediante poche linee di lettura.

In una ricostruzione di una immagine convenzionale ottenuta con una bobina ad un singolo elemento la riduzione del numero di codifiche dello spazio K comporta una riduzione del campo di vista (FOV) con conseguente effetto della sovrapposizione del campo di vista, comunemente espresso con il termine di effetto "aliasing".

Nella ricostruzione di una immagine con tecnica SENSE e bobina multi-antenna tale conseguenza sulla formazione dell'immagine non è irreversibile. Lo stratagemma che permette di separare le singole componenti che costituiscono l'immagine artefatta e crearne una a pieno campo consiste nel poter separare i dati di codifica forniti da ciascun elemento della bobina.

In reconstructing a conventional image obtained from a single-element coil, a decrease in the number of k-space encodings results in a reduction of the field of view (FOV) which entails a fold-over effect, commonly known as aliasing.

In reconstructing an image obtained with the SENSE technique and multiple-coil acquisition this image artefact is reversible: by separating the encoding data provided by each coil element, it is possible to separate the single image components and create a full FOV image.

For SENSE image reconstruction, it is essential to have knowledge of the sensitivity of each of the coil elements; this, because each element contributes to forming the final image and the sensitivity depends on the shape and size of the object or patient whose signal is to be detected.

To obtain a sensitivity map for each coil element, reference images (full FOV, low resolution and with clearly

Per ottenere una ricostruzione di una immagine SENSE è essenziale avere una conoscenza della sensibilità di ogni elemento della bobina la quale, essendo i vari elementi combinati tra loro nel determinare l'immagine finale, è variabile a seconda della forma e della misura dell'oggetto o del paziente di cui bisogna rilevare il segnale.

Per ottenere una mappa di sensibilità per ciascun elemento della bobina, è necessario che ogni immagine di riferimento (a pieno campo e a bassa risoluzione e nettamente disomogenea nella sensibilità) venga comparata con una analoga immagine ottenuta con la bobina di quadratura (Q-Body) la cui peculiarità è quella di avere una omogeneità del segnale. Questa fase, che consiste nel creare delle mappe di riferimento della sensibilità dei vari elementi della bobina, deve essere effettuata all'inizio di ogni esame RM - SENSE. La creazione di dette mappe permette di eseguire tutte le successive acquisizioni con tempi ridotti di un fattore R.

La tecnologia SENSE può essere utilizzata anche per migliorare la risoluzione spaziale rimanendo nei tempi di scansione consueti. Oppure si può rinunciare all'aumento della risoluzione spaziale per acquisire campi di vista (FOV) più estesi [1].

Selezione dei pazienti

Presso il nostro dipartimento di Diagnostica per Immagini e Radiologia Interventistica è stata sottoposta allo studio Cardio-RM una popolazione complessiva di 30 pazienti (11 femmine, 19 maschi; età compresa tra 42 e 76 anni) inquadrabili in 4 sottogruppi:

— I gruppo: *cardiopatía ischemica*: 12 pazienti affetti da alterazioni cinetiche post-infartuali;

— II gruppo: *miocardiopatía dilatativa*: 3 pazienti con una miocardiopatía dilatativa delle quali 2 primitive (di cui una in fase di scompenso con versamento pleurico), e 1 secondaria, sviluppata nel post-partum;

— III gruppo: *valvulopatie acquisite*: 12 pazienti affetti da valvulopatia mitralica e/o aortica e più precisamente:

- stenosi aortica: 4 pazienti;
- steno-insufficienza aortica: 3 pazienti;
- insufficienza aortica: 2 pazienti;
- steno-insufficienza mitralica: 3 pazienti;

— IV gruppo: *miscellanea*: 3 pazienti, di cui uno con anomalia di Ebstein (impianto anomalo della tricuspide) e due pazienti con cisti mediastinica.

Tutti i pazienti prima di entrare in sala RM, hanno compilato un questionario che escludeva controindicazioni generiche alla RM e hanno firmato un consenso informato.

Protocollo di acquisizione

Gli esami Cardio RM sono stati condotti utilizzando una apparecchiatura 1.5-Tesla Philips Gyroscan Intera (Philips Medical System, Best, the Netherlands) equipaggiata con gradienti Master (massima ampiezza di gradiente=30mT/m, massimo slew rate=150mT/m/ms).

Per lo studio della funzionalità ventricolare non è stato necessario effettuare l'iniezione di mezzo di contrasto paramagnetico.

Le immagini sono state acquisite utilizzando una bobina

inhomogeneous sensitivity) must be compared to a similar image obtained with homogeneously sensitive body coil (Q-Body).

This phase, which consists in creating reference sensitivity maps for each of the coil elements, must be performed at the beginning of each MR-SENSE examination. By creating these maps the acquisition times of all subsequent acquisitions can be reduced by the reduction factor R.

SENSE technology may also be employed to improve spatial resolution maintaining the usual acquisition times, or, should improved spatial resolution not be a priority, to acquire larger fields of view [1].

Patient selection

A total of 30 patients underwent cardiac MRI at our Department of Diagnostic Imaging and Interventional Radiology, 11 females, 19 males; age range 42-76 years) clinically divided into 4 subgroups:

— *Group I: ischaemic heart disease: 12 patients with post-infarction kinetic alterations;*

— *Group II: dilated cardiomyopathy: 3 patients with dilative cardiomyopathy, 2 of which primary forms (one during decompensation with pleural effusion), and 1 secondary form developed in the post-partum period;*

— *Group III: acquired valve disease: 12 patients with mitral and/or aortic valve disease, namely:*

- *aortic stenosis: 4 patients;*
- *aortic stenosis-insufficiency: 3 patients;*
- *aortic insufficiency: 2 patients;*
- *mitral stenosis-insufficiency: 3 patients;*

— *Group IV: miscellaneous disorders: 3 patients, one of which with Ebstein's anomaly (anomalous tricuspid implantation) and two with mediastinal cyst.*

Before entering the MRI suite, all patients completed a questionnaire to exclude general contraindications to MRI and signed the informed consent forms.

Acquisition protocol

The cardiac MRI examinations were performed using a 1.5-Tesla Philips Gyroscan Intera magnet (Philips Medical System, Best, the Netherlands) equipped with Master gradients (maximum gradient amplitude=30mT/m, maximum slew rate=150mT/m/ms). The study of ventricular function did not require administration of paramagnetic contrast material. The images were acquired with a 5-element cardiac coil using electrocardiographic and respiratory gating.

After performing a survey-scan and a reference-scan, we acquired real-time interactive 2D sequences, which should be regarded as low-resolution dynamic localisation scans as they are used to decide where to position the scan planes for the high-resolution Cine-MRI scans [2].

The scan planes used for cardiac imaging were:

- *3-, 4- and 5-chamber long axis*
- *2-chamber long axis (atrio-ventricular)*
- *biventricular short axis.*

Subsequently multiphase multi-slice 3D data sets were acquired that provided coverage of the left ventricle with 8

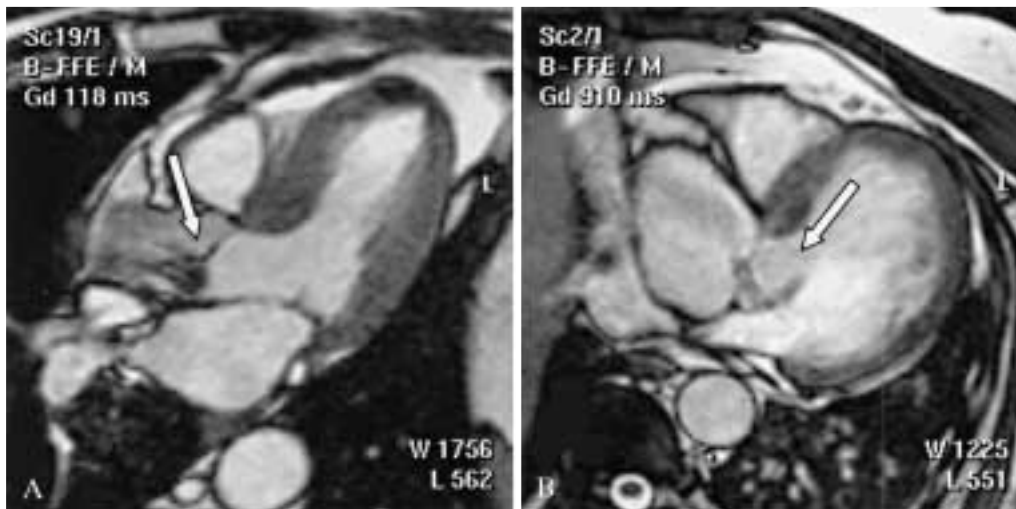


Fig. 5. — Insufficienza aortica: valutazione qualitativa in Cine RM (B-FFE/SENSE). A) Lieve insufficienza aortica documentata da un modesto signal void (freccia) diretto verso il lembo anteriore della valvola mitrale; B) insufficienza aortica medio-severa documentata da un signal void di maggiore entità (freccia), espressione di maggiore turbolenza.

Aortic insufficiency: qualitative evaluation in Cine MRI (B-FFE/SENSE) (A) light insufficiency showed by a signal void (arrow) directed to the anterior side of mitral valve; (B) middle-strong aortic insufficiency showed by a bigger signal void (arrow) expression of flow turbulence.

cardiaca a 5 elementi con sincronizzatore elettrocardiografico e respiratorio.

Dopo una scansione di centratura (Survey-scan) e una di riferimento (Reference-scan), sono state eseguite sequenze bidimensionali interattive in tempo reale che devono essere considerate delle scansioni di centratura dinamiche, a bassa risoluzione, utili per decidere dove localizzare i piani di scansione da utilizzare per le acquisizioni Cine-RM ad alta risoluzione [2].

I piani di scansione utilizzati per lo studio del cuore sono stati:

- asse lungo 3, 4 e 5 camere
- asse lungo a 2 camere (atrio-ventricolare)
- asse corto biventricolare

Successivamente è stato acquisito un pacchetto volumetrico multislice multiphase coprendo il ventricolo sinistro in 8 strati, posizionati sull'asse corto biventricolare, dall'apice alla base. Nei pazienti valvulopatici sono state effettuate anche delle acquisizioni a strato singolo multiphase per la valutazione della dinamica valvolare, nonché per la dimostrazione sia delle turbolenze di flusso delle stenosi sia dei rigurgiti delle insufficienze valvolari [3].

Le sequenze utilizzate sono state delle Gradient-Echo (GE) ultraveloci di tipo "Balanced" (B-FFE) caratterizzate da un segnale iperintenso del sangue con un ottimale contrasto parete ventricolare-sangue; tali sequenze devono essere effettuate in apnea respiratoria (breath-hold) ed hanno un tempo di acquisizione di una singola slice di circa 20 secondi, che è stato ridotto sensibilmente con l'utilizzo della nuova tecnica di codifica del segnale SENSE (SENSitivity Encoding) a circa 10 secondi.

Altre sequenze utilizzate a complemento di indagine sono state le GE Black-Blood per lo studio approfondito della super-

slices across the biventricular short axis from apex to base. Patients with valve disease were also imaged with single-slice multiphase acquisitions for assessment of valve dynamics and to demonstration of both stenotic flow turbulence and valve insufficiency regurgitations [3].

The sequences employed were Gradient-Echo (GE) "Balanced" ultra-fast (B-FFE) characterised by hyperintense blood signal with excellent contrast between ventricular wall and blood. These sequences require breath-holding and have an acquisition time of approx. 20 seconds per slice; use of the new SENSE signal encoding technique (SENSitivity Encoding) reduced this time to approx. 10 seconds.

The examination was completed by GE Black-Blood sequences for the detailed study of the endocardium and, in cases with suspected localised hypokinesia of the myocardial wall, by Echo Planar Imaging (EPI) Myocardial Tagging sequences characterised by saturation pulses that generate a spatial modulation of magnetization (SPAMM) on the images: the visual outcome is a grid with known spacing that follows the movement of the anatomical structures but remains unaltered in the regions of the myocardium that do not contract during systoles [4].

Post-processing

Post-processing was performed on a dedicated workstation EASY VISION Release 4.3 (Philips Medical Systems, Best, The Netherlands). End-systolic and end-diastolic volumes were calculated using two methods, the Simpson and single-plane area-length methods, without and with geometrical approximation, respectively. Using the Simpson method, we chose the slice with the greatest cardiac diameter of the 3D multislice multiphase acquisitions in the biven-

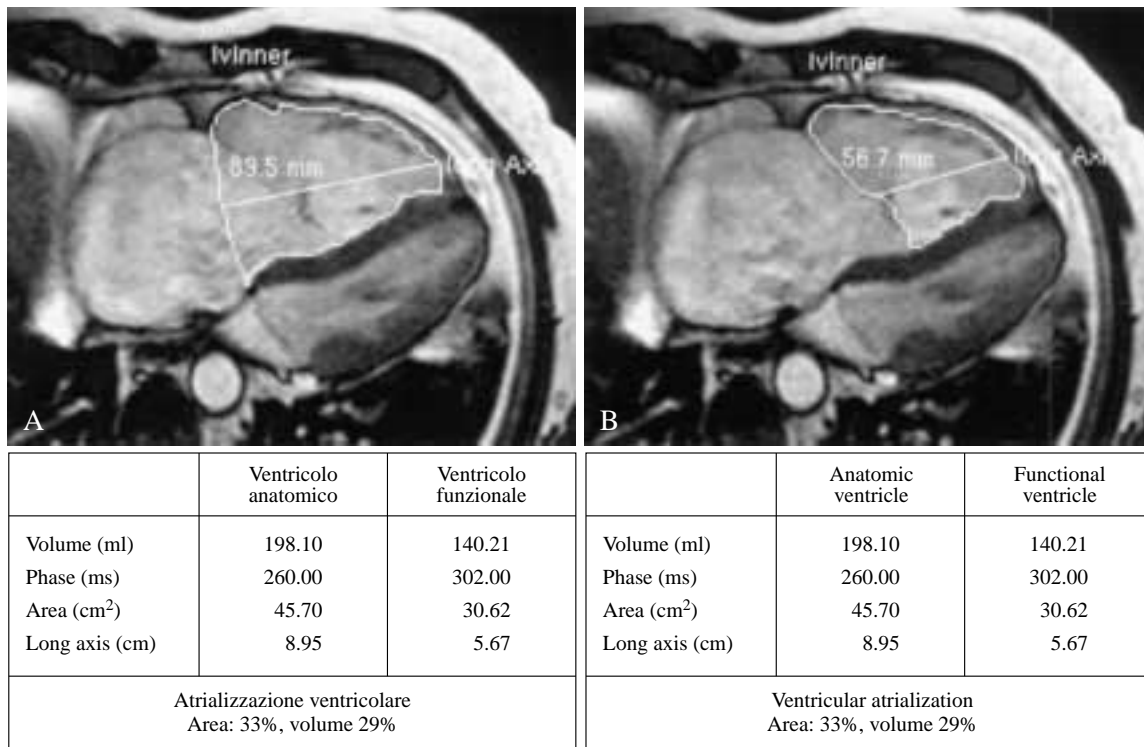


Fig. 6. — Malattia di Ebstein. Asse lungo atrio-ventricolare con sequenza B-FFE/SENSE: calcolo della atrializzazione del ventricolo destro espresso in percentuale
Ebstein's disease: A-V long axis with B-FFE/SENSE sequence: evaluation of the atrialization of right ventricle expressed in percentage.

ficie endocardica e, nei casi ove si sospettava una ipocinesia localizzata della parete miocardica, le Echo Planar Imaging (EPI) Myocardial Tagging caratterizzate da impulsi di saturazione con cui si genera una modulazione spaziale della magnetizzazione (SPAMM) sulle immagini: il risultato visivo è una griglia con spaziatura nota che segue le strutture anatomiche in movimento e che invece rimane inalterata nelle regioni di miocardio che in sistole non si contraggono [4].

Post-elaborazione

Le operazioni di post-elaborazione sono state eseguite su consolle dedicata EASY VISION Realease 4.3 (Philips Medical Systems, Best, The Netherlands). Il calcolo dei volumi telesistolici e telediastolici è stato eseguito secondo due metodi, Simpson ed area-lunghezza monopiano, rispettivamente senza e con approssimazione geometrica. Con il metodo di Simpson, dalle acquisizioni volumetriche multislice multiphase in asse corto biventricolare è stato scelto lo strato con diametro cardiaco maggiore e su questo sono state selezionate le immagini a massimo e minimo riempimento; successivamente è stato tracciato il margine endocardico (seguendo nei minimi dettagli i muscoli papillari) su ogni immagine di telesistole e telediastole per ognuna degli 8 strati che compongono l'intero ventricolo.

Il metodo area-lunghezza monopiano è meno preciso e accurato, ma molto più rapido e consiste nel tracciare i margini endocardici (trascurando i muscoli papillari) e l'asse lun-

golare lungo l'asse atrio-ventricolare, e da questa fetta di immagine abbiamo selezionato le immagini che mostrano il massimo e il minimo riempimento; successivamente le bordure endocardiche sono state tracciate (curatamente seguendo i muscoli papillari) su ogni immagine di telesistole e telediastole per ognuna degli 8 strati che compongono l'intero ventricolo.

Il metodo area-lunghezza monopiano è meno affidabile ma molto più veloce. Consiste nel tracciare le bordure endocardiche (escludendo i muscoli papillari) e l'asse lungo su un'immagine di telesistole e telediastole. Poi, sulla base del volume telediastolico (EDV) e del volume telesistolico (ESV) ottenuti in questo modo, il computer automaticamente deriva la frazione di eiezione e il flusso cardiaco (fig. 4).

Per lo studio della contrattilità segmentale basata sulle variazioni di spessore della parete durante il ciclo cardiaco, la fetta che meglio dimostra una disfunzione contrattile è stata scelta dalle acquisizioni multislice multiphase in asse corto biventricolare. Immagini di telesistole e telediastole su cui tracciare le bordure epicardiche e endocardiche (escludendo i muscoli papillari) sono state selezionate. La parete è stata divisa in segmenti utilizzando software dedicati e lo spessore della parete è stato calcolato per ogni fase del ciclo cardiaco.

I risultati dello studio della contrattilità segmentale sono stati rappresentati su un grafico cartesiano con due linee, telesistolica e telediastolica, che sono chiaramente distinte e hanno seguito un corso approssimativamente parallelo nei casi di normale contrattilità [5].

go su un'immagine in telesistole ed una in telediastole. Dai VTD e VTS così ottenuti il computer ha ricavato automaticamente la Frazione d'Eiezione e la Portata Cardiaca.

Per lo studio della contrattilità segmentaria sulla base della variazione dello spessore parietale durante il ciclo cardiaco, dalle acquisizioni volumetriche multislice multiphase in asse corto biventricolare è stato scelto lo strato che meglio documentava la presenza di un deficit contrattile. Quindi sono state selezionate le immagini in telesistole e telediastole e su queste sono stati tracciati i margini epicardici ed endocardici (trascurando i muscoli papillari). Tramite software dedicato è stato possibile suddividere la parete in segmenti e calcolarne lo spessore in ogni fase del ciclo cardiaco.

I risultati dello studio della contrattilità segmentaria sono stati visualizzati mediante un grafico cartesiano con due linee, telesistolica e telediastolica, nettamente separate e ad andamento grossolanamente parallelo in caso di normalità [5].

Per quanto riguarda la valutazione delle sequenze Cine-RM si è scelta la velocità di riproduzione più idonea allo studio della cinesi parietale globale, della dinamica dei lembi valvolari (fig. 1) e degli eventuali flussi patologici.

Risultati

La durata media di occupazione della sala RM per ottenere una valutazione quantitativa della funzionalità ventricolare è risultata di 30' circa (range 24'-38').

Non si sono osservate complicazioni e l'esame è stato sufficientemente tollerato da tutti i pazienti.

La qualità delle immagini ottenute con le sequenze B-FFE e tecnologia SENSE è risultata eccellente per l'ottimale contrasto tra il sangue e le pareti ventricolari e per l'ottimale risoluzione spaziale.

La fase di post-processing non ha mai superato i 15'; la variabilità della durata è legata all'esperienza dell'operatore; infatti nella fase più avanzata di questo studio le valutazioni quantitative sono state eseguite con maggiore velocità ed efficienza.

I gruppo: cardiopatia ischemica: la funzionalità ventricolare globale è strettamente correlata alla gravità ed estensione dell'infarto.

Le acquisizioni volumetriche cine - RM condotte sull'asse corto per lo studio dei segmenti miocardici hanno documentato in tutti i pazienti una evidente riduzione dell'escursione contrattile nella zona lesionata, permesso di localizzare i segmenti acinetici, ulteriormente confermati dalle sequenze Myocardial Tagging (fig. 2).

La valutazione quantitativa dello spessore parietale a livello dei segmenti acinetici è stata documentata in tutti i pazienti mediante una zona di contatto delle due linee telesistolica e telediastolica nel grafico "Wall thickness", espressione di una scarsa o assente variazione di spessore durante il ciclo cardiaco (fig. 3). In particolare la zona più frequentemente interessata è stata la porzione antero - settale del ventricolo sinistro.

Il valore della frazione di eiezione è variato dal 23,7% al 58%. In tutti i pazienti la portata cardiaca è risultata sostanzialmente conservata.



Fig. 7. — Cisti mediastinica congenita. Proiezione asse lungo atrio-ventricolare con sequenze Cine RM B-FFE/SENSE: la cisti mediastinica è localizzata posteriormente all'atrio in assenza di segni di compressione o di alterata cinetica dell'atrio.

Congenital mediastinic cyst. Cine MRI A-V long axis with B-FFE/SENSE sequence: the mediastinic cyst was located near the atrium in absence of compressive or kinetic alterations of the atrium.

The Cine-MRI sequences were evaluated after selecting the reproduction speed most suited for the study of overall wall kinesis, valve flap dynamics (fig. 1) and possible flow abnormalities.

Results

The mean MRI room time required for a quantitative evaluation of ventricular function was approximately 30' (range 24'-38').

There were no complications and the examination was sufficiently well tolerated by all patients.

The quality of the images obtained with the B-FFE sequences and SENSE technology proved to be excellent thanks to the optimal contrast between blood and the ventricular wall and the optimal spatial resolution.

The post-processing phase never exceeded 15'. Variations in post-processing times are related to operator experience, quantitative evaluations being performed more rapidly and efficiently in the later stages of the study.

Group I: ischaemic heart disease: global ventricular function is closely related to the severity and extent of infarction.

In all cases, the 3D Cine-MRI short-axis acquisitions for the study of myocardial segments demonstrated a clear reduction in contractile excursion in the infarcted area and allowed localisation of the akinetic segments, which were further confirmed by the Myocardial Tagging sequences (fig. 2).

The quantitative evaluation of wall thickness in the akinetic segments was documented in all patients by means of areas of contact between the two end-systolic and end-dias-

II gruppo: miocardiopatia dilatativa: in tutti e tre i casi si è osservata una riduzione della contrattilità del miocardio con valori bassi della Frazione di Eiezione (21% - 51%). I volumi telediastolico e telesistolico sono risultati enormemente aumentati nei pazienti affetti dalla forma primitiva. Nel caso di miocardiopatia secondaria i volumi risultavano lievemente aumentati in seguito ad una riduzione globale della contrattilità miocardica (FE 51%) associata a riduzione dello spessore parietale (spessore settale medio TS 9 mm; spessore settale medio TD 6 mm).

Inoltre le linee telesistolica e telediastolica, per la valutazione dello spessore del miocardio in sistole ed in diastole si sovrapponevano a livello di tutti i segmenti ventricolari studiati esclusivamente nelle forme primitive (fig. 4).

Infine, in un caso, grazie alla panoramicità della RM è stato possibile documentare la presenza di un concomitante versamento pleurico di cui non si sospettava l'esistenza prima dell'esame.

III gruppo: valvulopatie acquisite: le sequenze cine-RM B-FFE unislice-multiphase essendo caratterizzate da un segnale iperintenso del sangue hanno permesso di rilevare in tutti i casi le zone di turbolenza del flusso come vuoti di segnale (signal void). È stato possibile studiare la dinamica valvolare, nonché valutare qualitativamente l'entità della stenosi e dell'insufficienza valvolare (fig. 5).

Inoltre nei 4 casi di stenosi aortica si è documentata una marcata ipertrofia concentrica del ventricolo sinistro con riduzione del volume telesistolico. La contrattilità miocardica è risultata sempre conservata. La frazione di eiezione in tutti i casi è stata considerata nei limiti.

IV gruppo: anomalie congenite: nel paziente con anomalia di Ebstein, è stato possibile localizzare l'impianto anomalo della cuspid settale a 25 mm dal piano atrioventricolare, nonché documentare la differenza volumetrica tra il ventricolo funzionale e quello anatomico. In particolare la percentuale di atrializzazione del ventricolo, riferita ai volumi, è risultata essere del 29% (fig. 6).

Nei pazienti con cisti mediastinica è stato possibile documentare le dimensioni, la posizione della cisti rispetto alle camere cardiache e, con l'ausilio di sequenze Cine-RM, la mancata interferenza della stessa sulla cinetica parietale (fig. 7).

Discussione e conclusioni

Le indicazioni alla Cardio-RM stanno aumentando di pari passo all'aumento della risoluzione spaziale e della versatilità che tale tecnica può offrire. La Cardio-RM è oggi riconosciuta come tecnica "gold standard" nella valutazione delle dimensioni e della funzionalità sia globale che regionale del ventricolo sinistro.

Le sequenze utilizzate in questo studio sono state delle Gradient-Echo ultraveloci di tipo "Balanced" (B-FFE) effettuate in apnea respiratoria (breath-hold). Il tempo di acquisizione di una singola sequenza unislice-multiphase è di circa 20 secondi e può essere sensibilmente ridotto a circa 10 secondi con l'utilizzo della nuova tecnica di codifica del segnale SENSE.

Se si prende in considerazione il fatto che l'intero ventricolo viene studiato tramite una acquisizione volumetrica

tolica lines in the "Wall thickness" graph, an expression of poor or no changes in wall thickness during the cardiac cycle (fig. 3). In particular, the most frequently affected area was the anterior-septal region of the left ventricle.

The ejection fraction ranged from 23.7 % to 58%. In all patients cardiac output was essentially preserved.

Group II: dilated cardiomyopathy: all three cases exhibited reduced myocardial contractility with low ejection fraction (21-51%). End-diastolic and end-systolic volumes were hugely increased in patients with the primary form. In the case of secondary cardiomyopathy the volumes were slightly increased as a result of reduced global myocardial contractility (EF 51%) associated with reduced wall thickness (mean end-systolic septal thickness 9 mm; mean end-diastolic septal thickness 6 mm).

Moreover, the end-systolic and end-diastolic lines, for the evaluation of myocardial thickness during systole and diastole were found to overlap in all ventricular segments studied exclusively in the primary forms (fig. 4).

Finally, in one case, the panoramic view afforded by MRI enabled demonstration of a concurrent pleural effusion that had not been suspected prior to the examination.

Group III: acquired valve disease: the Cine-MRI B-FFE unislice-multiphase sequences characterised by a hyperintense blood signal enabled detection of flow turbulences as a signal void in all cases.

This allowed the study of valve dynamics and the qualitative assessment of the severity of stenosis and valve insufficiency (fig. 5).

Furthermore, in the 4 cases of aortic stenosis marked left-ventricle concentric hypertrophy with reduced end-systolic volume was demonstrated. Myocardial contractility was preserved and the ejection fraction was considered to be within normal limits in all cases.

Group IV: congenital anomalies: in the patient with Ebstein's anomaly, we were able to localise the anomalous implantation of the septal cuspid 25 mm from the atrioventricular plane, and document the difference in volume between the functional ventricle and the anatomical ventricle. In particular, the percentage of ventricle atrialization, in terms of volumes, was 29% (fig. 6).

In patients with mediastinal cyst we were able to document the size and position of the cyst relative to the cardiac chambers and, with the aid of the Cine-MRI sequences, the absence of interference of the cyst with wall kinetics (fig. 7).

Discussion and conclusions

The indications for Cardiac MRI are increasing with the improvements in spatial resolution and versatility that this technique can offer. Cardiac MRI is now recognised as a gold-standard technique for evaluating the size and global and regional function of the left ventricle.

The sequences used in this study were ultra-fast Gradient-Echo "Balanced" (B-FFE) sequences performed in breath-hold mode. The acquisition time for one single-slice multiphase sequence is approximately 20 seconds and this time can be reduced to about 10 seconds by using the new SENSE signal encoding technique.

composta da 8 strati in proiezione asse corto biventricolare e 5-6 strati in proiezione asse lungo 4 camere, tenendo conto delle pause respiratorie, è possibile ottenere con sequenze B-FFE con tecnica SENSE uno studio completo della volumetria e cinesi ventricolare e valvolare in circa 15 minuti con occupazione della sala RM per un tempo di circa 25 minuti. Nella nostra esperienza, inoltre, i tempi dell'esame sono stati ridotti anche dal fatto che non è stato più necessario perdere tempo nella scelta dei piani di acquisizione più idonei grazie all'introduzione di particolari sequenze a bassa risoluzione (Interactive -FFE) ottenute con tecnologia SENSE, che possono essere paragonate ad immagini di scopia in RM a bassa risoluzione ma estremamente utili per una ottimale pianificazione della geometria dell'esame.

La tecnologia SENSE ha permesso anche un notevole miglioramento della risoluzione temporale (fino a 40 frames per ciclo cardiaco); questo vantaggio, associato all'aumento della risoluzione spaziale, ha permesso studi cinetici parietali e valvolari molto precisi: oltre ai dati quantitativi, da sempre studiabili con RM, è possibile oggi ottenere anche una valutazione qualitativa delle strutture valvolari, dei movimenti dei lembi ed infine dell'entità dei "soffi", quest'ultimi visivamente apprezzabili solo nelle sequenze con sangue brillante come vuoto di segnale.

La rapida e continua espansione delle applicazioni della RM nel cuore si sta indirizzando attualmente, verso uno studio metabolico del cuore, così da offrire uno studio a 360° delle patologie cardiache. Ma l'utilizzo della Cardio-RM al posto della Ecocardiografia per uno studio esclusivamente morfologico-dinamico della funzionalità ventricolare, o della GATED - SPECT per uno studio perfusionale e funzionale, o del cateterismo cardiaco per lo studio delle coronarie non è attualmente proponibile a causa del rapporto costo/beneficio svantaggioso.

Il notevole risparmio di tempo consentito dall'uso della tecnologia SENSE è un ulteriore passo avanti verso la possibilità di eseguire studi morfo-dinamici combinati a quelli perfusionali e spettroscopici, nella stessa seduta d'esame. Questo vantaggio, probabilmente, farà della Cardio-RM un esame altamente competitivo in quanto potrà acquisire in un'unica seduta le informazioni derivanti dalla ultrasonografia, dal cateterismo cardiaco e dalla scintigrafia miocardica, spostando nettamente a suo vantaggio il rapporto costo/beneficio.

Considering that the entire left ventricle is acquired by means of the 3D acquisition of 8 slices in the biventricular short-axis plane and 5-6 slices in the 4-chamber long-axis plane, taking into account pauses for breathing, the use of B-FFE sequences with SENSE allows a complete study of ventricular and valve volume and kinesis to be carried out in approximately 15 minutes, with an MRI room time of about 25 minutes. Furthermore, our experience showed that examination times were also reduced by the fact that it was no longer necessary to waste time selecting the most suitable acquisition planes thanks to the introduction of special low-resolution sequences (Interactive -FFE) obtained with SENSE technology, which may be compared to MRI localization images that have low resolution but are very useful for the accurate planning of acquisition geometry.

Moreover, SENSE technology considerably improved temporal resolution (up to 40 frames per cardiac cycle). This advantage, associated with increased spatial resolution, enabled very accurate studies of wall and valve kinetics: in addition to quantitative data, which have always been provided by MRI, today it is also possible to obtain a qualitative evaluation of valve structures, and flap motion, and of the severity of the "murmurs" that can only be visually detected as signal voids in bright blood sequences.

The rapidly expanding field of cardiac MRI is currently moving towards the metabolic study of the heart so as to be able to provide a comprehensive study of heart disease. However, the use of cardiac MRI to replace echocardiography in the morpho-dynamic study of ventricular function, or GATED-SPECT in the study of cardiac perfusion and function, or cardiac catheterization in the study of the coronaries cannot as yet be proposed due to the unfavourable cost-benefit ratio.

The considerable savings in scan time made possible by the use of SENSE technology constitute a major step forward in the direction of combined morpho-dynamic, perfusional and spectroscopic studies within a single session. This advantage will probably render cardiac MRI a highly competitive examination in that all the information deriving from ultrasonography, cardiac catheterization and myocardial scintigraphy will become available in a single session, thereby definitely increasing the cost-benefit ratio of cardiac MRI.

Bibliografia/ References

- 1) Lauterbur PC. Image formation by induced local interactions: examples employing nuclear magnetic resonance. *Nature (London)* 242: 190-191, 1973.
- 2) Crosille P, Revel D: MR Imaging of the heart: functional imaging. *Eur Radiol* 10: 7-11, 2000.
- 3) Bornstedt A, Nagel E, Schalla S *et al.*: Multislice Dynamic imaging: complete functional cardiac MR examination within 15 seconds. *J Magn Reson Imag* 14: 300-305, 2001.
- 4) Schroeder AP, Houllind K, Pedersen EM *et al.*: Biplane long axis magnetic resonance imaging. Survey projections for rapid estimation of left ventricular mass and global function. *Scand Cardiovasc J* 35: 385-393, 2001.
- 5) Pruessman KP, Geiger M, Scheidegger MB, Boesiger P: SENSE: Sensitivity Encoding for fast MRI. *Magn Reson Med* 42: 952-962, 1999.
- 6) Dydak U, Geiger M, Pruessmann KP *et al.*: Scan time reduction in Spectroscopic Imaging using SENSE. In: *Proc ISMRM, 7th Annual Meeting, Philadelphia* 679, 1999.
- 7) Sharmeen M, Yang GZ: Investigating intrinsic myocardial mechanics: the role of MR tagging, velocity phase mapping and diffusion imaging. *J Magn Reson Imaging* 12: 873-883, 2000.
- 8) Buser PT, Aufferman W, Holt WW *et al.*: Non invasive evaluation of global left ventricular function with use of Cine Nuclear Magnetic Resonance. *J Am Coll Cardiol* 13: 1294-1300, 1989.
- 9) Schwitter J: Valvular heart disease: assessment of valve morphology and quantification using MR. *Herz* 25: 342-355, 2000.
- 10) Kramer CM: Current and future applications of cardiovascular magnetic resonance imaging. *Cardiol Rev* 8: 216-222, 2000.
- 11) Weber C, Steiner P, Sinkov R *et al.*: Correlation of 3D MR coronary angiography with selective coronary angiography: feasibility of the motion-adapted gating technique. *Eur Rad* 12: 718-726, 2002.
- 12) Panting JR, Gatehouse PD, Yang GZ *et al.*: Echo planar magnetic resonance myocardial perfusion imaging: parametric map analysis and comparison with Thallium SPECT. *J Magn Reson Imaging* 13: 192-200, 2001.
- 13) Romagnoli A, Nisini A, Gandini R: Coronarografia con TC spirale multi-strato: tecnica, metodologia d'esame. *Esperienza preliminare. Radiol Med* 103: 443-455, 2002.

*Prof. Ettore Squillaci
PTV - Policlinico Tor Vergata
Viale Oxford, 81
00133 Roma RM
Tel. 06/20902401
Fax 06/20902404
E-mail: ettoresquillaci@tiscali.it*